Transparente Prozessüberwachung von Biogasanlagen und Kläranlagen durch Einsatz moderner Mess- und Automationstechnik

von

Jürgen Wiese

an der Fakultät für Maschinenbau,
Helmut-Schmidt-Universität/
Universität der Bundeswehr Hamburg
angefertigte Habilitation

Tag der Prüfung: 17. März 2014

Inhalt

Danksagung XIII

1 Einleitung 1

1.1 Veranlassung 1

1.2 Ausgangssituation 5

1.3 Ziele der Arbeit 7

1.4 Begriffsdefinition 8

2 Entwicklungen mit Einfluss auf den Einsatz von Mess- und Automationstechnik auf Umweltanlagen 11

2.1 Allgemeine Entwicklungen und Trends 11

2.1.1 Rechtliche Anforderungen 11

2.1.2 Arbeitssicherheit 11

2.1.3 Demografischer Wandel 11

2.1.4 Fachkräftemangel 12

2.1.5 Ressourcenverknappung und Strompreisanstieg 12

2.1.6 Informationsgesellschaft 13

2.1.7 Transformation von Information in Wissen 13

2.1.8 Ressourcenschonende Produktionsmethoden 14

2.2 Siedlungswasserwirtschaftliche Entwicklungen und Trends 16

2.2.1 Höhere Umweltschutzstandards und Emissionsabgaben 16

2.2.2 Moderne Kläranlagen sind komplexer als Altanlagen 16

2.2.3 Terrorismusgefahr 17

2.2.4 Zunehmender Kostendruck in den Kommunen 17

2.2.5 Fernwirktechnik 18

2.2.6 Integrierte Ansätze für Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer 18

2.2.7 Controlling und Benchmarking 18

2.2.8 Weitestgehende Abwasserbehandlung 18

2.2.9 Nachhaltige Sanitärkonzepte 19

2.2.10 Energieautarke Kläranlagen 19

2.2.11 Multi-kriterielle Optimierungsprobleme 21

2.3 Entwicklungen in der Biogastechnik 21
2.3.1 Komplexität des Biogasprozesses 21
2.3.2 Gewerblich-industrielle Betreiber 21
2.3.3 Trennung von Anlagenbesitz und Anlagenbediener 22
2.3.4 Banken und Versicherungen 22
2.3.5 Anstieg der Dokumentationspflichten 23
2.3.6 Substratschwankungen 23
2.3.7 Verfügbarkeit von Substraten 23
2.3.8 Hohes Marktpotenzial 24
2.3.9 Controlling und Benchmarking von Biogasanlagen 24
2.3.10 Precision Farming 24
2.4 Entwicklungen bei verfahrenstechnischen Anlagen 25
2.4.1 Allgemein 25
2.4.2 SBR-Kläranlagen 26
2.4.3 Biogasanlagen 28
2.5 Zwischenfazit 30

3 Messgeräte auf Klär- und Biogasanlagen 31

3.1 Einführung 31
3.1.1 Der Mensch und die Mess- und Automationstechnik 31
3.1.2 Stand der Messtechnik 35
3.2 Entwicklungen und Trends in der Messtechnik 35
3.2.1 Chemometrie 35
3.2.2 Immer mehr Parameter können gemessen werden 35
3.2.3 Neue Messverfahren und Probenahmemethode 36
3.2.4 Entwicklung von Biosensoren 38
3.2.5 Smart Sensoren und Netzwerkfähigkeit 38
3.2.6 Vorausschauende Wartungskonzepte 39
3.2.7 Automatische Messwertvalidierung 40
3.3 Kontinuierliche Prozessmessgeräte 40
3.3.1 Ammonium 41
3.3.2 Aktivitäts- und Toxizitätstest 47
3.3.3 CSB, SAK und TOC 48

3.3.4 Druck ... 52
3.3.5 Durchfluss (Flüssigkeit) ... 54
3.3.6 Durchfluss (Gas) ... 56
3.3.7 Elektrolytische Leitfähigkeitsmessung ... 57
3.3.8 Filtrationsverfahren ... 59
3.3.9 Füllstand (Flüssigkeiten) ... 62
3.3.10 Füllstand (Gas) ... 63
3.3.11 Gasanalyse ... 64
3.3.12 Nitrat ... 67
3.3.13 Organische Säuren ... 71
3.3.14 pH-Wert ... 73
3.3.15 Phosphor ... 76
3.3.16 Redoxspannung ... 78
3.3.17 Sauerstoff (gelöst) ... 79
3.3.18 Schlammspiegel ... 80
3.3.19 Temperatur ... 82
3.3.20 Trockensubstanz und Trockenmasse ... 84
3.3.21 Vergleichsschlammvolumen (VSV) ... 90
3.3.22 Wägesysteme ... 92
3.3.23 Weitere Messungen ... 93
3.4 Energiemessgeräte ... 94
3.4.1 Elektrizität ... 94
3.4.2 Wärme ... 95
3.5 Wetterdaten ... 95
3.5.1 Wetterstationen ... 95
3.5.2 Niederschlagsmessungen ... 96
3.6 Sicherheitsmesstechnik ... 97
3.7 Videotechnik ... 97
3.7.1 Videosysteme als Sicherheitstechnik ... 97
3.7.2 Videosysteme in der Logistik ... 98
3.7.3 Videosysteme zur Prozessüberwachung und Messung ... 98
3.8 Labor- und Handmessverfahren ... 99
3.8.1 Photometrische Schnelltests ... 101

3.8.2 FOS/TAC-Bestimmung ... 105
3.8.3 Feuchtebestimmer ... 106
3.8.4 Handmessgeräte ... 106
3.8.5 Biogasertragsbestimmung ... 107
3.8.6 Wärmebildkamera ... 108
3.8.7 Methanleckdetektoren ... 108
3.8.8 Mikrobiologische Messmethoden ... 109
3.8.9 Viskosität ... 110
3.9 Qualitätssicherung von Messdaten ... 111
3.9.1 Auswahl geeigneter Messpunkte ... 111
3.9.2 Analytische Qualitätssicherung von Messgeräten ... 111
3.9.3 Gerätediagnose, Signalüberwachung und Drifterkennung ... 112
3.9.4 Kalibrierungs- und Regressionsfunktionen ... 114
3.10 Zwischenfazit ... 115

4 Automationsgeräte auf Klär- und Biogasanlagen ... 116

4.1 Einführung ... 116
4.2 Prozessebene ... 117
4.2.1 Sensoren ... 117
4.2.2 Aktoren ... 117
4.2.3 Kommunikation ... 122
4.3 Prozessleitebene ... 122
4.3.1 Steuerungs- und Regelungsebene ... 122
4.3.2 Visualisierungs- und Bedienebene ... 123
4.3.3 Steuerungs- und Regelungskonzepte ... 123
4.3.4 Downscaling ... 124
4.4 Unternehmensleitebene ... 125
4.5 Mensch-Maschine-Kommunikation ... 125
4.5.1 Allgemeine Bemerkungen ... 125
4.5.2 Intelligente Feldgeräte ... 126
4.5.3 Prozessvisualisierung ... 127
4.5.4 Mobile Endgeräte ... 127
4.5.5 Vollautomatisierung versus Rückbesinnung auf den Menschen ... 129

4.6 Sicherheitstechnik 129
4.6.1 IT-Sicherheit 129
4.6.2 Anlagensicherheit 129
4.7 Lebenszykluskosten 130
4.8 Condition Monitoring 130
4.9 Zwischenfazit 131

5 Einführung in die SBR-Technik 132

5.1 Historie der SBR-Technik 132
5.2 Reinigungsprozesse in der Abwassertechnik 133
5.3 Überblick über die SBR-Verfahrensvarianten 134
5.3.1 Das SBR-Prinzip 134
5.3.2 Grundverfahren 136
5.3.3 Sonderverfahren 138
5.3.4 Behandlung von hochbelasteten Abwässern 139
5.3.5 Anaerobverfahren 141
5.4 Systemanalyse der SBR-Technik 142
5.4.1 Vorteile 142
5.4.2 Nachteile 145
5.5 Bauteile und maschinentechnische Ausstattung 146
5.5.1 Einlaufhebewerk 147
5.5.2 Mechanische Reinigungsstufe 148
5.5.3 Vorlagebehälter und Zwischenpumpwerke 149
5.5.4 Sequencing Batch Reaktor 150
5.5.5 Mengenausgleich im Ablauf 154
5.5.6 Kläranlagenablauf 155
5.5.7 Nachgeschaltete Systme 156
5.5.8 Sonstige Bauteile 156
5.6 Bemessung von SBR-Kläranlagen 157
5.7 Simulation von SBR-Kläranlagen 158
5.8 Zwischenfazit 160

6 Mess- und Automationstechnik auf SBR-Anlagen 161

6.1 Stand der Mess- und Automationstechnik 161

6.2 Warum wird auf SBR-Anlagen so wenig gemessen?.....166

6.3 Warum sollte auf SBR-Anlagen mehr gemessen werden?.....168

6.4 Was gilt es beim Einsatz von Messtechnik zu beachten?.....169

6.5 Übersicht über übliche Mess- und Automationskonzepte 169

6.5.1 Zulauf 169

6.5.2 Beschickung der SBR-Reaktoren..... 174

6.5.3 Steuerungen und Regelungen für SB-Reaktoren 177

6.5.4 Bewirtschaftung von Speicherbehälter im Ablauf 191

6.5.5 Trübwasserbehandlung..... 192

6.5.6 Sicherheitstechnik..... 193

6.6 Forschung und Entwicklung.....193

6.6.1 Abwassercharakterisierung..... 194

6.6.2 Diagnose- und Prognosesysteme 194

6.6.3 Regelungen zur Stickstoffelimination..... 195

6.6.4 Regelungen zur Phosphorelimination 199

6.6.5 Simulationsbasierte Regelungs- und Steuerungskonzepte 199

6.7 Zwischenfazit 200

7 Von der Black-Box zur intelligenten SBR-Anlage.....201

7.1 Vorwort 201

7.2 Einleitung.....201

7.3 Die transparente SBR-Anlage.....205

7.3.1 Messtechnische Ausstattung 205

7.3.2 Erfassung aller relevanten Prozessgrößen 207

7.4 Dynamische Zyklussteuerung.....211

7.4.1 Beschreibung der Funktionsbausteine 211

7.4.2 Ergebnisse der Großtechnik 225

7.4.3 Ökologische Bewertung der Erkenntnisse..... 236

7.4.4 Ökonomische Bewertung der Erkenntnisse 238

7.4.5 Zusammenfassung der großtechnischen Erprobung 239

7.5 Prädiktive Steuerungs- und Regelungsstrategien 240
7.5.1 Vorwort 240
7.5.2 Einleitung 240
7.5.3 Prädiktive Zyklussteuerung mit multiplen CBR-Modellen 242
7.5.4 Zwischenfazit 252
7.6 Fehlerdiagnosen und Entscheidungshilfen 252
7.7 Zwischenfazit 254
8 Einführung in die Biogasanlagentechnik 255
8.1 Historie der Biogastechnik 255
8.2 Biogasprozess 257
8.3 Biogassubstrate 258
8.3.1 Nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) 258
8.3.2 Kosubstrate 259
8.3.3 Abfallstoffe und Klärschlamm 259
8.4 Vorteile von Biogas 260
8.5 Nachteile von Biogas 261
8.6 Potenzial zur Biogaserzeugung 262
8.7 Milieu- und Prozessbedingungen 265
8.7.1 Anaerobe Bedingungen 265
8.7.2 Mindestfeuchtegehalt 265
8.7.3 Substratzufuhr 265
8.7.4 Kontakt zwischen Biomasse und Bakterienmasse 265
8.7.5 Verweildauer 266
8.7.6 Temperatur 266
8.7.7 pH-Wert 267
8.7.8 Säurekapazität 267
8.7.9 Redox-Potenzial 267
8.7.10 Feststoffgehalt, Trockensubstanz und Viskosität 267
8.7.11 Faulraumbelastung 268
8.7.12 Nähr- und Spurenstoffe 268
8.7.13 Ammonium und Ammoniak 269
8.7.14 Fettsäuren 269

8.7.15 Schwefelwasserstoff, Schwermetalle und Schadstoffe 269
8.7.16 Zusammenfassung 269
8.8 Überblick über verschiedene Verfahrensvarianten 270
8.8.1 Kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren 270
8.8.2 Nassfermentation und Trockenfermentation 271
8.8.3 Reaktortypen 272
8.9 Bauteile und maschinentechnische Ausstattung.....275
8.9.1 Vorgruben und Güllebehälter 276
8.9.2 Silos für Feststoffe 278
8.9.3 Speicherbehälter 278
8.9.4 Pumpen und Pumpstationen 278
8.9.5 Feststoffdosierer 280
8.9.6 Anmischbehälter 282
8.9.7 Hygienisierungsstufe 282
8.9.8 Fermenter 283
8.9.9 Nachgärer 284
8.9.10 Gärrestbehälter 284
8.9.11 Gärrestabgabestation 285
8.9.12 Biogasentschwefelung 286
8.9.13 Biogastrocknung 287
8.9.14 Biogasnotfackel 287
8.9.15 Sickersaftschächte, Regenwassertanks o. ä. 288
8.9.16 Rohrleitungsbau 288
8.9.17 Betriebslabor 288
8.10 Biogasnutzung 289
8.10.1 Gas- und Zündstrahlmotoren sowie Mikrogasturbinen 289
8.10.2 Biomethan-Erzeugung 289
8.10.3 Brennstoffzellen 290
8.10.4 Wärmenutzung 290
8.10.5 Mikrobielle Brennstoffzellen 291
8.11 Planung und Bemessung von Biogasanlagen 292
8.11.1 Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen 292
8.11.2 Rechtsgrundlagen 293

8.11.3 Dimensionierung von Biogasanlagen ... 293
8.11.4 Simulation von Biogasanlagen ... 294
8.11.5 Ex-Zonen auf Biogasanlagen ... 298
8.11.6 Qualitätsstandards für Biogasanlagen ... 298
8.12 Zwischenfazit ... 300

9 Mess- und Automationstechnik auf Biogasanlagen ... 301

9.1 Stand der Verbreitung ... 301
9.2 Warum wird auf Biogasanlagen so wenig gemessen? ... 305
9.3 Warum sollte auf Biogasanlagen mehr Mess- und Automationstechnik zum Einsatz kommen? ... 306
9.4 Was gilt es beim Einsatz von Messtechnik zu beachten? ... 307
9.4.1 Was kann man auf Biogasanlagen online messen? ... 307
9.4.2 Was ist sinnvoll auf Biogasanlagen online zu messen? ... 308
9.4.3 Wozu können Messgeräte eingesetzt werden? ... 309
9.4.4 Was kosten Messgeräte? ... 311
9.4.5 Auswahlkriterien für Messtechnik auf Biogasanlagen ... 312
9.5 Übersicht über übliche Mess- und Automationskonzepte ... 317
9.5.1 Fütterung von Feststoffen ... 317
9.5.2 Fütterung von Flüssigstoffen ... 319
9.5.3 Rührwerke ... 320
9.5.4 Sicherheitskonzepte ... 321
9.5.5 Entschwefelung ... 323
9.5.6 Heizung ... 325
9.5.7 Hygienisierung ... 325
9.5.8 Motorensteuerung ... 325
9.5.9 Gasdruck und Gasfüllstand zur Ansteuerung der Motoren ... 325
9.5.10 Ansteuerung der Gasfackel ... 326
9.5.11 Eigenstrombedarf ... 326
9.5.12 Monitoring von Qualitätsparametern ... 327
9.5.13 Einbindung externer Experten in (teil-)automatisierte Prozesse ... 327
9.6 Forschung und Entwicklung ... 329
9.6.1 Dosier- und Rezirkulatregelungen ... 329

9.6.2 Fuzzy Control und andere regelbasierte Ansätze 330
9.6.3 Neuronale Netze 331
9.6.4 Modellbasierte Ansätze 332
9.6.5 Sonstiges 333
9.6.6 Aus der Theorie in die Praxis 334
9.6.7 Computergestützte Entwicklung 335
9.7 Wirtschaftlichkeit von EMSR-Technik auf Biogasanlagen 336
9.8 Nachrüstung von Mess- und Automationstechnik 338
9.9 Zwischenfazit 340

10 Von der Black-Box zur intelligenten Biogasanlage 341

10.1 Vom Black-Box-System zum Grey-Box-System 341
10.1.1 Anlagenbeschreibung 342
10.1.2 Mess- und Automationstechnik 343
10.1.3 Zentrale Pumpstation mit online-Messtechnik 345
10.1.4 Störungsoption – Tausch von Fermenter und Nachgärer 346
10.1.5 Feststoffdosierer für Maissilagen 347
10.1.6 Wasch- und Zerkleinerungsanlage für Rüben 349
10.1.7 Nah-Infrarot-Spektroskopie 352
10.1.8 Überwachung der Prozessstabilität 353
10.1.9 Mensch-Maschine-Interface 354
10.1.10 Benchmarking, Controlling und Stoffstrombilanzen 362
10.1.11 Simulation 365
10.2 Vom Grey-Box-System zum White-Box-System 365
10.2.1 Videoüberwachung eines Anaerobreaktors 366
10.2.2 Eingangskontrolle von flüssigen Substraten 367
10.2.3 Niveauüberwachung von Tauchmotorrührwerken 368
10.2.4 Spülautomatik für Schieber 369
10.2.5 Inbetriebnahme mittels Messtechnik 370
10.2.6 Schauglasspülung 372
10.2.7 Abschätzung der hydraulischen Verweildauer 372
10.2.8 Materialflussbilanzierung 373

10.3 Vision 1: Vom White-Box-System zum Glass-Box-System 374
10.3.1 Qualitätskontrolle der Eingangsstoffe 374
10.3.2 Qualitätskontrolle der Gärreste..... 376
10.3.3 Online-Bilanzierung der Material- und Energieströme 376
10.3.4 Die „riechende“ Biogasanlage 377
10.3.5 Die „sehende“ Biogasanlage 379
10.3.6 Mensch-Maschine-Interface 380
10.4 Vision 2: Die intelligente Biogasanlage 385
10.4.1 Das Ziel: Vom Datenfriedhof zur Wissensschatztruhe 385
10.4.2 Condition Based Maintenance und Condition Monitoring 386
10.4.3 Eine intelligente Substratdatenbank 390
10.4.4 Eine zielführende Fehlerdiagnose und Entscheidungshilfe 396
10.4.5 Eine Biogasanlage lernt von einer anderen Biogasanlage 399
10.4.6 Regelungs- und Steuerungskonzepte auf Basis künstlicher Intelligenz und modellbasierter Ansätze 401
10.5 Was muss passieren, damit die Visionen wahr werden? 402
10.5.1 Abbau von Wissensdefiziten und Vorurteilen..... 402
10.5.2 Qualitätssicherung von Messwerten 402
10.5.3 Anbindung der Messgeräte an die Automationsebene 402
10.5.4 Geeignete Einbauarmaturen..... 402
10.5.5 Robustere und wartungsarme Messgeräte 403
10.5.6 Kostendegression..... 403
10.5.7 Neue Messverfahren 403
10.5.8 Vom Labormaßstab in die Großtechnik 404
10.5.9 Bewusstsein: Eine Biogasanlage ist ein Industriebetrieb!..... 404
10.6 Rechtfertigen die Chancen den Aufwand?.....404
10.6.1 Steigerung der Wirtschaftlichkeit..... 405
10.6.2 Enormes Potenzial weltweit..... 405
10.6.3 Synergieeffekte..... 405
10.6.4 Know-how-Transfer 405
10.6.5 Künstliche Intelligenz..... 405
10.7 Zwischenfazit 406

11 Biogas- und SBR-Anlagen – Komponenten zukünftiger Bioraffineriekonzepte? 407

11.1 Einleitung 407

11.2 Biogasanlagen als Ergänzung heutiger Bioraffinerien 409

11.3 Exkurs: Chemische Verbundstandorte 411

11.4 Exkurs: Vorbehandlungs- und Desintegrationsverfahren 411

11.5 Exkurs: Neue Verfahren zur Nutzung von Synthesegas 415

11.6 Exkurs: Wasserstoffproduktion aus Biogasanlagen 415

11.7 Exkurs: Algenproduktion 416

11.8 Exkurs: SBR-Kläranlagen 418

11.9 Exkurs: Nährstoffrückgewinnung 418

11.10 Exkurs: Papierverarbeitende Industrie 420

11.11 Exkurs: Planung und Simulation 421

11.12 Zwischenfazit 423

12 Zusammenfassung und Ausblick 426

Anhang 430

Literaturverzeichnis i

Abbildungsverzeichnis lviii

Tabellenverzeichnis lxiv

Abkürzungen lxvii

Lebenslauf des Autors lxxvii

Danksagung

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay (Helmut Schmidt Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg) danke ich im besonderen Maße für die Möglichkeit, dieses Thema zu bearbeiten und für die sehr gute und inspirierende Betreuung, die er meiner Arbeit zukommen ließ. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Niemeyer (ebenfalls HSU) gilt mein Dank für die Übernahme des Korreferats und vor allem auch dafür, dass er mich ermutigt hat, an der HSU zu habilitieren. Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz (Universität Stuttgart) danke ich für die Übernahme des Korreferats, aber besonders auch dafür, dass sie mich seit der Zeit meines Studiums als Mentorin begleitet hat. Herrn Univ.-Prof. Dr. Klaus-Krüger (HSU) danke ich dafür, dass er den Prüfungsvorsitz übernommen hat.

Mein Dank gilt auch meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt, TU Kaiserslautern sowie den ehemaligen Oberingenieuren des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft, Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Antje Welker (heute FH Frankfurt am Main) und Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Hansen (heute University of Luxembourg): Während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Kaiserslautern zwischen 1997 und 2004 habe ich von ihnen als Jungingenieur und Jungwissenschaftler fachlich und menschlich stark profitiert.

Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt hat mir durch den zweiten Teil des Forschungsprojektes 17258 die Möglichkeit eröffnet, die Erkenntnisse, die ich in meiner Promotion in der Theorie erarbeitet hatte, 2004 in der Großtechnik zu verifizieren. Die Gemeinde Messel hat hierfür ihre Kläranlage zur Verfügung gestellt, die Betriebsführer dieser Anlage von der Entsorgungs-AG (heute: HSE Technik), Herr Dipl.-Ing. Stefan Herzog und Herr Stefan Kaffenberger, haben seinerzeit die Versuche konstruktiv unterstützt: Dafür vielen Dank! Weiterhin gilt mein Dank den Personen, die mich in der Zeit des Anlagenbaus begleitet, gefordert oder gefördert haben, besonders meinem Ex-Chef, Herrn Dipl.-Ing. Karsten Beyenbach, von dem ich viel gelernt habe, und meinem ehemaligen Kollegen in der Forschungsabteilung, Herrn Dr.-Ing. Olaf Kujawski, der mich bei der Entwicklung neuer Ansätze unterstützt hat. Auch zahlreichen Biogasanlagenbetreibern gilt mein Dank, besonders Karl-Heinrich und Elke Behle, Friedhelm Emde und Günter Meier.

Herr Prof. Dr.-Ing. Michael Bischoff (FH Lübeck) und Frau Dipl.-Ing. Laura Weitze (Bauhaus-Universität Weimar), die ich durch das CATE-B-Projekt kennengelernt habe, haben mich in der schwierigen Anfangsphase mit ihrem Zuspruch bestärkt, eine nebenrufliche Anfertigung dieser Arbeit zu versuchen: Dafür meinen Dank! Mein Dank gilt auch der Fa. HACH LANGE, Düsseldorf, besonders den Herren Dr.-Ing. Michael Häck, Dipl.-Ing. Jochen Simon und Ralf König, mit denen ich im letzten Jahrzehnt intensiv zusammengearbeitet habe.

Ein ganz herzlicher Dank gilt meiner Mutter, Frau Rosemarie Wiese, und meinem 2010 verstorbenen Vater, Herrn Dr. rer. nat. Friedrich-Franz Wiese, für die sehr gute Erziehung und Ausbildung, die ich genießen durfte und dafür, dass sie mich auf allen meinen Wegen – auch auf den Irrwegen und Umwegen – stets unterstützt haben. Schließlich möchte ich mich bei allen Freunden entschuldigen, die ich in den letzten Jahren aufgrund meiner beruflichen Tätigkeit und der Anfertigung dieser Arbeit (mal wieder) vernachlässigt habe.

Jürgen Wiese

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Abwasserreinigung und Biogaserzeugung gewinnen weltweit immer mehr an Bedeutung, da sie wesentliche Bestandteile der beiden Zukunftsthemen „Umweltschutz“ und „Erneuerbare Energien“ sind. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich in der Hauptsache mit der Mess- und Automationstechnik auf Kläranlagen und Biogasanlagen sowie den Möglichkeiten, die hieraus für eine Optimierung bzw. transparente Betriebs- und Prozessführung derartiger Systeme resultieren. Um dieses weite Themenfeld einzugrenzen, liegt der Fokus der Arbeit auf SBR-Kläranlagen sowie konventionellen Biogasanlagen. Dennoch gelten einige der Ausführungen auch für andere Formen von Kläranlagen (z. B. Durchlaufanlagen) oder Umweltschutzanlagen (z. B. anaerobe Bioabfallbehandlungsanlagen) bzw. sind im Falle der Ausführungen zur Messtechnik vielfach auch allgemein gültig für bioverfahrenstechnische Anlagen.

Bezüglich des Stands der Mess- und Automationstechnik für Biogasanlagen lässt sich dabei die Ausgangssituation in aller Kürze wie folgt beschreiben:

- Viele der weltweiten Biogasanlagen sind technisch auf einem niedrigen Stand und lassen sich wegen fehlender Messtechnik nur schwer analysieren und optimieren. Einige Anlagen werden zudem mangels Automation noch immer im Handbetrieb gefahren.
- Mit einer Professionalisierung der Branche werden aber zunehmend Anlagen gebaut, die bei Ausstattung und Komplexität vergleichbar mit Industrieanlagen sind.
- In diesem Zusammenhang gewinnt der Einsatz von Mess- und Automationstechnik auf Biogasanlagen für die Prozesskontrolle und -automation immer mehr an Bedeutung.

Für den Stand der Mess- und Automationstechnik auf Abwasserreinigungsanlagen und SBR-Kläranlagen im Speziellen lassen sich die folgenden Kernaussagen ableiten:

- Obwohl der Einsatz von Mess- und Automationstechnik in der Wasserwirtschaft in den letzten Jahren zugenommen hat, ist er im Vergleich zu anderen Industrien noch vielfach gering; dies gilt besonders für die in Deutschland zahlenmäßig dominanten Kläranlagen mit weniger als 10.000 Einwohnerwerten.
- Immer höhere Umweltschutzauflagen, die Einführung von Abgaben auf Emissionen sowie steigender Kostendruck führen aber dazu, dass auch in dieser Branche immer mehr Mess- und Automationstechnik zum Einsatz kommt.
- Ein Abwasserreinigungsverfahren, das aufgrund seiner hohen Leistungsfähigkeit und Flexibilität weltweit immer mehr Verbreitung findet, ist das Sequencing Batch Reactor-Verfahren (SBR), welches prädestiniert ist für den Einsatz von Automationstechnik.

Die vorliegende Arbeit soll daher anhand von Praxisbeispielen, Forschungsergebnissen und Literaturquellen einen Überblick darüber geben,

- wie man durch den Einsatz von Mess- und Automationstechnik auf diesen beiden Anlagentypen die Vorteile der jeweiligen Verfahrenstechnik effektiver nutzen und
- deren Nachteile und Schwächen soweit wie möglich mindern kann,
- um damit die Prozesse unter ökologischen und ökonomischen Aspekten zu optimieren.

Obwohl beide Anlagentypen verfahrenstechnische Unterschiede aufweisen und unterschiedliche Zielrichtungen verfolgen, so gibt es dennoch einige Gemeinsamkeiten die es rechtfertigen, diese Systeme im Rahmen dieser Abhandlung gemeinsam zu betrachten:

- Historisch gesehen gehen die Ursprünge der modernen Biogaserzeugung auch auf die Abwasserreinigung zurück. So wurden bereits seit den 1920er Jahre in Faultürmen von Kläranlagen nicht nur Klärschlamm vergoren, sondern auch mit der Zugabe anderer organischer Reststoffe experimentiert. Erst in jüngerer Zeit besinnt man sich in der Siedlungswasserwirtschaft auf diese Wurzeln zurück und wird wieder in diesem Bereich aktiv. D. h. zahlreiche Ingenieure der Abwasserreinigung haben sich in den letzten Jahren zu „Grenzgängern“ entwickelt und sind sowohl im Bereich der Abwasserreinigung als auch der Biogaserzeugung aus Bioabfällen, Wirtschaftsdüngern und Nachwachsenden Rohstoffen tätig. Damit bringen diese Fachleute auch einen anderen Blickwinkel (auch bezüglich des Einsatzes von Mess- und Automationstechnik) in die Biogasbranche ein.
- Der Einsatz von Mess- und Automationstechnik hat in der Abwassertechnik in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen; in der Biogastechnik steckt der Einsatz von Mess- und Automationstechnik jedoch noch in den Kinderschuhen. Es zeigt sich aber, dass die Entwicklung in diesen beiden Branchen zwar mit einem zeitlichen Versatz erfolgt, aber vom Prinzip her die Biogastechnik eine ähnliche Entwicklung durchmacht wie vormals die Abwassertechnik. Dies bedeutet, dass die Biogastechnik beim Einsatz von Mess- und Automationstechnik von der Erfahrungen der Abwassertechnik profitieren kann. Dies gilt nicht nur für den Einsatz von Messgeräten und die Implementierung von Steuer- und Regelkonzepten, sondern auch den Methodiken zur Qualitätssicherung von Messdaten.
- Die Natur sorgt dafür, dass Konzentrationen und Mengen der Eingangsstoffe sowohl bei Biogasanlagen als auch SBR-Kläranlagen oft erheblichen Schwankungen unterliegen. In Einzelfällen können hieraus sowohl hohe Spitzenbelastungen als auch Zeiten der Unterlast resultieren. Mit dieser großen Bandbreite an unterschiedlichen Belastungssituationen müssen sowohl die Anlagentechnik als auch die Mikroorganismen fertig werden. Hier kann Mess- und Automationstechnik unterstützend eingreifen.
- Sowohl Biogasanlagen als auch SBR-Kläranlagen sind keine neuen Entwicklungen: Die Ursprünge der ersten technischen Nutzung dieser Verfahren liegen bereits in der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts; die Wurzeln sogar früher. Das sich beide Verfahren über lange Zeit nicht durchsetzen konnten, hat verschiedene Ursachen. Eine gemeinsame Ursache ist aber, dass sowohl die Maschinentechnik als auch die Mess- und Automationstechnik lange Zeit nicht ausreichend zuverlässig und leistungsfähig waren, um diese Verfahren effektiv nutzen zu können. Dies hat sich im letzten Jahrzehnt grundlegend geändert und mit dazu beigetragen, dass beide Verfahrenstypen nun weltweit Verbreitung finden.
- Auch wenn die Bemessungskriterien für Biogasanlagen und SBR-Kläranlagen grundsätzlich unterschiedlich sind, ist beiden Verfahren gemeinsam, dass deren Dimensionierung bis heute meist statisch anhand ausgesuchter Lastfälle erfolgt. Der spätere Betrieb ist aber höchst dynamisch, sodass bei der statischen Bemessung in der Regel gewisse Sicherheiten berücksichtigt werden. Dieses unter anderem aus dem Bauwesen stammende Sicherheitsdenken setzt sich meist in der Praxis fort, sodass der Betrieb der Anlagen oft recht statisch erfolgt (z. B. über feste, zeitbasierte Schrittkettensteuerungen). Dies führt im täglichen Betrieb dazu, dass teilweise (erhebliche) Reserven vorhanden sind,

die sich nur durch Einsatz von Mess- und Automationstechnik für Optimierungszwecke effektiv nutzen lassen.

- Bei beiden Verfahren kam bisher überwiegend einfache Mess- und Automationstechnik zum Einsatz. Langsam setzt sich jedoch die Erkenntnis durch, dass sich durch Einsatz umfangreicher und moderner Mess- und Automationstechnik die Prozesse nicht nur stabil kontrollieren, sondern auch optimieren bzw. Systemschwächen reduzieren lassen.
- Beim SBR-Verfahren finden alle Reinigungsprozesse in einem einzigen Reaktor zeitlich nacheinander ablaufend statt. Mit Ausnahme der mechanischen Vorreinigung (Rechen und Sandfang) sind daher SB-Reaktoren nur in Ausnahmefällen weitere Reinigungsstufen vor- oder nachgeschaltet. Ähnlich verhält sich die Situation bei modernen Biogasanlagen. Auch wenn einige Anlagen über vorgeschaltete Hydrolysestufen verfügen, so finden in der Mehrzahl der heute gebauten Biogasanlagen alle vier Schritte der Biogaserzeugung simultan in einem Reaktor statt. Das Prinzip „Alles in einem Reaktor“ klingt auf den ersten Blick einfach: Tatsächlich stellt dies jedoch eine Herausforderung dar, da ein optimaler Abwasserreinigungs-/Biogaserzeugungsprozess auch die Einstellung optimaler Prozessbedingungen erforderlich macht. Dies ist umso schwieriger, da die einzelnen, zum Teil parallel ablaufenden chemischen, physikalischen und biologischen Prozesse unterschiedliche Anforderungen an die Milieu- und Prozessbedingungen stellen. Nicht selten müssen daher im Betrieb auch Kompromisse eingegangen werden.
- Das SBR-Verfahren ist ein diskontinuierliches Verfahren. Hieraus resultiert, dass bei einem kontinuierlichen Betrieb, wie in der Abwasserreinigung meist erforderlich, Speicherbehälter vor- und ggf. nachgeschaltet werden müssen. Diese Behälter müssen entsprechend bewirtschaftet werden, um hydraulische und stoffliche Belastungsschwankungen speichern bzw. ausgleichen zu können. Bei Biogasanlagen verhält es sich im gewissen Umfang ähnlich: Selten erfolgt eine kontinuierliche Beschickung der Reaktoren, sodass meist die für die Biogaserzeugung erforderlichen flüssigen oder festen Substraten diskontinuierlich zugegeben werden. D. h. auch hier müssen Speicherbehälter vorgehalten und bewirtschaftet werden.
- Die diskontinuierliche Zugabe von Abwasser bzw. die diskontinuierliche Zugabe von Substraten für die Biogaserzeugung erfordert nach Möglichkeit angepasste Beschickungsstrategien, um die Mikroorganismen nicht zu überfordern. Wünschenswert ist dabei nicht nur eine Erfassung der Volumen- und Mengenströme, sondern auch deren Zusammensetzung, um hieraus wichtige Prozessgrößen (z. B. Frachten) ableiten zu können.
- Auch wenn in kommunalen Kläranlagen überwiegend aerobe und anoxische Prozesse stattfinden, so spielen Anaerobprozesse auch dort eine wichtige Rolle: Hier werden sie aber nicht zur Biogaserzeugung eingesetzt, sondern für eine erhöhte biologische Phosphorfixierung. Bei großen SBR-Anlagen kann zudem der Klärschlamm anaerob stabilisiert werden, sodass Klärgas entsteht. Ferner gibt es auch erste Applikationen, bei denen die SBR-Technik in der Anaerobtechnik zum Einsatz kommt: Dies gilt nicht nur für die Biogasproduktion aus organischen Reststoffen, sondern auch die Behandlung von Abwässern aus Biogasanlagen oder Bioraffinerien mit Hilfe von SBR-basierten Kläranlagen. Weiterhin werden SBR-Anlagen auch schon getestet, um mit Hilfe vorgeschalteter anaerober Hydrolysereaktoren fermentativ Biopolymere zu erzeugen.
- Weiterhin ist vorstellbar (z. B. für Entwicklungsländer), dass dezentrale Verfahren zur Abwasserbehandlung mit Biogasanlagen kombiniert (ggf. in diese integriert) werden.

- SBR-Verfahren sind auch sehr gut für eine gewerblich-industriellen Abwasserreinigung geeignet. Da immer mehr Firmen erkennen, dass die von ihnen produzierten organischen Reststoffe keine Abfälle sind, die teuer entsorgt werden müssen, sondern durch Einsatz der Anaerobtechnik zu Wertstoffen werden, aus denen man Strom und Wärme erzeugen kann, gewinnt auch die Biogaserzeugung in Gewerbe- und Industriebetrieben an Bedeutung. Es gibt daher erste Beispiele, bei denen SBR-Verfahren zur Abwasserreinigung mit Kofermente-Biogasanlagen kombiniert werden, um sowohl im Hinblick auf eine effiziente Abwasserreinigung als auch bezüglich einer energetischen Nutzung der festen und flüssigen Reststoffe optimale Lösungen anbieten zu können. Weiterhin gibt es SBR-Kläranlagen und daraus abgeleitete Sonderverfahren, die zur anaeroben Reinigung von gewerblich-industriellen Abwässern eingesetzt werden.
- Sowohl bei Abwasser als auch Belebtschlamm bzw. sowohl bei Biogassubstraten als auch dem Fermenterinhalt handelt es sich oft um inhomogene Vielstoffgemische, die sich schwierig verarbeiten und analysieren lassen. So sind darin Schmutzstoffe (z. B. Fette) enthalten, die kurze Reinigungsintervalle für die Messgeräte erforderlich machen. Weiterhin enthaltene Grobstoffe bzw. zopfende und verstopfende Inhaltsstoffe (z. B. Haare, Hygieneartikel) können nicht nur Maschinen (z. B. Rührwerke) und Armaturen (z. B. Schieber) in ihrer Funktion beeinträchtigen, sondern auch kurze Reinigungsintervalle für Messgeräte zur Folge haben. Ein weiteres Problem stellen Störstoffe dar, da diese zu Querempfindlichkeiten von Messgeräten (z. B. ionenselektive Elektroden) führen können. Weiterhin können Schadstoffe einen erheblichen Einfluss auf die Alterung von Sensoren haben: Ein bekanntes Beispiel stellt die Vergiftung von pH-Elektroden infolge Schwefelwasserstoff dar. Schließlich gibt es sowohl auf Biogasanlagen als auch auf Kläranlagen Bereiche, in denen explosionsfähige Atmosphären auftreten können; die in diesen Ex-Zonen eingesetzte Technik muss über entsprechenden Ex-Schutz verfügen. Diese Anforderungen haben dazu geführt, dass die eingesetzte Mess-, Automations-, Maschinen- und Bautechnik bei beiden Verfahren ähnlich sind bzw. zahlreiche Komponenten in beiden Systemen zum Einsatz kommen, wie etwa Messgeräte, Pumpen oder Rührwerke.
- In beiden Segmenten führt ein zunehmend komplexes Umfeld dazu, dass auch die Betriebsführung immer schwieriger wird. Auch wenn sich diese Spannungsfelder in einigen Punkten unterscheiden, so ist ihnen gemeinsam, dass es sich um ähnliche multi-kriterielle Probleme mit teilweise widersprüchlichen Optimierungszielen handelt. Nach Auffassung des Autors kann nur die Mess- und Automationstechnik einen wirtschaftlichen Schlüssel zur Lösung darstellen, wobei auch hier die infrage kommenden Ansätze bei Biogas- und Kläranlagen ähnlich sind.
- Von Großanlagen einmal abgesehen, verfügen die wenigstens Biogas- und SBR-Kläranlagen über Betriebsingenieure, Meister oder Techniker, die in der Lage sind, die Vielzahl möglicher Prozessinformationen zuverlässig zu interpretieren. Hieraus resultiert in beiden Bereichen ein erhebliches Potenzial für einfache, aber dennoch effiziente Formen der Mensch-Maschine-Kommunikation und der Systemdiagnose. Aus Sicht des Autors sind diese Defizite einer der Gründe dafür, dass der Einsatz von Mess- und Automationstechnik auf kleinen und mittleren Biogas- und Kläranlagen noch immer schleppend verläuft.
- Einige Messgrößen sind in beiden Fällen wichtig zur Prozessüberwachung und -kontrolle, wie zum Beispiel pH, Redox, elektrolytische Leitfähigkeit oder NH_4-N, sodass oft die gleichen Messgeräte auf Kläranlagen und Biogasanlagen zum Einsatz kommen.

- Für beide Verfahrenstypen findet man umfangreiche Fachliteratur. Es ist jedoch auffällig, dass auch in den Standardwerken die Ausführungen bezüglich des Einsatzes von Mess- und Automationstechnik knapp gehalten sind oder oft ganz fehlen.
- Letztlich haben die zuvor beschriebenen Gemeinsamkeiten auch dazu geführt, dass zahlreiche Anlagenbau- und Automatisierungsfirmen in beiden Feldern, d. h. sowohl im Bau von (SBR-)Kläranlagen als auch Biogasanlagen tätig sind.
- Im Kapitel 11 wird zudem gezeigt, dass sowohl SBR-Kläranlagen als auch Biogasanlagen ein elementarer Bestandteil von zukünftigen Bioraffineriekonzepten sein könnten, woraus auch interessante Kombinationsmöglichkeiten resultieren.

1.2 Ausgangssituation

Bezüglich der SBR-Verfahrenstechnik lassen sich die wesentlichen Randbedingungen und treibenden Kräfte wie folgt zusammenfassen:

- Die SBR-Technik ist ein leistungsfähiges Reinigungsverfahren, dessen Stärken effektiv nur durch den Einsatz von Mess- und Automationstechnik genutzt und dessen Schwächen durch EMSR-Technik merklich reduziert werden können.
- Das SBR-Verfahren gewinnt weltweit zunehmend an Bedeutung. Aufgrund der einfachen Erweiterbarkeit kommt das Verfahren auch in Regionen zum Einsatz, wo hohe Wachstumsraten bei Bevölkerung, Gewerbe und Industrie auftreten.
- Es werden in den letzten Jahren auch größere SBR-Kläranlagen gebaut, bei denen die Kosten für Messtechnik im Vergleich zu den Gesamtinvestitionskosten und -betriebskosten an Bedeutung verlieren. Umso mehr steigt auch der wirtschaftliche Anreiz, durch Mess- und Automationsgeräte Prozesse zu optimieren (z. B. Energieeinsparung).
- Das SBR-Prinzip („Alles in einem Reaktor!“) klingt zunächst einfach und leicht verständlich. Hieraus resultiert jedoch de facto eine theoretisch unbegrenzte Anzahl von Betriebsweisen (z. B. Anzahl, Dauer und Kombination verschiedener Reinigungsschritte).
- Immissionsorientierte Ansätze lassen Systemgrenzen (z. B. Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer) allmählich verschwinden bzw. fördern anlagenweite oder gar Systemgrenzen überschreitende Betriebsführungskonzepte (z. B. integrale Steuerung und Regelung von Kanalnetz und Kläranlage in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Leistungsfähigkeit).
- Auf SBR-Anlagen finden nach wie vor meist nur einfache Ablaufsteuerungen (z. B. zeitbasierte Schrittketten) Anwendung, die das volle Potenzial nicht erschließen kann.
- Im letzten Jahrzehnt gab es große Fortschritte in der Mess- und Automationstechnik für Abwasseranlagen. Dies gilt besonders für die Entwicklung kostengünstiger Messtechnik zur Bestimmung der aus Gewässerschutzgründen möglichst vollständig zu eliminierenden Nährstoffe (z. B. ionenselektive NH_4/NO_3-Elektroden). Damit können nun auch kleinere Kläranlagen mit Messtechnik und den darauf aufbauenden Automationskonzepten ausgerüstet werden (z. B. Nitrifikations-/Denitrifikationsreglern).
- Es wurden in den letzten Jahren (oft im Labormaßstab) zahlreiche Forschungsprojekte zum Thema „Optimierung von SBR-Anlagen“ durchgeführt, die aber leider nur in wenigen Fällen Verbreitung in der Praxis gefunden haben. Gründe hierfür liegen auch darin, dass es beim Übergang von der Theorie in die Praxis (z. B. Upscaling) zahlreiche Hindernisse gibt, die es zu bewältigen gilt.

- Viele SBR-Anlagen, die in den letzten 15 bis 20 Jahren gebaut wurden, stehen in den nächsten Jahren für eine Erneuerung der Elektrotechnik an. Es liegt nahe, dann auf moderne leistungsfähige Mess- und Automationskonzepte auszuweichen.
- Die Probleme werden zunehmend komplex und lassen sich durch „gesunden Menschenverstand“ alleine nicht mehr lösen. Im Bereich der Abwasserreinigung kann dieses Spannungsfeld wie folgt zusammengefasst werden:
  - Sichere Einhaltung der immer strengeren Überwachungswerte im Kläranlagenablauf → Rechtssicherheit und Vermeidung von Umweltschäden
  - Weitgehende Reduzierung aller relevanten Schmutz- und Schadstoffe → maximaler Umweltschutz durch Minimierung der Emissionen
  - Maximale Verfügbarkeit der Maschinentechnik → Betriebssicherheit
  - Minimale Kosten für Energie, Betriebsstoffe und Entsorgung → Ausgabenreduzierung
  - Reduzierung der Abwasserabgabe → Reduzierung der Ausgaben
  - Optimierter Personaleinsatz → Reduzierung der Ausgaben
  - Minimierung der Investitions- und Betriebskosten bei Erweiterungen und Sanierungen → Reduzierung der Ausgaben

Bezüglich der Biogasanlagen lassen sich die wesentlichen Randbedingungen und treibenden Kräfte wie folgt zusammenfassen:

- Landwirtschaftliche Biogasanlagen (Wirtschaftsdünger, Nachwachsende Rohstoffe) und Kofermente-Biogasanlagen (z. B. Speisereste) gewinnen weltweit an Bedeutung, weil sie nicht nur einen Beitrag zum Umweltschutz leisten (z. B. Reduzierung klimaschädlicher Treibhausgase), sondern auch aufgrund steigender Preise für nicht-erneuerbare Energien eine immer wirtschaftlichere Form Erneuerbarer Energie darstellen.
- Dennoch gibt es immer wieder Phasen, in denen sich viele Anlagen nicht wirtschaftlich betreiben lassen: Ein Beispiel sind Monovergärungsanlagen auf Basis von Getreidekörnern, die in Phasen hoher Getreidepreise oft in finanzielle Schwierigkeiten geraten.
- Das Bestreben zahlreicher Betreiber, eine möglichst hohe Energieproduktion zu erreichen, führt vielfach dazu, dass Biogasanlagen (permanent oder zeitweise) in kritischen Betriebsbereichen gefahren werden. Die Grenzen zwischen gerade noch stabiler und ernsthafter biologischer Störung liegen aber oft dicht bei einander.
- Es werden mehr größere Biogasanlagen gebaut, bei denen die Kosten für Mess- und Automationstechnik relativ zu den Gesamtkosten an Bedeutung verlieren.
- Banken und Versicherungen legen zunehmend Wert auf den Einsatz von Mess- und Automationstechnik, um ihr Verlustrisiko angesichts zahlreicher ineffizienter und unwirtschaftlicher Biogasanlagen zu reduzieren.
- Steigende Energie- und Rohstoffpreise (z. B. nachwachsende Rohstoffe) bzw. sinkende Entsorgungserlöse für Kofermente zwingen Betreiber dazu, ihre Anlagen zu optimieren.
- Auf Biogasanlagen gibt es oft nur eine einfache Automation, die das volle Potenzial nicht erschließt. Viele Anlagen werden sogar nach wie vor per Hand betrieben.
- Mit einer allmählichen Reduzierung der Einspeisevergütung und/oder von Fördermitteln werden die Anlagenbetreiber neuer Anlagen stärker gezwungen, ihre Anlagen effizient und mit einer hohen Auslastung zu betreiben.

- Im letzten Jahrzehnt gab es auch in diesem Segment große Fortschritte in der Mess- und Automationstechnik: In diesem Zusammenhang sind zum Beispiel die Entwicklung kostengünstiger online-Gasanalysatoren für CH_4, CO_2 und H_2S zu nennen. Andere Messverfahren sind interessant (z. B. Nahinfrarotspektroskopie), aber werden erst in einigen Jahren in der breiten Masse wirtschaftlich einsetzbar sein.
- Der Betrieb von Biogasanlagen wird immer komplexer, da mittlerweile nicht mehr nur eine Maximierung der Stromproduktion angestrebt wird. Aufgrund der zuvor beschriebenen Randbedingungen gilt es zunehmend ein multi-kriterielles Optimierungsproblem zu lösen:
  - Maximierung der Energieproduktion → Erhöhung der Einnahmen
  - Maximierung der Durchsatzleistung → Erhöhung der Einnahmen
    → Vermeidung baulicher Erweiterungen
  - Minimierung der Roh- und Betriebshilfsstoffe → Reduzierung der Ausgaben
  - Verwendung verschiedener Eingangsstoffe → Nutzung von Marktchancen
  - Minimierung der Betriebsrisiken → hohe Anlagenverfügbarkeit und Auslastung
  - Minimierung des Eigenenergiebedarfs → Reduzierung der Ausgaben
  - Minimierung des erforderlichen Arbeitseinsatzes → Reduzierung der Ausgaben
  - Vermeidung von Havarien → keine Emissionen und Leckagen

  Die Maximierung der Lebenszykluseinnahmen bei gleichzeitiger Minimierung der Lebenszykluskosten entspricht dabei der Maximierung des Lebenszyklusgewinns. Derart komplexe Herausforderungen lassen sich auch hier nicht mehr nur alleine durch den „Einsatz des gesunden Menschenverstands“ lösen. Hierzu bedarf es dem Einsatz von umfangreicher Mess- und Automationstechnik.

1.3 Ziele der Arbeit

Mit der Arbeit werden folgende Ziele verfolgt:

- Überblick über den Stand der Mess- und Automationstechnik auf Klär- und Biogasanlagen
- Überblick über geeignete Messgeräte für Klär- und Biogasanlagen
- Diskussion der veränderten Randbedingungen und deren Auswirkungen auf Planung, Bau und Betrieb von SBR-Kläranlagen und Biogasanlagen, insbesondere vor dem Hintergrund eines verstärkten Einsatzes von Mess- und Automationstechnik.
- Systemanalyse der SBR- und Biogastechnik vor dem Hintergrund der Umsetzung von Mess- und Automationskonzepten
- Überblick über den Stand der Forschung und Entwicklung im Bereich der Mess- und Automationstechnik für Klär- und Biogasanlagen
- Übersicht über großtechnische Steuerungs- und Regelungskonzepte für SBR-Kläranlagen und Biogasanlagen
- Anwendungshinweise für die Planung, Projektierung und Implementierung von Mess- und Automationstechnik auf neuen SBR-Kläranlagen und Biogasanlagen
- Anwendungshinweise für die Erneuerung von Mess- und Automationstechnik auf bestehenden SBR-Kläranlagen und Biogasanlagen
- Wirtschaftlichkeit von Mess- und Automationskonzepten

- Übersicht über Mess- und Automationskonzepte unterschiedlicher Komplexität
- Ausblick auf künftige Mess- und Automationskonzepte für SBR-Klär- und Biogasanlagen
- Ansätze für eine Verbesserung der Mensch-Maschine-Kommunikation auf Umweltanlagen
- Ansätze für „intelligente“ SBR-Kläranlagen und Biogasanlagen

1.4 Begriffsdefinition

In der Literatur findet man verschiedene Definitionen der Begriffe „Black-Box“, „Grey-Box“, „White-Box“ und „Glass-Box“, um die unterschiedlichen Grade an Informationen über die inneren (z. B. biologische Prozesse) und äußeren Zusammenhänge (z. B. Eingangsstoffe, Reststoffe) eines Systems darzustellen. Da derartige Begriffe im weiteren Verlauf dieser Arbeit sowohl bei den Kläranlagen als auch den Biogasanlagen des Öfteren verwendet werden, definiert der Autor diese Begriffe im Kontext der weiteren Ausführungen wie folgt (Abb. 1.1):

„Black-Box“ SBR- oder Biogasanlage

Die messtechnische Ausstattung vieler SBR-Kläranlagen orientiert sich lediglich an den Vorgaben, die die einzelnen Bundesländer in Verwaltungsvorschriften o. ä. vorgeben werden. Das gleiche gilt für die Art und Anzahl der Labormessungen, die die Betreiber durchführen müssen. Insbesondere bei kleineren Kläranlagen liegen diese Anforderungen oft niedrig. So definiert die hessische Abwassereigenkontrollverordnung für eine Kläranlage der Größenklasse 2 (1.000 bis 5.000 Einwohnerwerte) folgende Anforderungen (*Hessenrecht [2010]*):

- Zulaufbeprobung: 1 x pro Monat Bestimmung von BSB_5, CSB, TN_b, N_{ges} und P_{ges}
- Abwassermenge im Ablauf: kontinuierlich
- Ablauf biologischer Reaktor: 1 x pro Tag Temperatur
- Ablaufbeprobung: 1 x pro Monat Bestimmung von NH_4-N, TN_b und N_{ges}
- Ablaufbeprobung: 1 x pro Woche Bestimmung von BSB_5, CSB und P_{ges}

Messgeräte, die darüber hinausgehen, sind meist entweder verfahrenstechnisch (z. B. Füllstand, Grenzfüllstand) oder energetisch (z. B. Sauerstoffmessung in der Belebung) bedingt. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass in derartigen Fällen nur wenige Informationen für Zwecke einer Überwachung und Optimierung zur Verfügung stehen, die zudem oft auch nur in einer geringen zeitlichen Auflösung erhoben werden.

Ähnlich sind die Randbedingungen auf vielen Biogasanlagen, auf denen oft keine oder nur wenige Betriebs- und Prozessdaten zeitnah oder gar in Echtzeit gemessen werden. Selbst einfach zu messende Größen (z. B. Durchfluss, Temperatur) werden vielfach nicht oder nicht vollständig in Echtzeit erfasst. Da sich einige Prozessparameter noch nicht oder nur zu relativ hohen Kosten online bestimmen lassen (z. B. organische Säuren), sind regelmäßige Laboranalysen in der Anaerobtechnik nach wie vor von großer Bedeutung. Dennoch kann man auch hier beobachten, dass wichtige Prozessgrößen auf vielen Anlagen nicht oder nur selten (z. B. 1 x pro Quartal) erfasst werden. Vom Blickpunkt der Mess- und Automationstechnik aus gesehen, entsprechen somit auch derartige Biogasanlagen eher dem Charakter von Blackbox-Systemen, da sich diese nur schwer analysieren und optimieren lassen.

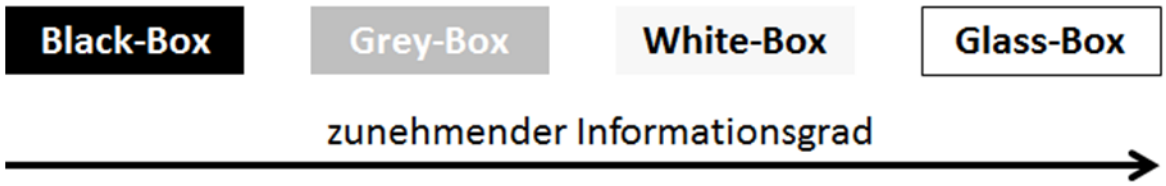


Abb. 1.1: Prinzipskizze zur Erläuterung der Abgrenzung zwischen den einzelnen Stufen der in dieser Arbeit betrachten Systeme (Definition des Autors)

„Grey Box“ SBR- oder Biogasanlage

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Black-Box-Anlagen unterscheiden sich die Grey Box-Anlagen dadurch, dass die folgenden Randbedingungen ganz oder zumindest weitgehend erfülllt sind:

1. Erfassung aller wesentlicher festen, flüssigen und gasförmigen Stoffströme
2. Messtechnik für wichtige Energie-, Betriebs- und Prozessparameter
3. (Automatische) Ableitung wichtiger Betriebs- und Steuerungsgrößen
4. Früherkennung und Vermeidung von Havarien
5. Alarmierung bei auffälligen Messwerten
6. Automatische Steuerung und Regelung der Anlage
7. Ableitung wichtiger Betriebsgrößen für Zwecke von Benchmarking und Controlling („Wie gut ist meine Anlage im Vergleich zu anderen?“)
8. Erfassung der Betriebszustände (Status, Laufzeiten, Schaltzahlen etc. für Pumpen, Rührwerke, Antriebe, Schieber etc.)
9. Moderne Störmeldekonzepte (Alarmierung über SMS, Dokumentation der Störungen etc.)

„White Box und Glass Box“ SBR- oder Biogasanlage

Eine White-Box-Anlage unterscheidet sich von Grey-Box-Anlagen dadurch, dass weitere wichtige Betriebs- und Prozessgrößen erfasst werden, wie zum Beispiel:

1. Einsatz von Videotechnik für Betriebs- und Prozessoptimierung
2. Rudimentäre Erfassung der Zusammensetzung der Eingangsstoffe
3. Ableitung von Materialflussbilanzen

Die Glass Box-Anlagen bauen darauf auf und verfügen noch über folgende Eigenschaften:

4. Erfassung der Zusammensetzung der Eingangsstoffe und Ausgangsstoffe
5. Mensch-Maschine-Interface zur reibungslosen Informationsvermittlung zwischen Bediener und Anlage
6. Integration von Dokumentations- und Informationssystemen

„Intelligente“ SBR- oder Biogasanlage

Eine „intelligente“ Anlage kann bereits auf einem Grey-Box-System aufbauen, wobei alle Ausprägungen dieser Entwicklungsstufe aber ein White-Box- oder Glass-Box-System erforderlich machen. Eine „intelligente“ Anlage ist aus Sicht des Autors mit mindestens einer, wünschenswerter Weise mehrerer, der folgenden Komponenten ausgestattet:

1. Condition Based Maintenance und Condition Monitoring
2. Bedarfsorientierte Fütterungs- und Bewirtschaftungskonzepte
3. Fehlerdiagnosesysteme
4. Anlagenweite Automationskonzepte ggf. auf Basis deterministischer Modelle und/oder Künstlicher Intelligenz

2 Entwicklungen mit Einfluss auf den Einsatz von Mess- und Automationstechnik auf Umweltanlagen

In diesem Kapitel erfolgt eine Diskussion wesentlicher Trends, die einen Einfluss auf den Einsatz und die weitere Verbreitung von Elektro-, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (EMSR-Technik) auf Kläranlagen und Biogasanlagen haben werden:

- Allgemeine Trends, die für allgemeine Weiterentwicklung unserer Gesellschaft Gültigkeit haben, welche aber mittelbar auch einen Einfluss auf den Einsatz der EMSR-Technik auf Umweltschutzanlagen haben.
- Trends in Siedlungswasserwirtschaft und der Biogasbranche, die einen direkten Einfluss auf den Einsatz von Mess- und Automationstechnik haben.
- Trends bei verfahrenstechnischen Anlagen, die im Allgemeinen, aber auch speziell im Falle der Klär- und Biogasanlagen einen unmittelbaren Einfluss haben.

Die nachfolgenden Ausführungen basieren vom Ansatz her auf *Wiese und Stahl [2005]* und *Wiese [2008A/B]*, werden aber genauer erläutert. Trotzdem kann jeder Punkt nur relativ kurz vorgestellt werden, sodass bei Bedarf auf weiterführende Literatur verwiesen wird. Trends in der Messtechnik und Automation, die einen Einfluss auf deren Einsatz auf Umweltschutzanlagen haben, werden in den Kapiteln 3 und 4 dargestellt.

2.1 Allgemeine Entwicklungen und Trends

2.1.1 Rechtliche Anforderungen

Wegen der vielerorts erheblichen Umweltbelastungen greifen viele Staaten stärker beim Umweltschutz durch, etwa durch die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten und Verschlechterungsverboten. In einigen Staaten kann auch eine schrittweise Abkehr vom Emissionsprinzip zugunsten immissionsorientierter Ansätze (z. B. *EU-WRRL [2000]*) beobachtet werden, die (regional) weitere erhebliche Investitionen im Bereich des Umweltschutzes wahrscheinlich werden lassen (siehe auch Abschnitt 2.2.1).

2.1.2 Arbeitssicherheit

Die Arbeit in bzw. auf Abwasser- und Biogasanlagen oder anderen Anlagen des Umweltschutzes ist mit potenziellen Gefahren für Leib und Leben verbunden: Das Personal ist nicht nur infektionsgefährdet, sondern kann unter Umständen auch explosiblen und toxischen Gasen ausgesetzt sein. Hinzu kommen andere Gefahren (z. B. durch Absturz, starke Wasserführung). Durch steigende Auflagen im Bereich des Arbeitsschutzes bemühen sich viele Staaten, schwere Unfälle zu vermeiden. In diesem Zusammenhang gewinnt auch der Einsatz von Mess- und Automationstechnik an Bedeutung (z. B. Detektion explosibler Gase).

2.1.3 Demografischer Wandel

Einigen Staaten steht in den nächsten Jahrzehnten ein demografischer Wandel bevor, der durch die Überalterung der Gesellschaft hervorgerufen wird. Neben den Auswirkungen auf soziale Sicherungssysteme und Arbeitsmärkte wird diese Überalterung auch Auswirkungen auf die Ver- und Entsorgungsinfrastruktur haben. So ist bereits heute in einigen struktur-

schwachen Regionen Deutschlands die Infrastruktur stark unterlastet. Die absehbare Verödung ganzer Landstriche im ländlichen Raum wird die Auslastung der vorhandenen Infrastruktur weiter vermindern. Diese Entwicklung wird nicht ohne Folgen auf Bau und Betrieb der Wasserver- und Abwasserentsorgung, aber auch der dezentralen Energieversorgung bleiben. Auch hier kann Mess- und Automationstechnik helfen, den Betrieb der Systeme effizienter zu gestalten bzw. flexibel an den jeweiligen Bedarf anzupassen.

2.1.4 Fachkräftemangel

In vielen Branchen zeichnet sich ein Fachkräftemangel ab. In einzelnen Bereichen der Umwelttechnik und der Erneuerbaren Energien herrscht bereits heute in Deutschland Fachkräftemangel. Gleichzeitig steigt die Anzahl der Klär- und Biogasanlagen weltweit stark an. Dies bedeutet, dass Expertenwissen durch steigende Löhne zukünftig nicht nur teurer wird, sondern jeder Experte auch immer mehr Anlagen verfahrenstechnisch und prozessbiologisch betreuen muss. Dies ist nur dann möglich, wenn es gelingt, die Produktivität der Experten permanent zu steigern. Es wird wichtiger werden, jedes „Bit an Information“ auf einer Anlage zu erfassen, damit der Experte schnell, sicher und ggf. auch aus der Ferne den Anlagenbetreibern Entscheidungsunterstützung und Hilfestellung liefern kann. Auch die steigenden Reisekosten spielen hierbei eine Rolle: Dienstreisen – nicht nur Flugreisen – werden wegen steigender Treibstoffpreise immer teurer. Hinzu kommt, dass Reisezeit in den meisten Fällen unproduktive Zeit ist. Auch dies wird dazu führen, dass der Mess- und Automationstechnik, besonders aber die Fernwirktechnik/Ferndiagnose – in einzelnen Industriezweigen schon Standard – auch bei den hier betrachteten Anlagen an Bedeutung gewinnen wird. Man wird zukünftig nur dann Fachkräfte auf die Reise schicken, wenn sich das Problem durch Fernwirktechnik oder Diagnose-Systeme nicht lösen lässt. In Einzelfällen (z. B. BHKW-Ferndiagnose) ist dies bereits heute schon bei neuen Biogasanlagen üblich.

2.1.5 Ressourcenverknappung und Strompreisanstieg

Die Ressourcenverknappung wird der Bioenergie, aber auch der Abwasserreinigung, einen (neuen) Schub verleihen, nicht zuletzt wegen folgender Faktoren:

Verknappung nicht erneuerbarer Energieträger: Bei den meisten der zurzeit für die Energieversorgung eingesetzten Energieträger handelt es sich um nicht erneuerbare Energiequellen, wie Kohle, Öl oder Erdgas. Die rasante wirtschaftliche Entwicklung der letzten Jahre in Brasilien, China, Indien und anderen Entwicklungs- bzw. Schwellenländer hat – trotz Energiesparmaßnahmen! – zu einem weiteren Anstieg des weltweiten Energieverbrauchs geführt, was wiederum die Nachfrage nach nicht erneuerbarer Energie weiter erhöhen wird.

Steigerung der Energiepreise: Als Folge der höheren Energienachfrage haben sich auch die Preise für die nicht erneuerbaren Energien in den letzten Jahren erhöht und zwar weitaus stärker als die allgemeine Preisentwicklung (Erdöl-Höchststände nach *Wikipedia [2013A]*: 1970: 4 US-$, 2005: 71 US-$, 2008: 147 US-$, 2012: 111 US-$). Eine dauerhafte Entspannung dieses Problems ist nicht zuletzt wegen der wiederkehrenden Unruhen im Nahen und Mittleren Osten nicht zu erwarten. Dies gilt trotz der Tatsache, dass bei der derzeitigen Lage auf dem Energiemarkt und dem technischen Fortschritt, mittlerweile auch lange Zeit uninteressante Lagerstätten (z. B. Ölsande, Tiefseelagerstätten) wirtschaftlich ausgebeutet werden können.

Förderung Erneuerbarer Energien: Angesichts der politischen Unruhen in einigen wichtigen Erdöl- und Erdgasländern, der starken Schwankung der Energiepreise und der Endlichkeit einiger wichtiger Energieträger wurden in den letzten Jahren erneuerbare Energien, wie z. B. Wasser, Sonne, Biogas und Wind, in vielen Industriestaaten finanziell gefördert. Die Atomkatastrophe von Fukushima wird diesen Trend nicht nur in Deutschland weiter vorantreiben. Als Folge zahlreicher Forschungsprojekte und wegen der rasanten technischen Entwicklung, wird zudem die Effizienz der erneuerbaren Energien gesteigert, sodass damit deren Wirtschaftlichkeit kontinuierlich besser wird; dies gilt auch für Biogas.

Nährstoffrecycling: Aber nicht nur Energie ist teurer geworden, sondern auch die wichtigsten Pflanzendünger, d. h. Kali, Stickstoff und Phosphor. Auch diesbezüglich bietet Biogas erhebliche Chancen, da der Biogasprozess mit Energiepflanzenanbau ein integrierter Nährstoffkreislauf ist (*Lens et al. [2004]*): Da Stickstoff, Kali und Phosphor nicht in das Biogas gelangen, werden sie über dem Gärrest wieder dem natürlichen Kreislauf zugeführt. Aber auch die Siedlungswasserwirtschaft kann ihren Beitrag leisten, da auch der Klärschlamm reich an Nährstoffen ist. So wird bereits heute an Recyclinganlagen zur Gewinnung von Phosphor aus Klärschlamm gearbeitet. So wurden im Rahmen der Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe“ der Bundesministerien für Bildung und Forschung bzw. Umwelt verschiedene Verfahren zum Nährstoffrecycling untersucht (*ISA RWTH [2011]*).

Strompreisanstieg: Nicht nur die hohen Rohstoffpreise führen zu steigenden Strompreisen, sondern auch die in den letzten Jahren gestiegenen Steuern (Mehrwert- und Stromsteuer) und die Erneuerbare Energie-Umlage beschleunigen diese Entwicklung. Diese rasante Entwicklung erhöht auch den Druck auf Kommunen, ihren Strombedarf zu reduzieren. Da der Energieverbrauch für den Betrieb der Kläranlage (ca. 1 % des bundesdeutschen Strombedarfs) einen erheblichen Anteil am Gesamtstromverbrauch einer Kommune (20 %) ausmacht (*UBA [2008]*), wächst das Interesse an der Energieoptimierung von Kläranlagen sprunghaft (siehe auch Abschnitt 2.2.10). Es gibt nicht nur diverse Förderprogramme, sondern auch umfangreiche Literatur mit praktischen Hinweisen (z. B. *UBA [2008]*, *DWA [2008A], DWA [2010A]*). Bei der Energieoptimierung von Kläranlagen und Biogasanlagen spielt Mess- und Automationstechnik eine zentrale Rolle.

2.1.6 Informationsgesellschaft

Angetrieben von neuen Technologien entwickelt sich die Menschheit zu einer Informationsgesellschaft. Auch das Interesse an Umweltschutz und Erneuerbaren Energien nimmt weltweit zu. Um den Informationsbedürfnis ihrer Einwohner nachzukommen, beginnen einzelne Staaten und Kommunen damit, relevante Umweltdaten (z. B. Luft- und Gewässerverschmutzung) – teilweise in Echtzeit – im Internet zugänglich zu machen. Hierfür sind aber soft- und hardwaretechnische Schnittstellen und Messgeräte erforderlich. Junge Menschen werden zudem heute von Kindesbeinen an mit modernen Kommunikationsmitteln vertraut gemacht.

2.1.7 Transformation von Information in Wissen

Der Einsatz von Messtechnik ist trotz aller Fortschritte nach wie vor mit erheblichen Kosten verbunden. Es ist daher bedauerlich, dass die so gesammelten Informationen meist in Datenfriedhöfen ungenutzt verschwinden. Jedoch wird es die zunehmende Komplexität der Optimierungsaufgaben erfordern, aus diesen Informationen Wissen und dieses Wissen allen Beteiligten zugänglich zu machen. Um dies zu realisieren, erscheinen die Methoden der

Künstlichen Intelligenz vielversprechend. Dies ist auch daher wichtig, weil es trotz aller Fortschritte in der Messtechnik und vieler interessanter neuer Messverfahren nie möglich sein wird, alle Prozessdaten (z. B. biologische Prozesse) in Echtzeit zu erfassen. In den meisten Fällen ist zudem ein Messwert, der an einer Stelle im Prozess gemessen wird, nicht repräsentativ für das Gesamtsystem. Dies hat zur Folge, dass das Betriebspersonal diese Anlagen mit ihrem Erfahrungswissen steuern muss, anstatt mit Hilfe komplexer Automationstechnik. Wenn es jedoch darum geht, Schlussfolgerungen aus historischem Wissen zu ziehen, bietet Künstliche Intelligenz interessante Technologien (z. B. Case Based Reasoning), die ihre Leistungsfähigkeit bereits in anderen Industrie- und Dienstleistungssektoren unter Beweis gestellt haben. Dennoch ist der Einsatz von Künstlicher Intelligenz von Ausnahmen (z. B. Fuzzy-Control für weitergehende Nährstoffelimination) bisher in der Umweltschutztechnik noch wenig verbreitet. Es existieren aber interessante Ansätze die belegen, dass der Einsatz der Künstlichen Intelligenz in der Siedlungswasserwirtschaft und der Biogaserzeugung für Entscheidungsunterstützende Systeme (EUS) für Planung und Betrieb, Steuerungs- und Regelungsaufgaben, Aus- und Weiterbildung etc. vielversprechend ist. Um dies zu erreichen, wird es jedoch notwendig werden,

- maschinelle Lernalgorithmen zu entwickeln, die geeignet sind, das Wissen aus der Domäne „Umweltschutzanlagen“ zu extrahieren bzw.
- muss der Einsatz von Messgeräten erweitert werden, um die fallspezifischen Datenbanken zu erweitern bzw. neue Prozessinformation zu sammeln,
- die dann im abschließenden Schritt in Wissen umgewandelt werden können.

2.1.8 Ressourcenschonende Produktionsmethoden

In den letzten Jahren sind die Kosten für den Energie- und Materialeinsatz in vielen Wirtschaftsbranchen kontinuierlich angestiegen. Besonders für kleine und mittlere Unternehmen bedeutet dies höhere Ausgaben, die sie oftmals nicht durch eine Standortverlagerung oder eine Internationalisierung der Produktion ausgleichen können. Weiterhin kann man beobachten, dass das Interesse der Bevölkerung an ökologisch erzeugten Produkten und Lebensmitteln mit wachsendem Wohlstand und Umweltbewusstsein sowie in Folge zahlreicher Lebensmittelskandale ebenfalls gestiegen ist. In diesem Zusammenhang gewinnt auch unter Marketingaspekten nicht nur ein biologischer Anbau, sondern auch eine umwelteffiziente Produktion (z. B. „CO_2-Fingerabdruck“ und spezifischer Wasserbedarf des Produktes, das sogenannte „virtuelle Wasser“[1]) an Bedeutung.

[1] siehe hierzu *Vereinigung Deutscher Gewässerschutz [2011]*

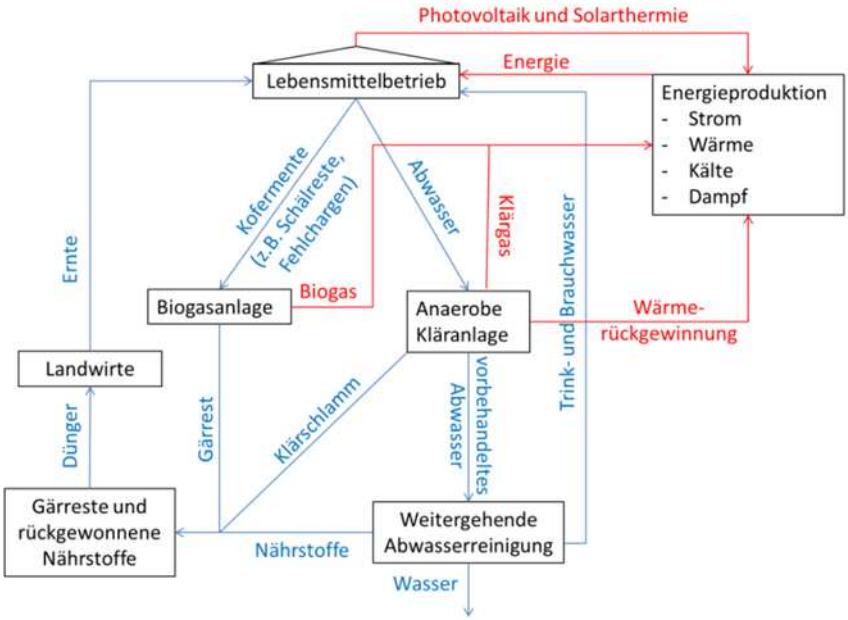


Abb. 2.1: Schema eines „energie- und nährstoffautarken“ Lebensmittelbetriebs (Quelle: Autor)

Im Zuge dieser Entwicklung entwickelt sich ein neuer, fachübergreifende Ansatz: Der produkt- und produktionsintegrierte Umweltschutz verfolgt das Ziel, innerhalb der Stoffkreisläufe einer Produktion alle vorhandenen Potenziale auszuschöpfen und dadurch nicht nur die Umwelt zu schonen, sondern auch einen erheblichen Beitrag zur Kostensenkung zu leisten. Weitergehende Informationen zu dieser Thematik können u. a. *VDI [2005]* und *Effizienz Agentur NRW [2011]* entnommen werden. Auch bezüglich der in dieser Arbeit diskutierten SBR-Kläranlagen und Biogasanlagen eröffnen derartige Handlungsansätze interessante Perspektiven: Die Abbildung 2.1 zeigt ein grobes Schema eines Lebensmittelbetriebes, der durch konsequente Nutzung der organischen Reststoffe eine weitgehende Schließung des Energie- und Nährstoffkreislaufs erreicht. Derartige Ansätze wurden bereits in Teilen umgesetzt: So berichten *LimnoTec [2007]* über die großtechnische Umsetzung eines ähnlichen Ansatzes für einen gemüseverarbeitenden Betrieb. Bei diesem Projekt wurden eine SBR-Kläranlage zur Behandlung der Produktionsabwässer, eine Biogasanlage zur Behandlung organischer Reststoffe und eine Reinstwasseraufbereitungsanlage mit Hilfe von Umkehrosmose und Ultrafiltration realisiert. Aber auch im Ausland wird bereits an derartigen Ansätzen gearbeitet: So berichtet *Jungkurth [2008]* über eine Fallstudie, bei der verschiedene Formen Erneuerbare Energie für einen genossenschaftlichen Betrieb in Chile untersucht wurden, der in der Alkoholherstellung tätig ist. Dabei stellt die Vergärung der anfallenden Schlempen eine wirtschaftliche Form der Energieerzeugung dar, da in diesem Fall nicht nur ein Bedarf an Strom und Wärme existiert, sondern auch an Kälte. Ferner wird der Einsatz von Solarthermie als eine weitere Option auf dem Weg zu einem energieautarken Lebensmittelbetrieb erachtet. Interessant ist an diesem Beispiel auch, dass sich der Einsatz dieser Technologien offenbar auch ohne staatliche Förderung rechnet. *Kirchmayr et al. [2008]* berichten über einen weitgehend energieautarken Schlachthof, der die anfallenden Schlachtabfälle in einer Biogasanlage vergärt.

2.2 Siedlungswasserwirtschaftliche Entwicklungen und Trends

In den letzten Jahren gab es auch siedlungswasserwirtschaftliche Trends, die die Verbreitung von Messtechnik auf Kläranlagen begünstigt haben.

2.2.1 Höhere Umweltschutzstandards und Emissionsabgaben

Eine wesentliche Antriebskraft für die zunehmende Nutzung von EMSR-Technik auf Kläranlagen sind die immer höheren Umweltschutzauflagen. Dies entwickelt sich zunehmend auch zu einem globalen Trend, da sich die Erkenntnis durchsetzt, dass sauberes Wasser sowohl für menschliches Leben als auch für unsere Pflanzen und Tierwelt eine essentielle Ressource ist. Einige Staaten haben bereits seit vielen Jahren Emissionsabgaben (z. B. Deutschland: Abwasserabgabe auf Grundlage des *AbwAG [1994]*) eingeführt, um finanzielle Anreize zur Reduzierung der Gewässerverschmutzung zu schaffen. Gleichzeitig bieten sie Instrumente zur Förderung von Optimierungsmaßnahmen, denn die Investitionskosten für Verbesserungsmaßnahmen, die zu einer signifikanten Reduzierung der Emissionen führen, können im bestimmten Umfang mit der Abwasserabgabe rückverrechnet werden; dies gilt auch für Maßnahmen im Bereich der Messtechnik und Automation. Die höheren Umweltstandards führen nicht nur zu umfangreichen Renaturierungsmaßnahmen von Gewässern, sondern auch zu einer Erhöhung der Anforderungen an die Reinigungsleistung. Als Folge dieser höheren Umweltauflagen müssen weltweit Kanalisationen und Kläranlagen neu gebaut bzw. grundlegend erneuert werden. Hat man lange Zeit an kleinere Kläranlagen geringe Anforderungen gestellt als an große Anlagen, so kann man seit Jahren feststellen, dass auch die Anforderungen für Anlagen mit weniger als 10.000 Einwohnerwerten (EW) gesteigert werden (Tab. 2.1). So werden in einzelnen Bundesländern (z. B. Hessen) Initiativen gestartet, um auch bei kleineren Kläranlagen im ländlichen Raum eine weitgehende Phosphorelimination zu realisieren.

Tab. 2.1: Beispiel für die Verschärfung der Überwachungswerte im Ablauf einer kleineren Kläranlage mit 4.500 Einwohnerwerten (Quelle: Autor)

Paramter	BSB_5 [mg/l]	CSB [mg/l]	NH_4-N [mg/l]	N_{ges} [mg/l]
vor 2000	25	110	keine	keine
nach 2000	9	45	3	18

2.2.2 Moderne Kläranlagen sind komplexer als Altanlagen

Die steigenden Reinigungsanforderungen machen den Neubau bzw. eine Ertüchtigung vieler Altanlagen erforderlich. Moderne Kläranlagen sind jedoch meist deutlich komplexer als ihre Vorgängersysteme, wie das Beispiel aus Tabelle 2.2 verdeutlicht. Zum einen bringt die umfangreiche Messtechnik „Licht ins Dunkel“, d. h. macht aus dem bisherigen Black-Box-System ein deutlich transparenteres System. Zum anderen erfordert die Bedienung derartiger Anlagen mehr Fachwissen. Weiterhin besteht die Gefahr, dass das Betriebspersonal mit Informationen überflutet wird. D. h. es muss zukünftig auch verstärkt in der Klärwerkstechnik darüber nachgedacht werden, wie wichtige Informationen dem Betriebspersonal effizient vermittelt und/oder wie Informationen in Wissen umgewandelt werden können.

Tab. 2.2: Beispiel einer Kläranlage mit 4.500 Einwohnerwerten vor und nach dem Umbau in 2000 ([1] die zahlreichen Aktoren sowie die fast beliebig parametrierbare Zyklussteuerung bieten eine fast unbegrenzte Anzahl von Einstellungen) (Quelle: Autor)

	KA (alt) 1975-2000	KA (neu) seit 2000
Prinzip der Kläranlage	Tropfkörper	SBR
Reinigungsleistung	Mittel	sehr hoch
Prozessleitsystem	kein Leitsystem	Stand der Technik
Aktoren	1	> 15
Sensoren, Statusmeldungen etc.	3	> 50
Komplexität	niedrig	sehr hoch
MSR-Möglichkeiten	1	∞[1]
Optimierungsmöglichkeiten	niedrig	hoch

2.2.3 Terrorismusgefahr

Seit den Terroranschlägen am 11. September 2001 ist die Angst weltweit angestiegen und auch an der Wasserwirtschaft nicht spurlos vorbeigegangen. So wird dem Schutz der Trinkwasserversorgung heute ein stärkeres Augenmerk gewidmet, da aufgrund der zentralisierten Strukturen durch die Zugabe von biologischen oder chemischen Giftstoffen (z. B. in einen Hochbehälter) ein erheblicher Schaden an der Bevölkerung angerichtet werden könnte. Auch wenn diese Befürchtungen in den USA besonders verbreitet sind, besteht auch in anderen westlichen Ländern eine reelle Gefahr: In Deutschland sorgte 2005 ein missglückter Anschlag auf die Bodensee-Wasserversorgung für bundesweites Aufsehen (*Süddeutsche Zeitung [2005]*). In diesem Zusammenhang gewinnt der Einsatz umfangreicher Mess- und Automationstechnik an Bedeutung, da intensiv an sogenannten Event Detection Systems (EDS) gearbeitet wird (*EPA [2010]*). Eine Applikation ist das „GuardianBlue – Early Warning System“ der Fa. HACH: Dieses Messsystem besteht aus einer Kombination verschiedener online-Messgeräte (Chlor, elektrolytische Leitfähigkeit, pH-Wert, Trübung, Temperatur, Druck, TOC) und einer umfangreichen Software zur automatischen Datenauswertung und Ereignisdetektion (*Hach [2011]*). Auch wenn diese Entwicklungen nicht direkt einen Einfluss auf die Abwasserreinigung und Anaerobtechnik haben, so lassen die großen finanziellen Mittel, die in die EDS-Forschung gesteckt werden, auch positive Effekte auf die Messtechnik in anderen Sektoren der Umwelttechnik erwarten (z. B. Entwicklung von Multi-Parameter-Messgeräten, leistungsfähige Chemometriesoftware).

2.2.4 Zunehmender Kostendruck in den Kommunen

Die Verschuldung der Kommunen hat ein Ausmaß erreicht (nach *DeStatis [2009]* betrug die Verschuldung der Gemeinden: 1950: 106 Mio. €, 1970: 20,5 Mrd. €, 1990: 64 Mrd. €, 2009: 114,1 Mrd. €), dass diese gezwungen sind, harte Einschnitte vorzunehmen bzw. alle Sparpotenziale im öffentlichen Haushalt konsequent zu nutzen. Zahlreiche Kläranlagenbetreiber, in der Regel Kommunen oder kommunale Zweckverbände, stehen damit immer mehr unter Druck, auch den Betrieb ihrer Anlagen in Hinblick auf Ökonomie und Ökologie zu optimieren,

ohne jedoch Abstriche bei der Betriebssicherheit machen zu dürfen. Steigende Kosten für Energie und die Klärschlammentsorgung sind daher treibende Kräfte für den zunehmenden Einsatz von Prozessmessgeräten für eine effiziente Steuerung und Regelung dieser Prozesse (siehe auch Abschnitt 2.1.5).

2.2.5 Fernwirktechnik

In weiten Teilen Deutschlands liegt die Betriebsführung der Abwasseranlagen noch immer in der Hand der Kommunen. Dies führt dazu, dass auch kleinere Kläranlagen noch meist – zumindest werktags – besetzt sind. Durch den zunehmenden Kostendruck schließen sich aber einzelne Kommunen bei der Abwasserentsorgung zusammen bzw. vergeben diesen Auftrag an externe Dienstleister. In diesem Kontext gewinnt die Automation von kleineren bis mittleren Kläranlagen an Bedeutung, sodass zunehmend mehr Anlagen mit Mess- und Automationstechnik ausgestattet und über Fernwirktechnik an größere Anlagen angeschlossen werden. So setzt zum Beispiel die Westpfälzische Ver- und Entsorgungs GmbH schon seit Jahren Videotechnik zur Überwachung ihrer zahlreichen dezentralen Kläranlagen ein (*WVE [2007]*).

2.2.6 Integrierte Ansätze für Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer

Integrierte Betriebsführungsansätze werden in den nächsten Jahren auf allen Ebenen an Bedeutung gewinnen. Dank eines zunehmend Immissions-orientierten Gewässerschutzes nimmt die Zahl von Gewässer-Monitoring-Stationen (z. B. N_{ges}, P_{ges}, pH, gelöster Sauerstoff) weltweit zu. So berichten *Kim et al. [2005A]* über den Aufbau und die Vernetzung eines landesweiten Systems von Messstellen an Gewässern und Kläranlagen in Südkorea. Aber auch auf der Ebene der Stadtentwässerung gewinnen integrierte Ansätze an Bedeutung, z. B. in Form einer belastungsabhängigen Steuerung und Regelung von Kanalnetzen und Kläranlagen. Für derart komplexe Konzepte ist der Einsatz von Mess- und Automationstechnik notwendig. Weitergehende Informationen zu dieser vielschichtigen Thematik finden sich unter *HSGSim [2008]*, *Muschalla et al. [2009]* und *Wiese [2004]*.

2.2.7 Controlling und Benchmarking

Die steigenden Anforderungen und der zunehmende Kostendruck bewirken, dass nun auch Controlling und Benchmarking, zwei Instrumente der Unternehmenssteuerung, die in weiten Teilen der Industrie seit langer Zeit verbreitet sind, in der Siedlungswasserwirtschaft an Bedeutung gewinnen, sodass Regelwerke (z. B. *DWA [2008B]*) und Arbeitshilfen (z. B. *DWA [2008C], DWA [2010B]*) entstehen. Für die Gewinnung der Eingangsdaten für diese Kennzahlensysteme sind zuverlässige Messwerte von großer Bedeutung. Dabei muss sich der Vergleich nicht nur auf betriebswirtschaftliche Kennziffern beschränken: So stellen *Schulz und Graf [2013]* ein Branchenkennzahlenmodell vor, welches von zwei DWA-Arbeitsgruppen entwickelt wurde und aus den Komponenten „Qualität“, „Sicherheit“, „Nachhaltigkeit“, „Kundenservice“, „Wirtschaftlichkeit“ und „Struktur und Technik“ besteht.

2.2.8 Weitestgehende Abwasserbehandlung

Die zunehmenden Anforderungen an den Umweltschutz führen dazu, dass die Abwasserreinigung immer komplexer und immer vollständiger wird, wie folgende Beispiele zeigen:

- Weitergehende Mischwasserbehandlung durch Einbau von Rechenanlagen in Sonderbauwerke oder durch den Einsatz von Retentionsbodenfiltern (z. B. *DWA [2005]*)

- Hygienisierung der Kläranlagenabläufe durch den Einsatz von UV-Desinfektion oder Ozonierung (z. B. *ATV [1998]*, *DIN EN 12255-14 [2004]*)
- Abwasserfiltration (z. B. *ATV [1995]*)
- Minimierung der Emissionen anthropogener Spurenstoffe (z. B. Arzneimittelrückstände) (z. B. *ATV-DVWK [2002]*, *DWA [2008D]*) durch Membrananlagen o. ä.

Auf den Bereich der Mess- und Automationstechnik können hieraus folgende Auswirkungen abgeleitet werden (Auswahl):

- Entwicklung von Messverfahren zur Detektion von Mikroschadstoffen
- Fernwirktechnische Anbindung der Sonderbauwerke in der Kanalisation

2.2.9 Nachhaltige Sanitärkonzepte

Sauberes Wasser stellt in vielen Teilen der Welt ein knappes Gut dar. Für einige Applikationen (z. B. Hotels in ariden Gebieten) stellen sogenannte nachhaltige Sanitärkonzepte eine vielversprechende Form der dezentralen Abwasserreinigung dar. Hierbei werden die einzelnen Stoffströme getrennt und nach jeweils optimalen Verfahren behandelt. Derartige Verfahren reichen von einfachen Technologien (z. B. Komposttoiletten) bis hin zu komplexen Verfahren, bei denen eine komplette Kreislaufführung (bis hin zur Trinkwassergewinnung aus Abwasser) angestrebt wird. Das Projekt „Modulaare“ der Universität Stuttgart umfasst dabei eine anaerobe Komponente (*Antakyali et al. [2008]*).

Ein weiteres Projekt „KOMPLETT“ wurde an der Technischen Universität Kaiserslautern durchgeführt (*Schmitt [2009]*). Auch im Ausland wird an derartigen Konzepten geforscht, die dabei zum Teil auch Anaerobtechnik verwenden: *Kujawa [2005]* und *Wilsenach [2005]* berichten über das niederländische Forschungsprojekt „DESAR“ auf Basis eines UASB-Reaktors. Besonders die komplexen Formen derartiger Werkzeuge setzen aber den Einsatz umfangreicher Messtechnik voraus: Man stelle sich in diesem Zusammenhang vor, welcher Image-Gau eintreten würde, wenn das Trinkwasser in einem Luxushotel mit geschlossener Kreislaufführung wegen eines Fehlers verunreinigt würde. Auch der Einsatz dieser Einheiten an entlegenen Orten, die zudem oft über kein (qualifiziertes) Vollzeit-Personal verfügen, begünstigt den Einsatz von Mess-, Automations- und Fernwirktechnik, um eine lückenlose Prozessüberwachung aus der Ferne sicherzustellen.

2.2.10 Energieautarke Kläranlagen

Die meisten zurzeit eingesetzten Abwasserreinigungsverfahren und Verfahrenskomponenten (z. B. Pumpwerke) benötigen größere Mengen an elektrischer Energie. Da Strom immer teurer wird, sind die Betreiber von Kläranlagen zunehmend bemüht, nicht nur Strom einzusparen, sondern auch nach Wegen zu suchen, um Energiepotenziale im Abwasser zu nutzen. In diesem Zusammenhang können die folgenden Tendenzen beobachtet werden:

- Rückkehr der Anaerobtechnik: Der Bau von Kläranlagen mit Anaerobreaktoren zur Klärschlammbehandlung und/oder Abwasserbehandlung gewinnt wieder an Bedeutung (*Zeeman [2011A]*). Unter anderem wird auch darüber nachgedacht, an zentralen Standorten den Klärschlamm kleinerer, benachbarter Kläranlagen zu vergären (z. B. *Schmitt und Hansen [2007]*). *McAdam et al. [2011]* regen zudem an, dass durch Vorschaltung eines

anaeroben EGSB-Reaktors vor die eigentliche Abwasserreinigungsstufe die Energiebilanz einer Kläranlage deutlich erhöht werden könnte.

- Kofermentation organischer Abfälle (z. B. *DWA [2009A]*): Durch Mitbehandlung organischer Reststoffe in den Faulbehältern kommunaler Kläranlagen soll die Klärgasproduktion bzw. die Gewinnung von Strom und Wärme für den Eigenbedarf erhöht werden.
- Energieoptimierung: Es gibt zahlreiche Ansatzpunkte zur Reduzierung des Energiebedarfs, die neben den Austausch alter gegen neue, energieeffiziente Aggregate auch die Umsetzung bedarfsorientierter Regelungskonzepte für die Belüftung vorsehen (z. B. *UBA [2008]*, *DWA [2008A], DWA [2010A]*).
- Nutzung des Energiepotenzials des Abwassers (*DWA [2009A]*): Durch den Einsatz von Wärmetauschern (z. B. im Kanal) und Wärmepumpen kann die Wärme des Abwassers für das Heizen genutzt werden. Bei Kläranlagen mit einer großen Abwassermenge und einem deutlichen Höhenunterschied zwischen Kläranlagenablauf und dem Gewässer ist auch die Nutzung der Lageenergie (z. B. Rohrturbine) möglich.
- Effiziente Energieerzeugung: Noch immer wird auf vielen Kläranlagen mit einer anaeroben Klärschlammbehandlung das Klärgas nicht zur Stromerzeugung genutzt, sondern nur zum Heizen. Weiterhin kann man beobachten, dass noch viele alte Motoren mit geringen Wirkungsgraden im Einsatz sind. Die Fortschritte im Bereich der Gasmotorentechnik (z. B. elektrische Wirkungsgrade > 40 %, Gasmotoren für Biogas/Klärgas mit einer Leistung von unter 100 kW_{el}) bieten ein erhebliches Verbesserungspotenzial.
- Photovoltaik: Auf vielen Kläranlagen finden sich Frei- und Dachflächen, die für PV-Anlagen genutzt werden können. Auch wenn der dort erzeugte Strom bei weitem nicht ausreicht, um den Strombedarf der Abwasserreinigung zu decken, so stellt auch diese Komponente einen Baustein auf dem Weg zur energieautarken Kläranlage dar.
- Vorbehandlung von Trüb-, Filtrat- und Zentratabwasser: Die interne Rückbelastung aus der Schlammbehandlung und Schlammeindickung stellt auf vielen Kläranlagen einen erheblichen Anteil der Gesamtbelastung – insbesondere der Stickstoffbelastung – dar. Neue Verfahren zur Vorbehandlung dieser Abwässer, wie die Anaerobe Ammonium-Oxidation (Anamox), die sehr viel weniger Energie benötigen als die bisherigen Behandlungswege, sind geeignet, den Energiebedarf vieler Kläranlagen nachhaltig und deutlich zu senken (*Fux et al. [2003], Siegrist et al. [2007]*).

Novak et al. [2011] berichten über zwei kommunale Kläranlagen in Österreich, die durch derartige Maßnahmen bereits energieautark arbeiten.

In diesem Zusammenhang gewinnt auch die Rückgewinnung sonstiger Ressourcen (z. B. Phosphorrecycling) und die Minimierung der Reststoffmengen (→ Reduzierung der Entsorgungskosten) an Bedeutung (siehe hierzu auch Abschnitt 2.1.5). Für den Einsatz von Mess- und Automationstechnik ist diese Entwicklung in zweierlei Hinsicht von Bedeutung:

- Veränderte Motivation für den Einsatz von Messtechnik (z. B. optimierte Klärgaserzeugung dank Mess- und Automationsechnik → kurze Amortisationsdauern)
- Es gewinnen Parameter bzw. Messgeräte an Bedeutung, die bisher nicht im Fokus der Wasserwirtschaft standen (z. B. Gasanalyse, Essigsäure)

2.2.11 Multi-kriterielle Optimierungsprobleme

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass man es in der Siedlungswasserwirtschaft zunehmend mit

- komplexen Anlagen zu tun hat, die aufgrund ihrer umfangreichen Maschinen- und Elektrotechnik immer mehr den Charakter von modernen Industrieanlagen annehmen.
- multi-kriteriellen Optimierungsproblemen zu tun hat, die sich alleine mit dem gesunden Menschenverstand nicht mehr lösen lassen (Abbildung 2.2).

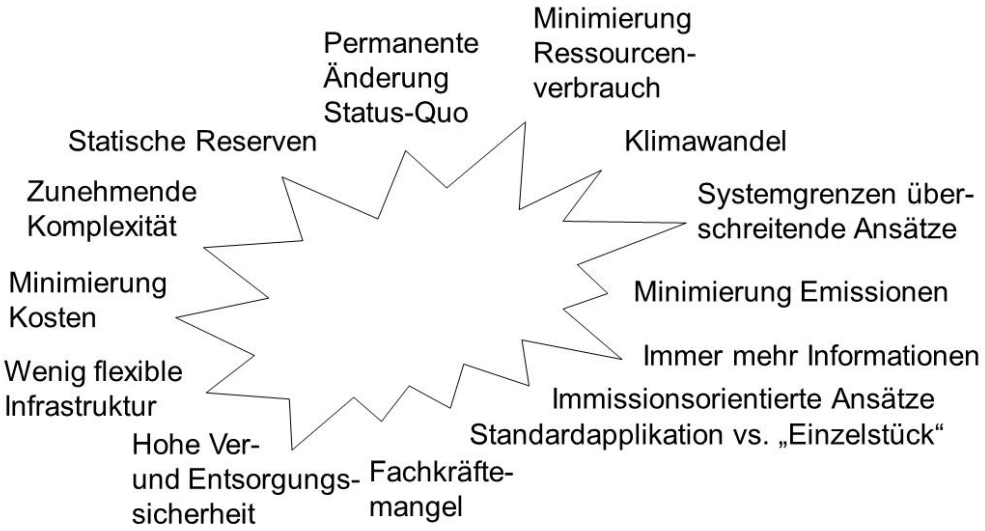


Abb. 2.2: Multi-kriterielles Spannungsfeld der modernen Siedlungswasserwirtschaft (Quelle: Autor)

2.3 Entwicklungen in der Biogastechnik

2.3.1 Komplexität des Biogasprozesses

Für die Teilschritte der Biogaserzeugung sind unterschiedliche Bakterienstämme verantwortlich. Wie viele spezialisierte Organismen reagieren auch anaerobe Bakterien sensibel auf Milieu-Änderungen, wie einer Änderung des pH-Wertes oder starken Belastungsschwankungen. Das Wachstum anaerober Mikroorganismen ist zudem relativ langsam. Im Falle einer biologischen Störung kann es daher mehrere Monate dauern, bis der Prozess wieder Vollleistung erreicht; hieraus können existenzbedrohende Situationen für den Biogasanlagenbesitzer resultieren. Je näher Biogasanlagen am Grenzbereich betrieben werden und je mehr unterschiedliche Eingangsstoffe zum Einsatz kommen, desto größer ist die Gefahr einer Störung. Dies begünstigt den Einsatz von Messgeräten zur Prozessüberwachung.

2.3.2 Gewerblich-industrielle Betreiber

In der Vergangenheit wurden Biogasanlagen überwiegend von Landwirten oder von einer Gruppe von Landwirten in Eigenregie gebaut. Bei dieser Personengruppe führt jedoch nicht jede durchgeführte Arbeit zwangsläufig zu anfallenden Kosten, da Überstundenbezahlung o. ä. unüblich ist. Bei vielen Landwirten ist daher die Neigung, Mess- und Automationstechnik einzusetzen, gering ausgebildet, da bei einer Reparatur und Wartung „kostenlose“ Manpower

zur Verfügung steht. In den letzten Jahren drängen aber mehr und mehr gewerblich-industrielle Betreiber auf den Markt, wie Energieversorger oder Entsorgungsfirmen, die in der Regel nicht nur größere Biogasanlagen bauen, sondern meist auch mehrere Anlagen ähnlichen Typs (z. B. in Form von Biogasanlagenparks) betreiben. Die Kostenstruktur dieser Betreiber ist völlig anders, da in der Regel sämtliche Kostenarten erfasst und anfallende Überstunden vergütet werden. Auch betriebswirtschaftliche Werkzeuge (z. B. Controlling und Benchmarking) sind oft fester Bestandteil der Unternehmenskultur. Diese Betreiber stehen daher dem Einsatz professioneller Mess-, Automations- und Fernwirktechnik aufgeschlossen gegenüber, da sie diese auch von ihren anderen Anlagen (z. B. Kraftwerken, Abfallbehandlungsanlagen) kennen; auch Anlagenoptimierung stellt für diese Klientel kein Fremdwort dar.

2.3.3 Trennung von Anlagenbesitz und Anlagenbediener

In den Anfangsjahren des Biogasbooms, d. h. Ende der 1990er bzw. Anfang der 2000er Jahre, waren die Bediener von Biogasanlagen meist auch ihre Besitzer. Mit dem Einstieg professioneller Investoren hat sich dies geändert: Einige Finanzinvestoren und Energieversorger übergeben die Betriebsführung ihrer Anlagen an lokale Landwirte. Hierdurch soll der Aufbau von eigenem Betriebspersonal vermieden werden, welches zudem für bestimmte Tätigkeiten zu teuer wäre. Wenn sich auch in vielen Fällen dieses Konzept bewährt hat, so wird aus der Praxis auch über negative Erfahrungen berichtet: So soll es bereits vorgekommen sein, dass der Anlagenbediener Teile der für die Biogasanlage vorgesehenen Substrate, welche sich im Eigentum des Anlagenbesitzers befand, für die Fütterung der eigenen Tiere verwendet hat. Hierdurch können erhebliche finanzielle Schäden entstehen, sodass es im Interesse der Investoren liegt, dass eine lückenlose Erfassung der Stoffströme sowohl bei der Anlieferung und Einlagerung als auch bei deren Zugabe in den Prozess erfolgt.

2.3.4 Banken und Versicherungen

Bei spezifischen Investitionskosten von zum Teil über 5.000 €/kW_{el} und hohen Preisen für Energiepflanzen liegt der Break-Even-Point von landwirtschaftlichen Biogasanlagen oft bei über 80 % Auslastung. Viele Biogasanlagen laufen daher bei hohen Substratpreisen und fehlender Möglichkeiten zur Wärmenutzung unwirtschaftlich. Besonders anfällig sind die Biogasanlagen, die wegen der verfahrenstechnischen Konzeption nur wenige Substrate (z. B. nur Getreide) vergären können. Wegen der Störanfälligkeit des Biogasprozesses und der fehlenden Messtechnik kommt es häufig zum Absturz von Biogasanlagen, mit teils dramatischen finanziellen Folgen für den Besitzer: Dies hat dazu geführt, dass in den letzten Jahren zahlreiche Biogasanlagen in finanzielle Probleme geraten sind, einige davon gingen insolvent. Hierdurch wurden Banken zunehmend sensibilisiert, da sie um ihre Kredite fürchten. Diverse Havarien (z. B. Leckagen, Explosionen) haben bewirkt, dass auch Versicherungskonzerne vorsichtig wurden. Einzelne Finanzinstitute haben sich als Konsequenz hieraus sogar aus der Finanzierung von Biogasanlagen zurückgezogen. Aber auch die Finanzinstitute, die nach wie vor im Biogassektor aktiv sind, haben die Anforderungen an die Vergabe von Krediten und Versicherungspolicen erhöht. Einzelne Finanzinstitute haben sogar Fachkräfte (z. B. Ingenieure) eingestellt, um Biogasprojekte auch verfahrenstechnisch bewerten zu können. Diese Randbedingungen haben dazu geführt, dass es von Seiten der Banken und Versicherungen gerne gesehen wird, wenn Biogasanlagen mit Mess- und Automationstechnik

ausgestattet werden, um Betriebsstörungen frühzeitig zu erkennen und damit betriebswirtschaftliche Risiken zu reduzieren.

2.3.5 Anstieg der Dokumentationspflichten

Bisher waren die behördlichen Auflagen bezüglich der Dokumentationspflichten für den Betrieb von Biogasanlagen gering (z. B. manuelles Stofftagebuch). Aufgrund diverser

- Probleme (z. B. Methan-Emissionen durch Leckagen aus Gasdächern),
- Skandale, wie z. B. die Verklappung von PFT-haltigen Industrieabfällen in organische Abfällen und Gärresten (*Taron [2010]*) und
- des *EEG [2008]* mit der Positivliste für landwirtschaftliche Kosubstrate in NawaRo-Biogasanlagen und dem *EEG [2012]* mit den Rohstoffvergütungsklassen

ist mit einer weiteren Zunahme der Dokumentationspflichten zu rechnen bzw. ist dies zum Teil bereits erfolgt. Für den Einsatz der Mess- und Automationstechnik wird dies ebenfalls Konsequenzen haben:

- Einsatz von professionellen, digitalen Betriebstagebüchern
- Lückenlose Stoffstromerfassung von der Anlieferung, über die Verarbeitungsschritte bis hin zur Abgabe und Ausbringung
- Zusammenführung aller Teilsysteme

2.3.6 Substratschwankungen

Die Qualität und besonders auch der Energiegehalt von Substraten können großen Schwankungen unterliegen, was den Betrieb einer Biogasanlage erschwert, denn eine rein gewichtsbezogene Fütterung ist kein Garant für eine stabile und konstante Gasproduktion. Dies gilt selbst dann, wenn eine Anlage nur mit einer Substratart betrieben wird.

2.3.7 Verfügbarkeit von Substraten

Die Biogastechnik hat nicht nur in Deutschland in den letzten Jahren einen Boom erlebt. Jeder Boom kann aber auch negative Folgen mit sich bringen, denn der wirtschaftliche Erfolg einer Biogasanlage steht und fällt mit der Verfügbarkeit von bezahlbaren Substraten. Insbesondere die Biogasanlagen, die keine langfristigen Lieferverträge abgeschlossen haben, können zu bestimmten Zeiten dadurch in Bedrängnis geraten. Davon sind nicht nur Biogasanlagen mit nachwachsenden Rohstoffen bei steigenden Preisen für Agrarprodukte betroffen, sondern auch viele Kofermente-Biogasanlagen, da die steigende Anzahl von Anlagen dazu geführt hat, dass die Entsorgungserlöse für die organischen Abfällen (zeitweise) stark gefallen sind. Für Biogasanlagen, die in den nächsten Jahren in Betrieb gehen, wird die Lage noch schwieriger werden, da der Kampf um die guten Substrate begonnen hat und immer mehr Substratlieferanten erkennen, dass sie keine Abfallstoffe produzieren für deren Entsorgung bezahlt werden muss, sondern Energierohstoffe für die sie oft sogar Geld verlangen können. Größere Lieferanten organischer Reststoffe gehen sogar dazu über, eigene Biogasanlagen zu errichten. In Zeiten knapper Rohstoffe müssen Biogasanlagen möglichst wirtschaftlich betrieben werden, um nicht Verluste zu generieren.

2.3.8 Hohes Marktpotenzial

Das weltweite Biogaspotenzial ist gewaltig! Für den Einsatz der Mess- und Automationstechnik bedeutet dies, dass zwar keine großen Stückzahlen an Messgeräten pro Biogasanlage verkauft werden können, aber dennoch der Markt für Mess- und Automationsfirmen interessant wird, da das weltweite Potenzial sehr hoch ist. Es ist zu erwarten, dass angesichts dieses Potenzials langfristig weltweit mehr mittlere und größere Biogasanlagen existieren werden als Kläranlagen. Der Biogasmarkt war für die großen Hersteller von Mess- und Automationstechnik lange Zeit aufgrund der geringen Größen wenig interessant. Das enorme Potenzial führt jetzt aber zu einem Umdenken bei vielen Firmen.

2.3.9 Controlling und Benchmarking von Biogasanlagen

Methoden zum Controlling und Benchmarking („Wie gut ist meine Biogasanlage im Vergleich zu anderen Anlagen?“) kommen bisher im Biogassektor kaum zum Einsatz. Erste Ansätze wurden jedoch schon auf den Weg gebracht (*HMUIRV [2006], VDI [2008], FNR [2009]*). Um Fehlallokationen und Ineffizienzen zu vermeiden, dürfte aber zukünftig ein aktiveres Asset Management an Bedeutung gewinnen, um die Effizienz der Biogasanlagen zu erhöhen und damit Kosten zu sparen. Aufgrund der spezifischen Randbedingungen dürften dabei vor allem die folgenden Punkte im Mittelpunkt des zukünftigen Interesses stehen:

- Identifikation und Beseitigung von Ineffizienzen durch Aufbau und Einsatz eines technischen und betriebswirtschaftlichen Benchmarking und Controlling.
- Konzentration auf Kernkompetenzen, Poolen von Know-how, Geräten (z. B. Laborgeräten) etc. und ggf. Auslagerung defizitärer Geschäfts- und Betriebsführungsprozesse.
- Knowledge, Data und Workflow Management: Anaerobsysteme stellen komplexe Systeme dar; die Entwicklung verlief zudem in den letzten Jahren rasant. Eine wesentliche Voraussetzung für ein erfolgreiches Asset Management ist daher der Aufbau eines Knowledge, Data und Workflow Managements. Hierbei gilt es das Wissen aller am Biogasprozess beteiligten Personen in Form von digitalen Dienst- und Betriebsanweisungen (z. B. Dokumentenmanagementsysteme), vernetzten Datenbanken und sonstiger betriebswirtschaftlicher und technischer Geschäfts- und Betriebsführungstools (z. B. Decision Making Tools oder Decision Support Systems) zu bündeln.

Ein zuverlässiges Controlling und Benchmarking setzt aber auch das Vorhandensein eines effektiven Messkonzeptes voraus. Entsprechende Werkzeuge – möglichst EDV-gestützt – müssen in den nächsten Jahren entwickelt werden.

2.3.10 Precision Farming

In den letzten Jahren gewinnt das Precision Farming (Präzisionsackerbau), d. h. ein landwirtschaftliches Verfahrensprinzip zur ortsdifferenzierten und zielgerichteten Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen langsam an Bedeutung (*Rösch et al. [2006]*). Hierdurch sollen unter anderem Unterschiede der Böden und der Ertragskraft innerhalb eines Schlags besser berücksichtigt werden. Um dies zu erreichen, wird die Position der jeweiligen Bearbeitungsmaschine (z. B. Maishäcksler, Mähdrescher, Güllefass) auf dem jeweiligen Flurstück erfasst; diese Fahrzeuge dokumentieren wiederum die Betriebskennwerte (z. B. bei einem Mähdrescher: Ertrag je Flächeneinheit, TM-Gehalt des geernteten Getreides) direkt an Ort und Stelle. Die hieraus resultierenden Daten können etwa zur Ertragskartierung, Pflanzenschutz-

und Düngemittelkartierung, Nachweisen gegenüber Aufsichtsbehörden et cetera verwendet werden. Es bietet sich an, die Biogasanlage als fester Bestandteil der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette in das Precision Farming zu integrieren, z. B. durch Erfassung der angelieferten Substrate (Gewicht, TM-Gehalt, Energiegehalt) bzw. der abgegebenen Gärrestreste (Gewicht, Düngewert).

2.4 Entwicklungen bei verfahrenstechnischen Anlagen

2.4.1 Allgemein

2.4.1.1 Virtuelle Anlagenprojektierung

Klär- und Biogasanlagen werden immer komplexer, wodurch das Risiko für Anlagenbaufirmen ebenfalls ansteigt. Hinzu kommt, dass die Projektierung komplexer Anlagen kostenintensiv sein kann. Eine virtuelle Anlagenprojektierung, wie sie bei Großanlagen (z. B. Kraftwerksbau (*Aveva [2008]*) bereits zum Einsatz kommt, dürfte mittel- bis langfristig auch im Bereich der Abwasser- und Erneuerbare-Energien-Anlagen an Bedeutung gewinnen. Unter virtueller Projektierung versteht man dabei den kombinierten und integrierten Einsatz von Prozess- und Auslegungsplanung, Material- und Energieflusssimulation, 3D-Visualisierung und/oder 3D-Animation (*Ritter und Tix [2005]*). Hilfreich ist hierbei, dass auch die Simulationswerkzeuge im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft und Biogastechnik Fortschritte machen: so sind mittlerweile diverse aerobe (z. B. ASM 1, ASM 3) und anaerobe Abbaumodelle (z. B. ADM 1) vorhanden (z. B. *IWA [2000], IWA [2002]*. Weiterhin vorteilhaft ist, dass Schnittstellen von der Simulations- zur Automatisierungsebene entwickelt werden, sodass am Computer entwickelte Mess-, Steuerungs- und Regelungskonzepte ohne Reibungsverluste in die Praxis übertragen werden können (z. B. *Ogurek et al. [2009]*); dies dürfte zu einer erheblichen Reduzierung der Engineering-Kosten führen. *Tschepetzki et al. [2011]* berichten über ein in der Entwicklung befindliches Simulationsprogramm „BAPSI“, das zur Projektierung und Simulation verfahrenstechnischer Anlagen entwickelt wird. Hierbei soll auch ein Unterprogramm für Biogasanlagen („BAPSI - Biogas Tool“) entwickelt werden; eine Erprobung anhand einer realen Biogasanlage erfolgte bereits. Die steigende Komplexität der Anlagentechnik führt aber auch dazu, dass immer mehr verschiedene Fachdisziplinen miteinander zusammenarbeiten müssen, woraus eine Vielzahl von Schnittstellen resultieren, welche wiederum zu Schnittstellenproblemen und Ineffizienzen bei der Planung und Entwicklung führen können. *Ulrich [2009]* hat daher einen methodischen Ansatz für die Planung verfahrenstechnischer Anlagen entwickelt und diesen anhand zweier Praxisbeispiele – eine Misch-/Destillationsanlage und eine Abfallverwertungsanlage – erprobt: Aufbauend auf der *VDI/VDE-Richtlinie 3682 [2005] „Formalisierte Prozessbeschreibungen“* entwickelte *Ulrich* ein grafisches Beschreibungsmittel für eine durchgängige Prozessbeschreibung, die von allen Gewerken verwendet und verstanden wird.

2.4.1.2 Von der Einzel- zur Mehrwertlösung

Eine Ursache dafür, dass Messgeräte in einigen Bereichen (z. B. kleine Kläranlagen) nach wie vor selten eingesetzt werden, kann damit begründet werden, dass die potenziellen Möglichkeiten nicht voll ausgeschöpft werden. Vielfach werden die Geräte zum Beispiel nur zur Überwachung eingesetzt. Daher muss bei allen Beteiligten ein Umdenken einsetzen:

- Es muss klarer gezeigt werden, dass Mess- und Automationstechnik komplexe Probleme effizient lösen kann.

- Messgeräte und Automation müssen stärker im Verbund gesehen und Synergieeffekte stärker unterstrichen werden.
- In einigen Fällen kann ein Messgerät für verschiedene Automationskonzepte eingesetzt werden (z. B. bei der SBR-Technologie), sodass hieraus Synergieeffekte resultieren.
- Insbesondere bei kleinen Anlagen muss neben dem Messgerät zukünftig auch das dazugehörige Automationskonzept verkauft werden.

2.4.1.3 Interdisziplinäre Aufgaben

Die zunehmende Komplexität der Aufgabenstellungen führt dazu, dass immer mehr verschiedene Fachdisziplinen in die Lösung eingebunden werden müssen. War zum Beispiel früher die Siedlungswasserwirtschaft eine klassische Ingenieursdisziplin (am Anfang dominierten die Bauingenieure), stießen im weiteren Verlauf auch Naturwissenschaftler (z. B. Biologen) zu dieser Disziplin. Zukünftig kommen vielleicht sogar noch ganz andere Berufsgruppen zum Einsatz. Es gilt das Know-how dieser Experten untereinander zu vernetzen und effektiv zu nutzen; hierfür ist der Einsatz moderner EDV unabdingbar. Gravierende Umweltprobleme und knappe finanzielle Ressourcen in vielen Teilen der Welt führen zudem dazu, dass die Systemgrenzen zwischen der Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Biogastechnik wieder verschwimmen. So ist es etwa vorstellbar, dass in Entwicklungsländern Anlagen zum Einsatz kommen, die die Funktion von Kläranlagen, Abfallanlagen und NawaRo-Biogasanlagen kombinieren. Auch bei der Mess- und Automationstechnik muss daher über die Grenzen der Wasserwirtschaft hinaus geblickt werden, nicht zuletzt um Synergien bei der Entwicklung komplexer Messtechnik zu nutzen.

2.4.2 SBR-Kläranlagen

Es spricht vieles dafür, dass der Einsatz von Mess- und Automationstechnik bzw. die Optimierung von SBR-Kläranlagen in den nächsten Jahren an Bedeutung gewinnen wird. Einige dieser Faktoren werden nachfolgend kurz beschrieben[2].

2.4.2.1 Weltweite Verbreitung

Es existieren einige Tausend SBR-Kläranlagen weltweit. Um 2000 waren bereits allein in Nordamerika ca. 1.300 SBR-Kläranlagen in Betrieb (davon 20 % Industrieanlagen), die bis zu 40.000 m^3/d Abwasser behandeln; der überwiegende Teil (ca. 80 % aller kommunalen Anlagen) davon sind aber kleine Anlagen, die weniger als 4.000 m^3/d behandeln (*IWA [2001]*). Erst Mitte der 1980er Jahre wurde die Technik in Deutschland „wiederentdeckt“ (*Wilderer und Irvine [1984]*). Insbesondere seit Mitte der 1990er Jahre werden in Deutschland verstärkt SBR-Anlagen gebaut, sodass hier bereits um 2000 mehr als 140 kommunale SBR-Kläranlagen und ca. 50 Industrieanlagen existierten. Die größte dieser Anlagen ist eine auf 140.000 EW ausgelegte CAST-Kläranlage (KA Neubrandenburg), jedoch dominieren auch in Deutschland mit 75 % kleinere Anlagen mit Anschlussgrößen von < 5.000 EW (*IWA [2001]*).

2.4.2.2 Zunehmend größere Anlagen

In den letzten Jahren werden aber auch zunehmend größere Anlagen mit deutlich mehr als 10.000 EW gebaut. Dies zeigt einmal mehr, dass bei großtechnisch eingeführten und bewährten Abwasserreinigungsverfahren vor allem die Wirtschaftlichkeit entscheidet, welche

[2] Nachfolgende Passagen entstammen zum Teil aus *Wiese [2004]*.

Größenordnung sich mit einem bestimmten Verfahren realisieren lässt. Diese größeren SBR-Anlagen sind bereits meist mit moderner Prozessleit- und Messtechnik ausgestattet.

2.4.2.3 Leichte Erweiterbarkeit

Ein weiterer Vorteil der SBR-Technik ist die relativ leichte Erweiterbarkeit. Bei Modernisierungen alter Anlagen können zudem auch bestehende Anlagenkomponenten weitergenutzt werden (z. B. als Vorlage- oder Ausgleichsbecken). Dieser Vorteil fällt vor allem im ländlichen Raum ins Gewicht, wo weltweit oft noch Nachholbedarf an Kläranlagen besteht. Aber auch in den schnell wachsenden Schwellenländern ist die SBR-Technologie aufgrund der leichten Erweiterbarkeit eine interessante Option.

2.4.2.4 Hohe Flexibilität

Aus verfahrenstechnischer Sicht sprechen einige Vorteile für das SBR-Verfahren: die hohe Flexibilität, die nahezu idealen Bedingungen für die Trennung des belebten Schlamms vom gereinigten Abwasser nach Ende des eigentlichen Reinigungsprozesses und die Fähigkeit, Belastungsschwankungen zu verkraften. Zahlreiche SBR-Kläranlagen besitzen zudem beträchtliche Reserven, weil in Deutschland einige Vorteile dieser Technologie noch immer nicht adäquat in den technischen Regelwerken berücksichtigt werden, was zwangsläufig zu einer Überdimensionierung führt. Von der zunehmenden Verbreitung der EMSR-Technik im Abwassersektor sollten nicht zuletzt die SBR-Kläranlagen profitieren, deren hohe Flexibilität erst durch den Einsatz von EMSR-Technik im vollen Umfang genutzt werden kann.

2.4.2.5 Beseitigung von Vorurteilen durch Praxiserkenntnisse

Lange Zeit herrschten in der Praxis gewisse Bedenken gegenüber diesem Verfahren, besonders die Eignung zur Mischwasserbehandlung wurde aufgrund des diskontinuierlichen Prinzips öfters in Frage gestellt. Die Praxis hat aber gezeigt, dass eine Mischwasserbehandlung bei ordnungsgemäßer Auslegung auch auf SBR-Kläranlagen möglich ist. Die hohe Flexibilität, die dem SBR-Verfahren eigen ist, qualifiziert dieses Verfahren sogar für integrierte Ansätze bzw. eine erhöhte Mischwasserbehandlung mit deutlich mehr als $2 \cdot Q_{T,x}$. Dies setzt jedoch voraus, dass man SBR-Anlagen nicht länger mit starren Zyklusprogrammen betreibt, die die Dauer einer jeden Reinigungsphase fest vorgeben, sondern stattdessen flexible Steuerungen und Regelungen verwendet, die die Dauer der einzelnen Prozessphasen dynamisch bzw. situations- und belastungsabhängig an die aktuellen Betriebsdaten anpassen. Die technischen Voraussetzungen sind seitens der Mess- und Automationstechnik hierfür bereits gegeben.

2.4.2.6 Leistungsschwache Einleitgewässer

Im ländlichen Raum findet man oft kleinere Gewässer, die empfindlich auf Abwasser- und Mischwassereinleitungen reagieren können. Die Einführung immissionsorientierter Ansätze (z. B. *BWK-Merkblatt M3 [2001]*) zur Beurteilung der Gewässergüte wird diesen Trend weiter verstärken. Sehr niedrige Grenzwerte (z. B. < 5 mg/l NH_4-N) können auf kleinen Kläranlagen wegen den Randbedingungen des ländlichen Raums (z. B. ausgeprägte Trockenwettertagesgänge, illegale Einleitungen) ohne MSR-Technik oft nicht zuverlässig eingehalten werden.

2.4.2.7 Erneuerung der EMSR-Technik auf älteren Anlagen

Wegen der oft geringen Ausbaugröße (< 5.000 EW) ist die Ausstattung vieler SBR-Anlagen mit Mess- und Automationstechnik meist auf ein Minimum beschränkt worden. In diesen Fällen sind die Möglichkeiten für eine Optimierung begrenzt. Auf vielen älteren SBR-Anlagen steht jedoch in den nächsten Jahren eine Erneuerung der EMSR-Technik an. Aufgrund der in diesem Kapitel beschriebenen Entwicklungen ist davon auszugehen, dass in diesen Fällen auch verstärkt Messtechnik eingesetzt wird, was neue Optimierungsmöglichkeiten erschließt.

2.4.3 Biogasanlagen

2.4.3.1 Größere Biogasanlagen

Durch den Bau von mittleren (250 bis 700 kW_{el}), größeren (700 bis 2.000 kW_{el}) und sehr großen Biogasanlagen (> 2.000 kW_{el}) können Skalen- und Synergieeffekte besser genutzt werden als bei kleinen Anlagen, z. B. im Bereich Planung, Bau, EMSR-Technik, Laboranalytik, Beschaffung von Substraten, gemeinsamer Betriebsführung, Kraft-Wärme-Kopplung o. ä. Dies hat dazu geführt, dass in den letzten Jahren die Biogasanlagen im Durchschnitt größer geworden sind. Auch wenn die Förderung kleinerer Biogasanlagen mit dem neuen *EEG [2008]* höher geworden ist, hat sich dieser Trend auch danach fortgesetzt (Deutschland, 2000: ∅ 150 kW_{el}, 2005: ∅ 300 kW_{el}, 2010: ∅ 380 kW_{el}) (*Fachverband Biogas [2011]*). Größere Anlagen besitzen zudem Betriebspersonal, das sich im Hauptberuf um den Betrieb der Anlage kümmert, ähnlich wie dies im Abwasserbereich bereits seit Jahrzehnten üblich ist. Hieraus resultiert, dass die Qualifikation des Personals zunehmen wird, da es sich primär auf den Betrieb der Biogasanlagen konzentrieren kann. Dies gilt vor allem auch wegen der immer besser werdenden Informations- und Weiterbildungsmöglichkeiten. Mittlere und größere Biogasanlagen sind zudem für den Einsatz umfangreicher EMSR-Technik besonders interessant, da der prozentuale Anteil für die Prozessleit- und Automatisierungstechnik und Labormesstechnik am Gesamtinvestitionsvolumen mit zunehmender Anlagengröße immer geringer wird. Auf der Erlösseite spielt der Skaleneffekt ebenfalls eine große Rolle, da durch einen quasi anlagenunabhängigen EMSR-Fixkostenanteil ebenfalls ein Gewinnhebeleffekt im Falle einer Anlagenoptimierung erzielt werden kann.

2.4.3.2 Multi-Feed-Konzepte

Ein weiteres Problem resultiert aus der Tatsache, dass viele Biogasanlagen nach wie vor nicht in der Lage sind, verschiedenste Substrate zu verarbeiten. So gibt es Biogasanlagen, die auf die Vergärung von Getreide spezialisiert sind und aufgrund geringen Faulraumvolumens und fehlender Feststoffdosierer nicht so einfach auf andere bzw. günstigere Substrate umstellen können. Betreiber, die mit derartigen Problemen konfrontiert werden, stehen unter Druck, ihre Wirtschaftlichkeit mit anderen Mittel (z. B. Betriebsoptimierung) zu verbessern. In diesem Zusammenhang sind auch Anlagenbauer zunehmend gefordert, ihre Biogasanlagen so flexibel zu konzipieren, dass ihre Betreiber möglichst viele verschiedene Substrate verarbeiten können. Dies erfordert nicht nur Anpassungen im Bereich der Verfahrens- und Maschinentechnik, sondern auch bei der Mess- und Automationstechnik (z. B. Rezepturverwaltung, Prozesskontrolle), da andernfalls durch das beliebige Mischen verschiedener Substrate die Gefahr besteht, dass es zu Betriebsstörungen kommen kann.

2.4.3.3 Vertikale Integration

Im letzten Jahrzehnt stand vor allem die Weiterentwicklung der Anaerobstufe und der dafür notwendigen Maschinen- und Verfahrenstechnik im Fokus der Forschung und Entwicklung. Seit einigen Jahren gewinnt aber auch die Weiterentwicklung der vor- und nachgelagerten Verfahrensstufen an Bedeutung, wie z. B.:

- Substratvorbehandlung (z. B. Thermodruckhydrolyse)
- speziell für Biogas optimierte Gasmotoren statt minimal angepasster Standardmotoren
- Downscaling anderer etablierter großskaliger Energieerzeugungsmethoden (z. B. Gasturbinen → Mikrogasturbine, Gasreinigung/Gaseinspeisung)
- Gärrestbehandlung (z. B. Dekanter, Ultrafiltration, Umkehrosmose)

Bisher kann man beobachten, dass diese Systemkomponenten aus Sicht der Mess- und Automationstechnik parallel und eigenständig oft nebeneinander laufen. So besitzen einige Biogasanlagen mehrere Leitsysteme (z. B. ein System für die Anaerobstufe, ein System für das BHKW und ggf. noch weitere Systeme für die Peripherie), sodass diese Komponenten zukünftig stärker zusammengeführt werden sollten („Anlagenweite Automation“).

2.4.3.4 Anlagenstandardisierung

Der Kostendruck im Biogassektor macht sich auch bei den Herstellern von Biogasanlagen bemerkbar, bei denen es sich noch immer oft um kleinere Firmen handelt; nur wenige Unternehmen machen einen Umsatz von mehr als 50 Mio. €/a. Einige Hersteller gehen dazu über, ihre Anlagenkonzepte zu standardisieren (z. B. 1 MW_{el} = 2 Biogasanlagen mit 500 kW_{el}, 2 MW_{el} = 4 BGA mit 500 kW_{el} usw.), um dadurch Synergieeffekte bei Planung, Bau, Service und Wartung zu realisieren. Für den Einsatz von EMSR-Technik ist dies günstig, da sich für derartige Anlagenkonzepte auch die Mess- und Automationskomponenten standardisieren lassen, was wiederum die Software-, Hardware- und Engineering-Kosten reduziert. Diese Anlagenbauer können für Automationsfirmen und Messgerätehersteller interessante Partner sein, da entsprechend große Stückzahlen gleicher Komponenten anfallen.

2.4.3.5 Ertüchtigung von Altanlagen

Altanlagen sind oft interessante Standorte für eine Erweiterung (Repowering) bzw. Modernisierung (Revamping), da bereits Genehmigungen vorliegen und die Rohstoffversorgung in vielen Fällen durch langfristige Lieferverträge abgesichert ist. Finanzinvestoren identifizieren das Segment des Revamping und Repowering als interessante Geldanlage: problembehaftete Altanlagen werden günstig gekauft, modernisiert oder erweitert und anschließend in Eigenregie betrieben oder weiterverkauft. Für den Einsatz von Mess- und Automationstechnik dürfte der Bereich der Modernisierung und Erweiterung eine treibende Kraft sein, da nicht die Finanzinvestoren einer Modernisierung einer Biogasanlage mit EMSR-Technik aufgeschlossen gegenüber stehen dürften („Hohe Anlagenverfügbarkeit bei gleichzeitiger Risiko-Minimierung“). Weiterhin sind diese Projekte für Anlagenbaufirmen und Ingenieursdienstleister interessant, da die Ertüchtigung derartiger Anlagen aufgrund zahlreicher Schnittstellen und Restriktionen oft höhere Anforderungen stellt als die Planung einer Neuanlage auf der grünen Wiese, sodass die Investoren externes Know-hows benötigen.

2.4.3.6 Geringe Anzahl von Systemvarianten

Die Systemvarianten bei den Biogasanlagen sind weniger vielfältig als in der Siedlungswasserwirtschaft, wo sich in den letzten Jahrzehnten eine nahezu unüberschaubare Zahl unterschiedlicher Abwasserreinigungsverfahren etabliert hat. Zwar wurden auch im Bereich der Biogasanlagen zahlreiche Verfahrensvarianten entwickelt, in der Praxis konnten sich jedoch nur wenige Verfahren durchsetzen. Dies begünstigt den Einsatz von Mess- und Automationskonzepten, da Steuerungs- und Regelungskonzepte, die für einen weit verbreiteten Anlagetyp entwickelt wurden, auf viele andere Anlagen (verschiedener Hersteller) übertragen lassen.

2.5 Zwischenfazit

Das Kapitel 2 verdeutlicht, dass es in den letzten Jahren eine Reihe von Entwicklungen und Trends allgemeiner Natur, aber vor allem auch in der Siedlungswasserwirtschaft und Biogastechnik gegeben hat, die Anlass zur Hoffnung geben, dass der Einsatz umfangreicher und moderner Mess- und Automationstechnik auf Biogasanlagen und SBR-Kläranlagen für Zwecke einer effektiven Prozessautomation in den nächsten Jahren stark an Bedeutung gewinnen wird.

3 Messgeräte auf Klär- und Biogasanlagen

3.1 Einführung

3.1.1 Der Mensch und die Mess- und Automationstechnik

Wenn es um den Einsatz von Mess- und Automationstechnik auf Biogas- und Kläranlagen geht, trifft man immer wieder auf Vorbehalte:

- *Angst vor Arbeitsplatzverlust:* Besonders in der Abwassertechnik verbinden die Arbeitnehmer mit der Einführung von Mess- und Automationstechnik sowie Fernwirktechnik und Videoüberwachung oft die Angst, dass Arbeitsplätze langfristig abgebaut werden (z. B. keine Wiederbesetzung nach einer Verrentung eines Mitarbeiters). Wenn auch in vielen Fällen der Einsatz dieser Techniken zu Effizienzsteigerungen führt, so werden dadurch selten Arbeitsplätze überflüssig, sondern vielmehr Freiräume geschaffen, die durch neue Aufgaben und den wachsenden bürokratischen Aufwand wieder gefüllt werden.
- *Angst vor etwas Neuem:* Modernste Mess- und Automationstechnik stellt eine komplexe Materie dar, dessen Betrieb hohe Anforderungen an das Betriebspersonal stellt. Besonders bei geringer qualifizierten Mitarbeitern stellen sich daher oft Ängste und Vorbehalte gegen den Einsatz von Messtechnik ein.
- *Angst vor einer Kontrolle:* Viele Mitarbeiter verbinden mit dem Einsatz von Messgeräten das Gefühl „Big Brother is watching you!“, denn die Mess- und Automationstechnik dokumentiert die Prozesse lückenlos: Manuelle Fehleingriffe des Betriebspersonals lassen sich – auch wenn kein Schaden entsteht – noch im Nachhinein dokumentieren.
- *Vertrauen in die eigenen Fähigkeiten:* Viele Betreiber von Biogasanlagen vertrauen ihren eigenen Erfahrungen mehr als der Mess- und Automationstechnik: „Wenn ich eine 10.000-Liter-Kuh füttern kann, dann kann ich auch eine Biogasanlage betreiben!“. Ähnlich sieht die Situation bei Kläranlagen aus: „Keiner kennt meine Kläranlage besser als ich!“. In der Praxis trifft man tatsächlich auf viele, erfahrene Anlagenbediener. Wenn man sich jedoch mit dem Betriebspersonal unterhält, so kann man feststellen, dass viele dieser Personen die komplexen Prozesse nicht wirklich oder nur unvollständig verstanden haben, sodass das eigene Vertrauen und die eigene Erfahrung nur so lange gute Ratgeber sind, wie die Anlage in bekannten Bereichen betrieben wird. Spätestens dann, wenn eine Anlage in unbekannten Grenzbereichen betrieben wird oder eine Prozessstörung auftritt, kann das Vertrauen in die eigene Erfahrung ein schlechter Ratgeber sein.
- *Fehlende Kosten-Nutzen-Transparenz:* Vielen Menschen erschließt sich der Nutzen von Mess- und Automationstechnik nicht unmittelbar und daher sehen sie nur die damit verbundenen Kosten („Meine Biogasanlage läuft auch ohne Mess- und Automationstechnik mehr als 8.000 Stunden im Jahr!“). In normalen Betriebszuständen können Anlagen oft auch ohne Mess- und Automationstechnik sicher betrieben werden, ob sie damit auch effizient betrieben werden, sei aber dahin gestellt. Die Praxis zeigt auch, dass der eigentliche Nutzen von Messtechnik oft erst erkannt wird, wenn es zu Betriebsstörungen und damit einhergehenden Problemen oder finanziellen Einbußen gekommen ist.
- *Defizite im Bereich der Mensch-Maschinen-Kommunikation:* Die Mess- und Automationstechnik hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Jedoch ist es bisher nicht gelungen, das Problem der Mensch-Maschinen-Kommunikation zufriedenstellend zu lösen.

Weder kann man bei den meisten Geräten Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit des Messsignals ziehen, noch ist eine Verknüpfung der Information (d. h. des Messwerts) mit dem daraus ableitbaren Wissen (z. B. Überlastung) gegeben. Auch viele Regelungskonzepte (z. B. Künstliche Neuronale Netze) sind wenig transparent und rufen damit bei vielen Nutzern Vorbehalte hervor („Wie soll ich dem System vertrauen, wenn ich nicht nachvollziehen kann, wie Entscheidungen getroffen werden!?“).

Dennoch ist unbestritten, dass der alleinige Einsatz und das alleinige Vertrauen in Mess- und Automationstechnik ebenfalls ein schlechter Ratgeber ist, denn der Mensch ist mit seinen integrierten „Messgeräten“, d. h. seiner physiologischen Wahrnehmung mit Hilfe seiner Sinne in der Lage, eine Vielzahl von für den Betrieb einer Anlage wichtige Rückschlüsse zu ziehen. Der Tastsinn, das Hören, Sehen und Riechen sind dabei von großer Bedeutung, während das Schmecken im Bereich der Biogas- und Abwassertechnik eher von geringer Bedeutung ist, da durch Bakterien, Viren und Schadstoffe eine gesundheitliche Beeinträchtigung bei einer derartigen Beprobung nicht ausgeschlossen werden kann. Die menschlichen Sinne kommen in der Regel zur Beurteilung der folgenden Punkte zum Einsatz (Auswahl):

- Lärm und Geräusche
  - Status (An/Aus) von Antrieben (z. B. Pumpen, Rührwerke, Gebläse)
  - Funktionsstörungen (z. B. Unwucht, Reibung)
  - Resonanzschwingungen
  - Funktionsstörungen von Maschinen
  - Falsche Befestigung von Maschinen
- Geruch
  - Ausströmendes Klärgas und Biogas
  - Qualität der Substrate (z. B. Silage)
  - Geruch des Abwassers im Zulauf und Ablauf der Kläranlage
  - Stabilisierungsgrad der Reststoffe (z. B. Klärschlamm, Gärrest)
  - Unvollständige Verbrennung von Motoren
- Optischer Eindruck
  - Schwimm- und Schaumschichten
  - Substrate (z. B. Häcksellänge, Störstoffe)
  - Leckagen (z. B. Ölfilme an Antrieben)
  - Rührverhalten
  - Blasenbild (Belebungsbecken, Entgasung eines Anaerobreaktors)
  - Strömungsverhalten
  - Vibrationen (z. B. Antriebe, Rohrleitungen)
  - Funktionsstörungen (Unwucht)
  - Verschmutzungen auf Fahrwegen, in Rechenanlagen etc.
  - Verzopfungen und Verstopfungen von Maschinen und Messgeräten
  - Korrosionserscheinungen
  - Stolper- und Absturzgefahren
  - Trübung des Abwassers im Zulauf und Ablauf der Kläranlage

  - Grenzschichten (z. B. Öl und Wasser, Klarwasser und Belebtschlamm)
- Tasten und Fühlen
  - Leckagen (z. B. Ölfilme an Antrieben)
  - Gärsubstrate (z. B. Struktur des Materials)
  - Vibrationen (z. B. Antriebe, Rohrleitungen)
  - Erschütterungen (z. B. infolge falscher Befestigung von Maschinen)
  - Temperaturen und Wärmeabstrahlungen (z. B. Rohrleitungen)

Art und Umfang der Rückschlüsse, die aus diesen Informationen gezogen werden, sind aber von Mensch zu Mensch unterschiedlich. Es gibt daher gute Gründe sich nicht alleine auf die menschlichen Sinne zu verlassen, denn diese sind von vielerlei Faktoren abhängig:

- *Eingeschränkte Messbereiche:* Die Sinne des Menschen weisen einen eingeschränkten Wahrnehmungsbereich auf. So ist bekannt (*Wikipedia [2013B]*), dass es Tiere gibt, die sehr viel besser riechen und hören können als der Mensch (z. B. Hund versus Mensch: Hörsinn 15 – 50.000 Hz versus 20 – 20.000 Hz, Riechsinn: 220 Millionen Riechzellen versus 5 Millionen Riechzellen). Auch der Sehbereich des Menschen ist auf den Bereich zwischen 380 und 780 nm Lichtwellenlänge beschränkt (*Puchner [2011]*), wohingegen es Messgeräte gibt, die im Bereich des ultravioletten Spektrums (1 bis 380 nm) bzw. des nahen Infrarotspektrums (780 nm bis 3.000 nm) arbeiten.
- *Die einzelnen Sinne sind bei den Menschen unterschiedlich ausgeprägt:* Es gibt auch Menschen, bei denen einzelne Sinne schwach ausgebildet sind oder gar vollständig fehlen (z. B. Hören oder Sehen), dafür aber andere Sinne (z. B. Riechen oder Tasten) stärker ausgeprägt sind. Dies führt zum einen dazu, dass jeder Mensch seine Umgebung etwas anders wahrnimmt, zum anderen es Menschen gibt, die auf einzelne Sinne nicht oder nur eingeschränkt zurückgreifen und diese Eindrücke damit auch nicht adäquat in ihrer Entscheidungsfindung berücksichtigen können. Weiterhin kann man beobachten, dass sich die Sinne auch verändern können: Gute Beispiele hierfür sind das Sehvermögen und das Gehör, welche im Laufe eines Lebens oft an Leistungsfähigkeit einbüßen. Daher ist schwierig, aus Sinneseindrücken allgemeingültige Empfehlungen abzuleiten.
- *Einzelne Sinne können blockiert werden oder abstumpfen.* Ein gutes Beispiel hierfür ist der Geruchsinn, da er in mehrfacher Hinsicht gefährdet ist:
  - Man kann feststellen, dass Menschen die auf Biogas- und Kläranlagen arbeiten, Gestank im Laufe der Zeit weniger stark und störend wahrnehmen als Menschen, die nur selten derartigen Geruchsbelastungen ausgesetzt sind. Damit besteht die Gefahr, dass der Geruchssinn bei der Situationsbewertung auf einer Anlage nicht mehr adäquat berücksichtigt wird.
  - Der Geruchssinn kann auch durch Stoffe blockiert werden: Ein gutes Beispiel hierfür ist der Schwefelwasserstoff, ein in höheren Konzentrationen toxisches Gas. In niedrigen Konzentrationsbereichen ab 0,02 ppm H_2S nimmt der Mensch Schwefelwasserstoff als Geruch nach faulen Eiern war. Bei Konzentration ab 100 ppm fällt die Warnwirkung jedoch wegen einer Lähmung des Geruchssinns schon nach kurzer Zeit aus, sodass dann eine erhöhte Gefahr besteht, da ab 1.000 ppm der Tod schnell eintreten kann (*IFA [2011]*). Dieses Beispiel unterstreicht die Notwendigkeit von Gaswarngeräten als Bestandteil der persönlichen Schutzausstattung im Abwasser- und Biogasbereich.

- Der Mensch muss sich täglich durch Schlaf regenerieren, sodass eine menschliche 24 h-Überwachung – zumindest durch einen Mitarbeiter alleine – nicht möglich ist. Darüber hinaus unterliegt die Aufmerksamkeit eines Menschen auch gewissen Schwankungen und wird nicht zuletzt auch von körperlicher und geistiger/seelischer *Belastung/Ermüdung* negativ beeinflusst. Auch Probleme und Sorgen, die ein Mensch mit sich herumträgt, können dazu führen, dass die Aufmerksamkeit etwa bei einem Anlagenrundgang stark nachlässt und man Dinge übersieht, die im konzentrierten Zustand sofort erkannt würden.
- Die Routine erleichtert die tägliche Arbeit, da sie zu Effizienzsteigerungen führt. Gleichwohl zeigt die Praxis, dass die *Routine der Feind der Arbeitssicherheit und der Unfallverhütung* ist, da Menschen bei Arbeiten, die vielfach durchgeführt wurden ohne dass es zu Problemen gekommen ist, zunehmend nachlässig oder gar leichtsinnig werden: Es gibt Beispiele von Menschen, die zu Tode gekommen sind, weil sie, nachdem sie zuvor niemals gefährliche Stoffe in einem Raum messen konnten, ohne Freimessen geschlossene Räume betreten haben, in denen plötzlich giftige Gase auftraten.
- *Ordnungssinn:* Der Autor hat die Erfahrung gemacht, dass es Betreiber und Betriebspersonal gibt, welche auf ihren Anlagen penibel Ordnung halten und selbst kleinste Verunreinigungen auf Fahrwegen, in Pumpstationen etc. sofort beseitigen. Andere Betreiber sehen Verschmutzungen als zwangsläufiges und unvermeidliches Resultat eines Anlagenbetriebs an. Ein hoher Verschmutzungsgrad auf einer Biogasanlage reduziert aber zum Beispiel die Möglichkeit, mit den Sinnen Störungen zu identifizieren, da zum Beispiel kleinere Gasleckagen im „Grundgestank“ der Anlage untergehen oder Ölleckagen von Pumpen aufgrund starker Verschmutzung nicht erkannt werden.
- *Erfahrung und Wissen:* Der richtige Umgang mit den Sinnen und die Interpretation der Sinneswahrnehmungen setzt Erfahrung voraus. Neben Alters- und Lebenserfahrung, kann diese Erfahrung auch durch Schulung und Weiterbildung erlernt werden. Dies macht deutlich, dass jeder Mensch unterschiedlich auf Sinneseindrücke reagieren wird.
- *Probleme von Anfang an:* Bei Maschinen kann man des Öfteren Aussagen von Anlagenbedienern hören wie „die Maschine hat schon immer so geklungen“. Dies macht eine zuverlässige Interpretation von Maschinengeräuschen schwierig, denn es kann sein, dass eine Maschine von Anfang an Fehler aufweist, aber nicht sofort ein Schaden auftritt.
- *Betriebsblindheit:* Jeder Mensch kennt die Situation, dass man, wenn man immer das Gleiche tut, nach einiger Zeit weniger aufmerksam wird und anfängt, den Status Quo nicht mehr kritisch zu hinterfragen.
- *Beruflicher Hintergrund:* Schließlich kann auch der berufliche Hintergrund einen Einfluss darauf nehmen, wie man mit den gewonnenen Sinneseindrücken umgeht: Während zum Beispiel der Beamter einer Wasser- oder Immissionsschutzbehörde im Silagesickersaft eine potenzielle Quelle einer Geruchsbelästigung der Nachbarschaft und eine Gefährdung naheliegender Gewässer sieht, so sehen viele Landwirte Silagesickersaft lediglich als ärgerlichen Energieverlust, den man zwar reduzieren, aber nie ganz vermeiden kann.

Diese Ausführungen machen deutlich, dass es kein entweder Mensch oder Mess- und Automationstechnik, sondern nur ein sowohl Mensch als auch Mess- und Automationstechnik geben kann, um dauerhaft einen optimalen und sicheren Anlagenbetrieb gewährleisten zu können.

3.1.2 Stand der Messtechnik

Während der letzten Jahre wurden immer neue Messgeräte und Messeverfahren entwickelt, sodass heute eine Vielzahl von wichtigen Betriebs- und Prozessparameter (quasi-) kontinuierlich in Wasser, Abwasser und Biogas gemessen werden können. Wir sind heute in der Lage, fast alle relevanten chemischen und physikalischen Parameter zu messen, die für eine Überwachung und Steuerung bzw. Regelung der Abwasserreinigungs- und Biogasprozesse erforderlich sind. In Kapitel 1 wurde ausgeführt, dass eine ganze Reihe von Messgrößen, die zumeist auch in Echtzeit messtechnisch erfasst werden können, sowohl in der Biogastechnik als auch in der Abwasserreinigung von Bedeutung ist. Umfangreiche Informationen hierzu können auch *Spanjers und van Lier [2005]*, *Steyer et al. [2005]*, *Winkler [2005]* und *Vanrollegham et al. [2005]* entnommen werden. Im Gegensatz hierzu ist es bisher nur in Ausnahmefällen möglich, biologische Parameter kontinuierlich zu messen, sodass in diesem Bereich noch Defizite existieren.

Aufgrund dieser vielen Gemeinsamkeiten und der Tatsache, dass oft auch die gleiche Messtechnik zum Einsatz kommt, erfolgt in diesem Kapitel eine Übersicht wichtiger Messverfahren und Messgeräte. Dabei wird der Schwerpunkt weniger auf die Messprinzipien gelegt, da diese in der Literatur umfangreich beschrieben werden. Vielmehr soll die Anwendung dieser Messgeräte in der SBR- und Biogastechnik und die daraus resultierenden spezifischen Randbedingungen genauer betrachtet werden, wie zum Beispiel:

- Welche Messgeräte und Messverfahren kommen zum Einsatz?
- Was muss bei der Auswahl von Messgeräten beachtet werden?
- Wie ist die Genauigkeit der Messtechnik?
- Für welche Aufgaben kommen welche Messgeräte in Frage?
- Welche Randbedingungen sind im Einsatz zu beachten?

Weiterhin werden der Vollständigkeit halber auch Messgeräte vorgestellt, die sich erst im Stadium der Forschung und Entwicklung befinden.

3.2 Entwicklungen und Trends in der Messtechnik[3]

3.2.1 Chemometrie

Der verstärkte Einsatz der Chemometrie, d. h. die Anwendung mathematischer Methoden (z. B. Hauptkomponentenanalyse, Multilineare Regression) zur Gewinnung eines Maximums an Informationen aus Messdaten, hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen und unter anderem die Entwicklung und Verbreitung von Multi-Parameter-Messgeräten (z. B. UV/VIS-Scan-Sonden, Nah-Infrarot-Spektroskopie) begünstigt.

3.2.2 Immer mehr Parameter können gemessen werden

Es existieren heute Sonden und Analysatoren für Kohlenstoffverbindungen (TC, TOC, DOC), den chemischen und biologischen Sauerstoffbedarf (CSB, BSB_5), gelöste organische Substanzen (SAK), Stickstoffverbindungen (NO_3-N, NH_4-N, N_{ges}), Phosphor (PO_4-P, P_{ges}),

[3] Die nachfolgenden Ausführungen basieren auf *Häck und Wiese [2005, 2006]*.

Schlammeigenschaften (Schlammspiegel, Schlammvolumen/-index, Trübung/Schlammkonzentration), gelöster Sauerstoff (O_2), pH, Redox, Temperatur, elektrolytische Leitfähigkeit, Alkalinität, flüchtige organische Säuren, Durchfluss, Füllstand sowie für weitere Parameter. Weiterhin gibt es Messgeräte für Gaszusammensetzung und Gasdurchfluss, wie Methan (CH_4), Sauerstoff (O_2), Kohlendioxid (CO_2), Wasserstoff (H_2), Schwefelwasserstoff (H_2S); diese Geräte sind auch interessant für anaerobe Abwasserreinigungs- und Schlammbehandlungsverfahren. Eine Bewertung einiger Messverfahren bezüglich Robustheit und Messgenauigkeit gibt *Winkler [2005]*. Eine kompakte Übersicht über die Entwicklung der Instrumentierung im Bereich von anaeroben Abwasseranlagen geben *Spanjers und van Lier [2005]* und *Steyer et al. [2005]*.

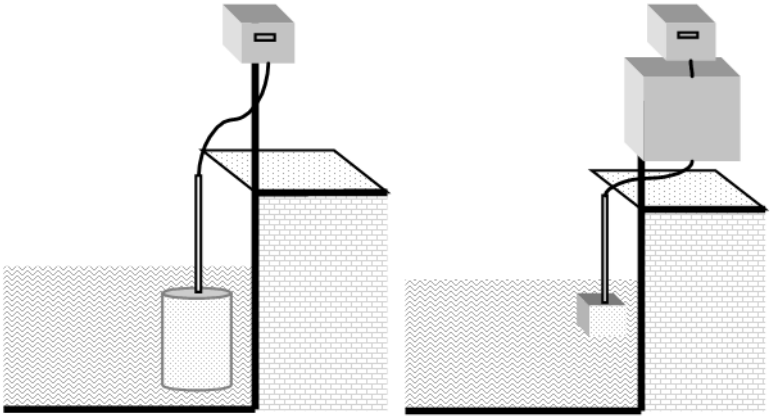


Abb. 3.1: Vergleich der Installation von In-Situ-Prozessanalysator (links) und On-Site-Prozessanalysator (rechts): Bei den In-Situ-Geräten befinden sich Probenvorbereitung und Analysator im zu messenden Medium, nur der Messumformer befinden sich außerhalb. Beim On-Site-Analysator befindet sich nur die Probenvorbereitung im Messmedium (Quelle: *Häck und Wiese [2005]*)

3.2.3 Neue Messverfahren und Probenahmemethode

Die zunehmende Verbreitung von Mess- und Automationstechnik ist auch der Einführung neuer Messverfahren und Probennahmemethoden zu verdanken. Besonders erwähnenswert sind hierbei die folgenden Entwicklungen:

- *Sauerstoff:* Über mehrere Jahrzehnte wurde der gelöste Sauerstoff mit Hilfe elektrochemischer Methoden gemessen. Seit einigen Jahren ist es aber möglich, den gelösten Sauerstoff auch mit Hilfe optischer Methoden (z. B. *Winkler [2005]*) zu messen, wodurch sich der Wartungsaufwand reduziert und die Gefahr der Elektrodenvergiftung entfällt.
- *pH und Redox:* Auch die Einführung differentialer pH- und Redox-Sonde hat Vorteile mit sich gebracht. Durch das gekapselte Design reagieren diese Sensoren weniger schmutzempfindlich; die Gefahr einer Elektrodenvergiftung wird auch reduziert. Die Praxis zeigt, dass diese Sensoren auch in schiwierigen Medien mit einem geringen Wartungsaufwand bzw. langen Wartungsintervallen auskommen und eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen.
- *Scan-Sonden:* Messgeräte auf Basis des UV-/VIS-Spektrums wurden entwickelt, um die organischen Verschmutzungsparameter bzw. deren Äquivalente zu bestimmen (z. B. SAK). Hierzu ist zum Teil eine aufwändige Kalibration erforderlich, allerdings ist der Vorteil dieser Sonden, dass mit ihnen mehrere Parameter bestimmt werden können.

		1994		2000		2005	
Kosten für Mess- und Regeltechnik		**PHOSPHAX**	**AMTAX**	**PHOSPHAX inter**	**AMTAX inter**	**PHOSPHAX sc**	**AMTAX sc**
Analyser	€	12.250	13.950	12.950	12.450	11.155	11.155
Probenaufbereitung 10 m	€	7.500		4.295		2.600	
Gestänge	€			409		940	
Regeleinrichtung	€	1.000		1.000		0	
Sonstiges (Container)	€	5.000		5.000		0	
Summe Investitionskosten	**€**	**24.750**	**27.450**	**23.654**	**23.154**	**14.695**	**11.155**
Investitionskost bezogen auf 1993		**100%**	**100%**	**96%**	**84%**	**59%**	**41%**
Abschreibung (linear)	über Jahre	8	8	8	8	8	8
Abschreibung / Jahr	**€ / Jahr**	**3.094**	**3.431**	**2.957**	**2.894**	**1.837**	**1.394**
Laufende Kosten							
Jahresbedarf (10 min.)	€ / Jahr	1.388	1.873	672	1.247	680	1.439
Ultrafiltration (Energie / Module)		3.675					
Probenaufbereitung	€/Jahr			200			
Wartungsvertrag Analyser	€ / Jahr	1.040		480	480	480	480
Personalaufwand	Std. / Woche	2	2	1	1	0,5	0,5
Personalkosten pro Stunde	€ / h	40	40	50	50	60	60
Peronalkosten pro Jahr	€ / Jahr	4.160	4.160	2.600	2.600	1.560	1.560
Betriebskosten	**€ / Jahr**	**10.263**	**10.748**	**3.952**	**4.527**	**2.720**	**3.479**
Betriebskosten für 8 Jahre		**82.100**	**85.984**	**31.616**	**36.216**	**21.760**	**27.832**
Betriebskosten / 8 a bezogen auf 1993		**100%**	**100%**	**39%**	**42%**	**27%**	**32%**
Gesamtkosten	**€ / Jahr**	**13.356**	**14.179**	**6.909**	**7.421**	**4.557**	**4.873**

Abb. 3.2: Kostenentwicklung für Ammonium- und Phosphatprozessphotometern der Fa. HACH LANGE zwischen 1994 und 2005 (Quelle: *Häck und Wiese [2005]*)

- *Nährstoffe:* Nitrat (NO_3-N) wird heute überwiegend mit Sonden auf Basis der UV-Absorption oder ionen-selektiven Elektroden bestimmt, sodass Nitrat-Analysatoren aus der Mode gekommen sind. Diese Messgeräte sind einfach in der Handhabung und besitzen eine geringe Ansprechzeit, sodass sie nahe am idealen Sensor sind („Eintauchen und Messen"); dies gilt auch in Hinblick auf Steuerungs- und Regelungsaufgaben. Bei Ammonium (NH_4-N) und Phosphat (PO_4-P) gewinnen die letzten Jahre on-site Analysatoren an Bedeutung und ersetzen zunehmend die traditionellen Analysatoren, die eine separate Probenahme und -behandlung erfordern. Die früher verwendeten Ultrafiltrationen waren bezüglich Investitions- und Betriebskosten kostspielig. Ab Ende der 1990er Jahre wurde diese Art der Probenaufbereitung durch auf die Analysengeräte zugeschnittene Membranfiltrationen abgelöst, die sehr viel günstiger sind. Hinzu kommt, dass die ältere Generation noch empfindlich auf Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen reagieren, sodass diese eingehaust werden mussten. Die neuen Analysatoren sind daher sehr viel flexibler in der Art der Aufstellung. Der Einzug der Mikromechanik zur exakten Dosierung von Flüssigkeitsströmen in Prozessanalysatoren hat auch den Reagenzienverbrauch der Geräte drastisch verringert. Gleichzeitig werden Schlauchpumpen sukzessive durch verschleißfreie Dosiertechnik ersetzt, um die Anzahl der notwendigen Wartungen zu reduzieren. Exemplarisch für diese Kostenentwicklungen zeigt Abbildung 3.2 die Entwicklung der Investitions- und Betriebskosten: Die Investitionskosten für eine Phosphat-Messung konnten zwischen 1994 und 2005 um bis zu 41 % und für NH_4-N sogar um bis zu 59 % reduziert werden. Die Betriebskosten konnten noch stärker reduziert werden (PO_4-P: 73 %, NH_4-N: 68 %). Preislich besonders attraktiv sind zudem ionenselektive Elektroden

zur NH_4-Messung als Alternative zu Prozessanalysatoren. Hinsichtlich der Erstinvestition lassen sich rund 10.000 € sparen. Die Betriebskosten variieren in Abhängigkeit der Abwasserzusammensetzung (z. B. Tausch der Membran und des Sensors). Wegen stark schwankender Abwasserzusammensetzungen, wie sie auf kleineren Kläranlagen häufig anzutreffen sind, erfordern die Sensoren eine relativ häufig durchzuführende manuelle Kalibrierung und Adaptierung an Störionen. Trotz dieses erhöhten Aufwands können im Einzelfall größere Abweichungen in den Messwerten auftreten (> 1 mg/l NH_4-N), die für bestimmte Applikation nicht zu akzeptierbar sind. Wenn diese ionenselektiven Elektroden aber funktionieren, sind die deutlich günstiger in Anschaffung und Betrieb als Analysatoren.

3.2.4 Entwicklung von Biosensoren

Bisher können nur wenige biologische Parameter (z. B. Atmungsmessung) online gemessen werden. Jedoch können bereits zahlreiche weitere Parameter (z. B. Anzahl nitrifizierender Bakterien, Anzahl e-coli Bakterien) im Labor bestimmt werden (z. B. durch den Einsatz von Gensonden). Aufgrund der großen Fortschritte im Bereich der Biotechnologie und der Bioverfahrenstechnik ist absehbar, dass mittel- bis langfristig zahlreiche online Biosensoren entwickelt werden, welche zum Beispiel zur Überwachung (z. B. Detektion einer Hemmung der nitrifizierenden Bakterien) oder zur Steuerung und Regelung (z. B. Befüllung eines Störfallbeckens) eingesetzt werden können; ein Beispiel hierzu gibt *Okayasu et al. [2005]*. Andere Biosensoren könnten etwa für die Bestimmung kinetischer Parameter (z. B. Wachstumsraten) entwickelt werden. Derartige Informationen wären hilfreich für die Entwicklung und Anwendung Modell-basierter prädiktiver Steuerungs- und Regelungskonzepte.

3.2.5 Smart Sensoren und Netzwerkfähigkeit

Bis vor wenigen Jahren bestand ein Messgerät aus einem Sensor und einem dazugehörigen Messumformer, in dem wesentliche Teile der Signalverarbeitung erfolgten. Seit Einzug der digitalen Signalverarbeitung werden diese traditionellen Messgeräte nun allmählich durch digitale, sogenannte Smart Sensoren verdrängt. Smart Sensoren beinhalten neben dem eigentlichen Sensor auch die komplette Signalauswertung und leiten an einen übergeordneten Messumformer ein digitales Signal weiter, bestehend aus Zahlenwert, Einheit und Statussignalen. Der Vorteil dieser neuen Philosophie ist eindeutig: An einen einzigen (oft mehrkanaligen) Controller können verschiedene Sensoren angeschlossen werden. Aufgrund der störungsfreien, digitalen Signalübertragung spielt die Entfernung zwischen dem Sensor und Controller kaum noch eine Rolle. Prozessanalysatoren, in dieses Konzept integriert, gelten dann auch als einfache Sensoren. Mit der Einführung der „Smart Sensoren“ können bis zu 1.000 € pro Messung eingespart werden, da Prozessanalysatoren mit anderen Sensoren mit einem einzigen Controller betrieben werden können. Hinzu kommt, dass die Universalcontroller in deutlich größeren Stückzahlen produziert werden können als die bisherigen maßgeschneiderten Messumformer. Gemäß des „Economy of Scale“-Prinzip können hieraus erhebliche Kostenvorteile bei der Produktion resultieren, die zum Teil an den Endkunden weitergegeben werden. Weitere Vorteile ergeben sich aus der einfachen Austauschbarkeit der Controller, was sich positiv bei der Ersatzteilbeschaffung/-bewirtschaftung bemerkbar macht und ebenfalls Kosten einspart. Verteilte Messstellen lassen sich zudem durch die Netzwerkfähigkeit moderner Controller kostengünstig miteinander vernetzen: Dabei wird jede Mess-

stelle mit einem Sondenmodul ausgestattet, welches mit den Sensoren einer Messstelle verbunden wird. Alle Sondenmodule können über ein Buskabel miteinander verbunden werden. Das gesamte Netzwerk kann über ein einziges Display bedient werden, angeschlossen an ein beliebiges Sondenmodul. Der Verkablungsaufwand wird so drastisch reduziert und die Inbetriebnahme aller Sensoren im Netzwerk erleichtert. Eine eventuelle Anbindung des Netzwerkes an einen Profibus erfolgt zentral in einem der Sondenmodule (*Häck und Wiese [2006]*). Derartige Konzepte werden mittlerweile von allen großen Herstellern von Abwassermesstechnik verfolgt.

Die Netzwerkfähigkeit bezieht sich jedoch nicht nur auf die Prozessmessgeräte. Es gibt auch erste Ansätze Labormessgeräte in Netzwerke zu integrieren (*Hach Lange [2007]*). Diese Vernetzung von Labor- und Echtzeit-Messtechnik bietet Vorteile:

- Erleichterung der Analytischen Qualitätssicherung und der Matrixkorrektur durch automatischen Abgleich von in Echtzeit gemessenen Prozessdaten und den zur Qualitätssicherung zeitgleich genommenen Vergleichsproben, die im Labor analysiert werden.
- Wenn die Labordaten in kurzer zeitlicher Auflösung erhoben werden, können die Ergebnisse automatisch an das Prozessleitsystem übergeben werden (Beispiel: täglich bestimmter FOS/TAC-Wert zur Steuerung von Biogasanlagen).

Die Ethernetfähigkeit moderner Controller ermöglicht es, in Kombination mit einem WLAN auf dem Anlagengelände, alle Sensor- und Statussignale des Netzwerkes zu jedem Zeitpunkt und an jeder Stelle der Anlage über einen Pocket-PC abzurufen. GSM-Module erlauben die Fernübertragung von Mess- und Statussignalen, die Konfigurierung aller angeschlossenen Sensoren oder ein Upload neuer Software aus der Ferne. Ereignismeldungen können per SMS oder E-Mail versendet werden. Diese Möglichkeiten schaffen die Voraussetzung für neuartige Service und Wartungskonzepte, die insbesondere für kleinere Anlagen von besonderem Interesse sind. Traditionelle Messwertumformer verfügen über 0/4–20 mA Stromausgangskarten zur Messsignalübertragung und Relais zur Übertragung von Grenzwertüber-/-unterschreitungen sowie Fehlermeldungen. Messumformer neuer Generation ermöglichen auch das Einlesen analoger und/oder digitaler Mess- und Statussignale. Diese Daten können ohne Programmierkenntnisse mit den Messwerten der angeschlossenen Sensoren verknüpft werden, um weitere Signale oder Stellgrößen zu erzeugen. So lassen sich etwa durch die Verknüpfung von Durchfluss- und Konzentrationsmessungen Frachten berechnen und entsprechende Aktoren ansteuern.

3.2.6 Vorausschauende Wartungskonzepte

Nach *Häck [2007 A/B]* sind die folgenden Wartungskonzepte bei Messgeräten dominant:

- Ausfallorientiert: Im Falle des Ausfalls eines Messgerätes muss zwangsläufig eine Wartungsarbeit durchgeführt werden, um die Störung zu beseitigen.
- Vorbeugend: Im Falle dieser Variante dominiert bisher die geplante Instandhaltung, d. h. zum Beispiel in Abhängigkeit einer bestimmten Anzahl von Betriebsstunden bzw. nach einem festen zeitlichen Rhythmus (z. B. alle 4 Wochen).

Beide Konzepte weisen in der Praxis gewisse Defizite aus: Der Ausfall eines Messgerätes ist dann als kritisch anzusehen, wenn das Gerät in eine Steuerungs- und Regelungsstrategie eingebunden ist. Ferner sind ausfallorientierte Instandhaltungsarbeiten oft finanziell deutlich

aufwändiger, da ein Schaden beseitigt werden muss, der bei frühzeitiger Erkennung vermieden worden wäre. Auch die geplante vorbeugende Instandhaltung hat Nachteile. So werden in vielen Fällen routinemäßig Verschleißteile o. ä. ausgetauscht, obwohl diese noch eine gewisse Zeit genutzt werden könnten. Der zunehmende Kostendruck und die neuen technischen Möglichkeiten (z. B. intelligente Feldgeräte, Fernwirktechnik) bieten daher die Möglichkeit, zukünftig verstärkt auf eine zustandsbasierte bzw. darauf aufbauend auf eine vorausschauende Instandhaltung umzusteigen (*Häck [2007 A/B]*):

- Zustandsbasiert: Moderne Feldgeräte stellen eine Vielzahl von Informationen zur Verfügung, aus denen sich der Zustand des Messgerätes ableiten lässt. Deuten bestimmte Parameter (z. B. Verschmutzungsparameter) darauf hin, dass der Zustand des Messgerätes schlechter wird, werden Instandhaltungsarbeiten veranlasst.
- Vorausschauend: Aufbauend auf dem Zustand des Messgerätes können auch vorausschauende Wartungskonzepte realisiert werden, z. B. basierend auf einer Prognose wie lange das Messgerät noch weiter verlässliche Informationen liefern wird. Die vorausschauende Betrachtung bietet auch den Vorteil, dass für die Wartung erforderliche Ressourcen (z. B. Personal, Ersatzteile) entsprechend frühzeitig eingeplant werden können.

3.2.7 Automatische Messwertvalidierung

Die Zuverlässigkeit von Messsignalen ist besonders dann von Bedeutung, wenn Echtzeitmessungen in Steuerungen und Regelungen eingebunden sind. Die Einführung von Werkzeugen zur Analytischen Qualitätssicherung (AQS) von Echtzeitmessungen ist daher sinnvoll, kann aber nur eine Komponente darstellen. Daher arbeiten Messgerätehersteller auch an einer automatischen Messwertvalidierung. Da im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch genauer auf die Aspekte eingegangen wird, sei auf den Abschnitt 3.9 verwiesen.

3.3 Kontinuierliche Prozessmessgeräte[4]

Nachfolgend werden verschiedene (quasi-)kontinuierliche Messverfahren zur Bestimmung der in der Biogas- und Abwassertechnik wichtigen Prozessgrößen vorgestellt (Tabelle 3.1). Aufgrund des beschränkten Umfangs dieser Arbeit wird nachfolgend nur auf die in diesem Kontext wichtigen Punkte eingegangen. Bezüglich weiterführender Details wird auf *Gevatter [1999]*, *Früh et al. [2009]*, *Brucker et al. [2008]* und *Heim [2006]* verwiesen.

Weiterhin werden in diesem Abschnitt Messverfahren und Messgeräte vorgestellt, die in der Biogas- und/oder Abwassertechnik von Bedeutung sind, aber in anderen Bereichen weitgehend unbekannt sind. Schließlich erfolgen noch Verweise auf Messgeräte, die sich noch im Status der Forschung und Entwicklung befinden, die aber interessante Ansatzpunkte bieten und/oder zukünftig von Bedeutung sein könnten.

[4] Wenn im weiteren Verlauf dieses Kapitels auf Messgeräte verwiesen wird, bei denen Betriebsergebnisse des Autors vorgestellt und diskutiert werden, so erfolgt ein Verweis auf weiterführende Literatur (z. B. Bedienungsanleitungen). Wenn lediglich auf Bilder von Messgeräten verwiesen wird, erfolgt in der Regel nur ein Hinweis auf die Herstellerfirma.

Tab. 3.1: Messgrößen in Klär-/Biogasanlagen: X = bedeutsam, (X) = im Einzelfall, - = i. d. R. nicht ([1] z. B. bei Hemmstoffen, [2] v. a. bei anaerob stabilisierenden Kläranlagen, [3] zur Düngewertbestimmung, [4] zur Ansteuerung von Rührwerken o. ä.). (Quelle: Autor)

Messgrößen	**Kläranlage**	**Biogasanlage**
Ammonium (NH_4-N)	X	X
Atmungsaktivität/Toxizität	(X)[1]	-
CSB, BSB, SAK und TOC (organische Verschmutzung)	X	-
Druck (Flüssigkeit)	X	X
Durchfluss (Flüssigkeit)	X	X
Elektrolytische Leitfähigkeit	X	X
Elektrizität	X	X
FOS und organische Säuren	(X)[2]	X
Füllstand (Flüssigkeit)	X	X
Gasanalyse	(X)[2]	X
Gasdruck	(X)[2]	X
Gasfüllstand	(X)[2]	X
Nitrat (NO_3-N)	X	-
Phosphor (PO_4-P und P_{ges})	X	(X)[3]
pH	X	X
Redox	X	X
Sauerstoff (gelöst)	X	-
Schlammspiegel	X	-
Strömung	-	(X)[4]
TAC/Alkalinität	(X)[2]	X
Temperatur	X	X
Trockensubstanz (TS)/Trockenmasse (TM)	X	X
Vergleichsschlammvolumen (VSV)	X	-
Videosysteme	(X)	(X)
Viskosität/Dichte	-	(X)[4]
Wägezellen	(X)	X
Wärme	(X)	X

3.3.1 Ammonium

3.3.1.1 Allgemeine Informationen

Der Parameter Ammonium ist sowohl in der Abwassertechnik als auch der Biogastechnik von großer Bedeutung:

- Abwassertechnik: Als sauerstoffzehrende Substanz und Nährstoff sowie bei hohen pH-Werten potenziell fischgiftig ist man heute bestrebt, Ammonium im Abwasser nahezu vollständig abzubauen bzw. in Nitrat umzuwandeln.

- Biogastechnik: Bei hohen Ammoniumkonzentrationen und pH-Werten kann es zu einer Hemmung des Biogasprozesses kommen, sodass es bei der Zugabe größerer Mengen bestimmter Stoffe (z. B. Hühnertrockenkot) ratsam ist, regelmäßig Ammonium zu bestimmen. Hierfür ist aber eine Laboranalyse (ggf. mit Schnelltests) meist ausreichend ist.

In der Abwassertechnik kommen zurzeit Prozessphotometer und Ionen-selektive Elektroden (ISE) zur Bestimmung der Ammoniumkonzentration zum Einsatz. Durch die Marktetablierung der kostengünstigen ISE besteht heute die Möglichkeit, auch auf kleineren Kläranlagen (< 10.000 Einwohnerwerte) diesen wichtigen Parameter zu messen (Abbildung 3.3). Die aufgrund der komplizierteren Technik, der erforderlichen Probenahme und dem Chemikalieneinsatz teureren Prozessphotometer kommen daher bevorzugt auf Großklärwerken zum Einsatz oder dort, wo hohe Genauigkeit gefordert ist.

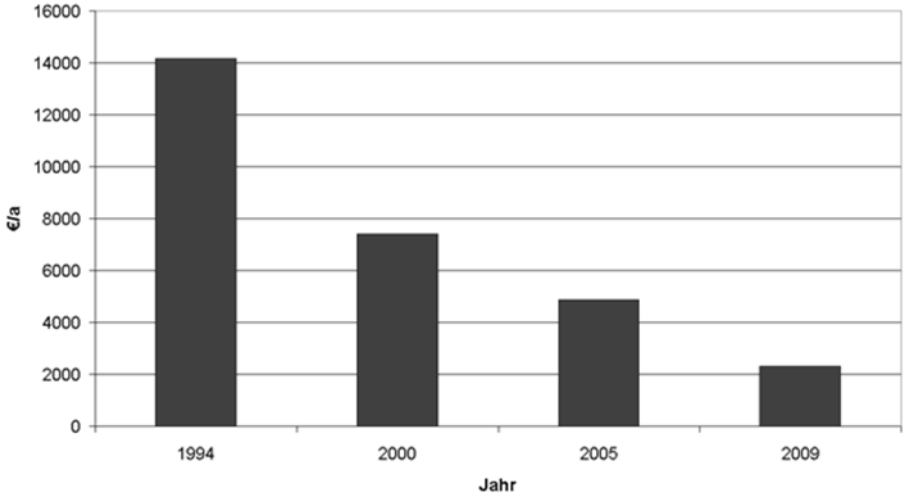


Abb. 3.3: Entwicklung der Jahreskosten (Investitions- und Betriebskosten) für Ammonium-Prozessmesstechnik zwischen 1994 und 2009 (1994 bis 2005: Prozessphotometer inkl. Probennahme, 2009: Ionen-selektive Elektrode)[5]

Typische Anwendungsorte sind dabei die Belebungsstufen bzw. SB-Reaktoren, um die Belüftung zu regeln (Dauer und Intensität). In Einzelfällen kommen aber auch Ammoniummessgeräte im Zulauf (z. B. zur Detektion von Belastungsspitzen) oder im Auslauf (z. B. zur lückenlosen Dokumentation der NH_4-N-Konzentration im Kläranlagenablauf) zum Einsatz. Weitere Anwendungsfälle können sich bei der biologischen Behandlung von Trüb- und Zentratabwässern aus der Schlammbehandlung ergeben.

3.3.1.2 Prozessphotometer

Der Autor konnte zwischen 2003 und 2004 umfangreiche Erfahrungen mit dem Einsatz von Ammonium-Prozessphotometer auf SBR-Anlagen im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes 17258 sammeln: So kamen auf einer SBR-Kläranlage zwei online-Ammonium-Messungen vom Typ „AMTAX Inter 2“ (*Hach Lange [2002A])* zum Einsatz (Abb. 3.4, Bild 1). Dieser Typ misst nach der DIN-äquivalenten Indophenolblau-Methode und ist in der Lage einen breiten

[5] Abbildung fortgeschrieben auf der Basis von Häck und Wiese [2005]

Messbereich von 0,1 bis 20 mg/l NH_4-N abzudecken. Deshalb eignen sich derartige Prozessphotometer sehr gut für die Messung von Batchprozessen, bei denen starke Konzentrationsschwankungen auftreten können bzw. die im Ablauf sehr niedrige Überwachungswerte für NH_4-N einhalten müssen. Die Geräte können – je nach Einstellung – alle 5 bzw. 10 min einen Messwert liefern. Damit dieses Messintervall auch ausgenutzt werden kann, wurde für jeden Reaktor ein „AMTAX Inter 2“ eingesetzt. Auf die deutlich kostengünstigere Zweikanalmethode (d. h. ein Messgerät misst abwechselnd die Proben beider Reaktoren) wurde wegen der Nachteile (z. B. längere Messintervalle, erforderliche Synchronisation der Probenströme) verzichtet, da über die NH_4-N-Messsignale geregelt wurde. Für die separate Probennahme und -aufbereitung wurden die im Abschnitt 3.3.8 beschriebenen „FILTRAX“-Einheiten eingesetzt. Als Aufstellungsort für die beiden Prozessphotometer wurde eine Gebläsehalle ausgewählt, die zwischen den beiden Reaktoren angeordnet ist. Dadurch konnten die Leitungswege für das Filtrat relativ kurzgehalten werden (10 bis 15 m), wodurch die Transportdauer, d. h. die Zeitdifferenz zwischen der Probennahme und der Ankunft des Filtrats am Prozessphotometer – je nach der Förderleistung der Schlauchmotorpumpen der Filtereinheit – zwischen 10 und 20 min beträgt. Hieraus resultiert inkl. der Probenanalyse eine Totzeit von 15 bis 25 min bzw. max. 30 min (10 min-Messzyklus). Die Analysatoren wurden über den analogen 0/4-20 mA-Ausgang an die Automatisierungsebene angeschlossen. Diese Totzeit ist für das Regeln eines Batchprozesses zwar nicht optimal, hat sich aber dennoch als ausreichend erwiesen. Dies gilt nicht zuletzt, da die Totzeit auch im Regelkonzept berücksichtigt werden kann, wie folgendes Beispiel zeigt: Der Grenzwert für das automatische Nachbelüften im Falle einer NH_4-N-Überschreitung des Überwachungswertes konnte gleich dem Überwachungswert (3 mg/l NH_4-N) gesetzt werden, da in der Totzeit die NH_4-N-Konzentration weiter absank bzw. deutlich unterhalb von 2,5 mg/l NH_4-N lag und damit aufgrund der hohen Messgenauigkeit des Prozessphotometers davon ausgegangen werden kann, dass der Überwachungswert sicher eingehalten wird. Ein weiterer Vorteil des Aufstellungsorts ist, dass aufgrund der von den Gebläsen erzeugten Abwärme die Prozessphotometer auch im tiefsten Winter trocken und warm aufgestellt sind; besonders bei regelmäßig erforderlichen Wartungsarbeiten hat sich dies als vorteilhaft erwiesen. Das Prozessphotometer ist mit einer automatischen Kalibrierung und einer automatischen Reinigung ausgestattet, die nahezu beliebig zeitlich programmiert werden können. In der Erprobung hat sich eine tägliche automatische Reinigung bzw. eine wöchentliche automatische Kalibrierung als ausreichend erwiesen. In der Zwischenzeit hat der Hersteller ein neues Prozessphotometer auf den Markt gebracht, andere Messgerätehersteller bieten zudem vergleichbare Geräte an. Auch mit derartigen Geräten lassen sich die spezifischen Anforderungen auf SBR-Anlagen erfüllen. Derartige Prozessphotometer verursachen heute Investitionskosten (inkl. Filtereinheiten, Befestigungsmaterial o. ä.) von unter 20.000 € ohne MWSt.

Die Abbildung 3.5 zeigt eine andere Gerätekonfiguration: In Abänderung der zuvor beschriebenen Gerätekonstellation wurde in diesem Beispiel eine Umschaltung mit Magnetventilen zwischen den beiden Probenströmen aus den Reaktoren 1 und 2 realisiert, sodass beide SB-Reaktoren mit nur einem Satz Messgeräten – in diesem Fall ein NH_4-N-Prozessphotometer, ein PO_4-P-Prozessphotometer und eine NO_3-N-By-Pass-Sonde – auskommen. Eine derartige Lösung reduziert zwar die Investitionskosten beträchtlich, schränkt die Flexibilität und die Möglichkeiten der Steuerung und Regelung durch lange Totzeiten ein, sodass dieser Messgerätekombination eher eine überwachende Funktion zukommt.

Da die Prozessphotometer von großer Wichtigkeit für die erfolgreiche Umsetzung der Steuerungs- und Regelungskonzepte im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes 17258 waren, wurde großer Wert auf die Genauigkeit der Messgeräte gelegt. Daher wurden während des 9-monatigen Probebetriebs pro Woche und Analysator im Mittel ca. 3 Vergleichsmessungen durchgeführt. Die Vergleichstests wurden überwiegend vor Ort mit Hilfe von Schnelltests durchgeführt. Im Falle von Ammonium kamen dabei der Test „LCK 303“ (2,0 bis 47 mg/l NH_4-N) (*Hach Lange [2003A]*) bzw. der Test „LCK 304“ (0,015 bis 2 mg/l NH_4-N) (*Hach Lange [2003B]*) zum Einsatz.

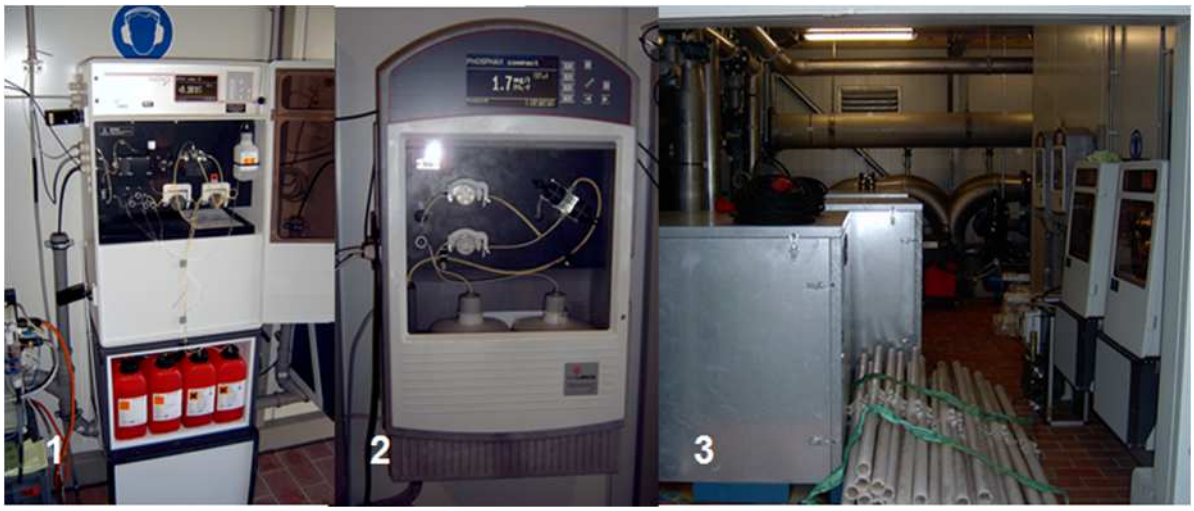


Abb. 3.4: Lösung für die Beprobung von zwei SB-Reaktoren mit je einem Satz Messgeräte: Ammonium- (1) und Phosphat-Prozessphotometer (2), Installation der Messgeräte in eine Einhausung zwischen den beiden Reaktoren (Bildquellen: Autor)

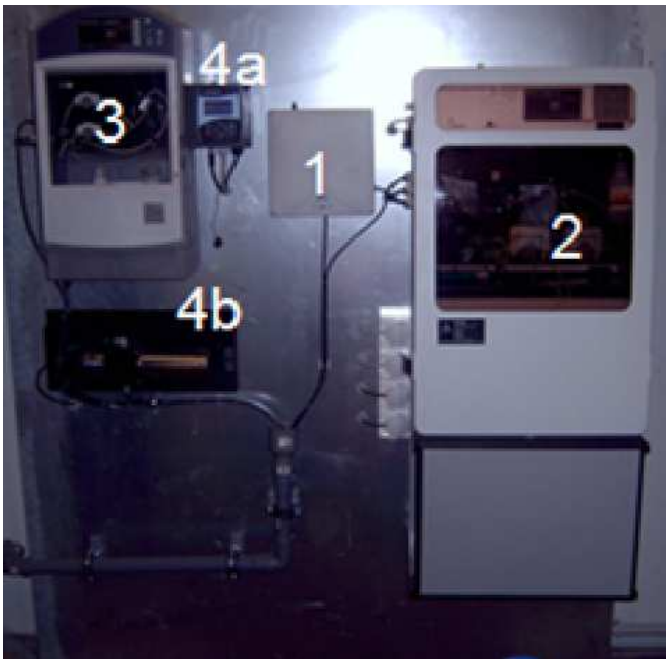


Abb. 3.5: Lösung für die Beprobung von zwei SB-Reaktoren mit einem Satz Messgeräte: Box mit Magnetventilen zum Umschalten der Probenahmeströme von SBR 1 und SBR 2 (1), Ammonium-Prozessphotometer (2), Phosphat-Prozessphotometer (3), Bypass-Nitrat-Sonde (4b) mit Messumformer (4a) (Bildquellen: Autor)

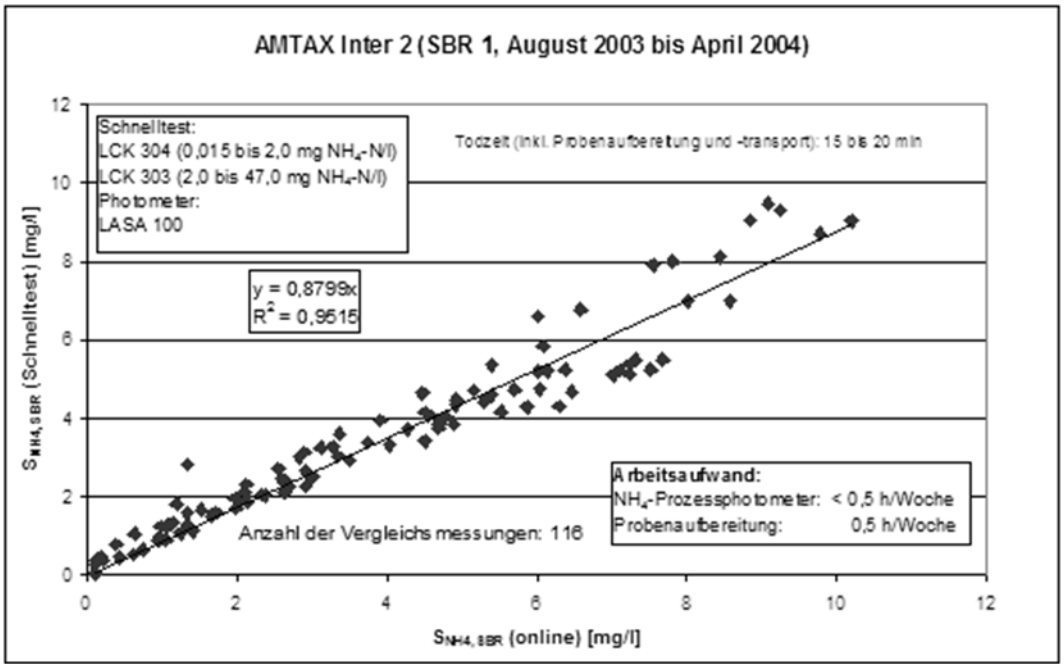


Abb. 3.6: Vergleich zwischen im Prozess gemessenen NH_4-N-Konzentrationen und mittels Schnelltests ermittelten Laborwerten (Quelle: *Wiese [2005]*)

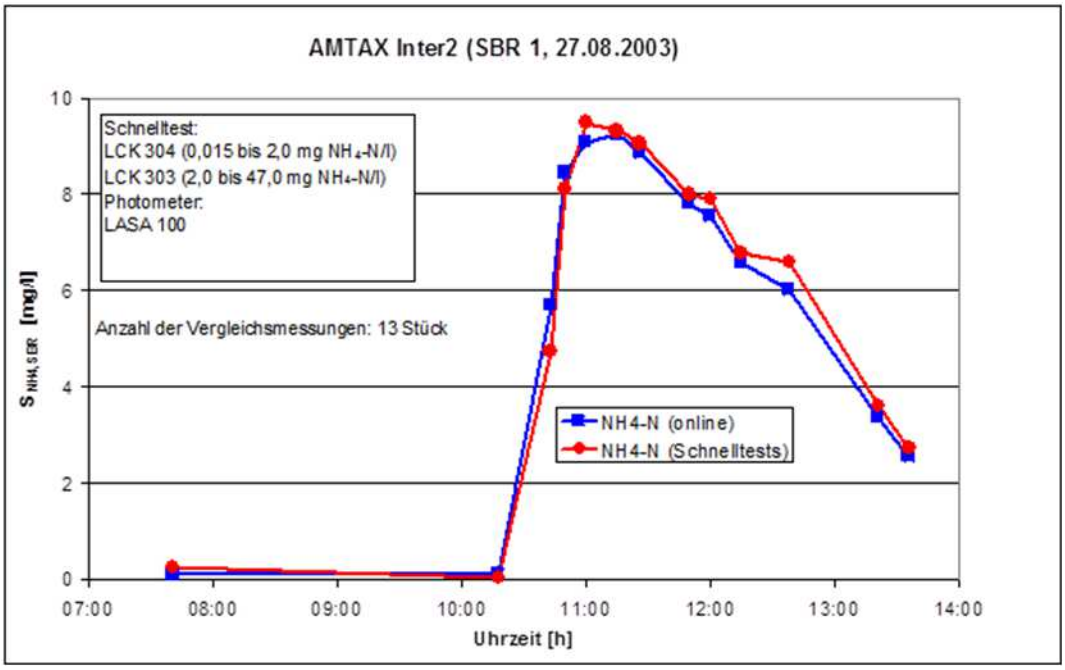


Abb. 3.7: Vergleich zwischen im Prozess gemessenen NH_4-N-Konzentrationen und mittels Schnelltests ermittelten Laborwerten während eines Zyklus (Quelle: *Wiese [2004]*)

Exemplarisch sind die Ergebnisse für das „AMTAX Inter 2“, welches dem SBR 1 zugeordnet wurde, in Abbildung 3.6 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass das Messgerät besonders in dem Konzentrationsbereich 0 bis 3 mg/l NH_4-N sehr genau misst, was bezüglich einer sicheren Einhaltung niedriger NH_4-N-Überwachungswertes wichtig ist. Abbildung 3.7 verdeutlicht, dass auch die ausgeprägten Konzentrationsschwankungen, die typisch für den Batchprozess sind, von dem Prozessphotometer gut gemessen werden können.

3.3.1.3 Ionenselektive Elektroden

In den letzten Jahren war eine rasante Entwicklung im Bereich der Sondenlösungen zu beobachten. Nachdem Sondenlösungen für Nitrat, SAK, Schlammspiegel und TS schon seit vielen Jahren verfügbar sind, gibt es seit einigen Jahren auch Ammonium-Sonden auf dem Markt. Diese ionensensitiven Elektroden haben nicht nur den Vorteil, dass sie nahezu keine Totzeit aufweisen, sondern auch in Hinblick auf die Anschaffung und den Betrieb deutlich günstiger sind als die konventionellen Prozessphotometer. Ein weiterer Vorteil ist, dass es heute Kombielektroden (Abbildung 3.8) gibt, die mit einem Sensor sowohl NH_4-N und NO_3-N messen können, was für die Optimierung des SBR-Betriebs optimal ist, da sich hier Nitrifikations- und Denitrifikationsphase in einem Zyklus abwechseln. Um die Messgenauigkeit zu verbessern, erfolgt meist eine Chlorid- und Kaliumionen-Kompensation.

Abb. 3.8: Ionenselektive Kombielektroden für NH_4-N und NO_3-N (1 = AN-ISE der *Fa. Hach Lange [2011A]*, 2 = Typ „Varion Plus 700 IQ“ der *Fa. WTW [2011A]*). Deutlich erkenntbar sind bei beiden Sensoren die verschiedenen Elektroden (Referenz-, NH_4-N- und NO_3-N-Elektrode, Störionenkompensation) (Bildquelle: Autor)

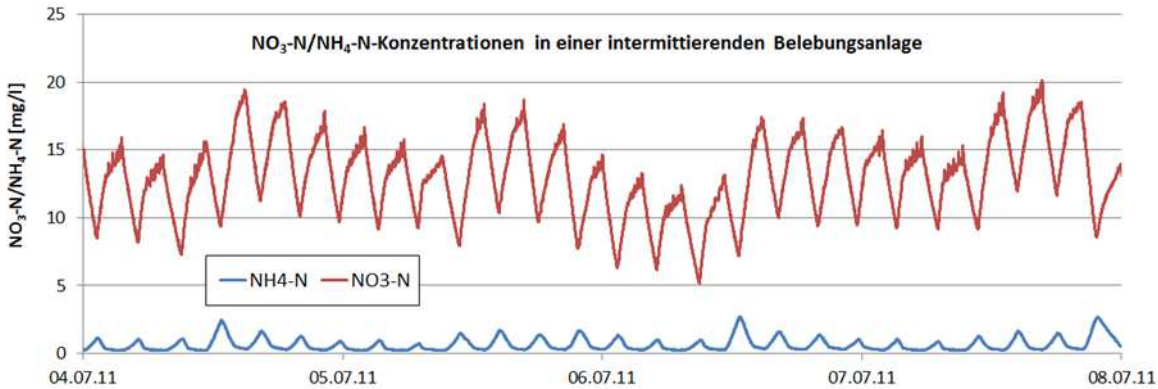


Abb. 3.9: Konzentrationsverlauf für NH_4-N und NO_3-N in einer intermittierenden Belebungsanlage, die mittels Redox-Potenzial und O_2 geregelt wird (Quelle: *Wiese [2013]*).

Bei Investitionskosten für derartige Kombielektroden um ca. 5.000 € ohne MWSt werdem MSR-Konzepte allmählich unwirtschaftlich, die auf Ersatz- oder Indirektparametern (z. B. Redox) basieren, da die dazu erforderlichen Geräte nicht mehr sehr viel günstiger sind. Regelungskonzepte über Ersatzparameter sind zudem meist weniger zuverlässig als die über Direktparameter. Ein gutes Beispiel zeigt hierfür Abbildung 3.9: Das Beispiel zeigt den NO_3-

N/NH_4-N-Konzentrationsverlauf in einer über eine Redox-Regelung betriebenen intermittierenden Kläranlage. Der Kurvenverlauf verdeutlicht, dass die Redox-Regelung unbefriedigende Ergebnisse liefert, da zwar NH_4-N fast immer vollständig abgebaut wird, NO_3-N hingegen im Tagesverlauf stark ansteigt. D. h. hier würde eine Umstellung auf eine Direktparameterregelung über eine ISE-Kombielektrode Verbesserungen erzielen, da die Dauer der Nitrifikations- und Denitrifikationsphase der Belastungssituation angepasst werden kann.

3.3.1.4 Einsatz in der Biogastechnik

Von wenigen Ausnahmen einmal abgesehen (z. B. Spezialfälle in der gewerblich-industriellen Abwasserbehandlung) ist eine kontinuierliche Ermittlung der Ammoniumkonzentration nicht erforderlich. Hinzu kommt, dass die schwierigen messtechnischen Randbedingungen eine Echtzeitbestimmung schwierig machen. So ist zum Beispiel die Gewinnung einer klaren Probe aus einer Gärprobe für eine photometrische Bestimmung mit den am Markt üblichen Vorbehandlungsverfahren in der Regel nicht möglich, zum anderen dürfte die Standzeit der ionenselektiven Elektroden gering sein; bei einem Labortest in 2007 mit einer ionenselektiven Prozesselektrode für Ammonium konnte der Autor mit verschiedenen Proben aus Biogasanlagen keine stabilen Messergebnisse gewinnen, da die Elektrode sehr schnell stark verschmutzte.

3.3.2 Aktivitäts- und Toxizitätstest

Bisher gibt es nur wenige Messgeräte, die in der Praxis eingesetzt werden, um die Aktivität von biologischen Prozessen oder die Toxizität von Stoffen in Echtzeit oder zeitnah zu messen. Toxische Stoffe im Abwasser können die Reinigungsleistung von Kläranlagen stark beeinträchtigen oder gar vollständig zum Erliegen bringen. Da aus einer solchen Störung auch über längere Zeiträume erhebliche Beeinträchtigungen der Einleitgewässer resultieren können, wird schon seit einigen Jahren an derartigen Echtzeitmessgeräten geforscht, um frühzeitig Gegenmaßnahmen einleiten zu können (z. B. automatische Befüllung von Störfall- und Haveriebecken, Zugabe von Aktivkohle). *Inui et al. [2005]* entwickelten einen Biosensor auf Basis von nitrifizierenden Bakterien zur Detektion toxischer Stoffe in Trinkwasser, Abwasser und im Gewässer, der auf der Messung des Sauerstoffverbrauchs beruht. *Jin et al. [2005]* berichten über den Einsatz einer mikrobiellen Brennstoffzelle zur Detektion toxischer Substanzen im Abwasser. Die Autoren sehen den Vorteil in der Geschwindigkeit der Detektion, da bei anderen Verfahren oft ein erheblicher Zeitverzug zwischen Probennahme und Detektion vorhanden ist. Ferner verweisen sie auf die (zeitweise) ungenügende Zuverlässigkeit der bisherigen Toxtest-Verfahren. Durch die Verwendung elektrochemisch aktiver Bakterien in Kombination mit der bio-elektrochemischen Brennstoffzelle glauben die Autoren einen Weg gefunden zu haben, um die Nachteile anderer Verfahren zu eliminieren. *Lee et al. [2005A]* berichten über Versuche mit einem Biosensor auf Basis von Biolumineszenz-fähigen Bakterien zur Detektion toxischer Abwässer. Anschließend erfolgt mit Hilfe einer Kamera und eines Computers eine Bildauswertung, die wiederum die Grundlage für das Analyseergebnis ist; bei dem Verfahren handelt es sich offenbar um ein offline Verfahren. *Okayasu et al. [2005]* entwickelten einen Biosensor zur Detektion toxischer Substanzen, der auf der Hemmung von nitrifizierenden Bakterien beruht. Im Fokus des Interesses stand dabei die zuverlässige Detektion von Kaliumcyanid im Abwasser, sodass bei Gefahr ein Störfallbecken angesteuert werden kann. Im Zuge der seit Jahren weltweit geführten Diskussionen um eine Desinfektion von Kläranlagenabläufen, arbeiten einzelne Forscher auch einer quasi-kontinuierlichen

Detektion von Keimen im Kläranlagenablauf: So berichten etwa *Morikawa et al. [2005]* über die Entwicklung eines Messgerätes zur Bestimmung coliformer Keime im Ablauf von Kläranlagen in weniger als einer Stunde. Dabei wird einer Ablaufprobe zunächst Enzyme (4-methylumbelliferyl-ß-D-galactopyranoside) zugegeben und bei einem konstanten pH-Wert von 7 auf 38 Grad Celsius erhitzt. Danach wird alle 10 Minuten eine Teilprobe in eine alkalische Flüssigkeit gegeben, um die enzymatischen Prozesse zu stoppen; abschließend erfolgt eine Fluroszenzanalyse. Der ganze Prozess wurde automatisiert.

3.3.3 CSB, SAK und TOC

3.3.3.1 Allgemeine Informationen

Der Chemische Sauerstoffbedarf (CSB), der Biologische Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen (BSB_5), der Spektrale Absorptionskoeffizient (SAK) und der Gesamte organische Kohlenstoff (TOC) sind in der Abwassertechnik weit verbreitete Summenparameter für die organische Verschmutzung von Abwasser. Im Labor lassen sich diese Parameter gut bestimmen, wohingegen in der Praxis – besonders im Zulauf – eine Echtzeitbestimmung deutlich schwieriger ist. In der Praxis finden für Spezialfälle jedoch SAK-Sonden sowie TOC-Messgeräte Anwendung. Klassische Anwendungsfelder sind für derartige Messgeräte:

- Beprobung von Sonderbauwerken im Kanalnetz (z. B. Regenüberlaufbecken)
- Ermittlung der Zulaufkonzentrationen und Zulauffrachten
  - Kontinuierliche Zulaufüberwachung
  - Identifikation von gewerblich-industriellen Stoßbelastungen, illegalen Einleitungen o. ä.
  - Bewirtschaftung von Speicher- und Störfallbecken
  - Ansteuerung von automatischen Probenehmern für Rückstellproben
  - Verdichtung der Datengrundlage für Modernisierungs-/Erweiterungsplanungen (meist temporäre Messungen)
  - Führungsgröße für Steuerungs- und Regelungskonzepte (z. B. Belüftungsregelung, Beschickungsprogramme) in nachgeschalteten Reinigungssystemen (z. B. SB-Reaktoren) oder Anaerobreaktoren (z. B. in der anaeroben Industrieabwasserbehandlung)
- Ermittlung der Ablaufkonzentrationen und Ablauffrachten
  - Kontinuierliche Ablaufüberwachung
  - Automatisches Schließen von Klarwasserabzugseinrichtungen bei Nichteinhaltung der Überwachungswerte
  - Detektion von Filterdurchbrüchen

Typische Anwendungsorte sind somit der Zulauf- und Ablaufbereich von Kläranlagen, wobei im Zulauf nach Möglichkeit eine Beprobung nach einer mechanischen Vorreinigung erfolgen sollte. Weiterhin kann man in der Praxis beobachten, dass man sich bei den oben genannten Applikationen in der Regel nicht auf nur eine Messung verlässt, sondern auf eine Kombination verschiedener Messgeräte setzt, um das gesamte Belastungsspektrum abzudecken, wie zum Beispiel:

- Zulauf: Durchfluss, pH, elektrolytische Leitfähigkeit, SAK, TS, NH_4-N, PO_4-P
- Ablauf: Durchfluss, pH, elektr. Leitfähigkeit, SAK, TS, NH_4-N, NO_3-N, PO_4-P, P_{ges}

3.3.3.2 Spektraler Absorptions-Koeffizient (SAK)

Online-SAK-Messungen kommen auf größeren Kläranlagen und zum Teil auch im Kanalnetz zum Einsatz. Sie gehören jedoch nicht zur Standardausrüstung von Kläranlagen, obwohl immer wieder versucht wird, den SAK als Ersatzparameter für den CSB zu etablieren, da einige Untersuchungen zeigen, dass sich der CSB über den SAK (ggf. in Korrelation mit der Trübung/TS) recht gut nachbilden lässt (z. B. *Grüning [2002]*). Für Kanalnetzbeprobungen sind auch ex-geschützte und/oder mobile Messgeräte am Markt verfügbar.

Abbildung 3.10 (Bild 1) zeigt eine temporäre Installation diverser Messgeräte zur kontinuierlichen Beprobung des Kläranlagenzulaufs im Rahmen der Grundlagenermittlung für eine Neubauplanung. Die provisorische Installation besteht aus Messungen für pH, Temperatur, elektrolytische Leitfähigkeit, TS und SAK sowie einen automatischen Probenehmer. Mit derartigen Installationen lassen sich mit einem überschaubaren Aufwand die oftmals schlechten Datengrundlagen auf kleinen Kläranlagen stark verbessern. Durch die lückenlose Erfassung von Daten über mehrere Wochen können die Konzentrationsverläufe und deren Dynamik sowie gewerblich-industrielle Belastungen sehr gut ermittelt werden. Derartige Installationen finden sich als Dauerlösung auch auf größeren Kläranlagen (Abbildung 3.10, Bild 2).

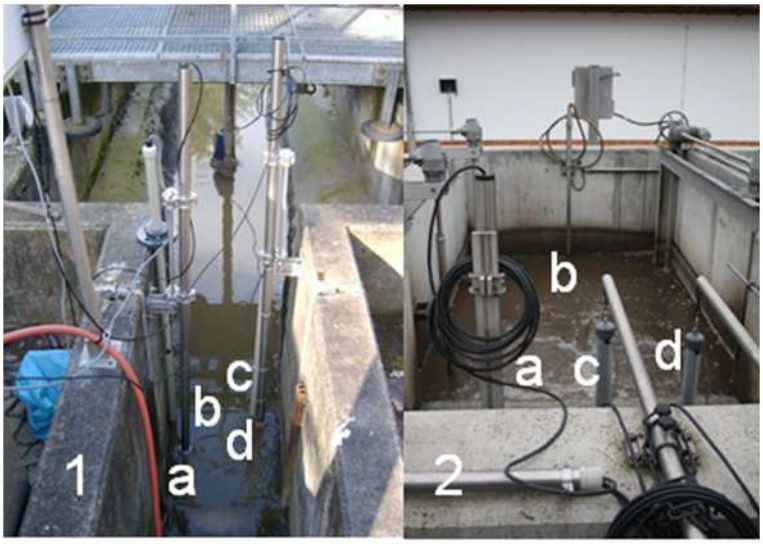


Abb. 3.10: Beprobung im Kläranlagenzulauf: 1 = Temporäre Beprobung mit pH (1a), TS (1b), elektr. Leitfähigkeit (1c) und SAK (1d), 2 = Permanente Beprobung mit SAK (2a), Filtermodul (2b) zur Gewinnung eines Probenstroms für NH_4-N- und PO_4-P-Prozessphotometer, pH (2c) und elektr. Leitfähigkeit (2d) (Bildquellen: Autor)

Abbildung 3.11 zeigt ein Beispiel von SAK-Tagesspektren im Wochenverlauf: Es ist klar erkennbar, dass immer wieder kurze, aber hohe Belastungsspitzen beobachtet werden können; bei korrespondierend genommenen Proben konnten im Labor CSB-Konzentrationen von über 8.000 mg/l ermittelt werden. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass SAK-Messungen sowohl für eine temporäre (z. B. Detektion illegaler Indirekteinleiter) als auch eine dauerhafte (z. B. Bewirtschaftung von Ausgleichsbehältern) Zulaufmessung sinnvoll sein können. Zur mobilen Beprobung verschiedener Messstellen besteht auch die Möglichkeit, diese kompakten Messungen in einen tragbaren Probenehmer einzubauen. Einen solchen mobilen Probenehmer (Abbildung 3.12) hat der Autor bei einem Forschungsprojekt (DBU 17258) eingesetzt. Diese Geräte bestehen aus einer Kompressoreinheit, einer dazugehörigen kleinen SPS zur

Ansteuerung des Kompressors sowie einer SAK-Sonde und einer TS-Sonde mit dazugehörigem Messumformer. Mit Hilfe des Kompressors kann über eine Höhe von mehreren Metern eine Abwasserprobe mit Hilfe eines Probennahmeschlauchs angesaugt werden und nach der Analyse auch wieder zurückgepumpt werden. Die genommene Probe gelangt in eine Messzelle, in der sich die Messöffnungen der SAK- und TS-Sonde befinden. Auf diese Art und Weise ist es möglich, alle etwa 6 Minuten – d. h. ansaugen, messen, ausblasen – eine Abwasserprobe zu analysieren. Der Sampler kostete seinerzeit ca. 20.000 €. Bei der verwendeten SAK-Online-Messung handelt es sich um eine Sonde vom Typ „UVAS plus“ (*Hach Lange [2001A]*), d. h. eine photometrische Sonde (254 nm) auf Basis eines 2-Strahl-Verfahrens, die eine UV-Absorptionsmessung der gelösten organischen Inhaltsstoffe ermöglicht. Der Messbereich liegt zwischen 0 und 1.500 1/m SAK und deckt damit einen großen Messbereich ab. Die TS-Sonden (*Hach Lange [2003C]*) sind baugleich mit denen, die im Abschnitt 3.2.20 beschrieben werden. Das Gerät wurde an verschiedenen Stellen auf der Kläranlage getestet, d. h. im Zulauf, am Vorlagebehälter, am Mengenausgleich im Ablauf und im Ablauf des Filters.

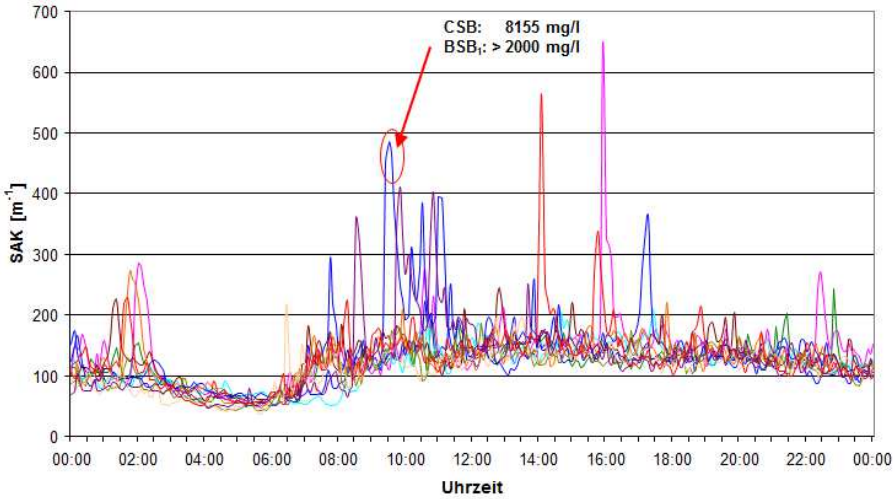


Abb. 3.11: SAK-Tagesspektren im Zulauf einer Kläranlage mit diversen Ausreißerwerten (Bildquelle: Autor)

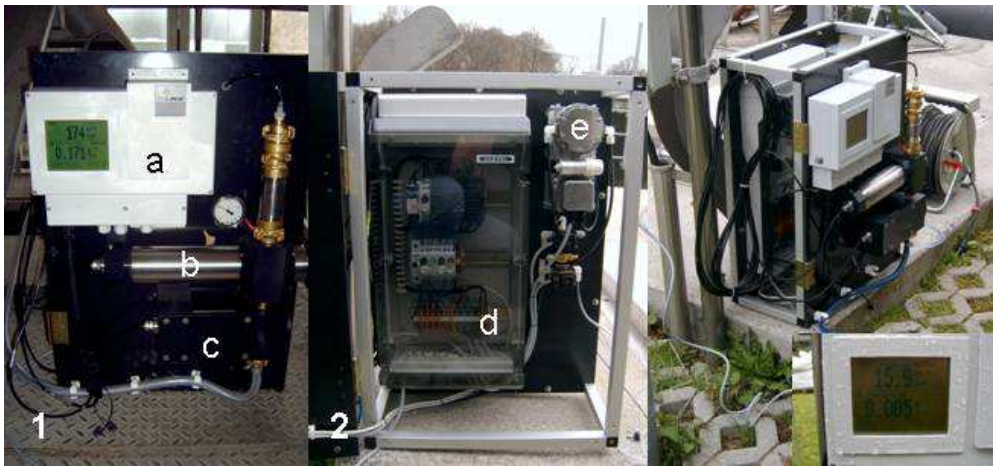


Abb. 3.12: Mobiler Sampler (Fa. Hach Lange): Messumformer (a), SAK-Sonde (b) und TS-Sonde (c), Steuereinheit (d) und Kompressoreinheit (e) (Bildqulle: Autor)

Ein Anwendungsbeispiel für eine derartige Applikation zeigt Abbildung 3.13: Hier wurde der automatische SAK-/TS-Sampler im Ablauf des Flächenfilters einer SBR-Kläranlage installiert, weil es immer wieder zu einem kurzzeitigen Anstieg der CSB-Konzentrationen gekommen ist. Die dargestellten SAK- und TS-Konzentrationen zeigen kurzzeitige Spitzen bei SAK und TS, die auf einen Durchbruch des Flächenfilters zurückzuführen waren. Derartige Messungen können dazu dienen, die Bewirtschaftung derartiger Filter (z. B. Rückspülprogramme) zu optimieren. Die Tabelle 3.2 zeigt eine gute Übereinstimmung der mit Hilfe einer multiplen Regression aus den SAK- und TS-Konzentrationen errechneten CSB-Werten im Ablauf einer Kläranlage mit den korrespondierenden CSB-Laborwerten; d. h. derartige Messsysteme sind in der Lage, die CSB-Konzentration im Ablauf einer Kläranlage zuverlässig zu überwachen.

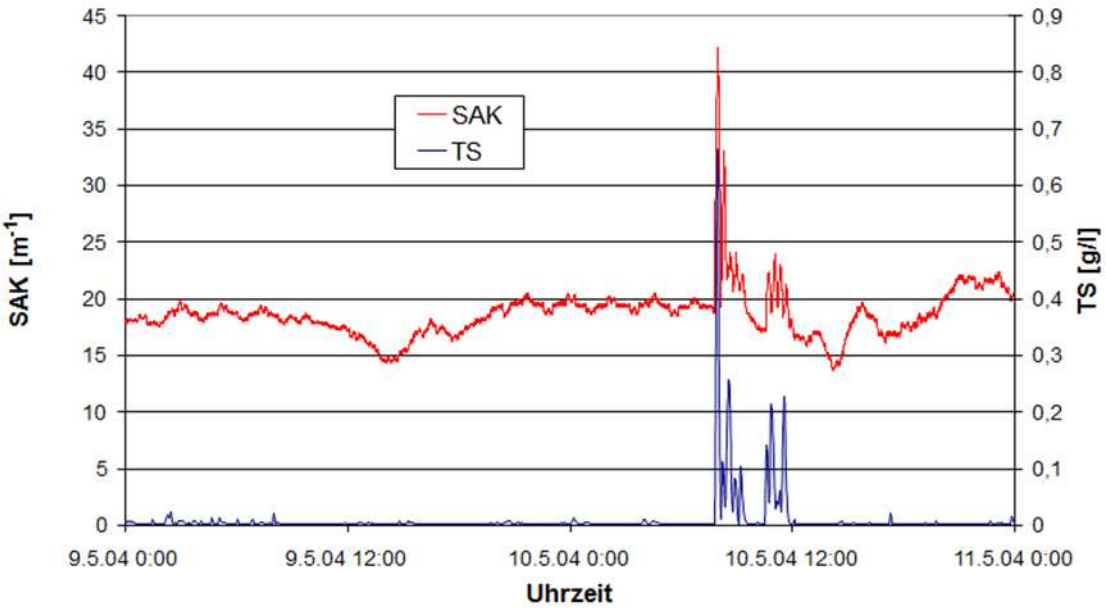


Abb. 3.13: SAK-/TS-Tagesganglinien im Ablauf des Filters einer SBR-Anlage (Quelle: Autor)

Tab. 3.2: Darstellung von CSB-Messungen (Labor) und SAK-/TS-Messungen (online) im Ablauf des Filters bzw. im Ablauf des Mengenausgleichs (Ergebnis einer multiplen Regression: R = 0,938) (Quelle: Autor)

Datum	Uhrzeit	Messort	SAK_{online} [1/m]	TS_{online} [mg/l]	$CSB_{rechn.}$ [mg/l]	CSB_{Labor} [mg/l]
13.04.2004	10:33	Mengenausgleich	27,9	8	35,9	34,3
20.04.2004	10:55	Mengenausgleich	25,8	8	33,8	27,9
03.05.2004	8:48	Mengenausgleich	21,7	3	24,7	21,3
09.05.2004	10:30	Filter	15,9	5	20,9	21,0
13.05.2004	7:42	Filter	22,0	1	23,0	21,0
29.06.2004	10:53	Filter	21,0	6	27,0	26,5
29.06.2004	13:00	Filter	19,4	3	22,4	19,8

3.3.3.3 CSB, BSB und TOC

Einzelne Messgerätehersteller bieten mittlerweile Messgeräte an, die vom Prinzip her ähnlich sind zu den zuvor beschriebenen SAK-Sonden, die aber nicht nur im Bereich von 254 nm messen, sondern das UV/VIS-Spektrum von 220 bis 720 nm scannen. So ist nach Angaben der Fa. *s::can [2011]* das Messgerät „spectro::lyser“ in der Lage, unter anderem NO_3-N, NO_2-N, CSB, BSB, TOC, DOC und SAK zu bestimmen. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass die Werkskalibrierung derartiger Messgeräte oftmals nicht ausreichend ist, um die Vielzahl dieser Parameter auch zuverlässig zu messen. D. h. derartige Messungen sollten sorgsam kontrolliert und ggf. aufgrund umfangreicher Labormessung für die örtlichen Bedingungen kalibriert werden. Für große Kläranlagen oder gewerblich-industrielle Abwasserreinigung kann im Einzelfall auch der Einsatz von TOC/N_{ges}/P_{ges}-Analysatoren sinnvoll sein, die je nach Ausstattung und Verfahren eine Vielzahl von Parametern quasi-kontinuierlich bestimmen können. So ist der Online-Analysator „Biotector B7000“ (*Hach Lange [2011B]*) nach Herstellerangaben in der Lage, mittels eines zweistufigen Oxidationsprozesses und eines IR-Detektors die Parameter TIC, TC, VOC, BSB, CSB, N_{ges}, P_{ges} und PO_4-P zu bestimmen, wobei mit einer speziellen Probenvorbereitung auch eine Beprobung des Zulaufs möglich sein soll. Je nach Ausstattung kosten derartige Geräte zwischen 35.000 und 60.000 €; hinzu kommt die Probenvorbereitung (5.000 bis 15.000 €). Diese Preise verdeutlichen, dass derartige Messgeräte nur in Spezialfällen zur Anwendung kommen.

3.3.3.4 Einsatz in der Biogastechnik

Es gibt immer wieder Versuche, den CSB und TOC auch in der Biogastechnik zu etablieren, unter anderem weil auch das weit verbreitete Anaerobmodell IWA-ADM 1 (z. B. *Batstone et al. [2002]*) auf einem CSB-Ansatz basiert. Über die universitäre Forschung sind derartige Versuche aber nicht hinausgekommen, da in der Praxis die zuverlässige CSB-Bestimmung einer Vielzahl von Gärsubstraten (z. B. Maissilagen) nur schwer möglich ist. Etwas anders sieht die Situation im Bereich der gewerblich-industriellen anaeroben Abwasserbehandlung aus, wo die zuvor genannten Messgeräte durchaus in Einzelfällen Anwendung finden, da die Bestimmung dieser Parameter in den meist flüssigen Medien sehr viel einfacher möglich ist.

3.3.4 Druck

Die Messung des absoluten Drucks sowie von Druckdifferenzen spielt in der Abwasser- und Biogastechnik eine wichtige Rolle. Eine unvollständige Liste umfasst folgende Applikationen:

- Drucksensoren in Flüssigkeiten:
  - Drucksensor als Füllstandsmessung in Behältern und Reaktoren
  - Drucksensor nach und ggf. auch vor Pumpen zur Überwachung und zwecks Vermeidung von Druckstößen o. ä.
  - Drucksensoren in Rohrleitungen
  - Differenzdruckverfahren zur Ansteuerung der Reinigungseinrichtungen von Rechen
- Drucksensor in Gasen:
  - Drucksensor als Über-/Unterdrucküberwachung im Gasraum von Anaerobreaktoren
  - Drucksensor in Gasleitungen zwecks Überwachung oder zur Ansteuerung von Verdichtern o. ä.

- Drucksensoren in der Druckluftversorgung
- Drucksensoren in Belüftungsleitungen von Belebungsanlagen

Eine Übersicht über einige dieser Applikationen zeigen die Abbildungen 3.14 und 3.15. Bei diesen Messgeräten handelt es sich um Standardanwendungen, die in vielen Branchen im Einsatz sind; Besonderheiten sind nur in Einzelfällen (z. B. Ex-Schutz-Anforderungen) zu beachten. Aus diesem Grund wird bezüglich technischer Details zur Druckmesstechnik auf die weiterführende Literatur verwiesen (z. B. *Früh et al. [2009]* und *Gevatter [1999]*).

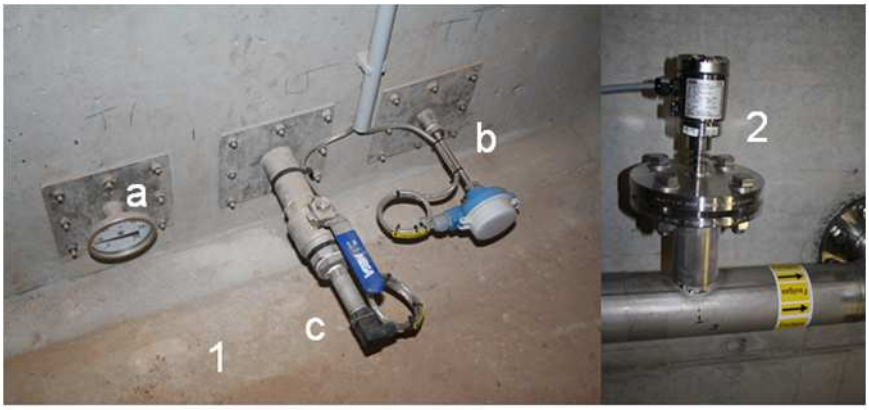


Abb. 3.14: Temperatur- und Druckmessgeräte in der Anaerobtechnik: 1 = Biogasfermenter (1a = Analogthermometer, 1b = Digitalthermometer, 1c = Druckmessgerät als Füllstandsmessung) (Fa. Endress+Hauser), 2 = Druckmessgerät in einer Biogasleitung (Fa. ABB) (Bildquelle: Autor)

Abb. 3.15: Applikationen für Druckmessungen im Biogassektor: 1 = Schauglas eines Fermenters mit installierten Drucksensor (1a) (Über-/Unterdruck zwecks Gasraum-Überwachung, Fa. WIKA) und Grenzfüllstandsmessung (1b) (Fa. Endress+Hauser), 2 = Drucküberwachung nach einer Drehkolbenpumpe, 3 = Druckluftstation zur Versorgung pneumatischer Schieber einer zentralen Pumpstation, 4 = analoge Druckmessung in einer Brauchwasserleitung (Bildquellen: Autor)

3.3.5 Durchfluss (Flüssigkeit)

3.3.5.1 Allgemeine Informationen

Die Messung von Durchflüssen bei Flüssigkeiten ist sowohl in der Abwassertechnik als auch der Biogastechnik von großer Bedeutung, wobei es sich in der Regel um Standardanwendungen handelt, die in vielen Branchen in ähnlicher Form im Einsatz sind (Tabelle 3.3). Aus diesem Grund wird bezüglich technischer Details zur Durchflussmesstechnik von Flüssigkeiten auf die weiterführende Literatur verwiesen (z. B. *Früh et al. [2009]* und *Gevatter [1999]*). Für einen umfassenden Überblick über Durchflussmessungen sei auch auf *Brucker et al. [2008]* verwiesen, der nicht nur einen Überblick über die verschiedenen Messverfahren gibt, sondern auch auf Sicherheitsaspekte, Kalibriermethoden, Auswahlkriterien, Messfehler und Entwicklungstrends eingeht.

In den letzten Jahren setzen sich in der Abwasser- und Biogastechnik zunehmend induktive Durchflussmessungen durch, da es sich nicht nur um ein erprobtes und kostengünstiges Messverfahren handelt, sondern sich diese Messgeräte auch meist relativ einfach in Rohrleitungen einrüsten bzw. nachrüsten lassen. Lange Zeit in der Abwassertechnik dominate Ultraschallmessungen (z. B. auch in Kombination mit einem Messwehr) werden hingegen heute weniger verbaut, zumal sie sich für bestimmte Anwendungen auch nicht eignen (z. B. Durchflussmessung für Überschussschlamm). Schwebekörpermessungen sind in der Dosiertechnik (z. B. Fällmittel) weit verbreitet, wobei in der Regel nur als optische Anzeiger und nicht als dokumentierende, alarmierende oder schaltende Messgeräte. Optische Durchflussmessverfahren (siehe Abschnitt 3.7.3) sind eher Stand der Forschung.

Durchflussmessungen auf SBR- und Biogasanlagen lassen sich oft mit einfachen Mitteln auf Genauigkeit überprüfen: Da in den meisten Behältern derartiger Anlagen kontinuierliche Füllstandsmessungen installiert und die Behälterabmessungen in der Regel bekannt sind, so kann eine gemessenen Durchflussmenge über die korrespondierende Niveauänderung in dem entleerten und/oder beschickten Behälter verglichen werden. Diese Überprüfung funktioniert dann sehr gut, wenn größere Mengen gepumpt werden und/oder das Breiten-Höhen-Verhältnis des Behälters nicht zu groß ist. Hierzu ist es jedoch erforderlich, dass während der Versuche nicht noch weitere Zu- oder Abflüsse erfolgen (z. B. Einlaufpumpwerk kurzfristig ausschalten).

Tab. 3.3: Messverfahren zur Bestimmung des Durchflusses (Flüssigkeiten): X = bedeutsam, (X) = in Einzelfällen relevant, - = i.d.R. keine Bedeutung (Quelle: Autor)

Messverfahren	Abwassertechnik	Biogastechnik
Ultraschall-Durchflussmessung	X	-
Induktive Durchflussmessung	X	X
Schwebekörper	X	(X)
Optische Verfahren	(X)	-

Abb. 3.16: Durchflussmesseinrichtungen auf Kläranlagen: Ultraschall-Messung mit Venturi-Messwehr im Kläranlagenablauf (1), MID-Messung (Promag, Fa. Endress+Hauser) im Kläranlagenzulauf (2), MID-Messung (Promag, Fa. Endress+Hauser) in der Überschussschlammleitung (3) (Bildquellen: Autor)

3.3.5.2 Einsatz in der Abwassertechnik

Durchflussmessungen für Flüssigkeiten kommen in der Abwassertechnik an verschiedenen Stellen zum Einsatz. Eine unvollständige Liste umfasst folgende Applikationen:

- Erfassung der Zulaufmenge (Abbildung 3.16, Bild 2)
- Erfassung der Ablaufmenge (Abbildung 3.16, Bild 1)
- Erfassung der Rücklaufschlammmenge (nicht bei SBR)
- Erfassung der Überschussschlammmenge (Abbildung 3.16, Bild 3)
- Erfassung interner Volumenströme (z. B. im Bereich der Schlammbehandlung)
- Erfassung von Dosiermengen (z. B. Fällmittel, Flockungshilfsmitteln) (Abb. 3.17, Bild 1)

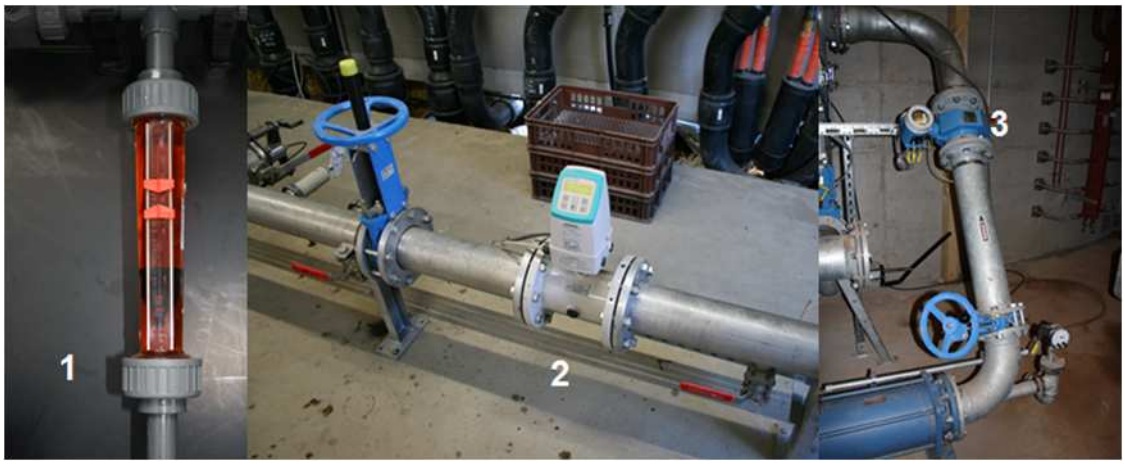


Abb. 3.17: Durchflussmessungen auf Kläranlagen- und Biogasanlagen: 1 = Schwebekörper-durchflussmesser in einer Fällmitteldosierstation, 2 = MID-Durchflussmessung (Fa. Siemens), 3 = schräg verbaute Durchflussmessung (Fa. Endress+Hauser) (Bildquellen: Autor)

3.3.5.3 Einsatz in der Biogastechnik

Durchflussmesseinrichtungen für Flüssigkeiten kommen in der Biogastechnik an verschiedenen Stellen zum Einsatz (Auswahl):

- Erfassung der dosierten flüssigen Wirtschaftsdünger (Gülle)
- Erfassung der dosierten flüssigen Kosubstrate
- Erfassung der Volumenströme in Pumpstationen (Abbildung 3.17, Bilder 2 und 3)
- Erfassung der abgegebenen Gärreste (siehe Abschnitt 8.8.11)

3.3.6 Durchfluss (Gas)

Die Durchflussmessung von Gasen ist in der Biogastechnik von zunehmender Bedeutung; in der Abwasserreinigung nur dort, wo auch eine anaerobe Vorbehandlung oder eine anaerobe Klärschlammbehandlung stattfindet, sodass ein entsprechender Klärgasanfall auftritt. Für einen umfassenden Überblick über Durchflussmessungen sei auch auf *Brucker et al. [2008]* verwiesen, der nicht nur einen Überblick über verschiedene Messverfahren gibt, sondern auch auf Sicherheitsaspekte, Kalibriermethoden, Auswahlkriterien, Messfehler und Entwicklungstrends eingeht. Gasvolumenzähler entwickeln sich auf Biogasanlagen immer mehr zu einer Standardausrüstung, wie zum Beispiel auch die Untersuchungen von *Rieger und Weiland [2006]* verdeutlichen. Begünstigt wird dieser Trend auch dadurch, dass die Gasvolumenzähler heute in der Regel zum Standardlieferumfang der BHKW-Lieferanten gehören und damit nicht mehr wie früher individueller Kundenwunsch sind, auf den entweder aus Kostengründen verzichtet wurde oder weil es schlichtweg bei der Planung (z. B. wegen Schnittstellenproblemen) vergessen wurde. Anhand des Absolutwertes und der Dynamik des Messsignals können diverse Rückschlüsse auf den Prozess gezogen werden:

- Beurteilung des Wirkungsgrades von Gasmotoren
- Abgleich zwischen dem theoretischen und dem tatsächlichen Gasbildungspotenzial
- Rückschlüsse über den Prozessverlauf

Abbildung 3.18 zeigt drei Messgeräte bzw. Messprinzipien, die in der Anaerobtechnik in den letzten Jahren weite Verbreitung gefunden haben. Derartige Systeme werden von den verschiedensten Messgeräteherstellern angeboten. *Keitlinghaus [2011]* und *Vaßen [2012]* geben eine Übersicht über die Vor- und Nachteile von Gasdurchflussmessungen auf Biogasanlagen. Weitere Informationen können auch dem *ATV-DVWK-Merkblatt M 263 [2003]* entnommen werden.

Abb. 3.18: Gasdurchflussmessungen: 1 = Thermische Messverfahren (Fa. Binder), 2 = oszillierendes Messverfahren (Fa. Esters), 3 = Staudrucksonde (Fa. ABB) (Bildquellen: Autor)

Rieger und Weiland [2006] weisen jedoch darauf hin, dass der Gasvolumenstrom nur bedingt aussagekräftig ist und in Kombination mit der Gasanalyse zu sehen ist. Der Autor dieser Arbeit sieht den Gasdurchfluss ebenfalls nur als einen Mosaikstein bei der Beurteilung einer Biogasanlage; dies gilt besonders, wenn man auf der Gasvolumenstrommessung aufbauend Energie- und Massenbilanzen aufbauen will.

3.3.7 Elektrolytische Leitfähigkeitsmessung

3.3.7.1 Allgemeine Informationen

Die elektolytische Leitfähigkeit ist der Kehrwert des elektrischen Widerstandes einer Flüssigkeitssäule und in einigen Branchen (z. B. Chemieindustrie) als Prozessparameter weit verbreitet. Informationen zu den Grundlagen, dem Messprinzip, den Messsensoren und der Messgenauigkeit gibt *Gevatter [1999]*. Da die Leitfähigkeit nicht nur von der Konzentration an Ionen, sondern auch von der Temperatur abhängig ist, erfolgt in der Regel eine Temperaturkompensation.

3.3.7.2 Einsatz in der Abwassertechnik

Die Messung der elektrolytischen Leitfähigkeit ist auf Kläranlagen nach wie vor weit verbreitet, wobei auf vielen Kläranlagen eine Bestimmung nicht nur im Rahmen der routinemäßigen Laboranalytik, sondern auch online im Prozess erfolgt. Im Bereich der online-Messungen wird die elektrolytische Leitfähigkeit vielfach sowohl im Kläranlagenzulauf (Abbildung 3.19) als auch Kläranlagenablauf bestimmt, zumal dieser Parameter günstig zu messen ist und die Messgeräte robust sind. Anhand des Absolutwertes und der Dynamik des Messsignals können zahlreiche Rückschlüsse gezogen werden, wie zum Beispiel:

- Unterscheidung zwischen Trockenwetter und Regenwetter (Abbildung 3.20)
- Verläufe von Trockenwettertagesgängen
- Indirekte Rückschlüsse auf Konzentrationsverläufe
- Rückschlüsse auf gewerblich-industrielle Indirekteinleitungen
- Rückschlüsse über den Prozessverlauf bei der Abwasserreinigung

Abb. 3.19: pH, elektrolytische Leitfähigkeit und Temperatur in Ex-Schutz-Ausführung (1) mit Messumformern (2) in einem Rechengebäude (Fa. Endress+Hauser); pH, elektrolytische Leitfähigkeit und Temperatur in Freiluftanordnung (4) mit Messumformern (3) (Fa. Hach Lange) (Bildquellen: Autor)

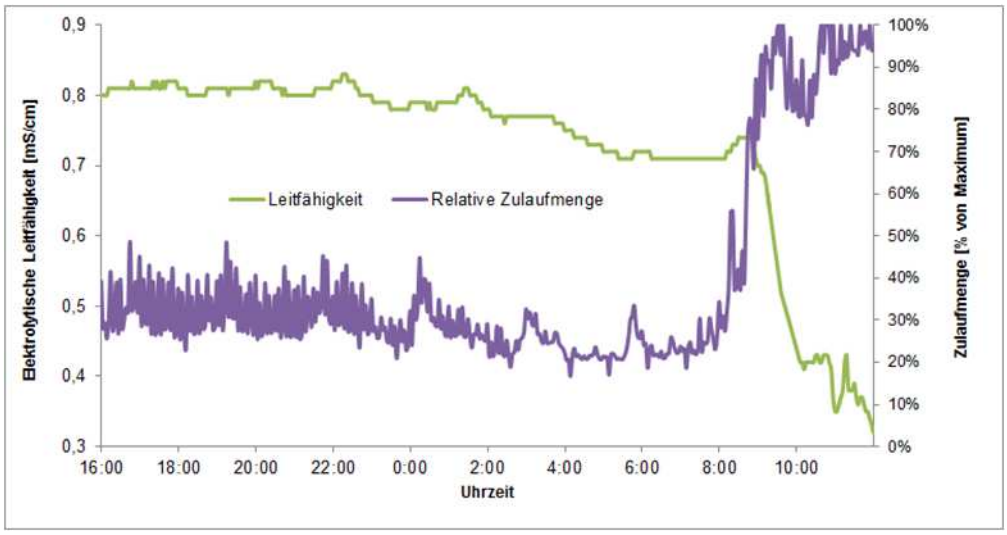


Abb. 3.20: Exemplarischer Verlauf von Messwerten für elektrolytische Leitfähigkeit und Durchfluss im Zulauf zu einer Kläranlage vor und unmittelbar nach Beginn eines Niederschlagsereignisses (Bildquelle: Autor)

Eine sichere Interpretation der Messwerte wird durch das Hinzuziehen von weiteren Messgrößen (z. B. Temperatur, pH-Wert) erleichtert, sodass in den meisten Fällen eine elektrolytische Leitfähigkeitsmessung in Kombination mit anderen (Indirektparameter-)Sensoren eingesetzt wird; in Einzelfällen steuert eine Leitfähigkeitmessung auch einen automatischen Probennehmer an, um zum Beispiel illegale Einleitungen zu detektieren. Mit zunehmender Verbreitung von Direktmessungen (SAK, NH_4-N, NO_3-N, PO_4-P) verliert die elektrolytische Leitfähigkeit im täglichen Betrieb aber immer mehr an Bedeutung: Die Kläranlagenmitarbeiter bestimmen diesen Messwert zwar nach wie vor – zum Teil auch aufgrund behördlicher Vorgaben – im Labor und Prozess, ziehen daraus aber keine Rückschlüsse für den Anlagenbetrieb. Dies gilt besonders, weil die elektrolytische Leitfähigkeitsmessungen für Überwachungszwecke zwar in der Regel an die Prozessleitsysteme bzw. Datenarchive angebunden sind, aber nur in Ausnahmefällen auch eine Einbindung in ein Steuer- und Regelkonzept erfolgt. In den letzten Jahren haben einzelne Forscher immer wieder versucht, die elektrolytische Leitfähigkeit in Kombination mit anderen Indirektparametern zur Steuerung und Regelung von Abwasserreinigungsprozesses einzusetzen: So berichten zum Beispiel *Aguado et al. [2005B]*, *Barat et al. [2008]* und *Kishida et al. [2008]* über die Einbindung der elektrolytischen Leitfähigkeit in Mess- und Automationskonzepte zur Optimierung der biologischen Phosphorelimination; derartige Betrachtungen sind zurzeit jedoch auf den Labormaßstab begrenzt.

3.3.7.3 Einsatz in der Biogastechnik

Die elektrolytische Leitfähigkeit ist ein Parameter, der in der Biogastechnik lange Zeit kaum genutzt wurde, nun aber zunehmend Beachtung findet. Diese Entwicklung wird dadurch begünstigt, dass verschiedene Autoren den Nutzen dieses Parameters in der Anaerobtechnik propagieren (z. B. *Baumann [2006]*, *Scherer [2008A]*). Auch wenn bisher eine Bestimmung der elektrolytischen Leitfähigkeit nahezu ausschließlich im Labor oder über Handmessgeräte erfolgt, so sieht der Autor dieser Arbeit auch Anwendungsmöglichkeiten für online-Messgeräte zur Bestimmung der elektrolytischen Leitfähigkeit auf einer Biogasanlage:

- Nach *Baumann [2006]* liegt der optimale Bereich beim Anaerobprozess bei 18 bis 20 ms/cm. Eine sich langsam anbahnende Störung des Biogasprozesses kann daher durch eine regelmäßige Labormessung der elektrolytischen Leitfähigkeit erkannt werden. Bei der in Abschnitt 10.1.8 beschriebenen Prozessstörung konnte der Autor dieser Arbeit durch Kontrollmessungen der elektrolytischen Leitfähigkeit die Erkenntnisse von *Baumann [2006]* im Wesentlichen bestätigen.
- Online-Prozessüberwachung: Das Beispiel aus Abschnitt 10.1.8 verdeutlicht aber eine Schwachstelle, denn die Praxis zeigt, dass bei Laboranalyseintervallen von meist deutlich mehr als zwei Wochen Ereignisse auftreten können, die innerhalb von nur wenigen Tagen zur Prozessstörung führen können. Aus diesem Grund wurden auf zwei Biogasanlagen in 2007 (siehe Kapitel 10) online-Messgeräte zur Bestimmung der elektrolytischen Leitfähigkeit eingesetzt (*Wiese et al. [2008]*): Hier konnten sehr gute Ergebnisse beobachtet werden, wobei auf einer der Anlagen eine gute Korrelation zur Pufferkapazität (TAC) beobachtet werden konnten (siehe Abschnitt 10.2.5).
- Überwachung der Dosierung: Die Praxis zeigt, dass es flüssige Substrate gibt, die besser nicht in größeren Mengen dem Prozess zugeführt werden sollten. Über die elektrolytische Leitfähigkeit lassen sich z. B. Silagesickersäfte mit hohen Konzentrationen organischer Säuren und niedriger Pufferkapazität identifizieren (siehe Abschnitt 10.2.2).

Bei der in Abbildung 3.29 dargestellten Messung handelt es sich um eine Messung vom Typ 3700 sc (*Hach Lange [2005A])* einer digitalen, induktiven Leitfähigkeits-Sonde, die bei der in Kapitel 10.2 vorgestellten Anwendung zum Einsatz kam. Diese Messung wurde auf der in Kapitel 10.2.5 beschriebenen Anlage zusammen mit einer TS-Messung, Redox- und pH-Elektrode in der zentralen Pumpstation der Biogasanlage installiert, sodass sowohl die Vorgrube als auch der Fermenter und Nachgärer beprobt werden konnten. Die Leitfähigkeitsmessung hat sich dabei als robustes und zuverlässiges Messgerät erwiesen.

3.3.8 Filtrationsverfahren

3.3.8.1 Allgemeine Informationen

Für verschiedene Messgeräte in der Abwassertechnik – insbesondere für Prozessphotometer für Ammonium und Phosphat – ist es erforderlich, die Probe vor der Analyse zu filtrieren. Bis zum Ende der 1990er Jahre war es üblich, Ultrafiltrationen einzusetzen, um einen partikelfreien Probenstrom zu erzeugen. Diese Form der Probenvorbereitung war aber sowohl bezüglich der Investitionskosten als auch der Betriebskosten sehr aufwändig. Innerhalb weniger Jahre haben sich daher bei Prozessphotometern vorgeschaltete Membranfiltrationen durchgesetzt, die deutlich günstiger und weniger wartungsintensiv sind. Da es beim Einsatz dieser Verfahren in SBR-Anlagen einige Besonderheiten zu beachten gilt, soll daher nachfolgend auf diese Probenahmentechnik eingegangen werden.

3.3.8.2 Membranfiltration

Der Autor hat auf zwei SBR-Anlagen Erfahrungen mit derartigen Membranfiltrationen sammeln können: In beiden Fällen kamen dabei Membranfiltrationen vom Typ „FILTRAX“ (Fa. *Hach Lange [2010]*) zum Einsatz; dabei wurde jeweils pro Reaktor eine Membranfiltration installiert. Bei diesem Gerät handelt es sich um ein sogenanntes automatisches in-situ-Probenfiltrationssystem. Es besteht aus einem Modulträger (Abbildung 3.21), der in das zu beprobende

Medium eingetaucht wird und in dem zwei Membranplatten eingesteckt werden sowie einer Steuereinheit. In der Steuereinheit befinden sich zwei Schlauchmotorpumpen, eine Durchflussmessung zur Ermittlung des geförderten Permeatstroms, ein Kompressor und eine Heizung. Modulträger und Steuereinheit sind über einen beheizten Saugschlauch von bis zu 5 m Länge verbunden. Während der Kompressor jeweils eine der Membranplatten mit Druckluft spült, zieht jeweils eine Schlauchmotorpumpe aus der anderen Membranplatte das Permeat ab und fördert es zur Steuereinheit. Nach einer frei programmierbaren Dauer erfolgt der Wechsel. Von der Steuereinheit wird dann der Permeatstrom, wiederum mit Hilfe der Schlauchmotorpumpen zu den Prozessphotometern transportiert. Der Transport erfolgt in einem beheizten Schlauch. Für den Einsatz in einem SB-Reaktor wurde dabei eine besondere Form der Befestigung gewählt: Es wurde eine Konstruktion entwickelt, die aus einem Schlitten besteht, der an zwei vertikalen Rohren mittels einer händisch zu betätigenden Seilwinde hoch und runter bewegt werden kann (Abbildung 3.21, Bild 2). Die gesamte Konstruktion wurde an die Wartungsplattformen oberhalb der Reaktoren montiert, sodass die Winde und der Modulträger einfach zugänglich sind (Abbildung 3.21, Bild 3). An den Schlitten wurde der Filtermodulträger montiert. In der oberen Endlage können die Filtermodule zwecks Reinigung von der Wartungsplattform aus dem Filterträger herausgezogen werden. In der unteren Endlage befindet sich die Oberkante der Membrane ca. 2,80 m über der Beckensohle, sodass diese auch bei einem Mindestwasserstand im Reaktor von etwa 3 m nicht trockenfallen können. Aufgrund dieser Konstruktion müssen die Schlauchmotorpumpen eine Saughöhe von bis zu 4 m überwinden. Um dies zu erreichen, wurden die Schlauchmotorpumpen dauerhaft im Hochlastmodus (Drehzahl: 130 % der Normaldrehzahl) betrieben. Der Permeatfluss, den die Schlauchmotorpumpen fördern, hängt primär davon ab,

- wann die Membranen das letzte Mal gereinigt wurden,
- der Nutzungsdauer der Schläuche und Schlauchkassetten, die in die Schlauchmotorpumpen eingelegt werden
- und dem Wasserstand im Reaktor.

Abb. 3.21: Membranfilitration in einem SB-Reaktor als Probennahmegerät: Steuergerät mit zwei Schlauchmotorpumpen und Kompressor (1), Schlitten für den Filtermodulträger bei maximaler Absenkung (2), Schlitten in der oberen Endlage zwecks Reinigung der Filtermodule (3), Filtermodul (4) (Fa. Hach Lange) (Bildquellen: Autor)

Je nach Kombination dieser Faktoren beträgt der Permeatstrom zwischen 500 und 2.000 ml/h, wobei ca. 500 ml/h noch ausreichend sind, um zwei in Reihe geschaltete NH_4-N-und PO_4-P-Prozessphotometer zu versorgen. Die Investitionskosten für derartige Filter betragen etwa 5.000 € netto. Hinzu kommen die Kosten für die zuvor beschriebene Beckenrand-befestigungen, die je nach Variante weitere ca. 2.000 € netto betragen können.

In den ersten ca. 2 Monaten des Betriebs war es im ersten Testfall erforderlich, alle ein bis zwei Wochen die Membranplatten mit einer 5 %-igen Natriumhypochloridlösung zu reinigen. Danach wurden die Reinigungsintervalle jedoch deutlich länger. Nach etwa einem halben Jahr war eine Reinigung der Filtermodule nur noch alle 1,5 bis 2,0 Monate erforderlich, wodurch der Wartungsaufwand deutlich verringert werden konnte. Neben der Reinigung der Filter-platten musste alle vier Wochen die Verzopfungen entfernt werden, die sich am Filter-modulträger bzw. am Tragseil angelagert hatten. Ferner mussten nach maximal drei Monaten die Schläuche in den Schlauchmotorpumpen ersetzt werden. Im Mittel beträgt der Wartungs-aufwand eines solchen Filtersystems pro Einheit und Monat somit etwa eine Stunde. Inklusive der erforderlichen Verschleiß- und Ersatzteile sowie einer Wartung durch den Hersteller dürften somit die Betriebskosten bei etwa 1.500 € pro Jahr liegen. Der Autor machte die Erfahrung, dass auch beim Ausfall des Kompressors die Schlauchmotorpumpen noch über mehrere Tage – d. h. bis zum Eintreffen des Wartungsdienstes – einen ausreichend hohen Filtratstrom lieferten, um die NH_4-N- und PO_4-P-Prozessphotometer zu versorgen, sodass keine Abschaltung des dynamischen Steuerungs- und Regelungskonzeptes erforderlich wurde. Durch die beheizten Schläuche erwies sich zudem der Winterbetrieb als völlig unproblematisch: In keinem Fall kam es zum Einfrieren der Leitungen. Nachteilig ist jedoch, dass die Filterplatten zwecks Spülung permanent mit Luft versorgt werden: Bei der Installation von „FILTRAX“-Einheiten oder ähnlichen Systemen anderer Hersteller gilt es daher zu beachten, dass der Abstand zwischen dem Dekanter und dem Filtermodul in Luftlinie mindestens 2,5 m betragen sollte, da die permanente Luftspülung der Filter den Sedimentationsprozess des belebten Schlamms kleinräumig behindern kann (Flotations-effekt). Wird der Abstand zwischen Filter und Dekanter zu gering, kann es daher dazu kommen, dass Schlammflocken in den Einzugsbereich des Dekanters gelangen und ggf. eine Klarwasserabzugsregelung auf Basis einer TS-Messung stören können. In diesem Fall bietet es sich an, die Ansteuerung des Kompressors an den Prozess zu koppeln und diesen während der Sedimentations- und Klarwasserabzugsphase abzuschalten. Insgesamt hat sich das verwendete System im Betrieb jedoch gut bewährt. Für zukünftige Generationen von Filtereinheiten wäre es aber hilfreich, wenn man die Pumpenleistung ansteuern könnte: Bei hohen Füllständen im SB-Reaktor könnte dadurch die Drehzahl der Schlauchmotorpumpen deutlich reduziert werden, sodass hierdurch die Betriebskosten (z. B. Verschleißteile wie Pumpenkassetten, Schläuche etc.) reduziert werden könnten.

Fogelman et al. [2009] stellen ein kontinuierliches Membranverfahren für den Einsatz im Bereich der anaeroben Klärschlammbehandlung vor: Die Autoren gewinnen mit dieser Probennahme und -vorbereitung aus einem Wasser-Belebtschlamm-Gemisch mit mehr als 5 % TS eine Probe, die sie anschließend in einem automatisierten Titrator analysieren. Interessant erscheint an diesem Forschungsvorhaben, dass die TS-Konzentration in dieser Applikation in Bereiche kommt, die auch in vielen Rührkessel-Biogasfermentern (oft 5 bis 10 % TS) herrschen. Ob ein derartiges Membransystem aber auch dauerhaft mit den dortigen spezifischen Randbedingungen (z. B. Faserstoffe) fertig wird, muss die Zukunft zeigen.

3.3.9 Füllstand (Flüssigkeiten)

3.3.9.1 Allgemeine Informationen

Die Messung von Füllständen bei Flüssigkeiten ist sowohl in der Abwassertechnik als auch der Biogastechnik von großer Bedeutung, wobei es sich in der Regel um Standardanwendungen handelt, die in vielen Branchen in ähnlicher Form im Einsatz sind. Die Vielzahl am Markt befindlicher unterschiedlicher Messverfahren gestattet oftmals die Lösung eines Messproblems mit verschiedenen Messverfahren. So sind zum Beispiel zur Füllstandsmessung in Reaktoren sowohl hydrostatische Bodendruckmessungen als auch Ultraschallmessungen, Drucksensoren oder Radarmessungen geeignet. Aus diesem Grund wird bezüglich technischer Details zur Füllstandsmesstechnik von Flüssigkeiten auf die weiterführende Literatur verwiesen (z. B. *Früh et al. [2009]* und *Gevatter [1999]*). Für einen umfassenden Überblick über Füllstandmessungen sei auch auf *Heim [2006]* verwiesen, der nicht nur einen Überblick über die verschiedene Messverfahren gibt, sondern auch auf Sicherheitsaspekte, Auswahlkriterien, Messfehler und Entwicklungstrends eingeht.

Abb. 3.22: Füllstandsmessungen auf Kläranlagen: 1 = Schwingsonden-Füllstandsschalter (Grenzfüllstand), 2 = hydrostatische Bodendruckmessung, 3 = Kombination aus Radarmessung (Fa. WEGA) und Grenzfüllstandsmessung (Fa. Endress+Hauser) (Bildquellen: Autor)

3.3.9.2 Einsatz in der Abwassertechnik

Füllstandsmesseinrichtungen für Flüssigkeiten kommen in der Abwassertechnik – besonders auf SBR-Kläranlagen – an verschiedenen Stellen zum Einsatz. Eine unvollständige Liste umfasst folgende Applikationen (Abbildung 3.22):

- Erfassung des Wasserstands im Einlaufpumpwerk und Ansteuerung der Pumpen o. ä.
- Erfassung von Füllständen von Speicherbecken, Störfallbecken o. ä. im Zulauf
- Erfassung von Füllständen in SB-Reaktoren
- Erfassung von Füllständen von Ausgleichsbecken im Ablauf
- Erfassung von Füllständen in peripheren Behältern (z. B. Schlammstapelbehälter)
- Erfassung von Füllständen in Behältern mit Betriebshilfsstoffen (z. B. Fällmitteltank)

- Vermeidung eines Überfüllens von Behältern jeglicher Funktion (Grenzfüllstand)
- Leckageerkennung von Behältern
- Ansteuerung von Entwässerungspumpen

3.3.9.3 Einsatz in der Biogastechnik

Füllstandsmesseinrichtungen für Flüssigkeiten kommen in der Biogastechnik an verschiedenen Stellen zum Einsatz (Auswahl):

- Kontinuierliche Erfassung der Füllstände in Güllebehältern, Lagerbehältern, Hygienisierungsbehältern, Fermentern, Nachgärern und Gärrestlagern (Abbildung 3.14)
- Vermeidung eines Überfüllens von Behältern jeglicher Funktion (Grenzfüllstand) (z. B. Abbildung 3.15 Bild 1)
- Erkennung von Schaumbildung und Schwimmschichten
- Füllstandsmessung in Feststoffdosierbehältern (*Dyes [2008]*)
- Niveauüberwachung von Tauchmotorrührwerken (Abbildung 10.22)
- Leckageerkennung von Behältern, Pumpstationen o. ä.
- Ansteuerung von Entwässerungspumpen (z. B. in Kondensatschächten, Silagesickersafttanks o. ä.)

Eine bebilderte Übersicht über die Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Füllstandsmessverfahren auf Biogasanlagen gibt *Dyes [2008]*.

3.3.10 Füllstand (Gas)

Das Messen des Gasfüllstands ist auf vielen Biogasanlagen und auf Kläranlagen mit Klärgaserzeugung weit verbreitet. Zunächst jedoch zeigten derartige Füllstandsmessungen auf vielen Biogasanlagen oft nur optisch den Füllstand an. In den letzten Jahren wurde aber zunehmend der Mehrwert kontinuierlicher Messungen erkannt:

- Gasfüllstand als Messsignal zur Ansteuerung des BHKW (siehe Abschnitt 9.5.9)
- Indikator für die Gasbildung
- Entscheidungsgrundlage für eine (meist manuelle) Anpassung der Füttermengen

Dabei kommen verschiedene Messverfahren (Auswahl) zum Einsatz:

- Seilzug-Wegesensor: An die Biogasmembran wird ein Seil gespannt, welches mit dem Seilzug-Wegesensor (z. B. *Micro-Epsilon [2007]*) verbunden wird. Durch Veränderung des Gasfüllstands bzw. ein Aufblähen oder Zusammensacken der Gasmembran kommt es zu einer Wegeänderung, die gemessen wird. In der Regel wird dabei das Seil auch durch ein Peilrohr geführt und mit einem Messstab verbunden, sodass der Anlagenbediener auch optisch vor Ort den Füllstand des Gasspeichers sofort erkennen kann.
- Ultraschall: Hier ist das Prinzip ähnlich, jedoch wird an dem Seil ein Gewicht befestigt, das in einem Peilrohr geführt wird; dieses Gewicht dient gleichzeitig der optischen Anzeige. An der unteren Öffnung wird ein Ultraschallsensor installiert, der die aktuelle Position des Gewichtes kontinuierlich erfasst (*Dyes [2008]*).
- Radar: Eine Radarfüllstandsmessung ermittelt die aktuelle Lage der Gasspeichermembran; eventuell vorhandene Tragluftdächer werden elektronisch ausgeblendet, um das Signal

nicht zu verfälschen. Der schwankende Abstand zwischen der variablen Gasspeicherfolie und der fest installierten Radarmessung ist dabei ein Indikator für den aktuellen Füllstand im Gasspeicher (*Dyes [2008]*).

3.3.11 Gasanalyse

3.3.11.1 Allgemeine Informationen

Gasanalysemesstechnik findet zunehmende Verbreitung auf Biogasanlagen. Hingegen kommen auch auf anaerob stabilisierenden Kläranlagen Gasanalysatoren in der Regel nicht zum Einsatz, da hier aufgrund der verfahrenstechnischen Randbedingungen regelmäßige Messungen mit Handmessgeräten ausreichend sind und der wirtschaftliche Vorteil einer Echtzeitmessung aufgrund der oft geringen Baugröße (z. B. 80 kW_{el}) der Gasmotoren begrenzt ist. Einen Überblick über verschiedene Messverfahren zur Gasanalyse gibt *Gevatter [1999]*.

3.3.11.2 Einsatz in der Biogastechnik

In den letzten Jahren finden online-Gasanalysatoren auf Biogasanlagen trotz Preisen von 5.000 € aufwärts immer mehr Verbreitung, da man durch die Analyse der Gaszusammensetzung Rückschlüsse auf die Prozessstabilität ziehen kann. Abbildung 3.23 gibt ein Beispiel für den Verlauf der Gaszusammensetzung auf einer NawaRo-Biogasanlage über den Zeitraum von einem Jahr; deutlich erkennbar sind die erheblichen Schwankungen. In den letzten Jahren haben sich zahlreiche Hersteller auf die Entwicklung von Biogasanalysatoren spezialisiert. Interessant ist dabei, dass sich zahlreiche Nischenhersteller etablieren konnten, wohingegen sich die großen Mess- und Automationsgerätehersteller auf diesem Gebiet nach wie vor schwertun. Die Messgerätehersteller verfolgen dabei zum Teil unterschiedliche Ansätze bezüglich des Messprinzips, aber auch bezüglich der gemessenen Parameter. So errechnen einzelne Hersteller die CO_2-Konzentration aus der Messung von Methan und Sauerstoff, während andere Hersteller sowohl CO_2 und CH_4 separat messen, sodass vielfach – zur Verwunderung der Anlagenbetreiber – die Summe von CO_2, CH_4 und O_2 deutlich von 100 % abweichen kann. Die meisten Messgeräte geben als Messwerte CH_4, CO_2, O_2 und H_2S aus; einzelne Messgerätehersteller bieten aber auch Nachrüstoptionen für weitere Parameter, wie z. B. Ammoniak und Wasserstoff. Einzelne Messsensoren haben aber nach wie vor Probleme mit der Standsicherheit: *Kühnert [2006]* beschäftigt sich etwa mit der Prozessstabilität von elektrochemischen H_2S-Sensoren bei kontinuierlichen Messungen. Anhand von Beispielen führt er anschaulich aus, dass ein übliches Messintervall von 12 h, welches oft zur Schonung der Sensoren gewählt wird, im Vergleich zur kontinuierlichen Messung nur unzureichende Informationen liefert. Dies gilt im Übrigen auch für die anderen Gaskomponenten.

Endress+Hauser [2013] berichten über das Gasdurchflussmessgerät „Prosonic Flow B 200“, welches mittels Ultraschall nicht nur den Gasdurchfluss, sondern auch den Methangehalt messen kann.

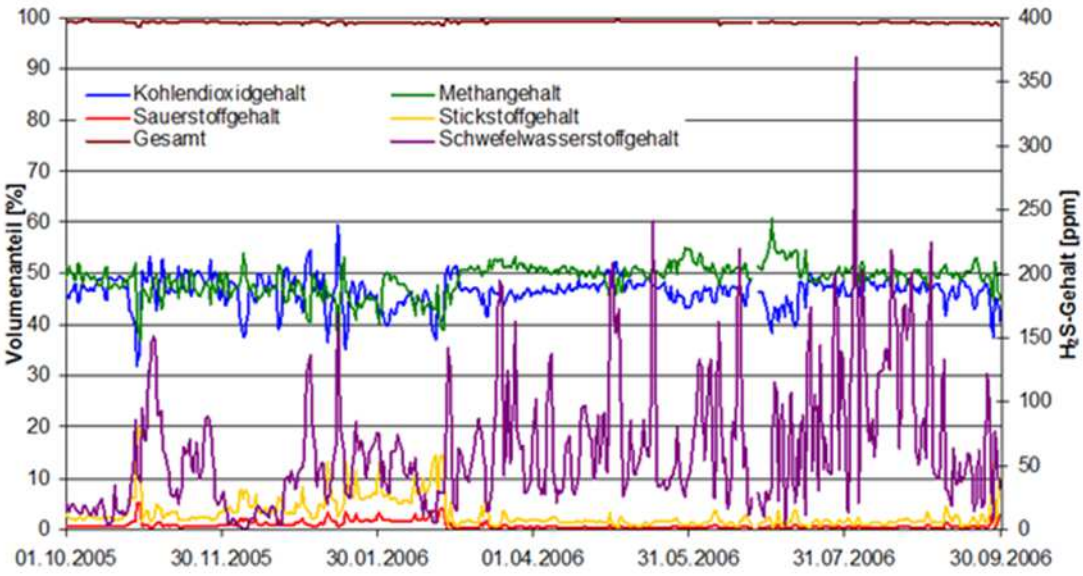


Abb. 3.23: Langzeitverlauf der Biogaszusammensetzung einer NawaRo-Biogasanlage, wobei der CO_2-Gehalt von Messgerät errechnet wurde; der Stickstoffgehalt wurde manuell aus der Sauerstoffkonzentration abgeschätzt (Bildquelle: ASA)

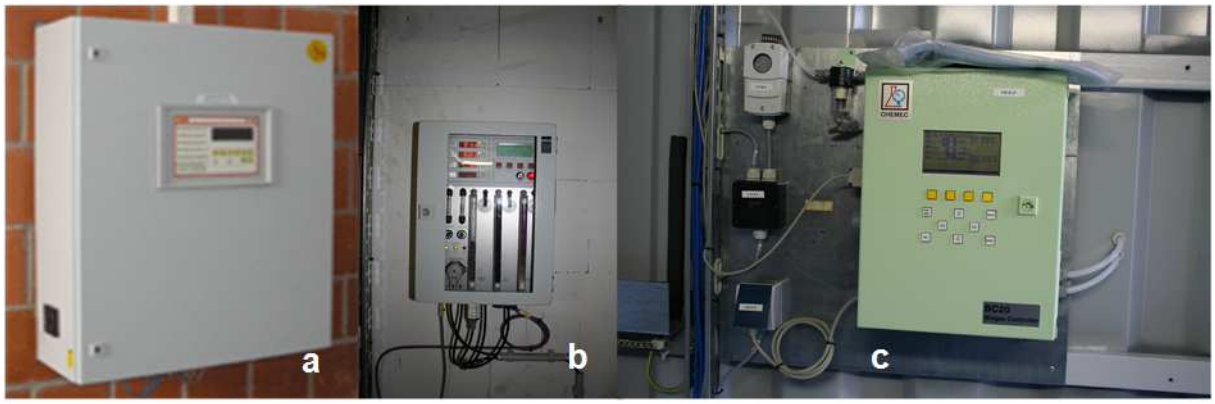


Abb. 3.24: Auswahl von online-Gasanalyse-Geräten: Fa. ExTox (a), Fa. ProNova (b), Fa. Chemec (c) (Bildquellen: Auto)

Für bestimmte Applikationen (z. B. Gasanalyse vor Einspeisung von Biomethan in das Erdgasnetz) kommen vereinzelt auch (eichfähige) Gaschromatographen zum Einsatz, die in Einzelfällen inklusive Einbau über 50.000 € kosten können. *Pöppl [2011]* beschreibt zum Beispiel eine Weiterentwicklung eines Prozess-Gaschromatographen der Fa. RMG: Das Gerät vom Typ „PGC 9300“ kann verschiedenen Anforderungsprofilen im Gassektor angepasst werden; die Biogas-Version wird derart ausgestattet, dass neun Komponenten gemessen werden können (Kohlenwasserstoffe bis Butan, Sauerstoff und Wasserstoff); eine Schwefelmessung soll später nachgerüstet werden. Des Weiteren sind Varianten verfügbar, die bis zu 15 Komponenten analysieren können, z. B. für Erdgas oder Erdgas, dem Biogas beigemischt wird. Letzteres verdeutlicht, dass derartige High-End-Gaschromatographen eher auf Biomethananlagen eingesetzt werden als auf herkömmlichen Biogasanlagen.

3.3.11.3 Forschung und Entwicklung

In den letzten Jahren haben sich zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit der Gasanalyse beschäftigt, wobei unter anderem auch dem Wasserstoff verstärkt Aufmerksamkeit gewidmet wird: *Zosel et al. [2007]* entwickelten einen Wasserstoffsensor für die Flüssigphase von Biogasanlagen. *Brauer und Weiland [2009]* untersuchten die Eignung einer kontinuierlichen Wasserstoffmessung zur Prozessüberwachung von Biogasanlagen: Wasserstoff ist ein Zwischenprodukt zwischen der acetogenen und methanogen Phase (siehe Kapitel 8.2). Dabei liegt dem Einsatz eines Wasserstoffsensors die Erkenntnis zugrunde, dass die Höhe des Wasserstoffpartialdrucks Aussagen über Prozessstörungen zulässt, da bei einem zu hohen Wasserstoffpartialdruck die acetogenen Bakterien gehemmt werden können. Um dies zu verifizieren, führten *Brauer und Weiland* Laborversuche durch. Dabei kam zur Bestimmung der Gaszusammensetzung ein Minigaschromatograph („Minibox“) der Fa. SLS Micro Technology GmbH mit einer Silizium-Glas-Chip-Trennsäule zum Einsatz: Neben Wasserstoff, wurden auch Stickstoff, Methan und Kohlenstoffdioxid bestimmt; des Weiteren wurde im Laborreaktor eine Redox-Elektrode installiert. *Brauer und Weiland* konnten beobachten, dass bei einer Leistungssteigerung von 3 auf 5 kg oTS/($m^3 \cdot d$) der Anaerobprozess instabil wurde, was daran erkennbar war, dass die Wasserstoffkonzentration auf bis zu 1.700 ppm deutlich anstieg bevor die Methankonzentration absank. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass Wasserstoff und Redox geeignete Frühwarnparameter seien: Für Wasserstoff spräche jedoch, dass die Detektion der Störung früher erfolgte (ca. 2 Tage) als beim Redox und dass die Wasserstoffmessung unabhängig von der Substratzusammensetzung ist, während die Redox-Messung eine nahezu konstante(n) Stoffzusammensetzung bzw. pH-Wert voraussetzen würde.

Zosel et al. [2011] berichten über neue Ergebnisse mit Sensorkonzepten zur Bestimmung gelöster Gase in Anaerobreaktoren: Anhand verschiedener Untersuchungen an einer halbtechnischen Laborbiogasanlage verweisen die Autoren auf gute Ergebnisse bei der Bestimmung des gelösten Wasserstoffpartialdrucks im Langzeitbetrieb (Genauigkeit, Standfestigkeit). Des Weiteren kommen die Autoren u. a. zu dem Schluss, dass der Wasserstoffpartialdruck in der gelösten Phase bei einer Fütterung deutlich früher anspricht als der Wasserstoffpartialdruck in der Gasphase.

Weiterhin wird bereits seit Jahren auf dem Gebiet des Einsatzes von elektronischen Nasen zur Detektion unterschiedlicher Gase und Gerüche geforscht. Praxisreife Applikationen sind aber noch nicht am Markt verfügbar, jedoch haben verschiedene Autoren Erfahrungsberichte und Testapplikationen veröffentlicht. So gibt *Krüger [2006]* eine Übersicht über praktische Erfahrungen mit dem Einsatz von elektronischen Nasen zur Bestimmung von Gasen und Gerüchen in Kläranlagen- und Biogasanlagen sowie optischen Sensoren zur Qualitätskontrollen von flüssigen Biokraftstoffen. Bezüglich des Einsatzes einer elektronischen Nase auf Biogasanlagen formuliert er folgende These:

„Biogasanlagen und E-Nasen passen nicht sonderlich gut zusammen, weil nicht in einem begrenzten und definierten Datenraum Messungen gemacht werden sollen (wenige vorkommende Zustände) und weil nicht das Faktum einer Änderung schon werthaltige Information ist. Es werde Sensoren benötigt, die inhärent direkt nutzbare physikochemische Daten liefern.“ (Krüger [2006])

3.3.12 Nitrat

3.3.12.1 Allgemeine Informationen

Der Parameter Nitrat ist nur in der Abwassertechnik von Bedeutung: Zur Vermeidung der Eutrophierung unserer Gewässer ist man heute bemüht, den Stickstoff aus dem Abwasser so weit wie möglich zu entfernen. D. h. das Nitrat, welches aus dem Ammonium bei der Nitrifikation im aeroben Milieu entsteht, zum elementaren Stickstoff umgewandelt werden muss (Denitrikation). Mit einer Nitratmessung kann die Denitrifikationsphase nicht nur überwacht, sondern auch durch Steuerung und Regelung positiv beeinflusst werden (z. B. Anpassung der Denitrifikationsdauer, ggf. Zugabe leicht abbaubarer Kohlenstoffverbindungen). Die typische Messstelle für ein Nitratmessgerät ist daher die Belebungsstufe bzw. der SB-Reaktor. In Einzelfällen kommen aber auch Nitratmessgeräte im Auslauf (z. B. zur lückenlosen Dokumentation der NO_3-N-Konzentration im Kläranlagenablauf von großen Klärwerken) zum Einsatz. In der Abwassertechnik kommen zurzeit überwiegend optische Messverfahren und Ionen-selektive Elektroden (ISE) zum Einsatz, die die frühen Nitratprozessanalysatoren verdrängt haben. Durch die Marktetablierung der kostengünstigen ISE besteht heute die Möglichkeit, auch auf kleineren Kläranlagen (< 10.000 Einwohnerwerte) diesen wichtigen Parameter zu messen.

3.3.12.2 Optische Verfahren

Für die Nitrat-online-Messungen kommt oftmals das Prinzip der UV-Absorptionsmessung zum Einsatz. Ein weit verbreitetes Messgerät ist der Typ „NITRATAX plus“ (*Hach Lange [2001B]*) (Abbildung 3.25), das der Autor bei verschiedenen Applikationen ausführlich getestet hat (u. a. beim DBU-Projekt 17258). Es handelt sich dabei um eine photometrische Sonde (250 nm) auf Basis eines Zwei-Strahl-Verfahrens, die in-situ eine UV-Absorptionsmessung des gelösten Nitrats und Nitrits ohne Reagenzienzugabe ermöglicht. Der Messbereich liegt zwischen 0,1 und 25,0 mg/l NO_X-N und deckt damit einen großen Messbereich ab. Deshalb eignet sich dieser Typ hervorragend für die Messung von Batchprozessen. Der Messzyklus beträgt mindestens 1 min. Die Geräte bestehen aus der eigentlichen Sonde und einem dazugehörigen Messumformer, der zum Beispiel auf der Arbeitsbühne eines SB-Reaktors montiert werden kann. Die Nitrat-Messungen gehörten zur Grundausstattung der KA Messel, auf der das DBU-Projekt 17258 realisiert wurde, und wurden mit einer Beckenrandbefestigung an den beiden Klarwasserabzugseinrichtungen montiert (Abbildung 3.25, Bild 1); d. h. sie schwimmt in diesem Falle mit dem Dekanter mit und misst die NO_x-N-Konzentration kontinuierlich ca. 0,5 m unterhalb des Wasserspiegels. Die Nitratsonden wurden über den analogen 0/4-20 mA-Ausgang an das Prozessleitsystem angeschlossen.

Abb. 3.25: Installation einer Nitratmesssonde (*Hach Lange [2001B])* in einem SBR (1 = Befestigung der Sonde an einer schwimmenden Klarwasserabzugseinrichtung, 2 = Ziehen der Sonde für Reinigungsarbeiten, 3 = Dekanter im entleerten Zustand: a = Pegelsonde, b = TS-Sonde, c = Nitratsonde) (Bildquellen: Autor)

Bezüglich der in Abbildung 3.25 gewählten Montage der Sonden können folgende Vor- und Nachteile aufgeführt werden:

Vorteile:

- Einfache Montage: Die Standardbeckenrandbefestigung kann an den Dekanter angeschweißt werden; der Zeitaufwand hierfür beträgt weniger als 1 h. Es entstehen keine zusätzlichen Kosten für Speziallösungen (z. B. Schwimmbojen mit Führungsgestänge).
- Die Sonde wird immer gut angeströmt.
- Lückenlose Prozessverfolgung: Die Nitratkonzentration wird in allen Phasen des SBR-Zyklus kontinuierlich gemessen.
- Daher erfasst die Sonde auch die Nitratkonzentration im Ablauf der Reaktoren (und damit im Ablauf der Kläranlage) und kann daher sehr gut für Überwachungs- und Bilanzierungszwecke (z. B. auch zur Ermittlung der Nitratfracht) genutzt werden.

Nachteile:

- Sofern die Reaktoren (nahezu) voll gefüllt sind, können die Sonden von der Wartungsplattform über dem SBR von einer Person gezogen und gewartet werden. Bei geringem Füllstand ist dies aber nicht möglich. In diesem Fall muss eine Person auf den Dekanter steigen und die Sonde ziehen; aus Arbeitssicherheitsgründen muss dabei eine weitere Person zur Absicherung anwesend sein; hieraus können Zusatzkosten resultieren.
- Die Kabelführung der Sonden erfolgte ursprünglich nach dem Vorbild der Kabelführung der Versorgungskabel des Dekanters. Diese Methode hat sich nicht bewährt, da es sich gezeigt hat, dass die dünnen Sondenkabeln (im Gegensatz zu den sehr viel dickeren Versorgungskabeln) sehr empfindlich auf Zug reagieren, sodass zwei Sondenkabel durchtrennt wurden, da diese bei hohem Füllstand und ungespannten Kabel an einer Schraube

o. ä. hängen blieben und von dem Gewicht des Dekanters (ca. 300 kg) während des Dekantierprozesses dann gekappt wurden. Solche Schäden sind nicht nur mit Kosten verbunden, sondern führen ggf. auch zum (meist mehrtägigen) Ausfall einer auf dieser Sonde aufbauenden Regelungsstrategie. Um diesbezüglich Abhilfe zu schaffen, wurden besonders gefährdete Kabel in den kritischen Bereichen in Hüllschläuchen verlegt. Diese Konstruktion hat sich prinzipiell bewährt, da seither keine weiteren Defekte mehr aufgetreten sind; jedoch ist die Wartung etwas zeitaufwändiger geworden, da die Hüllschläuche den Aus- und Einbau der Sonde etwas erschweren.

Aus diesem Grund muss man sich auch Gedanken über alternative Montagemöglichkeiten machen, zumal nicht alle SBR-Kläranlagen mit schwimmenden Klarwasserabzugseinrichtungen ausgerüstet sind und dann Sonderlösungen benötigt werden. Als eine vielversprechende Lösung wird die in Abbildung 3.26 dargestellte Schwimmbojenlösung angesehen. Mit gewissen Modifikationen (z. B. größere Bojen zur gleichzeitigen Montage mehrerer Sonden (z. B. NO_X-N, Schlammspiegel, TS), Kabelstraffer, Hebevorrichtung) könnte sich diese Konstruktion als eine praktikable Lösung erweisen.

Die Investitionskosten für eine derartige Nitrat-Messung, die auch von anderen Herstellern angeboten werden, betragen ohne Mehrwertsteuer etwa 15.000 € (inkl. Messumformer und Beckenrandbefestigung).

Abb. 3.26: Schwimmbojenlösung zur Montage von in-situ-Sonden (Bildquelle: Hach Lange)

Die UV-basierten Nitratsonden erweisen sich in der Praxis als erstaunlich wartungsarm und sehr zuverlässig. Der vom Hersteller angegebene Wartungsaufwand von 1 h pro Monat und Sonde wurde bei Versuchen des Autors problemlos eingehalten. Bei Härtetests wurden die Sonden über eine Dauer von 3 bis 4 Monaten nicht gewartet und nicht gereinigt, ohne dass bei den parallel dazu durchgeführten regelmäßigen Vergleichsmessungen im Labor ein Shift oder Drift der Messwerte erkennbar gewesen wäre. Am Ende der Härtetests wurden die Sonden mit Standardlösungen überprüft; auch hier wiesen die Messwerte der Sonden nur vernachlässigbar geringe Abweichungen auf. Die Wartungskosten derartiger Messgeräte liegen in der Regel inklusive Personal und Verschleißteilen meist unter 1.000 € pro Jahr.

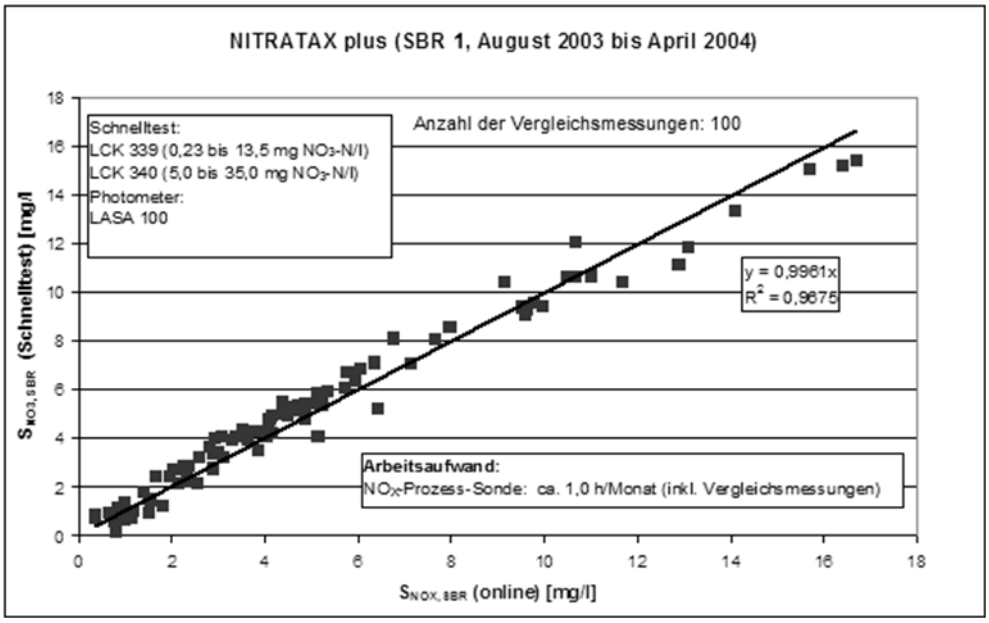


Abb. 3.27: Vergleich zwischen im Prozess gemessenen NO_3-N-Konzentrationen und mittels Schnelltests ermittelten Laborwerten (Quelle: *Wiese [2005]*)

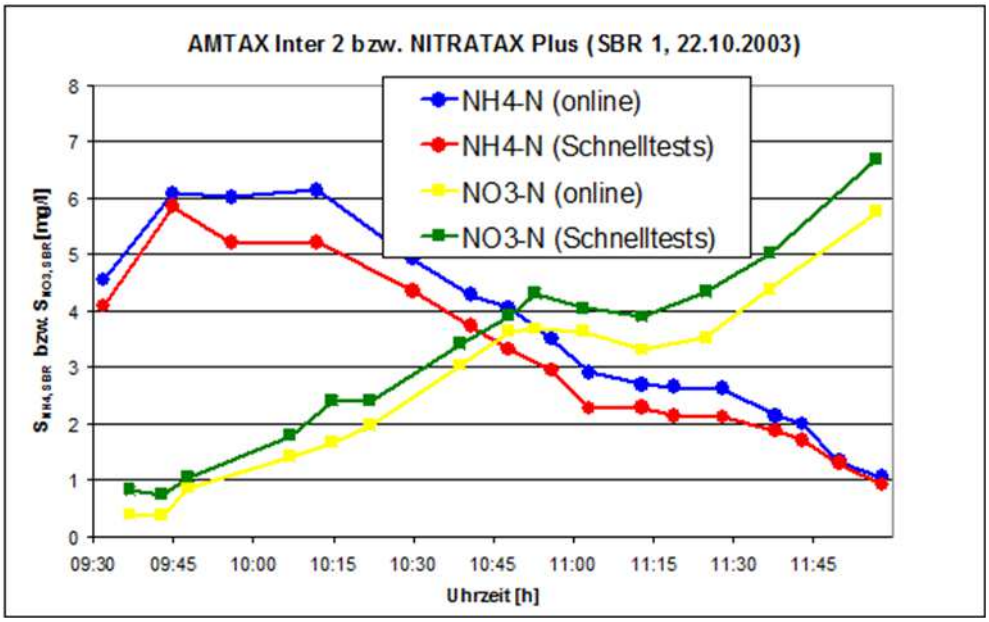


Abb. 3.28: Vergleich zwischen im Prozess online gemessenen NO_3-N-/NH_4-N-Konzentrationen und mittels NO_3-N-/NH_4-N-Schnelltests ermittelten Laborwerten während eines Zyklus (Quelle: *Wiese [2005]*)

Die Messgenauigkeit der optischen Nitratsonden wurde im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes 17258 vom Autor dieser Arbeit während des 9-monatigen Probebetriebs pro Woche und Analysator im Durchschnitt mit zwei bis drei Vergleichsmessungen überprüft. Die Vergleichstests wurden überwiegend vor Ort mit Hilfe von sog. Schnelltests durchgeführt. Im Falle des Nitrats kamen dabei der Test „LCK 339“ (0,23 bis 13,5 mg/l NO_3-N) (*Hach Lange [2003D]*) bzw. der Test „LCK 340“ (5 bis 35 mg/l NO_3-N) (*Hach Lange [2003E]*). Stichprobenartig wurde auch die Nitrit-Konzentration mit Hilfe des Tests „LCK 341“ (0,045 bis 0,61 mg/l NO_2-N) (*Hach Lange [2003F]*) ermittelt, jedoch lagen diese immer unter 0,15 mg/l NO_2-

N. Exemplarisch sind die Ergebnisse für das NITRATAX plus, welches dem SBR 1 zugeordnet wurde, in Abbildung 3.27 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass das Messgerät im gesamten beobachteten Konzentrationsbereich sehr genau misst. Abbildung 3.28 verdeutlicht, dass auch die ausgeprägten Konzentrationsschwankungen während eines Zyklus von der Prozesssonde gut gemessen werden können.

3.3.12.3 Ionenselektive Elektroden

Bezüglich des Einsatzes der ionenselektiven Nitratelektroden sei auf Abschnitt 3.3.1.3 verwiesen: Insbesondere die Markteinführung kostengünstiger NH_4-N-/NO_3-N-ISE-Kombielektroden kann mittelfristig die Optimierung von SBR-Kläranlagen voranbringen.

3.3.13 Organische Säuren

Die Bestimmung der organischen Säuren ist nur für die Überwachung und ggf. Automatisierung des Anaerobprozesses relevant. Bisher werden die flüchtigen organischen Säuren meist entweder per Gaschromatographie/Ionenchromatographie im Labor bestimmt und/oder mit Hilfe der Titration (siehe auch Abschnitt 3.8.2). Allerdings gibt es auch Möglchkeiten, die flüchtigen organischen Säuren online im Prozess zu bestimmen:

Nahinfratospektroskopie (NIRS)

NIRS-Messtechnik ist bereits seit Jahren in anderen Industrie- und Gewerbezweigen im Einsatz, wie der Futtermittelindustrie (z. B. zur Qualitätssicherung) oder in der chemischen Industrie (z. B. Petrochemie). Im Bereich der Futtermittelindustrie werden mit NIRS online und offline die Konzentrationen von Trockenmasse, organischer Trockenmasse, Protein, Rohfaser und Fett gemessen. Da derartige Applikationen artverwandt mit Anwendungen im Bereich der Biogastechnik sind, erscheint es daher vielversprechend, dass zukünftig NIRS auch im größeren Umfang auf Biogasanlagen zum Einsatz kommen kann. Erste Applikationen bestätigen diese Hoffnung:

Jabobi et al. [2008] berichten über den Einsatz einer NIRS-Messung auf einer NawaRo-Biogasanlage mit 720 kW_{el}. Die Versuche wurden über eine Dauer von 9 Monaten durchgeführt. Zur Kalibrierung der NIRS-Messung wurden wöchentlich verschiedene Analysen gezogen und im Labor bestimmt. Die Ergebnisse sind sehr vielversprechend, da für die folgenden Parameter sehr gute Korrelationskoeffizienten erreicht wurden: Propionsäure 0,94, Essigsäure 0,84, Flüchtige Organische Säuren 0,91, TS 0,97 und oTS 0,95. *Jacobi et al. [2009]* berichten über den Einsatz von NIRS zur Bestimmung der flüchtigen organischen Säuren, der Essigsäure sowie der Propionsäure. Die Versuche wurden auf einer 1 MW_{el}-NawaRo-Biogasanlage über eine Dauer von 500 Tagen durchgeführt. Wöchentlich wurden Proben gezogen und im Labor auf die zuvor genannten Parameter untersucht. Diese Daten dienten anschließend zur Kalibrierung des mathematischen Models. *Jacobi et al.* ermittelten für das NIRS-System brauchbare bis sehr gute Bestimmtheitsmaße (FOS 0,94, Essigsäure 0,69, Propionsäure 0,89).

Bereits *Andree et al. [2006]* verwiesen auf gute Ergebnisse mit NIRS-Messungen und sehen im Zusammenhang mit der Biogastechnik die folgenden Vorteile:

- „Online“: D.h. mit NIRS ist eine direkte Vor-Ort-Messung der für die Beschickung vorgesehenen Substrate und der Anaerobreaktoren möglich.

- „Schnell“: D.h. der Messwert ist sofort verfügbar (ca. 30 Sekunden), sodass es sich um eine Echtzeitmessung handelt.
- „Wartungsarm und robust“, weil der Sensor keinen direkten Kontakt mit dem Medium hat, sodass sich der Reinigungsaufwand in Grenzen hält. Weiterhin entfällt damit auch die Gefahr einer Korrosion des Messkopfes.
- „Betriebstendenzen“: D.h. wesentlicher Bestandteil einer NIRS-Messung ist das mathematische Modell, das nach einer entsprechenden Kalibrierung das Messsignal errechnet. Hierbei ist für einen sicheren Betrieb jedoch wichtiger einen Näherungswert an der Hand zu haben, der die Tendenzen richtig wieder gibt, anstatt eines Messwertes mit hoher Genauigkeit, aber in einer geringen zeitlichen Auflösung.
- „Repräsentativ“: D. h. da die zu beprobenden festen und flüssigen Masseströme am Messkopf vorbeigeführt werden, können große Massenströme analysiert werden. Bei vielen herkömmlichen Messungen besteht hingegen die Gefahr, dass die genommene Stichprobe nicht repräsentativ für den Prozess ist.
- „Diverse Messgrößen“: Ferner kann ein Nah-Infrarot-Spektrometer nach entsprechender Kalibrierung für die Messung zahlreicher verschiedener Parameter eingesetzt werden (z. B. Essigsäure, Propionsäure, FOS, Gesamtstickstoff, Ammonium, Protein, …)

Auf eine von *Andree et al.* entwickelte Applikation wird im Abschnitt 10.1.7 noch genauer eingegangen.

Spanjers et al. [2005] berichten über den Einsatz eines in-line-FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) in einer großtechnischen anaeroben EGSB-Kläranlage. Das System besteht neben der Messeinheit („Nicolet AVATAR 360“) auch aus einer Probenahmeeinheit. Die Autoren erzielten gute Übereinstimmungen zwischen Laborwerten und online gemessenen Werten für die folgenden Parameter: flüchtige organische Säuren, CSB, Sulfat, Ammonium und TKN. Allerdings führten die Autoren ebenfalls aus, dass das Gerät über längere Zeiträume ausgefallen ist, weil das Probenahmegerät nicht in der Lage war mit dem hohen Feststoffanteil fertig zu werden und es daher wiederholt zu Verstopfungen kam.

Sonstige Messkonzepte

Ruiz et al. [2005] berichten über die großtechnische Erprobung eines online-Titrators zur Überwachung anaerober Prozesse auf einen EGSB-Reaktor zur Abwasserbehandlung. Der Titrator, der den Produktnamen „ANASENSE“ trägt, ist nach den Ausführungen der Autoren geeignet, um die Konzentration flüchtiger organischer Säuren, Bikarbonat, Alkalinität, Ammonium und Milchsäure zu bestimmen.

Boe et al. [2007] berichten über ein Überwachungs- und Regelungskonzept für einen Rührkesselreaktor auf Güllebasis im Labormaßstab (7,2 l), bei dem ein Messgerät zur Bestimmung (Messintervall 6 h) der flüchtigen organischen Säuren, insbesondere der Propionsäure, zum Einsatz kam. Bei diesem nicht näher spezifizierten Messgerät werden zunächst aus einer 40 ml Probe die flüchtigen organischen Säuren durch Chemikalieneinsatz und Erhitzung ausgetrieben und anschließend in einem Gaschromatographen bestimmt.

Münchmeyer et al. [2009] berichten über ein Gas-Sensor-Array-System („Elektronische Nase“) zur Überwachung der Propionsäure-Konzentration in Anaeorbreaktoren. Kernbestandteil des Systems ist die elektronische Nase „PEN3“ der Fa. Airsense, welche über ein Sensorarray mit 10 Metalloxidsensoren verfügt, welche aus unterschiedlichen Halbleitermaterialien bestehen.

Die Sensorsignale werden automatisch überwacht und regelmäßig mit Nullgas einem Abgleich unterzogen. Das System wurde an einer Laboranlage, die Rindergülle vergärt, über mehrere Monate getestet, wobei das Biogas jeweils im Verhältnis 1:10 bzw. 1:100 verdünnt wurde. Dabei wurden diverse Versuche durchgeführt (z. B. durch Zugabe von Propionsäure), um zu untersuchen, wie sich die Signale des Sensorarrays verändern. Als eines der Ergebnisse dieser Untersuchungen konnte das Sensorarray auf drei Methalloxidsensoren mit einer gaschromatographischen Vortrennung reduziert werden. Nach Aussage der Autoren ist es mit diesem Gerät möglich, eine Überdosierung bzw. Übersäuerung einer Biogasanlage zu detektieren. Die Autoren machen aber ebenfalls deutlich, dass das Gerät zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch weiterentwickelt wurde bzw. noch umfangreichen Tests unterzogen werden sollte, sodass es sich hierbei wohl noch eher um ein Messgerät im Stand der Forschung handelt.

Walte et al. [2007] verwendeten ein Propionsäure erkennendes Gas-Sensor-Arrays zur Regelung von Vergärungsprozessen.

3.3.14 pH-Wert

3.3.14.1 Allgemeine Informationen

Der pH-Wert ist der negativ dekadische Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentrationen. Der pH-Wert ist in einigen Branchen (z. B. Chemieindustrie) als Prozessparameter bei wässrigen Lösungen weit verbreitet. Informationen zu den Grundlagen, dem Messprinzip, den Messsensoren und der Messgenauigkeit gibt *Gevatter [1999]*. Da der pH-Wert von der Temperatur abhängig ist, erfolgt in der Regel eine Temperaturkompensation.

3.3.14.2 Einsatz in der Abwassertechnik

Die Messung des pH-Wertes ist auf Kläranlagen nach wie vor weit verbreitet, wobei auf vielen Kläranlagen eine Bestimmung nicht nur im Rahmen der routinemäßigen Laboranalytik, sondern auch im Prozess erfolgt. Im Bereich der online-Messungen wird der pH-Wert vielfach sowohl im Kläranlagenzulauf (Abbildung 3.19), im Belebunsgbecken bzw. SB-Reaktor als auch Kläranlagenablauf bestimmt, zumal dieser Parameter günstig zu messen ist und die Messgeräte robust sind. Anhand des Absolutwertes und der Dynamik des Messsignals können ähnlich wie bei der elektrolytischen Leitfähigkeit zahlreiche Rückschlüsse gezogen werden, wie zum Beispiel:

- Unterscheidung zwischen Trockenwetter und Regenwetter
- Verläufe von Trockenwettertagesgängen
- Indirekte Rückschlüsse auf Konzentrationsverläufe
- Rückschlüsse auf gewerblich-industrielle Indirekteinleitungen
- Rückschlüsse über den Prozessverlauf bei der Abwasserreinigung
- Rückschlüsse über den Prozessverlauf in der anaeroben Schlammbehandlung

Eine sichere Interpretation der Messwerte wird durch das Hinzuziehen von weiteren Messgrößen (z. B. Temperatur, elektrolytische Leitfähigkeit) erleichtert, sodass in vielen Fällen eine pH-Wert-Messung in Kombination mit anderen (Indirektparameter-)Sensoren eingesetzt wird; in Einzelfällen steuert eine pH-Messung auch einen automatischen Probennehmer an, um zum

Beispiel illegale Einleitungen zu detektieren. Mit zunehmender Verbreitung von Direktmessungen (NH_4-N, NO_3-N) verliert der pH-Wert im täglichen Betrieb etwas an Bedeutung: Die Kläranlagenmitarbeiter bestimmen diesen Messwert zwar nach wie vor – zum Teil auch aufgrund behördlicher Vorgaben – im Labor und Prozess, ziehen daraus aber keine Rückschlüsse für den Anlagenbetrieb, da Prozessstörungen (z. B. bei der Nitrifikation und Denitrifikation) sich unmittelbar an den Direktmessungen ablesen lassen. Dies gilt besonders, weil die pH-Werte für Überwachungszwecke zwar in der Regel an die Prozessleitsysteme bzw. Datenarchive angebunden sind, aber nur in Ausnahmefällen auch eine Einbindung in ein Steuer- und Regelkonzept erfolgt. Eine Ausnahme hiervon stellen die in den 1990er und frühen 2000er Jahren populär gewordenen Mess-, Steuer- und Regelungskonzepte auf Basis künstlicher Intelligenz (z. B. Fuzzy Control) zur Optimierung der Nährstoffelimination dar, die vielfach aufgrund der damals noch hohen Kosten für Ammonium- und Nitratmessgeräte zunächst auf günstige Indirektparameter (pH, Redox, Temperatur und Gelöst-Sauerstoff) zurückgegriffen haben (siehe Abschnitt 6.6); aber auch diese Systeme benutzen zunehmend NH_4-N- und NO_3-N-Messgeräte.

3.3.14.3 Einsatz in der Biogastechnik

Der pH-Wert ist ein Parameter, der in der Biogastechnik prinzipiell von großer Bedeutung ist (siehe Abschnitt 8.7.7), dennoch aber lange Zeit kaum in Echtzeit gemessen wurde, unter anderem weil die konventionellen Glaselektroden nur kurze Standzeiten aufwiesen. Die Messsignale und Messgeräte werden daher von vielen Anlagenbetreibern nach wie vor als wenig vertrauenswürdig eingestuft. *Wolf et al. [2012]* berichtet über Probleme mit der Zuverlässigkeit bzw. Standfestigkeit von pH-Sensoren bei hohen TS-Konzentrationen und Störstoffen. *Zosel und Vonau [2012]* betrachten die Ursachen (z. B. Sulfide, Biofilm, hohe Viskosität) und Effekte der Schädigung von pH- und Redox-Sensoren in Biogasanlagen und stellen auch Schutzmethoden (z. B. Schutzmäntel gegen mechanische Beschädigung) und Wartungshinweise vor. Daher findet die Bestimmung des pH-Wertes meist entweder mit Handmessgeräten vor Ort oder meist im Rahmen der Routineanalytik im Labor statt.

Dennoch sieht der Autor dieser Arbeit sinnvolle Anwendungsmöglichkeiten für online-pH-Messgeräte:

- Prozessüberwachung: Bei einem simultanen Biogasentstehungsprozess sollte der pH-Wert zwischen 7 und 8 liegen. Es gibt immer wieder – auch in güllegepufferten Systemen – Beispiele (siehe Abschnitt 10.1.8) dafür, dass pH-Wert-Veränderungen schnell von statten gehen können und daher die üblichen Laboranalyseintervallen von meist mehreren Wochen diesbezüglich ungünstig sind. Eine akute Störung des Biogasprozesses kann daher durch eine pH-Messung zeitnah erkannt werden. Dies gilt besonders, wenn der Prozess nicht durch die Zugabe von Gülle gepuffert wird.
- Überwachung der Dosierung: Die Praxis zeigt, dass es flüssige Substrate gibt, die nicht in größeren Mengen stoßartig dem Prozess zugeführt werden sollten. Über dem pH-Wert lassen sich zum Beispiel die folgenden Problemstoffe detektieren:
  - Gülle mit Reinigungsmittel verunreinigt
  - Silagesickersaft mit hohen Konzentrationen organischer Säuren und niedriger Pufferkapazität

- Weiterhin kann der pH-Wert auch als eine Größe in Steuerungs- und Regelungskonzepte eingebunden werden. Denkbar ist auch die (automatisierte) Zugabe von pH-Wert-stabilisierenden Stoffen bei einem Absinken des pH-Wertes: Ein zu niedriger pH-Wert kann etwa durch die Zugabe von Neutralisationsmitteln angehoben werden.
- Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass der pH-Wert als alleinige Messgröße in gülle-basierten Biogasanlagen oft unpräzise Angaben liefert; hierbei sollte der pH-Wert immer in Kombination mit anderen Messgrößen (z. B. Redox) gesehen werden.

Neben diesen interessanten Anwendungsmöglichkeiten können zukünftig auch neue Messverfahren den Einsatz von pH-Elektroden auf Biogasanlagen begünstigen. So hat der Autor mit sogenannten gekapselten pH-Elektroden gute Erfahrungen gemach: Die für die pH-Messungen auf einigen Anlagen vom Autor eingesetzten digitalen Elektroden des Typs „pHD sc“ (*Hach Lange [2005B]*), ist durch eine gekapselte Bauweise vom Messmedium getrennt. Eine spezielle, schmutzunempfindliche Salzbrücke stellt den für die Messung notwendigen direkten Kontakt zum Medium her. Durch die Verwendung einer Salzbrücke wird, im Gegensatz zu herkömmlichen Elektroden mit Diaphragma, ein besonders langer Messbetrieb selbst in stark partikulären Medien erreicht und die Reinigungsintervalle minimiert. Außerdem werden Elektrodenvergiftungen verhindert und eine Verdünnung des Elektrolyten vermieden. Darüber hinaus müssen derartige Elektroden weniger häufig kalibriert und gereinigt werden, was die höheren Investitionskosten rechtfertigt. Bei der Interpretation der Messsignale gilt es jedoch zu beachten, dass durch die gekapselte Elektrode eine Zeitverzögerung auftritt. Dies gilt besonders dann, wenn eine solche Elektrode in eine zentrale Pumpstation eingebaut wird. D. h. es müssen ausreichend lange Pumpintervalle vorgesehen werden, um zuverlässige Messsignale für die einzelnen Reaktoren und Behälter (z. B. Vorlagebehälter, Fermenter, Nachgärer) zu erzeugen; erst dann empfiehlt es sich den Messwert für eine Überwachung oder gar Steuerung und Regelung zu verwenden. Eine derartige Applikation mit einem solchen pH-Sensor zeigt Abbildung 3.29: Hier wurden in einer zentralen Pumpstation einer Biogasanlage neben der pH-Elektrode auch noch eine bauähnliche Redox-Elektrode, eine TS-Sonde, eine separate Temperaturmessung sowie eine Leitfähigkeitsmessung installiert.

Abb. 3.29: Rohrleitung in einer zentralen Pumpstation einer Biogasanlage mit Einbau-armaturen für pH-Elekroden (1) und Redox-Elektroden (2), TS-Sonde (3) und Leitfähigkeitsmessung (4) (Messgeräte der Fa. Hach Lange) (Bildquellen: Autor und Fa. Hach Lange)

3.3.15 Phosphor

3.3.15.1 Allgemeine Informationen

Die Messung der Phosphorkonzentrationen im Prozessverlauf ist nur in der Abwasserreinigung von Bedeutung, da besonders bei größeren Kläranlagen heute sehr strenge Anforderungen an die Phosphorelimination gestellt werden. Einzelne Bundesländer (z. B. Hessen) planen zudem eine weitere Reduzierung der Überwachungswerte im Kläranlagenablauf (Tabelle 3.4). Um P_{ges}-Überwachungswerte von unter 1 mg/l ganzjährig sicher und dennoch wirtschaftlich einhalten zu können, wird es in vielen Fällen erforderlich sein, quasikontinuierliche Messgeräte für Phosphor einzusetzen, um die Zugabe von Fällmitteln für Zwecke einer chemisch-physikalischen Phosphorelimination auf ein Minimum zu begrenzen. Meist werden dabei die günstigeren Messgeräte für Ortho-Phosphat (PO_4-P) eingesetzt, da die Bestimmung des Gesamt-Phosphors messtechnisch aufwändiger ist.

Tab. 3.4: Übersicht über Phosphorkonzentrationen im Kläranlagenablauf nach Abwasserverordnung (Anhang 1) (*AbwV [2009]*) sowie den Zielen des hessischen Landesprogramms (*HMUELV [2011]*) (ÜW = Mindestüberwachungswert, [1] = individuelle Festlegung möglich, [2] = im Einzelfall auch schärfer)

Größenklasse	Einwohnerwerte	$P_{ges,ÜW}$ AbwV (Anh. 1) [mg/l]	$P_{ges,ÜW}$ Hessen 2015 [mg/l]	$P_{ges,Betriebsmittelwert}$ Hessen 2015 [mg/l]
1	< 1.000	- [1]	- [1]	- [1]
2	1.001 – 5.000	- [1]	2	1
3	5.001 – 10.000	- [1]	2	1
4	10.001 – 100.000	2 [2]	1	0,5
5	> 100.000	1 [2]	0,5	0,2 – 0,3

3.3.15.2 Einsatz in der Abwassertechnik

Der Autor konnte zwischen 2003 und 2005 Erfahrungen mit dem Einsatz von Phosphat-Prozessphotometern auf SBR-Anlagen sammeln. So kamen zum Beispiel im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes 17258 auf einer SBR-Kläranlage zwei online-Phosphat-Messungen vom Typ „PHOSPHAX compact“ (*Hach Lange [2002B])* zum Einsatz (Abb. 3.4, Bild 2) (je 1 Stück pro Reaktor). Diese Messgeräte arbeiten nach der Vanadat-Molybdat-Methode und zwar in einem Messbereich von 0,2 bis 10,0 mg/l PO_4-P bzw. mit einem Messintervall von 10 bzw. 20 min. Mit diesen Messgeräten sollten die Auswirkungen der geplanten Maßnahmen auf die biologische Phosphorelimination dokumentiert bzw. Informationen über den Verlauf der biologischen Phosphorelimination während eines Zyklus gesammelt werden, um diesen leichter optimieren zu können. Die Probennahme bzw. Probenaufbereitung für diese Geräte erfolgte über die „FILTRAX“-Einheiten, da diese bis zu jeweils drei Prozessphotometer mit Permeat versorgen können (siehe Abschnitt 3.3.8). Im Falle dieses Forschungsvorhabens wurden die Prozessphotometer für Ammonium und Phosphat in Reihe geschaltet, wobei das NH_4-N-Prozesspotometer als erstes beschickt wurde; die Aufstellung

erfolgte frostsicher in der Gebläsehalle, die sich zwischen den beiden SB-Reaktoren befindet. Bei der compact-Serie handelt es sich um ein vereinfachtes Prozessphotometer, das bezüglich zeitlicher Auflösung und Genauigkeit gewisse Einschränkungen aufweist, dafür aber auch bezüglich Investitionskosten und Wartung, Chemikalieneinsatz, Verschleißteile etc. günstiger bzw. weniger aufwändiger ist als die damals am Markt erhältlichen Analysatoren. Die Investitionskosten für ein derartiges Prozessphotometer betrugen 2003 ca. 8.500 € netto; komplexere Prozessphotometer kosten heute ca. 18.000 € netto inkl. Messumformer und Filtrationseinheiten. Trotz dieser Vereinfachungen haben sich die Prozessphotometer im Forschungsprojekt als äußerst zuverlässig erwiesen und nur einen sehr niedrigen Wartungsaufwand benötigt: Ca. alle 2 Monate musste bei einem 10 min-Messintervall das Reagenz ausgetauscht werden; alle 6 Monate wurde die Reinigungslösung gewechselt. Alle paar Monate mussten zudem die Schläuche getauscht werden. Dadurch erwies sich das PO_4-P-Photometer als wartungsarm (< 0,5 h pro Monat), sodass sich die Gesamtunterhaltskosten mit unter 1.500 € pro Jahr (mit Personalkosten und Wartung) in Grenzen hielten.

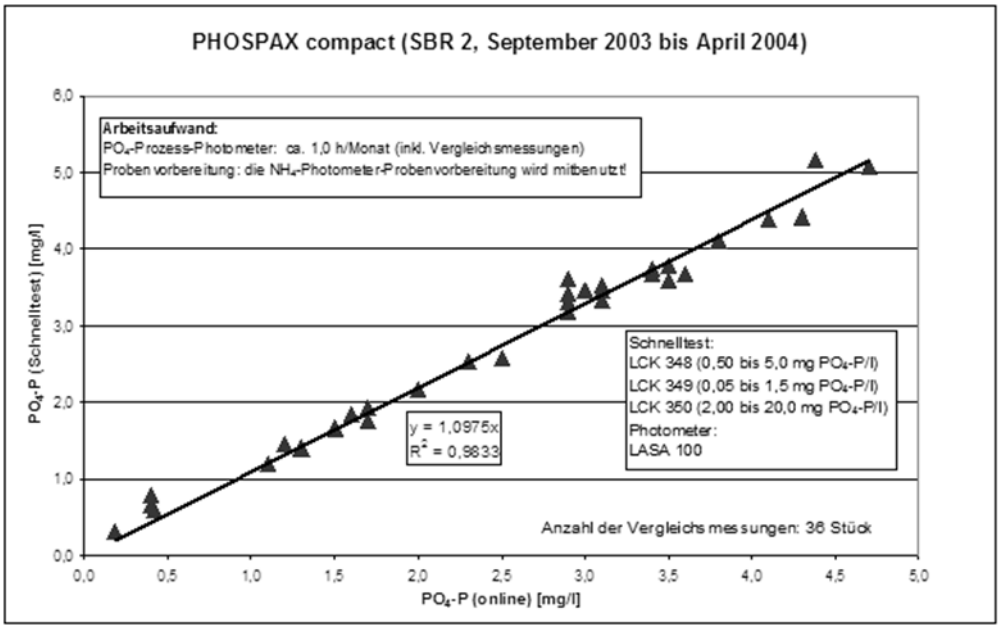


Abb. 3.30: Vergleich zwischen im Prozess online gemessenen PO_4-P-Konzentrationen und mittels PO_4-P-Schnelltests ermittelten Laborwerten (Quelle: *Wiese [2005]*)

Die Geräte erwiesen sich auch von der Messgenauigkeit als hinreichend genau, wie die Ergebnisse der analytischen Qualitätssicherung verdeutlichen (Abbildung 3.30), die mit Hilfe von Schnelltests vor Ort erfolgte. Zum Einsatz kamen die Tests „LCK 348“ (0,5 bis 5 mg/l PO_4-P) (*Hach Lange [2003G]*), „LCK 349“ (0,05 bis 1,5 mg/l PO_4-P) (*Hach Lange [2003H]*) bzw. „LCK 350“ (2 bis 20 mg/l PO_4-P) (*Hach Lange [2003I]*).

Slater et al. [2009] berichten über die Entwicklung und Tests mit einem neuartigen Phosphatanalysator, der auf einem sogenannten “Microfluidic lab-on-a-chip” basiert; die Autoren konnten bei ersten Vergleichsmessungen mit konventionellen Prozessphotometer bereits gute Ergebnisse erzielen. Derartige Ansätze könnten die Messtechnik im Hinblick auf eine weitere Miniaturisierung und Verbrauchskosteneinsparung weiter voranbringen.

3.3.15.3 Einsatz in der Biogastechnik

Für Anaerobreaktoren ist eine kontinuierliche Überwachung der Phosphorkonzentrationen hingegen nicht erforderlich. Zwar machen die zum Teil hohen Phosphorgehalte im Gärrest diesen zu einem begehrten Wirtschaftsdünger, jedoch ist hier eine regelmäßige Laborbestimmung für die Ermittlung des Düngewertes vollkommen ausreichend.

3.3.16 Redoxspannung

3.3.16.1 Allgemeine Informationen

Das Redox-Potenzial ist definert als das Potenzial einer chemischen indifferenten Metallelektrode in einem Reduktions-/Oxidations-Gleichgewichtssystem; Bezugspunkt ist in der Regel die Standard-Wasserstoffelektrode. Dabei ist das Redox-Potenzial ein Maß für das Verhältnis von reduzierenden zu oxidierenden Prozessen. Weitere Informationen zu den Grundlagen, dem Messprinzip, den Messsensoren und der Messgenauigkeit gibt *Gevatter [1999]*. Da das Redox-Potenzial auch von dem pH-Wert und der Temperatur abhängig ist, erfolgt in der Regel zumindest eine Temperaturkompensation.

3.3.16.2 Einsatz in der Abwassertechnik

Die Messung des Redox-Wertes ist auf Kläranlagen nur in Einzelfällen von Bedeutung:

- Rückschlüsse über den Prozessverlauf bei der Abwasserreinigung
- Rückschlüsse über den Prozessverlauf in der anaeroben Schlammbehandlung

Eine Ausnahme stellen die in den 1990er und frühen 2000er Jahren populär gewordenen intelligenten Mess-, Steuer- und Regelungskonzepten (z. B. Fuzzy Control) zur Optimierung der Nährstoffelimination auf Basis von Indirektparametern (pH, Redox, Gelöst-Sauerstoff) dar; durch die Markteinführung kostengünstiger ISE-Elektroden für NH_4-N und NO_3-N verlieren Redox-Messungen für diese Applikation aber an Bedeutung.

3.3.16.3 Einsatz in der Biogastechnik

Der Redox-Wert ist ein Parameter, der in der Biogastechnik prinzipiell von großer Bedeutung ist (siehe Abschnitt 8.7.9), dennoch aber lange Zeit kaum in Echtzeit gemessen wurde. Die Ursachen hierfür sind überwiegend in den Kosten und der geringen Standfestigkeit der Redoxelektroden zu suchen. Die Bestimmung des Redox-Potenzials mit Handmessgeräten vor Ort oder im Labor ist zudem fehleranfällig. Aus diesem Grund wird der Redox-Wert kaum für Mess- und Automationsaufgaben verwendet, obwohl es durchaus sinnvolle Anwendungen gibt (Auswahl):

- Prozessüberwachung: Die Biogasproduktion läuft effektiv nur im anaeroben Milieu ab, d. h. das Redox-Potenzial sollte kleiner sein als ca. – 330 mV (*Kaltschmitt und Hartmann [2001]*). In einigen Fällen korreliert der Verlauf des Redox-Potenzials zudem recht gut mit dem Verlauf der organischen Säuren (siehe Abschnitt 10.1.8).
- Überwachung der Dosierung: Über das Redox-Potenzial lassen sich in Flüssigkeiten Stoffe detektieren, die im größeren Umfang Oxidationsmittel (z. B. Sauerstoff, Sulfat, Nitrat oder Nitrit) enthalten und daher vom Prozess ferngehalten werden sollten.

- Darüber hinaus kann der Redox-Wert zum Beispiel auch als eine Größe in Steuerungs- und Regelungskonzepte eingebunden werden. Es ist sogar denkbar, dass bei einem zu starken Anstieg des Redox-Potenzials reduzierende Substanzen zugegeben werden: *Reuter et al. [2010]* berichten über derartige Versuche.

Rieger und Weiland [2006] sehen in der Bestimmung des Redox-Potenzials eine sehr gute Möglichkeit der Früherkennung von Prozessstörung, weisen aber darauf hin, dass diese Bestimmung kontinuierlich erfolgen muss. D. h. es sprechen einige Aspekte dafür, dass die Bestimmung des Redox-Wertes weitere Verbreitung finden wird; auch neue Messverfahren könnten dies begünstigen. So hat der Autor mit einer Redox-Elektrode (*Hach Lange [2005B]*), die vergleichbar aufgebaut ist wie die in Abschnitt 3.3.14.3 beschriebene pH-Elektrode gute Erfahrungen gemacht. Zur sicheren Interpretation der Messwerte empfiehlt es sich, weitere Messgrößen (z. B. pH-Wert, elektrolytische Leitfähigkeit) zu berücksichtigen. Eine derartige Applikation mit einer solchen Sensorkombination zeigt Abbildung 3.29.

3.3.17 Sauerstoff (gelöst)

Der Gelöst-Sauerstoff (kurz: Sauerstoff) ist ein Parameter, der ausschließlich in der Abwassertechnik zum Einsatz kommt. Eine der wichtigsten Reinigungsziele der Abwasserreinigung ist die Entfernung von sauerstoffzehrenden Substanzen. Dies geschieht in den Belebungsbecken überwiegend in den (zeitweise) belüfteten Beckenteilen bzw. SB-Reaktoren während der belüfeten Phase. Der Sauerstoff hat sich seit Jahrzehnten dabei als Leitparameter für die Überwachung des Reinigungsprozesses sowie zur Steuerung- und Regelung der Belüftungseinrichtungen (z. B. Drehkolbengebläse) durchgesetzt. Von wenigen Anlagentypen (z. B. kleine Teichkläranlagen) abgesehen, gehören online-Sauerstoffsensoren heute zur Standardausstattung von Kläranlagen. Die typische Messstelle ist dabei die Belebungsstufe bzw. der SB-Reaktor, um direkt die Belüftung (Dauer und Intensität) beeinflussen zu können. Lange Zeit wurde der gelöste Sauerstoff mit Hilfe elektro-chemischer Methoden (Abbildung 3.31) gemessen, wobei sich in den letzten Jahren optische Messverfahren zunehmend durchsetzen, da sie robuster sind.

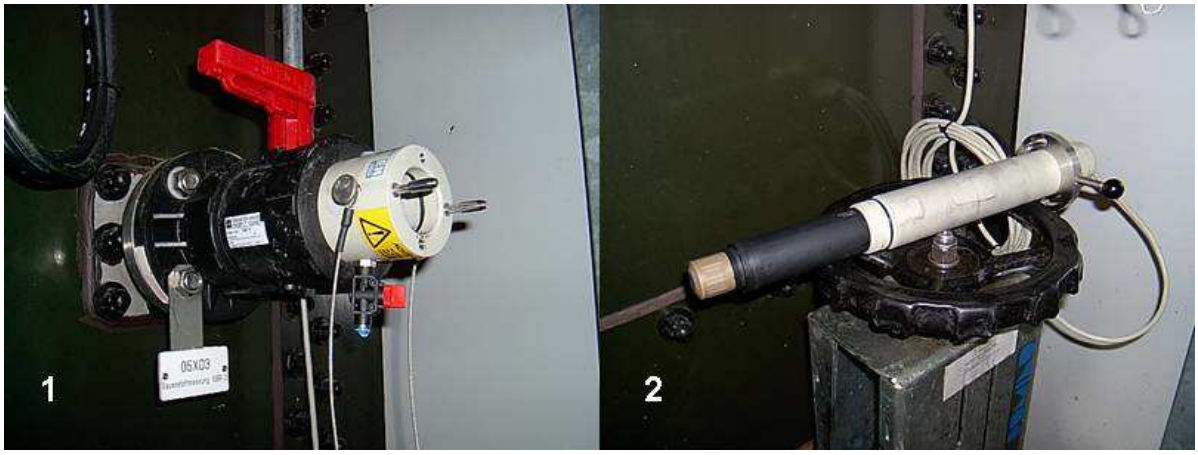


Abb. 3.31: Elektrochemische Gelöst-Sauerstoffmessung (Liquisys COM 253, Fa. Endress+ Hauser): Sicherheitseinbauarmatur zur Behälterdurchführung in einem SB-Reaktor aus emaillierten Stahl (1), Gelöst-Sauerstoffsensor (2) (Bildquellen: Autor)

Bezüglich der Installation der Sauerstoffsensoren in SB-Reaktoren gibt es verschiedene Ansätze:

- Installation durch die Behälterwand mit einer Sicherheitseinbauarmatur (Abb. 3.31).
- *Endress+Hauser [2011]* berichten über den Einsatz einer Sauerstoffsonde in einer SBR-Anlage, die an einer 2,4 m langen schwimmenden Pendelstange befestigt wurde, sodass sie mit den wechselnden Füllständen des Reaktors mit auf- und abschwimmt.
- Installation an Schwimmern, die über Führungsstangen mitschwimmen.
- Installation an klassischen Beckenrandbefestigungen, die an der Bedienbrücke installiert werden. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Stange so lange ist, dass der Sensor auch beim Mindestwasserstand noch ausreichend mit Wasser überdeckt ist.

3.3.18 Schlammspiegel

3.3.18.1 Allgemeine Informationen

Der Schlammspiegel ist ein Parameter, der in der Abwassertechnik zum Einsatz kommt: Nach Ende des Abwasserreinigungsprozesses muss der Belebtschlamm vom gereinigten Abwasser getrennt werden, wobei man sich meist die Schwerkraft bzw. den Dichteunterschied zu Nutze macht. Diese Trennung geschieht auf konventionellen Durchlaufkläranlagen in den sogenannten Nachklärbecken, in denen sich das Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch entlang einer Fließ- und Beruhigungsstrecke entmischt. Der abgesetzte Belebtschlamm wird mit Hilfe von Räumschilden von der Beckensohle geräumt und zurück in das Belebungsbecken geführt. Im SB-Reaktor werden hingegen nach dem Ende des eigentlichen Reinigungsprozesses alle Belüfter und Rührwerke abgeschaltet, sodass sich der Belebtschlamm ungestört absetzen kann. Da zum einen die Dauer des Absetzprozesses von diversen Faktoren abhängig ist (z. B. Schlammindex, TS-Konzentration) und zum anderen eine ungenügende Belebtschlammabtrennung zu Schlammabtrieb und damit ggf. zur Überschreitung der Überwachungswerte für CSB, BSB_5 und P_{ges} führen kann, bietet es sich an, den Absetzprozess auch in einem SBR kontinuierlich zu überwachen. Eine effektive Möglichkeit ist es, den Schlammspiegel kontinuierlich zu messen, d. h. die Grenzschicht zwischen dem sich absetzenden und eindickenden Belebtschlamms und der Klarwasserphase.

3.3.18.2 Schlammspiegelmessung

Zur Messung des Schlammspiegels haben sich in-situ-Sonden durchgesetzt, deren Messprinzip meist auf der Messung der Laufzeit eines Ultraschallechos basiert. Ein solches Gerät ist die Sonde vom Typ „SONATAX“ (*Hach Lange [2002C]*) (Abbildung 3.32). Mit diesen Sonden hat der Autor Erfahrungen sowohl auf Durchlaufanlagen als auch auf einer SBR-Kläranlage sammeln können. Nachfolgend sind die Ergebnisse des Einsatzes auf der Kläranlage Messel (DBU-Projekt 17258) dargestellt, da hier intensive Erprobungen vorgenommen wurden: Der Messbereich der „SONATAX“-Sonden liegt normalerweise zwischen 0,3 und 6,0 m. Wegen der stark schwankenden Wasserspiegel in den SB-Reaktoren sollte sich jedoch der einstellbare Maximalwert am Mindestfüllstand im Reaktor orientieren (z. B. 3 m). Die Ansprechzeit der Sonde kann ebenfalls eingestellt werden, wobei diese mindestens 10 s betragen sollte. Die Messgeräte bestehen jeweils aus der eigentlichen Sonde und einem dazugehörigen Messumformer, der in der Regel auf einer Arbeitsbühne oder am Beckenrand

montiert wird. Die Schlammspiegelsonden können mit Hilfe üblicher Beckenrandbefestigungen am Dekanter montiert werden; wobei sie dann mit dem Dekanter auf- und abschwimmen. Wegen der Einbaurandbedingungen werden in diesem Fall die Sonden ca. 0,5 m unterhalb des Wasserspiegels montiert. Inkl. des Mindestmessbereichs, der je nach Schlammabsetzeigenschaften zwischen 0,3 bis 0,5 m liegen kann, kann somit mit diesen Geräten der Schlammspiegel(-verlauf) in einem SB-Reaktor ab 0,8 bis 1,0 m erfasst und verfolgt werden. Die Sonden wurden in diesem Beispiel über die analogen 0/4-20 mA-Ausgänge an die Automatisierungsebene angebunden. In der Zwischenzeit gibt es aber ein neueres Modell mit digitalen Universalmessumformer; die hier gemachten Ausführungen gelten aber vom Prinzip her auch für die neue Gerätegeneration.

Abb. 3.32: Installation einer Schlammspiegelsonde (Fa. Hach Lange) in einem SBR (1 = Befestigung am schwimmenden Dekanter, 2 = Ziehen der Sonde für Reinigungsarbeiten, 3 = Sondenunterseite mit Fenster und Wischvorrichtung) (Bildquellen: Autor)

Die Investitionskosten für eine derartige Sonde betragen ohne Mehrwertsteuer ca. 7.000 € (inkl. Messumformer und Beckenrandbefestigung). Schlammspiegelsonden haben sich nach der Erfahrung des Autors als sehr wartungsarm und zuverlässig erwiesen. Von Zeit zu Zeit sollten jedoch auch die Schlammspiegelsonden kontrolliert und gereinigt werden, da ansonsten auch hier die Gefahr besteht, dass der eingebaute Wischer allmählich verzopft und der Wischermotor überlastet wird. Ein negativer Einfluss kleinerer Verzopfungen auf die Messgenauigkeit der Sonde konnte jedoch auch bei einem drei bis vier monatigen Härtetest, während denen keine Reinigung der Sonden erfolgte, nicht beobachtet werden. Die jährlichen Betriebskosten liegen inklusive Personalkosten, Wartung und Betriebsmitteln bei deutlich unter 1.000 €. Bezüglich der Montage am Dekanter gelten die bereits in Abschnitt 3.3.12.2 aufgeführten Vor- und Nachteile.

Bei Vergleichsmessungen über die Sichttiefe wurden mit den Schlammspiegelmesssonden in der Regel Unterschiede von weniger als 10 cm zwischen dem Sondenwert und der Sichttiefe beobachtet; nur vereinzelt traten größere Abweichungen auf, die aber meist unter 20 cm blieben. Abbildung 3.33 zeigt einen Vergleich zwischen der Schlammspiegel- und der Sichttiefenmessung unter normalen Betriebsbedingungen. Die Abbildung verdeutlicht, wie genau die Schlammspiegelmessung unter diesen Bedingungen misst; ab ca. 30 min nach Beginn der

Sedimentation ist die Differenz zwischen Schlammspiegel- und Sichttiefenmessung vernachlässigbar gering. In diesem Zusammenhang gilt es zu beachten, dass zum einen die Sichttiefenmessungen mit zunehmender Sedimentationsdauer dadurch erschwert werden, dass der Abstand zwischen Arbeitsbühne und Schlammspiegel mehrere Meter betragen kann und zum anderen die in kurzen Abständen durchgeführten Sichttiefenmessungen vereinzelt durch die Schlammverwirbelungen der vorangegangenen Messungen beeinträchtigt wurden. Weiterhin beeinträchtigen die Lichtverhältnisse die Genauigkeit der Sichttiefenmessungen. Aufgrund dieser Fehlerquellen lässt sich nicht immer einwandfrei feststellen, wer genauer misst: der Mensch oder die Sonde. Dennoch zeigen die Vergleichsmessungen, dass die Sonde nach 25 bis 30 min den Schlammspiegel ausreichend genau misst [6].

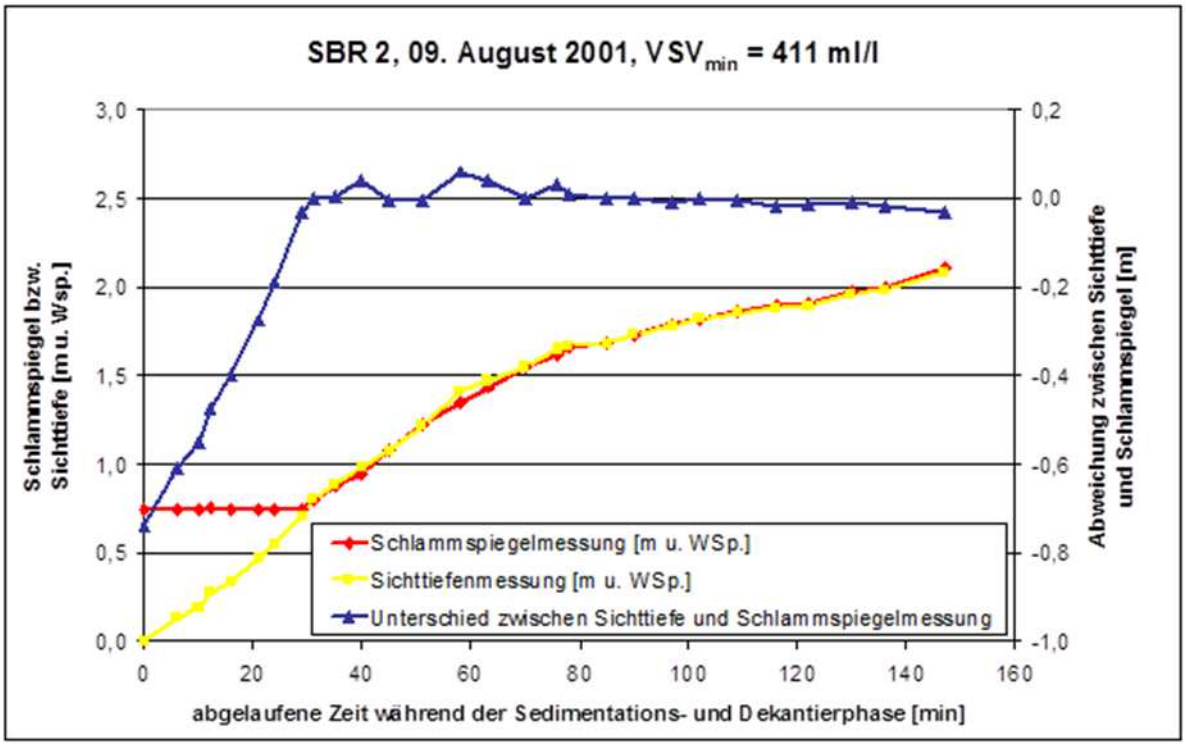


Abb. 3.33: Vergleich von Schlammspiegel- und Sichttiefenmessungen (Quelle: *Wiese [2004]*)

3.3.19 Temperatur

3.3.19.1 Allgemeine Informationen

Die Messung von Temperaturen und Temperaturdifferenzen spielt in der Abwassertechnik und der Biogastechnik eine große Rolle, wobei es sich in der Regel um Standardanwendungen handelt, die in vielen Branchen auch üblich sind. Besonderheiten sind nur in Einzelfällen zu beachten. Daher wird bezüglich technischer Details zur Temperaturmesstechnik auf die weiterführende Literatur verwiesen (z. B. *Früh et al. [2009]* und *Gevatter [1999]*).

3.3.19.2 Einsatz in der Abwassertechnik

Temperaturmessungen spielen an verschiedenen Stellen auf Kläranlagen eine Rolle, wobei zahlreiche dieser Applikationen vergleichbar sind mit denen in der Biogastechnik:

- Außenlufttemperatursensor (siehe Abschnitt 3.3.19.3)

[6] Diese Passage stammt im Wesentlichen aus *Wiese [2004]*.

- Temperatur im Belebungsbecken bzw. SB-Reaktor sowie im Zu- und Ablauf der Kläranlage: Die Prozesse (z. B. Geschwindigkeit) der Abwasserreinigung sind im hohen Maße von der Temperatur des Abwassers abhängig. Insbesondere bei der Stickstoffelimination müssen daher bei niedrigen Temperaturen Abstriche in der Reinigungsleistung in Kauf genommen werden. Aus diesem Grund wird auf vielen Kläranlagen an den zuvor genannten Stellen die Temperatur gemessen, da es in den in der Regel in Freiluft aufgestellten Bauteile im Winter auch zu erheblichen Abkühlungen des Abwassers kommen kann. In der Regel handelt es sich aber um keine separaten Temperatursensoren, sondern um Temperaturmessfühler, die in andere Kontrollmessungen (z. B. pH-Sensor, O_2-Sensor) integriert sind.
- Temperatur im Vor- und Rücklaufheizkreis sowie in Anaerobreaktoren: Bei großen Kläranlagen, die über eine anaerobe Schlammbehandlung und damit über einen Anaerobreaktor verfügen, gelten die gleichen Anmerkungen wie im Abschnitt 3.3.19.3; dies gilt auch für Temperaturmessungen im Bereich der energetischen Verwertung von Klärgas.
- Temperaturkompensation von Qualitätsmessgeräten: Einige Qualitätsmessungen sind temperaturabhängig und müssen entsprechend kompensiert werden (z. B. pH, Redox).
- Temperatursensoren in Peripheriegeräten: Temperatursensoren kommen weiterhin in einer Reihe von anderen Maschinen (z. B. Gebläse) sowie zur internen Überwachung verschiedener Antriebe (z. B. vor Überhitzung) zum Einsatz.

3.3.19.3 Einsatz in der Biogastechnik

Temperaturmessungen kommen an verschiedenen Stellen auf einer Biogasanlage zum Einsatz, wie folgende unvollständige Auflistung zeigt:

- Außenlufttemperatursensor: Wegen der harten und zum Teil langen Winter in Mitteleuropa bietet es sich an, mindestens einen Messfühler zur Bestimmung der Außenlufttemperatur zu installieren. Dieser Sensor ist zum Beispiel dazu geeignet, im Falle einer beginnenden Frostgefahr die Biogasanlage automatisch auf den Winterbetrieb umzustellen. Hierzu gehört etwa die Aktivierung eines Frostschutzprogramms für Pumpen (z. B. regelmäßiges Starten der Pumpe) oder Rohrleitungen (z. B. Rohrbegleitheizung).
- Temperatur im Reaktorinnenraum (Abbildung 3.14, Bild 1): Wie in Abschnitt 8.7 ausgeführt wird, ist es wichtig, den Anaerobprozess auf einem nahezu konstanten Temperaturniveau zu halten. Hierzu ist es wichtig, dass der Reaktor mit mindestens einem Temperaturmessfühler ausgestattet ist. Bei sogenannten liegenden oder hohen Fermentern werden oft auch mehrere Temperatursensoren eingesetzt, die etwa bei einem liegenden Fermenter gestaffelt nach Fließweg (z. B. 1 x am Beginn, 1 x in der Mitte, 1 x am Ende) oder bei einem hohen Fermenter höhengestaffelt (z. B. 1 x oben, 1 x unten) installiert werden.
- Temperatur im Vor- und Rücklaufheizkreis: In der Praxis hat sich gezeigt, dass mit dem Einsatz einer Temperaturmessung im Anaerobreaktor sowie je einer Temperaturmessung im Vorlauf und Rücklauf des Heizkreises eine sehr stabile Regelung der Temperatur im Reaktor erzielen lässt.
- Gastemperatur: Es empfiehlt sich, die Gastemperatur zu erfassen, da der Biogasdurchfluss sowohl vom Druck und der Temperatur abhängig ist. In modernen Geräten erfolgt bereits eine entsprechende Kompensation.
- Temperatur zur Kompensation von Qualitätsmessgeräten: Einige Qualitätsmessungen, wie etwa der pH-Wert oder das Redox-Potenzial, sind temperaturabhängig und müssen daher

entsprechend kompensiert werden. Moderne Sensoren haben meist integrierte Temperaturmessungen und kompensieren automatisch, aber oft wird nur der pH-/Redox-Wert übertragen, während die Temperatur über den Messumformer nicht ausgegeben wird. Es empfiehlt sich daher im Einzelfall (z. B. bei gekapselten Messungen) die Temperatur noch einmal separat zu erfassen und als eigenständiges Mess- und Kontrollsignal mit zu erfassen.

- Temperatursensoren in Peripheriegeräten: Temperatursensoren kommen weiterhin in einer Reihe von anderen Maschinen und Motoren zum Einsatz, wie zum Beispiel zur Überwachung in Blockheizkraftwerken, aktiven Gaskühlungen sowie zur internen Überwachung verschiedener Antriebe (z. B. vor Überhitzung).

Bei diesen Applikationen kommen neben kontinuierlichen Temperatursensoren, die oft auch an die Prozessleitebene angebunden sind, auch noch vielfach analoge Temperaturmessungen zum Einsatz, die nur zur Vor-Ort-Ablesung gedacht sind (siehe Abbildung 3.14, Bild 1).

3.3.20 Trockensubstanz und Trockenmasse

3.3.20.1 Allgemeine Informationen

Der Trockensubstanz-Gehalt (TS) [kg/m^3] ist in der Abwasserreinigung ein wichtiger Leitparameter für die Betriebsführung, da er ein Maß für die Belebtschlammmenge im System ist. Schon seit längerer Zeit wird dieser Parameter daher auch online bestimmt, um zum Beispiel das Schlammalter bzw. den Überschussschlammabzug zu überwachen bzw. zu automatisieren. Einzelne Experten sehen in dem Parameter TS bzw. in den auf feste Substrate bezogenen Trockenmasse-Gehalt (kurz: TM) [%] aber auch einen interessanten Parameter für die Biogastechnik, wobei im begrenzten Umfang auch die TS-Messgeräte aus der Abwassertechnik zum Einsatz kommen können. Insbesondere im hohen TS-/TM-Bereich sind jedoch andere Messverfahren erforderlich; hier sind Mikrowellen-Sensoren oder NIRS-Messungen vielversprechender. Eine Übersicht über die Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Verfahren gibt Tabelle 3.5.

Tab. 3.5: Einsatz verschiedener Messverfahren zur online-TS-Bestimmung im Klär- und Biogasanlagenbereich: X = bedeutsam, - = keine Bedeutung (Quelle: Autor)

Messverfahren	Abwassertechnik	Biogastechnik
Duo-Streulichtverfahren	X	X
Mikrowellen	-	X
Nah-Infrarotspektroskopie	-	X

3.3.20.2 Einsatz in der Abwassertechnik

Kontinuierliche Trübungs- und Feststoff-Messung (TS-Messungen) sind im Bereich der Abwassertechnik heute weit verbreitet, da der Parameter sowohl Rückschlüsse auf das Reinigungspotenzial als auch das Sedimentationsverhalten zulässt. Dementsprechend wichtig ist der Parameter auch in SBR-Kläranlagen, sodass die TS-Messung für verschiedene Zwecke eingesetzt werden können:

- Überwachung der TS-Konzentration und damit der Belebtschlammmenge im Reaktor; darauf aufbauend kann der Übersschussschlammabzug automatisiert werden.
- Überwachung der TS-Konzentration während der Dekantierphase zur Vermeidung von Schlammabtrieb; darauf aufbauend kann der Dekantiervorgang automatisiert werden. Bei Durchlaufanlagen wird mit TS-Messungen oft der Auslauf der Nachklärbecken überwacht.
- Überwachung der TS-Konzentration im Überschussschlamm (siehe unten)
- Überwachung der TS-Konzentration im Rücklaufschlamm (nicht bei SBR-Anlagen)
- Abschätzung der CSB-Konzentration durch Kombination einer SAK-Messung mit einer TS-Sonde (siehe Abschnitt 3.3.3)
- Überwachung der TS-Konzentration im Bereich der Schlammbehandlung und ggf. Regelung der Dosierung für Zusatzstoffe (z. B. Flockungshilfsmittelzugabe bei der maschinellen Eindickung)
- Überwachung der abgegebenen Nassschlamm-TS-Konzentration (*Karg [2009]*)

Damit kann der Einsatz von TS-Messungen auf SBR-Anlagen nicht nur einen Beitrag zur Erhöhung der Betriebssicherheit leisten, sondern auch die Betriebsführung erleichtern. Im Rahmen des DBU-Projektes 17258 konnte der Autor umfangreiche Erfahrungen mit diversen der oben genannten Anwendungen sammeln. Bei den dort eingesetzten TS-Sonden handelte es sich um den Typ „SOLITAX ts-line“ (*Hach Lange [2003C]*) (Abbildung 3.34, Bild 2).

Diese Sonden arbeiten nach dem Prinzip des kombinierten Infrarot-Absorptions-Streulicht-Verfahrens und messen entweder die Trübung oder den TS in einem Bereich von 0,001 FNU bis 4.000 FNU bzw. 0,001 bis 50 g/l TS. Das frei wählbare Messintervall beträgt mindestens 0,5 s. Die Sonden eignen sich aufgrund dieses breiten Anwendungsbereiches sehr gut für die Anwendung in einem SB-Reaktor. Im Projekt Messel wurde pro Reaktor eine Sonde eingesetzt. Eine dritte „SOLITAX“-Sonde (Abbildung 3.34, Bild 3) wurde in der gemeinsamen Überschussschlammabzugsleitung („SOLITAX ts-inline“) untergebracht. Alle drei Sonden wurden über die analogen 0/4-20 mA-Ausgänge an die Automatisierungsebene angeschlossen. Die beiden TS-Sonden in den Reaktoren wurden – analog zu den Nitratmessungen – mit Hilfe der üblichen Beckenrandbefestigung an den beiden Klarwasserabzugseinrichtungen montiert (siehe Abschnitt 3.3.12.2); d. h. sie schwimmen mit den Dekantern mit und messen die TS-Konzentration kontinuierlich ca. 0,8 m unterhalb des Wasserspiegels. Die „SOLITAX ts-inline“ wurde zwischen zwei Absperrschiebern in die Überschussschlammleitung montiert, sodass auf eine teure Spezialarmatur, die ein Ziehen der Sonde auch im laufenden Betrieb möglich macht, verzichtet werden konnte. In der Zwischenzeit gibt es aber ein neueres Modell mit digitalen Universalmessumformer; die hier gemachten Ausführungen gelten aber vom Prinzip her ebenfalls für die neue Gerätegeneration.

Abb. 3.34: Installation einer TS-Messsonde (Hersteller: Hach Lange) in einem SBR und in einer Übersschussschlammleitung (1 = Befestigung der Sonde am schwimmenden Dekanter, 2 = Sonde mit optischen Fenster und Wischvorrichtung, 3 = TS-Sonde in einer ÜS-Leitung) (Bildquellen: Autor)

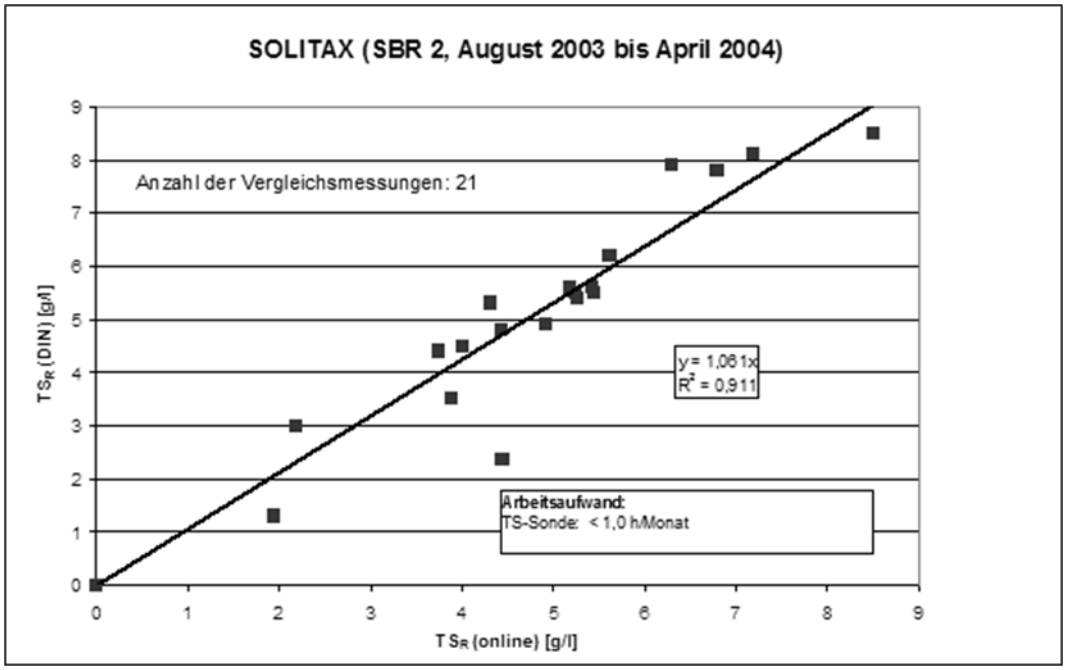


Abb. 3.35: Vergleich zwischen im Prozess online gemessenen TS-Konzentrationen und im Labor ermittelten TS-Konzentrationen (Quelle: *Wiese [2005]*)

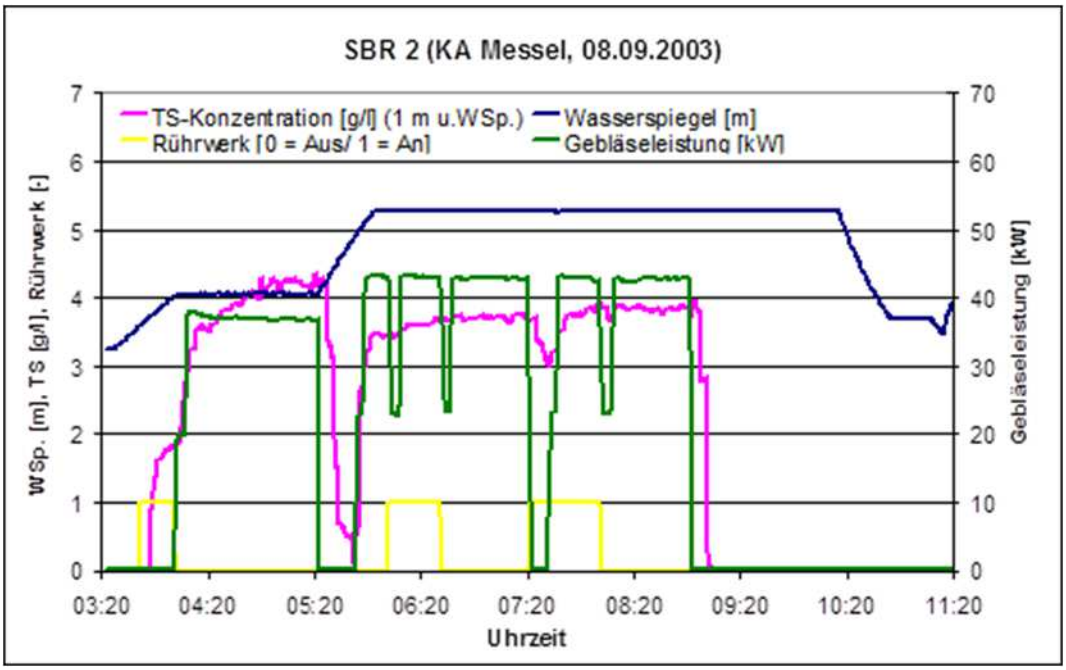


Abb. 3.36: Beispiel für den Verlauf der online-TS-Messung in den verschiedenen Phasen eines Zyklus im SBR 2 (Quelle: *Wiese [2005]*)

Tab. 3.6: Vergleichsmessungen der Ergebnisse mit der TS-Sonde in der ÜS-Schlammleitung mit den Ergebnissen der Laboranalytik (Quelle: Autor)

Datum	Reaktor	TS_{online} [g/l]	TS_{Labor} [g/l]	Abweichung [%]
13.01.2004	SBR 1	9,3	9,6	- 3
13.01.2004	SBR 2	9,7	11,0	- 12
04.02.2004	SBR 1	8,8	7,9	+ 11
04.02.2004	SBR 2	9,8	11,0	- 11
03.03.2004	SBR 1	7,9	9,1	- 13
03.03.2004	SBR 2	7,9	7,8	+ 1
06.04.2004	SBR 1	7,5	8,2	- 9
06.04.2004	SBR 2	7,4	8,3	- 11
05.05.2004	SBR 1	10,0	9,7	+ 3
05.05.2004	SBR 2	10,0	9,8	+ 2
01.06.2004	SBR 1	8,9	9,5	- 6
01.06.2004	SBR 2	9,2	9,7	- 5
	Mittelwert	8,9	9,3	- 5

Die Investitionskosten für eine „SOLITAX“-Sonde betragen je nach Messbereich und Einbauarmatur zwischen 5.000 und 8.000 € ohne Mehrwertsteuer (inkl. Messumformer). Die TS-Sonden haben sich als sehr wartungsarm und zuverlässig erwiesen. Gelegentlich müssen die TS-Sonden jedoch kontrolliert werden, da ansonsten die Gefahr besteht, dass der eingebaute Wischer allmählich verzopft und es zu Fehlmessungen kommt. Die jährlichen Betriebskosten

solcher Messungen liegen inklusive Personal, Wartung und Betriebsstoffen in der Regel weit unter 1.000 € pro Jahr. Auch für die TS-Messungen wurden zahlreiche Vergleichsmessungen im Labor durchgeführt. Exemplarisch sind die Ergebnisse für die TS-Messung im SBR 2 dargestellt (Abb. 3.35). Die TS-Konzentrationen im Bereich unter 10 mg/l wurden über die Differenz zwischen dem homogenisierten und filtrierten CSB abgeschätzt: Die Abbildung 3.35 zeigt, dass das Messgerät im gesamten beobachteten Konzentrationsbereich recht genau misst. Die vereinzelt beobachteten größeren Abweichungen müsse nicht zwangsläufig auf eine Fehlmessung der Sonde zurückzuführen sein: Im Laufe des Projektes wurde festgestellt, dass der Reaktor in vielen Fällen – zumindest aus Sicht der Feststoffverteilung – nicht als volldurchmischt angesehen werden kann (siehe Abbildung 3.36); dies gilt besonders für die gerührte Phase. Hieraus können erhebliche Fehler bei der Probennahme resultieren, weil die händische TS-Probe oberflächennah entnommen wird, während die online-Messung ca. 0,8 m unterhalb des Wasserspiegels erfolgt. Insbesondere im untersten Bereich (< 20 mg/l TS) scheinen die Sonden sehr gut zu funktionieren, was besonders wichtig ist, da die TS-Messungen primär einer Überwachung der Dekantierphase bzw. der Vermeidung von Schlammabtrieb dienen. Tabelle 3.6 zeigt die Ergebnisse von Vergleichsmessung für die TS-Sonde in der Überschussschlammleitung: Auch hier wird deutlich, dass die Labor- und Echtzeit-Werte meist gut übereinstimmen; eine gute Grundlage für die Regelung des Überschussschlammabzugs.

3.3.20.3 Einsatz in der Biogastechnik

Wie bereits ausgeführt, gibt es zahlreiche Ansatzpunkte für den Einsatz von TS-Messungen auf Biogasanlagen. Eine Auswahl zeigt die folgende Auflistung:

- TS/oTS-Gehalt: Der TS-Gehalt dient unter anderem der Abschätzung der aktuellen Raumbelastung bzw. dessen zeitlicher Veränderung. Die organische TS-Konzentration (oTS) ist für den Anlagenbetrieb eine wichtige Kenngröße, da zu hohe Raumbelastungen (oft > 3 kg oTS/($m^3 \cdot d$)) zu einer Überlastung des Fermenters führen können.
- Ferner kann der TS-Gehalt für eine Bilanzierung der Stoffströme in der Biogasanlage hilfreich sein. Dies gilt besonders dann, wenn der Wert über den gesamten Prozessverlauf erfasst wird, wie zum Beispiel:
  - TS-Gehalt in der Gülle
  - TM-Gehalt in den zugegebenen Feststoffen
  - TS-Gehalt im Fermenter und Nachgärer
  - TS-Gehalt im abgegebenen Gärrest
- Der Ausfall eines Rührwerkes kann auf eine Überlastung durch eine zu hohe Faulraum- bzw. TS-Belastung zurückzuführen sein. Es bietet sich daher an, bei der Überschreitung eines vordefinierten Wertes – bei Rührkesselreaktoren bietet sich ein Wert von maximal 10 % TS – eine automatische Alarmierung einzuleiten, damit rechtzeitig Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können.
- Weiterhin kann eine online-TS-Messung zur energieoptimierten Ansteuerung der Rührwerke (Taktung, Leistung, Niveau) und der Pumpen (Leistung) eingesetzt werden; dies gilt besonders dann, wenn diese Motoren mit Frequenzumformern ausgestattet werden.

- Überwachung der flüssigen Inputstoffe und der Reaktoren, Manipulation der Rezirkulation und der Frischgüllezugabe, ggf. in Kombination mit TS/oTS-Erfassung der Feststoffe → Energiebezogene Fütterung
- Ermittlung der TS-Konzentration im abgegebenen Gärrest

Duo-Streulicht-Verfahren (adaptierte Verfahren aus der Abwassertechnik)

Die in Abbildung 3.37 dargestellten Werte stellen einen Ausschnitt von Vergleichsmessungen dar: In diesem Fall war die TS-Sonde in der Pumpstation eingebaut, sodass sowohl der Fermenter als auch der Nachgärer beprobt werden konnten. Zum Einsatz kam eine Feststoffsonde (Typ „Solitax highline SC“), einem Nachfolgegerät des in Abschnitt 3.3.20.2 vorgestellten Sensors (*Hach Lange [2003C]*). Diese Edelstahlsonde ist selbst reinigend und mit einem kombinierten Infrarot-Absorptions-Streulicht-Verfahren (Duo-Streulicht-Methode bei 860nm: 90° Streulicht kombiniert mit einer 140° Rückstreulicht-Messung) zur Messung gefärbter Flüssigkeiten und Schlämme in Rohrleitungen. Der Messbereich beträgt 0,001 bis 150 g/l TS (15 % TS). Für den Rohrleitungseinbau ist eine Sicherheitsarmatur (Ein-/Ausbau bei gefüllter Rohrleitung) erhältlich. Die Investitionskosten für eine derartige Messung betragen etwa 7.500 € netto inkl. Messumformer und Einbauarmatur.

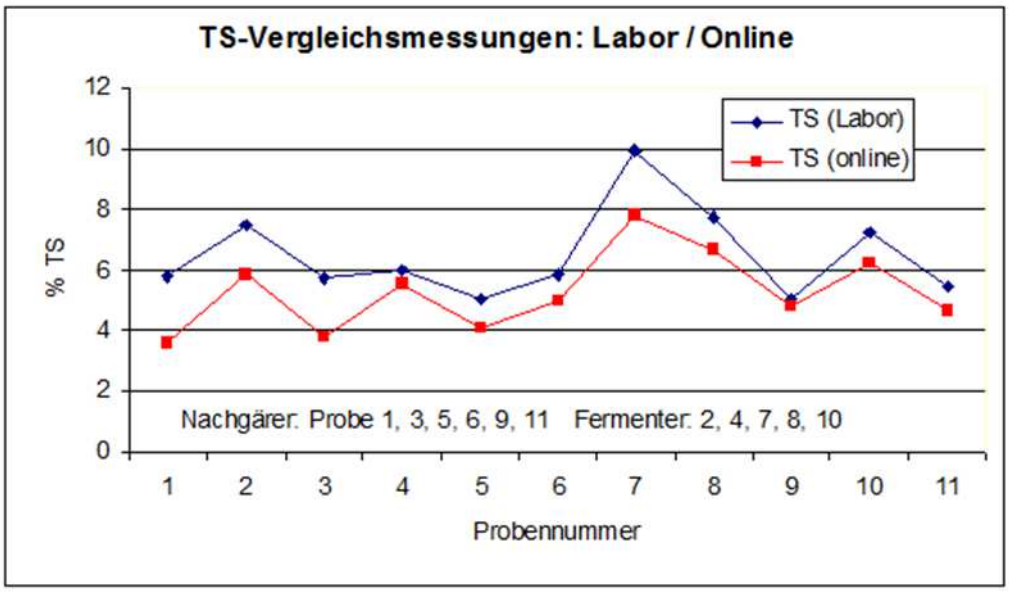


Abb. 3.37: TS-Vergleichsmessungen: TS-Sonde vs. Labor (Quelle: *Wiese und König [2006]*)

Parallel zu den online-Messungen wurde der TS-Gehalt in einem externen Referenzlabor gravimetrisch ermittelt (Abbildung 3.37). Die ermittelten TS-Werte bewegen sich zwischen 3,8 und 10 %, wobei die Ergebnisse der Labormessung jeweils leicht über den Ergebnissen der online-Messung liegen. Bedingt durch die jeweils variierende Teilchengrößenverteilung im Gärsubstrat muss daher für den Abgleich einer TS-Sonde generell mit einem anlagen-spezifischen Korrekturfaktor gearbeitet werden. In Einzelfällen bietet es sich auch an, mit bauwerksspezifischen Korrekturfaktoren zu arbeiten (z. B. unterschiedliche Korrekturfaktoren für Vorgrube, Fermenter, Nachgärer und Gärrestlager). Beide Ganglinien geben jedoch die Schwankungen der TS-Gehalte innerhalb des Fermentationsprozesses bzw. die Unterschiede zwischen Fermenter und Nachgärer deutlich wieder (*Wiese und König [2006]*).

Mikrowellensensorik

Nacke et al. [2009] berichten über den Einsatz von in-line-Mikrowellensensorik (Reflexionsprinzip) zur Bestimmung des organischen Trockenmasseanteils (oTS) in Prozessmedien von Biogasanlagen. Nach Auffassung von *Nacke et al.* spielt die online-Bestimmung des oTS im Eingangsrohstoff und im Fermenter zur Bestimmung wichtiger Prozessgrößen, Effizienzkennzahlen und der Biogasausbeute eine wichtige Rolle. Den Vorteil der Mikrowellenmesstechnik sehen die Autoren im breiten Messspektrum (2 bis 90 % TS) für flüssige und feste Biomassen sowie der Robustheit der Messung, da diese kein Kontakt zu dem Medium hat. Das von der Fa. hf sensor Leipzig GmbH vertriebene System ist ein modulares Messsystem, das für verschiedene (Einbau-) Applikationen eingesetzt werden kann (Fermenter, Rohrleitung). Neben dem eigentlichen Sensor (Spektralbereich: 2,2 bis 2,6 GHz) ist der wesentliche Bestandteil des Systems ein statistisches Auswerteprogramm mit einem multivarianten Modellansatz zur Bestimmung des TS/oTS-Gehalts; dabei wurden die besten Kalibrierergebnisse mit der PLSR-Methode (Partial Least Square Regression) ermittelt. Anhand einer Abbildung, die einen Vergleich der online gemessenen oTS-Werte mit den im Labor bestimmten Werten über eine Dauer von 160 Tagen zeigt, belegen die Autoren eine gute Übereinstimmung der Laboranalyse mit der Mikrowellenmesstechnik. *Göller und Nacke [2012]* berichten über weitere praktische Einsatzfälle mit dem Mikrowellen-TS-Sensor.

Nahinfratospektroskopie (NIRS)

Wie bereits in Abschnitt 3.3.13 wird schon seit Jahren mit dem Einsatz von NIRS-Messtechnik auf Biogasanlagen experimentiert, wobei diese Geräte zum Teil auch für die Bestimmung von TS und oTS bzw. TM und oTM kalibriert wurden. So berichten *Jabobi et al. [2008]* über den Einsatz einer NIRS-Messung auf einer NawaRo-Biogasanlage mit 720 kW_{el}. Zur Kalibrierung der NIRS-Messung wurden zahlreiche Vergleichsmessungen durchgeführt und dadurch für TS (0,97) und oTS (0,95) sehr gute Bestimmtheitsmaße ermittelt. Über eine ähnliche Applikation wird im Abschnitt 10.1.7 noch genauer eingegangen.

3.3.21 Vergleichsschlammvolumen (VSV)

3.3.21.1 Allgemeine Informationen

Das Vergleichsschlammvolumen (VSV) ist eine Messgröße, die Rückschlüsse auf das Sedimentationsverhalten des Belebtschlamms zulässt. Bisher handelt es sich dabei um einen Parameter, der händisch im Labor nach DIN-Messung (DIN 38 414-10) ermittelt wird, wobei seit Jahren die Möglichkeit besteht, diese Messgröße auch online zu ermitteln.

3.3.21.2 Messgerät

In Abbildung 3.38 ist ein VSV-Messgerät dargestellt: Es handelt sich dabei um eine quasikontinuierliche in-situ-Messung vom Typ „VOLITAX“ der Fa. *Hach Lange [2003J]*. Das Gerät besteht neben einem Messumformer aus einem Sedimentationsgefäß indem sich ein optischer Sensor befindet. Dieser Sensor misst mit Hilfe einer Zeilenkamera den Verlauf und die Geschwindigkeit, mit der sich der belebte Schlamm im birnenförmigen Sedimentationsgefäß absetzt und rechnet aus diesen Werten den VSV aus. An den Messumformer kann auch eine TS-Sonde angeschlossen werden; in diesem Fall kann auch der ISV online ermittelt werden. Der Messbereich wird vom Hersteller mit 50 bis > 750 ml/l angegeben. Die eigentliche

Messung dauert analog zur händisch durchgeführten DIN-Messung genau 30 min. Inklusive der erforderlichen Dauer für die Befüllung und Entleerung des Sedimentationsgefäßes umfasst ein Messzyklus etwa 40 min. Die „VOLITAX“-Sonde kann – analog zu den anderen Sonden – mit Hilfe üblicher Beckenrandbefestigungen an einem schwimmenden Dekanter montiert werden. Der Messumformer kann über die analogen 0/4-20 mA-Ausgänge an die Automatisierungsebene angebunden werden.

Die Investitionskosten für eine „VOLITAX“-Sonde betrugen zuletzt ca. 8.300 € netto inklusive Messumformer und Beckenrandbefestigung. Das Gerät wird zurzeit von der Fa. Hach Lange nicht mehr vertrieben, da eine Umstellung auf das neu eingeführte, digitale Universalcontrollersystem nicht erfolgt ist. Ob dies noch erfolgen wird, bleibt abzuwarten.

Die „VOLITAX“-Sonde hat sich als wartungsarm erwiesen, allerdings muss hier mindestens einmal pro Monat das Sedimentationsgefäß und die Zeilenkamera gereinigt werden. Der vom Hersteller angegebene Wartungsaufwand von einer Stunde pro Monat wird dann in etwa ausgeschöpft, sofern aufgrund der Einbaurandbedingungen zwei Personen eingesetzt werden müssen. Da das Gerät über keine großen Verschleißteile verfügt, dürften die jährlichen Betriebskosten unter 500 € (inkl. Personalkosten) liegen. Bezüglich der in Messel gewählten Montage gelten die bereits in Abschnitt 3.3.12.2 aufgeführten Vor- und Nachteile. Die Abbildung 3.39 zeigt die Ergebnisse von Vergleichsmessungen; die händische Probennahme erfolgte dabei parallel zu dem Füllvorgang des Sedimentationsgefäßes der VSV-Messung.

Abb. 3.38: Installation einer VSV-Messsonde (Fa. Hach Lange) in einem SBR (1 = Befestigung der Sonde am schwimmenden Dekanter, 2 = VSV-Messung mit birnenförmigen Sedimentationsgefäß, 3 = Zeilenkamera im Inneren des Sedimentationsgefäß) (Bildquellen: Autor)

Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen ergaben die folgenden Erkenntnisse:

- Die quasi-kontinuierlich und händisch ermittelten VSV-Werte korrelieren sehr gut (Bestimmtheitsmaß: 0,9338) über den gesamten Messbereich.

- Bereits mit der werksseitigen Kalibrierung ließen sich brauchbare Ergebnisse erzielen. Nach Ermittlung einer ausreichenden Anzahl von Vergleichsmessungen empfiehlt es sich jedoch, die online-Messwerte mit der ermittelten Trendlinie umzurechnen.

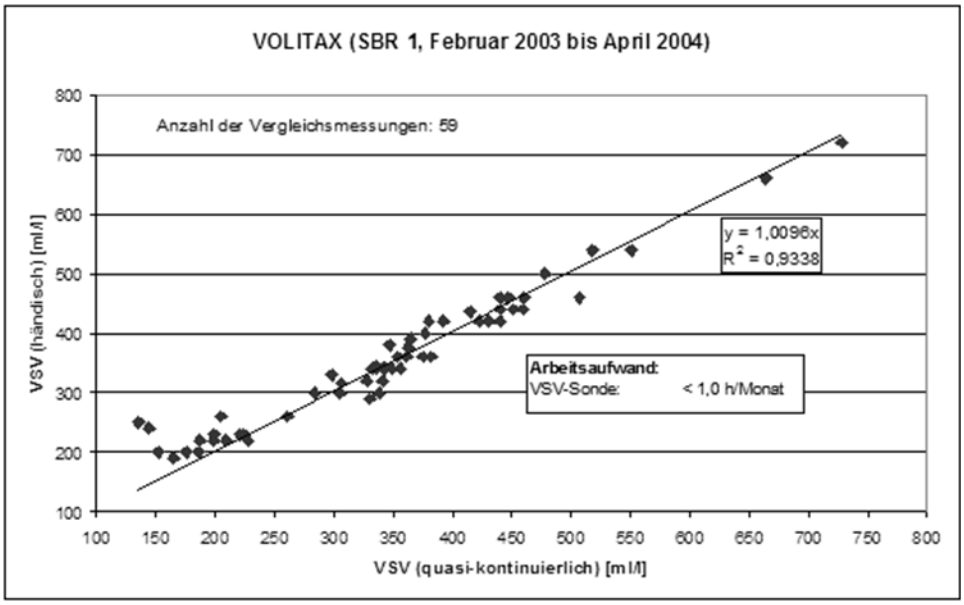


Abb. 3.39: Vergleich zwischen händisch ermittelten VSV-Werten und den Werten einer VSV-Sonde (in-situ) vom Typ „VOLITAX“ (Quelle: *Wiese [2005]*)

Kim et al. [2009] berichten über positive Ergebnisse mit einem VSV-Messgerät, das auf einem ähnlichen Prinzip basiert wie der zuvor vorgestellte Sensor, sodass Hoffnung besteht, dass derartige Sensoren zukünftig wieder am Markt verfügbar sein werden.

3.3.22 Wägesysteme

Die Messung von Gewichten spielt in der Abwassertechnik nur in Einzelfällen eine Rolle (z. B. Verwiegung von entwässertem und zu entsorgendem Klärschlamm), wobei selbst in diesen Fällen meist auf externe Dienstleister bzw. Waagen zurückgegriffen wird. Hingegen sind Wägezellen auf Biogasanlagen von großer Bedeutung (Abb. 3.40):

- Verwiegung im Prozess:
  - Wägezellen unter Feststoffdosierern zur Ermittlung des Behälterinhalts bzw. der bereits pro Fütterung dosierten Menge
  - Wägezellen unter Anmischbehältern zur Ermittlung des Behälterinhalts und ggf. zur Überwachung von Rezepturen
  - Wägezellen bei Förderbändern
- Verwiegung im Rahmen der Substratlogistik:
  - Verwiegung des ankommenden Lieferverkehrs (z. B. Silagewaagen)
  - Verwiegung des abgehenden Lieferverkehrs (z. B. Gärreste)

Bei der Verwiegung im Prozess kommen in der Regel Wägezellen zum Einsatz, die unter den Behälterfüßen installiert werden. Bei der Erfassung der Substratlogistik kommen sowohl LKW-Waagen (25.000 bis 30.000 € netto) als auch Achswaagen zum Einsatz, die deutlich günstiger sind. Bei alle diesen Wägesystemen handelt es sich um Standardanwendungen, die in vielen

Branchen im Einsatz sind; Besonderheiten sind nur in Einzelfällen zu beachten. Aus diesem Grund wird bezüglich der Grundlagen, den Messprinzipien, den Messsensoren und der Messgenauigkeit der heutigen Wägetechnik auf *Früh et al. [2009]* verwiesen.

Abb. 3.40: Wägevorrichtungen auf Biogasanlagen (1 = Wägezelle unter einem Feststoffdosierer, 2 = LKW-Fahrzeugwaage) (Bildquellen: Autor)

3.3.23 Weitere Messungen

Es gibt immer wieder Versuche, weitere Messgeräte auf Kläranlagen und Biogasanlagen zu testen, wobei diese über Einzelapplikationen selten hinauskommen. Eine unvollständige Liste umfasst unter anderem die folgenden Parameter: Strömung, Viskosität, Dichte, Pufferkapazität, Gasfeuchte, …

Kottmair [2011] beschreibt ein automatisches Probenahme- und Messgerät („APAS“) zur online-Überwachung der Alkalinität von Biogasanlagen, da er hierin einen der wesentlichen Parameter für die Prozessüberwachung sieht; dabei verfolgt er einen ähnlichen Ansatz wie *Clemens und Hecht [2006]*, die jedoch ein einfaches, manuelles Messgerät entwickelten (siehe Abschnitt 3.8.2). *Lindorfer [2012]* berichtet unter anderem über Ergebnisse mit einer online-Bicarbonatmessung der Fa. IBK Bioanalytik GmbH. Die Ausführungen lassen jedoch nur wenige Rückschlüsse über Details (Genauigkeit, Preis etc.) zu.

Endress+Hauser [2012] berichten über den Einsatz einer Dichtemessung zwecks Optimierung eines Fermenters zur Erzeugung von Bioethanol. Das Messgerät basiert auf der Resonanzfrequenz einer Schwinggabel, ein Prinzip das auch für andere Zwecke (z. B. Grenzfüllstandsmessung) eingesetzt wird: Dabei wird aus der Resonanzfrequenz direkt die Dichte abgeleitet. Das Messprinzip kam bei dieser Applikation zum Einsatz, weil es weniger Anforderungen stellt als andere Dichtemessverfahren (z. B. das Coriolisverfahren erfordert eine ausreichende Strömung; die Radiometrie kann ggf. einen Einfluss auf die Biozenose haben). Ob dieses Verfahren auch auf Biogasanlagen einsetzbar ist, bleibt abzuwarten. Problematisch könnte hier sein, dass es in den großen Reaktoren (und sich ausbildender Gaszonen) größere Dichteunterschiede über den Querschnitt geben kann.

3.4 Energiemessgeräte

3.4.1 Elektrizität

Der Einsatz von Energieverbrauchsmessgeräten hat auf Kläranlagen lange Zeit nur eine geringe Bedeutung gehabt: Oftmals begnügte man sich mit einer Messung des Stromverbrauchs am Netzanschlusspunkt. Durch ständig steigende Strompreise hat in den letzten Jahren ein Umdenken stattgefunden, denn mittlerweile wird zunehmend auch der Energieverbrauch von größeren Verbrauchsgruppen (z. B. Einlaufbaugruppe, Belebungsbecken, Schlammbehandlung) und zum Teil auch schon von einzelnen Verbrauchern (z. B. Gebläse, Rührwerke) erfasst, sodass bei solchen Anlagen zahlreiche Informationen zur Verfügung stehen, um gezielt Schwachstellen zu identifizieren und Energieoptimierungspotenzial zu ermitteln. Neben der Ermittlung des eigentlichen Stromverbrauchs ist aber auch der Leistungslastgang von Interesse, denn viele Kläranlagen sind als Großverbraucher Sondervertragskunden, die nicht nur den Stromverbrauch, sondern auch die Leistungsbereitstellung bezahlen müssen; meist auf Basis der monatlichen 15 min-Lastspitzen. Abbildung 3.41 zeigt einen exemplarischen Tagesgang eines Leistungslastgangs einer Kläranlage: Es wird deutlich, dass der Lastgang starken Schwankungen unterliegt, was zum Teil auch aus dem unkoordinierten Zuschalten von elektrischen Verbrauchern resultieren kann, kurzzeitig erhebliche, abrechnungsrelevante Lastspitzen resultieren. Um derartige Lastspitzen so weit wie möglich zu vermeiden, können Lastwächter oder Lastabwurfsysteme bei Bedarf weniger wichtige Verbraucher automatisch abschalten.

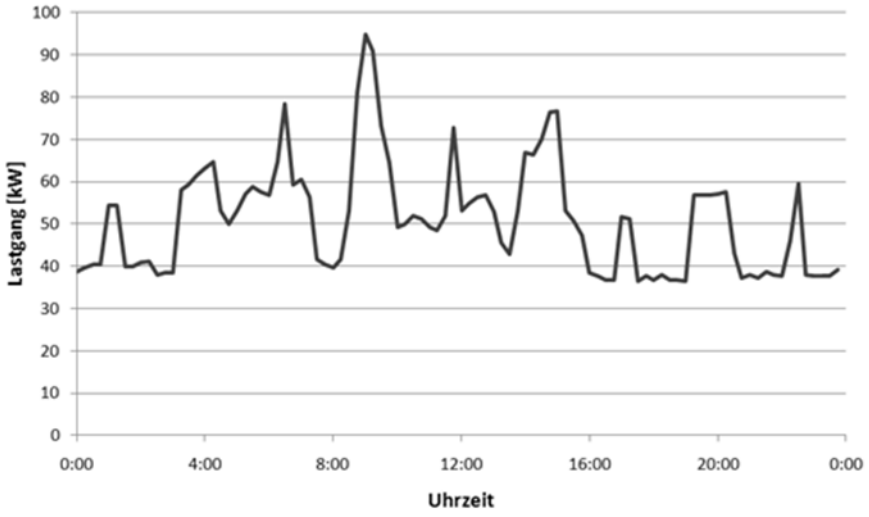


Abb. 3.41: Tageslastgang (15 min-Werte) der elektrischen Leistung einer Kläranlage (Quelle: Autor)

Ähnlich verhält sich die Situation bei den Biogasanlagen: Hier wurde über lange Zeit nur die in das Stromnetz eingespeiste Strommenge sowie die für den Eigenbedarf abgenommene Strommenge erfasst. Da der Eigenenergiebedarf einer Biogasanlage (z. B. für Rührwerke, Feststoffdosierer, Pumpen, BHKW) bis zu 10 % der erzeugten Strommenge ausmacht, gewinnt bei steigenden Strompreisen und einem höheren Kostendruck auf die Anlagenbetreiber auch die Optimierung des Eigenstromverbrauchs an Bedeutung.

In beiden Fällen handelt es sich um Aufgaben, die bereits in anderen Branchen seit Jahren erfolgreich in Angriff genommen wurden, sodass sowohl bezüglich der Methodiken als auch der Mess- und Automationsgeräte auf das Standardrepertoire der Industrieautomation zurückgegriffen werden kann. Eine Übersicht über die Erfassung und Bewertung von Energieverbräuchen anhand von Echtzeit- und Handmessgeräten gibt *Faulstich [2011]*. *Merkl [2008]* gibt eine kompakte Übersicht über die verschiedenen im Bereich der Niederspannungsverteilung üblicherweise eingesetzt Messgeräte (z. B. Voltmeter, Ampermeter, Energiezähler); die Ausführungen beziehen sich auf die elektrotechnische Ausstattung von Wasserwerken, lassen sich aber auch auf die Abwasser- und Anaerobtechnik übertragen.

3.4.2 Wärme

Die Messung von Wärme ist auf Kläranlagen in der Regel unüblich. Auf Biogasanlagen ist diese Thematik aber von zunehmender Bedeutung, da der Gesetzgeber im zunehmenden Maße eine sinnvolle Nutzung der Abwärme der Blockheizkrafte fordert, aber auch durch entsprechende Anreize (z. B. Bonus auf Wärmenutzung durch Kraft-Wärme-Kopplung) schafft. Für eine zuverlässige Abrechnung ist daher das Messen der Wärmemenge (z. B. am Abgabestutzen zu dem externen Wärmeabnehmer) wichtig, wobei aber in der Regel keine Anbindung an die Automation notwendig ist, sondern eine regelmäßige manuelle Ablesung ausreichend ist. Auch hier handelt es sich um Standardapplikationen wie sie in anderen Branchen üblich sind.

3.5 Wetterdaten

Die Berücksichtigung von Wetterdaten und deren Anbindung an Prozessleitsysteme kann für Kläranlagen und Biogasanlagen eine sinnvolle Ergänzung darstellen, wobei sowohl die Motivation für die Verwendung von Wetterdaten als auch Art und Umfang unterschiedlich sind. Aus diesem Grund erfolgt nachfolgend eine Unterscheidung zwischen Wetterstationen und Niederschlagsmessgeräten.

3.5.1 Wetterstationen

Biogas wird von der Bevölkerung nicht nur positiv aufgenommen: In einzelnen Kommunen haben sich Bürgerinitiativen gegen existierende oder in Planung befindliche Biogasanlagen gebildet. Bedenken haben diese Bürgerinitiativen vor allem im Hinblick auf einen Anstieg der Verkehrsbelastung und Lärm- bzw. Geruchsbelästigungen. Beim ersten Problem kann Mess- und Automationstechnik keinen oder nur einen geringen Anteil zur Verbesserung liefern. Bezüglich der – oftmals subjektiv geprägten Geruchsproblematik – kann der Einsatz einer automatischen Wetterstation zur Dokumentation von Windrichtungen etc. sinnvoll sein. Derartige Technik ist bereits kommerziell verfügbar und für vertretbare Kosten (<< 5.000 €) verfügbar. Für Biogasanlagenbetreiber, die derartige Systeme einsetzen, liegt der Vorteil darin, dass hierdurch zahlreiche unbegründete Vorwürfe ausgeräumt werden können, da zum Beispiel zum Zeitpunkt der vermeintlichen Geruchsbelästigung nachweislich eine andere Windrichtung herrschte. Übliche Daten, die mit den kommerziell verfügbaren Wetterstationen (Abb. 3.42) erfasst werden, sind:

- Windrichtung
- Windgeschwindigkeit

- Lufttemperatur
- Luftdruck
- Luftfeuchtigkeit

Einzelne Betreiber von Biogasanlagen mit Einhüllen-Gasspeicherdächern reduzieren bei Sturmgefahr die Leistung des BHKW, damit der Gasdruck ansteigt und damit die Gefahr eines Ausschwingens der Gasblase bei hohen Windgeschwindigkeiten reduziert wird. In diesem Zusammenhang ist es denkbar, dass eine Wetterstation in ein Automationskonzept eingebunden wird (z. B. bei starken Gasdruckschwankungen im Tagesrhythmus oder bei einem Wetterumschwung). Die Einbindung der Außentemperatur in die Automationsebene kann ebenfalls von Vorteil sein, um bei Frostgefahr automatisch auf einen Winterbetrieb umzustellen. Derartige Wetterinformationen sind auf Kläranlagen hingegen kaum von Bedeutung: Lediglich die Einbindung der Außenlufttemperatur für Zwecke eines automatisierten Winterbetriebs findet auch hier vereinzelt Anwendung.

3.5.2 Niederschlagsmessungen

Die Dynamik des Kläranlagenzuflusses ist im Wesentlichen auch von Niederschlagsereignisssen geprägt. Daher kann es sinnvoll sein, auf der Kläranlage oder ggf. auch im Einzugsgebiet der Kläranlage, den Niederschlag kontinuierlich zu messen, um auf Basis der Messergebnisse vorausschauend die Betriebsweise der Kläranlage, wie zum Beispiel bei SBR-Anlagen durch ein frühzeitiges Umschalten von einem Trockenwetterzyklus in einen verkürzten Regenwetterzyklus. Ein solches Gerät zeigt Abbildung 3.42. Bei dem abgebildeten Gerät handelt es sich um einen Niederschlagsgeber der Fa. Thies Clima. Der Niederschlagsgeber, der eine Auffangfläche von 200 cm^2 besitzt, ist mit einer Kippwaage ausgerüstet, die eine Auflösung von 0,1 mm pro Impuls besitzt. Das Gerät ist mit einem Datenlogger ausgestattet, der zu jedem Impuls das Datum und die Uhrzeit registriert. Derartige Niederschlagsgeber haben sich als wartungsarm erwiesen; der Behälter muss jedoch regelmäßig (z. B. von Vogelkot) gereinigt werden. Da keine Verschleißteile vorhanden sind, liegen die Betriebskosten selbst inklusive Personalkosten bei weniger als 500 € pro Jahr. Für Biogasanlagen ist die Erfassung von Niederschlagsdaten in der Regel ohne Bedeutung.

Abb. 3.42: Wettermessgeräte: 1 = stationäre Wetterstation auf dem Lagerbehälter einer Biogasanlage, 2 = Niederschlagsmessung

3.6 Sicherheitsmesstechnik

Bezüglich des Einsatzes von Sicherheitsmesstechnik sei auf die Abschnitte 6.5.6 und 9.5.4 verwiesen.

3.7 Videotechnik

Gwodzek [2007] identifiziert für den allgemeinen Einsatz von Videoüberwachungssystemen die folgenden Anwendungsgebiete:

- Medizin
- Forschung
- Sicherheit
- Produktion
- Messtechnik

In der Abwasser- und Biogastechnik kommen von diesen fünf Anwendungsfällen die Bereiche Sicherheit und Messtechnik, ggf. noch die Forschung in Frage.

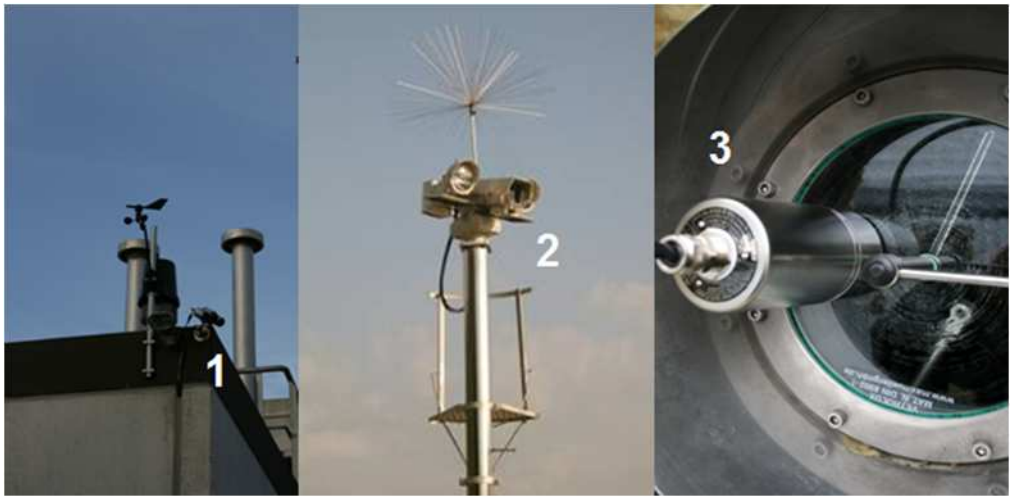


Abb. 3.43: Web-Cam zur Objektsicherung einer Biogasanlage (1), schwenkbare Videotechnik mit Leuchtvorrichtung auf einem Mast zur Überwachung der wesentlichen Bauwerke einer Kläranlage (2), Ex-geschützte Videokamera zur Überwachung des Innenraums eines Anaerobreaktors (3) (Bildquellen: Autor)

3.7.1 Videosysteme als Sicherheitstechnik

Im Bereich der Sicherheitstechnik identifiziert *Gwodzek [2007]* die folgenden Applikationen:

- Personenschutz
- Objektschutz
- Sicherung von Sachwerten
- Vandalismusbekämpfung
- Verbrechensaufklärung
- Verkehrslenkung
- Umweltschutz

In der Abwasser- und Biogastechnik sind von diesen Applikationen in der Regel nur der Objektschutz, die Sicherung von Sachwerten und die Vandalismusbekämpfung: In Einzelfällen ist es bereits vorgekommen, dass Sabotageakte auf Anlagenteile von Biogasanlagen oder Baumaschinen verübt wurden. Weiterhin kommt es vor, dass auch außenliegende Not-Aus-Schalter (z. B. bei BHKW-Containern) bei ungesicherten Objekten mutwillig gedrückt werden. Auch Abwasseranlagen werden Opfer von Vandalismus oder Einbruchsversuchen (z. B. Diebstahl von Computern und Werkzeugen). Derartige Probleme und Risiken lassen sich bereits heute mit denen in der Sicherheitstechnik vorhanden Komponenten (VIS/IR-Videoüberwachung, Bewegungsmelder, Lichtschranken) reduzieren (Abbildung 3.43, Bild 1).

3.7.2 Videosysteme in der Logistik

Videosystemtechnik kann auch im Bereich der Logistik auf Biogasanlagen unterstützend zum Einsatz kommen (z. B. *OAS [2011]*): Ein typisches Beispiel ist die Kombination einer Videokamera mit einer Wägeeinrichtung. Die ankommenden und abgehenden LKW und landwirtschaftlichen Fahrzeuge werden verwogen, wobei von dem Fahrzeug per Videokamera eine Aufnahme gemacht wird, die für die Dokumentation (z. B. Zuordnung eines Fotos zum Wiegeschein) verwendet werden oder für eine (automatische) Fahrzeugerkennung (z. B. Kennzeichenerkennung mit Übertrag in den Wiegeschein) dienen kann.

3.7.3 Videosysteme zur Prozessüberwachung und Messung

Videosysteme – auch in Kombination mit automatischer Bildverarbeitung – finden in der Industrie und Industrieautomation seit Jahren zunehmende Verbreitung, wie zum Beispiel für Zwecke der optischen Qualitätskontrolle (*Demant et al. [2009]*). Hingegen sind derartige Ansätze im Bereich der Kläranlagen- und Anaerobtechnik bisher noch kaum im Einsatz, jedoch gibt es in den letzten Jahren auch hier interessante Ansätze:

Der Kostendruck und die immer zuverlässige Mess-, Automations- und Maschinentechnik führen dazu, dass einzelne Kläranlagen nicht mehr arbeitstäglich besetzt sind, sondern nur noch für die Routinemessungen sowie für die Wartung angefahren werden. Derartige Anlagen werden über Fernwirktechnik an eine zentrale Station (z. B. eine größere Kläranlage) angebunden. Erste Anlagenbetreiber binden dabei nicht nur die Leitsysteme und die Messgeräte an Zentralen an, sondern statten neuralgische Punkte der Kläranlage (z. B. Zulauf, Ablauf, Belebungsbecken) mit Videoüberwachungstechnik aus (Abb. 3.46, Bild 2), sodass sich die Bediener aus der Ferne auch einen visuellen Überblick verschaffen können. So setzt zum Beispiel die Westpfälzische Ver- und Entsorgungs GmbH schon seit Jahren Videotechnik zur Überwachung ihrer zahlreichen dezentralen Kläranlagen ein (*WVE [2007]*), wobei dem Bediener nicht nur das aktuelle Videobild („IST-Bild“) angezeigt wird, sondern auch der Soll-Zustand angezeigt wird: Durch einen Abgleich der beiden Bilder kann der Bediener eventuelle Fehlzustände identifizieren.

Wölle und Ebert [2009] berichten über den Einsatz einer WLAN-fähigen WebCam zur Prozessüberwachung einer störanfälligen Siebtrommel zur Fest-Flüssig-Trennung in einer Schwarzwasseraufbereitungsanlage. Da die Anlage nicht mit Personal besetzt ist und die Siebtrommel eine zentrale Komponente darstellt, wurde eine automatische Bilderkennung implementiert: Über den pixelweisen Abgleich zweier aufeinander folgender Graubilder diagnostiziert das System den ordnungsgemäßen Betrieb der Siebtrommel; andernfalls erfolgt eine Alarmierung.

In der Anaerobtechnik werden vereinzelt auch schon Videosysteme zur Prozessüberwachung eingesetzt (Abbildung 3.43, Bild 3); ein Beispiel hierfür stellt die in Abschnitt 10.2.1 vorgestellte Videoüberwachung des Inneren eines Anaerobreaktors dar.

Einzelne Forscher beschreiten andere Wege, in dem sie die Möglichkeiten der Videotechnik für Zwecke einer Prozesssteuerung untersuchen:

Rozaimah et al. [2006] berichten über ein online-Analysesystem zur Regelung der Dosierung von Flockungshilfsmitteln in der Abwasserbehandlung, das auf einer Bilderkennung basiert. Eine Webkamera und eine Lichtquelle ermöglichen Echtzeit-Aufnahmen in den Flockungsreaktor hinein. Ein Bildverarbeitungsprogramm analysiert dann die Flockengröße und -verteilung. Das Ergebnis beeinflusst anschließend die Menge an Flockungshilfsmitteln, die dem Abwasser – in diesem Fall aus einer Palmölfabrik – zugegeben werden.

Heim et al. [2009] untersuchten die Möglichkeiten der dynamischen Bildanalyse zur Beurteilung von Belebtschlämmen. Die Autoren fanden dabei heraus, dass damit nicht nur fadenförmige Bakterien detektiert werden können, sondern auch unterschiedliche Schlämme (z. B. Primärschlamm, Überschussschlamm) identifiziert werden können; ebenfalls konnten Veränderungen in der Partikelgröße der Schlammflocken detektiert werden. Darauf aufbauend sehen *Heim et al. [2009]* die Möglichkeit, derartige Systeme in die Prozesssteuerung (z. B. Zugabe von Flockungshilfsmittel, Früherkennung von Prozessstörungen) einzubinden.

In Einzelfällen werden auch Videosysteme in der Messtechnik eingesetzt, wobei diese in der Biogastechnik nicht und in der Abwassertechnik nur in Spezialfällen zum Einsatz kommen: So berichten *Jeanbourquin et al. [2011]* über den Einsatz eines optischen Verfahrens zur Durchflussmessung in Abwasserkanälen. Basierend auf Videoaufnahmen und einer Bildverarbeitungssoftware war es den Autoren möglich, den Durchfluss zu messen, indem sie sowohl den Wasserspiegel als auch die Fließgeschwindigkeit mit dieser Technik ermittelten. Derartige Applikationen können nach Auffassung der Autoren zum Beispiel für die Ermittlung von schwierig zu messenden Mischwasserentlastungen eingesetzt werden.

Auf die Möglichkeiten, die der Einsatz von Wärmebildkameras oder ähnlicher Systeme für die Prozessüberwachung bieten, wird in den Abschnitten 3.8.6 und 3.8.7 eingegangen.

3.8 Labor- und Handmessverfahren

Sowohl in der Biogastechnik als auch in der Abwassertechnik spielen Labor- und Handmessverfahren seit langer Zeit eine große Bedeutung, wobei es deutliche Unterschiede gibt:

In der Abwassertechnik ist es üblich, einen Großteil der für den Betrieb und die staatlich geforderte Eigenkontrolle notwendigen Messungen in den oft gut ausgestatteten Betriebslaboren der Kläranlagen durchzuführen und nur in Einzelfällen (z. B. Schwermetallanalysen im Klärschlamm) an externe Umweltlabore zu vergeben. Begünstigt wurde diese Entwicklung dadurch, dass in den letzten zwei Jahrzehnten sogenannte Schnelltests entwickelt wurden, die in kurzer Zeit (i.d.R. < 2,5 Stunden inkl. Probennahme und -vorbereitung) und relativ günstig (i.d.R. < 10 € pro Stück inkl. Personalkosten) durchgeführt werden können. Art und Umfang der Analysen werden hierbei vor allem durch länderspezifische Vorschriften zur Selbstkontrolle von Abwasseranlagen vorgegeben, die je nach Größenklasse sowohl die Anzahl (z. B. werktäglich) als auch die zu untersuchenden Parameter vorgeben. Vereinfacht

können die regelmäßig auf größeren Kläranlagen bestimmten (oder als Summe errechneten) Parameter wie folgt zusammengefasst werden:

- Kläranlagenzulauf: pH, Temperatur, elektrolytische Leitfähigkeit, Absetzbare Stoffe, Abfiltrierbare Stoffe, BSB_5, CSB, NH_4-N, NO_3-N, NO_2-N, N_{org}, TKN, N_{ges}, P_{ges}
- Belebungsbecken: VSV, TS_{BB}, ISV, GV
- Kläranlagenablauf: pH, Temperatur, elektrolytische Leitfähigkeit, BSB_5, CSB, NH_4-N, NO_3-N, NO_2-N, TN, TKN, N_{ges}, P_{ges}, Säurekapazität

Darüber hinaus kommen bei komplexeren Anlagen noch weitere Parameter hinzu (z. B. bei anaerob-stabilisierenden Kläranlagen diverse Parameter aus der Schlammbehandlung).

Ganz anders sieht die Situation auf Biogasanlagen aus: Kaum eine Anlage verfügt über ein eigenes Betriebslabor, jedoch haben sich einzelne Betreiber Handmessgeräte (z. B. pH, Redox) und händische oder automatisierte Titrationsgeräte zugelegt. D. h. bei Biogasanlagen ist es nach wie vor weit verbreitet, regelmäßig Proben (z. B. 1 x pro Monat) zu nehmen und diese zu einem externen Labor zu versenden. Eine ganze Reihe von Umweltlaboren hat folglich dieses sehr stark wachsende Marktsegment für sich entdeckt. Art und Umfang der Analysen sind bei Biogasanlagen meist vom individuellen Sicherheitsdenken der Betreiber abhängig, sodass hier keine allgemeingültigen Aussagen gemacht werden können. Weiterhin kann auch das Analysespektrum von Umweltlabor zu Umweltlabor stark unterschiedlich sein, umfasst aber meist die folgenden Parameter:

- Substrate: TS, oTS, theoretische Gasausbeute, Rohasche, Rohprotein, Rohfett, Rohfaser, NfE (stickstofffreie Extraktstoffe), rechnerischer Methangehalt
- Fermenter/Nachgärer: pH-Wert, FOS, TAC, elektrolytische Leitfähigkeit, NH_4-N, TS, oTS, Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure, Iso-Buttersäure, Valeriansäure, Iso-Valeriansäure, diverse Makro- und Spurenelemente
- Gärrest: TS, oTS, N_{ges}, NH_4-N, P_2O_5, K_2O, S, Asche
- Gasanalyse: CH_4, CO_2, O_2, H_2S, H_2, NH_3, diverse Verbindungen (z. B. Siloxane)
- Gärtests inkl. Gasmenge und Gasanalyse und TS/oTS-Bestimmung

In der Praxis werden aber nur wenige dieser Analysen regelmäßig durchgeführt: Viele Biogasanlagenbetreiber belassen es bei einem Minimum an Analysen (z. B. pH, FOS, TAC, TS sowie bei Bedarf Essigsäurespektrum und NH_4-N). *Gamper [2011]* gibt einen Überblick über Methoden zur externen Überwachung der wesentlichen Prozessparameter von Biogasanlagen. *Brunert [2007]* gibt einen Überblick über verschiedene Labormessverfahren und deren Anwendbarkeit für die Analytik in der Biogastechnik. *Oelsner [2011]* berichtet über ein Überwachungskonzept zweier großen Biogasanlagen, das neben diversen online-Messgeräten (z. B. Gasanalyse) auch auf Laboranalysen für Wirtschaftsdünger (2 - 3 Mal pro Jahr: TS, oTS, N_{ges}, NH_4-N) und Anaerobreaktoren (i.d.R. monatliche Bestimmung von TS, pH-Wert, Essigsäure, Propionsäure, Summe der Fettsäuren, N_{ges}, NH_4-N) beruht; für die Bewertung der nachwachsenden Rohstoffe wird zum Beispiel auf Futtermitteltabellen zurückgegriffen.

Zahlreich der oben genannten Messungen, die zum Teil wichtige Hinweise auf ein Monitoring von SBR-Kläranlagen und Biogasanlagen zulassen, können mit vertretbarem Aufwand auch auf den Anlagen direkt analysiert werden, sodass nachfolgend einige dieser Verfahren vorgestellt werden.

3.8.1 Photometrische Schnelltests

3.8.1.1 Kläranlagen

Der Einsatz von photometrischen Schnelltests ist auf Kläranlagen seit Jahren Standard, sodass sehr viele der zuvor genannten Parameter verfügbar sind, wie zum Beispiel: Säurekapazität, BSB_5, CSB, TOC, Stickstoffverbindungen (NO_2-N, NO_3-N, NH_4-N, TKN, TN), Phosphorverbindungen (PO_4-P, P_{ges}), … Aufgrund der Einführung zahlreicher Maßnahmen und Methoden zur Analytischen Qualitätssicherung (z. B. *DWA [2007], DWA [2010C]*) können hiermit vergleichbar gute Werte wie im Labor erzielt werden.

3.8.1.2 Biogasanlagen[7]

Weniger verbreitet ist der Einsatz von Schnelltests auf Biogasanlagen, wobei Ergebnisse dafürsprechen, dass auch bei diesen Anlagentypen erhebliches Potenzial besteht (Abbildung 3.44). Die Konzentration der im Verlauf des Gärprozesses gebildeten organischen Säuren ist bislang nur mit Labormethoden zuverlässig zu bestimmen. Hierfür existieren verschiedene Möglichkeiten, wobei die chromatographischen Verfahren (GC, IC oder HPLC) in der Regel nur in speziell ausgestatteten Untersuchungslaboren mit entsprechenden Kosten und einem entsprechenden Zeitversatz zwischen Probenahme und Ergebnisübermittlung möglich sind. Für eine schnelle vor Ort durchzuführende Trendanalyse stehen mittlerweile auch photometrische Küvettentests zur Verfügung, die bereits seit vielen Jahren anerkannt sind für die Eigenüberwachung kommunaler und auch industrieller Kläranlagen sowie Trinkwasserwerken. Diese Küvettentests erlauben eine schnelle (20 bis 120 min), einfache und kostengünstige Ermittlung wichtiger Parameter (z. B. für organische Säuren, Säurekapazität, Ammonium, N_{ges} oder CSB). Auf einer niedersächsischen Kofermente-Biogasanlage haben *Wiese und König [2006]* getestet, ob diese Küvettentests auch für die Überwachung von Biogasanlagen eingesetzt werden können. Die Vergleichsmessungen wurden durch ein externes Labor auf Basis von DIN-Methoden durchgeführt.

Abb. 3.44: Auswahl von Labormessgeräten auf Biogasanlagen: Automatischer Feuchtebestimmer (Fa. Denver Instruments) (a), Photometerarbeitsplatz (Fa. Hach Lange) (b) und automatischen FOS/TAC-Titrator (Fa. Hach Lange) (c) (Bildquellen: Autor)

[7] Die nachfolgenden Passagen und Abbildungen stammen aus *Wiese und König [2006, 2007]*.

Probenvorbereitung: Für die Durchführung eines photometrischen Tests werden farblose und klare Lösungen benötigt. Aus diesem Grunde ist eine Probenvorbereitung der stark partikulären Proben besonders wichtig. Die Proben wurden daher zunächst einer 1:20 Verdünnung unterzogen. Für die Durchführung der Küvettentests wurden jeweils bis zu 20 ml der vorfiltrierten Probe in einer Tischzentrifuge bei 13.500 Umdrehungen für 10 Minuten zentrifugiert. Das Zentrifugat wurde anschließend für die Küvettentests verwendet.

Durchführung der Analyse:

- Organische Säuren: Für die Bestimmung der organischen Säuren wurde der photometrische Küvettentest „LCK 365“ (*Hach Lange [2005B]*) verwendet. Der für die Bestimmung der Essigsäureäquivalente erforderliche Hydrolyseschritt wird durch 10-minütiges Erhitzen bei 100 °C in einem vortemperierten Trockenthermostaten durchgeführt. Anschließend wird die auf Raumtemperatur abgekühlte, klare und farblose Probe mit dem Küvettentest photometrisch ausgewertet.
- Ammoniumgehalt: Speziell beim fermentativen Abbau eiweißreicher Substrate können hohe Ammonium-Konzentrationen auftreten. Ammonium steht in einem vom pH-Wert abhängigen Gleichgewicht mit Ammoniak, welcher für die Bakterien toxisch wirkt. Bei steigendem pH-Wert verschiebt sich dieses Gleichgewicht in Richtung Ammoniak. Eine regelmäßige Kontrolle des Ammonium-Gehaltes sichert den störungsfreien Betrieb einer Anlage. Die Messung der Ammoniumkonzentration erfolgte mit dem Küvettentest „LCK 302“ (*Hach Lange [2005C]*), jedoch wurde hier aufgrund eines kleineren Messbereichs auf 1:50 verdünnt.
- CSB-Gehalt: Der Chemische Sauerstoffbedarf (CSB) gibt an, wie viel Sauerstoff zur Oxidation der oxidierbaren Komponenten im Gärsubstrat gebraucht wird. Der CSB-Wert erscheint als zuverlässiger Indikator für das Energiepotenzial eines Gärsubstrates, wenngleich er in der Anaerobtechnik – mit Ausnahme von anaeroben Kläranlagen – kaum bestimmt wird. Für die Bestimmung des gelösten CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf) wurde der Küvettentest „LCK 514“ (*Hach Lange [2005D]*) eingesetzt.

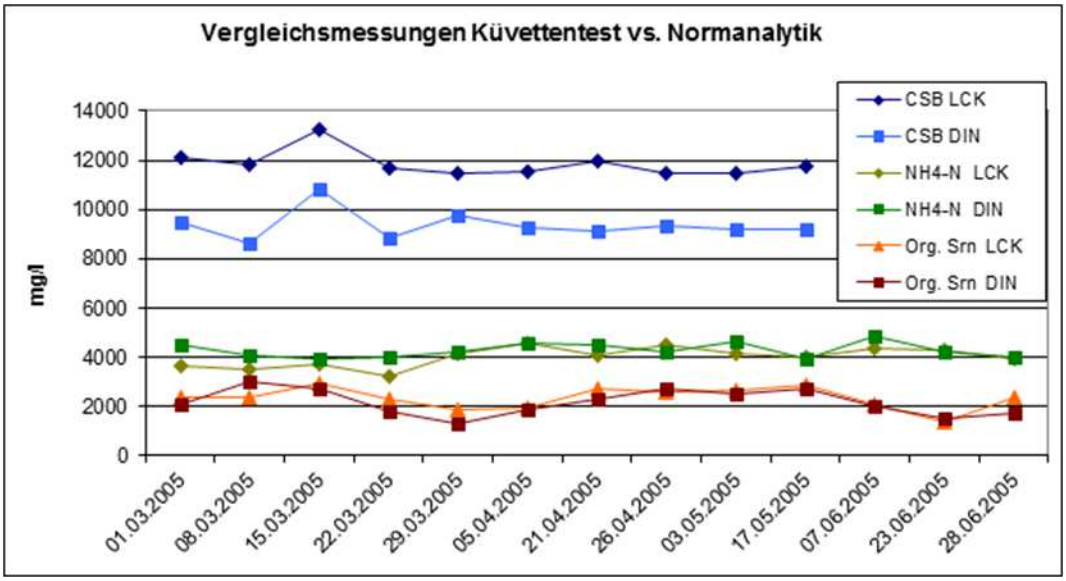


Abb. 3.45: Vergleichsmessungen zwischen Küvettentests und Norm-Analytik (Quelle: *Wiese und König [2006]*)

Abbildung 3.45 gibt die Ganglinien der durchgeführten Vergleichsmessungen zwischen dem Küvettentest und der jeweiligen Norm-Methode wieder. Die durchgeführten Vergleichsmessungen erstreckten sich über einen Zeitraum von vier Monaten. Es ist zu erkennen, dass im Falle der Ammonium-Messungen und der Bestimmung der organischen Säuren im Rahmen der Messgenauigkeit (z. B. Verdünnungsfehler) eine gute Vergleichbarkeit zwischen beiden Verfahren erzielt werden konnte. Beide Methoden spiegeln die jeweiligen Konzentrationsveränderungen gut wieder und lassen sich somit für die Überwachung dieser beiden wichtigen Parameter im Biogasprozess einsetzen. Die Ergebnisse der CSB-Messungen weichen hingegen etwas voneinander ab, geben aber trotzdem die jeweiligen Konzentrationsveränderungen der organischen Fracht gut wieder. In diesem Fall muss mit einem anlagenspezifischen Korrekturfaktor gearbeitet werden.

Für Zwecke der analytischen Qualitätssicherung wurden zudem verschiedene Kontrollen durchgeführt:

Aufstock- und Verdünnungsreihen: Für die Plausibilitätsprüfung stehen prinzipiell zwei relativ einfache Verfahren zur Verfügung: Verdünnung und Aufstockung (*Hach Lange [1997]*). Bei der Verdünnungsreihe wird die bereits vermessene Originalprobe stufenweise verdünnt und erneut vermessen. Eine eventuell vorhandene Störung wird dabei ebenfalls verdünnt und verliert so an Einfluss. Nach erfolgter Umrechnung (Berücksichtigung des Verdünnungsfaktors) stellt sich bei Vorhandensein einer Störung eine signifikante Änderung des Messergebnisses ein (Zunahme oder Abnahme). Bleibt der errechnete Wert nahezu konstant, lag keine probenspezifische Störung vor. Beim Aufstocktest werden der bereits gemessenen Probe steigende Konzentrationen eines Standards zugesetzt. Nach Umrechnung des Faktors und der zugesetzten absoluten Menge des Standards sollte der gemessene reale Wert linear mit dem theoretischen Erwartungswert korrelieren, d. h. bei grafischer Auftragung sollte sich eine Gerade ergeben. In Abbildung 3.46 ist das Ergebnis einer Verdünnungsreihe dargestellt, die im Verlauf der Langzeit-Vergleichsmessungen mit einer Nachgärer-Probe auf einer Biogasanlage durchgeführt wurde. Bis auf das Ergebnis der 1:10 Verdünnung liegen alle Ergebnisse innerhalb des Toleranzbereichs, der bei Messungen in stark partikulärer Proben infolge des unvermeidlichen Verdünnungsfehlers entsprechend höher ausfällt als bei nichtpartikulären Proben. Die Ursache für den Minderbefund der 1:10 Verdünnung ist unbekannt und kann mit der bereits erwähnten Unsicherheit bei der Volumenabnahme in Verbindung gebracht werden. Eine Probenstörung kann ausgeschlossen werden, da die nachfolgenden Verdünnungsstufen diesen Trend nicht bestätigt haben. Der Aufstockversuch (Abbildung 3.47) wurde mit einer Probe aus dem Nachgärer einer Kofermente-Biogasanlage durchgeführt. Als Standard wurde Eisessig verwendet, der mit destilliertem Wasser auf eine Konzentration von 1.000 mg/l verdünnt wurde. Niedrigster und höchster Wert der Aufstockung waren destilliertes Wasser bzw. die verdünnte Eisessiglösung. Die Auftragung der real gemessenen Werte gegenüber den Erwartungswerten liefert eine Gerade mit einer Korrelation von 0,999. Dieser nahezu lineare Zusammenhang deutet darauf hin, dass auch in dieser Probe keine Störung vorliegt (*Wiese und König [2007]).*

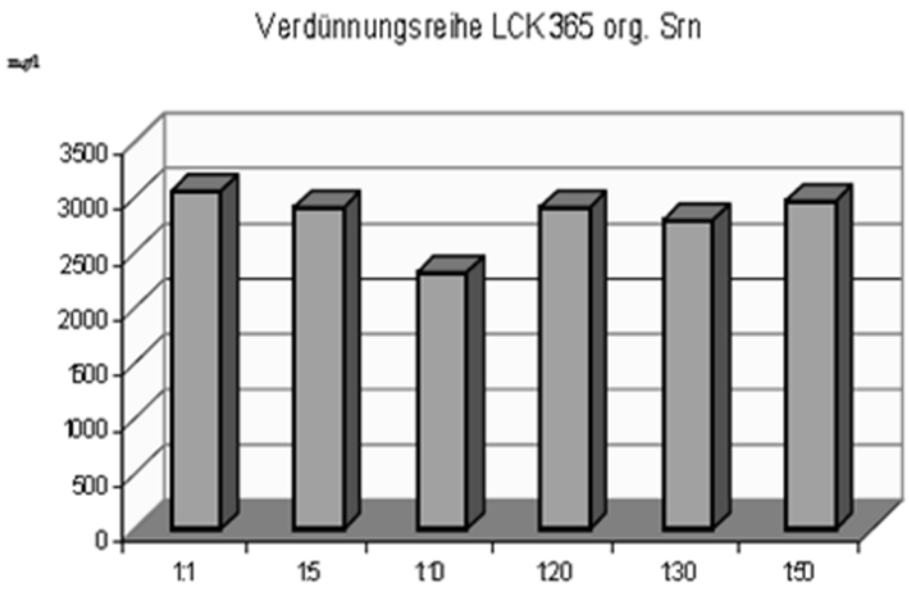


Abb. 3.46: Ergebnisse einer Verdünnungsreihe zur Plausibilitätsuntersuchung organischer Säuren in der Fermenterprobe (Quelle: *Wiese und König [2006]*)

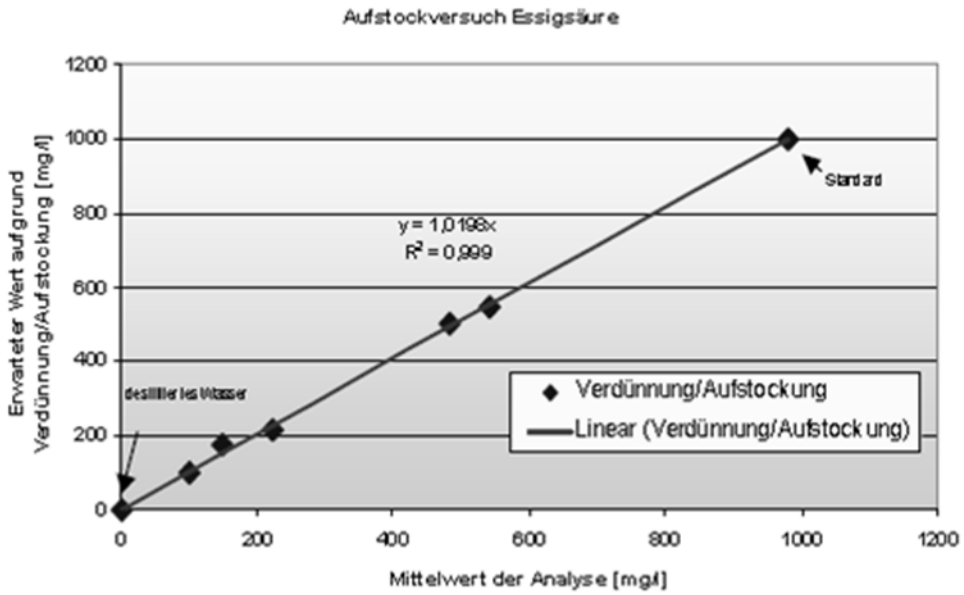


Abb. 3.47: Aufstock- und Verdünnungsversuche zur Plausibilitätsuntersuchung organischer Säuren in einer Fermenterprobe (Quelle: *Wiese und König [2006]*)

Tab. 3.7: Ergebnisse der Vergleichsmessungen – Ionenchromatogramm der Fermenterprobe mit den Einzelkomponenten (Acetat, Lactat, Propionat, n-Butyrat) versus Ergebnisse der Schnelltests (Quelle: *Wiese und König [2006]*)

Komponente	Konzentration [mg/l]	Säuren Schnelltest [mg/l]	Abweichung [%]
Probe I			
Acetat	1768,7		
Lactat	81,63		
Propionat	296,4		
n-Butyrat	88		
total:	**2234,73**	**2530,13**	**13**
Probe II	**1227,45**	**1340,9**	**9**
Probe III	**3937,93**	**4130,5**	**5**
Probe IV	**1941,69**	**2070,7**	**7**

Vergleichsmessungen zur Ionenchromatographie: Die Ergebnisse des Küvetten-Tests der organischen Säuren und des Normverfahrens (Wasserdampfdestillation und Titration der Essigsäureäquivalente) geben jeweils die Summe der vorhandenen Einzelsubstanzen an. Eine selektive Konzentrationsangabe der ursprünglich vorhandenen Einzelsubstanzen wie Propion-, Butter- oder Essigsäure kann nicht erfolgen. Um zusätzlich eine Aussage über die Konzentration der Einzelsubstanzen zu erhalten und abzuklären, ob der über den Küvetten-Test bzw. die Wasserdampfdestillation ermittelte Summenwert mit den Einzelergebnissen der Ionenchromatographie übereinstimmt, wurden verschiedene Fermenterproben zusätzlich mit einer Ionenchromatographie (IC) gemessen und mit dem Ergebnis des photometrischen Schnelltests verglichen. Die Probenvorbereitung der durchgeführten Messungen gestaltete sich bei diesen Proben aufgrund des geringen TS-Gehaltes wesentlich einfacher, als bei den Vergleichsmessungen zuvor. Eine einfache Filtration über einen Faltenfilter war in der Regel ausreichend. Das ionenchromatographische Ergebnis der Probe I zeigt insgesamt vier organische Einzelsubstanzen der Fermenterprobe auf: Acetat, Lactat, Propionat und n-Butyrat. Die Summe der Einzelkonzentrationen ergibt 2.235 mg/l organische Säuren (Tab. 3.7). Der photometrische Test ermittelte einen Summenwert von 2.530 mg/l. Die Abweichung beträgt bei dieser Probe 13 %. Die Abweichung stellt allerdings mit Bezug auf den bereits mehrfach erwähnten Verdünnungsfehler (stark feststoffhaltige Probe) einen sehr guten Wert dar.

3.8.2 FOS/TAC-Bestimmung

Ein weiterer Parameter zur Kontrolle und Bewertung der Fermentationsprozesse ist der sogenannte FOS/TAC-Wert, wobei FOS für die Abkürzung für Flüchtige Organische Säuren (in mg/l Essigsäureäquivalente) und TAC für Totales Anorganisches Carbonat bzw. alkalische Pufferkapazität (in mg/l $CaCO_3$). Entwickelt wurde die FOS/TAC-Bestimmung von der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) (*Weiland und Rieger [2006]*) in Anlehnung an die Nordmann-Methode. Der FOS/TAC-Wert wird heute auf vielen Biogasanlagen zur Kontrolle der Anlagenstabilität eingesetzt, wobei sowohl manuelle Verfahren als auch automatische Titratoren (Abbildung 3.44, Bild c) zum Einsatz kommen. In der Praxis finden sich verschiedene Richtwerte, die von Anlagenbetreibern als Hilfestellung für das Steuern ihrer Biogasanlagen genutzt werden können. Ein Beispiel für derartige Richtwerte mit daraus

abgeleiteten Maßnahmen haben *Lossie und Pütz [2008]* veröffentlicht (Tab. 3.8). Es ist jedoch empfehlenswert, die Wertbereiche für jede einzelne Biogasanlage anzupassen, da diese von Anlage zu Anlage unterschiedlich sein können.

Tab. 3.8: FOS/TAC-Werte und daraus abgeleitete Maßnahmen (*Lossie und Pütz [2008]*)

FOS/TAC-Wert	Interpretation	Maßnahme
> 0,6	Starke Überfütterung	Fütterung einstellen
0,5 – 0,6	Überfütterung	Fütterung drosseln
0,4 – 0,5	Stark belastet	Beobachtung erhöhen
0,3 – 0,4	Ausgelastet	Fütterung unverändert beibehalten
0,2 – 0,3	Hungrig	Fütterung langsam steigern
< 0,2	Sehr hungrig	Fütterung zügig steigern

Clemens und Hecht [2006] verfolgen einen ähnlichen Ansatz, indem sie ein einfaches Messgerät („BiogasPro“) zur Bestimmung des Hydrogencarbonatpuffers vorstellen. Die Autoren propagieren, dass ein zuverlässiger Messwert für den Hydrogencarbonatpuffer eine wichtige Grundlage zur Bestimmung der Prozessstabilität im Anaerobreaktor ist. Das einfache Messgerät beruht auf einer volumetrischen Bestimmung des Hydrogencarbonatpuffers durch Austreiben des Carbonatpuffers als Kohlenstoffdioxid mit Hilfe einer Säure. Die Ermittlung des Messwertes erfolgt durch Verdrängung einer Sperrflüssigkeit. Die Autoren führen jedoch aus, dass zur zuverlässigen Interpretation der Messwerte eine Anpassung an die jeweilige Anlage erfolgen muss. Die Autoren sehen die Vorteile dieser Erfindung auch unter anderem in den geringen Verbrauchskosten (< 0,5 € pro Messung), der einfachen Handhabung sowie der Wartungsfreiheit des Messgerätes.

3.8.3 Feuchtebestimmer

Die Bestimmung von Trockensubstanz und Glühverlust ist auf den meisten Kläranlagen kein Problem, da diese über Betriebslabore mit der dazugehörigen Ausstattung verfügen. Anders sieht dies auf Biogasanlagen aus, da diese meist über keine Betriebslabore verfügen. Um den TS/TM-Gehalt als wichtige Prozessgröße dennoch ausreichend genau für die Praxis schätzen zu können, kann auf automatische Feuchtemessgeräte (Abbildung 3.44, Bild a) zurückgegriffen werden. Dabei handelt es sich um Präzisionswaagen, die mit Heizeinrichtungen ausgestattet sind. Diese Geräte bestimmen den Feuchtegehalt einer Probe bis zur deren Gleichgewichtskonstanz. Einstiegsgeräte sind bereits für ca. 1.500 € netto erhältlich. Derartige Geräte eignen sich für die folgenden Aufgaben:

- Feuchtegehaltsbestimmung von Güllen und Silagen
- Feuchtegehaltsbestimmung im Fermenter- und Nachgärerinhalt
- Feuchtegehaltsbestimmung im Gärrest
- Vergleichsmessungen zu online-TS-Messgeräten

3.8.4 Handmessgeräte

Handmessgeräte für pH, elektrolytische Leitfähigkeit und gelöster Sauerstoff gehören zur Standardausstattung vieler Kläranlagen, wobei sie sowohl im Laborbereich als auch zum

Gegenmessen von online-Messgeräten vor Ort eingesetzt werden. Auch auf Biogasanlagen können Handmessgeräte für pH, Redox und elektrolytische Leitfähigkeit sinnvoll sein. Mit derartigen Messgeräten können sowohl die Anaerobreaktoren kontrolliert als auch Fremdanlieferungen von Gülle o. ä. beprobt werden. Auf vielen Biogasanlagen finden sich auch Handmessgeräte zur Bestimmung der CH_4- und der H_2S-Konzentration: Dabei handelt es sich oft nicht um Gaswarngeräte, sondern um Messgeräte zur Bestimmung der Gaszusammensetzung.

3.8.5 Biogasertragsbestimmung

Es gibt verschiedene Verfahren zur Biogasertragsbestimmung, die im alltäglichen Anlagenbetrieb aber von untergeordneter Bedeutung sind, da sie zeit- und kostenintensiv sind. Derartige Verfahren kommen zum Beispiel bei der Grundlagenermittlung zum Bau von Biogasanlagen, der erstmaligen Bestimmung eines neuen Substrats oder für Forschungszwecke zum Einsatz; die hierfür erforderlichen Arbeiten werden meist durch externe Labore durchgeführt:

Die *VDI-Richtline 4630 [2006]* beschreibt eine Methodik zur Durchführung von Gärversuchen und gibt Hinweise zur Substratcharakterisierung, Stoffdatenerhebung und Probenahme.

Günther et al. [2011] haben den VDI 4630-Test zum sogenannten „BCM-Biogastest 1000“ weiterentwickelt: Der Test geht über eine Dauer von mindestens 42 Tagen bzw. 1.000 h. Dabei wird nicht nur Methan und Kohlenstoffdioxid, sondern auch Stickstoff und Wasserstoff gaschromatographisch gemessen. Des Weiteren erfolgt auch eine ionenchromatographische Bestimmung der Flüssigkeit, um toxische Komponenten (z. B. Ammonium) zu bestimmen. Neben der Bestimmung des Biogaspotenzials von Gärsubstraten soll das Verfahren nach Auffassung der Autoren auch gut dazu geeignet sein, das Restgaspotenzial im Gärrest zu bestimmen. Nach *Günther et al.* ist dieser Test damit aussagekräftiger als der CSB, weil dieser alle organischen Verbindungen berücksichtigt, auch diejenigen, die sich nicht oder nur schwer vergären lassen. Gegenüber der TS- und oTS-Bestimmung sehen die Autoren ebenfalls einen Vorteil, da bei diesen Parametern die Bestimmung bei 105 °C erfolgt, sodass die leicht flüchtigen organischen Säuren (zum Teil) bereits verdampfen.

Angelidaki et al. [2008] stellen eine Vorgehensweise zur Bestimmung des Biogaspotenzials von festen, organischen Abfällen vor, der von der Task Group for the Harmonization of Anaerobic Biodegradation, Activity and Inhibition Assays der International Water Association entwickelt wurde.

Buffiere et al. [2008] schlagen eine weitere Methode zur Bestimmung der Abbaubarkeit organischer Stoffe vor. Ausgehend von der Erkenntnis, dass die CSB-Bestimmung in Abfallstoffen schwierig ist und bei der Trocknung leicht flüchtige organische Säuren verdampfen, schlagen die Autoren vor, den zu untersuchenden Stoff in eine wasserlösliche und eine wasserunlösliche Komponente zu trennen und getrennt zu analysieren. Die Autoren gehen davon aus, dass hierdurch die Analysegenauigkeit ansteigt.

Engler et al. [2009, 2012] beschreiben den sogenannten „Rostocker Aktivitätstest“, ein Verfahren das entwickelt wurde, um praxisnah eine vergleichende Quantifizierung der biologischen Aktivität von NawaRo-Biogasfermentern vorzunehmen.

3.8.6 Wärmebildkamera

Für besondere Applikation kann auch der Einsatz von Wärmebildkameras interessant sein, wobei es sich nur in Ausnahmefällen (z. B. für Betreiber von mehreren Biogasanlagen) lohnen dürfte, sich ein solches Gerät anzuschaffen. D. h. es empfiehlt sich das Ausleihen einen solchen Gerätes (z. B. bei der Ortsfeuerwehr), zumal es eine gewisse Erfahrung im Umgang und der Interpretation der Ergebnisse bedarf. Anwendungsfälle im Bereich der Biogas- und Kläranlagen sind unter anderem:

- Beurteilung der Isolierung von Betriebsgebäuden und Behältern sowie Identifikation von Wärmebrücken (z. B. durch falsche Rohrdurchführungen)
- Leckageerkennung von Klär- und Biogasen (siehe Abschnitt 3.8.7)
- Beurteilung der Wärmeentwicklung in Silagesilos: So weisen *Banemann und Nelles [2008]* darauf hin, dass sich mit einer Wärmebildkamera eine ungewollte Nacherwärmung von Silos – und damit Silageverluste – infolge von Fehlern bei der Silierung und des Einbaus der Silage identifizieren lassen.

3.8.7 Methanleckdetektoren

Methanemissionen aus Biogasanlagen sind aus den folgenden Gründen unerwünscht:

- Methan gilt nach Kohlendioxid als eines der bedeutendsten Treibhausgase, sodass Leckagen aus Klimaschutzgründen auf ein Minimum reduziert werden müssen.
- Methanlecks stellen potenzielle Explosionsquellen dar und gefährden damit auch die Arbeitssicherheit und die Unfallverhütung.
- Nach *Bachmaier et al. [2009]* betragen die diffusen Methanemissionen etwa 1 % der Methanproduktion. In Einzelfällen können die Leckagen noch deutlich größer sein, wenn zum Beispiel die Gasspeichermembran beschädigt ist.
- Rechnet man diese Leckagen in entgangene Umsatzerlöse um, so entstehen hieraus bereits bei kleineren Biogasanlagen Mindereinnahmen von mehreren Tausend € pro Jahr.
- Ausströmendes Biogas kann zu Geruchsbeeinträchtigungen der Nachbarschaft führen, da einzelne Inhaltsstoffe (z. B. leichtflüchtige organische Säuren, H_2S) geruchsintensiv sind und von vielen Menschen als störend wahrgenommen werden.

Daher gibt es sowohl sicherheitstechnische, ökologische und ökonomische Gründe, potenziellen Methanleckagen regelmäßig auf die Spur zu gehen. Dies empfehlen auch *Clemens et al. [2009]* aufgrund zahlreicher durchgeführter Messungen auf Biogasanlagen. Viele Biogasanlagenbetreiber verlassen sich dabei alleine auf ihre Nase.

Es gibt mittlerweile aber auch moderne Messgeräte, die das Erkennen von Leckagen aus Biogasanlagen erleichtern:

- Die Fa. Crowcon bietet am Markt für ca. 13.000 € das Methanmessgerät „LaserMethane®mini Gen2“ an (Abb. 3.48). Dabei handelt es sich um ein Handmessgerät, das auf Basis der TDLAS-Lasertechnology (Tuneable diode laser absorption spectroscopy) in der Lage ist, aus einer sicheren Distanz von bis zu 30 m Methanlecks zu detektieren. Der Benutzer, der nach Firmenangaben auch ungeübt sein kann, hält den Laser (1.653 nm bei 10 mW) dabei auf die potenzielle Leckagequelle: Der Messwert ergibt sich dann aus der Differenz des emittierten und des reflektierten Lichts. Der Messbereich

wird vom Hersteller mit 1 bis 50.000 ppm angegeben, die Messgenauigkeit mit ± 10 %. Bezüglich weiterer Informationen sei auf die Herstellerinformationen verwiesen (*Crowcon [2011]*).

- Die Fa. FLIR Systems verkauft für 60.000 bis 80.000 € unter dem Namen „FLIR GF320“ eine CH_4-Kamera, deren Handhabung aber Erfahrung benötigt. Es handelt sich dabei um eine Infrarotkamera zur Detektion von Methan und flüchtiger organischer Verbindungen, wobei auch die klassische Funktion der Infrarotthermografie genutzt werden kann. Die Kamera gestattet eine schnelle und kontaktlose Echtzeitvisualisierung von größeren Bereichen, die mit Hilfe einer integrierten Digitalkamera auch dokumentiert werden können. Für weitere Informationen sei auf die Herstellerinformationen verwiesen (*FLIR Systems [2011]*).

Abb. 3.48: Laserhandmessgerät zur Methanleckortung (links), Vermessung des Kopfteils eines Anaerobreaktors auf einer Kläranlage (rechts) (Bildquellen: Autor)

3.8.8 Mikrobiologische Messmethoden

In den letzten Jahren gewinnen auch mikrobiologische Messmethoden an Bedeutung, um Rückschlüsse auf die Prozessstabilität von Biogasanlagen und Kläranlagen ziehen zu können. Dabei kommen zahlreiche verschiedene Verfahren zum Einsatz, wie zum Beispiel molekulare Marker, PCR-basierte Methoden oder Fluoreszenz-Mikroskopie. Eine Übersicht über dieses umfangreiche und komplexe Themenfeld geben *Kleinsteuber et al. [2012]*.

Im Bereich der Anaerobtechnik arbeiten zahlreiche Forscher an der Entwicklung von Aktivitäts- und Toxizitätstests – meist Laborverfahren, vereinzelt aber (Quasi-) Echtzeitmethoden –, die vereinfacht in folgende Schwerpunkte eingeteilt werden können:

- (Teil-)Automatische Bestimmung der Abbaubarkeit organischer Stoffe
- Detektion von Hemm- und Störstoffen
- Messgeräte zur Beurteilung der Prozessstabilität
- Messgeräte zur Steuerung und Regelung von Anaerobreaktoren

Der nachfolgende Abschnitt gibt eine kurze Übersicht über ausgewählte Projekte, die sich diesen Schwerpunkten zuordnen lassen:

Hwu et al. [2005] berichten über ein automatisiertes Messgerät zur Bestimmung der anaeroben Abbaubarkeit von Stoffen sowie der Aktivität: Dabei wurden 16 parallel geschaltete

Laborreaktoren mittels Präzisionsdruckmessungen überwacht, um daraus Rückschlüsse über den zeitlichen Verlauf zu ziehen. Der Beschreibung nach handelt es sich jedoch nicht um ein Prozessmessgerät, sondern den Versuch einer Automatisierung von Gärversuchen. Ein derartiges Messkonzept soll der Untersuchung der Abbaubarkeit von Substraten sowie der Untersuchung der Aktivität des Anaerobprozesses dienen; letzteres dürfte sich auch auf den Einfluss von Hemmstoffen beziehen.

Miksch et al. [2005] berichten über den Einsatz eines online-Atmungsmessgerätes für Zwecke der Steuerung und Regelung von Kläranlagen.

Liang et al. [2007] berichten über die Ergebnisse einer Studie, bei der phenolhaltige Abwässer in einem anaeroben, thermophilen Upflow Anaoerbic Sludge Blanket (UASB) Laborreaktor (2,8 l) behandelt wurden. Dabei identifizierten die Autoren einen Bakterienstamm (*Thermotogales*), dessen Populationsdichte sehr gut mit der Phenolabbaurate korrelierte. Daher entwickelten die Autoren ein Monitorverfahren für diese Bakterien auf Basis der qRT-PCR-Methode (quantitative real-time polymerase chain reaction), um daraus Rückschlüsse auf den Reinigungsprozess ziehen zu können. Die Intensität der Fluoreszenz wird dabei als Maß für die Populationsdichte verwendet. *Feng et al. [2007]* verfolgten einen ähnlichen Ansatz, konzentrierten sich aber bei ihren Untersuchungen auf organische Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie. Als Kontrollparameter benutzten die Autoren für die 12 Laborfermenter (4 l) zunächst die Methanproduktion, den pH-Wert sowie die Konzentration an organischen Säuren. Um die Leistungsfähigkeit und Stabilität der Prozesse mit der Zusammensetzung der Bakterienpopulation in Echtzeit zu vergleichen, setzten die Autoren zudem eine Kombination einer qRT-PCR-Methode mit einer T-RFLP (Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism)-Analyse ein.

Lebuhn [2012] berichtet über ein Mess- und Frühwarnkonzept zur Bewertung der Prozesstabilität von Biogasanlagen auf Basis einer molekularbiologischen Quantifizierung, wobei eine PCR-basierte Methode zum Einsatz kam.

Neumann et al. [2013] berichten über einen Ansatz zur Vitalitätsanalyse von methanbildenden Mikroorganismen auf Basis einer fluoreszenzmikroskopischen Begutachtung. Das Resultat dieser Analyse wird von den Autoren als „Aktivitäts-Faktor“ definiert und als sinnvolle Ergänzung einer prozessbiologischen Betreuung gesehen. Dabei werden mit einem Epifluoreszenzmikroskopie mit verschiedenen Farbfiltern digitale Aufnahmen gemacht, die anschließend mit Hilfe einer Bildanalysesoftware ausgewertet werden. Die detektierte Autofluoreszenz dient als Indikator für die Vitalität der methanbildenden Mikroorganismen.

Die Beispiele aus der Abwasser- und Biogastechnik verdeutlichen, dass es sich jedoch bei vielen der oben genannten Projekte entweder um Sonderanwendungen handelt oder die Geräte noch Prototypenstatus haben, sodass es vermutlich noch Jahre dauern wird, bis derartige Messverfahren umfangreiche Verbreitung in der Praxis finden werden; dies gilt besonders für online-Messgeräte-Applikationen.

3.8.9 Viskosität

Brehmer und Kraume [2012] geben eine Übersicht über die Bestimmung der Viskosität im Gärsubstrat sowie geeigneter Messverfahren.

3.9 Qualitätssicherung von Messdaten

Im Kapitel 3 wurden bereits einige Punkte aufgeführt, die erkennen lassen, dass die im Betrieb erfassten Messewerte kritisch betrachtet und regelmäßig auf Plausibilität kontrolliert werden müssen. Zum Abschluss dieses Kapitels soll nun auf die Qualitätssicherung von Echtzeit-Messungen und Messdaten eingegangen werden. Zum besseren Verständnis werden die wesentlichen Einflussfaktoren auf das Messergebnis nachfolgend zusammengefasst. Einen allgemeinen Überblick über die Problematik und das Erkennen von Messfehlern geben *Hoffmann und Biermann [2004]*. Auf die spezifischen Randbedingungen bei der Analyse von Messdaten in der Abwasserreinigung gehen *Ollson et al. [2005]* ein.

3.9.1 Auswahl geeigneter Messpunkte

Die Auswahl der richtigen Messstelle und der Messgeräteeinstellung ist von großer Bedeutung, daher sollten unter anderem die folgenden Punkte berücksichtigt werden:

- Geschwindigkeit der Prozessänderung → „Ist der Probennahmezeitpunkt und das Messintervall repräsentativ für den Prozess?“
- Probennahme → „Ist die Probenzusammensetzung repräsentativ für den Prozess?“
- Probennahmeort → „Ist die Messstelle repräsentativ für den Prozess?“
- (bei Labormessungen) Probentransport → „Ist der Analysewert der Probe nach ein bis fünf Tagen noch vergleichbar mit dem Messwert bei der Probennahme?“
- Probenhomogenisierung → „Ist das analysierte Probenvolumen repräsentativ für die Gesamtprobe?“
- Analysefehler → „Wie hoch ist der mögliche Fehler bei der gewählten Analysemethode?“
- Qualifikation des Betriebs- und Laborpersonals → „Wie gut ist das Personal ausgebildet?“, „Sind sich alle Beteiligten der oben genannten Probleme bewusst?“

Bei Kläranlagen, die zumeist offene Bauwerke aufweisen, ist es relativ einfach, verschiedene Probenahmeorte auszuprobieren. Bei Biogasanlagen mit ihren geschlossenen Behältern ist dies nicht so einfach möglich, aber es gibt bereits Überlegungen geeignete Messpunkte zu ermitteln. *Junne et al. [2012]* gehen unter anderem auf die Idenfikation des „kritischen Hotspots“ ein, d. h. der Ermittlung eines möglichst repräsentativen Punkt zur Bestimmung der Prozessstabilität mit Hilfe einer sogenannten Multipositionssensorik, d. h. einer lanzenbasierten Mess- und Probenahmevorrichtung, die zum Beispiel durch eine Einbauarmatur in den Anaerobreaktor geschoben werden kann. Mit einem solchen Gerät können Konzentrationsprofile aufgenommen werden und daraus Rückschlüsse über die Verteilung im Reaktor gezogen werden.

3.9.2 Analytische Qualitätssicherung von Messgeräten

Messgeräte sind unterschiedlich genau und die Genauigkeit der Messsignale kann durch widrige Umstände schnell vom tatsächlichen Wert abweichen. Aus diesem Grund ist die Einführung und Beachtung einer Analytischen Qualitätssicherung (AQS) sehr wichtig. Dies gilt besonders dann, wenn auf der Basis der gewonnenen Messsignale auch steuernd oder regelnd auf das System eingewirkt werden soll. Die wesentlichen Grundprinzipien einer Analytischen Qualitätssicherung können wie folgt zusammengefasst werden:

- Es muss ausreichend Probenvolumen entnehmen werden; dies gilt insbesondere für DIN-Tests. Von Zeit zu Zeit sollten auch Rückstellproben genommen werden.
- Regelmäßig sollten Doppel-/Dreifach-Bestimmungen durchgeführt werden, um Fehler bei der Probenaufbereitung bzw. Analyse zu identifizieren.
- Online-Messgeräte müssen regelmäßig gewartet und kalibriert werden.
- Wenn Schnelltests und online-Messgeräte zum Einsatz kommen, sollten diese regelmäßig mit den Ergebnissen von DIN-Vergleichsmessungen kontrolliert werden.
- Bestehen Zweifel an der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Analysen können Proben von verschiedenen Labors parallel analysiert werden.
- Die Personen, die Messungen im Labor durchführen, sollten an Ringversuchen teilnehmen bzw. die Auftraggeber auf eine ausreichende Qualifikation des Labors achten.
- Eine sorgfältige Dokumentation der Probennahme (Ort, Datum, Uhrzeit, Auffälligkeiten) bzw. der Ergebnisse (alle Einzelwerte bei Mehrfachbestimmung, Verdünnungsverhältnisse, Analyseverfahren) ist wichtig. Nur so lassen sich die Ergebnisse auch noch später zuverlässig interpretieren und ggf. Mess- und Analysefehler identifizieren.

Weiterhin entstehen auch erste Regelwerke, die sich mit der analytischen Qualitätssicherung von online-Messgeräten auf Kläranlagen beschäftigen: *Fuhrmann [2010]* berichtet über derartige Ansätze, die im Rahmen der Novellierung des *DWA-Arbeitsblatt A 704 [DWA 2007]* erarbeitet wurden. Neben einer Strukturierung der AQS mit Hilfe von Kontrollkarten und standardisierten Vorgehensweisen wird auf die verschiedenen Formen von Qualitätssicherungsmaßnahmen inklusive Nutzen, Mindesthäufigkeit der Vergleichsmessung und Qualitätszielen (max. Abweichung/Streuung) verwiesen. Leider hat die Biogasbranche bezüglich derartiger Überlegungen bisher nur im geringen Umfang eigene Überlegungen angestellt. Einige der zuvor genannten Ansätze und Hinweise lassen sich aber direkt auf die Labor- und Prozesstechnik von Biogasanlagen übertragen.

3.9.3 Gerätediagnose, Signalüberwachung und Drifterkennung

Moderne Feldgeräte können zahlreiche Geräteinformationen (Statussignale, Warn- und Fehlermeldung) zur Verfügung stellen, die mittels digitaler Kommunikationskanäle auch an die Leitwarte, Servicemitarbeiter etc. übertragen werden können. Im Einzelfall stehen mehr als hundert Informationen je Gerät zur Verfügung, die für eine Gerätediagnose herangezogen werden können. Die Validierung von Messwerten erfolgt bisher jedoch noch meist unregelmäßig, obwohl die Zuverlässigkeit eines Messsignals für eine Reihe von Steuerungs- und Regelungskonzepten von großer Bedeutung ist. Dies liegt auch daran, dass bisher wenige praxistaugliche Konzepte zur Messwertvalidierung existieren.

Nach *Häck [2007A/B]* kann man die folgenden Ansätze unterscheiden:

1. Signalüberwachung (Absolutwert, Änderungsgeschwindigkeit, „Hängen bleiben“ des Messsignals, Ausreißerwerte, Varianz)
2. Drifterkennung (Überwachung des Mittelwertes, Multiple Signalanalyse, Unterscheidung zwischen Prozessfehler oder Gerätefehler, Einbeziehung historischer Daten)
3. Realisierung (innerhalb des Messgerätes, der SPS oder des Leitsystems)

Aufbauend auf diesen Ansätzen und den Grundsätzen der analytischen Qualitätssicherung skizziert *Häck [2007A/B]* einen vierstufigen Ansatz zur Qualitätssicherung von Prozessmesswerten (Abbildung 3.49). Mit der Implementierung von Teilkomponenten dieses Konzeptes in Messgeräte der Abwasserprozessanalyse wurde bereits begonnen, wobei die ersten derartigen Messgeräte in absehbarer Zeit auf dem Markt erscheinen sollen. Das diesem Ansatz zur Grunde liegende Konzept kann Abbildung 3.50 entnommen werden.

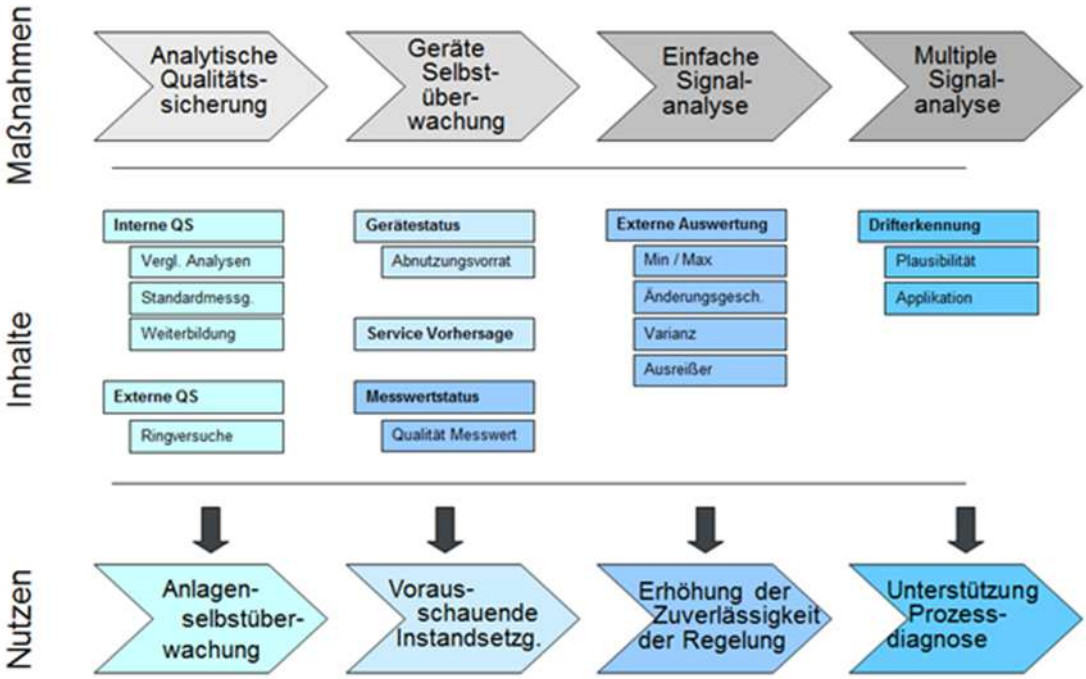


Abb. 3.49: Ansatz zur Qualitätssicherung von Prozessmesswerten 1 (*Häck [2007A/B]*)

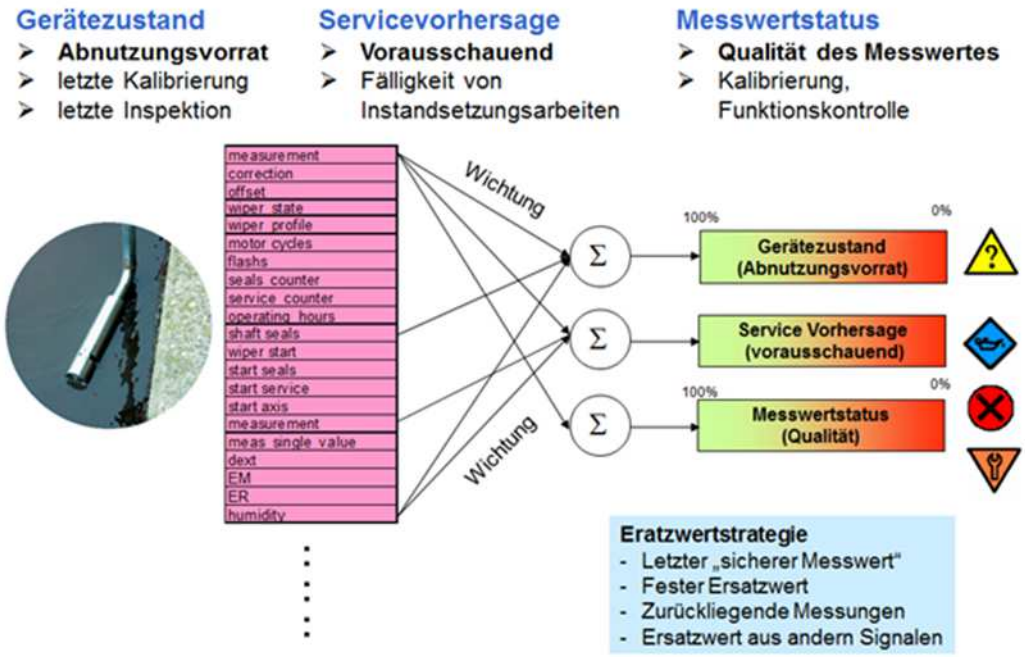


Abb. 3.50: Ansatz zur Qualitätssicherung von Prozessmesswerten 2 (*Häck [2007A/B]*)

Auch andere Autoren verfolgen ähnliche Ansätze:

Yoo et al. [2005] berichten über einen Ansatz zur Sensorvalidierung und Messwertabgleich am Beispiel eines SHARON-Reaktors zur Behandlung von Trübwasser. Das Konzept basiert auf einer umfangreichen und zum Teil redundanten Messtechnik und dient zur Identifizierung der folgenden Messfehler: Messwertverschiebung, Messwertdrift, Komplettausfall und zunehmender Ungenauigkeit der Messwerte. Grundlage hierfür ist eine Hauptkomponentenanalyse.

Schraa et al. [2005] berichten über einen Ansatz zur Fehlerdiagnose auf Kläranlagen, der auf einer Analyse und Filterung der Messdaten beruht. Beispielhafte Anwendungen sehen die Autoren in der Detektion fehlerhafter Messgeräte sowie dem Erkennen und Gegensteuern (z. B. anti-windup) ungewollter Regelzustände (z. B. Überschießen des Sauerstoffwertes).

Schmidberger et al. [2006] stellen einen Ansatz für ein automatisiertes Asset-Management auf Basis der kontinuierlichen Auswertung von Feldgeräteinformationen vor, der das Ziel verfolgt, Fehler und Ausfälle möglichst frühzeitig zu erkennen. Die Autoren gehen dabei über die Verwendung der üblichen Ansätze (z. B. Diagnose durch Vergleichsmessungen, Selbstdiagnosefunktionen, redundante Messgeräte) hinaus und propagieren ein Konzept einer feldgeräteübergreifenden Überwachung. D. h. es werden Sensorinformationen verschiedener Messgeräte, Stellgrößen von Aktoren und ggf. auch physikalisch-logische Zusammenhänge berücksichtigt. Als ein Beispiel stellen die Autoren die Überwachung von Durchfluss- und Füllstandsmessungen auf Basis von automatisch erstellten Bilanzgleichungen vor. Die Autoren gehen aber noch einen Schritt weiter indem wissensbasierte Ansätze vorgestellt werden, auf deren Basis sich derartige Engineering-Aufgaben (teil-)automatisieren lassen, was die Implementierung und Verbreitung derartiger Ansätze in der Praxis wesentlich erleichtern dürfte.

Pawlenko [2008] untersucht verschiedene Ansätze der empirischen Datenanalyse zwecks Lebensdauerschätzung von Feldgeräten, um diese rechtzeitig vor dem Ausfall nachbestellen und austauschen zu können.

Nivert et al. [2009] berichten über die Implementierung von automatischen Werkzeugen zur Messwertvalidierung und ggf. Messwertanpassung (z. B. Ersatzwertstrategien) auf einer schwedischen Großkläranlage.

Grube [2011] stellt ein Konzept zur Sensorvalidierung von pH-Glaselektroden vor, welches aus den vier Teilmodellen „Identifikation des Prozesses“ (Art des Prozesses und Teilschrittes), „Schätzen des Kalibrierintervalls“, „Schätzen der Lebensdauer“ (z. B. Alterungseffekte) und „Schätzen des Zustands“ besteht.

3.9.4 Kalibrierungs- und Regressionsfunktionen

Mit der zunehmenden Verbreitung von Mehrfachparametermessgeräten (z. B. UV/VIS-Sonden, NIRS) gewinnen mathematische Verfahren zur Ableitung bestimmter Messgrößen aus den aufgezeichneten Messwerten an Bedeutung. Damit wird die stete Verbesserung bzw. Suche nach geeigneten Algorithmen auch Gegenstand der Forschung. Exemplarisch sei auf *Rieger et al. [2005]* verwiesen, die den Einfluss verschiedener Kalibriermethoden auf die Genauigkeit von UV/VIS-Sonden untersuchten. Verglichen wurde dabei die Werkseinstellung mit den Ergebnissen von Versuchen auf vier Schweizer Kläranlagen sowie einer Vor-Ort-Kalibrierung. Untersucht wurden dabei die Auswirkungen auf die Messgenauigkeit für Gesamt-CSB, Gelöst-CSB, NO_3-N, NO_2-N und TS. Die Autoren kamen zu der Erkenntnis, dass die Vor-

Ort-Kalibrierung die besten Ergebnisse liefert, während die Werkseinstellung das schlechteste Ergebnis lieferte. Dieses Beispiel belegt die Notwendigkeit, auch moderne Messgeräte trotz oftmals gegenteiliger Äußerungen der Hersteller und trotz des hohen Aufwands jeweils vor Ort zu kalibrieren.

3.10 Zwischenfazit

Das Kapitel 3 hat eine Übersicht über zahlreiche Messgeräte für Abwasser- und Biogasanlagen gegeben. Es wurde deutlich gemacht, dass heute bereits eine Vielzahl von wichtigen Prozessmessgrößen in Echtzeit erfasst werden können; weitere interessante Messgeräte befinden sich in der Entwicklung. Weiterhin wurde gezeigt, dass auch die Methodiken zur Analytischen Qualitätssicherung und der Messwertvalidierung weiterentwickelt werden. D. h. in den letzten Jahren wurden die Grundlagen dafür gelegt, dass Prozessmessgeräte nicht nur zur Überwachung, sondern auch zur Steuerung und Regelung von Kläranlagen und Biogasanlagen – weitgehend problemlos – Anwendung finden können.

4 Automationsgeräte auf Klär- und Biogasanlagen

4.1 Einführung

Treibende Kräfte im Bereich der Automation waren über Jahrzehnte die Industrie (z. B. Chemie) und der Maschinen- und Anlagenbau. Daraus abgeleitet wurden die entwickelten Produkte oft als „Abfallprodukte“ im weitaus kleineren Markt der Umweltschutztechnik eingesetzt. Lediglich im Bereich der Messtechnik für Umweltschutzaufgaben gab es schon länger Hersteller, die sich früh auf diese Nischenprodukte spezialisiert haben. Das seit einigen Jahren weltweit steigende Interesse an Erneuerbaren Energien und der Wasser-/ Abwassertechnik führt jedoch dazu, dass man sich auch bei den großen Herstellern Gedanken macht, welche Anforderungsprofile aus den Zukunftsmärkten „Wasser/Abwasser“ und „Biogas/ Bioraffinierien“ für zukünftige Automationskonzepte resultieren (z. B. *ZVEI [2009A]* und *ZVEI [2009B]*). *Früh et al. [2009]* gehen davon aus, dass der Markt für Automationstechnik in der Umwelttechnik mit 8,4 % pro Jahr schneller wächst als der Gesamtmarkt (6,2 % pro Jahr).

Hat man in den letzten zwei Jahrzehnten noch des Öfteren Komponenten (z. B. Leitsysteme, Steuerungen) gefunden, die speziell für Kläranlagen und Biogasanlagen konzipiert wurden und meist von den Anlagenbaufirmen oder Nischenanbietern in Eigenregie entwickelt wurden, so basiert die Automatisierung heutiger Kläranlagen und Biogasanlagen im zunehmenden Maße auf der Verwendung von Standardkomponenten aus der Industrieautomation. Dies hat nicht nur Kostenvorteile, sondern bietet auch eine Gewähr für einen dauerhaften (weltweiten) Support. Weiterhin profitiert man von den zahlreichen Standards und Vorlagen, die bereits für ähnliche Applikationen in der Industrie entwickelt wurden. So schätzt *Albert (in NAMUR [2012])*, dass sich die Kosten für Prozessleitsysteme in den letzten 15 bis 20 Jahren um 30 bis 45 % (ohne Inflation) bzw. 45 bis 60 % (mit Inflation) verringert haben.

Da in der Umwelt- und Biogasbranche zunehmend auf Industriekomponenten zurückgegriffen wird, wird bezüglich weitergehender Informationen zu den verschiedenen Automationsgeräten auf die einschlägige Literatur verwiesen (z. B. *Früh et al. [2009], Gevatter [1999], Herbrich [2004], Maier und Tauchnitz [2009], Simon et al. [2003]*). Nachfolgend sollen daher nur allgemeine Informationen bzw. Hinweise auf Projekte und spezifische Randbedingungen auf Kläranlagen und Biogasanlagen gegeben werden.

Nach *Scherff et al. [1999]* und *Hilgers und Vogel-Heuser [2003]* kann die moderne Automation in folgende Ebenen untergliedert werden (Abbildung 4.1):

- Ebene 1: Prozessebene mit Aktoren und Sensoren
- Ebene 2: Steuerungs- und Regelungsebene
- Ebene 3: Bedien- und Visualisierungsebene
- Ebene 4: Produktions-, Betriebs- und Unternehmensleitebene

Die Ebenen 2 und 3 werden oft auch unter dem Begriff „Prozessleitebene“ zusammengefasst. In den nachfolgenden Abschnitten wird nun genauer auf die Ebenen 1 bis 3 eingegangen. Die Ebene 4 ist bisher nur in sehr wenigen Fällen auf Kläranlagen und Biogasanlagen anzutreffen.

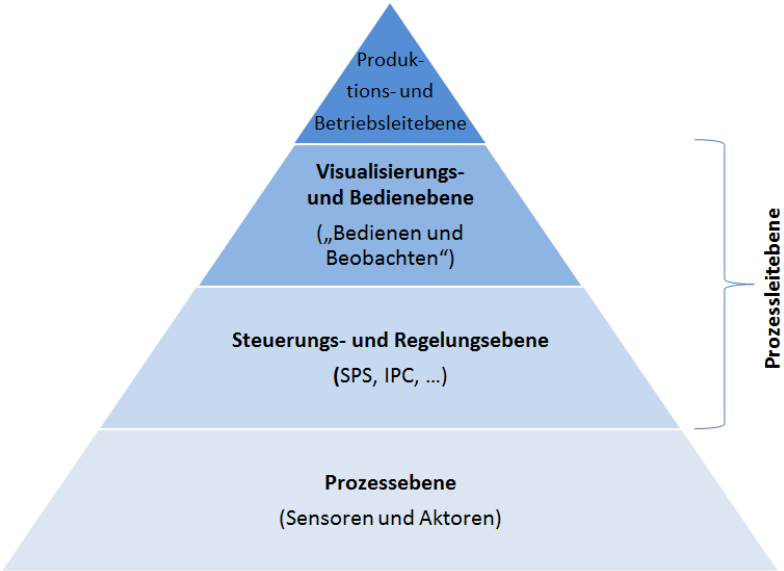


Abb. 4.1: Informations- und Automationspyramide im Anlagenbau (nach *Hilgers und Vogel-Heuser [2003]* und *Scherff et al. [1999]*)

4.2 Prozessebene

4.2.1 Sensoren

In Kapitel 3 wurde bereits auf die zahlreichen Messgeräte, die auf Biogasanlagen und Kläranlagen zum Einsatz kommen, eingegangen.

4.2.2 Aktoren

In der Abwasser- und Biogastechnik kommen in der Regel Aktoren zum Einsatz, die auch in anderen Industriebereichen Anwendung finden. Nach *Langmann [2010]* können die gebräuchlisten Aktoren wie folgt untergliedert werden:

- Stellglieder für Massesträme
  - Klappe
  - Schieber
  - Stellventil
  - Kugelhahn
- Stellantriebe
  - Elektrische Antriebe
  - Pneumatische Antriebe
  - Hydraulische Antriebe

Die nachfolgenden Ausführungen dienen daher nur der Übersicht, welche Aktoren auf Kläranlagen und Biogasanlagen häufig zum Einsatz kommen bzw. vielfach automatisiert werden. Weitere Informationen zu Stellventilen, Armaturen und sonstigen Bauelementen in der Rohrleitungstechnik können auch *Herbrich [2004]*, *Jockenhöfer [1999]* und *Thier [1997]* entnommen werden.

4.2.2.1 Abwasseranlagen

In der Tabelle 4.1 sind Stellglieder und Armaturen aufgelistet, die üblicherweise auf SBR-Kläranlagen zum Einsatz kommen.

Tab. 4.1: Stellglieder und Armaturen auf SBR-Kläranlagen (Quelle: Autor)

Armaturen und Stellglieder	**Abwasser**/Wasser
Schieber	
- Hand (Rad/Hebel)	**X**, X
- Pneumatisch	**X**, X
- Elektrisch	**X**, X
Klappen	
- Hydraulisch	**X**, X
- Elektrisch	**X**
- Hand	**X**, X
Druckminderer	X
Kompensatoren	**X**
Ventile	
- Magnetventile	**X**, X
- Hand	**X**, X

Darüber hinaus kommen auf diesen Anlagen verschiedene – meist elektrisch angetriebene – Apparate zum Einsatz, wie zum Beispiel:

- Pumpen und Schnecken (z. B. Einlauf-/Zwischenhebewerke, Förderschnecken)
- Pressen (z. B. Kammerfilterpressen)
- Gebläse (z. B. Sandfang, Belüftung des SBR)
- Rührwerke (z. B. Vorlagebehälter, SBR)
- Klarwasserabzugseinrichtungen („Dekanter“) (SBR)
- Ventilatoren (Zu-/Abluft)
- Entwässerungseinrichtungen (z. B. maschinelle Eindickung und Entwässerung)

Im Kapitel 5 finden sich zu einigen dieser Stellglieder etc. entsprechende Abbildungen.

4.2.2.2 Biogasanlagen

In den Tabellen 4.2 und 4.3 sind diverse Aktoren und Armaturen aufgelistet, die üblicherweise auf Biogasanlagen zum Einsatz kommen. Die Abbildungen 4.2 bis 4.6 zeigen einige dieser Armaturen. Darüber hinaus kommen auf diesen Anlagen verschiedene – meist elektrisch angetriebene – Apparate zum Einsatz, wie zum Beispiel:

- Pumpen (z. B. Substratpumpen)
- Dosiereinrichtungen und Förderschnecken für Feststoffe
- Rührwerke (z. B. in Güllebehältern, Anaerobreaktoren und Gärrestlagern)
- Gärrestseparation (z. B. Schneckenpressen)

- Gasmotoren inkl. Peripherie (z. B. Gaskühlung, Gasverdichter)

In den Kapiteln 8 bis 10 findet sich zu einigen dieser Stellglieder, Apparate etc. weitere Abbildungen.

Tab. 4.2: Armaturen und Stellglieder auf Biogasanlagen (Teil 1) ([1] = z. B. für biologische Entschwefelung) (Quelle: Autor)

Armaturen und Stellglieder	**Substrat**/Wasser	**Gas**/Luft[1]*/Druckluft*	**Heizung**
Schieber (Druck-/Saugseite)			
- Hand (Rad/Hebel)	**X**		
- Pneumatisch	**X**		
- Elektrisch	**X**		
Absperrschieber			
- Hand	**X**, X		
Hähne			
- Kugelhähne	**X**	**X**, X	
- 3-Wege-Hähne		X	
Spüleinrichtungen			
- Ventile (Druckluft/Wasser)	**X**		
- Hähne (Wasser)	**X**, X		
Kompensatoren			
- Druckleitungen	**X**		
- Saugleitungen	**X**		
Magnetventile	X		
Gasabsperrklappe			
- Fermenter		**X**	
- Nachgärer		**X**	
- Gärrestlager		**X**	
- Kondensatschacht		**X**	
- Hauptabsperrklappe		**X**	
- BHKW		**X**	
Schaugläser			
- Gasraum		**X**	
- Rohrleitungen	**X**		
Über-/Unterdrucksicherung			
- Mechanisch		**X**, *X*	
- Elektrisch/Pneumatisch		**X**	
Entlüftungsarmaturen/-ventile			
- Druckleitungen (Kugelhähne)	**X**		
- Saugleitungen (Kugelhähne)	**X**		
- Heizung (Ventile)			**X**
Rückschlagklappen	**X**, X	**X**, X	**X**

Tab. 4.3: Armaturen und Stellglieder auf Biogasanlagen (Teil 2) (Quelle. Autor)

Armaturen und Stellglieder	**Substrat**/Wasser	**Gas**/Luft/*Druckluft*	**Heizungen**
Heizungsmischer			**X**
Befüllarmaturen			**X**
Heizschlangen			**X**
Filter, Schmutzfänger		**X**, X	**X**
Über-/Unterdruckventile		*X*	**X**
Vor-/Rücklaufverteiler (manuell)			**X**
Heizungsverteiler (manuell)			**X**
Druckausdehungsgefäße			**X**
Ventilinsel		*X*	
Druckminderer		*X*	
Schnellkupplungsverschlüsse		*X*	

Abb. 4.2: Handschieber zum Notabsperren von Pumpleitungen (1), Schieber mit Elektroantrieb (2), Handschieber an einer Gärrestabgabestation (3) (Bildquellen: Autor)

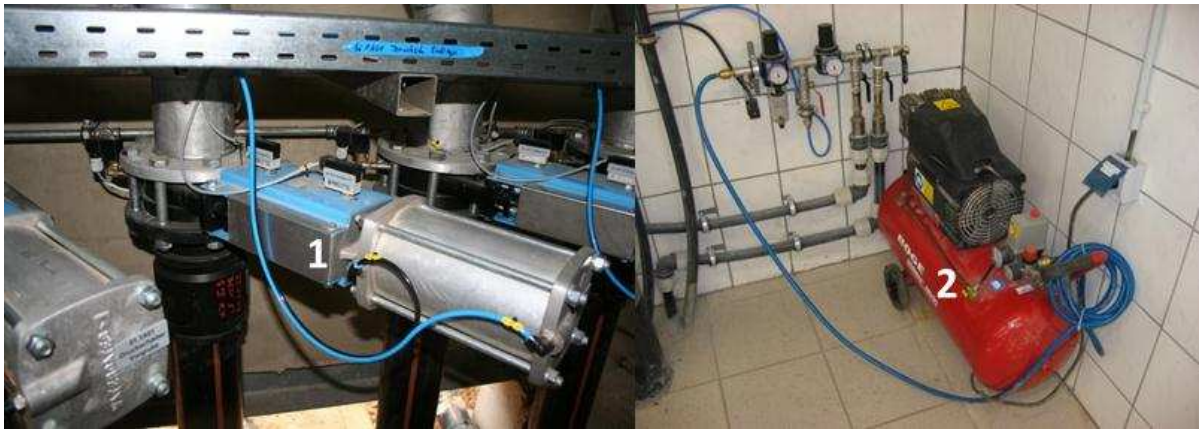


Abb. 4.3: Pneumatikschieber mit Endlagenüberwachung und Spülanschlüssen (1), Druckluftversorgung (2) (Bildquellen: Autor)

Abb. 4.4: Heizungssystem (1) im BHKW-Raum, Anschlüsse an die Heizung des Fermenters (noch vor der Verkleidung der Rohrleitungen und Anschlüsse) (Bildquellen: Autor)

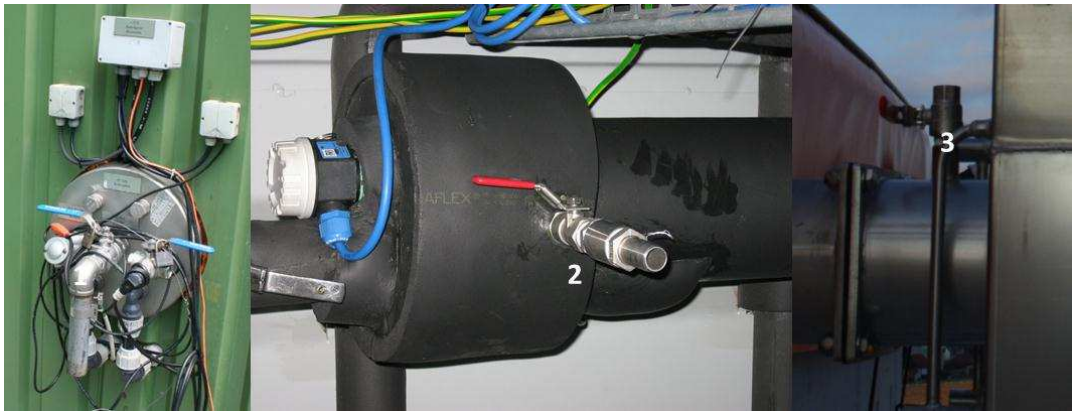


Abb. 4.5: Probenahmestutzen - flüssig (1), Probenahmestutzen - Biogas (2), Spülanschluss (3) (Bildquellen: Autor)

Abb. 4.6: Überdruck-/Unterdrucksicherung (1), Kondensatschacht (2), Notabsperrhahn für Gasleitung (3), Gasabsperrschieber an einem gasdichten Gärrestlager (4) (Bildquellen: Autor)

4.2.3 Kommunikation

Im Bereich der Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten haben sich in den letzten Jahren zahlreiche drahtgebundene (z. B. Koaxialkabel, Lichtwellenleiterkabel, Twisted-Pair-Kabel) oder drahtlose (z. B. Industrial WLAN) Datenübertragungssysteme und Kommunikationsmodelle (z. B. PROFIBUS, PROFINET) entwickelt. Da die Kommunikationswege und -modelle nachrangig für diese Arbeit sind, wird auf die weiterführende Literatur verwiesen, wie zum Beispiel: *Strohrmann [2002], Hilgers und Vogel-Heuser [2003], Pigan und Metter [2008]*, *Früh et al. [2009]* und *Langmann [2010]*.

4.3 Prozessleitebene

4.3.1 Steuerungs- und Regelungsebene

Damit die einzelnen Prozesse bzw. Verfahrensschritte auf den Biogasanlagen und Kläranlagen automatisch ablaufen können, werden Automatisierungseinrichtungen benötigt. Mit der rasanten Entwicklung der Elektronik haben sich dabei mikrorechnerbasierte Lösungen durchgesetzt, die durch die Entkoppelung von Hardware und Software die Realisierung von unterschiedlichen Funktionalitäten (Steuerung versus Regelung) auf einer Gerätebasis erlauben (*Langmann [2010]*). Weite Verbreitung haben in diesem Zusammenhang die sogenannten Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) gewonnen, die mittlerweile auf jeder modernen Kläranlage und nahezu jeder neueren, größeren Biogasanlage anzutreffen sind. Diese Automatisierungsgeräte bestehen nach *Langmann [2010]* aus den folgenden Komponenten:

- Zentralbaugruppe mit
  - einem Mikroprozessor,
  - verschiedenen Speichermedien,
  - Schnittstellen für Programmiergeräte,
  - einer internen Stromversorgung und
  - einer Verbindung zu den E/A-Peripheriebaugruppen.
- Peripheriebaugruppen
  - Digitale Eingangs- und Ausgangsbaugruppen
  - Analoge Eingangs- und Ausgangsbaugruppen
  - Funktionsbaugruppen (z. B. Zähler, Reglerbaugruppen)

Die Programmierung dieser Baugruppen erfolgt über ein Programmiergerät (meist einen PC), wobei die führenden Automationshersteller entsprechende Software anbieten. Der Vorteil dieser Lösung ist, dass sich eine Anpassung der Automatisierung oft einfach und kostengünstig gestalten lässt, da vielfach nur die Software angepasst werden muss. Ein gutes Beispiel wird in Kapitel 7 beschrieben: Das dort dargestellten Praxisbeispiel zeigt deutlich, dass alleine durch eine Anpassung der Software eine erhebliche Leistungssteigerung zu verzeichnen war, ohne dass hierfür die Automatisierungseinrichtungen der SBR-Kläranlage erweitert werden mussten. In den letzten Jahren wurden auch Klein-SPS und Industrie-PC entwickelt, die ebenfalls – jedoch im abgespeckten Umfang – eine Automatisierung erlauben.

4.3.2 Visualisierungs- und Bedienebene

Um die Bedienung der Anlagen zu erleichtern und Betriebsverläufe zu kontrollieren, setzt auf der Steuerungs- und Regelungsebene eine Visualisierungs- und Bedienebene auf. Diese Ebene erfüllt nach *Siemens [2011A]* die folgenden Funktionalitäten:

- Erfassen: Alle wichtigen Mess- und Betriebsdaten werden kontinuierlich vom Leitsystem erfasst.
- Bedienen: Die Anlage lässt sich schnell und einfach vom Computer aus mit Hilfe des Leitsystems bedienen. Dank Fernwirktechnik ist hierfür nicht zwingend die Anwesenheit des Bedieners erforderlich.
- Beobachten: Die erfassten Daten können visualisiert werden, sodass der Bediener stets einen umfassenden Überblick über die aktuellen und historischen Betriebszustände der Anlage hat; ebenso stehen statische Auswertefunktionen (z. B. Minimum, Maximum, Mittelwert) zur Verfügung.
- Melden: Sollte eine Störung auftreten, so wird der Bediener sofort informiert; ggf. über SMS, Sprachmitteilung und/oder Email.
- Archivieren: Die Messsignale und Betriebszustände werden archiviert und können auch für andere Softwareprodukte (z. B. digitale Betriebstagebücher) verwendet werden.
- Quittieren: Störungen werden nicht nur erfasst, die Beseitigung muss auch quittiert werden.

Aufgrund der Fortschritte im Bereich der Elektrotechnik, gibt es immer leistungsfähigere Prozessleitsysteme (PLS) und Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS). Daher ist es heute möglich, selbst komplexe Mess-, Steuerungs- und Regelungsstrategien mit mehreren Tausend Variablen umzusetzen. So bieten derartige Systeme eine Bandbreite verschiedener Kommunikationsarten, Programmier- und Datenbankschnittstellen. D. h. die Dokumentation und Speicherung von Messsignalen, die Überwachung der Anlage, die Weitergabe der Daten an andere Softwareprodukte ist sehr viel einfacher und damit auch kostengünstiger als noch vor einigen Jahren. Eine kompakte Übersicht über diese Komponenten gibt *Cheon et al. [2005]*. Moderne Systeme bieten verschiedene Berechtigungsstufen, sodass für jeden Benutzer (z. B. Besitzer, Bediener, Anlagenbaufirma) individuelle Zugriffsrechte vergeben werden können und sind durch Mehrsprachigkeit gekennzeichnet, sodass mit diesen Systemen ein Großteil der heutigen und zukünftigen Zielmärke für Biogas- und Umwelttechnik sprachlich abgedeckt werden können.

4.3.3 Steuerungs- und Regelungskonzepte

Herkömmliche Steuerungs- und Regelungsstrategien in der Siedlungswasserwirtschaft und Biogastechnik basieren heute noch meist auf einfachen, konventionellen Automationsstrategien (z. B. Schrittkettensteuerung, Zwei-Punkt-Regler, PI- und PID-Regler). Hierbei ist meist noch ein häufiges manuelles Eingreifen des Betriebspersonals erforderlich. In Kläranlagen mit einer komplexen Struktur (z. B. ausgeprägte Belastungsschwankungen, umfangreiche Systemkomponenten) sind derartige Systeme aber oft überfordert und daher oft nicht optimal. Wenn jedoch Kläranlagen aufgrund zunehmender Anforderungen nahe an ihrer Belastungsgrenze arbeiten sollen, aber dennoch eine maximale Reinigungsleistung bei minimalen Kosten erzielen sollen, müssen die komplexen Strukturen und Randbedingungen auch in den (möglichst anlagenweiten) Steuerungs- und Regelungsstrategien berücksichtigt

werden; ähnlich komplexe Fragestellungen gibt es bei Biogasanlagen. In diesen Fällen wird man oft nicht umhinkommen, auf komplexe Automationskonzepte zurückzugreifen, welche etwa auf Basis von Modellen, Mehrgrößenentscheidungen oder Künstlicher Intelligenz beruhen können. Besonders im Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI) gibt es zahlreiche Ansätze aus anderen Bereichen, die auch für die Siedlungswasserwirtschaft und Biogasbranche interessant erscheinen und zum Teil bereits großtechnisch umgesetzt werden (z. B. Neuronale Netze, Fuzzy Logic). Einen guten Überblick über verschiedene Methoden Künstlicher Intelligenz geben *Beierle und Kern-Isberner [2003], Aliev et al. [2000]* und *Russel und Norvig [2003]*. *López de Mántaras und Saitta [2004]* stellen zahlreiche KI-Methoden und verschiedenste darauf aufbauende Applikationen vor. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird auf einige dieser Modell- und KI-basierten Ansätze noch genauer eingegangen.

4.3.4 Downscaling

Die führenden Messgeräte- und Automationshersteller bieten im Bereich der Industrieautomation ein nahezu unüberschaubares Produktportfolio an. Diese Produkte erlauben bereits heute eine Automation von Biogasanlagen und Kläranlagen auf einem hohen Niveau bzw. die Realisierung nahezu beliebig komplexer Steuerungs- und Regelungskonzepte. Leider sind einige dieser Komponenten ursprünglich für größere Anlagen konzipiert worden, sodass deren Einsatz auf kleinen Anlagen entweder zu teuer oder das Produkt an sich zu komplex ist. D. h. einzelne Komponenten (z. B. Leitsysteme) müssen daher entsprechend den Bedürfnissen kleiner Anlagen abgespeckt werden. Insbesondere im Abwassersektor ist dies aber eine schwierige Gradwanderung, da zwischen sehr großen (> 1 Mio. EW) und kleinen Kläranlagen (< 5.000 EW) und Wasserwerken erhebliche Skalenunterschiede existieren. Ein Hersteller von Messgeräten beschreitet daher einen anderen Weg, da er aufbauend auf einem Standardmessumformer und einem Industrie-PC verschiedene standardisierte Steuer- und Regelmodule entwickelt (*Häck et al. [2011]*); die Zielgruppe derartiger Systeme dürften kleinere bis mittlere Kläranlagen sein. Derartige Ansätze, die sich zum Teil für weniger als 30 Tsd. € realisieren lassen, sind auch für ältere Kläranlagen interessant, da diese Module auch als eigenständige Lösung, d. h. unabhängig von der vorhandenen Elektro- und Automationstechnik, verwendet werden können; hierdurch entfallen teure Einbindungs- und Modernisierungskosten. Neben den Kosten für Hardware- und Software-Komponenten stellt die eigentliche Implementierung der Mess- und Automationskonzepte ein erheblicher Kostenblock dar. Bei Tagessätzen für Automatisierer von mehr als 1.000 € kommen in diesem Kostenblock schnell erhebliche Beträge zusammen. Um die Zielgruppe kleiner Kläranlagen bzw. Biogasanlagen mit effektiver, aber dennoch wirtschaftlich vertretbarer Mess- und Automationstechnik ausstatten zu können, ist es daher erforderlich, auch die einzelnen Softwarebausteine zu standardisieren. Auch die Hersteller von Automationskomponenten haben dies erkannt und angefangen, objektorientierte und branchenorientierte Programmbibliotheken für Pumpen, Rührwerke etc. zu erstellen, die dann bei Bedarf relativ einfach zusammengebaut werden können. Hierdurch können die Engineeringkosten gesenkt werden. Die großen Hersteller von Biogasanlagen haben zudem ihre eigenen Bibliotheken entwickelt, die die Grundlage für die Automatisierung neuer Anlagen sind.

4.4 Unternehmensleitebene

Seit einigen Jahren erfolgt vermehrt eine Anbindung der Automationsebene an die Unternehmensleitebene, wie zum Beispiel an kaufmännische Software oder Logistiksoftware. *Früh et al. [2009]* widmen sich ausführlich diesem Wandel und den Auswirkungen, die hieraus für die zukünftige Automatisierung resultieren: Waren früher die Prozessleittechnik ein weitgehend geschlossenes System, das nur interne Informationen verarbeitete, so müssen zukünftig auch externe Informationen bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden. Auch wenn derartige Konzepte bisher überwiegend nur im produzierenden Gewerbe und der Industrie eingesetzt werden, so wird dies langfristig auch in der Umwelttechnik von Bedeutung sein, da einzelne Abwasserentsorger bereits Dutzende, wenn nicht gar Hunderte, Kläranlagen betreiben bzw. bereits auch Öko-Energieversorger existieren, die entweder Großbiogasanlagen (z. B. > 10 MW_{el}) und/oder Dutzende von mittleren Biogasanlagen (0,5 bis 3 MW_{el}) betreiben. In diesen Fällen erscheint eine Einbindung der Automation in die Software des Unternehmensverbunds (z. B. Kaufmännische Abrechnung, Logistik, Ersatzteilversorgung, Service und Wartung) sinnvoll. In Einzelfällen, wie bei großen Wasser- und Abwasserverbänden, werden derartige Ansätze daher bereits verfolgt: So berichten *Zelezny und Wong [2005]* über ein derartiges Vorhaben für den Großraum Vancouver, wobei unter anderem durch die Einbindung von Dokumentenmanagementsystemen auch den Mitarbeitern vor Ort alle wichtigen Informationen zur Verfügung gestellt werden.

4.5 Mensch-Maschine-Kommunikation

4.5.1 Allgemeine Bemerkungen

Die Bedienung von komplexen Systemen und Anlagen stellt in der Regel hohe Anforderungen an dessen Benutzer. Mit steigendem Einsatz von Mess- und Automationstechnik werden die Anlagen zwar immer transparenter, jedoch erleichtert dies dem Bediener nicht zwangsläufig auch die Arbeit, da die meisten Menschen mit zu vielen Informationen gleichzeitig schnell überfordert sind. Dies gilt besonders, da nicht zwangsläufig davon ausgegangen werden kann, dass der Bediener auch Experte in der jeweiligen Technologie ist, denn auf der Bedienebene von kleineren und mittleren Klär- und Biogasanlagen findet man selten Fachkräfte (Ingenieure, Meister), sondern oft angelernte Mitarbeiter. Aus diesem Grund hat man schon vor Jahrzehnten in der Automationstechnik damit begonnen, nach Möglichkeiten zu suchen, wie die Kommunikation zwischen dem Bediener (Mensch) und der automatisierten Maschine so einfach und so wenig anstrengend wie möglich erfolgen kann. *Geisler und Beyerer [2010]* geben unter anderem einen Überblick über die Entwicklung der Mensch-Maschinen-Kommunikation der letzten Jahrzehnte sowie zu Forschungsprojekten. Wurden Mensch-Maschine-Systeme für komplexe Systeme anfangs nur für Großanlagen konzipiert – so beschreibt *Steusloff* (in *Geisler und Beyerer [2010]*) ein verteiltes, dezentrales, lichtleitergekoppeltes und farb-bildschirmgeführte Prozessleitsystem mit einer Lichtgriffelbedienung für ein deutsches Stahlwerkes aus den 1970er Jahren –, so halten heute derartige Werkzeuge immer mehr Einzug in unser tägliches Leben. Dies gilt nicht nur für einfach zu bedienende Konsumgüter- und Elektronikgeräte, sondern auch neue leistungsfähige Komponenten für Fahrerassistenzsysteme (z. B. Einspiegelung von Informationen in die Windschutzscheibe von Kraftfahrzeugen).

Die Praxis zeigt jedoch, dass bei verfahrenstechnischen Anlagen, deren Investitionskosten im niedrigen Millionenbereich liegen, und die aufgrund von individuellen Kundenwünschen und/oder besonderer Randbedingungen eher den Charakter von Einzelanlagen haben, die Mensch-Maschine-Kommunikation erhebliche Defizite aufweist. Leider gehören in diese Gruppe auch die Biogasanlagen und Kläranlagen! Dies liegt in vielen Fällen weniger an den Funktionalitäten, die moderne Leitsystemen bieten, sondern daran, dass viele der kleineren und mittleren Anlagenbaufirmen, die Biogas- und Kläranlagen bauen, nur kleinere Automatisierungsgruppen beschäftigen, deren Mitarbeiter zudem auch noch oft die Projektierung, Bauleitung und Inbetriebnahme übernehmen müssen. Ein weiteres Problem ist, dass die wenigsten Auftraggeber von Kläranlagen (meist Kommunen) und Biogasanlagen (oft Landwirte) nicht wissen, welche Möglichkeiten moderne Leitsysteme dem Bediener bieten können. Diese Defizite auf Seiten der Auftragnehmer und der Auftraggeber führen oft dazu, dass nur ein kleiner Teil der Funktionalitäten moderner Leitsysteme auch genutzt wird.

Daher sieht der Autor dieser Arbeit die wesentliche Herausforderung der nächsten Jahre darin, diese Schwachstelle zu beseitigen, damit der Einsatz leistungsfähiger Mess- und Automationstechnik auf diesen Anlagen den Durchbruch und damit eine flächendeckende Verbreitung schafft. Bei der Lösung dieses Problems kann jedoch auf Erfahrungen aus anderen Bereichen sowie allgemeingültige Anforderungen zurückgegriffen werden: So beschreibt *Zühlke [2012]* nicht nur die einzelnen Elemente der menschlichen Informationsaufnahme, Wahrnehmung und des daraus resultierenden Handelns, sondern beleuchtet auch die Ursachen für „menschliches Versagen“ bei der Bedienung komplexer Anlagen. Darauf aufbauend beschreibt *Zühlke [2012]* nutzergerechte Ansätze für Mensch-Maschine-Systeme; unter anderem wird hierbei nicht nur auf Methodiken (z. B. Navigationskonzepte, Strukturierung/Klassifizierung von Informationen), sondern auch auf zukünftige Informationstechniken (z. B. Virtuelle Realität, Augmented Realtiy, Agentensysteme) verwiesen.

4.5.2 Intelligente Feldgeräte

Wie im Kapitel 3 ausgeführt, haben sich Messgeräte im letzten Jahrzehnt stark weiterentwickelt. Dies gilt nicht nur bezüglich der Zuverlässigkeit, Kosten und Genauigkeit, sondern bezieht sich auf die Möglichkeiten der Kommunikation und Selbstdiagnose. D. h. die Sensoren und sonstigen Feldgeräte werden zunehmend „smart“ und „intelligent“, was insbesondere auch deren Einbindung in die Automationsebene erleichtert, sowie neue Möglichkeiten der Diagnose und Kommunikation bietet. In den letzten Jahren entstehen zudem auch Feldgeräte, die über Ethernet/IP-Protokolle verfügen. *Bouwer [2011]* sieht in dieser Entwicklung zahlreiche Vorteile, die er kurz zusammenfasst:

- „[...] Einfache und kostengünstige Systemintegration [...]
- Durchgängigkeit der Anlagendaten von der Feld- bis Betriebsebene [...]
- Mehr Transparenz [...] durch [...] Zugriff auf Prozess-, Geräte- und Diagnosedaten [...]
- schnelle Datenübertragung und Echtzeitinformation [...]
- vereinfachte Geräteparametrierung [...]“

Seintsch und Brucker [2011] veranschaulichen die Möglichkeiten der Feldgerätediagnose anhand einer Durchflussmessung, einer Druckmessung und eines Stellgerätes; alles Beispiele, die sich auch auf die Biogas- und Abwassertechnik übertragen lassen. Auch wenn von diesen Möglichkeiten im Bereich der Biogas- und Abwassertechnik noch kaum Gebrauch

gemacht wird (und man sich nach wie vor meist mit der Übertragung der Messwerte begnügt), so wird sich dies aufgrund der im Kapitel 2 beschriebenen Trends mittel- bis langfristig ändern. Erste diesbezügliche Ansätze wurden bereits im Abschnitt 3.9.3 vorgestellt. Für die zum Beispiel in Kapitel 10 vorgestellten Konzepte „gläserner“ Biogasanlagen sind intelligente Feldgeräte zudem eine wesentliche Voraussetzung.

4.5.3 Prozessvisualisierung

Zühlke [2012] verweist auf die zahlreichen Möglichkeiten, die moderne Prozessleitsysteme im Hinblick auf eine anwendungsspezifische Prozessvisualisierung bieten:

- Bereitstellung von Visualisierungsbaukästen (z. B. Grafiken und Diagramme)
- Bereitstellung von gerätespezifischen Treibern für Sensoren und Aktoren
- Programmvorlagen für die Realisierung von Prozesssteuerungen
- Editoren für die grafische Gestaltung der Benutzeroberfläche
- Bereitstellung vorparametrierter Visualisierungsobjekte für Standardanlagenkomponenten (z. B. Stellventile und Stellmotoren)

Allgemeine Hinweise für die Gestaltung der Prozessvisualisierung (z. B. Fließbilder, Meldungen, Kurvenbilder) gibt *Früh et al. [2009]*. *Zühlke [2012]* weist aber auch darauf hin, dass bei Prozessleitsystemen nach wie vor eine einfache Herstellung der Prozessautomation von Maschinen und Anlagen im Vordergrund steht und weniger die nutzergerechte Gestaltung. Auch *Kronemeier (in NAMUR [2012])* sieht einen Bedarf für die Informationsverdichtung durch neue Grafikobjekte und der Prozessbildoptimierung: So ersetzt er etwa in anschaulichen Beispielen den aktuellen Messwert in der Visualisierung eines Bauteils durch den Verlauf der letzten Stunden inklusive einer Darstellung der Trend- und Soll-Bereiche. Daher denken Forscher und Entwickler auch über neue und ergänzende Mensch-Maschine-Systeme für den Umweltschutzsektor nach. So berichten etwa *Wölle und Ebert [2009]* über die Entwicklung eines neuen Ansatzs zur Prozessvisualisierung und -diagnose: Da bei der Entwicklung des nachhaltigen Sanitärkonzeptes „KOMPLETT“ (*Schmitt [2009]*) umfangreiche Verfahrenstechnik zum Einsatz kam, sollten neue Methodiken der Mensch-Maschine-Kommunikation erprobt werden. Interessant an diesem Ansatz ist, dass nicht nur ein intelligentes, vielschichtiges Diagnosesystem (z. B. Verschleißerkennung von Pumpenkomponenten, Videobildanalyse, Virtuelle 3-D-Modelle der Anlagenkomponenten) beinhaltet, sondern sich auch Methodiken des Visual Data Mining bedient (z. B. Color-Plane-Darstellung), um dem Benutzer die Vielzahl an Informationen anschaulich zur Verfügung zu stellen. Durch die Umwandlung zahlreicher klassischer Tagesgänge in farbcodierte Flächen sehen die Autoren eine Möglichkeit, dem Bediener das Erkennen von Mustern und Ausreißerwerten im Anlagenverhalten zu erleichtern.

4.5.4 Mobile Endgeräte

In den letzten Jahren wurden verschiedene drahtlose Übertragungswege entwickelt, wie z. B. WLAN, Bluetooth, UMTS/GPRS, LTE. Durch diese Übertragungswege lassen sich auch Betriebsdaten, Messwerte o. ä. übertragen. Darüber hinaus steigen auch die Leistungsfähigkeit und Funktionalitäten von Mobiltelefonen, Tablet-PC und anderen mobilen Endgeräten von Jahr zu Jahr kontinuierlich an; GPS-Funktionalitäten sind bereits bei modernen Mobilgeräten Standard. Da Biogasanlagen und Kläranlagen immer komplexer werden, steigen

dadurch auch die Anforderungen an das Betriebspersonal permanent an. Um dieses Personal zu unterstützen bzw. zu entlasten, kann es sinnvoll sein, über den Einsatz von mobilen Endgeräten nachzudenken. Moderne Endgeräte können alle Informationen (z. B. Gebrauchsanweisungen, Bilder, Schulungsvideos) mobil zur Verfügung stellen, auch bauwerks- oder verrichtungsspezifisch. Es sind auch Endgeräte am Markt erhältlich, die unter extremen Bedingungen eingesetzt werden können und zum Beispiel wetterfest, wasserdicht, staubdicht und ggf. auch Ex-geschützt sind. Es kann daher nicht verwundern, dass sich seit Beginn des neuen Jahrtausends Wissenschaftler und Praktiker mit den Einsatzmöglichkeiten dieser neuen Technologien auf Umweltschutzanlagen beschäftigen:

Steinmetz et al. [2005] sehen zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten für mobile Endgeräte auf Abwasseranlagen, wobei als wesentliche Schlüsselfunktionen die folgenden Bereiche identifiziert wurden:

- Arbeitssicherheit
- Reparatur und Wartung
- Prozessüberwachung, Prozessvisualisierung und Prozessoptimierung
- Weiterbildung
- Technisches und betriebswirtschaftliches Controlling und Benchmarking
- Erste Hilfe

Kawada et al. [2005] berichten über den Einsatz von Mobiltelefonen zur Überwachung von Kläranlagen und Wasserwerken in Japan. *Seibert-Erling und Uecker [2005]* sehen für den Einsatz von mobilen Endgeräten auf wasserwirtschaftlichen Anlagen vor allem die Bereiche „Elektronische Dokumentation“, „Bedienen und Beobachten“ und „Instandhaltung/Asset Management“; so verweisen die Autoren unter anderem auf ein Pilotprojekt, bei dem derartige Endgeräte zur Unterstützung von Instandhaltungsarbeiten bei Sonderbauwerken (z. B. Pumpwerken, Regenüberlaufbecken) im Kanalnetzbetrieb eingesetzt wurden. *Steinmetz und Wiese [2006]* berichten über großtechnische Versuche auf einer SBR-Kläranlage (ca. 20.000 EW): Zum Einsatz kam in diesem Beispiel ein 1,8 kg schweres, mobiles Endgerät vom Typ „Mobic T8“ (Fa. Siemens), das mit einem 8,4‘‘-Touch Display ausgestattet war und auf dem Betriebssystem „Windows CE.NET“ basierte. Das Gerät erwies sich als robust, staub- und wassergeschützt. Die drahtlose Kommunikation mit dem Prozessleitsystem („WinCC“, Fa. Siemens) erfolgte auf Basis von WLAN (802.11) mit vier Access-Points; die Gesamtkosten betrugen weniger als 10.000 €. Die Tests verdeutlichten, dass das mobile Endgerät nahezu auf dem gesamten Kläranlagengelände eingesetzt werden konnte bzw. viele Funktionalitäten des Leitsystems auch vor Ort genutzt werden konnten. Als problematisch erwies sich jedoch, dass die sich damals technisch noch in einem frühen Stadium befindlichen TFT-Displays bei vielen Wetter- bzw. Lichtverhältnissen im Freien nicht lesbar waren, was die Brauchbarkeit stark einschränkte. *Wölle et al. [2011]* berichten über Ergebnisse des Forschungsprojekten “SYNERGIE“, welches die Möglichkeiten der Organisation, Übertragung und Visualisierung von Betriebsdaten von Kläranlagen auf modernen Endgeräten (z. B. „Apple ipad®“) untersucht; die Untersuchungen erfolgten am Beispiel einer Kläranlage in Rheinland-Pfalz. Kernstücke sind dabei ein wissensbasierter Ontologie-Editor, der zum Beispiel eine Verknüpfung von Bildern und Texten mit verfahrenstechnischen Bauteilen (mittels GPS) auf einer Kläranlage verknüpft. Ferner wurde Wert darauf gelegt, dass auch Standardschnittstellen (z. B. OPC-UA), die auch in der Automatisierung Anwendung finden, zum Einsatz kommen.

Um eine Informationsüberflutung der Benutzer zu vermeiden, machten sich die Autoren auch Gedanken über eine geeignete Mensch-Maschinen-Kommunikation (z. B. über Fisheye-Interaktion).

4.5.5 Vollautomatisierung versus Rückbesinnung auf den Menschen

Der schnelle Fortschritt in der Automatisierungstechnik hat nach *Zühlke [2012]* lange dazu geführt, dass man auf Unfälle infolge vermeintlich „menschlichen Versagens“ damit reagiert hat, dass man noch mehr Prozesse automatisieren wollte, um die „Fehlerquelle Mensch“ zu beseitigen. Die Praxis zeigt aber, dass es ohne die Einbindung des Menschen einfach nicht geht und selbst vollautomatisierte Anlagen nicht vor schweren Havarien geschützt sind.

Faktisch haben sich hieraus in der Abwasser- und Biogastechnik verschiedene (Misch-) Formen der Einbindung des Menschen in komplexe Mess- und Automationskonzepte ergeben (Auswahl):

- Überwachung vollautomatisierter Anlagen durch geschulte Bediener, die bei Abweichungen von Soll- und Grenzwerten alarmiert werden und regulierend eingreifen.
- Teilautomation von Arbeitsprozessen bei gleichzeitiger Echtzeiterfassung wichtiger Prozessdaten und Weiterleitung dieser Informationen an Bediener und ggf. Experten. Auf der Grundlage dieser Informationen passen die Bediener dann die Soll-/Führungsgrößen an.
- Teilautomation von Arbeitsprozessen und begleitende Prozesskontrolle anhand (un-)regelmäßig genommener Proben, die anschließend im Labor analysiert werden. Aufgrund der Laborergebnisse sowie weiterer Informationen nimmt der Bediener dann – ggf. auf Empfehlung eines externen Beraters – Veränderungen an den Einstellungen vor.

4.6 Sicherheitstechnik

4.6.1 IT-Sicherheit

Mit zunehmender Komplexität und Vernetzung der einzelnen Automationskomponenten ist auch die Gefahr vor Angriffen von innen (z. B. durch unzufriedene Mitarbeiter) als auch von außen (z. B. durch Hacker) in den letzten Jahren gestiegen (z. B. *FTD [2011]*). Daher setzen sich verschiedene Experten und Firmen mit dieser Thematik auseinander bzw. arbeiten an geeigneten Lösungen und Präventionsmaßnahmen: *Siebert und Herrmann [2007]* betrachten Sicherheitsaspekte beim Fernzugriff auf Abwasseranlagen über verschiedene Verbindungsarten. *Och et al. [2007]* beschäftigen sich mit der IT-Sicherheit auf Abwasseranlagen.

4.6.2 Anlagensicherheit

Trotz technischer Fortschritte gibt es immer wieder Beispiele für teilweise katastrophale Fehler, die nicht auf menschlichem Fehlverhalten, sondern dem Versagen einzelner – teils winziger – Anlagenkomponenten hervorgerufen wurden. Aus diesem Grund beschäftigen sich Wissenschaftler und Ingenieure auch mit der Entwicklung durchgängiger Sicherheitskonzepte für Maschinen und Anlagen, wobei neben organisatorischen Präventionsmaßnahmen bei Planung, Bau und Betrieb auch diverse mess- und automationsbasierte Schutzmaßnahmen zum Einsatz kommen. So geben *Wratil und Kieviet [2010]* eine Übersicht über die verschiedensten Elemente der Sicherheitstechnik bei Maschinen und Anlagen, die nicht nur Sicherheitsfragen bei Antrieben und mechanischen Komponenten, sondern auch bei

Automationskomponenten, Kommunikationselementen und der Software umfasst. *Hilgers und Vogel-Heuser [2003]* beschäftigen sich unter anderem mit der Problematik des Explosionsschutzes in der Prozessautomatisierung.

Bezüglich des Einsatzes von Sicherheitsmesstechnik bei Biogas- und Kläranlagen wird auf die Abschnitte 6.5.6 und 9.5.4 verwiesen.

4.7 Lebenszykluskosten

Sowohl in der stark kommunal geprägten Abwasserwirtschaft als auch der nach wie vor sehr stark landwirtschaftlich geprägten Biogastechnik wurden über lange Zeit Messgeräte und Aggregate nahezu ausschließlich über die Investitionskosten ausgewählt, wobei in der Regel der billigste Anbieter den Zuschlag bekam. In den letzten Jahren setzt sich jedoch auch hier die Erkenntnis durch, dass billig nicht unbedingt günstig sein muss. So weist *DWA [2008A]* darauf hin, dass die Investitionskosten einer durchschnittlichen Kreiselpumpe in der Abwassertechnik nur 6 % der Gesamtkosten während der gesamten Nutzungsdauer („Lebenszykluskosten“) ausmachen; 20 % entfallen auf die Wartungskosten und 74 % auf die Energiekosten. *Uecker [2011]* beschäftigt sich mit Entwicklungen und Trends beim Lebenszyklusmangement von Automatisierungskomponenten für Abwasseranlagen. *Seibl [2011]* verweist auf ein „EXCEL“-basiertes Tool zur Bestimmung der Lebenszykluskosten und veranschaulicht dies anhand eines Kläranlagenbeispiels. *Pehnt [2010]* verweist auf die Möglichkeiten zur Stromeinsparung durch Wahl energieeffizienter Elektromotoren: Anhand eines Nomogramms verdeutlicht er die Wirkungsgradunterschiede verschiedener Elektromotoren der Energieeffizienzstufen IE1 (Standardeffizienz) bis IE3 (sehr hohe Effizienz). Das Nomogramm zeigt, dass in der Abwasser- und Biogastechnik weit verbreiteten Leistungsklasse zwischen 1 und 10 kW_{el} (z. B. für Rührwerke und Pumpen) zwischen den einzelnen Effizienzklassen zwischen 5 und 10 % Wirkungsgradunterschied liegen können.

4.8 Condition Monitoring

Im Abschnitt 3.2.6 wurde ausgeführt, dass in der Messtechnik zurzeit ausfallorientierte oder vorbeugende Wartungskonzepte dominieren. Dies gilt aber auch für andere Bereiche, wie zum Beispiel die Verfahrens- und Maschinentechnik. Aus verschiedenen Gründen wird diese Vorgehensweise aber zunehmend kritisch hinterfragt:

- Eine vorbeugende Wartung führt aufgrund des Sicherheitsdenkens zu höheren Personal- und Materialkosten, da Teile vorbeugend gewartet und ggf. sogar ausgetauscht werden, sodass die Lebenszykluskosten tendenziell ansteigen.
- Eine ausfallorientere Wartung kann jedoch dazu führen, dass in der Dauer der Ausfallzeit die Leistungsfähigkeit der Anlage negativ beeinflusst wird. Dies gilt besonders dann, wenn zentrale Komponenten betroffen sind. Verschärfend kommt hinzu, dass bei dieser Methodik nicht auszuschließen ist, dass die Geräte so auf Verschleiß gefahren werden, dass statt einer Wartung eine Reparatur oder gar eine Neubeschaffung erforderlich wird.

Es ist daher nachvollziehbar, dass um die Lebenszykluskosten einerseits zu senken und auf der anderen Seite die Lebenszykluserlöse zu erhöhen, das Interesse daran steigt, den Zustand aller Komponenten einer Anlage kontinuierlich zu überwachen und wünschenswerter Weise dem Anlagenfahrer auch Hinweise zu möglichen Problemen (z. B. bevorstehender

Ausfall einer Maschine) aufzuzeigen. Aus diesem Wunsch heraus entwickelt sich in den letzten Jahren die Disziplin des Condition Monitoring, die durch den schnellen Fortschritt im Bereich der Hard- und Software begünstigt wird. In der Literatur finden sich hierzu bereits zahlreiche Ansätze, die auf verschiedenen Messverfahren aufbauen: *Jiang [2011]* berichtet über den Einsatz akustischer Verfahren, während *Randall [2011]* hingegen auf Vibrationsmessungen setzt. Andere Ansätze beruhen unter anderem auf dem Einsatz von Temperatur-, Druck- und Drehmomentmessungen.

Für Biogasanlagen sind derartige Verfahren langfristig interessant, da Abschnitt 8.11.6 verdeutlichen wird, dass mittlerweile ein erheblicher Teil der Störungen nicht auf Probleme mit dem Biogasprozess an sich, sondern auf den Ausfall von Motoren, Pumpen, Rührwerken o. ä. zurückzuführen ist. Da Substrate in der Regel im ausreichenden Maße zur Verfügung stehen, könnte durch ein effektives Condition Monitoring die Anlagenverfügbarkeit und Anlagenauslastung erhöht werden. Gleichzeitig könnten die Wartungskosten reduziert werden, da hier vorbeugende Wartungskonzepte (z. B. Motorölwechsel) noch weit verbreitet sind. Der Abschnitt 10.4 zeigt wie derartige Konzepte aussehen könnten.

Bei Kläranlagen dürfte das Potenzial geringer sein, da hier wichtige Anlagenkomponenten (z. B. Gebläse, Pumpen) redundant ausgeführt werden, sodass der temporäre Ausfall dieser Komponenten die Anlagenverfügbarkeit oft nur geringfügig beeinflusst. Gleichwohl wird die Personaldecke bei den meist von Kommunen betriebenen Kläranlagen zunehmend dünner, sodass zustandbezogene Wartungskonzepte eine Entlastung bewirken könnten. Außerdem könnte hierdurch dem beunruhigen Trend entgegengewirkt werden, dass Komponenten aus Personalmangel auf Verschleiß bis hin zum Maschinenbruch gefahren werden.

4.9 Zwischenfazit

Das Kapitel 4 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Aspekte der Automatisierung. Es wurde deutlich, dass bei der Automatisierung von Kläranlagen und Biogasanlagen heute auf eine Vielzahl von Komponenten aus der Industrieautomation zurückgegriffen werden kann, die sich in anderen Branchen bereits über Jahre bewährt haben. Zusammen mit der umfangreichen Messtechnik (Kapitel 3) lassen sich damit schon heute nahezu beliebig komplexe Mess- und Automationskonzepte auf Biogas- und Kläranlagen realisieren. Es wurde aber auch deutlich, dass es im Bereich der Mensch-Maschine-Kommunikation noch erhebliches Verbesserungspotenzial gibt: Dies gilt besonders für Biogas- und Kläranlagen, da – von wenigen Großanlagen abgesehen – die wenigstens dieser Anlagen über Betriebsingenieure oder Meister/Techniker verfügen, die in der Lage sind, die Vielzahl möglicher Prozessinformationen zuverlässig zu interpretieren. Aus Sicht des Autors ist das Fehlen effizienter und einfacher Formen der Mensch-Maschine-Kommunikation sowie der Systemdiagnose einer der Gründe dafür, dass der Einsatz von Mess- und Automationstechnik auf kleinen und mittleren Biogas- und Kläranlagen noch immer schleppend verläuft und viele Versuche für alle Beteiligten enttäuschend verlaufen. Weiteres Potenzial sieht der Autor im Einsatz von Methoden des Condition Monitoring, um die Anlagenverfügbarkeit bei gleichzeitiger Minimierung der Wartungskosten zu verbessern.

5 Einführung in die SBR-Technik

5.1 Historie der SBR-Technik[8]

Die Ursprünge des **S**equencing **B**atch **R**eactor-Verfahrens (SBR) gehen im Wesentlichen auf die Arbeiten von *Ardern und Lockett [1914]* (zitiert in *IWA [2001]*) zurück, die zunächst Reaktoren im Labormaßstab nach dem zyklischen Aufstauprinzip betrieben haben, wobei das Rohabwasser stoßartig zugegeben wurde. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden rasch in die Großtechnik umgesetzt. In England sind zwischen 1914 und 1920 mindestens vier Kläranlagen nach diesem Prinzip erbaut worden, die zwischen 300 und 7.600 m^3/d Abwasser behandelten. Diese Anlagen wurden aber nicht stoßartig betrieben, sondern über eine längere Dauer befüllt. Etwa zeitgleich sind in den USA ab 1915 ebenfalls einige zyklisch betriebenen Aufstaukläranlagen gebaut worden. Ab 1920 wurden aber nahezu alle Aufstauanlagen zu Durchlaufanlagen umgebaut, da der Aufwand für den Aufstaubetrieb wegen der noch fehlenden Automatisierungstechnik hoch war bzw. weil es mit den damals zur Verfügung stehenden mechanischen Bauteilen beim Aufstaubetrieb Probleme gab. Abgesehen von einigen Anlagen, die in den 1940er und 1950er Jahren errichtet und meist zur Industrieabwasserbehandlung eingesetzt wurden, geriet der Batchbetrieb von Abwasserreinigungsanlagen für längere Zeit in Vergessenheit. Ab Ende der 1950er Jahre entwickelte *Pasveer [1959]* (zitiert in *IWA [2001]*) in den Niederlanden eine kontinuierlich beschickte, aber diskontinuierlich dekantierende Aufstauanlage, die eine Grundlage für zahlreiche Weiterentwicklungen war. Ein Beispiel ist das Intermittently Decanted Extended Aeration-Verfahren (IDEA), das in Australien vielfach realisiert wurde. Wesentlich vorangebracht wurde die SBR-Technologie ab den 1960er Jahren durch *Irvine* und seine Mitarbeiter/innen, die auch erstmals den Begriff Sequencing Batch Reactor (SBR) für diskontinuierlich betriebene Aufstaukläranlagen verwendeten. *Dennis und Irvine [1979]* (zitiert in *IWA [2001]*) erforschten u. a. auch den Einfluss unterschiedlicher Beschickungs- und Zykluszeiten auf den Betrieb von SBR-Anlagen. Mittlerweile existieren weltweit einige Tausend SBR-Kläranlagen. Bereits um 2000 waren allein in Nordamerika ca. 1.300 SBR-Kläranlagen in Betrieb (davon 20 % Industrieanlagen), die bis zu 40.000 m^3/d Abwasser behandeln; der überwiegende Teil (ca. 80 % aller kommunalen Anlagen) davon sind jedoch viele kleine Anlagen, die weniger als 4.000 m^3/d behandeln (*IWA [2001]*). Erst Mitte der 1980er Jahre wurde die Technik in Deutschland „wiederentdeckt" (*Wilderer und Irvine [1984]*). Insbesondere seit Mitte der 1990er Jahre wurden in Deutschland verstärkt SBR-Anlagen gebaut, sodass hier bereits um 2000 mehr als 140 kommunale SBR-Kläranlagen und ca. 50 Industrieanlagen existierten; im Vergleich zu der Gesamtzahl von ca. 10.000 Kläranlagen in Deutschland immer noch eine überschaubare Zahl. Die größte dieser Anlagen ist eine auf 140.000 EW ausgelegte CAST-Kläranlage (KA Neubrandenburg), jedoch dominieren auch in Deutschland mit 75 % kleinere Anlagen mit Anschlussgrößen von weniger als 5.000 EW (*IWA [2001]*). In den letzten Jahren werden aber auch zunehmend größere Anlagen mit mehr als 20.000 EW gebaut. Dies zeigt einmal mehr, dass bei großtechnisch eingeführten und bewährten Abwasserreinigungsverfahren vor allem die Wirtschaftlichkeit entscheidet (bzw. entscheiden sollte), welche Größenordnung sich mit einem bestimmten Verfahren realisieren lässt. In Deutschland gilt das SBR-Verfahren mittlerweile als Stand der Technik, nicht zuletzt wegen der Einführung technischer

[8] Die nachfolgenden Ausführungen stammen im Wesentlichen aus *Wiese [2004]*.

Regelwerke, wie dem *ATV-Merkblatt M 210 [1997]* bzw. dem Nachfolgemerkblatt *DWA-Merkblatt M 210 [2009]*. Trotz dieser Entwicklung kann man in der Praxis noch immer eine gewisse Skepsis gegenüber dem Einsatz des SBR-Verfahrens feststellen, die nicht zuletzt darauf zurückzuführen ist, dass viele Ingenieurbüros, Kläranlagenbetreiber und Aufsichtsbehörden keine oder kaum Erfahrungen mit SBR-Anlagen vorweisen können. So herrscht oft noch die Einschätzung vor, dass sich SBR-Anlagen für die Behandlung von Mischwasser im Vergleich zur Durchlaufanlagen weniger gut eignen bzw. eine erhöhte Beschickung nicht möglich sei (z. B. *ATV [1997C]*). Nach *Schreff [2001]* werden ferner Problemursachen (ungeeignete Klarwasserabzugseinrichtungen, unterdimensionierte Belüftung o.ä.) oft dem SBR-Verfahren angelastet, obwohl diese häufig eher auf Unerfahrenheit und Planungsfehler zurückzuführen sind. Auch Probleme, die aus der Abwasserzusammensetzung (z. B. erhöhter Fettanteil) bzw. den Schlammeigenschaften (Bläh- und Schwimmschlamm) resultieren können, werden vereinzelt dem SBR-Verfahren zugeordnet, obwohl derart ungünstige Bedingungen auch bei anderen Abwasserreinigungsverfahren zu Problemen führen würden. Zahlreiche Betriebserfahrungen belegen mittlerweile, dass SBR-Anlagen, die sorgfältig geplant und mit geeigneter Technik ausgestattet wurden, sehr gute Reinigungsleistungen erzielen und sich auch gut zur Mischwasserbehandlung eignen. Auch in der Fachliteratur findet man zahlreiche Veröffentlichungen, die sich mit der Leistungsfähigkeit von SBR-Anlagen (u. a. auch bei Mischwasser) beschäftigen. So führt *Gallent [1999]* aus, dass sich SBR-Anlagen auch bei Mischsystemen bewährt haben und den Anforderungen gerecht werden. Er belegt anhand der Betriebsergebnisse der SBR-Kläranlage Abensberg, dass diese die Ablaufwerte trotz Überlastung einhalten konnte bzw. zum Teil weit unterschritt. *Steinmetz [2001]* konnte bei der ebenfalls hochbelasteten Kläranlage Zehdenick auch bei erhöhtem Zufluss stabile und gute Reinigungsleistungen feststellen. *Demoulin et al. [1997]* beobachteten bei einer CASS-Anlage, einer SBR-Variante, selbst bei hohen hydraulischen Belastungen und niedrigen Abwassertemperaturen noch gute Ablaufwerte, auch bezüglich Ammonium. *Holm et al. [2000]* verweist auf die gute Reinigungsleistung der SBR-Kläranlage Bruchmühlen. Einen guten Überblick über die Entwicklungen im Bereich der SBR-Technik für Zwecke der weitergehenden Nährstoffelimination gibt auch *Keller [2005]*.

5.2 Reinigungsprozesse in der Abwassertechnik

Die Beschreibung der in der Abwassertechnik wichtigen biologischen (z. B. Nitrifikation und Denitrifikation, biologische Phosphorelimination) und chemische-physikalischen Abwasserreinigungsprozesse (z. B. chemisch-physikalische Phosphorelimination) würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Für Details wird auf die umfangreiche Fachliteratur verwiesen (z. B. *ATV [1997D], ATV [1997E], IWA [2001], Gujer [2002]*).

5.3 Überblick über die SBR-Verfahrensvarianten[9]

5.3.1 Das SBR-Prinzip

Das Prinzip des Sequencing Batch Reactor-Verfahrens beruht darauf, dass alle Schritte des Abwasserreinigungsprozesses in einem Reaktor in einer bestimmten zeitlichen Reihenfolge nacheinander ablaufen. Dabei wird das Rohabwasser dem Reaktor in der Regel diskontinuierlich zugeführt und das gereinigte Abwasser diskontinuierlich abgezogen. Der Zyklus des Reinigungsprozesses kann aus einer Vielzahl verschiedener Teilschritte fast beliebig gestaltet werden, sowohl in der Abfolge als auch in der Dauer der einzelnen Schritte, jedoch schränken die verfahrenstechnischen Randbedingungen und das angestrebte Reinigungsziel die Zahl sinnvoller Kombinationen stark ein. Einen typischen Zyklus zeigt Abbildung 5.1. Im übertragenen Sinne entspricht der SBR-Zyklus damit dem Typus eines Pfropfenstromreaktors, wenn man den Zyklusbeginn gleichsetzt mit der Einlaufzone bzw. das Ende der biologisch aktiven Phase im Zyklus mit dem Auslaufbereich gleichsetzt des Propfenstromreaktors.

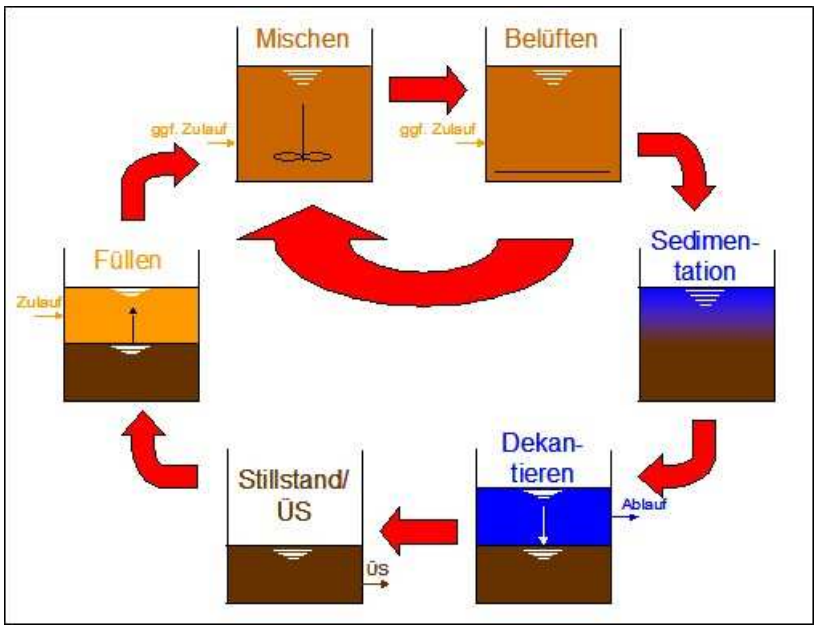


Abb. 5.1: Typischer Prozessphasenablauf in einem SBR-Zyklus (Bildquellen: Autor)

Ein SBR-Zyklus kann sich aus den folgenden Reinigungsschritten zusammensetzen:

- Statisches Füllen: Mit diesem Schritt beginnt in vielen Fällen der Zyklus. Der belebte Schlamm befindet sich im sedimentierten Zustand, Rührwerke und Belüftung sind ausgeschaltet. Während dieser Phase erfolgt eine Substratakkumulation und es wird ein Substratdruck aufgebaut. Ferner finden Phosphatrücklöseprozesse statt.
- Füllen und Mischen bzw. nur Mischen: Durch Einschalten des Rührwerks wird der sedimentierte belebte Schlamm aufgewirbelt und der Reaktorinhalt durchmischt. Im anoxischen und anaeroben Milieu finden Denitrifikations- und Phosphatrücklöseprozesse statt. Abbildung 5.2 verdeutlicht, dass während dieser Phase die Ammonium- und Phosphatkonzentrationen stark ansteigen, wohingegen die Nitratkonzentration stark abfällt.

[9] Die nachfolgenden Ausführungen stammen zum Teil aus *Wiese [2004]*, wurden jedoch ergänzt um Literatur seit 2005 sowie die Abschnitte 5.3.3 bis 5.3.5.

- Beschicken und Belüften bzw. nur Belüften: Durch die Einschaltung der Belüftung kommt es zu aeroben Abbauprozessen und zur Phosphateinlagerung in die Biomasse; besonders zu Beginn eines Zyklus können wegen der hohen Sauerstoffzehrung auch simultane Denitrifikationsprozesse auftreten. Abbildung 5.2 verdeutlicht dies: Der Anstieg der Nitratkonzentration zu Beginn der ersten belüfteten Phase fällt etwas geringer aus als der Rückgang der Ammoniumkonzentration, da ein Teil des gebildeten Nitrats simultan denitrifiziert wird, da die Sauerstoffkonzentration, obwohl ein zweites Gebläse zugeschaltet wurde, nicht signifkant ansteigt. Vor allem bei runden Reaktoren mit nicht-flächendeckender Belüftung kann es daher sinnvoll sein, einen Schritt *Belüften und Mischen* einzuführen, da mit Hilfe der Rührwerke der Sauerstoffeintrag verbessert werden kann. Im Beispiel aus Abbildung 5.2 wird kein Fällmittel zugegeben, sodass das Absinken der Phosphatkonzentration während der belüfteten Phase auf die biologische Phosphorelimination zurückzuführen ist.
- Sedimentation: Nach Abschluss der Reaktionsphase werden Belüftung und Rührwerke ausgeschaltet; es beginnt die Trennung des Belebtschlamms vom gereinigten Abwasser.
- Klarwasserabzug bzw. Dekantieren: Nach Ablauf einer gewissen Sedimentationsdauer kann mit dem Klarwasserabzug begonnen werden, d. h. der klare Überstand wird als gereinigtes Abwasser abgezogen. Dieser Teilschritt wird meist beim Erreichen eines definierten Wasserstands beendet.
- Überschussschlammabzug: Am Ende eines Zyklus bietet es sich an, den Überschussschlamm aus dem eingedickten Schlammbett abzuziehen; allerdings ist es prinzipiell möglich, den Überschussschlamm auch zu jedem anderen Zeitpunkt abzuziehen.
- Pause/Stillstand: Bei Anlagen mit mehreren Reaktoren und solchen ohne Vorlagebehälter kann es aus Synchronisationsgründen oder zur Sicherstellung der erforderlichen hydraulischen Kapazität erforderlich sein, Pausenzeiten in den Zyklus einzuführen.

Je nach dem erforderlichen Reinigungsziel und der Zyklusdauer kann es sinnvoll und ggf. zur Sicherstellung der erforderlichen hydraulischen Kapazität erforderlich sein, mehrmals innerhalb eines Zyklus den Reaktor zu beschicken bzw. mehrmals im Wechsel anaerobe, anoxische oder aerobe Milieubedingungen herzustellen. In Abbildung 5.2 ist ein Beispiel aufgeführt, bei dem eine zweite Beschickung erfolgte, um das zwischenzeitlich gebildete Nitrat wieder effektiv zu denitrifizieren. Der zweite Beschickungsschub ist aber nur gering, zumal der Vorlagebehälter (VLB) zu dieser Zeit kaum gefüllt war.

Die letzten vier Schritte werden oft als biologisch nicht aktive Phase angesehen, etwa bei der Bemessung nach dem *ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 131 [2000]* bzw. *ATV-Merkblatt M 210 [1997]* bzw. *DWA-Merkblatt M 210 [2009]*. Tatsächlich finden jedoch auch in dieser Zeit biologische Prozesse statt, wie etwa Denitrifikationsprozesse. Dies verdeutlicht auch Abbildung 5.2: Zwischen dem Abschalten der Gebläse gegen 14 Uhr und dem Beginn der Klarwasserabzugsphase (15:15 Uhr) geht die Nitratkonzentration um ca. 2 mg/l zurück.

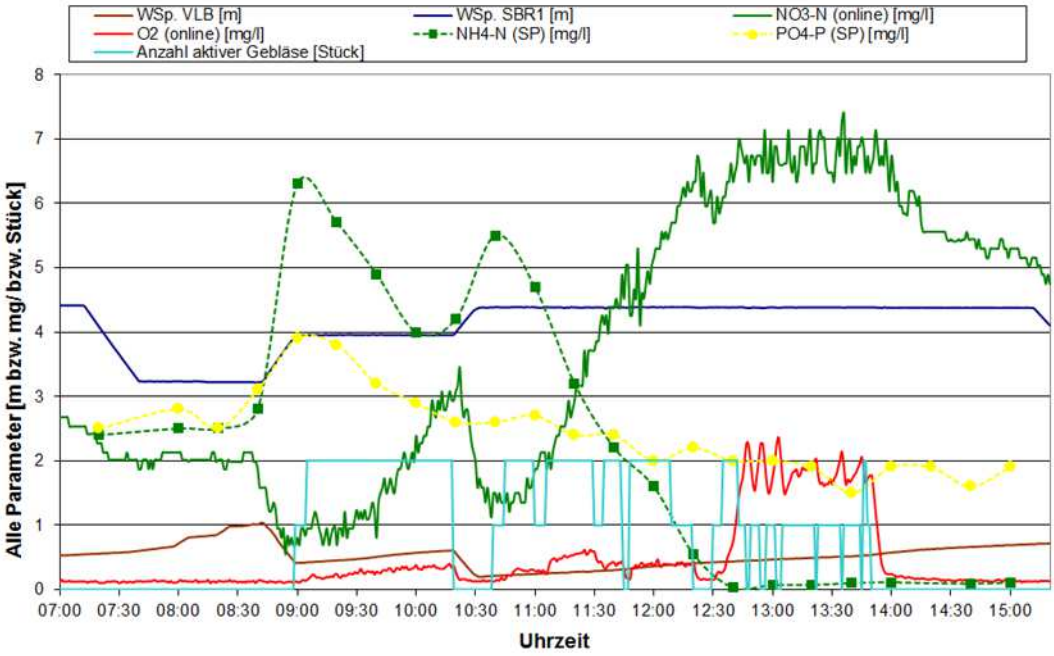


Abb. 5.2: Konzentrationsverlauf wichtiger Prozess- und Verschmutzungsparameter während eines 8-stündigen Trockenwetterzyklus mit einer Schrittkettensteuerung (Quelle: *Wiese [2004]*)

5.3.2 Grundverfahren

Aus dem klassischen SBR-Prinzip wurden bereits zahlreiche Verfahrensvarianten entwickelt. Die Gründe hierfür sind u. a.:

- Das SBR-Verfahren kann prinzipiell für nahezu alle Abwässer eingesetzt werden. Es ist sowohl für die Behandlung von kommunalem Abwasser aus Trenn- und Mischsystemen als auch für die Behandlung zahlreicher Industrieabwässer geeignet, jedoch müssen ggf. gewisse Anpassungen vorgenommen werden. So ist es im Falle von Mischkanalisationen von Vorteil, den SB-Reaktoren einen Mengenausgleich vorzuschalten, um den kontinuierlichen Zufluss, der zwischen den einzelnen diskontinuierlichen Beschickungsphasen die Kläranlage erreicht, zwischen zu speichern. Darüber hinaus bietet ein Vorspeicher auch im Trockenwetterbetrieb Vorteile, da er gestattet, den Reaktor schubweise zu beschicken und somit einen Substratdruck zu erzeugen.
- In einigen Ländern sind sehr weitreichende Patente auf gewisse verfahrenstechnische Anlagenkonfigurationen, Beschickungsstrategien etc. möglich. Dies hat wie in anderen Industriezweigen auch dazu geführt, dass Anbieter von SBR-Anlagen nicht nur aus Optimierungsgründen Modifikationen vorgenommen haben, sondern in Einzelfällen auch, um bestehende Patente zu umgehen.

Die verschiedenen SBR-Varianten lassen sich im Wesentlichen in vier Grundformen einordnen, die in Abbildung 5.3 dargestellt sind. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde bei jeder Prinzipskizze nur jeweils ein bis zwei Reaktoren dargestellt; grundsätzlich kann eine SBR-Anlage aber aus einer nahezu beliebigen Anzahl von Reaktoren bestehen. Das ursprünglich von *Irvine und Davis [1971]* als SBR-Verfahren bezeichnete System (Abbildung 5.3, oben links) beruht auf dem Prinzip, dass ein Reaktor so lange beschickt wird, bis ein bestimmtes

Kriterium erfüllt ist, etwa das Erreichen des maximalen Wasserspiegels. Anschließend beginnt die Befüllung des nächsten Reaktors. Wegen des fehlenden Vorlagebehälters müssen in den Zyklus ausreichend Pausenzeiten eingebaut werden, um Zuflussschwankungen auszugleichen. Alternativ können auch mehrere SBR-Reaktoren parallel betrieben werden, sodass auch hierdurch eine kontinuierliche Beschickung möglich ist:

- So berichtet *Keller [2005]* über eine SBR-Anlage in Irland mit einem maximalen Tageszufluss von 950.000 m^3/d: Aus Platzgründen wurden hier die 24 quadratischen SB-Reaktoren in zwei Stockwerken mit je 12 Reaktoren übereinander angeordnet.
- *Demoulin [2008]* berichtet über eine SBR-Anlage in Malaysia mit 12 SB-Reaktoren zur Behandlung von 1,2 Mio. EW bzw. 583.000 m^3/d Spitzenzufluss.

Die oben rechts dargestellte Modifikation unterscheidet sich vom Grundprinzip dadurch, dass den SB-Reaktoren ein Vorlagebehälter vorgeschaltet ist, der das Verfahren sehr viel flexibler macht, da es u. a. eine stoßartige Beschickung der Reaktoren ermöglicht. In Deutschland ist dieses Prinzip weit verbreitet, nicht zuletzt wegen der Dominanz der Mischkanalisation, da hier der Vorlagebehälter ökonomische und betriebliche Vorteile bietet. Bei den beiden in der unteren Hälfte abgebildeten Verfahren handelt es sich um Sonderformen, die vor allem dann zum Einsatz kommen, wenn große Abwassermengen behandelt werden müssen. So arbeitet etwa die größte SBR-Kläranlage Deutschlands, die KA Neubrandenburg (140.000 EW) nach dem CAST-Prinzip. Dieses Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass es über ein separates Becken verfügt, das als Selektor fungiert. Aus dem eigentlichen SBR wird Schlamm in den Selektor zurückgeführt. Während der Sedimentations- und Dekantierphase wird der Zufluss unterbrochen. Beim letzten Verfahrenstyp (unten rechts) erfolgt nur der Abzug des gereinigten Abwassers diskontinuierlich, der Zufluss hingegen kontinuierlich. Um Kurzschlussströmungen während der Dekantierphase und damit eine Beeinträchtigung der Ablaufwerte zu verhindern, ist der Zulaufbereich durch eine Trennwand vom übrigen Reaktorbereich abgetrennt.

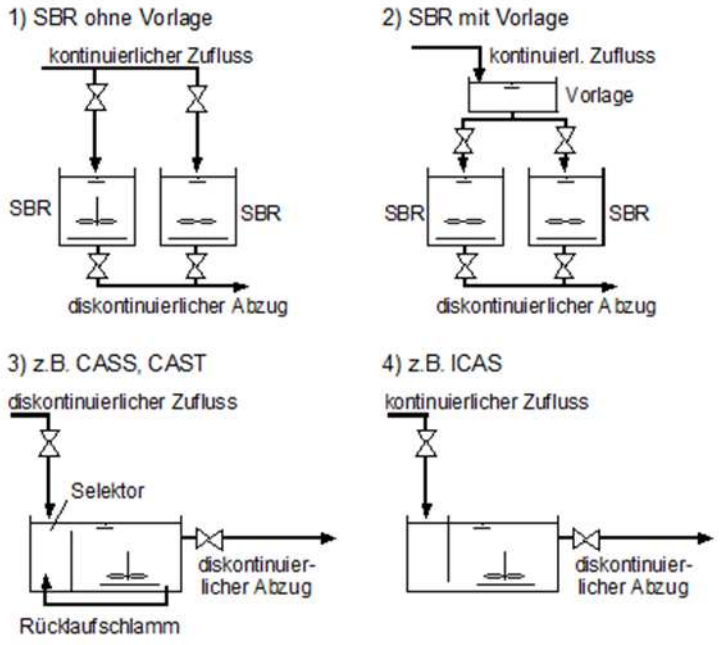


Abb. 5.3: Grundprinzip verschiedener SBR-Verfahren (nach *IWA [2001]*)

Wegen der Ähnlichkeit der verschiedenen Verfahren ist es in Einzelfällen möglich, mit vertretbarem Aufwand von einem Verfahren zum anderen zu wechseln:

- *Irvine und Irvine [2008]* berichten über die Umrüstung einer ICEAS-Kläranlage (Intermittent Cycle Extended Aeration System) mit einem Zufluss von 77.000 m^3/d und vier Becken mit einem Gesamtbeckenvolumen von 32.264 m^3; dabei wurden die Becken in einem 4,8 h Trockenwetterzyklus und einem 3,6 h Regenwetterzyklus betrieben, wobei das vorhandene Austauschvolumen (f_A) oft nicht erreicht wurde, da die Füllung der Becken zeitbasiert erfolgte. Die Kläranlage musste modernisiert werden, um die Überwachungswert im Ablauf von 10 mg/l N_{ges} angesichts gestiegener Zulaufbelastung sicher einhalten zu können; weiterhin kam es während der Dekantierphase zu Schlammabtrieb. Die Autoren wählten zur Lösung des Problems den folgenden Ansatz: Die ICEAS-Anlage wurde zu einer klassischen SBR-Anlage umgerüstet, was aufgrund der engen Artverwandschaft der beiden Verfahren im Wesentlichen durch eine Umstellung der Software in der Anlagensteuerung erreicht werden konnte. Im 2. Schritt wurde die Belüftung derart modernisiert, dass nicht nur zwei, sondern alle vier Becken gleichzeitig belüftet werden konnten. Im letzten Schritt wurde dann die gesamte Automatisierung überarbeitet und die Becken mit einer füllstandsbasierten Steuerung mit einer hinterlegten Zeitsteuerung ausgestattet, d. h. eine Umkehr des ursprünglichen Prinzips. Durch diese Maßnahmen konnten die N_{ges}-Ablaufwerte im Jahresmittel von 12,3 auf 6,9 mg/l reduziert werden.
- *Dror-Ehre et al. [2008]* berichten über die Umnutzung eines ehemaligen belüfteten Teichs als Speicher- und Ausgleichsbecken für eine überlastete, 3-straßige SBR-Kläranlage. Durch das vorgeschaltete Becken konnte sowohl ein stofflicher als auch ein hydraulischer Ausgleich erzielt werden.

5.3.3 Sonderverfahren

Weiterhin wurden im Laufe der Zeit einige Sonderverfahren entwickelt, die unter anderem auf Biofilmprozessen oder Granularschlamm aufbauen (Auswahl):

Iaconi et al. [2008] berichten über die Erprobung einer halbtechnischen SBBGR-Kläranlage auf Basis eines aeroben Granularbiofilters (Sequencing Batch Biofilm Granular Reactor). Durch diese Kombination können sehr hohe TS-Konzentrationen im Reaktor gefahren werden, die bis zu 35 kg TS/m^3 betragen können, sodass derartige Anlagen sehr platzsparend konstruiert werden können. Bereits bei kurzen hydraulischen Verweildauer (z. B. 4 Stunden) können damit hohe Kohlenstoffabbauleistungen und Nitrifikationsleistungen von bis zu 90 % beobachtet werden. Die Anlage wurde mit Hilfe kontinuierlicher online-Messungen für pH, Sauerstoff, NH_4-N und NO_3-N überwacht.

Zhou et al. [2008] berichten über eine Laboranlage, die aus einer Kombination von einem SB-Reaktor mit aeroben Granularschlamm und einem aeroben SBB-Reaktor (Sequencing Batch Biofilm) besteht: Die Anlage wurde konzipiert, um Abwässer aus Schlachtereien zu behandeln. Die Stickstoffelimination lag bei 81 % und die Phosphorelimination bei 94 %. Auch *Liu [2008]* berichtet über die Anwendung von aeroben Granularschlamms in Sequencing Batch-Reaktoren.

Da diese Verfahren nur in Einzelfällen Anwendung finden und zudem oft nur im labor- oder halbtechnischen Maßstab umgesetzt werden, soll an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen werden.

5.3.4 Behandlung von hochbelasteten Abwässern

Verschiedene Autoren haben auch die Nutzungsmöglichkeiten von SBR-Anlagen zur Behandlung hochbelasteter Abwässer aus der Schlammbehandlung, aus Biogasanlagen sowie aus Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft untersucht (Beispiele):

Celis et al. [2006] berichten über Versuche zum Abbau von landwirtschaftlichen Herbiziden mit dem SBR-Verfahren. Dabei kamen zwei Laboranlagen (2 l Volumen) zum Einsatz, wobei ein Reaktor im aeroben (22 °C) und der andere unter anaeroben Bedingungen (30 °C) betrieben wurde. Die hydraulische Aufenthaltszeit wurde mit 48 Stunden gewählt und Glucose als externe Kohlenstoffquelle eingesetzt. Während bezüglich Isoproturon kein Abbau beobachtet werden konnte, waren die Abbauleistungen bezüglich 2,4-Dichlorophenoxyacetic (2,4-D) beachtlich. Bis zu einer Konzentration von 500 mg/l 2,4-D konnte beim aeroben SBR ein vollständiger Abbau beobachtet werden; die Grenze beim anaeroben Reaktor lag bei 120 mg/l 2,4-D.

Figueroa et al. [2008] berichten über Versuche mit einem SB-Reaktor im Labormaßstab (1,5 l Volumen) zur Behandlung von stark salzhaltigen (30 g/l NaCl) Abwässern aus einer Fischkonservenfabrik. Zunächst wurde über einen Zeitraum von 75 Tagen aerober Granularbelebtschlamm gezüchtet, der mit einem Schlammindex von 30 ml/g sehr gute Schlammabsetzeigenschaften aufwies. Anschließend wurde der Reaktor mit einer Raumbelastung von 1,72 kg CSB/(m^3·d) bzw. 0,18 kg N_{ges}/(m^3·d) betrieben. Die Autoren konnten trotz des schwierigen Abwassers einen nahezu vollständigen Abbau der Kohlenstoffverbindungen beobachten und immerhin noch eine Stickstoffelimination von 40 %. *Figueroa et al. [2011]* berichten über die Erprobung eines SB-Laborreaktors (1,5 l Volumen) für die Behandlung von Schweinegülle. Der SB-Reaktor wurde dabei mit aeroben Granular betrieben. Bezüglich des CSB und N_{ges} beobachteten die Autoren eine Abbauleistung von 87 % bzw. 70 %.

Galí et al. [2005A] berichten über Versuche mit zwei SB-Laborreaktoren (je 3 l Volumen) zur Behandlung der stark ammoniumhaltigen Abwässer (800 bis 900 mg/l NH_4-N) aus der Klärschlammbehandlung einer spanischen Kläranlage. Die Autoren identifizierten optimale Betriebsbedingungen bei 32 Grad Celsius, einem 8 h-Zyklusmodus, einem Schlammalter von 11 Tagen, einer hydraulischen Verweildauer von einem Tag, einer Belebtschlammmenge von 2,5 kg/m^3 oTS und einer Sauerstoffkonzentration von weniger als 1 mg/l O_2, um den Denitrifikationsprozess weitgehend über Nitrit zu betreiben. *Galí et al. [2005B]* verglichen ferner die Leistungsfähigkeit einer SBR-Laboranlage (3 l Volumen) und zweier kontinuierlicher SHARON-Reaktoren (je 4 l Volumen) zur Behandlung der Abwässer aus der Schlammbehandlung. Dabei beobachteten die Autoren bei der SBR-Anlage eine Stickstoffelimination von 0,8 kg N_{ges}/(m^3·d), während beim SHARON-Reaktor nur 0,4 kg N_{ges}/(m^3·d) festgestellt werden konnten. Schließlich berichten *Galí et al. [2008]* über Versuche mit SBR-Laboranlagen (4 l Volumen) in denen Versuche zur Behandlung verschiedener stark ammoniumhaltigen Abwässern durchgeführt wurden. Untersucht wurden dabei Deponiesickerabwässer und Abwässer aus der Schlammbehandlung, der Vergärung von Schweinegülle sowie der Vergärung der organischen Fraktion kommunaler Abfälle, wobei in den Reaktoren eine Belastung zwischen 0,3 und 0,85 kg N_{ges}/(m^3·d) eingestellt wurden und gezielt versucht wurde, die Nitrifikation und Denitrifikation bereits über den Zwischenschritt der Nitritation zu erzielen. Als online-Messtechnik kam Temperatur, Sauerstoffgehalt und pH-Wert zum Einsatz. Die Autoren stellten fest, dass das SBR-Verfahren geeignet ist, derartige Abwässer zu behandeln,

dass nach Möglichkeit aber der pH-Wert und der Sauerstoffgehalt in einem engen Bereich geregelt werden sollte, um ein Optimum zu erreichen.

He et al. [2006] führten Vergleiche zwischen einem konventionellen SB-Reaktor und einem SB-Reaktor durch, dem Zeolithpulver zugegeben wurde. Die Autoren konnten beobachten, dass durch eine Zeolithzugabe die Stickstoffeliminationsleistung durch NH_4-N-Adsorption gesteigert und die Schlammabsetzeigenschaften deutlich verbessert werden konnten. Weiterhin konnte durch den Zeolitheinsatz die Durchsatzleistung um 22 % gesteigert werden.

Hsieh et al. [2008] berichten über den Einsatz des SBR-Verfahrens zur Behandlung von Abwässern aus der Produktion von TFT-LCD-Displays für Computer und Flachbildfernseher. Ziel war es dabei, das bei der Produktion anfallende Tetra-Methyl Ammonium Hydroxide biologisch abzubauen, wobei der SBR-Laboranlage versuchsweise auch eine Ozonierung vorgeschaltet wurde.

Macé et al. [2005] untersuchten mit Hilfe von Laboranlagen (3 l Volumen) den Einsatz der SBR-Technologie für die Behandlung von Abwässern aus einer anaeroben Anlagen zur Behandlung von organischen Siedlungsabfällen. Aufgrund des Fehlens leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen wurde eine externe Kohlenstoffquelle zugegeben. Bei der Betriebsweise wurden zwei verschiedene Strategien erprobt. Die Strategie 1 umfasste einen Betrieb bei 30 Grad Celsius, einem Schlammalter von 12 Tagen, einer hydraulischen Verweildauer von 3 Tagen sowie einer pH-Wert-Regulierung (7,4 – 8,6) mit Hilfe der Dosierung von $NaHCO_3$. Die Sauerstoffzufuhr wurde auf ein Minimum reduziert, um den Denitrifikationsprozess bevorzugt über Nitrit zu steuern. Bei der Strategie 2 wurde auf die Dosierung von $NaHCO_3$ verzichtet, jedoch wurde mit einer intermittierenden Denitrifikation (d. h. mehreren Schüben) gearbeitet, um den pH-Wert stabil zu halten. Die Strategie 2 wurde dabei von den Autoren als effektiv eingestuft, da bis zu 360 mg NH_4-N/(l·d) abgebaut werden konnten.

Moreno-Andrade et al. [2008] berichten über die Ergebnisse bei einem Vergleichsversuch mit einer klassischen und einer modifizierten SBR-Kläranlage, welche mit einer Membran ausgerüstet war. Bei beiden Anlagen handelt es sich um Laboranlagen mit 6 l Volumen und einem Austauschvolumen von 33 %. Der Sinn der Membran-Installation wird darin gesehen, dass man auf die Sedimentationsphase verzichten kann und einen vollständigen Schlammrückhalt hat. Die beiden Anlagen wurden getestet, um synthetisches Abwasser mit 4-Chlorphenol zu reinigen, einem Zwischenprodukt in der Arzneimittel- und Farbstoffproduktion. Die Autoren kommen zu der Erkenntnis, dass beide Verfahrensvarianten bezogen auf 4-Chlorphenol vergleichbar gute Reinigungsleistungen (> 99 %) zeigen. Interessant ist, dass die Biozönosen in beiden Systemen – obwohl das gleiche Inokulum verwendet wurde – deutliche Unterschiede aufwiesen.

Murat et al. [2005] berichten über den Einsatz eines halbtechnischen SB-Reaktors (844 l Volumen) zur Behandlung von Gerbereiabwasser, wobei die Stickstoffelimination im Vordergrund stand: Dabei wurde mit Abwassertemperaturen zwischen 7 und 30 Grad Celsius sowie Schlammaltern zwischen 5 und 28 Tagen experimentiert. Die Ergebnisse wurden genutzt, um zum einen ein Computermodell zu kalibrieren als auch die Reinigungsleistung auf Basis der Stöchiometrie und von Massenbilanzen zu bewerten.

Rey et al. [2008] führten Laborversuche (2 l SBR) durch, um schwerabbaubare Abwässer (1.700 bis 2.630 mg/l CSB und 345 bis 580 mg/l TKN) aus einem Harz-produzierenden Fabrik zu behandeln, wobei auch mit einer Teilstromozonierung experimentiert wurde.

Thanikal et al. [2008] berichten über die Ergebnisse von Schlammanalysen von sechs großtechnischen SBR-Kläranlagen zur Behandlung der Abwässer aus Käsereien.

Tomei und Annesini [2008] untersuchten den Einsatz einer SBR-Laboranlage (5 l) zum biologischen Abbau von 4-Nitrophenol, ein Zwischenprodukt bei der Herstellung des Schmerzmittels Paracetamol und ein Ausgangsstoff für Fungizide. Bei dieser Laboranlage wurden pH und Sauerstoff online gemessen und die Beschickung, der Überschussschlammabzug, der Klarwasserabzug und eine Säure-/Base-Zugabe zur pH-Wert-Regulierung erfolgt über Peristaltikpumpen, die Luftzugabe erfolgt variabel. Die Zyklusdauer und Steuerung/Regelung wurde durch eine in Labview programmierte Software übernommen. Die Autoren führen aus, dass die gewählte Vorgehensweise zielführend ist, um 4-Nitrophenol effektiv abzubauen. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden zudem für ein Simulationsmodell eingesetzt, um den Prozess weiter zu optimieren.

5.3.5 Anaerobverfahren

Mittlerweile werden SBR-Anlagen bzw. daraus abgeleitete Verfahrensvarianten zum Teil auch zur anaeroben Behandlung von gewerblich-industriellen Abwässern eingesetzt. In der Literatur finden sich hierzu zahlreiche Quellen (Auswahl):

Alvarez et al. [2007] berichten über Ergebnisse der Behandlung von Destillerieabwässern in einer halbtechnischen, anaeroben SBR-Anlage. Da diese Abwässer sehr stark verschmutzt, aber auch sehr energiehaltig sind und noch im warmen Zustand aus der Produktion kommen, bot sich ein anaerober Reinigungsprozess an. Mit dieser Form der anaeroben Vorbehandlung konnte eine CSB-Abbauleistung von 90 % erreicht werden.

Amin et al. [2007] testeten mit einer Laboranlage die Einsatzmöglichkeit eines anaeroben Sequencing Batch-Reaktors zur Behandlung von petrochemischen Abwässern. Bei einer hydraulischen Verweildauer von 25 Tagen und einer Raumbelastung von 3,2 kg CSB/(m^3·d) wurden zum Teil sehr hohe Abbauraten von mehr als 95 % beobachtet.

Donoso et al. [2007] verwendeten einen anaeroben Sequencing Batch Reaktor im Labormaßstab (4 l) zur Behandlung synthetischen häuslichen Abwassers. Bei Raumbelastungen zwischen 0,4 bis 0,8 kg CSB/(m^3·d) beobachteten die Autoren Abbauleistungen zwischen 50 und 60 %; bei einer Steigerung auf 1,2 kg CSB/(m^3·d) ging die Abbauleistung jedoch stark zurück (20 - 30 %). Die Daten wurden zudem verwendet, um ein einfaches Modell zur Simulation dieser Anlage zu erstellen.

Bergamo et al. [2007] untersuchten den Einfluss der Temperatur bei verschiedenen Belastungen auf die Reinigungsleistungen einer anaeroben SBR-Laboranlage (1,8 l). Der Reaktor wurde im 6 h-Zyklus mit einer Temperatur von 15, 20, 25 und 30 °C bzw. bei Zulaufkonzentrationen von 500 und 1000 mg/l CSB getestet. Der Reaktor lief stets stabil und erreichte bei den verschiedenen Lastfällen eine Abbauleistung zwischen 79 und 86 %.

Martinez-Sosa et al. [2007] berichten über eine anaerobe SBR-Kläranlage, die konzipiert wurde, um fetthaltige Flotate aus einer Schweinefleisch verarbeitenden Fabrik zu behandeln.

Der Anaerobreaktor war in der Lage das Flotatfett zu 96 % abzubauen und dabei erhebliche Mengen Methan zu produzieren.

Bouallagui et al. [2008] untersuchten die Vergärung von Fischabfällen, Schlachthausabwässern, Klärschlamm sowie Frucht- und Gemüseabfällen in vier mesophilen, anaeroben Labor-SBR-Anlagen (2 l) mit einer hydraulischen Verweildauer von 10 Tagen und 2,5 kg oTS/($m^3 \cdot d$).

5.4 Systemanalyse der SBR-Technik[10]

5.4.1 Vorteile

Die Vorteile der SBR-Technik können wie folgt zusammengefasst werden:

- Alle Phasen des Reinigungsprozesses finden in einem Becken in einer bestimmten zeitlichen Abfolge statt. Mit Hilfe moderner Mess- und Automationstechnik ist es daher möglich, die Zyklusdauer, die Dauer der einzelnen Schritte und andere Größen (z. B. Austauschvolumen) den jeweiligen Gegebenheiten (z. B. unterschiedlichen Abwasserzuflüssen und -beschaffenheiten) anzupassen.
- Durch den Einsatz von online-Qualitätsmessungen in den Reaktoren ist es möglich, die Dauer eines Teilschrittes so zu variieren, dass das Reinigungsziel sicher erreicht wird. Diese hohe Flexibilität kann ein wesentlicher Vorteil gegenüber Durchlaufanlagen bei Abwassereinleitungen in ein leistungsschwaches Gewässer sein.
- Bei Anlagen mit mehreren Reaktoren können in belastungsschwachen Zeiten ein Reaktor oder ggf. auch mehrere Reaktoren außer Betrieb genommen werden. Erfahrungen mit der Kläranlage Nürburgring (z. B. *Siekmann et al. [1999]*) belegen, dass ein SBR auch eine längere Stillstandsperiode verkraften kann, sofern das Belebtschlammgemisch regelmäßig belüftet wird.
- Kurzschlussströmungen, wie sie in Durchlaufanlagen wegen zu schwacher Rührwerke, ungünstig gestalteter Ein- und Auslaufbauwerke o. ä. auftreten können, sind bei SBR-Varianten mit einem diskontinuierlichen Zufluss nicht möglich.
- Ein weiterer Vorteil des SBR-Verfahrens ist, dass die Trennung des belebten Schlamms vom gereinigten Abwasser unter nahezu idealen hydraulischen Bedingungen stattfinden kann, da während der Sedimentation und dem Klarwasserabzug kein Zufluss erfolgt und damit keine störenden Turbulenzen auftreten. Auch bei Mischwasserzufluss können daher sehr niedrige Feststoffkonzentrationen im Ablauf erzielt werden. So stellten *Kazmi und Furumai [2000]* auch bei sehr ungünstigen Schlammindizes von bis zu 350 ml/g keine Erhöhung der abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf fest.
- Sollte es bei einem SBR dennoch einmal infolge ungünstiger Schlammabsetzeigenschaften zu einer Erhöhung der Feststoffkonzentration im Ablauf kommen, kann die Sedimentations- und Dekantierdauer verlängert werden; dies geht jedoch zu Lasten der biologisch aktiven Phase. Faktisch entspricht eine Verlängerung dieser beiden Teilschritte damit einer Vergrößerung des Nachklärbeckenvolumens zu Ungunsten des Belebungsbecken-

[10] Die nachfolgenden Ausführungen stammen überwiegend aus *Wiese [2004]* und *Simon et al. [2006]*.

volumens. Die starren Beckenvolumina bei Durchlaufanlagen gestatten eine solche Anpassung nicht. Bei Verwendung von Trübungs- oder TS-Sonden zur Kontrolle des Klarwasserabzugs lässt sich dieser bei Gefahr eines Schlammabtriebs zeitweise unterbrechen.

- Da keine Schlammverlagerung auftreten kann, steht außerdem die gesamte Biomasse während der reaktiven Phasen für Reinigungszwecke zur Verfügung. Hieraus resultiert ein weiterer Vorteil: Auch bei Mischwasserzufluss steht die gesamte Biomasse wieder für Reinigungszwecke zur Verfügung, sobald die Rührwerke und/oder die Belüftung zu Beginn eines neuen Zyklus wieder angeschaltet werden. Bei Durchlaufkläranlagen hingegen wird der Belebtschlamm bei einem Zuflussanstieg in das Nachklärbecken verdrängt und muss von dort aus wieder in die Belebung zurückgefördert werden; bei manchen Durchlaufkläranlagen kann es deutlich mehr als ein Tag dauern, bis die TS-Konzentration im Belebungsbecken wieder so hoch ist wie vor Beginn des Regenereignisses. Bei Durchlaufkläranlagen mit hohen Belastungsspitzen zu Beginn (z. B. Spülstoß) oder am Ende eines Niederschlagsereignisses (z. B. durch die Entleerung der Regenüberlaufbecken) kann dies zur Verschlechterung der Reinigungsleistung führen.
- *Kazmi und Furumai [2000]* beobachteten bei ihren Untersuchungen während der Sedimentation noch eine deutliche Denitrifikationsleistung von bis zu 30 % der Stickstoffzulauffracht, die zwar bei Mischwasser rückläufig war, immerhin aber noch 15 % betrug. Zu ähnlichen Erkenntnissen kam auch *Wiese [2004]*.
- Viele SBR-Kläranlagen werden innerhalb kurzer Zeit stoßartig mit Abwasser beschickt, wodurch ein Substratdruck erzeugt wird. In diesen Fällen wechseln sich in einem Zyklus Phasen hoher und niedriger Substratverfügbarkeit ab. Gemäß *IWA [2001]* ist dies einer der Gründe dafür, dass solche Anlagen weniger sensibel auf Stoßbelastungen reagieren, wie sie beispielsweise von Spülstoßereignissen bei Mischwasser oder durch die Entleerung eines Regenbeckens hervorgerufen werden können.
- Ferner sind viele SBR-Anlagen mit Vorlage- bzw. Pufferbehältern ausgestattet, die stoffliche und hydraulische Belastungsspitzen – je nach Größe – mehr oder weniger gut abpuffern können. Dies kann besonders bei kleinen Kläranlagen von Vorteil sein, da hier die stofflichen und hydraulischen Belastungsschwankungen sowohl bei Trocken- als auch bei Regenwetter stärker ausgeprägt sein können als bei größeren Anlagen.
- Als weitere positive Folge des Substratdrucks kann die Unterdrückung eines exzessiven Wachstums bestimmter fadenbildender Bakterien angesehen werden (*IWA [2001]*). Folglich sind die Schlammabsetzeigenschaften in einem SBR mit stoßartiger Beschickung in aller Regel gut, oft sogar besser als in vergleichbaren Durchlaufkläranlagen.
- *Morling [2008]* berichtet über die Ergebnisse von SBR-Anlagen in Dänemark und Schweden zwischen 11.000 und 45.000 EW, die zwischen 5 und 17 Jahren in Betrieb waren. Der Autor konzentrierte sich auf eine Bewertung der Reinigungsleistung unter den winterlichen Bedingungen Skandinaviens, d. h. mit Abwassertemperaturen zwischen 5 und 8 °C im Kläranlagenzulauf. Die Praxis zeigt, dass die Reinigungsleistung – insbesondere die Stickstoffelimination – bei niedrigen Temperaturen stark einbricht, sodass zum Beispiel auch in Deutschland die N_{ges}- und NH_4-N-Ablaufgrenzwerte in der Regel nur bei Abwassertemperaturen von über 12 °C eingehalten werden müssen. Der Autor beobachtete bei drei der vier Anlagen auch bei sehr niedrigen Abwassertemperaturen eine gute bis sehr gute Stickstoffelimination, die zum Teil nur geringfügig schlechter war als im Sommer. Auch die

biologische Phosphorelimination lief in der Regel stabil, sodass auch im Winter die Zugabe chemischer Fällmittel auf ein Minimum reduziert werden konnten.

- Im Normalbetrieb läuft der gesamte Reinigungsprozess in einer SBR-Anlage wegen des hohen Automatisierungsgrades selbsttätig ab, wodurch das Betriebspersonal entlastet wird; allerdings gilt dies heute auch für die meisten anderen Reinigungsverfahren.
- Die verfahrenstechnischen Randbedingungen lassen sich auch dann vorteilhaft nutzen, wenn es um die Plausibilitätskontrolle von Messgeräten geht (z. B. Durchfluss vs. Volumenänderung pro Zeit).
- Wegen der Randbedingungen der SBR-Technik können die einzelnen Teilsysteme (z. B. Reaktoren, Vorlagebehälter) modulartig gefertigt und zusammengesetzt werden, weshalb sich SBR-Anlagen oft einfacher erbauen und erweitern lassen.
- Einige Firmen verkaufen weitgehend standardisierte SBR-Anlagen (z. B. Standarddurchmesser bei den Behältern, relativ einheitliche maschinen- und elektrotechnische Ausstattung), die nur an die Randbedingungen eines neuen Projektes angepasst werden müssen. Hierdurch steigen zudem die Chancen, dass einmal entwickelte Mess- und Automationskonzepte sich relativ einfach auf andere ähnliche SBR-Anlagen übertragen lassen bzw. Synergieeffekte genutzt werden können. Aus dem Umstand, dass bei SBR-Anlagen eine Rezirkulation von nitratreichem Abwasser bzw. des belebten Schlamms nicht erforderlich ist, ergeben sich weitere Investitionsvorteile. Alles dies sind Gründe dafür, dass in den letzten Jahren bei Ausschreibungen SBR-Anlagen – nach Erfahrung des Autors – oft deutlich günstiger angeboten werden als Durchlaufanlagen und deshalb nun vermehrt gebaut werden.
- Ein weiterer Vorteil der modulartigen Bauweise ist, dass sich daraus in vielen Fällen Reserven ergeben können, da diese Module (z. B. Klarwasserabzugseinrichtungen) meist innerhalb eines gewissen Anwendungsspektrums eingesetzt werden können.
- Erfahrungen zeigen, dass SBR-Anlagen oft über ein hohes Optimierungspotenzial verfügen, da Reserven nicht voll ausgeschöpft werden. Dies belegen auch einige SBR-Anlagen, die laut Bemessung eigentlich überlastet sind, aber dennoch gute Reinigungsleistungen erzielen (z. B. *Holm et al. [2000]*, *Steinmetz [2001]*). Diese oft hohen Reserven sind zum einen eine Folge der in Deutschland üblichen statischen Bemessungsansätze und daraus resultierender „Angstzuschläge“, zum anderen ergeben sie sich aber auch aus einer nicht-adäquaten Berücksichtigung der verfahrensbedingten Vorteile.
- Aus dem SBR-Prinzip resultiert ferner, dass sich diese Reserven wegen der weitgehenden Entkopplung der Reaktoren und Ausgleichsbehälter leichter abschätzen und bilanzieren lassen als bei Durchlaufanlagen mit den zahlreichen unterschiedlichen Reaktionsräumen und Leitungen. Dies ist dann hilfreich, wenn der Kläranlagenzufluss über das Normalmaß hinaus erhöht werden soll.

Alle diese Faktoren sprechen dafür, dass das SBR-Verfahren grundsätzlich auch zur erhöhten Mischwasserbehandlung geeignet ist; dies verdeutlichen auch die Erkenntnisse aus der großtechnischen Erprobung durch *Wiese [2005]* (siehe auch Kapitel 7).

5.4.2 Nachteile

Die Nachteile der SBR-Technik können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der Handbetrieb einer SBR-Kläranlage, der im Einzelfall erforderlich sein kann, stellt an das Betriebspersonal höhere Ansprüche als bei vergleichbaren Durchlaufanlagen, besonders wenn mehrere Reaktoren vorhanden sind und hohe Anforderungen an die Reinigungsleistung gestellt werden.
- Ferner kann beobachtet werden, dass das Betriebspersonal von neuen SBR-Anlagen, welches meist zuvor keine Erfahrung mit dieser Technologie sammeln konnte und bis dahin oft auch nur auf relativ einfachen Abwasseranlagen (Tropfkörperanlagen, Abwasserteichen o. ä.) gearbeitet hat, vereinzelt Schwierigkeiten hat, das neue Verfahren im Detail zu verstehen und sich an die veränderten Bedingungen anzupassen (*Schreff [2001]*). Dies gilt vor allem, wenn keine intensive Schulung auf die neue Technologie stattgefunden hat und sich in der Nähe keine weiteren SBR-Anlagen befinden, wodurch der Erfahrungsaustausch erschwert wird. Allerdings muss einschränkend angemerkt werden, dass ähnliche Probleme auch beim Wechsel von einfachen Anlagen auf moderne Durchlaufanlagen auftreten können.
- Wichtige Komponenten von SBR-Anlagen (z. B. Klarwasserabzugseinrichtungen) müssen hohen Ansprüchen an Funktionstüchtigkeit, Flexibilität und Zuverlässigkeit genügen. In vielen Fällen, in denen SBR-Anlagen die in sie gesetzten Hoffnungen nicht erfüllen konnten, ist die Ursache nicht nur auf Planungsfehler, sondern auch auf eine mangelhafte maschinen- und elektrotechnische Ausstattung zurückzuführen (*IWA [2001]*). Auf eine sorgfältige Auswahl der entsprechenden Ausrüstung ist daher besonderer Wert zu legen; dieser Grundsatz sollte allerdings auch bei Durchlaufanlagen gelten.
- Aus der Entkoppelung des Reinigungsprozesses von der hydraulischen Zuflusssituation ergeben sich keineswegs nur Vorteile: Wegen des Kontinuitätsprinzips ist die Zuflusserhöhung bei Durchlaufanlagen, wenn die sonstigen Randbedingungen (z. B. ausreichende Pumpenleistung, leistungsfähige Nachklärung) erfüllt sind, vom Prinzip her relativ problemlos; eine Erhöhung der Zuflussmenge führt zwangsläufig auch zu einer zeitnahen Erhöhung der Ablaufmenge. Zwischenspeicher o. ä. sind nicht erforderlich. Anders sieht dies bei SBR-Anlagen aus, denn eine Zuflusserhöhung führt nicht unmittelbar zu einer Erhöhung der Ablaufmenge. Es muss also ausreichend freies Volumen in dem Vorlagebehälter und den Reaktoren vorhanden sein, um hydraulische Spitzen zu bewältigen.
- Bei mehreren Reaktoren wird man wegen verschiedener Zwangspunkte (z. B. Anzahl der Belüftungsaggregate) zudem um eine Mindestsynchronisation der einzelnen Reaktoren nicht umhinkommen. Dieser Umstand muss bei der Optimierung beachtet werden.
- Wegen der verfahrensspezifischen Randbedingungen der SBR-Technik ist in aller Regel der Aufwand für die Belüftungseinrichtung höher als bei Durchlaufanlagen, da sich aus der intermittierenden Verfahrensweise und der stoßartigen Beschickung eine höhere Anfangszehrung ergibt und die Belüftung nur während eines Teils des Zyklus erfolgt. Hinzu kommt, dass viele SBR-Anlagen ein Zwischenpumpwerk benötigen.
- Wegen des Diskontinuitätsprinzips werden auch die Reaktoren nicht kontinuierlich entleert. In vielen Fällen wird deshalb von den Aufsichtsbehörden der Bau eines Ausgleichsbeckens gefordert, um den Kläranlagenablauf zu vergleichmäßigen und hydraulische Spitzen zu kappen. Bei SBR-Anlagen mit mehr als drei Reaktoren kann in der Regel auf einen

Mengenausgleich verzichtet werden, da bei Zyklusdauern von 6 bis 8 Stunden und Sedimentations- und Dekantierphasen von etwa 2 Stunden ohnehin eine Abflussvergleichmäßigung stattfindet. Dies gilt besonders, wenn mittels einer Durchflussmessung regulierend auf die Dekantierleistung eingewirkt wird.

5.5 Bauteile und maschinentechnische Ausstattung

SBR-Kläranlagen bestehen aus einer Vielzahl von Bauteilen und einer umfangreichen maschinentechnischen Ausstattung, die wie folgt gegliedert werden kann:

- Einlaufhebewerk
- Mechanische Vorreinigung
  - ggf. Grobrechen
  - Feinrechen bzw. Feinsieb
  - Sandfang
  - Fettfang
  - Sandwäscher, Rechengutpressen o.ä.
  - ggf. Vorklärbecken
- Mengenausgleichsbehälter im Zulauf
- Zwischenhebewerk
- Sequencing Batch-Reaktor(en)
  - Behälter
  - Belüftungseinrichtungen
  - Rührwerke
  - Dekanter
  - ggf. Notüberlauf / Schwimmschlammabzug
- Mengenausgleichsbehälter im Ablauf
- Schlammbehandlung
  - Überschussschlammabzug
  - Schlammstapelbehälter
  - Trübwasserspeicher
  - ggf. maschinelle Schlammeindickung/-entwässerung
  - ggf. anaerobe Schlammbehandlung
- ggf. weitergehende Ablaufbehandlung
  - Filter mit/ohne weitergehender biologischer Behandlung
  - UV-Desinfektion
- Rohrleitungen und Armaturen
- Fällmitteldosierstation

In den nächsten Abschnitten wird auf die jeweiligen Bauteile und Maschinenkomponenten eingegangen, da einige Informationen hilfreich sind zum Verständnis der nachfolgenden Ausführungen bzw. der Mess- und Automatisierungskonzepte. Jedoch ist es nicht möglich, auf

Details der Maschinentechnik einzugehen. Da es sich hier in vielen Fällen um Standardkomponenten (z. B. Rechen, Pumpen, Rührwerke, Gebläse, Belüfterelemente) handelt, die auch auf anderen Kläranlagentypen zum Einsatz kommen, wird auf *Hellmann und Riegler [2003]* verwiesen, die die Maschinentechnik von Kläranlagen im Detail vorstellen.

5.5.1 Einlaufhebewerk

Nur in Einzelfällen fließt das Abwasser den Komponenten der Einlaufbaugruppen der SBR-Kläranlagen, d. h. der mechanischen Vorreinigung und dem Vorlagebehälter, im freien Gefälle zu. Die Regel ist, dass das ankommende Abwasser in die Kläranlage gepumpt wird. Dabei kommen auf SBR-Kläranlagen die gleichen Einlaufpumpwerke (Abbildung 5.4) zum Einsatz, die auch von anderen Kläranlagentypen bekannt sind, wie etwa

- Schneckenhebewerke,
- Tauchmotorpumpwerke und
- trockenaufgestellte Kreiselpumpwerke.

Abb. 5.4: Diverse Typen von Pumpwerken: Trockenaufgestellte Kreiselpumpen (1), gekapseltes Scheckenhebewerk (2), Tauchmotorpumpen (3) (Bildquellen: Autor)

Da viele SBR-Kläranlagen relativ klein sind, dominiert der Einsatz von Tauchmotorpumpen, da derartige Bauwerke mit geringem Aufwand und geringem Platzaufwand möglich ist. Pumpwerke mit trockenaufgestellten Kreiselpumpen kommen hingegen eher auf größeren SBR-Kläranlagen zum Einsatz; dies gilt auch für Schneckenhebewerke. Diese kommen zum Beispiel auch auf älteren Kläranlagen zum Einsatz, die im Zuge einer Modernisierung mit SBR-Technik nach- bzw. umgerüstet wurden, bei denen aber die Einlaufbaugruppen weiterverwendet werden. Beim Einsatz von Tauchmotorrührwerken und trockenaufgestellten Kreiselpumpen wird meist aus Gründen der Redundanz mindestens eine Pumpe als Reserve vorgehalten, da ansonsten im Falle einer Pumpenstörung die SBR-Kläranlage nicht mehr oder nur noch mit verringerter Leistung betrieben werden kann. Schneckenpumpwerke weisen eine hohe Zuverlässigkeit auf, sind aber meist auch von den Investitionskosten deutlich teurer; in Einzelfällen wird dann auf das Vorhalten einer Reserveschnecke verzichtet. Ferner kommen bei diesen beiden Pumpwerksformen auch Frequenzumformer zum Einsatz, um die Förderleistung der Pumpen beliebig variieren zu können.

Die **messtechnische Ausstattung** des Einlaufpumpwerks besteht meist nur aus Füllstandsmessungen. So ist der kombinierte Einsatz einer kontinuierlichen Füllstandsmessung mit einer Grenzfüllstandsmessung weit verbreitet. Erstere dient (ggf. in Kombination mit einer Durchflussmessung) zur Ansteuerung der Pumpen, letztere Messung zur Warnung vor Überflutungen oder zur Zwangseinschaltung der Pumpen.

5.5.2 Mechanische Reinigungsstufe

Auch die baulichen und maschinentechnischen Komponenten, die auf SBR-Kläranlagen für Zwecke der mechanischen Vorreinigung zum Einsatz kommen, unterscheiden sich ebenfalls nicht von denen, die auf anderen Kläranlagentypen zum Einsatz kommen. Dies belegt auch Abbildung 5.5: Diese Bilderkollage zeigt Applikationen auf SBR-Anlagen bei denen Standardkomponenten der Abwassertechnik zum Einsatz kommen: Bei größeren Kläranlagen wird dem Feinrechen oder Feinsieb manchmal noch ein Grobrechen vorgeschaltet, um ein zu schnelles Verstopfen des Feinrechens/Feinsiebs zu vermeiden; dieser kann auch direkt im Einlauf angeordnet sein und damit dem Einlaufhebewerk vorgeschaltet sein. Oft kommen auf kleineren und mittleren SBR-Kläranlagen sogenannte Kombi-Module zum Einsatz, d. h. vorgefertigte und standardisierte Module mit integrierten Rechen/Sieb sowie Sand- und Fettfang, die von verschiedenen Herstellern angeboten werden. Häufig werden diese Module aufgeständert, d. h. oberirdisch eingebaut. Da die Kosten für Erdbauarbeiten oft hoch sind, ist es vielfach günstiger, die höheren Pumpkosten in Kauf zu nehmen, anstatt die Vorreinigung in den Boden zu bauen. Dies gilt besonders, da von diesen aufgeständerten Modulen aus das Abwasser vielfach im freien Gefälle in die nachgeschalteten Vorlagebehälter fließen kann, auch wenn diese nicht komplett in die Erde gebaut wurde. D. h. auch hier können durch die Aufständerung Erdbaukosten gespart werden. Um im Falle eines Ausfalls des Rechens bzw. Siebes dennoch weiterarbeiten zu können, sind einige SBR-Kläranlagen mit einem Notüberlauf (ggf. integriert in das Kombi-Modul) zur Umgebung der mechanischen Vorreinigungsstufe versehen. Die Behandlung des Rechengutes bzw. des abgesetzten Sands erfolgt ebenfalls analog zu den üblicherweise auf Kläranlagen eingesetzten Komponenten (z. B. Sandwaschanlagen, Rechengutpressen). Vorklärbecken kommen meist nur auf größeren SBR-Kläranlagen zum Einsatz, da die kleineren bis mittleren Kläranlagen den Belebtschlamm in der Regel aerob stabilisieren. Ausnahmen gibt es bei älteren Kläranlagen, die im Zuge einer Modernisierung mit SBR-Technik nach- bzw. umgerüstet wurden, und bei denen die vorhandenen Komponenten zur anaeroben Schlammbehandlung weiterverwendet werden.

Die **messtechnische Ausstattung** der mechanischen Vorreinigung besteht in der Regel aus Füllstandsmessungen (kontinuierliche Messung und/oder Grenzfüllstand), die ggf. dazu eingesetzt werden können, um die Reinigung des Rechens bzw. des Siebes zu aktivieren. Darüber hinaus wird in dieser Baugruppe oft auch die Zulaufmengenmessung integriert. Weiterhin üblich ist der Einsatz von kontinuierlichen Messgeräten zur Bestimmung des pH-Wertes, der elektrolytischen Leitfähigkeit und der Temperatur. Oft findet man an dieser Stelle auch einen stationären oder mobilen Probenehmer zur regelmäßigen Beprobung des Kläranlagenzulaufs; die Proben werden anschließend im Labor analysiert.

Abb. 5.5: Bilder mechanischer Vorreinigungssysteme auf SBR-Anlagen: aufgeständertes, eingehaustes Kombimodul (1, 2) mit Notüberlauf, Spiralsieb, belüfteten Langsandfang mit Fettkammer und Sandwäscher; Einlaufauwerk in Außenaufstellung mit zwei Grobrechen, zwei Feinrechen und Sandfang (3) (Bildquellen: Autor)

5.5.3 Vorlagebehälter und Zwischenpumpwerke

Viele SBR-Kläranlagen sind mit einem Vorlagebehälter und einem Zwischenpumpwerk ausgestattet (Abbildung 5.6). Der Einsatz von Vorspeichern ist dann sinnvoll, wenn

- das Einzugsgebiet der Kläranlage im Mischsystem entwässert wird,
- ein Mengen- und Konzentrationsausgleich angestrebt wird (z. B. Dämpfung von Belastungsspitzen),
- die SBR-Anlage in kurzer Zeit beschickt werden soll (Substratdruckerzeugung) und/oder
- eine hydraulische Entkoppelung der SBR-Reaktoren von der aktuellen Zuflusssituation angestrebt wird.

Ein solcher Vorlagebehälter erhöht die Flexibilität im Anlagenbetrieb deutlich. In Kombination mit einer belastungsabhängigen Steuerung und Regelung kann hierdurch die hohe Flexibilität der SBR-Technologie effektiv genutzt werden. Bei den Vorlagebehältern findet man alle möglichen Kombinationen aus verschiedenen Formen (rund/rechteckig), Materialien (Ortbeton, Spannbeton, Stahl, emaillierter Stahl), Bezugspunkten (oberirdisch, ebenirdisch, unterirdisch) etc. Bei Modernisierungsprojekten können auch vorhandene Komponenten (z. B. alte Vorklärbecken) nach entsprechenden Modifikationen umgenutzt werden.

Die Durchmischung der Vorlagebehälter sollte durch Rührwerke sichergestellt werden, da es andernfalls zu Ablagerungen im Speicherbecken kommen wird. Weit verbreitet ist der Einsatz von schnelllaufenden Tauchmotorrührwerken, die sich höhenverstellen lassen, wodurch sich Ablagerungen wirkungsvoll beseitigen lassen. Je nach Größe und Form des Beckens ist ggf. auch der Einsatz mehrerer Rührwerke erforderlich.

Nur in wenigen Fällen ist es aufgrund der Topographie oder der gewählten Bauform (z. B. oberirdischer Vorlagebehälter, unterirdische SB-Reaktoren) möglich, dass das im Vorlagebehälter gespeicherte Rohabwasser im freien Gefälle den SB-Reaktoren zugeführt wird. In diesen Fällen wird der Zufluss zu den einzelnen Aufstaubecken über Automatikschieber gesteuert. Auch wenn kein Vorlagebehälter Anwendung findet, muss das Abwasser nach der mechanischen Vorreinigung den Aufstaureaktoren meist zwangsweise zugeführt werden.

Daher ist der Einsatz eines Zwischenpumpwerks üblich; zum Einsatz kommen meist Tauchmotorpumpen, aber im Einzelfall auch trockenaufgestellte Pumpen. In den Fällen, in den SB-Kläranlagen über Vorklärbecken verfügen, können diese gegebenenfalls auch als Vorlagebehälter genutzt werden. In Einzelfällen wurde zudem Stauvolumen im Kanalnetz verwendet, d. h. das Speichervolumen vor die mechanische Vorreinigung verlegt. Bei Mischkanalisationen muss jedoch unbedingt verhindert werden, dass es infolge des aufgestauten Kanalvolumens direkt (z. B. über einen dem Kanalstauraum zugeordneten Überlauf) oder indirekt (z. B. über Rückstaueffekte hervorgerufene Entlastungen an anderen Entlastungsbauwerken) zu einer Gewässerbelastung kommt. Besonders im ersten Fall besteht ansonsten die Gefahr, dass hochverschmutztes Mischwasser entlastet wird (*DWA-Merkblatt M 210 [2009]*).

Abb. 5.6: Zwischenpumpwerke mit zwei Tauchmotorpumpen (1) integriert in einen Vorlagebehälter (2) mit einem schnell laufenden Tauchmotorrührwerk (3) (Bildquellen: Autor)

Die **messtechnische Ausstattung** der Vorlagebehälter besteht in der Regel aus Füllstandsmessungen, wobei sowohl kontinuierliche Messungen als auch Min-/Max-Messungen zum Einsatz kommen. Üblich ist der Einsatz einer kontinuierlichen Füllstandsmessung zur Ansteuerung der Pumpen des Zwischenpumpwerks bzw. einer Grenzfüllstandsmessung zur Notabschaltung (z. B. Überflutungsschutz) des Einlaufpumpwerks.

5.5.4 Sequencing Batch Reaktor

Die Aufstaureaktoren bestehen in der Regel aus einer Reihe verschiedener Bauteile und Maschinenelemente:

- Behälter
- Belüftungseinrichtungen
- Rührwerke
- Klarwasserabzugseinrichtungen
- Messtechnische Ausstattung

5.4.4.1 Behälter

Wie bei den Vorlagebehältern findet man auch bei den SB-Reaktoren alle möglichen Behälterkombinationen (offen/geschlossen) aus verschiedenen Formen (rund/rechteckig), Materialien (Ortbeton, Spannbeton, Stahl, emaillierter Stahl), Bezugspunkten (oberirdisch, ebenirdisch, unterirdisch) etc. (Abbildung 5.7). Auch bezüglich der Höhe der Reaktoren bzw. der daraus resultierenden Aufstauhöhen gibt es verschiedene Varianten. Üblich sind jedoch

Wassertiefen zwischen 4 und 7 m (*DWA-Merkblatt M 210 [2009]*). In die Behälter führen (meist durch entsprechende Wand- oder Sohldurchführungen) die erforderlichen Leitungen (z. B. Beschickung, Klarwasserabzug, Überschusschlammabzug).

Abb. 5.7: Verschiedene Typen von Reaktoren: Rechteckbecken mit fester Decke in oberirdischer Bauweise und Erdanschüttung (1), oberirdisches Rundbecken aus emaillierten Stahl (2), unterirdisches, offenes Rechteckbecken aus Ortbeton (3) (Bildquellen: Autor)

5.4.4.2 Belüftungseinrichtungen

Auf SBR-Kläranlagen kommen die gleichen Belüfterelemente zum Einsatz wie auf konventionellen Kläranlagen (Abbildung 5.8) (Auswahl):

- Feinblasige Druckbelüftungen an der Beckensohle
  - Schlauchbelüfter
  - Tellerbelüfter
  - Plattenbelüfter
- Schwimmende Oberflächenbelüfter
  - Rotoren
  - Kreisel

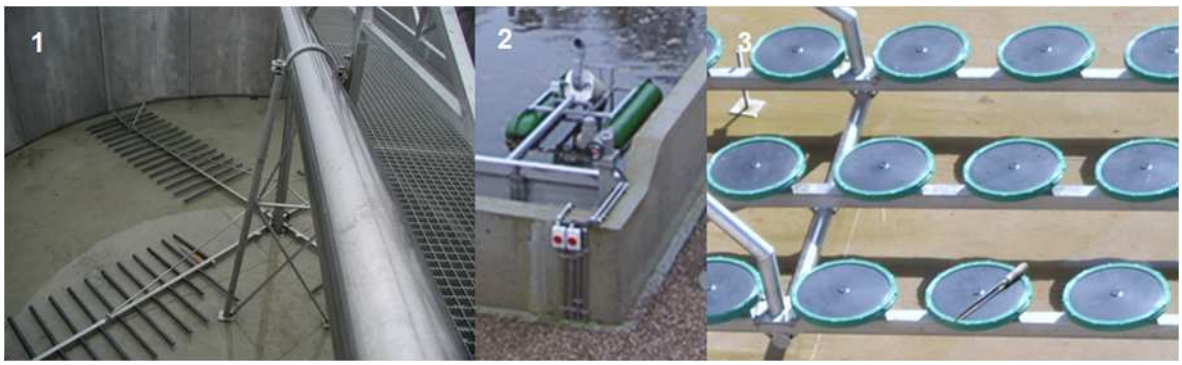


Abb. 5.8: Rundbecken mit vier Belüfterarmen und Schlauchmembranbelüftern (1), schwimmender Oberflächenbelüfter (Wendelbelüfter) (2), Tellerbelüfter (3) (Bildquellen: Autor)

Oberflächenbelüfter kommen in der Praxis nur in Einzelfällen zum Einsatz. Bei den Druckbelüftungen ist es weit verbreitet, dass diese an Belüfterarmen an der Beckensohle installiert werden, die einzeln abgeschiebert und im laufenden Betrieb für Wartungsarbeiten (z. B. Austausch der Membranen) gezogen und wieder eingebaut werden können.

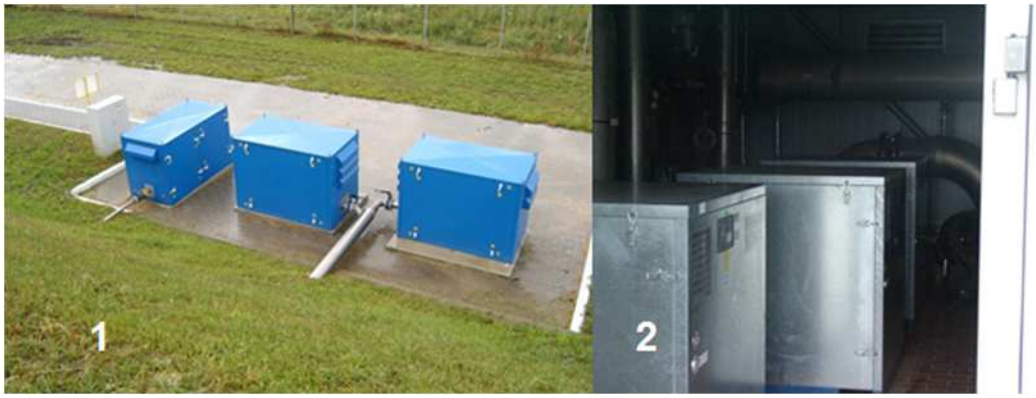


Abb. 5.9: Gebläse in Außenaufstellung (1), Gebläse (2) zwischen den beiden SB-Reaktoren witterungsgeschützt in einem Raum aufgestellt („Brillenform“) (Bildquellen: Autor)

Abb. 5.10: Installationen in einen Reaktor: Großflügelrührwerk (1), Dekanter mit Seilzug (2a), Schwimmschlammabzug/ Notüberlauf (2b), schwimmender Dekanter mit offenem Ablaufrohr/-schlauch (3), schwimmender Dekanter mit Teleskopstab (4, 5a) durch die Beckensohle, sonst noch zu sehen: Füllstandsmessung (5b), Beckenzulauf (5c), Überschussschlammabzug (5d), Nitratsonde am Dekanter (5e), TS-Sonde am Dekanter (5f), absenkbare Wehrklappe (6), getauchte Ablaufrohre (7) (Bildquellen: Autor)

Feinblasige Druckbelüfter setzen den Einsatz von Gebläsen (z. B. Drehkolbengebläse) oder Verdichtern (z. B. Turboverdichtern) voraus (Abb. 5.9). Auch bezüglich dieser Aggregate gelten im Wesentlichen die gleichen Anmerkungen wie beim Einsatz auf konventionellen Anlagen. Wichtig ist jedoch, dass die gewählten Belüfterelemente in der Lage sind, auch Stillstandsperioden zu überstehen, ohne dass das Abwasser-Belebtschlammgemisch in den Belüfter eindringt. Bei der Auslegung der Gebläse ist unter anderem darauf zu achten, dass durch die systembedingten Wasserspiegelschwankungen im Reaktor die Gebläse auf den maximalen Wasserspiegel bzw. Gegendruck ausgelegt werden müssen. Bezüglich technischer Details und der Bemessung wird auf das *DWA-Merkblatt M 210 [2009]* (sowie das *Vorgängermerkblatt ATV-M 210 [1997]*), *ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 131 [2000]* und *Hellmann und Rieger [2003]* verwiesen.

5.4.4.3 Rührwerke

Auch bei den Rührwerken wird meist auf Standardaggregate aus dem Abwasserbereich zurückgegriffen (siehe auch *Hellmann und Rieger [2003]*): Weit verbreitet sind heute Tauchmotorrührwerke (meist langsam laufende Großflügelrührwerke, Abbildung 5.10 Bild 1), im Einzelfall sind aber auch andere Rührwerke (z. B. schwimmende Oberflächenrührwerke) möglich. Bei der Auswahl geeigneter Rührwerke gilt es zu beachten, dass der Wasserspiegel im Reaktor systembedingt stark schwanken kann und hierbei stets die Funktionstüchtigkeit und eine ausreichende Durchmischung sichergestellt sein müssen.

5.4.4.4 Klarwasserabzugseinrichtungen

Eine Besonderheit der SBR-Anlagen sind die Klarwasserabzugseinrichtungen, in der Praxis oft auch als Dekanter bezeichnet. In den letzten Jahrzehnten wurde eine nahezu unüberschaubare Anzahl von verschiedenen Klarwasserabzugsvorrichtungen konstruiert, die sich wie folgt einteilen lassen (modifiziert nach dem *DWA-Merkblatt M 210 [2009]*):

- Absenkbare Dekanter (z. B. mittels einer automatischen Seilwinde) (Abb. 5.10, Bild 2)
- frei schwimmender Dekanter (Abbildung 5.10, Bild 3)
- zwangsgeführte schwimmende Dekanter
  - Teleskopstab (Abbildung 5.10, Bilder 4 bis 5)
  - Kniegelenk
- Wehrkonstruktionen (ggf. mit vorgeschalteter Tauchwand) (Abbildung 5.10, Bild 6)
- lagefixierte Abzugssysteme (z. B. getauchte Abblaufrohre (Abbildung 5.10, Bild 7)

Die Klarwasserabzugseinrichtung ist von zentraler Bedeutung für die Reinigungsleistung der Kläranlage. Daher müssen diese Vorrichtungen nach dem *DWA-Merkblatt M 210 [2009]* die folgenden Bedingungen erfüllen:

- möglichst großes Austauschvolumen sicherstellen (bis zu 50 %)
- möglichst kurze Abzugsdauer (kleiner 90 min)
- Schwimmschlamm und Schaum müssen zuverlässig zurückgehalten werden.
- Während der Misch- und Belüftungsphasen darf kein Schlamm in den Abzug eindringen.
- Die Sogwirkung muss begrenzt werden, um punktuellen Schlammabzug zu verhindern.

Vorrichtungen zum Schwimmschlammabzug – wie in einem Nachklärbecken üblich – werden in SB-Reaktoren in der Regel nicht verbaut. Einzelne Reaktoren sind jedoch mit einem Notüberlauf ausgestattet, über den auch Schwimmschlamm abgezogen werden kann (Abbildung 5.10, Bild 2b).

5.4.4.5 Messtechnische Ausstattung

Die **messtechnische Grundausstattung** der SB-Reaktoren besteht in der Regel aus folgenden Geräten:

- kontinuierliche Füllstandsmessung
- Grenzfüllstandsmessung (Überflutungsschutz)
- Sauerstoffmessung (z. B. zur Regelung des Sauerstoffeintrags)
- Temperaturmessung (in der Regel in Sauerstoffmessung integriert)

Prinzipiell lassen sich aber auch andere – insbesondere Qualitätsparametermessungen – Messgeräte installieren. In Kapitel 3 wurde auf großtechnisch realisierte Applikationen verwiesen:

- pH-Elektrode (in-situ)
- Redox-Elektrode (in-situ)
- Nitratmessung (in-situ als Elektrode oder optischer Sensor)
- Ammoniummessung (in-situ als Elektrode oder on-site als Prozessanalysator)
- Phosphatmessung (on-site als Prozessanalysator)
- TS-Messung (in-situ als optischer Sensor)
- Schlammspiegelmessung (in-situ meist als Ultraschallsensor)
- Schlammvolumenmessung (in-situ als optischer Sensor)

5.5.5 Mengenausgleich im Ablauf

Aufgrund des diskontinuierlichen Klarwasserabzugs wird von den Behörden bei kleineren Einleitleitgewässern oft der Bau eines Mengenausgleichs im Kläranlagenablauf gefordert, um die hydraulische Spitze entsprechend zu kappen. Da es sich um gereinigtes Abwasser handelt, benötigen diese Bauwerke keine Rührwerke und können entsprechend einfach gehalten werden. Diese Becken gibt es in diversen Variationen wie Abbildung 5.11 verdeutlicht; einzelne Becken sind auch mit einem Notüberlauf ausgestattet.

Die **messtechnische Ausstattung** der Mengenausgleichsbehälter besteht in der Regel aus kontinuierlichen Füllstandsmessungen sowie Grenzfüllstandsmessungen.

Abb. 5.11: Mengenausgleichsbecken im Ablauf: Rundbehälter aus emaillierten Stahl (1) mit Grundablass (a) und Notüberlauf (b), Rechteckbehälter aus Ortbeton (2), Erdbecken (3) (Bildquellen: Autor)

5.5.6 Kläranlagenablauf

Der Kläranlagenablauf kann auf verschiedene Weisen ausgebildet werden. In der Regel kommt hier – nicht zuletzt aufgrund behördlicher oder gesetzlicher Auflagen – diverse Messtechnik zum Einsatz.

Die **messtechnische Grundausstattung** der SBR-Kläranlagen im Kläranlagenablauf besteht in der Regel aus folgenden Geräten:

- Durchflussmessung
- Temperaturmessung
- pH-Wert

Prinzipiell lassen sich aber auch andere – insbesondere Qualitätsparametermessungen – Messgeräte installieren; in Kapitel 3 wurde auf großtechnisch realisierte Applikationen verwiesen:

- Leitfähigkeit
- Trübung
- Sauerstoff
- Nitratmessung (in-situ als Elektrode oder optischer Sensor)
- Ammoniummessung (in-situ als Elektrode oder on-site als Prozessanalysator)
- Phosphat- oder Gesamtphosphormessung (on-site als Prozessanalysator)
- SAK/CSB/TOC

In der Regel findet man an dieser Stelle auch einen stationären oder mobilen Probenehmer zur regelmäßigen Beprobung des Kläranlagenzulaufs; die Proben werden anschließend im Labor analysiert.

5.5.7 Nachgeschaltete Systme

Im Einzelfall kann es notwendig sein, dem Reinigungsprozess noch weitere Systeme nachzuschalten, um die Qualität des gereinigten Abwassers weiter zu verbessern. Abbildung 5.12 zeigt exemplarische Beispiele:

- Flächenfilter zur Reduzierung bzw. sicheren Einhaltung der CSB- und P_{ges}-Ablaufwerte (Abbildung 5.12, Bild 1)
- UV-Desinfektion im Kläranlagenablauf (Abbildung 5.12, Bild 2)

Abb. 5.12: Behandlung des Kläranlagenablaufs: Flächenfilter (1), UV-Desinfektion (2) (Bildquellen: Autor)

5.5.8 Sonstige Bauteile

Darüber hinaus gibt es auf SBR-Kläranlagen noch eine Reihe weiterer Bauteile und Aggregate, die für den Anlagenbetrieb erforderlich sind, aber für den weiteren Verlauf dieser Arbeit von untergeordneter Bedeutung sind (Abb. 5.13). Die Gebräuchlisten dieser Art sind:

- Fällmitteldosierstation für die Lagerung und die Zugabe von Fällmitteln für die chemisch-physikalische Phosphorelimination
- Schlammstapelbehälter zur Lagerung des Überschussschlamms
- Trübwasserspeicher zur Zwischenspeicherung des belasteten Trübwassers bzw. Zentrats
- Maschinelle Entwässerung des Überschussschlamms
- Lagerflächen für den entwässerten Klärschlamm

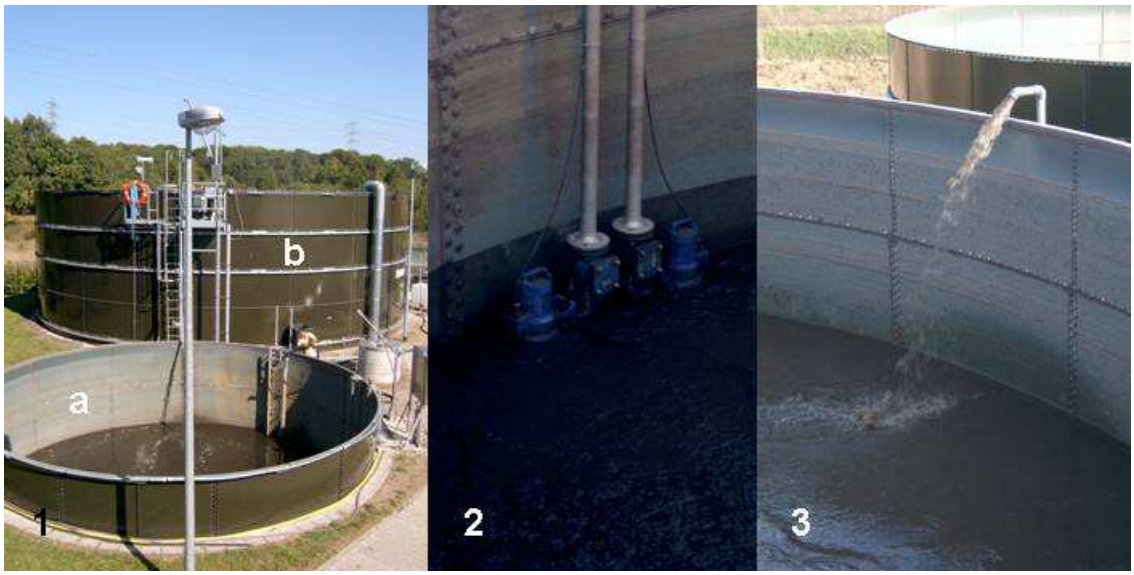


Abb. 5.13: Trübwasserspeicher (1a), Schlammstapelbehälter (1b), Tauchmotorpumpen zur gezielten Dosierung von Trübwasser in die Reaktoren (2, 3) (Bildquellen: Autor)

5.6 Bemessung von SBR-Kläranlagen[11]

In Deutschland existieren mehrere Regelwerke zur Dimensionierung und adäquaten Ausrüstung von SBR-Kläranlagen wie das *ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 131 [2000]*, das *DWA-Merkblatt M 210 [2009]* (sowie das Vorgängermerkblatt *ATV-M 210 [1997]*) und das *VDMA-Einheitsblatt 24427 [1997]*. Bei Anlagen, die in den 1990ern erbaut wurden, fand zudem meist das *ATV-Arbeitsblatt A 131 [1991]* Anwendung. Darüber hinaus haben verschiedene Autoren ergänzende Kommentare (z. B. *Kayser [1995, 2001]*), Erläuterungen (z. B. *Teichgräber [1998]*) oder optimierte Berechnungsmethoden (z. B. *Wichern et al. [2001]*) zum *ATV-Merkblatt M 210 [1997]* verfasst, die bei der Bemessung berücksichtigt werden können. Weitere Vorschläge zur Bemessung von SBR-Anlagen machten unter anderem *Oles [1991]* und *Mikkelsen und Nyhuis [1996]*. Einen Überblick über verschiedene Bemessungsansätze geben zum Beispiel *Krampe [2001]* und *Keudel [2002]*. *Keudel* diskutiert auch verschiedene Ansätze zur Bemessung der Sedimentations- und Klarwasserabzugsphase. Im internationalen Bereich gibt es ebenfalls Regelwerke und Handlungsempfehlungen, auf die jedoch an dieser Stelle nicht eingegangen werden soll. Es sei lediglich auf den „Scientific and Technical Report No. 10 – SBR Technology“ (*IWA [2001]*) verwiesen, der einen sehr guten Überblick über das SBR-Verfahren im Allgemeinen, die damit bisher weltweit gewonnenen Erfahrungen und zahlreiche Informationen zur adäquaten maschinen- und elektrotechnischen Ausstattung und Bemessung von SBR-Kläranlagen gibt. Zudem haben weitere internationale Autoren Untersuchungen zur Bemessung von SBR-Anlagen (bzw. Teilaspekten) durchgeführt, wie zum Beispiel:

Orhon et al. [2005] entwickelten eine Bemessungsmethode auf Basis von Massenbilanzen und kinetischen Ansätzen. Ziel dieser nach Auffassung der Autoren allgemein gültigen Methode ist eine Betrachtung des SBR-Prozesses unter verschiedenen Betriebsweisen:

- Betrieb als vorgeschaltete Denitrifikation
- Betrieb als intermittierende Belebungsanlage (mit mehrfacher Beschickung)

[11] Die nachfolgenden Ausführungen stammen aus *Wiese [2004]*, wurden jedoch ergänzt um Literatur seit 2005.

- Betrieb mit erhöhter biologischer Phosphorelimination, aber ohne Stickstoffelimination
- Betrieb mit simultaner Stickstoff- und Phosphorelimination

Suh et al. [2005] führten zahlreiche Batch-Absetzversuche für Belebtschlämme im Labor durch, um auf den Erkenntnissen aufbauend eine mathematische Funktion für die Absetzgeschwindigkeit zu ermitteln. Dieser und ähnliche Ansätze können die Grundlage für eine Berechnung der erforderlichen Dauer der Sedimentations- und Dekantierphase sein und damit als Eingangsgröße für ein entsprechendes Regelungskonzept fungieren.

Velmurugan und Veenstra [2008] bemängeln Dimensionierungsmethoden, die im Wesentlichen auf dem Schlammalter, der hydraulischen Aufenthaltszeit und der Schlammbelastung beruhen, da sie der Überzeugung sind, dass dadurch SBR-Anlagen unwirtschaftlich ausgelegt werden. Daher schlagen die Autoren ein vereinfachtes biologisches Modell zur optimierten Planung von SBR-Kläranlagen vor, welches die Investitions- und Betriebskosten, die Zuflussbedingungen, die einzuhaltenden Ablaufgrenzwerte und Zwangsbereiche für wichtige Prozessparameter berücksichtigt; die Optimierungsfunktion ist nicht linear. Die Autoren erprobten das Modell an einer großtechnischen Anlage mit 7.570 m^3/d Zufluss. Für dieses Beispiel errechneten sie ein Einsparpotenzial der Lebenszykluskosten um 10 bis 15 %. Nachteilig an diesem Modell ist sicherlich, dass es nur den Kohlenstoffabbau berücksichtigt und nicht weitergehende Abwasserreinigungsprozesse (z. B. Denitrifikation, biologische Phosphorelimination), die mittlerweile in vielen Staaten der Welt und insbesondere in Europa zum Standard gehören.

5.7 Simulation von SBR-Kläranlagen

In den letzten Jahren haben sich zahlreiche Autoren mit der Simulation von SBR-Kläranlagen beschäftigt, wobei verschiedene Ziele verfolgt wurden (Auswahl):

Wiese [2004] erstellte ein integriertes Modell „Kanalnetz/Kläranlage“ einer SBR-Kläranlage mit Mischkanalisation für das Einzugsgebiet der Gemeinde Messel, um darauf aufbauend verschiedene Möglichkeiten zur Reduzierung der Gesamtemissionen aus Kanalnetz und Kläranlage zu erforschen. Da das Kläranlagenmodell auf Basis von ASM 3 (*Henze et al. [2000]*) mit zahlreichen Messungen kalibriert wurde, konnten die Ergebnisse der Simulation in einer späteren großtechnischen Erprobung bestätigt werden (*Wiese [2005]* und *Wiese und Simon [2006]*).

Corominas et al. [2005A] berichten über die Erstellung eines SBR-Modells für eine Laboranlage (30 l Volumen) auf Basis des ASM 1 (*Henze et al. [2000]*), wobei zur Kalibrierung die online-Messdaten für Sauerstoff sowie Laborergebnisse zur Anwendung kamen. Die Kalibrierung orientierte sich an den Vorgaben des BIOMATH-Protokolls (*Vanrollegham et al. [2003]*) zur Durchführung von Simulationsstudien. Das Modell lieferte auf der Grundlage der vorhandenen Daten und der strukturierten Vorgehensweise zufriedenstellende Ergebnisse.

Lim et al. [2005] führten für eine Laboranlage mit zwei SB-Reaktoren (je 9 l Volumen) Versuche durch, die die Grundlage für die Erstellung eines Simulationsmodells auf Basis eines vereinfachten ASM 2d (*Henze et. al. [2000]*) sind. Die beiden SB-Reaktoren waren in Reihe geschaltet, d. h. das nitratreiche Abwasser aus dem ersten Reaktor wurde einer Denitrifikation im zweiten Reaktor zugeführt. Die Autoren erreichten mit diesem Versuchsaufbau eine Abbauleistung von 94 % für CSB, 91 % für P_{ges} und 71 % für N_{ges}. Das modifizierte Modell war

in der Lage, die Reinigungsleistung zuverlässig vorherzusagen und hat daher nach Auffassung der Autoren auch Potenzial für eine modellbasierte Echtzeitsteuerung.

Sin et al. [2005] berichten über den Einsatz eines Computermodells zur Optimierung einer Labor-SBR-Anlage auf Basis eines modifizierten ASM 2d (*Henze et. al. [2000]*). Die Autoren übertrugen den Optimierungsansatz auf die Laboranlage und beobachteten einen Anstieg der Nitrifikationsleistung um 50 % bzw. um 40 % bei der biologischen Phosphorelimination. Sie mussten jedoch erkennen, dass der SB-Reaktor nach der Umstellung allmählich instabil wurde. Die Autoren fanden hierfür die Erklärung, dass sie durch die vorgenommenen Änderungen den Anwendungsbereich des Modells überschritten hatten, sodass hieraus Bedarf für die Anpassung des Modells resultierte. Das Beispiel von *Sin et al. [2005]* verdeutlicht, dass die Simulation zwar ein wichtiges Hilfsmittel ist, den Ergebnissen aber nicht blind vertraut werden sollte. Insbesondere wenn es an einen Transfer in die Großtechnik geht, muss daher – auch durch den Einsatz von Mess- und Automationstechnik – sichergestellt werden, dass ein Prozess nicht instabil wird; dies gilt auch dann, wenn ein Modell die Grundlage eines Automationskonzeptes werden soll (Modell-based Control).

Rönner-Holm und Holm [2008] berichten über den Einsatz des ASM 3-Modells (*Henze et al. [2000]*) in Kombination mit dem EAWAG-Bio-P-Modul (*Rieger et al. [2001]*) zwecks Optimierung einer großtechnischen SBR-Anlagen (22.500 EW) mit drei parallelen SB-Reaktoren. Die Optimierungsansätze bestanden aus einer Variation der Bewirtschaftung des Zulaufspeicherbeckens und der Rückführung von Belebtschlamm in das Speicherbecken. Die Ergebnisse zeigen, dass die ohnehin schon sehr gute Reinigungsleistung nochmals verbessert werden konnte (N_{ges}: 92 % auf 94 %, P_{ges}: 86 % auf 90 %, BSB_5: 95 % auf 98 %) und auch Betriebskosten um 54.000 € pro Jahr reduziert werden konnten.

Alex et al. [2011] berichten über die Entwicklung und den Einsatz eines hydraulischen und biologischen Modells zur Simulation von SBR-Kläranlagen mit zylindrischen Reaktoren. Basierend auf den Ergebnissen von Strömungssimulationen wurde der Prozess in sechs Rührkesselreaktormodelle unterteilt, die die einzelnen Phasen des SBR-Prozesses nachbilden. Die Simulation der biologischen Vorgänge erfolgte mit ASM 3 (*Henze et. al. [2000]*).

Stand bisher im Wesentlichen die Simulation der biologischen Prozesse im Fokus des Interesses der Kläranlagensimulation, so wird mit steigenden Energiepreisen im Einzelfall bereits die Simulation des Energieverbrauchs berücksichtigt. Einen ersten Schritt diesbezüglich unternahmen *Alex et al. [2005]*, die derartige Ansätze im „MATLAB/SIMULINK/ SIMBA“ implementierten. Für die Simulation von SBR-Anlagen, bei denen erhebliche Kosten für Pumpen, Rührwerke und Gebläse anfallen, ist die Berücksichtigung der Energieverbräuche ein wesentlicher Schritt zu einer anlagenweiten Simulation sowie des computergestützten Tests neuer Mess- und Automationskonzepte.

Magrí und Flotats [2008] führten Versuche mit einem Labor-SBR (20 l Volumen) zur Behandlung der Flüssigphase von Schweinegülle durch, um damit ein Modell zu erstellen.

Petta et al. [2008] entwickelten auf Basis zahlreicher Simulation mit dem ASM 1 (*Henze et al. [2000]*), bei denen sie u. a. das CSB/NH_4-N-Verhältnis, die Anzahl der Zyklen pro Tag und die Dauer der anoxischen Phase variierten, eine mathematische Funktion zur Dimensionierung von SBR-Anlagen für Zwecke einer Stickstoffelimination kommunaler Abwässer.

5.8 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde ein Überblick über die SBR-Technik gegeben. Es wurde gezeigt, dass das SBR-Verfahren eine äußerst leistungsfähige und sehr flexible Form der Abwasserreinigung darstellt, das seit einigen Jahren weltweit immer mehr Verbreitung findet. Darüber hinaus gibt es Ansätze, diese Technik auch außerhalb der bisher üblichen Applikationen einzusetzen, zum Beispiel auch im Bereich der Anaerob- bzw. Biogastechnik. Das Prinzip „Alles in einem Reaktor“ klingt auf den ersten Blick einfach: Tatsächlich stellt dies jedoch eine Herausforderung dar, da ein optimaler Abwasserreinigungsprozess auch die Einstellung optimaler Prozessbedingungen erforderlich macht. Bei der SBR-Technik kam aber bisher überwiegend einfache Mess- und Automationstechnik zum Einsatz. Um die Vorteile der SBR-Technik in Gänze zu nutzen, gleichzeitig aber die Nachteile bzw. Systemschwächen so weit wie möglich zu reduzieren, ist der Einsatz umfangreicher und moderner Mess- und Automationstechnik unablässig. Aus diesem Grund widmet sich das nachfolgende Kapitel 6 dieser Thematik.

6 Mess- und Automationstechnik auf SBR-Anlagen

6.1 Stand der Mess- und Automationstechnik[12]

In der SBR-Technologie kommen zahlreiche Mess-, Steuerungs- und Regelungskonzepte zum Einsatz; in Abbildung 6.1 sind die Grundprinzipien einer Regelung bzw. Steuerung schematisch dargestellt.

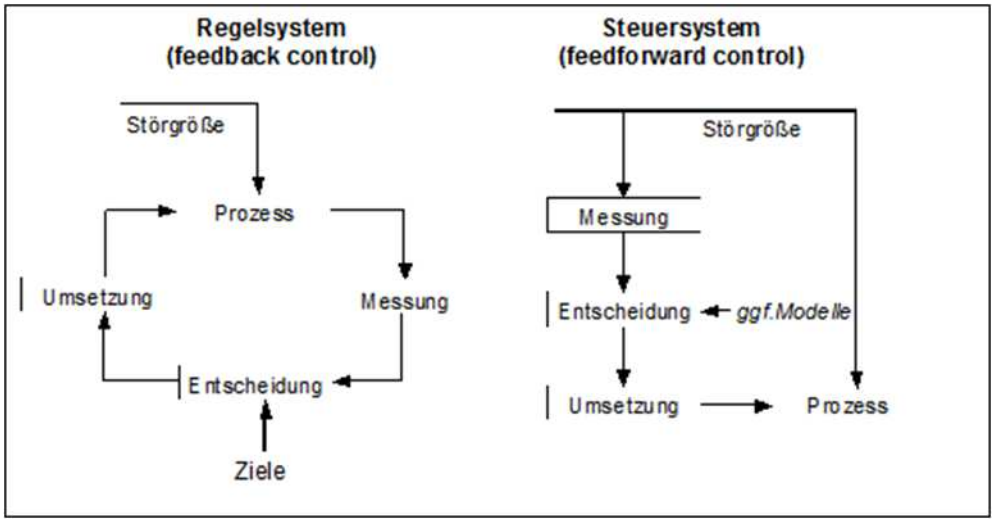


Abb. 6.1: Grundprinzip einer Regelung bzw. Steuerung (nach *Ollson und Newell [1999]* und *Londong und Sauer [2001]*) (aus *Wiese [2004]*)

Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen SBR- und Durchlaufkläranlagen werden auch im Bereich der Mess- und Automationstechnik deutlich, da es verfahrensbedingte Unterschiede bei den Stör- und Stellgrößen geben kann. Nach *Ollson und Newell [1999]* unterscheidet man interne – die innerhalb einer Abwasseranlage auftreten – und externe Störgrößen, die von außen auf das System einwirken. Zur ersten Gruppe zählt man etwa die Dynamik der Belüftungsaggregate. Die wichtigsten externen Störgrößen sind hingegen die Dynamik des Kläranlagenzuflusses im Hinblick auf Menge, Konzentration und Zusammensetzung. Es versteht sich von selbst, dass in komplexen Systemen, wie sie Abwasseranlagen darstellen, eine Vielzahl von Störgrößen existieren. Hinzu kommt, dass viele dieser Störgrößen (noch immer) nicht messtechnisch erfasst werden (können).

Stellgrößen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie vom Anlagenbetreiber verändert werden können und mit Hilfe von Stellgliedern, also Schiebern, Pumpen, Ventilen etc. derart beeinflusst werden, dass ein vorgegebener Sollzustand erreicht bzw. wiederhergestellt wird (*Londong und Sauer [2001]*). Stellgrößen sind im Wesentlichen Massen- und Energieströme, wobei man die wichtigsten den Bereichen Hydraulik und Belüftung zuordnen kann. Die verschiedenen hydraulischen Variablen kann man wiederum nach *Ollson und Newell [1999]* den Bereichen Zufluss-, Abfluss-, Schlamm-, Rückführ- und Zyklusregelungen zuordnen, wobei beim SBR-Verfahren eine Rückführregelung systembedingt in aller Regel entfällt und sich die Schlammregelung somit auf eine Beeinflussung des Überschussschlammabzugs

[12] Die nachfolgenden Ausführungen stammen zum Teil aus *Wiese [2004]*.

beschränkt. Da die Reinigung bei der SBR-Technik im Gegensatz zu Durchlaufkläranlagen nicht entlang einer Wegstrecke, sondern entlang einer Zeitachse erfolgt, wird der Prozessablauf bei SBR-Anlagen in der Praxis meist über ein Zyklusprogramm mit festen Vorgaben bezüglich der Dauer der einzelnen Phasen gesteuert. Daher sind bei SBR-Anlagen – im Gegensatz zu den meisten Durchlaufanlagen – zeitbasierte Ablaufsteuerungen von großer Bedeutung. Die Zyklusdauer kann als hydraulische Variable eingestuft werden, da stark erhöhte Zulaufmengen (z. B. infolge Mischwasserzufluss) eine Verkürzung der Zyklusdauer erfordern können. Weiterhin ist es zu belastungsarmen Zeiten auch möglich, einzelne Reaktoren außer Betrieb zu nehmen. Einige Gemeinsamkeiten mit Durchlaufanlagen gibt es bei der Zuflussregelung. Hierzu gehören Stellgrößen, die eine Veränderung des Zuflusses (auch im Bereich des Kanalnetzes), die Nutzung von Ausgleichsbehältern im Zu- und/oder Ablauf, die Aufteilung des Zuflusses auf verschiedene Straßen bzw. Reaktoren sowie ggf. die gezielte Umgehung einzelner Baugruppen im Bypass ermöglichen. Neben den hydraulischen Stellgrößen gibt es eine Vielzahl weiterer Variablen, auf die mit Hilfe von Stellgliedern eingewirkt werden kann, vor allem im Bereich der Belüftung. Von praktischer Bedeutung kann bei SBR-Anlagen auch die Dosierung chemischer Substanzen, im Wesentlichen Fällungs- und Flockungsmitteln oder externer Kohlenstoffquellen, sein. Weitere Stellgrößen können sich bei SBR-Anlagen aus dem Dekantierprozess ergeben, sofern sich das Absenkziel und die Leistung der Klarwasserabzugsvorrichtung manipulieren lassen.

Ein reibungsloser Betrieb von SBR-Anlagen setzt das Vorhandensein zahlreicher Messgeräte, insbesondere zur Ermittlung physikalischer Größen (z. B. Durchfluss und Füllstand) voraus. In Abbildung 6.2 sind die wichtigsten Messgeräte aufgeführt, die zur Grundausstattung einer SBR-Anlage der Größenklasse 1 bis 3, d. h. mit weniger als 10.001 Einwohnerwerten gehören.

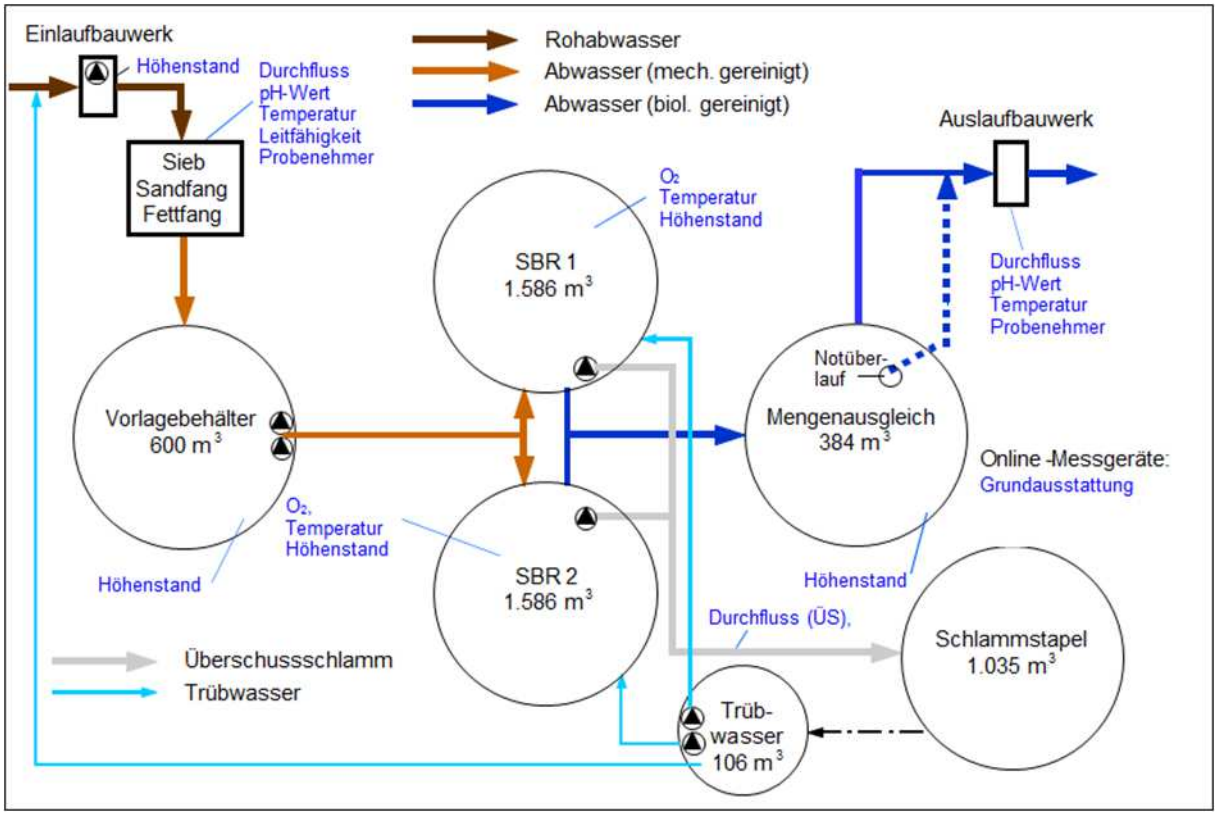


Abb. 6.2: Typische Messtechnische Ausstattung einer SBR-Kläranlage mit Vorlagebehälter und zwei SB-Reaktoren der Größenklasse 1 bis 3 (Bildquelle: Autor)

In der Abbildung 6.2 sind die zahlreichen Statusmelder, Grenzfüllstandsmessgeräte, Energieverbrauchszähler etc. jedoch noch nicht enthalten. In Summe werden somit mehr als 100 Mess- bzw. Statusgrößen von der SPS erfasst und ggf. auf der Prozessleitsystemebene archiviert (Tabelle 6.1).

Tab. 6.1: Messtechnisch erfasste Status-/Stellgrößen/Stellglieder, Abwasserparameter etc. auf einer SBR-Kläranlage (Quelle: Autor)

Messstellen	**Anzahl**
Pumpen, Rührwerke und Gebläse	28
Füllstands-, Temperatur-, Durchfluss- und Qualitätsmessungen	63
Antriebe, Klappen und Ventile	25
Summe	**116**

Bei SBR-Kläranlagen der Größenklasse 4 (> 10.001 Einwohnerwerter), oder bei Anlagen mit hohen Anforderungen an die Reinigungsleistung kommen auf SBR-Kläranlagen bereits seit Jahren auch Qualitätsparametermessgeräte zum Einsatz (Tabelle 6.2). Weitere Messgeräte, die auf SBR-Kläranlagen für MSR-Zwecke zum Einsatz kommen, sind u. a. Schlammspiegel- und Trübungs- bzw. TS-Messungen (z. B. *IWA [2001]*). Doch auch hier werden die Messgeräte häufig nur zur Überwachung eingesetzt bzw. in Sicherheitskonzepte eingebunden, etwa zur Vermeidung von Schlammabtrieb während des Dekantierprozesses.

Bezüglich des Einsatzes dieser Messtechnik kommen im Wesentlichen drei Grundkonzepte zum Einsatz:

- Grundkonzept 1: Jeder Reaktor ist mit einem eigenen Messgerät ausgestattet, sodass zu jedem Zeitpunkt der Konzentrationsverlauf des entsprechenden Parameters nachvollzogen werden kann (Abbildung 3.4). Dieses Konzept ist am teuersten, bietet aber nicht nur eine lückenlose Überwachung, sondern auch die beste Grundlage für Steuerungen und Regelungen. Bei günstigen Sensoren (z. B. pH, Redox, O_2, ANISE) ist daher dieses Konzept das Mittel der Wahl. Für bestimmte Applikationen (z. B. gewerblich-industrielles Abwasser) kann es sinnvoll sein, die einzelnen Reaktoren (zumindest zeitweise) zu entkoppeln; dies ist aber nur mit diesem Konzept realistisch machbar.
- Grundkonzept 2: Aus jedem Reaktor erfolgt mittels automatischer Filtrationseinheiten eine kontinuierliche Probennahme. Die einzelnen Probenströme werden wechselseitig über einen Satz Messtechnik (z. B. über Magnetventile oder Mehrkanalmessgeräte) analysiert (Abbildung 3.5); d. h. ein Reaktor wird jeweils beprobt, die Probenströme der anderen Reaktoren während dieser Zeit verworfen, sodass nach einer gewissen Dauer alle Reaktoren einmal durchgemessen sind (z. B. eine Messung pro Stunde). Hierdurch können im Einzelfall zwar Investitions- und Betriebskosten reduziert werden und auch zur Überwachung ist dies Konzept vielfach geeignet, jedoch wird hierdurch die Fähigkeit zum Steuern und Regeln stark eingeschränkt. Dieses Konzept kommt oft dann zum Einsatz, wenn investitions- und betriebskostenintensive Messgeräte zur Anwendung kommen (z. B. nasschemische Phosphatprozessphotometer).

- Grundkonzept 3: Hier erfolgt die Installation der Qualitätsparametermessgeräte im Ablauf der Reaktoren bzw. im Kläranlagenablauf. Dies ist in der Regel aus Investitionskostensicht die günstigste Lösung und eignet sich zur kontinuierlichen Überwachung der Ablaufkonzentration, aber nicht zur Steuerung und Regelung.

In der Praxis kommen meist Kombinationen dieser Grundkonzepte zum Einsatz, wie auch Tabelle 6.2 anhand exemplarischer Beispiele verdeutlicht: Die Kläranlage B hat zum Beispiel eine Kombination aus Konzept 1 und 3 (Sauerstoffelektrode in jedem Reaktor, sowie Nitrat- und Phosphatmessungen im Ablauf der Kläranlage); die Kläranlage D eine Kombination aus 1 und 2 (Sauerstoff- und pH-Elektroden in jedem Reaktor sowie ein gemeinsamer Satz von Nitrat-, Ammonium- und Phosphatmessungen).

Tab. 6.2: Vergleich bauähnlicher SBR-Kläranlagen bezüglich der wichtigsten Messgeräte (GK = Grundkonzept) (Quellen: Autor)

Kläranlage	A	B	C	D	E
Größe	≈ 5.000 EW	≈ 25.000 EW	≈ 21.000 EW	≈ 16.000 EW	≈ 10.000 EW
Einlauf	Q pH Temp. LF	Q pH Temp. LF	Q pH Temp. LF	Q pH Temp. LF	Q pH Temp. LF
SBR	GK 1: O_2 Temp. NO_3-N jeweils pro Reaktor (d. h. 2 St.)	GK 1: O_2 Temp. jeweils pro Reaktor (d.h. 2 St.)	GK 1: O_2 Temp. jeweils pro Reaktor (d.h. 2 St.) GK 2: NO_3-N (1 St.) PO_4-P (1 St.) gemeinsam für die Reaktoren	GK 1: O_2 Temp. pH jeweils pro Reaktor (d.h. 2 St.) GK 2: NH_4-N (1 St.) NO_3-N (1 St.) PO_4-P (1 St.) gemeinsam für die Reaktoren	GK 1: O_2 Temp. NO_3-N jeweils pro Reaktor (d.h. 2 St.)
Mengen-ausgleich		GK 3: NO_3-N (1 St.) PO_4-P (1 St.)			
Ablauf	Q pH Temp.	Q pH Temp.	Q pH Temp.	Q pH Temp.	Q pH Temp. Trübung
ÜS	Q	Q	Q	Q	Q

Angesichts dieser messtechnischen Ausstattung ist es nicht verwunderlich, dass man sich in den letzten Jahren und Jahrzehnten im Wesentlichen nur auf die Entwicklung von optimierten Füllstrategien und Sauerstoffreglern konzentrierte und dadurch die zahlreichen Vorteile der SBR-Technik nicht richtig ausgeschöpft hat. Steuerungen und Regelungen kommen hier nur in einfachster Form zum Einsatz, wie zum Beispiel:

- Füllstandsregelungen zur Befüllung und Entleerung der SB-Reaktoren
- Füllstandsregelungen zur Bewirtschaftung der Speicherbecken im Zu- und Ablauf
- Schrittkettensteuerung zur Abarbeitung der einzelnen Zyklusschritte
- Sauerstoff-basierte Belüftungsregelungen zur Ansteuerung der Gebläse
- Bedarfsgerechte Fällmittelzugabe zur chemisch-physikalischen Phosphorelimination

Diese Defizite bzw. im Umkehrschluss die Notwendigkeit zur Entwicklung leistungsfähiger Mess- und Automationskonzepte wurde von zahlreichen Experten schon früh erkannt:

Schreff und Wilderer [1999] bemängelten, dass sich die einzelnen SBR-Varianten im Wesentlichen nur durch die gewählte Füllstrategie unterscheiden. Dies ist einer der Gründe, weshalb eine Optimierung des Batchbetriebs in vielen Fällen nach der Methode „trial and error“ (*Helmreich et al. [2000]*) erfolgt. D. h. die einzelnen Zyklusschritte werden per Hand am PLS oder Operator Panel angepasst und das Resultat mittels konventioneller Analytik betrachtet; ggf. wird dann wieder nachjustiert. Diese Vorgehensweise ist bis heute Mittel der Wahl für viele SBR-Anlagenbetreiber. *Schreff und Wilderer [1999]* verweisen daher früh auf Forschungsbedarf im Bereich angepasster Steuerungsstrategien, etwa bei Anlagen mit stark schwankenden Belastungsbedingungen. Auch *Teichgräber [1998]* forderte, dass in Zukunft ein besonderes Augenmerk auf die Weiterentwicklung im Bereich der Zyklussteuerung und der dazugehörigen Messgeräte gelegt werden müsse. Auch *Katsogiannis et al. [1999]* bemängeln ebenfalls, dass trotz der günstigen Randbedingungen, die das SBR-Verfahren im Bereich der Automatisierungstechnik bietet, bis dato nur wenige brauchbare Vorschläge zur Entwicklung von Mess-, Steuerungs- und Regelungsstrategien zur Optimierung von SBR-Anlagen unterbreitet wurden. *Schreff [2003]* verweist darauf, dass sich Struktur und Aufbau der SBR-Prozesssteuerung nur selten an den betrieblichen Belangen orientieren, vor allem was die Möglichkeiten der Programmmodifikation angeht[13].

Die Konsequenz hieraus war, dass weltweit in den letzten 10 bis 15 Jahren sehr viel in dieser Richtung geforscht wurde (Abschnitt 6.6), wobei aber nur wenige Konzepte den Sprung in die Praxis geschafft haben (Abschnitt 6.5).

Betrachtet man hingegen die Automationsgeräte auf der Prozessleitebene, so kann man hier meist keine wesentlichen Defizite erkennen. Zwar findet man auf kleineren SBR-Kläranlagen – vor allem den Anlagen mit weniger als 1.000 bis 2.000 EW – nach wie vor noch Anlagen ohne Prozessleitsystem, im Wesentlichen entspricht die Ausstattung jedoch bezogen auf die Visualisierungs- und Bedienebene, die Feldgeräte, Speicherprogrammierbaren Steuerungen etc. meist einem Level wie er zum Zeitpunkt der Anlageninbetriebnahme auch in der Industrieautomation üblich ist/war. Dies hängt nicht nur damit zusammen, dass im Abwassersektor zahlreiche technische Regelwerke beachtet werden müssen, sondern auch der

[13] Dieser Absatz stammt aus *Wiese [2004]*: Vom Prinzip hat sich die Aussagekraft bis heute nicht geändert.

Tatsache, dass Gewässerverschmutzung eine Straftat darstellt und somit eine hohe Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit gegeben sein muss.

Abbildung 6.3 zeigt eine Übersicht über das Automatisierungs- und Leitsystemkonzept einer SBR-Kläranlage der Größenklasse 4 zu Beginn des 21. Jahrhunderts; grundsätzlich hat sich hierbei bis heute nichts Wesentliches geändert. Aufgrund der Größe dieser SBR-Kläranlage wird ebenfalls eine Not-SPS vorgehalten, um auch beim Ausfall der baugleichen Haupt-SPS einen ordnungsgemäßen Anlagenbetrieb sicherstellen zu können.

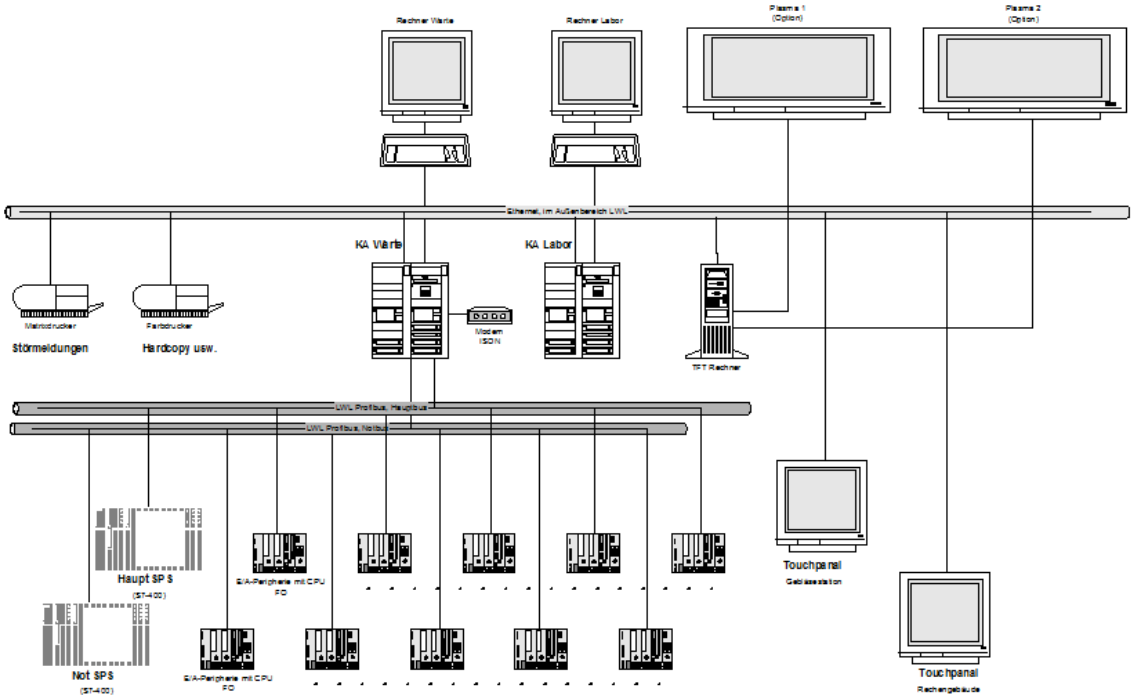


Abb. 6.3: Übersicht der Automatisierungs- und Leittechnik einer SBR-Kläranlage der Größenklasse 4 (Bildquelle: *ASA [2005]*)

Für die Nachrüstung von bedarfs- und/oder prozessabhängigen Steuerungs- und Regelungskonzepten auf SBR-Kläranlagen mit konventionellen Steuerungskonzepten bedeutet dies gute wirtschaftliche und technische Voraussetzungen, denn es müssen „nur“ einzelne Messgeräte nachgerüstet und das Programm der Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) angepasst werden. D. h. eine grundlegende Erneuerung bzw. Modernisierung der Automationstechnik ist zumindest bei den meisten SBR-Kläranlagen, die in den letzten 15 Jahren gebaut wurden, nicht erforderlich. Bei dem in Kapitel 7 vorgestellten Ertüchtigungskonzept konnte die neue bedarfs- und prozessabhängige, dynamische Zyklussteuerung problemlos auf einer SBR-Kläranlage aus dem Baujahr 1999 nachgerüstet werden.

6.2 Warum wird auf SBR-Anlagen so wenig gemessen?

Durch den Einsatz von MSR-Technik soll auf die ablaufenden Prozesse sowie die auftretenden Störgrößen derart eingewirkt werden, dass der Reinigungsbetrieb stabiler, sowie ökonomisch und/oder ökologisch möglichst effizient abläuft. Hieraus resultiert, dass der umfangreiche Einsatz von MSR-Technik für SBR-Kläranlagen lange Zeit wenig interessant erschien[14]:

[14] Dieser Absatz stammt zum Teil aus Wiese [2004].

- Da es sich bei den meisten SBR-Anlagen um kleinere Abwasseranlagen handelt, ist/war der Einsatz von Qualitätsparameter-Messtechnik meist entweder unwirtschaftlich und/oder wegen geringer Anforderungen an die Reinigungsleistung nicht erforderlich.
- Die Kosten für online-Messtechnik (besonders für Ammonium und Phosphat) waren bislang hoch; dies galt nicht nur für die Anschaffungs-, sondern auch für die Betriebskosten.
- Nach Einschätzung von *Schreff [2003]* ist daher der Einsatz von Trübungs- und Prozessmessgeräten erst bei größeren Anlagen nutzbringend bzw. bei kleineren Anlagen die Einbindung von Sauerstoffgehalt und Füllstand in entsprechende Regelungen ausreichend.
- Die in Deutschland gebauten SBR-Kläranlagen werden nach wie vor statisch bemessen (siehe Abschnitt 5.6). Hieraus resultiert, dass in der betrieblichen Praxis die Überwachungswerte meist sicher eingehalten werden, da das gleichzeitig Auftreten ungünstiger Lastfälle und Betriebsparameter nur selten eintritt. Da lange Zeit auch für viele Anlagenbetreiber eine Optimierung der Betriebskosten (z. B. Stromkosten, Arbeitskosten „Eh-Da-Kosten“) kein Thema war, fehlte der wirtschaftliche und/oder rechtliche Antrieb zum Einsatz leistungsfähiger Mess- und Automationstechnik.

Ein weiterer Grund ist, dass sich sowohl Planer, Bauherr als auch Anlagenbauer oft streng an den Vorgaben der technischen Regelwerke orientieren. Insbesondere im Bereich der SBR-Technik ist bzw. war das Anforderungsprofil, das wichtige technische Regelwerke an die Automationstechnik dieser Anlagen stellen, lange Zeit sehr gering. Besonders deutlich wird dies am über ein Jahrzehnt gültigen *Merkblatt ATV-M 210 [1997].* Die **gesamten Ausführungen** (!) bezüglich der elektrotechnischen Ausstattung und der Steuerungstechnik von SBR-Kläranlagen können folgendem Zitat aus diesem Merkblatt entnommen werden:

„Um die gewählte Zyklusstrategie ausführen zu können, ist eine spezielle Steuerungstechnik erforderlich. Folgende Möglichkeiten sollten gegeben sein:

- Flexible Einstellmöglichkeiten von Zyklusdauer, Belüftungsdauer, Mischdauer, Absetzdauer, Dauer für den Klarwasserabzug etc.,
- Steuerung der Belüftung bzw. Gebläse über die Sauerstoffmessung im Reaktor,
- Gegebenenfalls Wechsel zu einem speziellen Zyklusplan bei Mischwasserzufluß,
- Gegebenenfalls Wechsel zu einem speziellen Zyklusplan bei geringer Belastung (z. B. Wochenende, Ende der Saison in Gemeinden mit starkem Fremdenverkehr).“

Der *Scientific and Technical Report No. 10 – SBR Technology (IWA [2001])* geht zwar über diese Ausführungen hinaus, indem zum Beispiel auch Hinweise auf Datenarchivierung, Alarmierung, notwendige Funktionalitäten auf der Bedien- und Visualisierungsebene, Sicherheitskonzepte etc. gegeben werden, jedoch beschränken sich auch diese jeweils knappen Ausführungen auf in Summe weniger als zwei Seiten. Des Weiteren finden sich hier Hinweise, die als eher kontraproduktiv für eine Verbreitung von Mess- und Automationstechnik sind, wie folgendes Zitat aus diesem Merkblatt verdeutlicht:

„The higher the degree of automation becomes, the larger ist the dependence on the measuring devices and thus the risk of encountering temporary system failures.“ *(IWA [2001])*

Eine derartige Formulierung ist insofern unglücklich und falsch, da es sich dabei nicht um ein spezifisches Problem der SBR-Technik handelt, sondern jegliche Applikation in allen möglichen Branchen betrifft, die Mess- und Automationstechnik einsetzen. Hieraus resultiert,

dass in der Vergangenheit eine Vielzahl von Sicherheits- und Rückfallkonzepten entwickelt wurden, die sicherstellen, dass auch beim Ausfall eines Messgerätes kein negativer Einfluss auf die Prozess- und Anlagenstabilität auftritt. Im Übrigen ist dieser Einwurf unbegründet, denn die verfahrenstechnischen Randbedingungen der SBR-Technik begünstigen förmlich die Realisierung von Sicherheitskonzepten und/oder einer Qualitätssicherung der online-Messdaten (siehe Abschnitt 6.5.6).

6.3 Warum sollte auf SBR-Anlagen mehr gemessen werden?

Aufgrund der in Kapitel 2 beschriebenen Randbedingungen und der mittlerweile leistungsfähigen und vielfach günstigen Messtechnik (Kapitel 3) wird die Ausrüstung bzw. Nachrüstung von SBR-Anlagen mit leistungsfähiger, prozessabhängigen Steuerungs- und Regelungskonzepten an Bedeutung gewinnen:

- Die SBR-Technik ist ein leistungsfähiges Reinigungsverfahren, dessen Stärken effektiv nur durch den Einsatz von Mess- und Automationstechnik genutzt und dessen Schwächen durch EMSR-Technik merklich reduziert werden können (Abschnitt 5.4).
- Immissionsorientierte Ansätze lassen Systemgrenzen (z. B. Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer) verschwinden bzw. fördern anlagenweite oder gar Systemgrenzen überschreitende Betriebskonzepte (z. B. integrale Steuerung und Regelung von Kanalnetz und Kläranlage in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Leistungsfähigkeit). Der Mehrwert, den ein solches Konzept erzielen kann, verdeutlicht das Beispiel aus Kapitel 7.
- Viele SBR-Anlagen, die in den letzten 15 bis 20 Jahren gebaut wurden, stehen in den nächsten Jahren für eine Erneuerung der Elektrotechnik an. Es liegt nahe, dann auch auf moderne leistungsfähige Mess- und Automationskonzepte auszuweichen.
- Die zunehmenden Betriebskosten, Umweltauflagen und die finanziell angespannte Lage vieler Kläranlagenbetreiber – meist Kommunen – führen zu einem allmählichen Umdenken in der Betriebsführung. Eine kontinuierliche Betriebsoptimierung, die in anderen Branchen seit jeher üblich ist, wird zunehmend als Notwendigkeit erkannt:
  - Sichere Einhaltung der immer strengeren Überwachungswerte im Kläranlagenabblauf → Rechtssicherheit und Vermeidung von Umweltschäden
  - Weitgehende Reduzierung aller relevanten Schmutz- und Schadstoffe → maximaler Umweltschutz durch Minimierung der Emissionen
  - Maximale Verfügbarkeit der Maschinentechnik → Betriebssicherheit
  - Minimale Kosten für Energie, Betriebsstoffe und Entsorgung → Ausgabenreduzierung
  - Reduzierung der Abwasserabgabe → Reduzierung der Ausgaben
  - Optimierter Personaleinsatz → Reduzierung der Ausgaben
  - Minimierung der Investitions- und Betriebskosten bei Erweiterungen und Sanierungen → Reduzierung der Ausgaben

  Eine multikriterielle Optimierung dieser Parameter ist aber eine komplexe Aufgabe, die sich mit dem „gesunden Menschenverstand“ alleine nicht mehr lösen lässt!

Schließlich gibt es auch noch andere Gründe mehr zu messen:

- Durch den Einsatz von Messtechnik erhöht sich die Informationsdichte deutlich, die der Betriebsleitung zur Verfügung steht. D. h. auch wenn Messgeräte nicht zur Steuerung und Regelung eingesetzt werden, erhöhen die Messergebnisse das Verständnis über das Verhalten der Kläranlage bei verschiendensten Belastungssituationen. Dies erleichtert und beschleunigt auch die Anwendung der noch immer beliebten „trial and error“-Methode, d. h. der regelmäßigen händischen Anpassung der Zyklussteuerung etc.
- Die Daten können für eine Vielzahl weiterer Applikationen angewendet werden:
  - Controlling und Benchmarking („Wie gut ist meine Anlage im Vergleich zu anderen?“)
  - Nachrechnung und Optimierung der Anlage durch computergestützte Simulation
  - Schaffung von Datenpools, auf die im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten aufgebaut werden kann
  - Ermittlung der Reserven der Kläranlage
  - Überwachung, Ermittlung und Dokumentation der Emissionen aus der Kläranlage

6.4 Was gilt es beim Einsatz von Messtechnik zu beachten?

Bezüglich der Randbedingungen, Auswahlkriterien etc., die es bei der Auswahl eines Messgerätes für eine SBR-Kläranlage zu beachten gilt, wird auf Kapitel 3 verwiesen: Hier wurden für die einzelnen Messverfahren Hinweise gegeben. Ebenso finden sich dort zahlreiche Informationen zur analytischen Qualitätssicherung von online-Messgeräten.

6.5 Übersicht über übliche Mess- und Automationskonzepte

6.5.1 Zulauf

6.5.1.1 Füllstandsregelung

In nur wenigen Fällen ist es möglich, dass das Abwasser im freien Gefälle der Kläranlage zufließt, d. h. es ist meist erforderlich, das Abwasser zu Beginn des Reinigungsprozesses mit Hilfe eines Einlaufpumpwerks anzuheben. In der Bundesrepublik Deutschland erfolgt die Bemessung einer Kläranlage auf einen konstanten maximalen Zuflusswert, der sich in der Regel am Mischwasserzufluss orientiert. Auf diesen Wert erfolgt auch die Auslegung der Pumpen, wobei aus Sicherheitsgründen auch beim Ausfall einer Pumpe ein mindestens eingeschränkter Betrieb sichergestellt sein muss. Häufig werden bei SBR-Anlagen mit zwei Einlaufpumpen die Pumpen derart ausgelegt, dass jede Pumpe für sich alleine bereits den Bemessungszufluss fördern kann. Derart starr erfolgt in der Regel auch der Betrieb der Pumpwerke, unabhängig davon, ob auf der Kläranlage noch freie Behandlungskapazität vorhanden ist (Abbildung 6. 4).

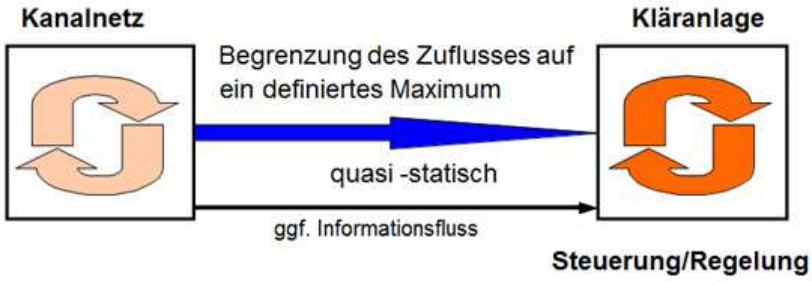


Abb. 6.4: Status Quo – Begrenzung des Zuflusses auf ein definiertes Maximum (Quelle: *Wiese [2004]*)

Bei Schneckenpumpwerken kommen in der Regel entweder leistungsgestaffelte Schnecken (z. B. eine Trockenwetterschnecke, eine Regenwetterschnecke) oder Schnecken mit verschiedenen Leistungsstufen (z. B. gleichartige Schnecken mit je zwei Leistungsstufen) zum Einsatz; die Wahl der jeweiligen Leistung bzw. das Umschalten zwischen den einzelnen Schnecken erfolgt in der Regel über die Vorgabe einfacher Sollwerte für den Füllstand im Einlaufbauwerk, wie folgende Beispiele zeigen:

Variante 1: Zwei verschieden große Schnecken

- 1 Stück Trockenwetterschnecke mit 100 l/s
- 1 Stück Mischwasserschnecke mit 200 l/s
- Beispielhafte Parametrierung:
  - wenn Füllstand im Pumpensumpf < 1,20 m → Trockenwetterschnecke an
  - wenn Füllstand im Pumpensumpf ≥ 1,20 m → Mischwasserschnecke an
  - wenn Füllstand im Pumpensumpf < 1,10 m → Mischwasserschnecke aus, Trockenwetterschnecke wieder an

Variante 2: Zwei gleich große Schnecken

- 2 Stück Schnecken mit je max. 100 l/s (1. Stufe: 50 l/s, 2. Stufe: 100 l/s)
- Beispielhafte Parametrierung:
  - wenn Füllstand im Pumpensumpf > 0,50 m → Schnecke 1 an, Stufe 2
  - wenn Füllstand im Pumpensumpf < 0,10 m → Schnecke 1 an, Stufe 1
  - wenn Füllstand im Pumpensumpf > 0,70 m → Schnecke 2 an, Stufe 1
  - wenn Füllstand im Pumpensumpf < 0,40 m → Schnecke 2 aus, Stufe 1
  - wenn Füllstand im Pumpensumpf > 0,90 m → Schnecke 2 an, Stufe 2
  - wenn Füllstand im Pumpensumpf < 0,60 m → Schnecke 2 aus, Stufe 1

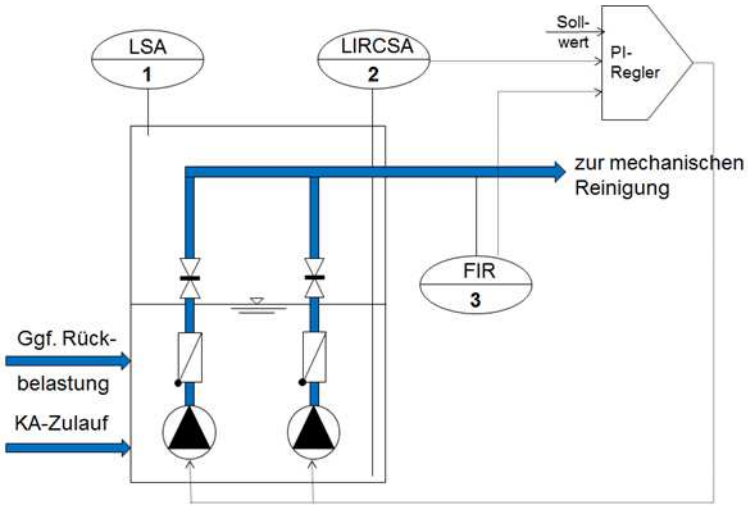


Abb. 6.5: Einlaufpumpwerk mit zwei abwechselnd betriebenen Tauchmotorpumpen, die über einen PI-Regler angesteuert werden. Vorgabewerte sind hier zum einen der maximale Durchfluss (als Begrenzung nach oben) und ein definierter Soll-wasserspiegel im Einlaufbauwerk (Bildquelle: Autor)

Bei trocken- oder nassaufgestellten Motorpumpen kann man ähnlich verfahren, jedoch kommen seit Jahren auch FU-geregelte Pumpen zum Einsatz (Abbildung 6.5). Diese Vorgehensweise kann diverse Vorteile bieten:

- Durch Vorgabe eines Sollwasserspiegels kann im täglichen Betrieb Energie eingespart werden, da ggf. die Leistung der Pumpen reduziert werden kann bzw. diese zeitweise auch ganz weggeschaltet werden können.
- Der Anstieg der Pumpmenge erfolgt in der Regel nicht auf einen Schlag, wie dies zum Beispiel beim Zuschalten einer zweiten Pumpe der Fall ist, sondern gedämpft. Dies ist vom Betrieb her für die nachgeschalteten Bauteile schonender (z. B. Rechen).

6.5.1.2 Bewirtschaftung von vorgelagerten Sonderbauwerken

Bei den SBR-Kläranlagen mit Mischkanalisation finden sich in aller Regel der Kläranlage vorgeschaltete, d. h. netzabschließende Sonderbauwerke zur Mischwasserbehandlung. Abbildung 6.6 zeigt ein weitverbreitetes Beispiel eines Durchlaufbeckens im Nebenschluss. Da in diesen Fällen der Drosselabfluss des letzten Sonderbauwerks in der Regel identisch ist mit der geförderten Zulaufmenge der Kläranlage, erfolgt eine Rückkopplung dieser beiden Systeme. D. h. die Zuflussmenge zum Regenüberlaufbecken, die die Zuflussmenge zur Kläranlage übersteigt, wird somit zunächst im Regenüberlaufbecken gespeichert. Sobald dieses Becken voll ist, erfolgte eine Entlastung der Restmenge in das Gewässer, sodass das Regenüberlaufbecken zu diesem Zeitpunkt nur noch als Sedimentationsbecken dient, d. h. die absetzbaren Stoffe zurückhält. Nach Ende des Regenereignisses erfolgt eine Entleerung des Beckeninhalts in Richtung der Kläranlage. Wegen des statischen Maximalzuflusses zur Kläranlage und der Rückkopplung ist die Bewirtschaftung dieser Becken heute einfach.

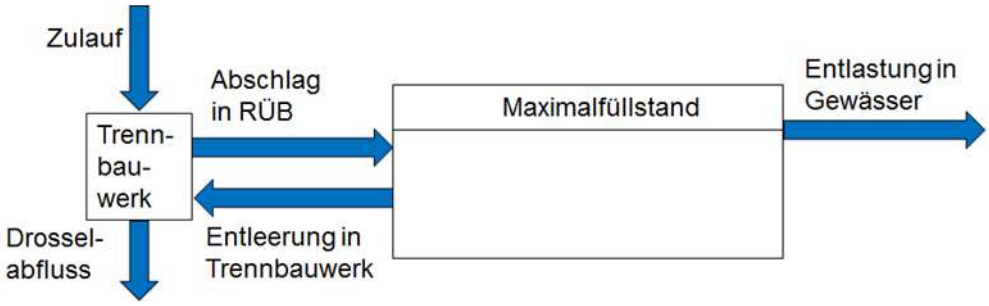


Abb. 6.6: Bewirtschaftung eines vorgelagerten Regenüberlaufbeckens (Durchlaufbecken im Nebenschluss) (Bildquelle: Autor)

Dennoch kann es auch hier im Einzelfall sinnvoll sein, über weitergehende Bewirtschaftungskonzepte nachzudenken:

- In Abhängigkeit der Struktur des Einzugsgebietes und der Wetterlage kann es immer wieder vorkommen, dass erhebliche Frachten in den Regenüberlaufbecken zurückgehalten werden; z. B. bei einem Regenereignis nach einer langen Trockenwetterperiode, während dessen es zu erheblichen Ablagerungen im Kanalnetz gekommen ist und ein hohes Schmutzpotenzial an der Oberfläche akkumuliert wurde. Um die Kläranlage in diesen Fällen nicht zu überfrachten, kann es sinnvoll sein, die Beckenentleerung entsprechend der jeweiligen Leistungskapazität der Kläranlage durchzuführen.
- In zusammenhängend entwässerten Siedlungsgebieten befinden sich auch im Kanalnetz meist noch vorgelagerte Sonderbauwerke (z. B. Stauraumkanäle). Die Praxis zeigt, dass aufgrund unterschiedlicher Strukturen (z. B. Wohnbebauung, Gewerbegebiete) und einer oft ungleichförmigen Überregnung diese Sonderbauwerke oft unterschiedlich stark ausgelastet sind und der Mischwasserabfluss zudem stark unterschiedlich verschmutzt sein kann. In diesen Fällen kann es sinnvoll sein, über eine Kanalnetzsteuerung nachzudenken. Beispielsweise kann eine Beckenverbundsteuerung eingerichtet werden, die dem Abfluss aus einem oberliegenden Becken, das noch nicht gefüllt ist, drosselt, um ein weiter unterliegendes Becken, das bereits überläuft, zu entlasten. Weitergehende Informationen über diese Thematik können *Schilling [1996]* entnommen werden.
- Im Kapitel 7 wird ein Beispiel vorgestellt, bei dem eine SBR-Kläranlage mit einer belastungsabhängigen Anlagensteuerung/-regelung ausgerüstet wurde. Hierdurch ist es möglich, die Zuflussmenge (zeitweise) deutlich zu erhöhen, was wiederum auch neue Möglichkeiten zur Bewirtschaftung der vorgelagerten Sonderbauwerke ermöglicht.

6.5.1.3 Früherkennung von Belastungsschwankungen

Aus dem diskontinuierlichen Prinzip der SBR-Technologie sowie den begrenzten Beckenvolumina (Vorlagebehälter, SB-Reaktoren) resultiert, dass eine Erhöhung und/oder eine dynamische Anpassung der hydraulischen Behandlungskapazität nur auf zwei verschiedenen Wegen erreicht werden kann:

- Erhöhung des Austauschvolumens durch ein stärkeres Absenken des Mindestwasserspiegels im SB-Reaktor. Da dies in der Regel mit einer Reduzierung der Reinigungsleistung (z. B. Denitrifikation) einhergeht und das Austauschvolumen aufgrund technischer Randbedingungen nicht beliebig erhöht werden kann, sind dieser Methodik Grenzen gesetzt.

- Alternativ kann die hydraulische Behandlungskapazität durch eine Verkürzung der Zyklusdauer (z. B. Trockenwetter: 8 h, Regenwetter: 6 h, 4 h o. ä.) erreicht werden.

Da bei Regenereignissen der Zulauf sehr schnell ansteigen kann, ist es daher sinnvoll, derartige Änderungen in der Belastungsschwankung möglichst früh zu erkennen. Auf vielen Kläranlagen werden die SB-Reaktoren vom Trocken- in einen verkürzten Regenwetterzyklus anhand der gemessenen aktuellen Zuflussmenge umgeschaltet. In einigen Fällen wird auch das Überschreiten eines bestimmten Wasserstands im Vorlagebehälter oder im Reaktor als Umschaltsignal verwendet. Da kurzfristige hydraulische Belastungsspitzen infolge des Anfahrens von Pumpen, kurzer Regenschauer etc. immer auftreten können, geschieht das Umschalten im ersten Fall jedoch oft nicht direkt über die aktuell gemessene Zuflussmenge, sondern anhand der Veränderung des Zuflusses in gewissen Zeitabständen. Derartige Konzepte lassen sich zwar einfach realisieren, haben aber den Nachteil, dass erst dann reagiert wird, wenn der Zufluss bereits über eine gewisse Zeit angestiegen ist[15].

Wiese [2004] hat daher verschiedene Varianten getestet, um den Umschaltprozess zu beschleunigen, wobei verschieden Informationen verwendet wurden:

- Durchfluss und Füllstand im Zulauf zur Kläranlage
- Einbindung von Niederschlagsdaten
- Einbindung von Daten aus dem Kanalnetz

Dabei konnte gezeigt werden, dass durch Kombinaton verschiedener Faktoren erhebliche Verbesserungen erzielt werden können bzw. deutlich früher umgeschaltet werden kann.

In den letzten Jahren kommen auf größeren Kläranlagen auch online-Messgeräte im Kläranlagenzulauf zum Einsatz, wie zum Beispiel:

- Ammonium
- CSB (z. B. über SAK und TS)
- Phosphat

Diese Messgeräte können – ggf. auch in Kombination mit pH, Leitfähigkeit und Temperatur – für folgende Mess- und Automationsaufgaben zum Einsatz kommen:

- Identifikation von illegalen Einleitungen in die Kanalisation (z. B. Gülle)
- Erkennung von Belastungsspitzen (z. B. Spülstößen)
- Bewirtschaftung von Vorlagebehältern
- Beschickung von Störfall- oder Havariebecken
- Einflussgröße für die Zyklussteuerung (z. B. Umschaltung Regenwetter/Trockenwetter)

Hierbei gilt es zu beachten, dass das Messen im Zulauf zur Kläranlage aufgrund der widrigen Randbedingungen sehr viel schwieriger ist als direkt im SB-Reaktor oder im Kläranlagenablauf.

Cohen et al. [1997] berichten über den Einsatz eines neuronalen Netzes als Hilfsmittel bei der online-Simulation einer SBR-Anlage. In diesem Projekt ging es darum, die stoffliche Belastung der Kläranlage Morrinsville (Neuseeland) vorherzusagen, die maßgeblich durch einen Molkereibetrieb verursacht wurde. Als Eingangswerte für das neuronale Netz dienten online-

[15] Die nachfolgenden Ausführungen stammen im Wesentlichen aus *Wiese [2004]*.

Messungen im Ablauf der Molkerei. Die vom neuronalen Netz prognostizierten Belastungen im Kläranlagenzulauf lieferten die Eingangsgrößen für ein einfaches Kläranlagenmodell, dass nur die ungefähren Prozesse abbildete und nicht für Zwecke der Echtzeit-Steuerung bzw. -Regelung eingesetzt wurde. Die Modellergebnisse wurden jedoch dazu verwendet, die Zyklusdauer den zu erwartenden Belastungen anzupassen.

Kim et al. [2005B] beschäftigen sich mit der Vorhersage der Zulaufmenge und Zulaufkonzentration (CSB, NH_4-N und PO_4-P). Auf Basis von 250 Tagen großtechnischer Ergebnisse (150 Tage Kalibrierung, 100 Tage Validierung) wurde ein Tool auf Basis von Zeitreihenanalysen erstellt.

Im Abschnitt 7.5.3 wird ein weiteres Modell vorgestellt, das auf Basis von Case-Based-Reasoning, einer weiteren Form Künstlicher Intelligenz, den Zulauf auf Tagesbasis für Trockenwettertage vorhersagt. Diese Prognose ist zwar nicht hilfreich für die Vorhersage von Regenereignissen, ist aber zielführend bezüglich der Prognose anderer Belastungszustände (z. B. Trockenwetterperiode → automatisches Umschalten in einen Schwachlastzyklus, Anpassung des Austauschvolumens).

6.5.2 Beschickung der SBR-Reaktoren

In Abbildung 5.3 wurden die gebräuchlisten Grundformen der SBR-Technik vorgestellt. Bei den drei Verfahren mit kontinuierlichen Zufluss, wie sie im kommunalen Bereich aufgrund der Randbedingungen dominant sind, unterscheidet man nach *Merkblatt ATV-M 210 [1997]* drei Formen der Beschickung:

- Kontinuierliche Beschickung
- Schubweise Beschickung ohne Vorlagebehälter
- Schubweise Beschickung mit Vorlagebehälter

Nachfolgend werden die daraus resultierenden Beschickungsstrategien kurz vorgestellt.

6.5.2.1 Kontinuierliche Beschickung

Bei der kontinuierlichen Beschickung erfolgt der Zufluss in die Reaktoren über die gesamte Zyklusdauer im Reaktor. Da während des eigentlichen Abwasserreinigungsprozesses, d. h. während der belüfteten und unbelüfteten („Mischen“) Phasen sowie während der Sedimentationsphase ebenfalls Rohabwasser dem Reaktor zufließt, steigt folglich der Wasserspiegel im Reaktor kontinuierlich an. Nach einer bestimmten Sedimentationsdauer erfolgt dann der Klarwasserabzug bzw. die Entleerung des Reaktors, in der Regel bis auf das vorgegebene Mindestniveau. Der hieraus resultierende Zyklusplan, der einfach in eine Schrittkettensteuerung übertragbar ist, kann Abbildung 6.7 entnommen werden. Allerdings findet bei dieser Verfahrensvariante auch eine Zugabe von Rohabwasser während der Klarwasserabzugsphase statt, was zwangsläufig die Gefahr einer Verschlechterung der Ablaufqualität birgt. Zum Teil kann hier durch konstruktive Verfahren (z. B. Abtrennung des Einlaufbereichs durch eine Tauchwand zur Reduzierung der Gefahr von Kurzschlussströmungen) entgegengewirkt werden (*Merkblatt ATV-M 210 [1997]*). Wegen dieses Nachteils ist diese Variante heute mit Ausnahme der in Teilen Deutschlands (z. B. Osthessen) noch existierenden Aufstauoxidationsgräben nur noch selten anzutreffen.

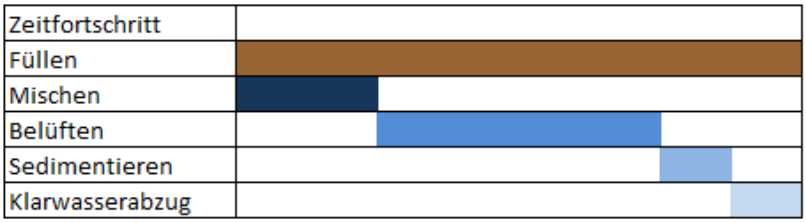


Abb. 6.7: Zyklusplan für eine SBR-Anlage mit kontinuierlicher Beschickung (nach *Merkblatt ATV-M 210 [1997]*)

6.5.2.2 Schubweise Beschickung ohne Vorlagebehälter

Bei SBR-Anlagen mit mindestens zwei Reaktoren besteht die Möglichkeit, einer schubweisen, d. h. einer diskontinuierlichen Beschickung der Reaktoren, auch wenn kein Vorlagebehälter vorhanden ist. In diesem Fall werden die Reaktoren abwechselnd beschickt, wie der exemplarische Zyklusplan in Abbildung 6.8 zeigt: Es wird deutlich, dass in diesem Fall sich die Beschickungsphase auf die Hälfte der Zyklusdauer beschränkt, sodass sichergestellt ist, dass kein Rohabwasser ohne eine Mindestreinigungsdauer den Reaktor verlässt. Bei mehr als zwei Reaktoren ergibt sich die Fülldauer in der Regel durch Teilung der Zyklusdauer durch die Anzahl der Reaktoren. Diese Form der Beschickung bietet zudem den Vorteil, dass in der ersten Phase ein deutlicher Konzentrationsanstieg erzielt werden kann, was sich in mehrfacher Hinsicht positiv auf den Abwasserreinigungsprozess auswirkt (siehe Abschnitt 5.4); dies gilt besonders wenn zu Beginn der Füllung zunächst die Rührwerke nicht eingeschaltet werden („Statisches Beschicken“) und das Einleiten des Rohabwassers nahe an der Beckensohle in das Schlammbett, d. h. den während der Sedimentationsphase abgesetzten Belebtschlamm, erfolgt (*Merkblatt ATV-M 210 [1997]*). Auch diese Form der Beschickung lässt sich einfach mit Hilfe von Ablaufsteuerungen realisieren, allerdings gilt es dabei zu beachten, dass die einzelnen Ablaufsteuerungen der Reaktoren zeitlich aufeinander abgestimmt werden müssen („Synchronisation“).

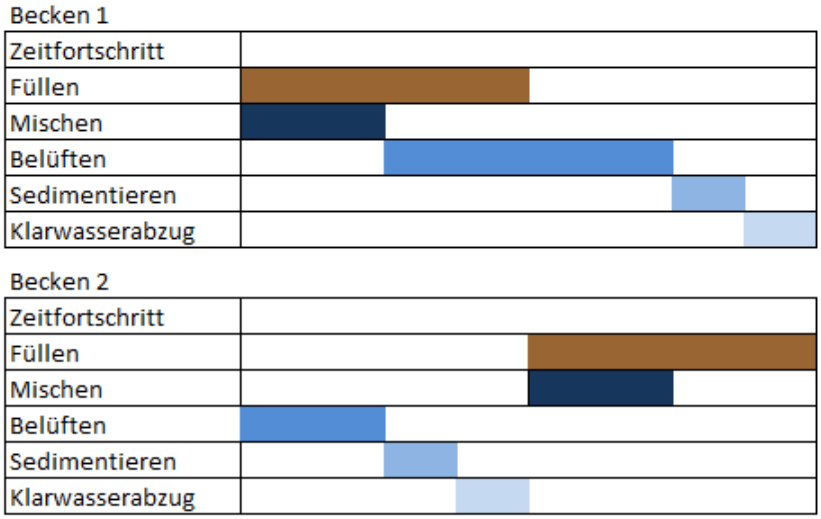


Abb. 6.8: Zyklusplan für eine SBR-Anlage mit einer schubweisen Beschickung ohne Vorspeicher mit zwei SB-Reaktoren (nach *Merkblatt ATV-M 210 [1997]*)

6.5.2.3 Schubweise Beschickung mit Vorlagebehälter

Bei Anlagen mit weniger als drei Reaktoren kommen meist Vorlagebehälter zum Einsatz, dies gilt besonders in Deutschland, wo die Mischkanalisation weit verbreitet ist (Abb. 6.9). Der Vorlagebehälter erhöht die betriebliche Flexibilität deutlich, u. a. bietet er die Möglichkeit, den Substratdruck zu Beginn eines Zyklus noch einmal deutlich zu erhöhen, indem das Abwasser stoßweise in einer sehr kurzen Zeit (z. B. weniger als 1 h) dem Reaktor zugegeben wird, d. h. durch die Entkopplung von der Hydraulik kann der Reinigungsprozess optimiert werden (*Merkblatt ATV-M 210 [1997]*). So ist es bei diesem Verfahren auch möglich, eine Beschickung während der Zyklusdauer mehrfach zu wiederholen. So sind zwei bis drei kurze Beschickungsphasen im Wechsel mit unbelüfteten und belüfteten Phasen nicht unüblich, um die Stickstoffeliminationsleistung noch einmal zu steigern. Schließlich bietet der Vorlagebehälter innerhalb gewisser Grenzen die Möglichkeit, die einzelnen Reaktoren voneinander zu entkoppeln. Dies ist insbesondere im Hinblick auf eine dynamische Prozessführung hilfreich (siehe auch Kapitel 7).

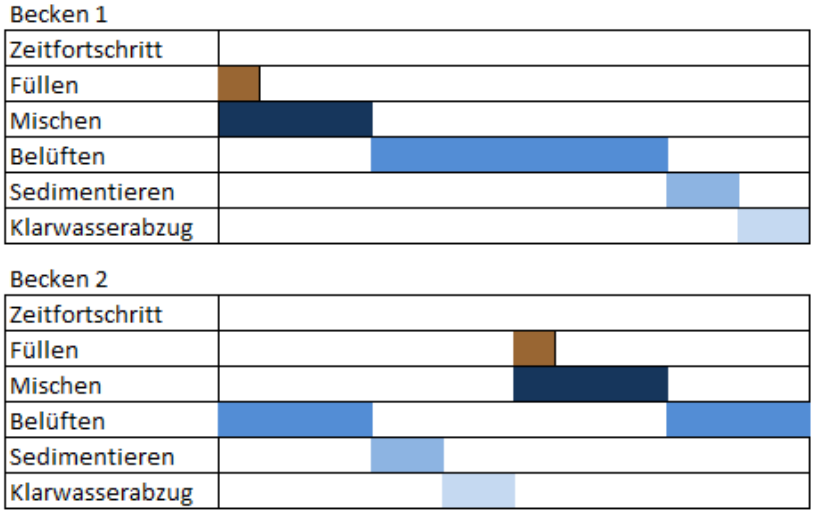


Abb. 6.9: Zyklusplan für eine SBR-Anlage mit einer schubweisen Beschickung mit Vorspeicher und zwei SB-Reaktoren (nach *Merkblatt ATV-M 210 [1997]*)

Die Bewirtschaftung dieser meist durch Pumpen entleerten Zuflussspeicher erfolgt oft in Abhängigkeit verschiedener Parameter (Abbildung 6.10):

- **Zeit:** Ein jeder SBR-Zyklus sieht zu bestimmten Teilschritten eine Beschickung des Reaktors vor. Sieht der jeweilige Zyklusschritt eine Beschickung vor, so erfolgt ein Freigabesignal vom SB-Reaktor.
- **Füllstand Vorlagebehälter:** Liegt der Füllstand im Vorlagebehälter über dem Mindestfüllstand und liegt ein Freigabesignal vom SB-Reaktor an, so erfolgt eine Beschickung des jeweiligen SB-Reaktors bis der Mindestfüllstand im Vorlagebehälter erreicht wird.
- **Füllstand SB-Reaktor:** Wird der maximale Füllstand im Reaktor erreicht – gemessen über eine kontinuierliche Messung und/oder eine Grenzfüllstandsmessung – so erfolgt eine Zwangsabschaltung der Beschickung.

- **Grenzfüllstandsmessung Vorlagebehälter:** Ist der Maximalfüllstand im Vorlagebehälter erreicht, so kann auch unabhängig vom Freigabesignal der SB-Reaktoren eine Zwangsbeschickung eingeleitet werden, sofern noch freie Volumen in den Reaktoren vorhanden sind. Ist dies nicht möglich, so wird der Zufluss zum Vorlagebehälter automatisch abgeschaltet, um eine Überfüllung des Vorlagebehälters zu verhindern.

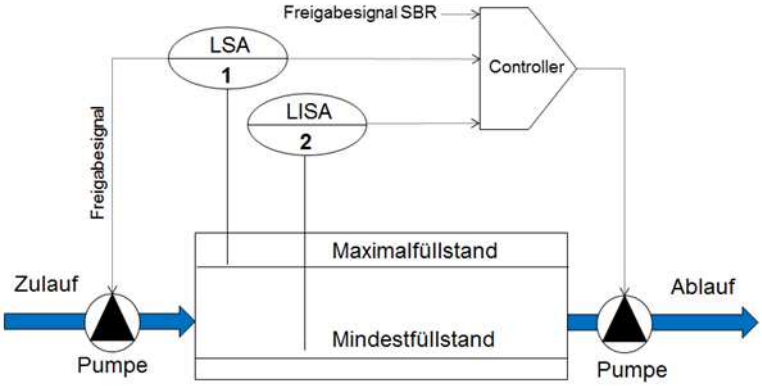


Abb. 6.10: Beispiel einer zeit-/füllstandsbasierten Bewirtschaftung eines Zuflussspeichers (Bildquelle: Autor)

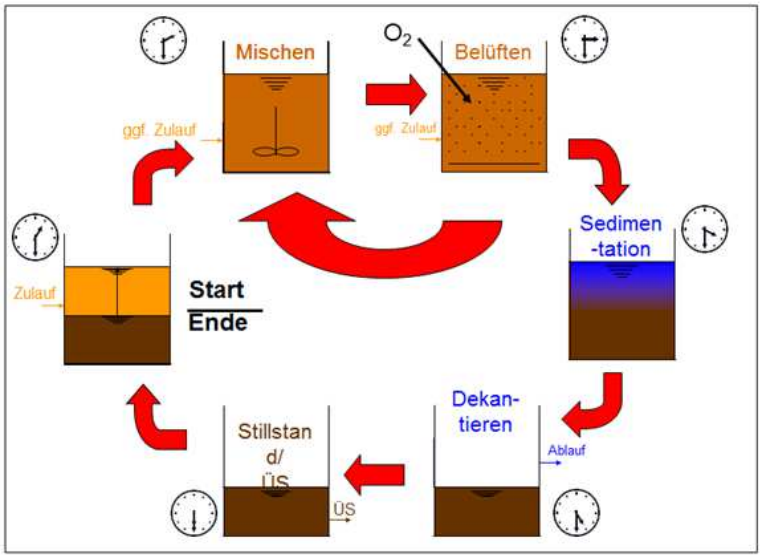
Um Ablagerungen zu vermeiden, sind die Vorlagebehälter meist mit Rührwerken ausgestattet, die im Automatikmodus in der Regel im Takt-Pause-Betrieb betrieben werden. Alternativ ist auch eine Kopplung an den Prozess möglich (z. B. Anlaufen des Rührwerks vor und während einer Reaktorbeschickung). Voraussetzung ist immer, dass ein ausreichender Füllstand vorhanden ist, damit die Rührwerke nicht trockenlaufen. Einzelne Anlagenbauer und Planer bewirtschaften die Vorlagebehälter auch nach anderen Kritieren (z. B. Bewirtschaftung des Speicherbeckens anhand normierter Tagesganglinien) oder nutzen den Vorlagebehälter gar für biologische Zwecke (z. B. durch die Rückführung von Belebtschlamm). Zum Beispiel wird beim DIC-SBR-Verfahren (*Holm et al. [2000]*) ein typischer Tagesgang im Leitsystem definiert, mittels dem die Beschickung der Reaktoren bzw. ggf. die Bewirtschaftung des Vorspeichers erfolgt.

6.5.3 Steuerungen und Regelungen für SB-Reaktoren

6.5.3.1 Schrittkettensteuerung

Kernstück der Automatisierung einer jeden SBR-Kläranlage ist die Steuerung (und ggf. Regelung) der Abläufe im SB-Reaktor oder ggf. auch von mehreren Reaktoren. Auf den meisten SBR-Kläranlagen kommt hierzu eine klassische Schrittkettensteuerung zum Einsatz, die sich in der Regel bezüglich der Schrittart als auch der Schrittfolge am SBR-Zyklus (Abbildung 6.11) orientiert. D. h. in der Regel werden in einer Ablaufsteuerung die in Tabelle 6.3 aufgelisteten Schritte in einer bestimmten zeitlichen Reihenfolge abgearbeitet; danach beginnt alles wieder von vorn. Im einfachsten Fall geschieht dies dadurch, dass eine Schrittkette mit einer definierten Anzahl von Schritten vorgegeben wird: Der Benutzer kann dann durch einfaches Anklicken der jeweiligen Schrittart und Eingabe der jeweiligen Dauer des Teilschrittes sich eine nahezu beliebige Schrittkette zusammenstellen. So transparent und einfach diese Vorgehensweise einerseits im Sinne der Mensch-Maschine-Bedienung ist, so viel Erfahrung ist für eine effiziente Parametrierung erforderlich, denn theoretisch lassen sich

beliebige Schrittkettenabläufe definieren, die nicht zwangsläufig effizient und zielführend sein müssen; ggf. kann durch eine falsche Abfolge auch eine Störung hervorgerufen werden.



Schritt	Trockenwetter Verfahrens-anweisung	Schrittzeit	abgel. Zeit
1	Beschicken und Mischen	30	29
2	Mischen	30	29
3	Beschicken und Belüften	30	29
4	Belüften	30	29
5	Beschicken und Belüften	30	29
6	Belüften	30	29
7	Beschicken und Belüften	30	29
8	Belüften	30	29
9	Belüften	15	14
10	Belüften	90	89
11	Sedimentation	60	58
12	Dekantieren	60	0
13	USS-Abzug	15	0
14	Pause	0	0
15	Pause	0	0
16	Pause	0	0
17	Pause	0	0
18	Pause	0	0
19	Pause	0	0
20	Pause	0	0
21	Pause	0	0
	einmalige Wartezeit	20	0

Abb. 6.11: SBR-Zyklus mit zeitlicher Ablaufsteuerung (links) und exemplarischer Schrittkette (rechts) (Bildquellen: Autor)

Ggf. müssen daher bestimmte kritische Abfolgen (z. B. Klarwasserabzug direkt nach vollduchmischten Zustand ohne den Zwischenschritt der Sedimentation) abgefangen werden. Um den täglichen Ablauf für das Betriebspersonal nachvollziehbar zu gestalten, empfiehlt es sich zudem, die Gesamtdauer der Schrittkette in ganzen Stunden zu wählen, die sich einfach durch 24 h teilen lassen; dies ermöglicht besonders bei nicht ständig besetzten Kläranlagen die Einteilung bzw. Vorplanung der täglichen Arbeit (z. B. händische Bestimmung von TS und VSV). Besonders beliebt sind daher Zyklusdauern von 4 h, 6 h, 8 h oder 12 h. Die einzelnen Schrittketten werden dabei jeweils für jeden einzelnen SB-Reaktor hinterlegt, wobei jedoch in der Regel eine zeitliche Synchronisation erfolgt, um sicherzustellen, dass die Reaktoren nicht parallel zu einander arbeiten. Um einen maximalen hydraulischen Durchsatz sicherzustellen, ist es daher weit verbreitet, den zeitlichen Versatz entsprechend proportional der Reaktoranzahl zu wählen (z. B. 8 Stunden-Zyklus und 2 Reaktoren: Der zweite Reaktor folgt dem ersten Reaktor mit einem Zeitversatz von 4 Stunden). Darüber hinaus ist es üblich, für jeden Reaktor mehr als eine Schrittkette zu hinterlegen, um flexibel auf Belastungsschwankungen reagieren zu können; automatisch und/oder händisch kann die Behandlungskapazität dadurch angepasst werden. In *Merkblatt ATV-M 210 [1997]* wird davon abgeraten, einen Zyklus mit einer Dauer von 6 h bzw. 12 h zu wählen, da hierdurch die Reaktoren ungleich stark belastet würden: Der Autor kann diese Auffassung nicht teilen, da die Praxis auch Beispiele kennt, dass bei einem 8 h Zyklus dieses Phänomen ebenfalls auftreten kann. Im Übrigen besteht bei einer leistungsfähigen Automatisierung immer die Möglichkeit, während einer Trockenwetterphase auch die Reaktoren zu tauschen bzw. einen Reaktor auch einmal nicht zu beschicken, um hierdurch die Belastung der Reaktoren auszugleichen.

Tab. 6.3: Übersicht über verschiedene Formen von Schritten und die daraus resultierende Ansteuerung der wichtigsten Aggregate (1 = An, 0 = Aus) (Quelle: Autor)

Schrittart	Beschickung	Rührwerk	Belüftung	Dekanter	ÜS-Abzug
Statisches Beschicken	1	0	0	0	0
Beschicken und Mischen	1	1	0	0	0
Beschicken und Belüften	1	0	1	0	0
Beschicken, Mischen & Belüften	1	1	1	0	0
Belüften	0	0	1	0	0
Belüften und Mischen	0	1	1	0	0
Sedimentation	0	0	0	0	0
Klarwasserabzug	0	0	0	1	0/1
Überschussschlammabzug	0	0	0	0	1
Pause	0	0	0	0	0

In der Regel kommen dabei mindestens zwei Programme zum Einsatz:

- Trockenwetterzyklus: Standschrittkettensteuerung, die in der meisten Zeit abgearbeitet wird. Ein Beispiel hierfür zeigt Tabelle 6.4.
- Regenwetterzyklus: Um die hydraulische Behandlungskapazität zu erhöhen, wird die Gesamtdauer der Schrittkette reduziert; ggf. werden auch andere Schrittarten eingeführt (Tabelle 6.5).
- Sonderzyklen: Typisch ist hier zum Beispiel der Schwachlastzyklus, der dann zum Einsatz kommt, wenn nur wenig Abwasser anfällt (z. B. Urlaubszeit). Im Extremfall wird dann der SBR in Wartestellung gehalten bzw. im Leerlauf betrieben und nur gelegentlich belüftet.

Tab. 6.4: Exemplarische Schrittkettensteuerung eines SB-Reaktors bei Trockenwetter (Quelle: Autor)

Zyklusschritt	**Dauer**	**Trockenwetter**
Statisches Beschicken	min	20
Mischen und Beschicken	min	20
Belüften	min	80
Beschicken	min	20
Beschicken und Belüften	min	20
Mischen und Belüften	min	30
Belüften	min	50
Beschicken	min	5
Mischen und Beschicken	min	5
Mischen und Belüften	min	30
Belüften	min	55
Sedimentieren	min	77
Dekantieren	min	60
ÜS-Abzug	min	7
Pause	min	1
Gesamtdauer	**min**	**480**

Um auch hier die Synchronisation der Reaktoren aufrecht zu erhalten, so werden mit einem entsprechenden Zeitversatz alle Reaktoren in das aktuelle Programm umgeschaltet.

Beispiel: Der Reaktor 1 wird infolge Mischwasserzuflusses nach dem Ende eines Trockenwetterzyklus in den verkürzten Regenwetterzyklus umgestellt. Entsprechend folgt der zweite Reaktor, sobald er seinen aktuellen Trockenwetterzyklus beendet hat. Mit der Rückschaltung nach Ende eines Regenereignisses läuft es entsprechend: D. h. erst schaltet der Reaktor 1 mit Beginn eines neuen Zyklus wieder in den Trockenwetterbetrieb, dann der Reaktor 2.

Abb. 6.12: Exemplarischer Auszug aus einer Schrittkettensteuerung: Der Benutzer kann durch Anklicken der jeweiligen Schrittart und der Eingabe einer Schrittdauer die Schrittkettensteuerung einfach seinen individuellen Bedürfnissen anpassen. (Bildquelle: Autor)

Tab. 6.5: Exemplarische Schrittkettensteuerung eines SB-Reaktors bei Regenwetter (Quelle: Autor)

Zyklusschritt	**Dauer**	**Regenwetter**
Statisches Beschicken	min	1
Mischen und Beschicken	min	16
Mischen	min	1
Beschicken und Belüften	min	33
Belüften	min	25
Beschicken und Belüften	min	51
Belüften	min	25
Mischen und Beschicken	min	18
Beschicken und Belüften	min	33
Belüften	min	25
Sedimentieren	min	48
Dekantieren	min	76
ÜS-Abzug	min	5
Pause	min	3
Gesamtdauer	**min**	**360**

6.5.3.2 Beschickungsphase

Bei SB-Reaktoren sind verschiedene Beschickungsarten möglich:

- **Statischen Beschicken:** Hier erfolgt eine Beschickung des Reaktors, ohne dass ein Rührwerk oder die Belüftung in Betrieb ist. Hierdurch soll zum einen ein Substratdruck erzeugt werden und zum anderen ein anaerobes Milieu eingestellt werden, da die biologische Phosphatrücklösung durch die Anwesenheit von leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen im Rohabwasser begünstigt wird. Um diesen Effekt zu begünstigen, kann die Zufuhr des Rohabwassers bodennah, d. h. in das abgesetzte Schlammbett erfolgen, da hier in der Regel zu Beginn eines neuen Zyklus bereits anaerobe Verhältnisse herrschen. Diese Art der Beschickung wird daher gerne am Anfang eines neuen Zyklus angewendet; im weiteren Verlauf des Zyklus ist dieser hingegen nicht mehr vorteilhaft.
- **Beschicken und Rühren:** Hier erfolgt eine Beschickung des Reaktors, während mindestens ein Rührwerk läuft; in diesem Schritt erfolgt eine Denitrifikation. Dieser Schritt wird gerne dem statischen Beschicken (quasi als vorgeschaltete Denitrifikation) oder nach einer Nitrifikationsphase (quasi als intermittierende Denitrifikation) nachgeschaltet.
- **Beschicken und Belüften:** Dieser Schritt kommt in der Regel nur dann zum Einsatz, wenn eine sichere Einhaltung der Stickstoffüberwachungswerte nicht gefährdet ist. Typisches Beispiel ist hierbei die Anwendung bei Mischwasserzufluss, bei dem in der Regel niedrige Stickstoffkonzentrationen im Zulauf auftreten. Wählt man diesen Schritt, so geht es in der

Regel darum, die Zyklusdauer auf ein Minimum zu verkürzen und/oder das Gesamtvolumen der Reaktoren möglichst vollständig auszunutzen.

- **Beschicken, Rühren und Belüften:** Dies stellt eine Sonderform dar, die besonders bei Rundbecken Anwendung finden kann. Hier kann durch das Zuschalten eines Rührwerkes eine Kreisbewegung erzielt werden, in deren Folge der Sauerstoffeintrag verbessert werden kann. Ausschlaggebend hierfür ist die Frage, ob der verbesserte Sauerstoffeintrag höher ist als die Zusatzkosten, die durch das Zuschalten eines Rührwerks entstehen.
- **Außerplanmäßige Beschickung:** Normalerweise erfolgt eine Beschickung der SB-Reaktoren nur in bestimmten Zyklusschritten. In Einzelfällen kann es jedoch sinnvoll sein, eine außerplanmäßige Beschickung zu jedem Teilschritt der biologisch aktiven Phase (d. h. ohne Sedimentation und Klarwasserabzug) sowie in den Pausenzeiten zuzulassen. In der Praxis erfolgt eine außerplanmäßige Beschickung zum Beispiel dann, wenn in Folge von Mischwasserzufluss der Vorlagebehälter voll ist und in einem oder gar mehreren SB-Reaktoren noch freie Behandlungskapazität vorhanden ist.

Um den Reinigungsprozess zu optimieren und die hydraulische Kapazität auszulasten, werden oft mehrere Beschickungsphasen in eine Schrittkette eingebaut (siehe Tab. 6.4 und 6.5).

6.5.3.3 Denitrifikationsphase

In der Denitrifikationsphase erfolgt durch die Rührwerke eine kontinuierliche Durchmischung der Rührwerke; alternativ kann auch durch Stoßbelüftungen eine Durchmischung sichergestellt werden. Zur Verbesserung der Denitrifikation kann es sinnvoll sein, eine kurze Beschickung mit Rohabwasser durchzuführen; dies gilt besonders dann, wenn die Denitrifikationsphase einer längeren belüfteten Phase folgt, während der bereits ein Teil der leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen abgebaut wurde. In der Regel ergibt sich die Dauer aus einer in der Schrittkettensteuerung vorgegebenen Dauer.

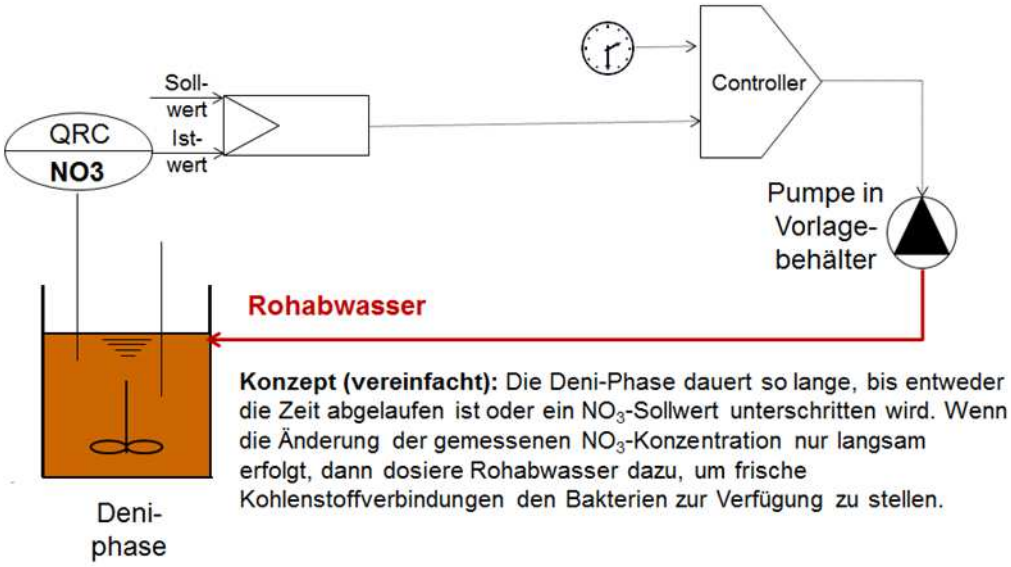


Abb. 6.13: Grobkonzept einer Steuerung und Regelung der Denitrifikationsphase (Bildquelle: Autor)

Im gewissen Umfang gibt es jedoch auch andere Möglichkeiten der Steuerung und der Regelung dieser Phase (Abbildung 6.13):

- Durch den Einsatz von Messgeräten für NO_3-N oder Redox besteht die Möglichkeit, diesen Schritt vorzeitig abzubrechen oder ganz zu überspringen, wenn ein definierter Sollwert unterschritten wird (z. B. < 2 mg/l NO_3-N).
- Weiterhin besteht die Möglichkeit bei zu hohen NO_3-N-Konzentrationen und/oder einem zu langsamen Rückgang der NO_3-N-Konzentration leicht-abbaubare Kohlenstoffquellen zu dosieren (z. B. externe Kohlenstoffquellen bei der Trübwasserbehandlung oder Rohabwasser bei der normalen Abwasserreinigung).

6.5.3.4 Belüftungsphase

Wie bereits ausgeführt, sind bei SB-Reaktoren verschiedene Belüftungsschritte möglich:

- **Belüften:** Diese Phase dient dem Abbau sauerstoffzehrender Substanzen sowie der Nitrifikation. Weiterhin findet während dieser Phase die biologische Phosphataufnahme statt.
- **Belüften und Befüllen:** siehe Abschnitt 6.5.3.2
- **Belüften, Mischen und Befüllen:** siehe Abschnitt 6.5.3.2

Auch wenn die Dauer der belüfteten Phase in der Regel gesteuert wird, so findet hier in den meisten Fällen erstmals eine Regelungskomponente Anwendung. Da dieser Schritt die Zuführung von Sauerstoff – in Regel durch Lufteintrag – erfordert, ist er energieintensiv. D. h. über die Messung der Sauerstoffkonzentration (und ggf. über NH_4-N bzw. Redox) wird die Luftzufuhr der Gebläse geregelt. Aufgrund der verfahrenstechnischen Randbedingungen, ist das Maß der Sauerstoffzehrung über den gesamten Zyklus sehr unterschiedlich, denn die Geschwindigkeit des Anstiegs und der Verlauf der Sauerstoffkonzentration im SB-Reaktor in der belüfteten Phase hängt maßgeblich von der Verschmutzung des zugeführten Abwassers ab. Sehr anschaulich verdeutlichen dies die beiden folgenden Extremfälle.

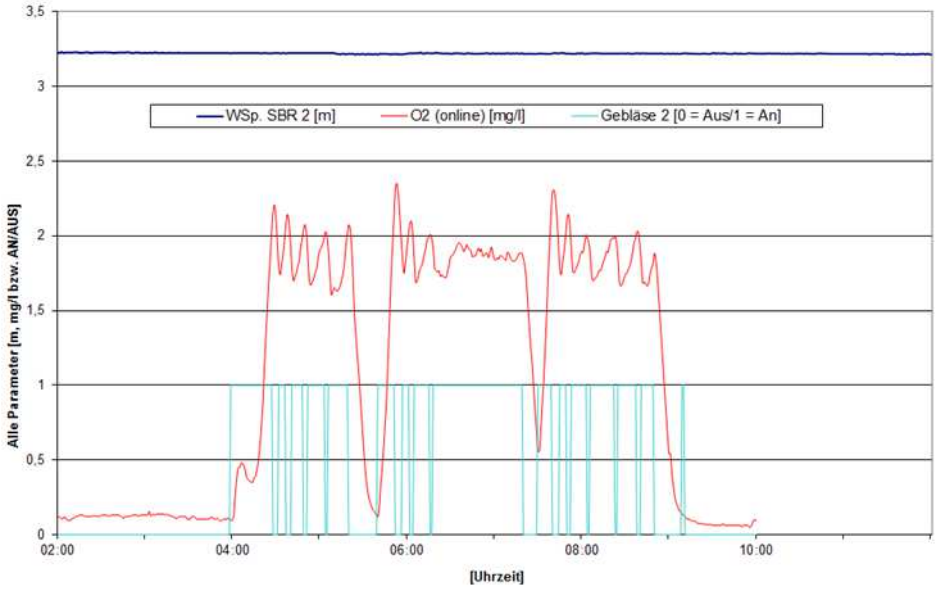


Abb. 6.14: Verlauf der Sauerstoffkonzentration im Verlauf eines Schwachlasttages (nach *Wiese [2004]*)

Schwachlastzyklus bzw. Leerlaufzyklus

In diesem Beispiel (Abbildung 6.14) erfolgte keine Beschickung im SBR 2 einer Klärnlage. Das Grundlastgebläse 2, welches dem SBR 2 fest zugeordnet ist, erreicht aufgrund der fehlenden Abwasserlast jeweils schon nach kurzer Zeit den Sauerstoffsollwert von 1,8 mg/l, sodass das Gebläse wiederholt während der Belüftungsphase abschaltet.

Hochlastzyklus

Das genaue Gegenteil stellt das Beispiel aus Abbildung 6.15 dar: Zu Beginn eines Zyklus erfolgt eine Beschickung des Reaktors mit konzentrierten Abwasser, sodass die Sauerstoffregelung bereits nach kurzer Zeit (kurz nach 9 Uhr) neben dem Grundlastgebläse auch noch das Reservegebläse anfordert. Trotzdem steigt die Sauerstoffkonzentration aufgrund der hohen Sauerstoffzehrung nur langsam an. Nachdem eine kurze zweite Beschickung in einer gerührten, unbelüfteten Phase erfolgt, sinkt die Sauerstoffkonzentration wieder ab. In der sich daran anschließenden zweiten Belüftungsphase holt die Sauerstoffregelung wiederholt das Reservegebläse. Gegen 12:30 Uhr ist die Restverschmutzung des Abwassers weitgehend abgebaut: Innerhalb kurzer Zeit steigt die Sauerstoffkonzentration auf den Sollwert des Reglers von 1,8 mg/l O_2. Der Umstand, dass die Sauerstoffkonzentration erst gegen Ende der biologisch aktiven Phase im Zyklus erreicht wird, muss dabei nicht nachteilig sein, da niedrige Sauerstoffkonzentrationen (< 0,5 mg/l O_2) eine simultane Denitrifikation begünstigen.

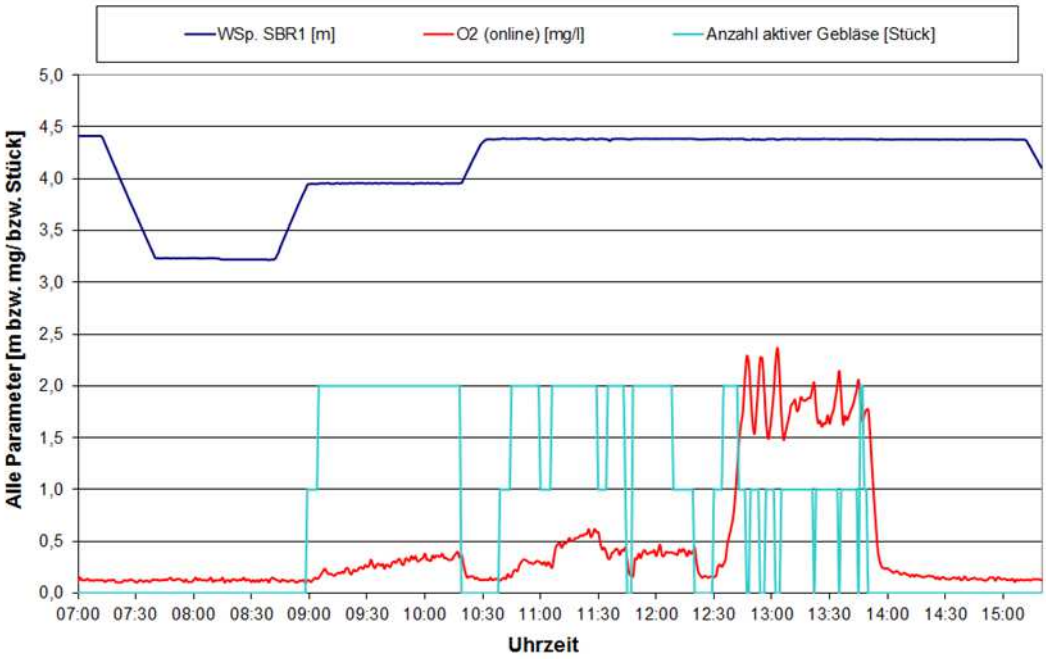


Abb. 6.15: Verlauf der Sauerstoffkonzentration im Verlauf eines Hochlastzyklus (Bildquelle: Autor)

Nachfolgend werden einzelne Reglerkonzepte vorgestellt, wobei nahezu allen Konzepten gemein ist, dass innerhalb einer definierten Gesamtdauer für die belüfteten Phasen nur die Dauer der Belüftung variiert wird, nicht aber die Zyklusdauer dynamisch angepasst wird. D.h. bei der Basis handelt es sich in der Regel weiter um eine zeitbasierte Schrittkettensteuerung mit einer überlagerten Regelung, die Dauer und Intensität der Belüftung regelt:

Zwei- und Mehrpunktregler

Schleypen et al. [1996] beschreiben den Einsatz eines Zweipunktreglers, d. h. beim Erreichen eines Maximalwertes schaltet das Gebläse ab, bei Unterschreitung eines Sollwertes schaltet das Gebläse wieder ab.

Über den Einsatz und die Einbindung von Redox-Messgeräten in die Steuerungs- und Regelungstechnik auf SBR-Anlagen berichten *Demoulin et al. [1997]*, die auf der österreichischen Kläranlage Großarl die Ergebnisse der Redox- und O_2-Messungen dazu nutzen, um die Nährstoffelimination zu optimieren. Die Anpassung geschah über eine Veränderung der Einschaltpunkte der konventionellen Belüftungsregelung.

Mangels [2012] berichtet über eine Optimierung der Belüftungsphase für Zwecke der Energieoptimierung: Durch die Nachrüstung einer NH_4-N-Elektrode wurde die Zyklussteuerung derart modifiziert, dass während der 1. Nitrifikationsphase in einem Zyklus die Belüftung dann abgeschaltet wird, wenn eine Konzentration von 1,3 mg/l NH_4-N unterschritten wird; während der 2. Nitrifikationsphase (und in dieser Schrittkettensteuerung letzten Belüftungsphase) werden die Gebläse abgeschaltet, wenn eine Konzentration von 0,7 mg/l NH_4-N unterschritten wird. Durch diese Zusatzkomponente kann die Gebläselaufzeit pro Jahr um 1.500 Stunden reduziert werden, was Energie- und Wartungskosten spart.

PI-/PID-Regler

Weit verbreitet ist die Ansteuerung der Gebläse über PI- bzw. PID-Regler, der auf einer Sauerstoffmessung aufbaut; bei den Beispielen aus Abbildung 6.14 und 6.15 kam beispielsweise ein PID-Regler zum Einsatz. Die Belüftung erfolgte zunächst mit dem Grundlastgebläse, steigt der Sauerstoffwert innerhalb einer bestimmten Zeit (z. B. 10 min) nicht signifikant an, so wird automatisch auch noch das Reservegebläse geholt.

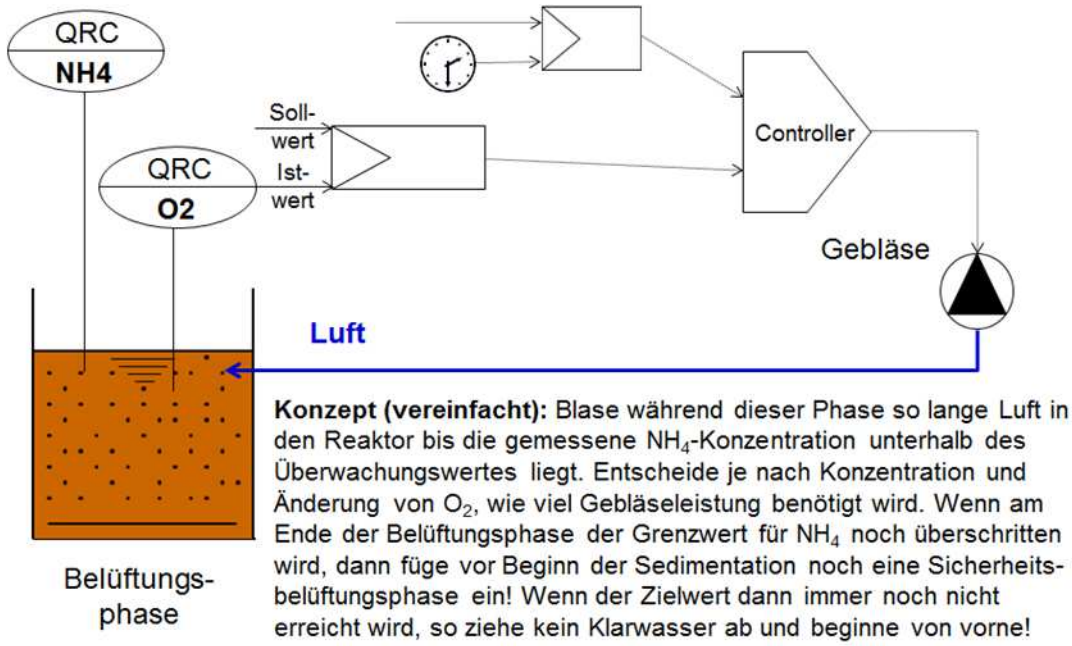


Abb. 6.16: Vereinfachte Darstellung einer Regelung der Belüftung in Abhängigkeit der NH_4-N-Konzentration (Bildquelle: Autor)

Im Beispiel aus Kapitel 7 wurde darüber hinaus auch die Ammoniumkonzentration in den Regler eingebunden, sodass bei Unterschreitung einer bestimmten NH_4-N-Konzentration (z. B. < 1 mg/l) erfolgt eine Abschaltung der Belüftung; ein automatischer Abbruch erfolgt zudem nach Ablauf der definierten Belüftungsdauer oder ggf. auch eine Nachbelüftung, wenn der Überwachungswert noch nicht sicher eingehalten wird.

Atmungsrate

Nach *Vogel et al. [1998]* wird auf der Kläranlage Potsdam, die auf einem SBR-artverwandten Verfahrensprinzip beruht, am Ende eines jeden Belüftungszyklus die Atmungsrate der Biomasse gemessen. Die Ergebnisse werden anschließend dazu verwendet, für die nächste Belüftungsphase Sauerstoff-Sollwerte zu ermitteln, die an die jeweiligen Belastungsverhältnisse angepasst sind.

Fuzzy-Control

Seit Jahren kommen statt klassischer Sauerstoffregler auch Methoden der künstlichen Intelligenz zum Einsatz, um diesen Prozessschritt und ggf. auch die biologische Phosphorelimination sowie die Denitrifikation zu optimieren:

Hamamoto et al. [1997] entwickelten sowohl für eine SBR-Anlage im Labormaßstab als auch für eine großtechnische Anlage eine wissensbasierte Regelung zur Verbesserung der Nährstoffelimination. Eingangsgrößen für diesen Fuzzy-Controller waren die Sauerstoffkonzentration, der pH-Wert, das Redox-Potenzial sowie der Wasserstand. Die Ausgangswerte des Fuzzy-Controllers dienten zur automatischen Anpassung der Rühr- und Belüftungsphasen. Die Dauer des Zyklus wurde dabei allerdings nicht verändert, sondern lediglich die Dauer der belüfteten und unbelüfteten Phasen. Mit Hilfe des Fuzzy-Controllers konnten bei den Nährstoffverbindungen deutlich bessere Wirkungsgrade erzielt werden als im Rahmen der konventionellen, zeitgesteuerten Betriebsweise.

Auch *TAT [2000]* berichten über gute Erfahrungen mit einer Fuzzy-Regelung auf einer SBR-Kläranlage (15.000 EW), die ebenfalls auf Sauerstoff-, pH- und Redoxmesswerten beruhen.

Jordy und Pfaff [2007] berichten über das modular aufgebaute Fuzzy-Logic-Reglerkonzept „AQUALOGIC“ zum belastungsabhängigen, intermittierenden Betrieb von Durchlaufkläranlagen, welches nach Autorenangaben auf etwa 260 Kläranlagen im Einsatz ist. Die beiden Autoren verweisen jedoch darauf, dass es zu dem Grundmodul auch Zusatzmodule gibt, die den Einsatz auf SBR-Kläranlagen sowie eine bedarfsgerechte Fällmitteldosierung möglich machen. Der Regler steuert im Grundmodul die Belüftungsaggregate und die Rührwerke an, um ideale Voraussetzungen für die Nährstoffelimination zu schaffen und dennoch Energie einzusparen. Dabei können nach Angaben der Autoren verschiedene Messgerätekombinationen als Eingangsgrößen verwendet werden:

- Sauerstoff (O_2), Ammonium (NH_4-N), Nitrat (NO_3-N), Temperatur
- Sauerstoff (O_2), Nitrat (NO_3-N), Temperatur
- Sauerstoff (O_2), Ammonium (NH_4-N), Redoxpotenzial, Temperatur
- Sauerstoff (O_2), Redoxpotenzial, Temperatur

Lodde und Charatjan [2007] berichten über eine Fuzzy-Pattern-Regelung auf Basis von Redox, pH-Wert und Sauerstoff für intermittierende Belebungsanlagen, sodass der Controller auch für SBR-Kläranlagen geeignet sei. Durch die Erweiterung des Fuzzy-Logic-Controllers

um ein Verfahren zur Merkmalsmustererkennung, wollen die Autoren eine bedarfsgerechte Regelung erstellen, die sich flexibel den jeweiligen Betriebs- und Belastungsbedingungen anpassen soll. Da die Mustererkennung sich an den Signalverläufen der Prozessgrößen orientiert, gehen die Autoren davon aus, dass auch Verschmutzungen und Alterungseffekte der Sonden keinen negativen Einfluss auf die Regelung haben werden. Die Autoren gehen anhand von zwei Kläranlagen – jedoch konventionellen Durchlaufkläranlagen – von einem Energieeinsparpotenzial von 15 bis 20 % aus.

Sonstiges

Alex und Tschepetzki [2001] entwickelten ein Steuerungs- und Regelungskonzept für die Kläranlage am Nürburgring, die extremen Belastungsschwankungen ausgesetzt ist: Die Normalbelastung der Anlage ist relativ gering, während der Rennwochenenden steigt die Belastung jedoch drastisch an. Die lastabhängige Steuerung berücksichtigt u. a. die aktuelle Zuflusssituation und die aktuelle Leistungsfähigkeit der Anlage. Mittels dieses Mess- und Automationskonzeptes wurden u.a. die O_2-Konzentration sowie die Dosierung einer externen Kohlenstoffquelle und des Fällmittels geregelt bzw. die Zyklusdauer und -zusammensetzung ermittelt.

Demoulin [2008] berichtet über eine SBR-Anlage in Malaysia mit ca. 1,2 Mio. EW bzw. 583.000 m^3/d Spitzenzufluss. Die Anlage besteht aus 12 SB-Reaktoren und wird über die Messung der Sauerstoffzehrung, das Redox-Potenzial sowie über eine TS-Messung (Belebung/ Schlammspiegel) gesteuert und geregelt.

6.5.3.5 Chemisch-physikalische Phosphorelimination

Wie bereits im Kapitel 5 ausgeführt und Abbildung 5.2 verdeutlicht, kann durch erhöhte biologische Phosphorelimination infolge eines stetigen Wechsels zwischen anaeroben und aeroben Phasen ein erheblicher Teil des im Rohabwasser befindlichen Phosphors eliminiert werden. Dabei kann man durch Beachtung der folgenden Punkte die biologische Phosphorelimination deutlich erhöhen (siehe auch *Wiese [2012]*):

- Je höher die Phosphatrücklösung in der anaeroben Phase, desto höher die Phosphataufnahme in der aeroben Phase.
- Statische Beschickung und Verlängerung der anaeroben Phase zu Beginn des Zyklus → Erhöhte Phosphatrücklösung
- Kurze Belüftung vor Beginn der Sedimentationsphase (aerober Zustand), um eine Phosphatrücklösung während der Sedimentations- und Dekantierphase zu vermeiden.
- Ebenso gilt es die Sedimentations- und Dekantierphase auf ein Minimum zu reduzieren.
- Eine TS-Sonde im Auslauf verhindert Schlammabtrieb (und damit des Phosphors, der in der Bakterienflocke fixiert ist) während der Dekantierphase, sodass das gelöste Phosphat näherungsweise gleich mit dem Gesamtphosphor ist.

Wie das Beispiel in Kapitel 7 zeigen wird, kann man hierdurch bereits eine signifikante Steigerung der Phosphoreliminationsleistung erreichen. Um dauerhaft und sicher sehr niedrige Überwachungswerte (z. B. < 1 mg/l P_{ges}) wird man meist aber nicht an der Zugabe von chemischen Fällmitteln vorbeikommen. Dies geschieht meist durch Zugabe von Eisen- oder Aluminium-haltigen Fällmitteln, wobei aus einem gelösten Metallkation und einem gelösten Phosphatanion eine unlösliche Metallphosphatverbindung entsteht, die über den

Klärschlamm entsorgt wird. Aufgrund der verfahrenstechnischen Randbedingungen bietet es sich an, die Zugabe dieser Fällmittel erst gegen Ende der biologisch aktiven Phase in einer Phase guter Durchmischung (z. B. während der letzten belüfteten Phase) zuzugeben.

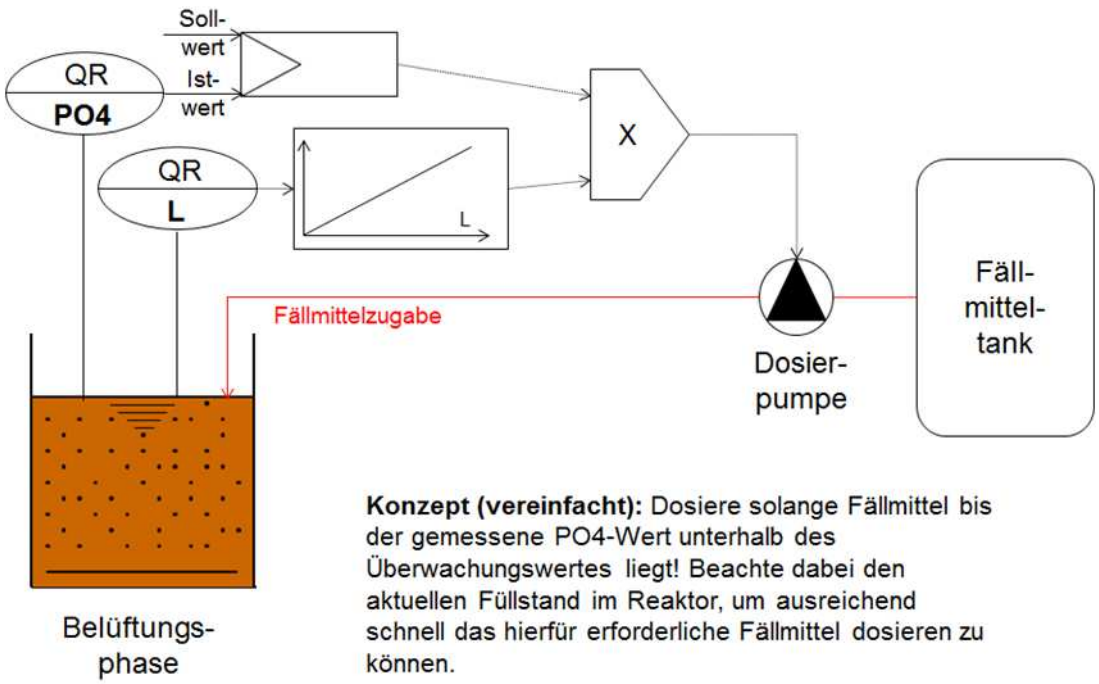


Abb. 6.17: Vereinfachte Darstellung einer Regelung der Zugabe von Fällmitteln für Zwecke der chemisch-physikalischen Phosphorelimination (Bildquelle: Autor)

Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Dosiermenge einzustellen, wie zum Beispiel:

- Dosierung einer konstanten Fällmittelmenge je Zyklus
- Dosierung einer Fällmittelmenge, die sich am Füllstand im Reaktor orientiert
- Regelung in Abhängigkeit der Phosphatkonzentration im Reaktor (ggf. in Kombination mit dem Füllstand) (Abbildung 6.17)

Bei Fällmittelkosten von bis zu 500 €/m^3 gewinnt die Regelung der Fällmittelzugabe dabei zunehmend an Bedeutung.

6.5.3.5 Sedimentations- und Dekantierphase

Nach Abschluss der Nitrifikationsphase wird die Belüftung abgeschaltet; das Rührwerk ist auch nicht mehr aktiv. Unter dem Einfluss der Schwerkraft beginnt der Belebtschlamm sich allmählich abzusetzen. Abbildung 6.18 verdeutlicht, dass dies ein nicht-linearer Prozess ist, d. h. der Belebtschlamm sinkt zunächst schnell ab, mit zunehmender Belebtschlammdichte in der Schlammschicht sinkt der Belebtschlamm aber nur noch langsam ab. In der Regel wird die Dauer der Sedimentationsphase über die Schrittkettensteuerung vorgegeben (z. B. 60 min). Nach Ablauf der Sedimentationsphase wird der Klarwasserabzug freigegeben bzw. geöffnet. Auch hier wird die maximale Dauer über die Schrittkettensteuerung vorgegeben, wobei in der Regel der Dekantierprozess vorzeitig abgebrochen wird, sobald der Mindestwasserspiegel im Reaktor erreicht wird. Da die Absetzgeschwindigkeit des Belebtschlamms aber von verschiedenen Faktoren abhängig ist (z. B. der TS-Konzentration

und dem Schlammindex), die sich wiederum auch im Betrieb verändern können, bietet es sich an, über eine dynamische Anpassung der Sedimentations- und Dekantierphase nachzudenken, wobei hierzu sowohl Messgeräte zur online-TS-Bestimmung bzw. online-Schlammspiegelmessung zum Einsatz kommen können; ggf. können auch beide Messgeräte miteinander verknüpft werden. Die einfachste Regelung besteht darin, dass der Klarwasserabzug erst dann beginnen darf, wenn zwischen Klarwasserabzugseinrichtung und Schlammspiegel ein ausreichender Mindestabstand (z. B. 1 m) vorhanden ist und/oder die TS-Konzentration in der Klarphase vernachlässigbar gering ist (z. B. < 5 mg/l TS). Diese Randbedingungen werden auch nach Beginn des Klarwasserabzugs kontinuierlich überwacht, sodass der Klarwasserabzug sofort unterbrochen werden kann, wenn die Gefahr von Schlammabtrieb besteht (Abbildung 6.19).

Bei manchen Klarwasserabzugseinrichtungen kann die Leistungsfähigkeit angepasst werden (z. B. durch Vergrößerung/Verkleinerung der Spaltöffnung). In diesen Fällen kann auch diese Komponente in die Regelung integrierter werden, wie zum Beispiel:

- Passe die Abzugsleistung so an, dass ein konstanter Abstand zwischen Wasserspiegel und Schlammspiegel eingehalten wird.
- Erhöhe die Abzugsleistung wenn der Schlammspiegel größer ist als X Meter, reduziere die Abzugsleistung wenn der Schlammspiegel kleiner ist als Y Meter.

Schließlich besteht auch die Möglichkeit über eine Anpassung des Austauschvolumens, einen Einfluss auf die Stickstoffeliminationsleistung zu nehmen. Gängige Austauschvolumen liegen zwischen 0,2 und 0,5 des nutzbaren Reaktorinhalts. Generell gilt: Je niedriger das Austauschvolumen ist, desto höher ist unter anderem die Denitrifikationsleistung. Die Anpassung des Austauschvolumens kann dann über eine ggf. dynamische Sollwertanpassung des Mindestwasserspiegels im Reaktor erfolgen. Hierbei muss jedoch sichergestellt werden, dass bei einem Anstieg der Zuflussmenge immer noch genügend Behandlungskapazität zur Verfügung steht.

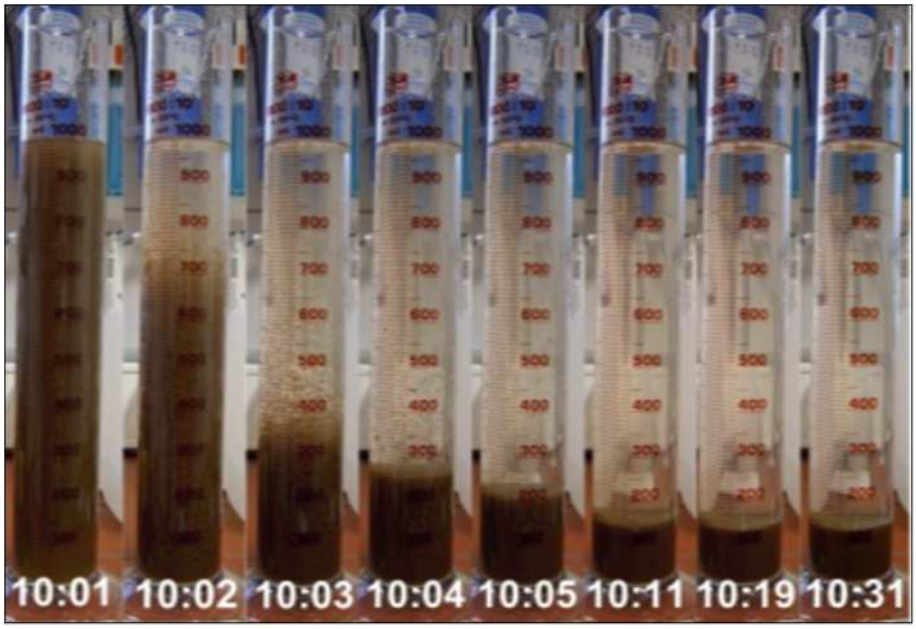


Abb. 6.18: Absetzversuch mit belebtem Schlamm in einem Standzylinder über die Dauer von 30 min (Quelle: *Wiese [2004]*)

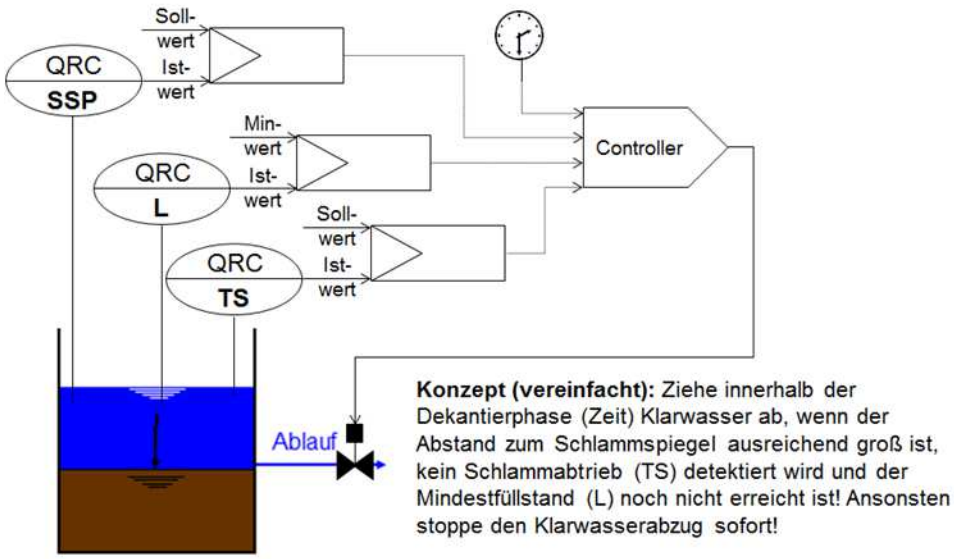


Abb. 6.19: Vereinfachtes Konzept zur Regelung der Sedimentations- und Dekantierphase (Bildquelle: Autor)

6.5.3.6 Überschussschlammabzug

Der Überschussschlammabzug kann zwar auch in der belüfteten oder volldurchmischten Phase erfolgen. Aus betrieblichen und wirtschaftlichen Gründen ist es jedoch sinnvoller, den Überschussschlamm aus dem abgesetzten Schlammbett abzuziehen, da er zu diesem Zeitpunkt bereits statisch voreingedickt ist und damit weniger Volumen gepumpt werden muss. In der Praxis kommen hierfür verschiedene Verfahren zum Einsatz:

- **Zeitbasierter Überschussschlammabzug:** Hier erfolgt der Abzug über die vorgegebene Dauer in der Schrittkettensteuerung. Das Betriebspersonal muss hierbei sorgsam darauf achten, dass weder zu viel noch zu wenig Überschussschlamm abgezogen wird. D. h. in diesem Fall muss das Betriebspersonal die Dauer des Übersschussschlammabzugs regelmäßig der erforderlichen bzw. gemessenen Schlammmenge im System anpassen.
- **Abzug einer definierten Überschusschlammmenge:** In vielen Fällen erfolgt der Überschussschlammabzug über eine Durchflussmenge in der Überschussschlammleitung. Hier stoppt der Übersschussschlammabzug nach Überschreitung eines vorgegebenen Sollwertes; ggf. kann eine maximale Zeitdauer als Abbruchkritierium hinterlegt werden.
- **Abzug in Abhängigkeit einer definierten Überschussschlammmasse:** Durch Kombination einer TS-Messung und einer Durchflussmessung in der Überschussschlammleitung kann der Überschussschlamm sehr genau abgezogen werden. Dies gilt besonders dann, wenn auch die Schlammmasse im System (z. B. über eine TS-Messung im SB-Reaktor) kontinuierlich ermittelt wird. Hier stoppt der Übersschussschlammabzug nach Überschreitung eines vorgegebenen Sollwertes; ggf. kann eine maximale Zeitdauer als Abbruchkritierium hinterlegt werden.
- **Abzug in Abhängigkeit des erforderlichen (aeroben) Schlammalters:** Es gibt Ansätze, durch den Einsatz moderner Mess- und Regeltechnik jeweils nur so viel Belebtschlamm im Systems zu halten, wie für eine sichere Einhaltung der Überwachungswerte rechnerisch erforderlich ist. Die erforderliche Menge wird dabei kontinuierlich den jeweiligen Randbedingungen (z. B. Jahreszeit, Abwassertemperatur) angepasst. Hierfür werden in jedem SB-

Reaktor eine online-TS-Messung sowie eine online-TS-Messung und eine Durchflussmessung in der Übersschussschlammleitung benötigt (Abbildung 6.20).

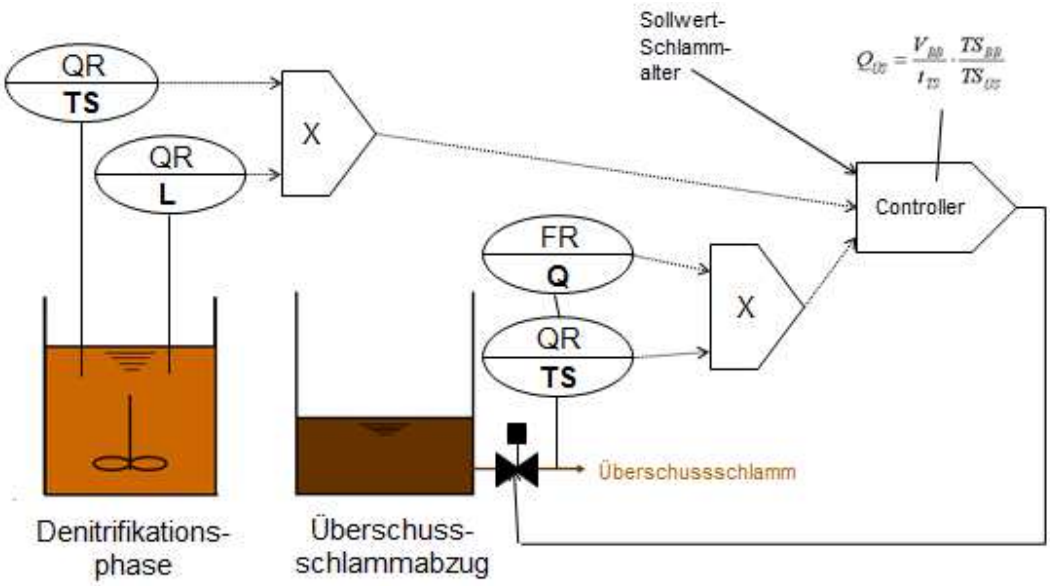


Abb. 6.20: Vereinfachtes Konzept zur Regelung des Überschusschlammabzugs (Bildquelle: Autor)

6.5.3.7 Pausenzeit und Synchronisation

Um den tägliche Arbeitsrhythmus zu erleichtern (z. B. Aufrundung auf volle Stunden) bzw. mehrere Reaktoren zu synchronisieren, ist es sinnvoll, einen Pausenschritt einzuführen. Eine derartige Pause kann entweder in einem Teilschritt der Schrittkettensteuerung implementiert werden (hier in der Regel mit einer konstanten Dauer) oder variabel über eine einmalige Wartezeit, deren Dauer sich in der Regel aus dem vorgegebenen zeitlichen Versatz der einzelnen Reaktoren errechnet.

6.5.4 Bewirtschaftung von Speicherbehälter im Ablauf

Wie in Abschnitt 5.5.5 ausgeführt, fordern die Behörden in vielen Fällen den Bau eines Mengenausgleichsbehälters im Ablauf der Kläranlage, um die hydraulischen Spitzen, die durch den diskontinuierlichen Klarwasserabzug hervorgerufen werden, zu dämpfen; meist wird dabei auch ein Maximalablaufwert vorgeben, der messtechnisch nachgewiesen werden muss, da die Ablaufmenge auch noch für andere Zwecke (z. B. zur Berechnung der Abwasserabgabe) ermittelt werden muss. Um diesen Wert sicher einzuhalten, kann dann der Ablauf des Mengenausgleichbehälters geregelt werden. Die Bewirtschaftung kann dann wie folgt erfolgen (Abbildung 6.21):

- Ein Regler (z. B. ein PID-Regler) wirkt auf einen Elektroschieber ein, sodass der Ablauf aus der Kläranlage unterhalb des maximal zulässigen Wertes liegt.
- Eine Grenzfüllstandsmessung stellt sicher, dass der Klarwasserabzug aus dem SB-Reaktor sofort beendet wird, wenn der Mengenausgleich voll ist.
- Die Freigabe für den Dekanter erfolgt in Abhängigkeit der Grenzfüllstandsmessung und/ oder einer kontinuierlichen Füllstandsmessung.

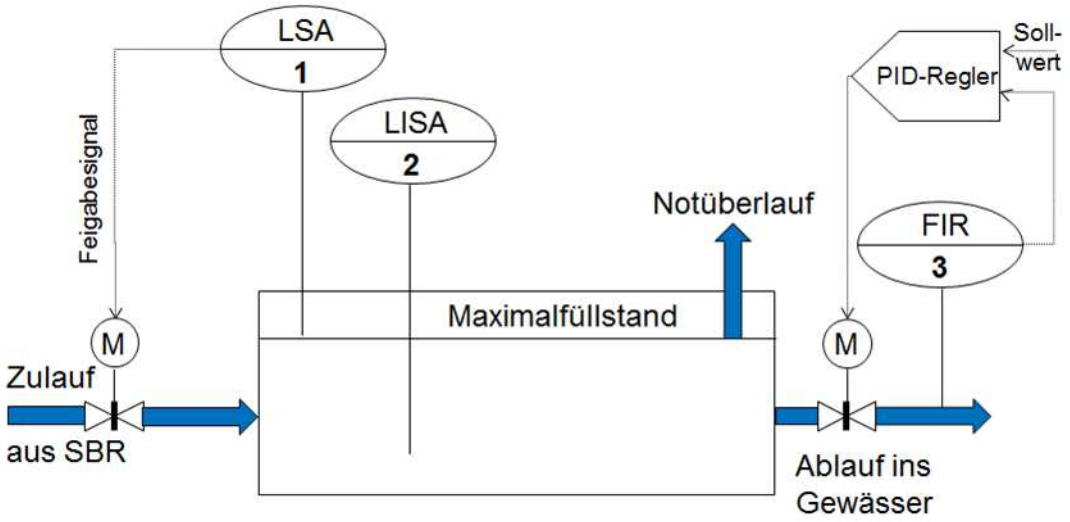


Abb 6.21: Beispiel einer durchflussbasierten Bewirtschaftung eines Abflussspeichers (Bildquelle: Autor)

6.5.5 Trübwasserbehandlung

Im Abschnitt 5.3.4 wurde bereits ausgeführt, dass SBR-Anlagen auch zur Behandlung hochbelasteter Abwässer aus der anaeroben Schlammbehandlung auf konventionellen Kläranlagen eingesetzt werden. Dementsprechend werden auch Mess- und Automationskonzepte eingesetzt:

Wett [2005] berichtet über eine großtechnische SBR-Anlage zur Behandlung von hochbelasteten Abwässern aus der Schlammbehandlung eines österreichischen Großklärwerks (200.000 EW) mittels Deammonifikation. Die SBR-Anlage hat eine Kapazität von 300 kg N_{ges}/d. Die Steuerung des Systems erfolgt dabei auf Basis des pH-Wertes sowie niedriger Sauerstoffkonzentrationen. Die Steuerung basiert dabei auf der Erkenntnis, dass der pH-Wert während der Nitrifikation absinkt, während er bei der Denitrifikation wieder ansteigt. Bezüglich des Energieverbrauchs konnte der Autor feststellen, dass durch dieses Verfahren der Luftbedarf der Verdichter von 109 m^3_{Luft}/kg N_{ges} beim klassischen Nitrifikations-/ Denitrifikations-Verfahren auf 29 m^3_{Luft}/kg N_{ges} bei der Deammonifikation reduziert werden konnte, was auch mit einem Rückgang des Energieverbrauchs um ca. 70 % verbunden sein dürfte.

Gustavsson et al. [2008] beschreiben eine SBR-Kläranlage (2.000 m^3), die zur Behandlung von Zentratwasser aus der Schlammbehandlung auf einem schwedischen Großklärwerk errichtet wurde. Die Anlage dient nur der Nitritation, da das Nitrit in der anoxischen Stufe der Kläranlage denitrifiziert wird. Die Prozessregelung basiert auf einer Messung der NH_4-N-Konzentration, der Sauerstoffkonzentration und dem pH-Wert; weiterhin wird auch die TS-Konzentration bestimmt. Die ersten beiden Messgrößen dienen zur Regelung der Belüftung, der gemessene pH-Wert beeinflusst die Dosierung von Natronlauge, da der Prozess auf einen pH-Wert von etwa 6,8 stabilisiert werden soll. Die Sauerstoffbelüftung wurde auf einen Sollwert von 1,1 mg/l O_2 geregelt, wobei die Belüftungsdauer dann endet, wenn 90 % der NH_4-N-Anfangskonzentration oxidiert sind bzw. die Konzentration einen Wert von 70 bis 90 mg/l NH_4-N erreicht.

6.5.6 Sicherheitstechnik

Damit jederzeit ein ordnungsgemäßer Anlagenbetrieb sichergestellt ist, werden auf SBR-Kläranlagen verschiedene Sicherheitskonzepte realisiert:

- Die Arbeit an bzw. in Abwasseranlagen ist mit erheblichen Gefahren für Leib und Leben verbunden: Das Personal ist nicht nur infektionsgefährdet, sondern kann unter Umständen auch explosiblen und toxischen Gasen (z. B. in Kanalisationen) ausgesetzt sein. Hinzu kommen Gefahren durch Absturz, starke Wasserführung und das Arbeiten im öffentlichen Verkehrsraum (*Stein [1998]*).
- Weitere Gefahren können von Quetschungen, drehenden Teilen und Elektrizität ausgehen. Trotz Dienstanweisungen, Arbeitssicherheits- und Hygienevorschriften sind immer wieder schwere Unfälle zu verzeichnen, da Auflagen (oft auch aus Unkenntnis) nicht beachtet werden. Besondere Bedeutung kommt daher auch der persönlichen Schutzausstattung des Betriebspersonals zu, sodass ein mobiles Gaswarngerät (siehe Abbildung 9.4, Bild 4) zur Pflichtausstattung gehört. In Ex-Zonen von Kläranlagen (z. B. in eingehausten Rechengebäuden, BHKW-Räumen) sind zudem Sensoren zur Detektion explosibler Gase installiert, die nicht nur alarmierend, sondern auch schaltend (z. B. Einschaltung einer Zwangsentlüftung, Abschalten elektrischer Verbraucher) wirken.
- Wichtige Systemkomponenten werden ggf. auch redundant (z. B. Pumpen) ausgeführt oder Bypass-Funktionalitäten (z. B. Rechenanlagen, Ausgleichsbehälter) vorgesehen.
- In Pumpstationen o. ä. kommen zudem Füllstandsmessungen zur Leckagedetektion zum Einsatz und/oder um Kellerentleerungspumpen zu schalten.
- Die verfahrenstechnischen Bedingungen lassen sich auch dann vorteilhaft nutzen, wenn es um die Plausibilitätskontrolle oder Ersatzwertstrategien von online-Messgeräten geht:
  - Der Anstieg der Ammoniumkonzentration in einer späteren Belüftungsphase ist zum Beispiel in einem SB-Reaktor dann unplausibel, wenn währenddessen keine Beschickung mit Rohabwasser erfolgt. Ebenso wäre ein Anstieg der Nitratmessung während der Denitrifikationsphase unplausibel. Fällt ein online-Messgerät aus, so ist es – vorausgesetzt man misst sowohl Nitrat als auch Ammonium – möglich, auf den jeweils anderen Parameter auszuweichen.
  - Darüber hinaus kann man einzelne Messgeräte untereinander plausibel abgleichen (z. B. Ammonium geht runter, Nitrat geht tendenziell hoch; Ammonium ist sehr niedrig, Sauerstoff geht hoch) oder gegenseitig kontrollieren (z. B. Trockensubstanzkonzentration versus Schlammspiegelhöhe).
  - Durchflussmessungen auf SBR-Anlagen lassen sich einfach dadurch überprüfen, dass eine gemessene Durchflussmenge über die korrespondierende Niveauänderung in dem entleerten und/oder beschickten Behälter verglichen wird.

6.6 Forschung und Entwicklung

In den letzten Jahren haben sich zahlreiche Wissenschaftler und Ingenieure mit der Entwicklung neuer Mess- und Automationskonzepte beschäftigt, um die Leistungsfähigkeit von SBR-Kläranlagen zu steigern und/oder Lösungen für Spezialanwendungen zu finden. Leider haben bisher erst wenige Ansätze den Sprung in die Praxis geschafft: Gründe hierfür liegen auch darin, dass es beim Übergang von der Theorie in die Praxis (z. B. Upscaling) zahlreiche

Hindernisse gibt, die es zu bewältigen gilt. Im Nachfolgenden sind aber auch Projekte aufgeführt, die zwar nicht an SBR-Anlagen erprobt wurden, aber auf diese übertragbar sind.

6.6.1 Abwassercharakterisierung

Ciappelloni et al. [2005] berichten über eine online-Überwachung der Nitrifikationsleistung in einem SB-Reaktor mit Hilfe eines automatischen Titrators zur Bestimmung des pH-Wertes und des Sauerstoffs. Mit Hilfe der Titration soll zum einen eine mögliche Toxizität des Abwassers auf die Nitrifikanten und zum anderen die maximale Nitrifikationsrate ermittelt werden.

Fujita et al. [2005] berichten über die Entwicklung zur Echtzeit-Schätzung des schnell- und langsam-abbaubaren Anteils am CSB im Kläranlagenzulauf auf Basis der Änderung der Messsignale von Redox- und pH-Wert in einem anoxischen/aeroben Labor-SB-Reaktor (6 l Volumen). Grundlage des Schätzers, der auf einem künstlichen Neuronalen Netz basiert, sind die Messsignale die während der Beschickungs- und Mischphase gemessen werden.

Vargas und Buitrón [2005] berichten über einen Ansatz zur Detektion toxischer Stoffe im Abwasser mit Hilfe von mathematisch aufbereiteten Daten (z. B. mittels der Partial Least Squares-Methode) einer online-Spektroskopie. Getestet wurde dieses Verfahren an einem SB-Laborreaktor (7 l Volumen) zum biologischen Abbau von p-Nitrophenol.

Wu et al. [2005] berichten über einen Ansatz zur Charakterisierung von Abwasser durch „Fingerprinting“ mit Hilfe von UV- und Fluoreszenz-Spektroskopie. Dabei wurden Proben von drei Kläranlagen genommen und im Labor vermessen. Die Ergebnisse sind jedoch nur in Teilen aussagekräftig, sodass die Autoren noch weiteren Forschungsbedarf sehen, wie zum Beispiel bei der Typisierung nach Siedlungsstruktur und Wettereinfluss.

6.6.2 Diagnose- und Prognosesysteme

Martínez et al. [2004] berichten über die Entwicklung eines CBR-basierten Entscheidungs-unterstützenden Systems (EUS) zur Identifizierung und Bekämpfung von Bläh- und Schwimm-schlammproblemen, welche eine Schlamm-Wasser-Trennung erschweren können. Derartige Probleme können auf allen Arten von Kläranlagen (z. B. Durchlaufkläranlage, SBR) auftreten. Ein CBR-Fall besteht dabei aus den folgenden Daten: Problemdiagnose, Dauer des Problems, Prozessdaten (z. B. Schlammindex, Schlammvolumen, TS-Konzentration, CSB/P_{ges}-Verhält-nis), Bemerkungen, Schlussfolgerungen. Das CBR-System ist dabei auf eine Kläranlage zugeschnitten.

Über einen ähnlichen, aber Kläranlagen übergreifenden Ansatz berichten *Wiese et al. [2004]*. Dieser Ansatz beruht auf der Auswertung von Bläh- und Schwimmschlammproblemen auf einer Vielzahl von Kläranlagen. Bei diesem Ansatz besteht die Fallbeschreibung aus den folgenden Informationen: Anlagenbeschreibung (z. B. Art der Belüftung, Verfahrensprinzip), Abwassercharakteristik (z. B. Fettgehalt), Betriebsdaten (z. B. Schlammindex, Sauerstoffsoll-wert, Abwassertemperatur), erfolgreiche Gegenmaßnahmen, erfolglose Gegenmaßnahmen, Häufigkeit des Problems (z. B. nur im Frühjahr, ganzjährig), Dauer des Problems, Ort des Problems (z. B. nur Belebungsbecken, nur Nachklärbecken) und ursächliche Bakterien (z. B. *microtrix parvicella*).

Jami et al. [2012] berichten über die Erstellung eines Künstlichen Neuronalen Netzes für die Prognose der Ablaufwerte einer SBR-Kläranlage in Malaysia (52.000 EW) in Abhängigkeit der Zulaufwerte.

6.6.3 Regelungen zur Stickstoffelimination

Die Arbeiten von *Yu et al. [1997]*, die im Labormaßstab durchgeführt wurden, ergaben, dass mit Hilfe einer Echtzeitsteuerung auf der Basis von Redox- und pH-Messgeräten die Zykluszeit im Vergleich zur konventionellen Zeitsteuerung um 35 % (Gesamtzyklus) bzw. 42 % (Belüftungsphase) verkürzt und dennoch niedrigere Stickstoff- und Phosphorablaufwerte erreicht werden konnten.

Katsogiannis et al. [1999] berichten über einen von ihnen entwickelten linearen Algorithmus, der dazu dienen soll, die Nitrifikation durch eine optimierte Belüftung zu verbessern und letztendlich damit Energiekosten zu sparen. Der am Modell getestete Algorithmus soll mit wenigen Eingangsgrößen auskommen.

Peng et al. [2001] entwickelten einen Fuzzy-Regler für einen SBR im Labormaßstab, der auf der Sauerstoffkonzentration, dem pH-Wert und dem Redox-Potenzial basiert.

Tomlins et al. [2001] berichten ebenfalls über den Einsatz einer Redox- und O_2-basierten Regelung auf einer halbtechnischen SBR-Kläranlage.

Rubio et al. [2004] berichten über Versuche mit einem halbtechnischen SB-Reaktor (1 m^3), der mit Hilfe von pH-Wert, Redox-Potenzial, Sauerstoff und Temperatur überwacht wird. Ziel der Arbeit ist das Identifizieren charakteristischer Trends für pH- und Redox-Verläufe, um dadurch das Ende der Nitrifikation und Denitrifikation eindeutig zu identifizieren. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen soll anschließend die Dauer der belüfteten und unbelüfteten Phasen auf das erforderliche Maß begrenzt werden. Als Forschungsausblick geben die Autoren an, dass im nächsten Schritt ein Case Based Reasoning-Modell zum Einsatz kommen soll, um eine prädiktive Komponente in die Zyklussteuerung einbinden zu können. Dabei enthalten die historischen CBR-Fälle die folgenden Attribute: Art des Musters (z. B. Detektion des Nitratknies), Dauer des Zyklusschrittes (min), Änderung des Redox-Potenzials (mV/s) und Endwert des Redox-Potenzials (mV). *Rubio et al. [2005]* berichten über weitere Versuche mit der zuvor genannten halbtechnischen Versuchsanlage: Diesmal untersuchen sie die Möglichkeiten der Steuerung eines SB-Reaktors über die Messung der Sauerstoffzehrung. Dabei verfolgen sie zwei Ansätze: Beim ersten Ansatz schalten Sie die Belüftung An und Aus, um aus dem Verlauf des Absinkens des Sauerstoffs die Sauerstoffzehrung abzuleiten. Beim zweiten Ansatz benutzen die Autoren Fuzzy Control, um die Sauerstoffzehrung mit Hilfe eines Modells zum Massentransfer abzubilden. Basierend auf den Versuchsergebnissen favorisieren die Autoren den Fuzzy Control-Ansatz.

Aguado et al. [2005B] berichten über die Entwicklung eines Softsensors zur Überwachung eines SB-Reaktors zur erhöhten biologischen Phosphorelimination im Labormaßstab (7 l Volumen) auf Basis zweier Varianten künstlicher Neuronaler Netze. Datengrundlage waren dabei die Ergebnisse der online-Messungen für pH, Redox, elektrolytische Leitfähigkeit, Temperatur und Sauerstoff sowie ergänzende Labormessungen. Der Softsensor ist nach Ansicht der Autoren in der Lage, die Entwicklung der Phosphatkonzentration im Zyklusverlauf zuverlässig zu prognostizieren. *Aguado et al. [2005C]* nutzten die Daten aus der Versuchs-

anlage auch dazu, um mit Hilfe einer Hauptkomponentenanalyse Rückschlüsse auf signifikante Abweichungen im Prozess und die Ursachen hierfür abzuleiten (z. B. Belastungsanstieg).

Li et al. [2005] berichten über Versuche zur Optimierung eines halbtechnischen Sequencing Batch Biofilm Reaktors (200 l Volumen) zur Behandlung kommunalen Abwassers. Das Regelungskonzept beruhte dabei auf pH, Redox und Sauerstoff, wobei der Reaktor im Modus simultane Nitrifikation/Denitrifikation betrieben wurde. Die Autoren berichten über eine nahezu vollständige Nitrifikation und eine Stickstoffabbauleistung von 85 %.

Puig et al. [2005] entwickelten für einen halbtechnischen SB-Reaktor (1 m^3 Volumen) eine online-Optimierung für einen SBR-Zyklus für Kohlenstoffabbau und Stickstoffelimination auf Basis von pH-Wert und Sauerstoff, wobei letzterer zur rechnerischen Ermittlung der Sauerstoffzehrung eingesetzt wurde. Als Substrat kam kommunales Abwasser zum Einsatz. Bezüglich der Belüftung testeten die Autoren zwei Strategien: Ein/Aus-Schalten der Belüftung versus Fuzzy-Regelung der Belüftung, wobei letztere von den Autoren bevorzugt wurde, weil dadurch unter anderem klarer Signalverläufe beobachtet werden konnten.

Yuan et al. [2005] weisen darauf hin, das durch den Einsatz von Mess- und Automationstechnik sich auch die Zusammensetzung des Belebtschlamms verändern und damit auch optimieren lässt. Als Beispiel führen die Autoren Untersuchungen auf, bei denen die Betriebsbedingungen (z. B. niedrige Sauerstoffwerte) in SB-Reaktoren gezielt so eingestellt werden, dass der Stickstoffabbau durch Hemmung Nitrit-oxidierender Bakterien gezielt über Nitrit statt Nitrat erfolgen soll. Weiterhin verweisen die Autoren auf diverse Versuche mit einer erhöhten biologischen Phosphorelimination, weil hierbei gezeigt werden kann, dass durch eine pH-Wert-Regelung sowie die Zugabe externer Kohlenstoffquellen das Wachstum Glykogen-akkumulierender Mikroorganismen limitiert und dadurch die Phosphorelimination verbessert werden kann.

Albanez et al. [2007] optimierten die Nitrifikation- und Denitrifikationleistung eines SB-Reaktors im Labormaßstab (5 l, 30 °C). Um die Reinigungsleistung im Optimum zu fahren, wurden sowohl die einzelnen Zyklusschritte innerhalb eines festen 8 h-Zyklus angepasst als auch die Dosierschritte und die zu dosierende NH_4-N-Fracht. Weiterhin wurden Ethanol als externe Kohlenstoffquellen zugegeben, um die Denitrifikation zu verbessern. Mit diesen Optimierungsmaßnahmen wurde eine Stickstoffelimination von mehr als 95 % beobachtet.

Fiocchi et al. [2008] sind der Auffassung, dass alleine über pH, Sauerstoff und Redox ein stabiler SBR-Anlagenbetrieb bei hohen Ammoniumkonzentrationen nicht zuverlässig realisiert werden kann. Sie führten daher Versuche mit einer halbtechnischer SBR-Anlage (200 l Volumen) durch, wobei eine automatische Titration (Typ „TITAAN“, Fa. SPES) eingesetzt wurde, um die Nitrifikationsphase zu überwachen und toxische Einflüsse zu detektieren. Weiterhin wurde der Reaktor mit umfangreicher online-Messtechnik ausgestattet: UV-Sensor zur Bestimmung von Nitrat und Nitrit, Sauerstoff, pH-Wert, Temperatur, Redox-Potenzial, Schlammspiegel und Zulaufmengenmessung. Die Autoren führen aus, dass der automatische Titrator ein geeignetes Messgerät ist, um den Prozess der Nitrifikation zu überwachen und zu automatisieren. Bereits zuvor (*Fiocchi et al. [2005]*) verwiesen die Autoren darauf, dass neben der Überwachung eines SB-Reaktors der Titrator auch für folgende Zwecke geeignet sei: Detektion toxischer Stoffe im Zulauf, Bestimmung der N_{ges}-Zulaufkonzentration sowie der Nitratablaufkonzentration.

Guo et al. [2008] führten mit Hilfe eines Laborreaktors (15 l Volumen) Versuche zur Optimierung der Stickstoffelimination durch. Dabei wurden zum einen multiple Phasenwechsel zwischen aeroben und anoxischen Zuständen durchgeführt, weiterhin wurde die Anzahl der Beschickungen variiert. Der Reaktor war mit folgenden online-Messgeräten ausgestattet: pH, Redox, Temperatur und Sauerstoff. Die Autoren stellten fest, dass sich durch eine Variation der Anzahl der Beschickung und der Phasenwechsel die Stickstoffelimination auf über 97 % steigern ließ bzw. die Ablaufkonzentrationen auf weniger als 2 mg/l N_{ges} reduzieren ließen.

Irizar et al. [2008] führten Versuche mit Mess-, Steuerungs- und Regelungskonzepten an einer 150 l Labor-SBR-Kläranlage ohne Vorlagebehälter durch: Dabei wurde ein dreilagiges Mess- und Automationskonzept untersucht. Die 1. Stufe berücksichtigt eine Optimierung der Nitri- und Denitrifikation auf Basis einer Redox- und Sauerstoffmessung. Die 2. Stufe regelt die TS-Konzentration im SB-Reaktor. Die 3. Stufe überwacht die Belüftungsdauer auf Basis einer NH_4-N-Messung, um auf der einen Seite die NH_4-N-Überwachungswerte sicher einzuhalten, auf der anderen Seite aber auch Energie einzusparen: Die Zyklusdauer konnte zum einen um etwa 20 % reduziert werden, zum anderen wurde auch die Belüftungsdauer um etwa 30% reduziert.

Kishida et al. [2008] berichten über ein Mess- und Automationskonzept für einen aeroben SB-Laborreaktor (4 l Volumen) mit Granularschlamm. Die Dauer der anaeroben, anoxischen und aeroben Phasen wurde dabei über die Ergebnisse zweier online-Messungen für elektrolytische Leitfähigkeit und pH-Wert geregelt. Die Autoren berichten, dass durch das Regelungskonzept eine sehr stabile Stickstoffelimination und biologische Phosphorelimination erreicht werden konnte: Die Konzentrationen für NH_4-N, NO_3-N und PO_4-P lagen unter 0,3 mg/l. Dabei kam jedoch synthetisches Abwasser zum Einsatz. Ob ein solches Regelungskonzept auf eine großtechnische Kläranlage mit häuslichen/gewerblichen Schmutzwasser sowie Fremd- und Regenwasser übertragen werden kann, muss kritisch hinterfragt werden, da hier sowohl die elektrolytische Leitfähigkeit als auch der pH-Wert im Rohabwasser großen Schwankungen unterliegen kann.

López et al. [2008] berichten über Versuche zur pH-Wert-Regelung mit zwei Annamox-SBR-Laborreaktoren (2 l Volumen), die in einem Fall synthetisches Abwasser und im anderen Fall Deponiesickerwasser behandelten. Beim synthetischen Abwasser testen die Autoren eine Strategie, bei der zu zwei Zeitpunkten während eines Zyklus eine Säurezugabe zwecks pH-Wert-Stabilisierung erfolgte, während im Falle der Deponiesickerwasserbehandlung eine kontinuierliche pH-Wert-Regulierung auf Basis eines PID-Reglers erfolgte. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass die Variante mit der Zugabe zu zwei Zeitpunkten nur dann sinnvoll ist, wenn die Nitrat- und Ammoniumkonzentration im Zulauf bekannt sind. Andernfalls sei immer eine kontinuierliche pH-Wert-Anpassung/-Überwachung vorzuziehen.

Luccarini et al. [2008] berichten über einen Ansatz zur Signalanalyse und Zustandserkennung auf Basis von pH, Redox und Sauerstoff sowie einer Kombination eines künstlichen Neuronalen Netzes und Fuzzy Control. Es wurde mit Hilfe eines Trainingsdatensatzes einer halbtechnischen SBR-Anlage (500 l Volumen) untersucht, ob und wie zuverlässig die einzelnen Prozessphasen (z. B. aerob, anoxisch) bzw. Betriebszustände identifiziert werden können; die Autoren ermittelten dabei eine Zuverlässigkeit von mehr als 90 %.

Poo et al. [2008] berichten über eine Zyklussteuerung auf Basis von pH, Redox und Sauerstoff für einen halbtechnischen SB-Reaktor (80 l Volumen). Neben der Belüftung erfolgen auch

Eingriffe die schubweise Dosierung von Rohabwasser sowie externen Kohlenstoffquellen. Die Dosierung von Rohabwasser erfolgte dabei über eine Abschätzung der NH_4-N-Fracht anhand des Verlaufs der Sauerstoffkonzentration. Hierdurch sollte – vermutlich um eine Anreicherung zu vermeiden – nur so viel Fracht zugeführt werden, wie in der nachfolgenden Denitrifikationsphase abgebaut werden konnte. Das synthetische Abwasser wurde so zusammengestellt, dass es der Charakteristik koreanischer Schweinegülle entspricht.

Schwittalla et al. [2008] untersuchten den Einfluss einer NH_4-Adsorption einer Belebtschlammflocke während der Befüllungsphase und einer NH_4-Desorption am Ende der Nitrifikationsphase. Die Untersuchungen basierten auf Simulationsergebnissen, Laborversuchen sowie den Erkenntnissen von fünf großtechnischen SBR-Kläranlagen. Wegen der Erkenntnisse schlagen die Autoren vor, zu Beginn der Sedimentationsphase in Bodennähe des Reaktors und in Strömungsrichtung etwas Rohabwasser zu dosieren, um die Denitrifikationsleistung weiter zu steigern. Da hierbei die Gefahr einer Kurzschlussströmung und damit einer Verschlechterung der Ablaufwerte besteht, schlagen die Autoren vor, diese Dosierung über ein online-NH_4-N-Messgerät zu überwachen und zu kontrollieren.

Vargas et al. [2008] untersuchten an einer SBR-Laboranlage (10 l) die Möglichkeiten einer simultanen Nitritation/Denitritation und einer erhöhten biologischen Phosphorelimination. Nach einem Einfahrbetrieb wurde die Versuchsanlage mit einer Zyklusdauer von 8 h betrieben (1 h anaerob, 5,5 h anoxisch, 1,5 h aerob, 0,5 h Sedimentation und Dekantierung), um die Phosphataufnahme zu erhöhen. Das Nitrit wurde in zwei Schüben zugegeben, um Hemmeffekte zu vermeiden. Interessant an dieser Arbeit ist, dass die Autoren zur Überwachung des Prozesses eine online-Titration nutzten: Sie stellten fest, dass man die Denitrationsaktivität mit der Titration detektieren kann, da der Wert nach der Zugabe von Nitrit zunächst stark absinkt (z. B. durch Phosphataufnahme) und ein konstantes Niveau erreicht, sobald Nitrit abgebaut wurde; hierüber lässt sich auch der geeignete Zeitpunkt zur schubweisen Dosierung des Nitrats ermitteln.

Tan und Tang [2008] führten Versuche an einer Labor-SBR-Anlage mit verschiedenen CSB- und NH_4-N-Zulaufkonzentrationen sowie TS-Konzentrationen durch. Dabei untersuchten sie auch die Aussagekraft verschiedener Verfahren zur Bestimmung der biologischen Aktivität. Dabei stellten sie fest, dass der Verlauf der Sauerstoffzehrung aussagekräftige Rückschlüsse auf den Verlauf des Kohlenstoffaufbaus, der Nitrifikation und der endogenen Atmung zulässt.

Ye et al. [2009] berichten über Laborversuche (10 l SBR) zur Stickstoffelimination von häuslichen Abwasser direkt über Nitrit; hierdurch soll der für die Nitratation erforderliche Energieaufwand vermieden werden. Die Autoren untersuchten den Einsatz von pH und Sauerstoff zur Prozessregelung bei verschiedenen Salzkonzentrationen. Hintergrund dieses Ansatzes ist die Beobachtung, dass die nitritoxidierenden Mikroorganismen bei hohen Salzkonzentrationen gehemmt werden, sodass dann die Denitrifikation bei niedrigen Sauerstoffkonzentrationen und hohen Ammoniumkonzentrationen direkt über Nitrit erfolgen kann. Die Autoren stellten fest, dass bei einer Salzkonzentration von 5 g/l mit der Regelung über pH und Sauerstoff ein stabiler Prozess erreicht werden konnte.

6.6.4 Regelungen zur Phosphorelimination

Barat et al. [2008] untersuchten mit Hilfe einer Labor-SBR-Kläranlage (7 l Volumen) und synthetischen Abwasser den Einfluss der Calcium-Konzentration auf die Effektivität der biologischen Phosphorelimination. Dazu wurde der Reaktor mit einer pH-Elektrode, einer Redox-Elektrode, einer elektrolytischen Leitfähigkeitsmessung sowie einer Sauerstoffelektrode bestückt. Die Autoren konnten zeigen, dass bei hohen Konzentrationen eine Calciumphosphatfällung auftrat, die wiederum sowohl einen negativen Einfluss auf die Phosphatrücklösung in der anaeroben Phase als auch die Phosphoraufnahme der Bakterien in der aeroben Phase hatte. Ob und wie derartige Erkenntnisse sich in der Praxis – ggf. auch in Form von Steuerungs- und Regelungskonzepten – umsetzen lassen, bleibt abzuwarten.

Puig et al. [2008] führten anhand von 30 l bzw. 5 l Labor-SBR-Anlagen Versuche mit der Zugabe von Ethanol als externe Kohlenstoffquelle durch. Die Autoren stellten dabei fest, dass sowohl die biologische Phosphorelimination als auch die Stickstoffelimination im Falle einer Unterversorgung mit leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen durch die Zugabe von Ethanol deutlich verbessert werden konnte, sodass die geregelte Zugabe einer externen Kohlenstoffquelle in einen SB-Reaktor eine andere Möglichkeit der Prozessoptimierung darstellt.

6.6.5 Simulationsbasierte Regelungs- und Steuerungskonzepte

Guisasola et al. [2005] berichten über eine Simulationsstudie auf Basis des ASM2d (*Henze et al. [2000])* bei der die Möglichkeiten des Einsatzes einer Sauerstoffregelung auf Basis der Sauerstoffzehrung für den optimalen Anfahrbetrieb eines SB-Reaktors zur erhöhten biologischen Phosphorelimination untersucht werden sollten. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass durch die Simulation und die Regelung über die Sauerstoffzehrung der Startprozess und die erzielbare Phosphoraufnahme deutlich erhöht werden kann.

Corominas et al. [2008] berichten über einen modellbasierten Ansatz zur Optimierung der Stickstoffelimination in SBR-Kläranlagen. Grundlage für die Simulation waren die Ergebnisse eines 30 l SB-Reaktors. Dem Modell lag ein modifiziertes ASM1-Modell (*Henze et al. [2000]*) zugrunde. Die Autoren setzen dabei auf zwei Strategien: Zum einen wurde die Zyklusdauer angepasst, zum anderen wurden die Sauerstoffsollwerte für den Belüftungsregler variiert. Mit beiden Varianten konnte eine Verbesserung der Reinigungsleistung erzielt werden. Die Autoren hatten bereits zuvor modellbasierte Ansätze auf Basis von Redox und Sauerstoffzehrung mit einer Simulation bzw. der oben genannten Laboranlage durchgeführt (*Corominas et al. [2005B]*).

Wichern et al. [2008] berichten über die Optimierung eines SB-Reaktors zur Behandlung von Molkereiabwässern mit Hilfe dynamischer Simulation. Dabei wurden unter anderem die Sauerstoffkonzentrationen (2 bis 8 mg/l O_2), die Raumbelastung (1 bis 15 kg CSB/($m^3 \cdot d$)) und die Zyklusdauer (6 bis 12 h) variiert.

6.7 Zwischenfazit

Das Kapitel 6 gibt eine Übersicht über den Stand der Mess- und Automatisierungstechnik auf SBR-Kläranlagen. Es wurde gezeigt, dass auf SBR-Kläranlagen bis heute relativ wenig gemessen wird; dies gilt besonders für die wichtigen Qualitätsparameter (z. B. NH_4-N, NO_3-N, PO_4-P). Die eingesetzten Steuerungs- und Regelungskonzepte sind relativ einfach (z. B. Schrittkettensteuerung, konventionelle Belüftungsregelungen). Angesichts der zahlreichen Reserven, die sich aus der statischen Bemessung einer SBR-Kläranlage ergeben, sind diese Methoden in der Regel ausreichend, um die behördliche Auflagen – besonders die Überwachungswerte – einzuhalten. Derartige Konzepte sind aber nicht ausreichend, um ein hohes Maß an Betriebs- und Prozesstransparenz zu erzeugen und vor allem nicht geeignet, die hohe Flexibilität und Systemreserven der SBR-Technik adäquat zu berücksichtigen. Weiterhin verdeutlichen die zahlreichen Beispiele (auch die der jüngeren Vergangenheit), dass es bisher primär um die Optimierung einzelner Teilschritte (meist der Optimierung der Zyklussteuerung/ -regelung) geht und nicht um die Optimierung des Gesamtsystems „Kläranlage“. Dabei ist es relativ einfach, SBR-Kläranlagen signifikant zu ertüchtigen, denn moderne Anlagen sind bereits mit leistungsfähigen Automatisierungskonzepten (z. B. Bedien- und Visualisierungsebene, SPS) ausgestattet. D. h. es ist in vielen Fällen relativ einfach und kostengünstig möglich, Messgeräte nachzurüsten und die Automationssoftware entsprechend anzupassen. Wie ein anlagenweites Ertüchtigungskonzept aussehen kann, das durch den Einsatz moderner Messtechnik und innovativer Steuerungs- und Regelungskonzepte die Stärken der SBR-Technik konsequent nutzt bzw. die Systemschwächen eliminiert, soll nun das Kapitel 7 verdeutlichen.

7 Von der Black-Box zur intelligenten SBR-Anlage

7.1 Vorwort

Der Autor dieser Arbeit hat im Rahmen seiner Doktorarbeit (*Wiese [2004]*) ein integriertes, computergestütztes Simulationsmodell von Kanalnetz- und SBR-Kläranlage der Gemeinde Messel (Hessen) erstellt, welches mit Hilfe umfangreicher Mess- und Betriebsdaten kalibriert wurde. Anschließend wurde das Modell dazu genutzt, um Systemreserven zu ermitteln und verschiede Strategien für eine erhöhte Mischwasserbehandlung zu entwickeln und zu erproben. Dabei konnte gezeigt werden, dass durch eine Erhöhung der Zulaufmenge und eine Ertüchtigung des Anlagenbetriebs durch Mess- und Automationstechnik die Emissionen bezüglich Fracht und Konzentration deutlich reduziert werden können. Wegen dieser positiven Ergebnisse hatte sich die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (AZ: 17258) bereit erklärt, eine großtechnische Erprobung finanziell zu fördern. Der Autor hatte somit die Möglichkeit, in einer Post-Doc-Phase die theoretischen Erkenntnisse in der Praxis zu verifizieren bzw. ein anlagenweites Mess- und Automationskonzept zu erproben, welches im Endausbau deutlich über die Ansätze von *Wiese [2004]* hinausging. Teilergebnisse wurden in *Wiese [2005]* publiziert, sodass diese Publikation eine Zusammenführung der Ergebnisse aus Doktorarbeit und Post-Doc-Arbeit darstellt („Theorie und Praxis“). Aufgrund der positiven Ergebnisse der großtechnischen Erprobung ist das dynamische Steuerungs- und Regelungskonzept im Übrigen noch immer im Einsatz[16]. Da dieses Konzept bis heute eine der wenigen großtechnischen Applikationen einer anlagenweiten, dynamischen Prozessführung einer SBR-Kläranlage sein dürfte und die Ergebnisse über mehrere Monate zudem sehr detailliert dokumentiert wurden, soll den Testergebnissen aus *Wiese [2005]* auch in dieser Arbeit ein eigenes Kapitel gewidmet werden. In Ergänzung zu den Ausführungen von *Wiese [2005]* beinhaltet dieses Kapitel aber noch eine ausführliche Beschreibung des Automationskonzeptes (Abschnitt 7.4.1), diverser ergänzender Abbildungen, weitere Modellbausteine für das prädiktive CBR-Modell (Abschnitte 7.5.2.3.2 und 7.5.2.3.3) sowie Ansätze für Fehlerdiagnosen und Entscheidungshilfen. Weiterhin werden Fremdquellen mit ähnlicher Fragestellung zitiert.

7.2 Einleitung

Wie bereits ausgeführt, beschränkt sich die messtechnische Ausstattung vieler deutschen SBR-Anlagen in der Regel auf die Vorgaben gemäß der Eigenkontrollverordnung des jeweiligen Bundeslandes sowie nur auf die für einen sicheren Betrieb absolut notwendigen Mess- und Automationsgeräte; international sieht dies ähnlich aus. Derartige Anlagen sind noch immer Black-Box-Systeme, da nur wenige Prozessinformationen in Echtzeit verfügbar sind, welche für Controlling und Benchmarking, Steuerungs- und Regelungskonzepte sowie für Zwecke einer Optimierung eingesetzt werden können. Nachfolgend soll daher ein Beispiel vorgestellt werden, wie durch den Einsatz moderner Mess- und Automationstechnik eine Wandlung von einem Black-Box-System bis hin zu einer transparenten Kläranlage bzw. im letzten Schritt eine Umwandlung in eine intelligente Kläranlage erfolgen kann. Durch die Anbindung und Einbindung von Messsignalen aus vorgelagerten Systemen (z. B. Füllstände

[16] Der Autor hat die Kläranlage Messel in 2009 besucht: Seinerzeit war das dynamische Steuerungs- und Regelungskonzept mit dem Originalparametersatz aus 2004 im Einsatz. Nach einer telefonischen Auskunft des Betriebsführers dieser Anlage vom März 2013 war das System auch noch zu diesem Zeitpunkt im Betrieb; lediglich die Zuschaltung der zweiten Zulaufpumpe wurde aus energetischen Gründen deaktiviert.

und Durchflüsse an bestimmten Stellen im Kanalnetz, Menge und Qualität des Entlastungsabfluss aus Regenüberlaufbecken), dem Einzugsgebiet (z. B. Niederschlagsdaten) und dem Einleitgewässer (z. B. Gewässergütemessstellen) können zudem integrale, systemgrenzen überschreitende Mess- und Automationskonzepte entworfen werden.

Warum ist die Einbindung von Messsignalen des vorgelagerten Kanalsystems und des Gewässers sinnvoll?[17]

Aus Mischwassereinleitungen können sich vielfältige Gefährdungen für die Gewässerbiozönose und -struktur ergeben (Abbildung 7.1). Nach *Borchardt [1992]* und *Fischer [1998]* kann eine akute Gefährdung – d.h. über einen Zeitraum von nur wenigen Stunden – eines Gewässers durch Mischwassereinleitungen aus einer hydraulischen (z. B. hohe sohlnahe Schubspannungen) und/oder chemischen Belastung (z. B. Sauerstoffdefizit infolge Einmischung des Entlastungsabflusses, Schwebstoffe, toxische Stoffe) resultieren. Verzögerte Wirkungen – d. h. im Bereich von Stunden bis Tagen – können sich aus einer chemischen Belastung ergeben, wobei hierbei besonders Sauerstoffdefizite aufgrund sauerstoffzehrender Substanzen (CSB, Ammonium) zu nennen sind. Bakterien und Viren können eine hygienische Belastung des Gewässers bzw. eine akute bis verzögerte Wirkung hervorrufen. Mögliche Langzeitwirkungen – d. h. über Wochen, Monate, Jahre – können aus einer Eutrophierung des Gewässers sowie der Anreicherung von Schadstoffen (z. B. Schwermetalle) in Organismen und im Sediment resultieren (bzgl. Details siehe auch *ATV [1997A]* und *ATV [1993]*). Bei der Abschätzung einer möglichen akuten und/oder verzögerten Wirkung von Mischwassereinleitungen müssen daher eher Einzelereignisbetrachtungen durchgeführt werden, wohingegen bei der Ermittlung einer möglichen Langzeitwirkung Frachtbetrachtungen über längere Zeiträume wichtig sind. Im *BWK-Merkblatt M3 [2001]* wird die Verwendung integrierter Bewirtschaftungskonzepte für Kanalnetze und Kläranlagen primär bei einer Verringerung der NH_3-N-/NH_4-N-Emissionen als erfolgsversprechend angesehen. Wie nachfolgend noch gezeigt wird, sind integrierte Bewirtschaftungskonzepte auch bezüglich einer Verringerung der CSB-Emissionen bei Regenwetter und der Anzahl der Entlastungsereignisse sinnvoll, woraus eine deutliche Verbesserung des Gewässerschutzes erzielt werden kann, ohne dass viel Geld in zusätzliche Maßnahmen zur Mischwasserbehandlung investiert werden müssen (z. B. Regenüberlaufbecken, Bodenfilter).

Wie ein integriertes System schematisch aussehen könnte verdeutlicht Abbildung 7.3. Der Begriff „Integrierter Betrieb“ umfasst im nachfolgenden Sinne zunächst nur die Teilsysteme „Mischkanalisation inkl. Maßnahmen der Mischwasserbehandlung“ und „Kläranlage“. Um das volle Optimierungspotenzial bezüglich einer Verringerung der Gewässerbelastung auszuschöpfen, bedarf es eines Ansatzes, bei dem der Zufluss zur Kläranlage ständig oder in kurzen Zeitabständen dynamisch der aktuellen Leistungsfähigkeit von Kanalnetz und Kläranlage angepasst wird. Der bidirektionale Informationsfluss zwischen Kanalnetz und Kläranlage ist dabei zu bevorzugen (Abbildung 7.2). Bei größeren Kanalnetzen kann es zudem sinnvoll sein, über die Realisierung einer Kanalnetzsteuerung nachzudenken.

[17] Die nachfolgenden Ausführungen entstammen im Wesentlichen aus *Wiese [2004]*.

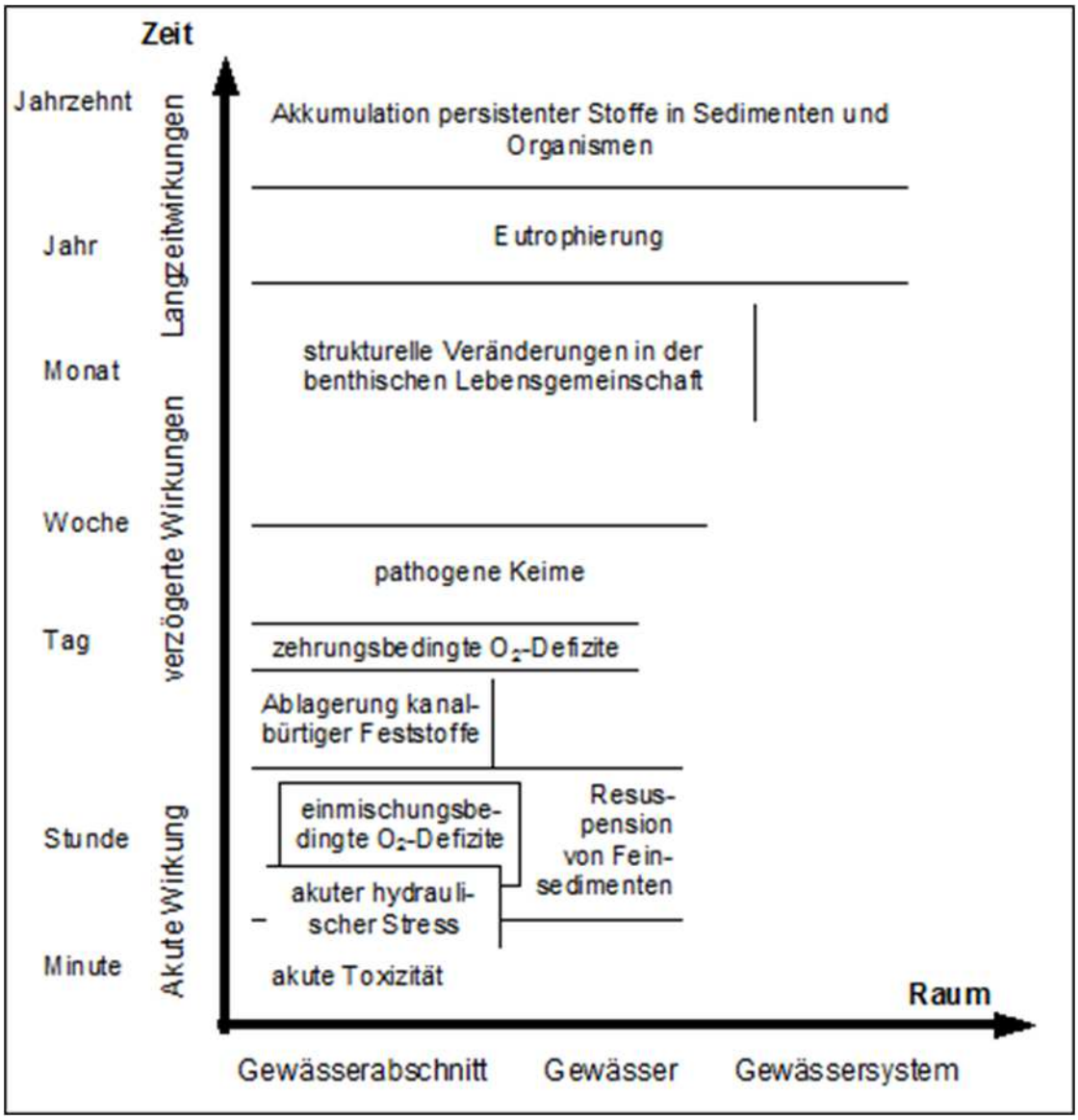


Abb. 7.1: Wirkungsspektrum von Mischwassereinleitungen (*Fischer [1998]*)

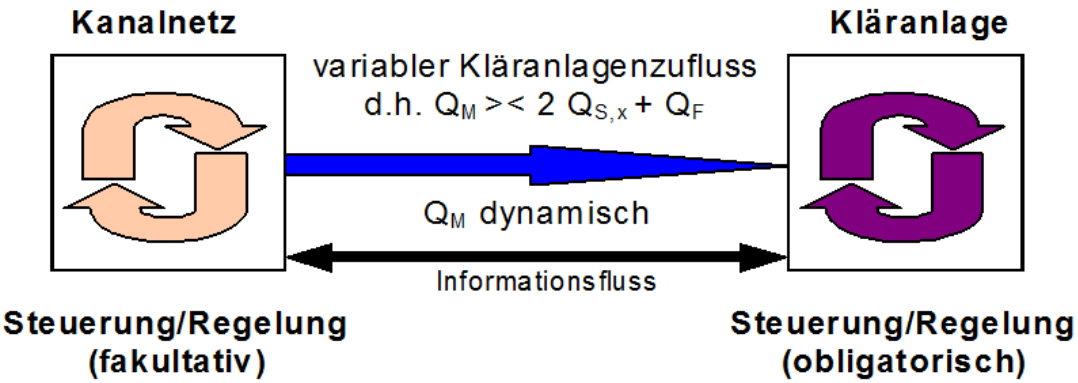


Abb. 7.2: Prinzip eines integrierten Betriebs mit dynamischer Anpassung des Mischwasserzuflusses (Q_M) (Quelle: *Wiese [2004]*)

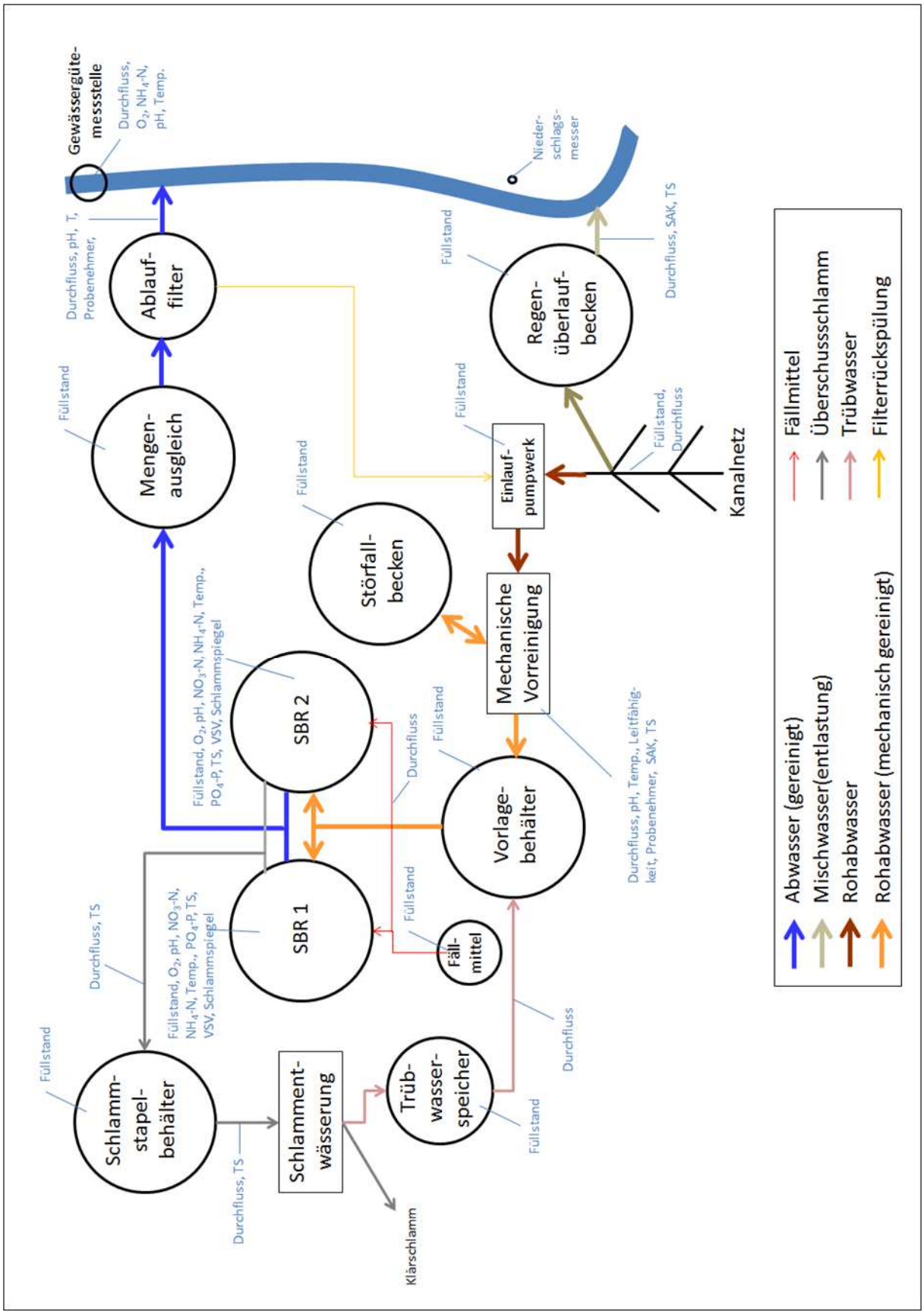


Abb. 7.3: Übersicht über verfahrenstechnische Komponenten und Messstellen auf einer „transparenten“ SBR-Anlage sowie im Kanalnetz und Gewässer (Bildquelle: Autor)

7.3 Die transparente SBR-Anlage[18]

7.3.1 Messtechnische Ausstattung

Nachfolgend wir das Beispiel der Kläranlage Messel beschrieben, die durch den Einsatz von zusätzlicher Messtechnik im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes 17258 in eine transparente SBR-Kläranlage umgewandelt wurde. Aufbauend auf der in Abbildung 6.2 dargestellten Grundausstattung wurde eine Ergänzung mit Messgeräten vorgenommen (Tabelle 7.1). Die messtechnische Basisausstattung dieser Kläranlage entsprach dabei weitgehend dem Standard anderer Anlagen. Die bereits vorhandenen online-Nitrat-Messgeräte dienten zunächst nur der Überwachung bzw. Information. Die in Vorbereitung der großtechnischen Umsetzung der neuen Automationskonzepte durchgeführten intensiven Tests der zusätzlichen Messgeräte haben folgende Erkenntnisse gebracht:

- Die Installation der zusätzlichen Messgeräte erwies sich überwiegend als relativ problemlos; dies galt auch für die Anbindung an das Prozessleitsystem.
- Für die Analytische Qualitätssicherung der Messgeräte wurden während der Erprobung mehr als 600 Vergleichsmessungen durchgeführt. Die Messgeräte erwiesen sich dabei als sehr genau.
- Die Messgeräte haben sich als sehr zuverlässig erwiesen. Der Wartungsaufwand aller Messgeräte war erfreulich gering und lag meist unter den Angaben der Hersteller; dies gilt nicht nur für die Sonden, sondern auch für die Prozessphotometer (inkl. Probennahme). Es gilt besonders zu betonen, dass trotz der umfassenden messtechnischen Ausstattung, die in Teilen weit über das hinausgeht, was auf sehr viel größeren Kläranlagen an Messtechnik vorhanden ist, die Betreuung dieser Geräte mit einer in Summe relativ geringem Aufwand möglich war: Die Wartung und Instandhaltung aller eingesetzten Messgeräte erforderte für eine Person weniger als ½ Tag pro Woche (inkl. der zahlreichen Vergleichsmessungen). Die eingesetzten Messgeräte können auch unter den speziellen Bedingungen der SBR-Technologie sehr gut eingesetzt werden; jedoch können im Einzelfall Sonderlösungen (z. B. bei der Befestigung) erforderlich werden.
- Vom Prinzip her erschien es wünschenswert, im SBR-Prozess Messgeräte einzusetzen, die eine möglichst geringe Totzeit (< 5 min) aufweisen. Interessanter Weise hatte jedoch die erhebliche Totzeit der eingesetzten NH_4-N-Prozessphotometer (20 - 25 min inkl. Probennahme) keinen erkennbaren negativen Einfluss auf die Prozesssteuerung.

Generell kann man feststellen, dass die Ertüchtigung der KA Messel bezüglich Messtechnik ohne größere Probleme möglich war. Der Listenpreis der zusätzlich beschafften Messgeräte betrug seinerzeit etwa 83.500 € netto. Aufgrund der zwischenzeitlich erfolgten Einführung neuer Messkonzepte (z. B. ANISE) dürften die Kosten heute niedriger liegen.

---

[18] Die nachfolgenden Ausführungen stammen im Wesentlichen aus Arbeiten des Autors, die sich an die Promotion anschlossen und die großtechnische Umsetzung der zunächst nur theoretischen Ansätze zum Ziel hatte (siehe u.a. *Wiese [2005]*, *Wiese et al. [2005A]*, *Steinmetz und Wiese [2006]*, *Wiese et al. [2006]*)

Tab. 7.1: Liste der Messgeräte während der Erprobung der modifizierten MSR-Konzepte (G = Grundausstattung, E = Ergänzung im Rahmen des Forschungsprojektes, L = Leihgaben, Ü/I = Überwachungs- und Informationsfunktion, MSR = Regelung und Steuerungsfunktion im neuen MSR-Konzept) (Quelle: *Wiese [2005]*)

Einsatzort	**Messgröße**	**Messgerät**	**Hersteller**	**Bemerkung**
Einlaufgruppe	Durchfluss	Promag 30FH2H	Endress & Hauser	G, MSR
Einlaufgruppe	Temperatur	Mycom CPM 152	Endress & Hauser	G, Ü/I
Einlaufgruppe	pH-Wert	Mycom CPM 152	Endress & Hauser	G, Ü/I
Einlaufgruppe	Leitfähigkeit	Mycom CPM 152	Endress & Hauser	G, Ü/I
Einlaufgruppe	Probenehmer	RPT 10	Endress & Hauser	G, Ü/I
SBR 1/SBR 2	O_2	Liquisys COM 253	Endress & Hauser	G, MSR
SBR 1/SBR 2	NO_3-N	NITRATAX plus *(in-situ)*	HACH LANGE	G, MSR
SBR 1/SBR 2	NH_4-N	AMTAX Inter 2	HACH LANGE	E, MSR
SBR 1/SBR 2	PO_4-P	PHOSPHAX compact	HACH LANGE	E, Ü/I
SBR 1/SBR 2	TS	SOLITAX ts-line *(in-situ)*	HACH LANGE	E, MSR
SBR 1/SBR 2	Schlammspiegel	SONATAX *(in-situ)*	HACH LANGE	E, MSR
SBR 1	VSV	VOLITAX *(in-situ)*	HACH LANGE	L, Ü/I
ÜS-Leitung	Durchfluss	Promag 30FH1H	Endress & Hauser	G, MSR
ÜS-Leitung	TS	SOLITAX ts-inline	HACH LANGE	E, MSR
Ablaufgruppe	Durchfluss	Promag 30FH2F	Endress & Hauser	G, MSR
Ablaufgruppe	Temperatur	Liquisys CPM 223	Endress & Hauser	G, Ü/I
Ablaufgruppe	pH-Wert	Liquisys CPM 223	Endress & Hauser	G, Ü/I
Ablaufgruppe	Probenehmer	RPS 20	Endress & Hauser	G, Ü/I
Ablaufgruppe	Niederschlagsgeber	5.4032.35.007	Fa. Thies Clima	L, Ü/I
Mobiler Sampler	SAK/TS	UVAS/SOLITAX ts-inline	HACH LANGE	L, Ü/I

7.3.2 Erfassung aller relevanten Prozessgrößen

Mit Hilfe der online-Messgeräte konnten bereits im Vorfeld der Entwicklung neuer Mess-, Steuerungs- und Regelungskonzepte eine Vielzahl von Zyklen mit unterschiedlichster Belastungssituation dokumentiert werden, die das hohe Optimierungspotenzial verdeutlichten. Um dieses Potenzial zur Zyklusdauerverkürzung, einer Optimierung der Zykluszusammensetzung und der Verbesserung der Reinigungsleistung zu verdeutlichen, sollen nachfolgend einige Beispiele vorgestellt werden. Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Ausführungen ist in Tabelle 7.2 die damalige Zykluszusammensetzung aufgeführt.

Tab. 7.2: Zykluszusammensetzung während der Vorbereitungsphase (Quelle: Wiese)

Zyklusart	Trockenwetter	Regenwetter
Gesamtdauer t_Z	480 min	360 min
Reaktionsdauer t_R	290 min	213 min
Belüftungsdauer t_N	260 min	170 min
Sedimentation, Dekantieren, ÜSS, Pause	150 min	147 min
Beschickung (max.) [19]	80 min	90 min

Mischwasserzyklus SBR 1

Abbildung 7.4 zeigt wichtige Prozessgrößen im SBR 1 bei Mischwasserzufluss. In allen Phasen des dargestellten 6 h-Regenwetterzyklus ist erhebliches Optimierungspotenzial erkennbar: In einem 4 h-Zyklus wäre eine zweite Beschickungsphase aus hydraulischer Sicht nicht erforderlich (Einsparpotenzial: 23 min). In der Nitrifikationsphase können mindestens 55 min eingespart werden, da NH_4-N bereits um ca. 15:30 vollständig eliminiert worden ist. Die erste Sedimentationsphase kann um 24 min verkürzt werden, da er Abstand zwischen Schlamm- und Wasserspiegel bereits nach 30 min ausreichend groß war und die TS-Konzentration im abzuziehenden Klarwasser (damals 1 m unterhalb des Wasserspiegels gemessen) unter 10 mg/l lag; aus gleichem Grund könnte ebenfalls auf die Zwischensedimentationsphase verzichtet werden (20 min). Im konkreten Fall wurde der Dekantierprozess sogar vorzeitig beendet. Inklusive der Pausenzeiten können somit weitere 28 min eingespart werden. In Summe ergibt sich ein Potenzial zur Verkürzung der Zyklusdauer um 150 min; d. h. in diesem Fall wäre es möglich gewesen, die Zyklusdauer von 6 h auf 3,5 h zu reduzieren bzw. die hydraulische Kapazität um deutlich mehr als 50 % zu erhöhen.

Trockenwetterzyklus SBR 1

Bei Abbildung 7.5 handelt es sich um einen 8 h-Trockenwetterzyklus im SBR 1, in dessen Verlauf ein Niederschlagsereignis auftrat. Ein Großteil dieser Belastung wurde während der zweiten Beschickungsphase (ab 6:00 Uhr) dem Reaktor zugeführt. Auch hier ist ein hohes

[19] Die Beschickung der Reaktoren erfolgt mit jeweils maximal 2 Beschickungsphasen pro Zyklus. Während der Beschickung werden die Rührwerke (TW, RW) bzw. die Belüftung (nur bei RW) teilweise zugeschaltet.

Optimierungspotenzial zu erkennen: Mittels einer dynamischen Zyklusdaueranpassung hätte dieser Zyklus um 132 min (< 0,1 mg/l NH_4-N) bis 192 min (≈ 3 mg/l NH_4-N) verkürzt werden können. Es wäre dadurch sehr viel früher möglich gewesen, im weiteren Verlauf des Niederschlagsereignisses in den verkürzten Regenwetterzyklus umzuschalten.

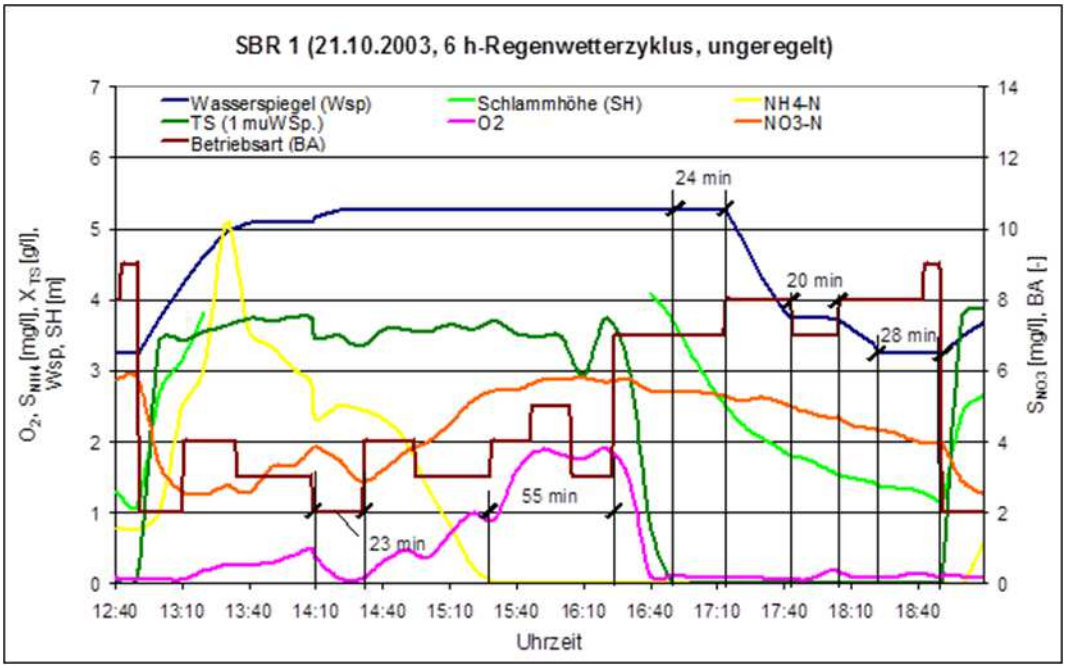


Abb. 7.4: Prozessgrößen im SBR 1 während eines 6 h-Regenwetterzyklus (Abwassertemperatur im Zulauf: 10 bis 13 °C) (Quelle: *Wiese [2004]*) [20]

Regenwetterzyklus SBR 1 / SBR 2

Die Abbildungen 7.6 und 7.7 zeigen eine Art „Worst Case"-Ereignis aus Sicht einer erhöhten Mischwasserbehandlung: Am 08.09.2003 wurde ein Niederschlagsereignis erfasst, dem eine ausgeprägte Trockenwetterperiode vorausging. So betrug der mittlere Tageszufluss in den letzten 40 Tagen vor diesem Niederschlagsereignis nur 709 m^3/d (Median: 617 m^3/d, Maximum: 1.817 m^3/d; im Normalfall beträgt der mittlere Tageszufluss ca. 1.400 m^3/d). Während dieser Zeit erfasste der Niederschlagsgeber eine Gesamtniederschlagshöhe von nur 23 mm. Eine Folge dieser Randbedingung war, dass der SBR 2 zu Beginn des Niederschlagsereignisses mit einer sehr hohen Schmutzfracht belastet wurde, die die Folge eines Spülstoßes war (Abbildung 7.6). Eine Schätzung ergab, dass in diesem Zyklus alleine dem SBR 2 ca. 27 kg N_{ges} (mittlere Belastung der Kläranlage pro Tag: 48 kg/d N_{ges}) zugeführt wurden! Die CSB-Fracht konnte leider nicht genau abgeschätzt werden, jedoch dürfte diese ebenfalls sehr hoch gewesen sein, da die O_2-Konzentration über die gesamte Zyklusdauer niedrig blieb. Trotz dieser ungünstigen Randbedingungen wurde der NH_4-N-Überwachungswert sicher eingehalten und es ist auch hier noch ein Potenzial zur Zyklusdauerverkürzung erkennbar (85 bis 115 min). Abbildung 7.7 zeigt den nachfolgenden Zyklus im SBR 1; dieser hat bereits in den verkürzten 6 h-Regenwetterzyklus umgeschaltet. In diesem Zyklus ist das Potenzial zur Zyklusdauerverkürzung wieder sehr hoch. In Summe hätte die Zyklusdauer um

[20] Betriebsart (BA): 1 = statisches Beschicken, 2 = Beschicken und Mischen, 3 = Belüften, 4 = Beschicken und Belüften, 5 = Belüften und Mischen, 6 = Mischen, 7 = Sedimentation, 8 = Klarwasserabzug, 9 = ÜS/Pause

172 min verkürzt werden können, d. h. es wäre möglich gewesen, einen 3 h- bzw. 3,5 h-Zyklus zu verwenden.

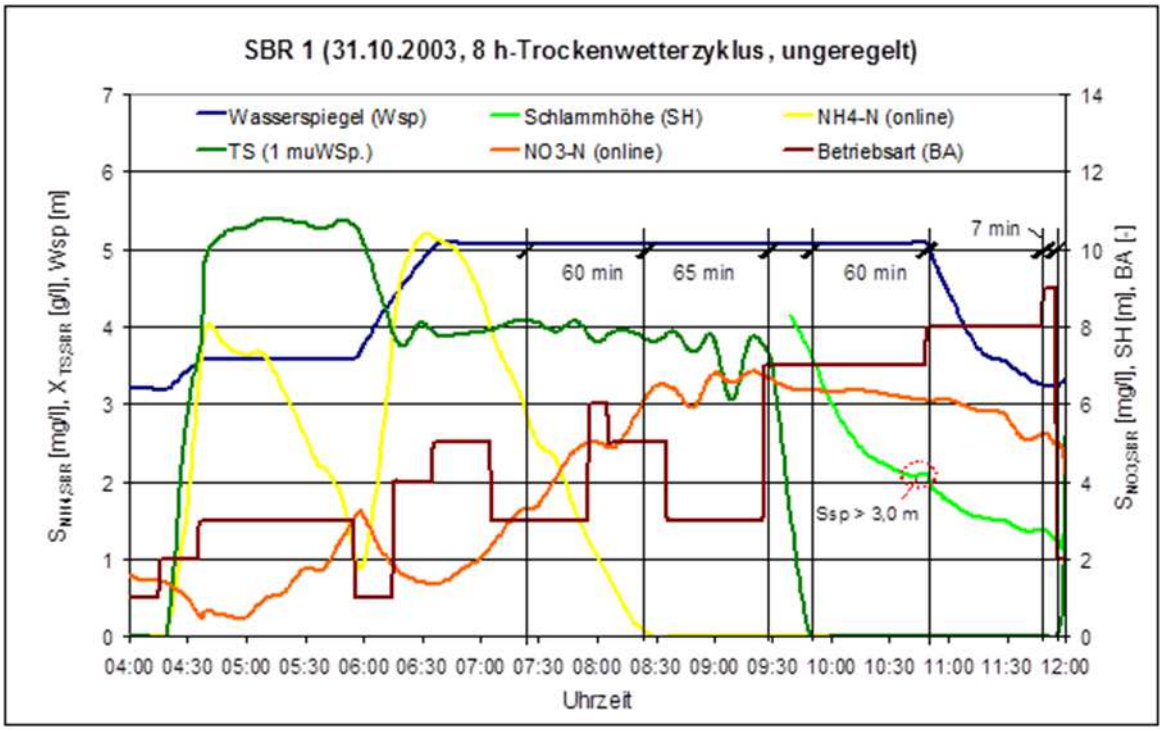


Abb. 7.5: Prozessgrößen im SBR 1 während eines 8 h-Regenwetterzyklus (Beginn eines Niederschlagsereignisses, Abwassertemperatur im Zulauf: 10 bis 12 °C) (Quelle: *Wiese [2005]*)

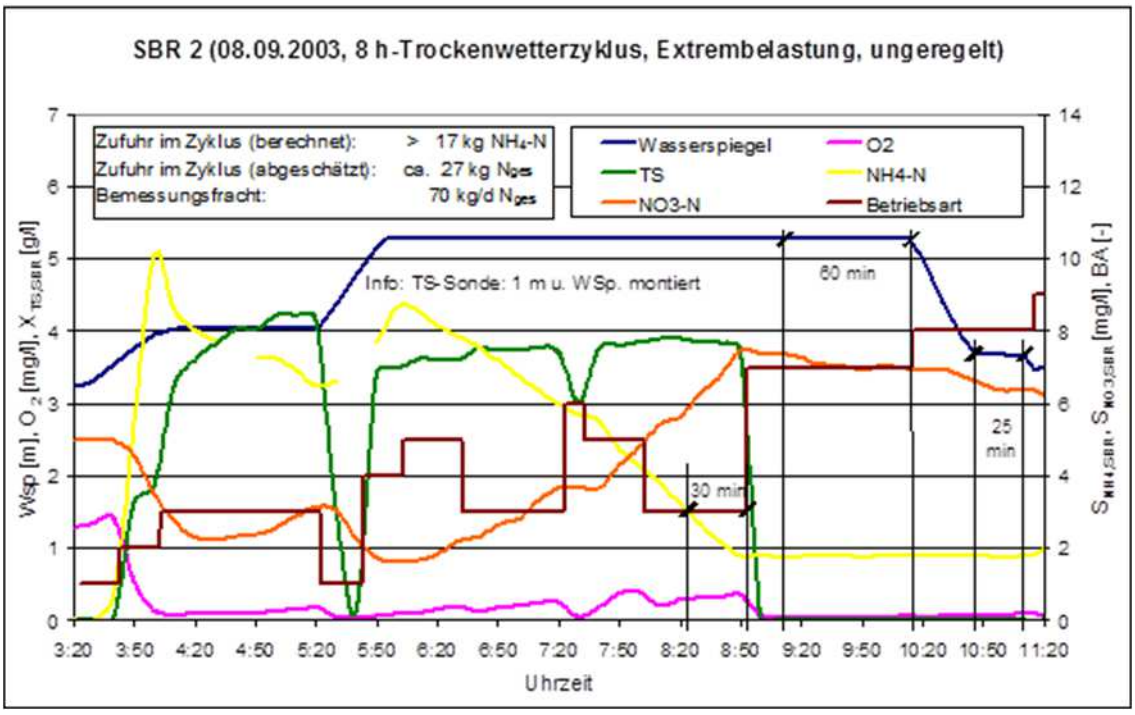


Abb. 7.6: Prozessgrößen im SBR 2 während eines 8 h-Regenwetterzyklus (Beginn eines Niederschlagsereignisses, Abwassertemperatur im Zulauf: 16 bis 18 °C) (Quelle: *Wiese [2004]*)

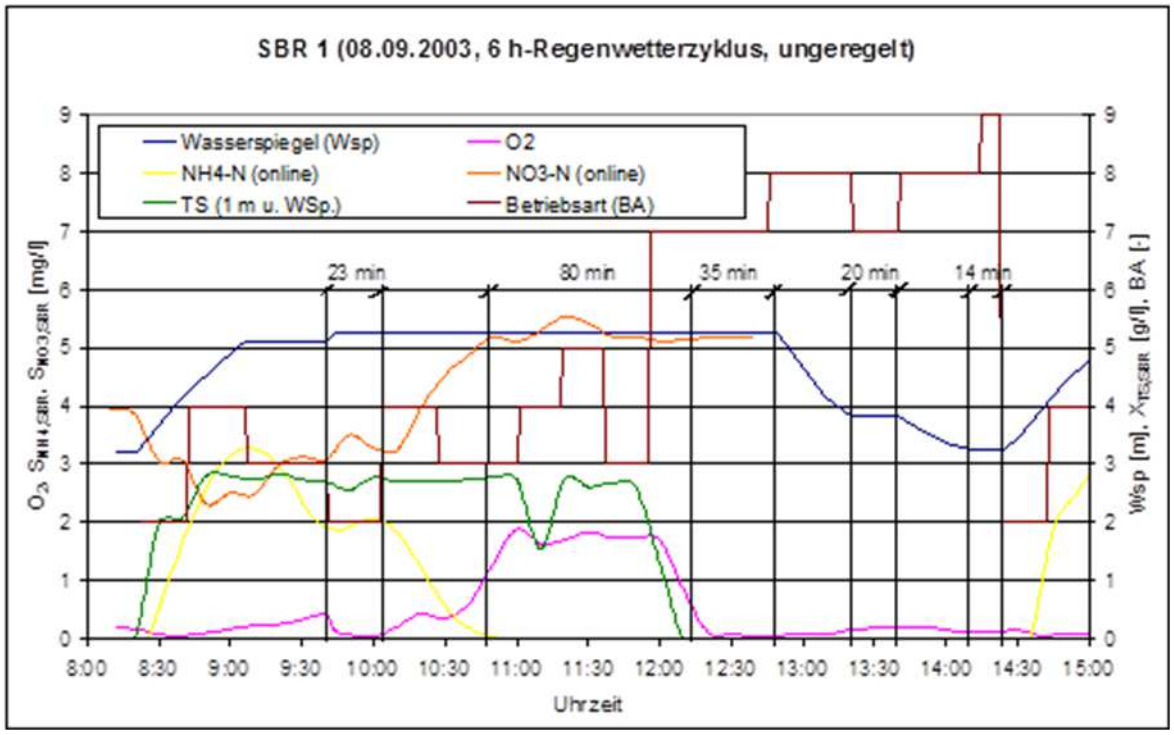


Abb. 7.7: Ganglinien wichtiger Prozessgrößen im SBR 1 (08.09.2003) während eines 6 h-Regenwetterzyklus (Quelle: *Wiese [2004]*)

Hochlastzyklus SBR 1

Zum Abschluss dieses Abschnitts sei noch auf Abbildung 7.8 verwiesen: Es zeigt die Ganglinien wichtiger Prozessgrößen bei einer sehr hohen Belastung. Die Folge war eine Ablaufkonzentration von knapp unter 6 mg/l NH_4-N, d. h. eine signifikante Überschreitung des Überwachungswertes von 3 mg/l NH_4-N. Wäre dieser Zyklus von der Behörde im Rahmen der regelmäßigen Fremdüberwachung beprobt worden, so hätte dies erhebliche finanzielle Belastungen durch eine Steigerung der Abwasserabgabe zur Folge haben können. Die Abbildung verdeutlicht aber auch, dass in der sogenannten nicht reaktiven Phase (Sedimentation, Klarwasserabzug, Pause) bis zu 70 min hätten eingespart werden können. Diese Zeit hätte genügt, um bei Verlängerung der belüfteten Phase eine vollständige Nitrifikation zu erreichen; eine statistische Auswertung zeigte, dass es immerhin in ca. 1 % aller Zyklen zu derartigen Überschreitungen kam.

Hieraus resultiert, dass die Chance, dass das Betriebspersonal derartige Probleme im Rahmen ihrer Eigenüberwachung identifizieren können, gering ist. Mit ähnlichen Problemen haben auch die Betreiber anderer Kläranlagen zu kämpfen.

Alle diese Abbildungen – und zahlreiche weitere dokumentierte Misch- und Trockenwetterereignisse – veranschaulichen eindrucksvoll das erhebliche Potenzial im Hinblick auf eine belastungsabhängige Regelung; nicht zuletzt, weil auch noch im Bereich der Belüftung Verbesserungspotenzial vorhanden war. Die von Zyklus zu Zyklus stark wechselnden Belastungsverhältnisse sprechen zudem dafür, eine echte dynamische Steuerung zu realisieren, um das volle Potenzial zur Verminderung der Emissionen bzw. des Energieverbrauchs effektiver zu nutzen.

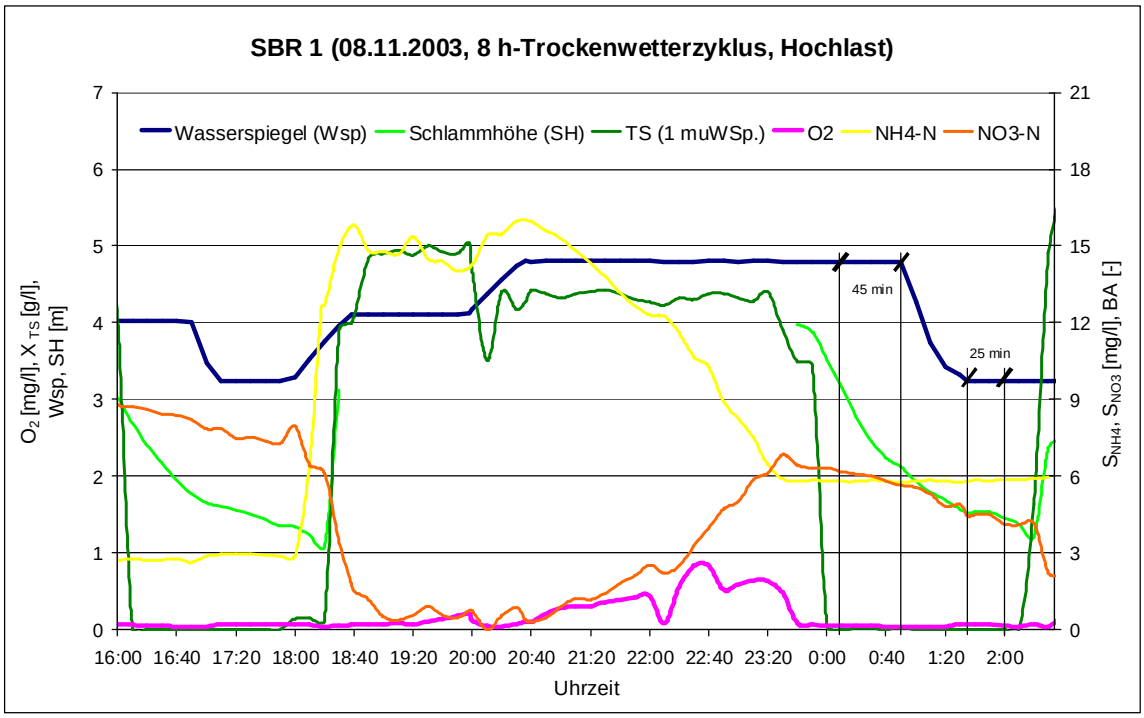


Abb. 7.8: Prozessgrößen infolge einer (vermutlich illegalen) hohen Belastung im SBR 1 (08.11.2003, Samstag) während eines 8 h-Trockenwetterzyklusses (Quelle: *Wiese [2005]*)

7.4 Dynamische Zyklussteuerung

Die gewonnenen Erkenntnisse bestätigen die Notwendigkeit einer flexiblen, belastungs- und situationsabhängigen Zyklussteuerung, die nicht allein auf eine Erhöhung der hydraulischen Kapazität, sondern auch auf eine Verbesserung der Denitrifikation und der biologischen Phosphorelimination ausgelegt werden muss. Ferner musste durch geeignete Maßnahmen (z. B. automatische Nachbelüftung) sichergestellt werden, dass weitere Überschreitungen des NH_4-N-Überwachungswertes vermieden werden. Es wurde daher eine neue SBR-Steuerung und -regelung entwickelt, die vereinfacht aus vier Kernelementen besteht:

- Trocken- bzw. Regenwettererkennung
- Dynamische Steuerungs- und Regelungsstrategien für die Einlaufbaugruppen (Einlaufpumpwerk, mechanische Vorreinigung, Vorlagebehälter, Trübwasserspeicher)
- Steuerungs- und Regelungsstrategien für die beiden SBR-Reaktoren
- Steuerungs- und Regelungsstrategien für die Auslaufbaugruppen (Mengenausgleich, Filter, Bypass, Notüberlauf)

Nachfolgend wird nun genauer auf diese einzelnen Kernkomponenten eingegangen.

7.4.1 Beschreibung der Funktionsbausteine

7.4.1.1 Trocken- und Regenwettererkennung

Die bisherige Trocken- bzw. Regenwettererkennung beruhte auf dem Mittelwert des Zuflusses, der alle 30 min ermittelt wurde. Lag dieser Wert über 145 m^3/h, so wurde Regenwetter erkannt

und der Reaktor 1 (führend) schaltete mit Beginn des nächsten Zyklus in den verkürzten 6 h-Zyklus um, um die hydraulische Leistungsfähigkeit der Kläranlage zu erhöhen. Der Reaktor 2 (folgend) folgte dann mit einem Zyklusversatz von 3 h. Die Rückschaltung vom 6 h-Zyklus in den Trockenwettermodus (8 h) erfolgte nach dem gleichen Muster bei Unterschreitung eines 30 min-Mittelwertes von weniger als 120 m^3/h. Das neue modifizierte Konzept ist in Abbildung 7.9 dargestellt. Die Entscheidungsfindung geschieht dabei wie folgt:

- Hauptentscheidungsgröße ist nach wie vor die Zuflussmenge, jetzt jedoch fließt der gleitende Mittelwert der letzten 15 min in die Entscheidungsfindung ein.
- Die zweite Entscheidungsgröße ist der Wasserstand im Einlaufpumpwerk. Da der Vorlagebehälter dadurch effektiver genutzt wird, dass der Zufluss zur Kläranlage bei Mischwasserzufluss auf deutlich über 230 m^3/h erhöht wird, werden immer wieder Situationen auftreten, bei denen die Einlaufpumpen kurzzeitig abschalten, wenn der Vorlagebehälter voll ist; dies hat zwangsläufig auch Auswirkungen auf den 15 min-gleitenden Zuflussmittelwert. Um Fehlsignale zu verhindern, wird die Überschreitung eines gewissen Wasserstands im Einlaufpumpwerk ebenfalls als Indiz für Regenwetter gewertet.
- Ursprünglich war vorgesehen noch weitere Größen in die Entscheidungsfindung einzubeziehen, um noch früher auf hydraulische Spitzen reagieren zu können. Aufgrund fehlender technischer Voraussetzungen wurde von der Ein- bzw. Anbindung dieser Informationen an das PLS jedoch abgesehen. Prinzipiell wäre eine Einbindung dieser Messsignale – sobald die technischen Randbedingungen erfüllt sind – in die neue Kläranlagensteuerung aber jederzeit möglich.

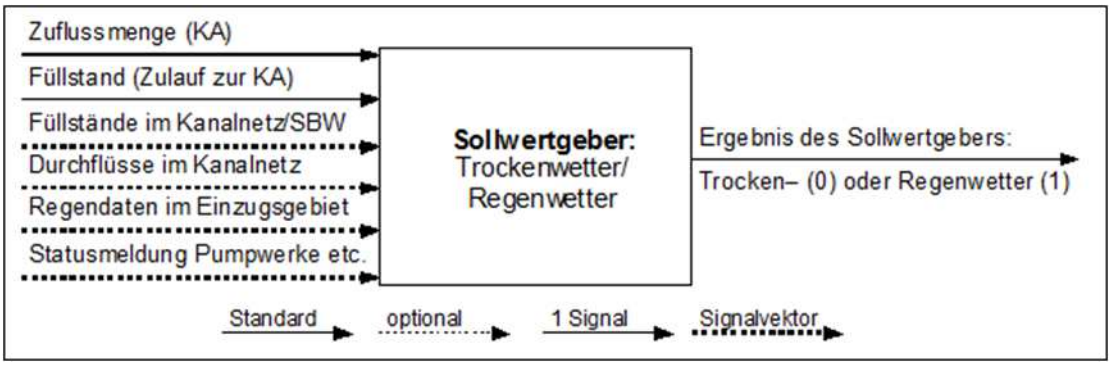


Abb. 7.9: Grundprinzip der Trocken- und Regenwettererkennung (nach *Wiese et al. [2005B]*)

7.4.1.2 MSR-Strategien für die Einlaufbaugruppen

Der Einlaufbereich besteht aus den folgenden Baugruppen:

- Einlaufbauwerk mit den beiden FU-geregelten Tauchmotorpumpen
- Vorreinigungsmodul mit Sieb, Sand- und Fettfang sowie Notumgehung
- Vorlagebehälter mit Beschickungspumpwerk (zwei polumschaltbare) Tauchmotorpumpen
- Trübwasserspeicher

Die in der ersten Projektphase durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass auch bei Mischwasserzufluss zeitweise erhebliche Volumina im Vorlagebehälter ungenutzt bleiben

(*Wiese [2004]*). Aus diesem Grund wurde entschieden, den Zufluss am Einlaufpumpwerk zumindest zeitweise deutlich über die eigentliche Behandlungskapazität der Kläranlage zu erhöhen, um so das Speichervolumen auf der Kläranlage effektiver zu nutzen. Die neue Einlaufpumpwerksregelung kann dabei wie folgt beschrieben werden:

- Bei Trockenwetter ändert sich an der bisherigen Betriebsführung nichts.
- Bei Regenwetter wird der Zufluss bis zu einem definierten Wasserstand im Einlaufbauwerk auf bis zu 260 m^3/h erhöht, wobei aus Energiegründen nur eine Pumpe läuft.
- Bei Überschreitung eines gewissen Wasserstands im Einlaufbauwerk wird die zweite Einlaufpumpe zugeschaltet und der Zufluss bis max. 500 m^3/h erhöht.
- Erreicht das Sieb (z. B. aufgrund eines Spülstoßes) seine Leistungsgrenze und kommt es zum Rückstau im Einlaufkanal des Moduls (und damit zum Anspringen des Notüberlaufs) werden die Pumpen kurzzeitig auf die Mindestförderleistung (30 - 40 m^3/h) herunter geregelt bis durch die einsetzende Siebreinigung die hydraulische Leistung des Siebes wieder erhöht wird. Dies gilt aber nur bis zum Erreichen einer definierten Wasserstandsmarke im Einlaufbauwerk; ab dieser Marke läuft/laufen die Pumpe(n) auf Maximalleistung, um sicherzustellen, dass die im Einleiterbescheid vorgeschriebene Mindestzuflussmenge auch von der Kläranlage angenommen werden kann.

Zur Erhöhung der hydraulischen Kapazität des Siebes wurde auch eine Optimierung der Siebreinigung in Angriff genommen:

- Erste Priorität hat nach wie vor die Wasserstandsmessung im Einlaufgerinne des Vorreinigungsmoduls. Bei Überschreitung einer definierten Wasserstandsmarke wird automatisch die Siebreinigung aktiviert.
- Weist die Füllstands- bzw. Zuflussmessung auf eine deutliche Steigerung des Zuflusses hin, wird vorsorglich eine einmalige Siebreinigung von 10 min Dauer eingeleitet, sodass die Siebreinigung zu Beginn einer Mischwasserzuflussspitze meist aktiv ist.
    - Hierdurch soll sichergestellt werden, dass das Sieb möglichst sauber ist, wenn die zweite Einlaufpumpe zugeschaltet werden muss.
    - Ferner soll der negative Einfluss von Spülstößen (i. d. R. stark mit partikulären Stoffen verunreinigt) auf die hydraulische Leistungsfähigkeit des Siebs verringert und dadurch möglichst vermieden werden, dass der Notüberlauf aktiviert werden muss.

Die Ansteuerung des Beschickungspumpwerks für die SBR wurde nur wenig modifiziert:

- Die Schaltpunkte der wasserstandsbasierten Regelung des Einlaufpumpwerks können vom System variabel gehandhabt werden. So kann eine partielle Bewirtschaftung zum Frachtausgleich bei Trockenwetter erfolgen, wohingegen bei Indizien für einen erhöhten Mischwasserzufluss die Vorlage nach Möglichkeit bis auf die Sohle heruntergefahren wird, um Speicherplatz zu schaffen. Da leider auf die Einbindung von Informationen aus dem Kanalnetz bzw. von Niederschlagsdaten verzichtet werden musste und damit die Frühwarnkomponente noch nicht vorhanden war, wurde die Einstellung so parametriert, dass die Vorlage nach Möglichkeit bei einer Beschickung immer weitgehend entleert wird.
- Gegen Ende des Projektes wurde eine Zwangsbeschickung implementiert, um das vorhandene Behandlungsvolumen effektiver zu nutzen. D. h. ist die Vorlage voll, jedoch in den

Reaktoren freies Volumen vorhanden, ist in Abhängigkeit der Vorgaben der SBR-Zyklussteuerung in bestimmten Zyklusphasen (d. h. bis zu einer definierbaren Schrittnummer und in den Pausezeiten) eine außerplanmäßige Zwangsbeschickung der Reaktoren möglich [21].

Auch die Bewirtschaftung des Trübwasserspeichers wurde modifiziert, da beobachtet wurde, dass durch die Zugabe von Trübwasser erhebliche Frachtspitzen erzeugt werden können:

- Früher wurde der Trübwasserspeicher über einen Elektroschieber entleert. Dieser wurde jedoch nicht automatisch angesteuert, sondern vom Betriebspersonal per Mausklick oder über die Vor-Ort-Steuerung während der Arbeitszeit eingestellt. Der Beckenabfluss wurde in das Einlaufbauwerk abgeleitet. Dieses einfache Verfahren hat sich nicht immer als vorteilhaft erwiesen, da die händische Bedienung des Schiebers des Öfteren dazu geführt hat, dass die Entleerung des Beckens oft schneller erfolgte als eigentlich gewollt, wodurch wiederum die ausgleichende Wirkung des Trübwasserspeichers gemindert wurde. Die Konsequenz war, dass eine erhebliche Trübwassserbelastung auf die tägliche Belastungsspitze der Gemeinde Messel traf.
- Daher wurden zwei Tauchmotorpumpen (pro Reaktor je eine Pumpe) in den Trübwasserspeicher eingebaut und Rohrleitungen zur direkten Beschickung der Reaktoren verlegt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden diese Pumpen in die SBR-Zyklussteuerung eingebunden, sodass jetzt eine direkte Zugabe des Trübwassers in die Reaktoren zu günstigen Zeitpunkten erfolgen kann; in der Regel erfolgt die Zugabe nun während der ersten Zyklusschritte.

7.4.1.3 Dynamisierte Zyklussteuerung mit Regelungselementen

Die neue dynamisierte Zyklussteuerung beruht ebenfalls – wie schon die alte Steuerung – auf einer zeitbasierten Schrittkettensteuerung, die aber durch zahlreiche Sollwertgeber und Regelungskonzepte je nach aktueller Belastung (z. B. Hochlast) und Situation (z. B. Regenwetter) nahezu beliebig gestaucht oder verlängert werden kann; sie wurde daher „Ziehharmonikasteuerung“ getauft. Eine weitere Änderung ist, dass es nur noch ein einziges Steuerungsprogramm gibt, auch wenn Abbildung 7.10 den Eindruck vermittelt, dass es nach wie vor ein Trocken- und ein Regenwetterprogramm gäbe. Basis der Steuerungsebene sind zwei Sollwert-Ebenen: Eine Ebene definiert die minimale Dauer, die andere die maximale Dauer eines jeden Schrittes. Die Sollwerte werden nicht starr vorgegeben, sondern mit Hilfe entsprechender Sollwertgeber ermittelt. Das Grundprinzip eines solchen Sollwertgebers ist in Abbildung 7.11 dargestellt. Zwischen den beiden Sollwert-Ebenen sitzt eine dritte Ebene, in dem die einzelnen Regelungskonzepte implementiert wurden. Die Min-/Max-Sollwerte für jeden einzelnen Teilschritt werden mit Hilfe eines Sollwertgebers ermittelt, der seine Entscheidung auf den folgenden Informationen aufbaut:

1. Die erste Entscheidungsbasis für den Min- und Max-Sollwertgeber eines Zyklus ist die Entscheidung des Sollwertgebers „Trocken- bzw. Regenwetter“. D. h. je nach der hydraulischen Zuflusssituation werden unterschiedliche minimale bzw. maximale Sollwerte für die Dauer des jeweiligen Schrittes vorgegeben.
2. Zweite Grundlage für die Entscheidung können optional einzelne Messsignale der online-Qualitätsparametermessungen sein. So kann auf bestimmte Phasen (z. B. Denitrifikation, Bio-P) verzichtet werden, wenn es die jeweilige Situation (z. B. hoher Zufluss) erfordert

[21] Alternativ ist die Freigabe zur Zwangsbeschickung in Abhängigkeit der online-Messwerte möglich.

und/oder die Einhaltung des Reinigungsziels (z. B. NO_3-N- und PO_4-P-Konzentration niedrig) diesen Schritt nicht erforderlich macht.

3. Weitere optionale Entscheidungshilfen können aus physikalischen Messgrößen resultieren. Ein Beispiel hierfür ist der Füllstand im Reaktor, der als Entscheidungsgröße in die Schritte „Sedimentation“ und „Dekantieren“ (s. u.) eingeht.
4. Weitere mögliche optionale Entscheidungshilfen können aus den Ergebnissen von Modellen resultieren. Hier könnten zukünftig beispielsweise die Ergebnisse von computergestützten Modellen in die Entscheidungsfindung mit einbezogen werden.
5. Letztlich besteht auch die Möglichkeit, noch andere Werte für die Entscheidungsfindung dem Sollwertgeber zur Verfügung zu stellen. Eine Möglichkeit könnte beispielsweise darin bestehen, die Belüftungsdauer des letzten Belüftungsschrittes bei Trockenwetter dem Stabilisierungsgrad des belebten Schlamms anzupassen.

Legende: WS = Wasserstand, SS = Schlammspiegel, SV = Schlammvolumen, SM_{SBR} = Schlammmenge im Reaktor, DF = Durchfluss, ÜS = Überschussschlamm, TS = Trockensubstanz

Abb. 7.10: Grundprinzip der dynamisierten Zyklussteuerung (nach *Wiese et al. [2005B]*)

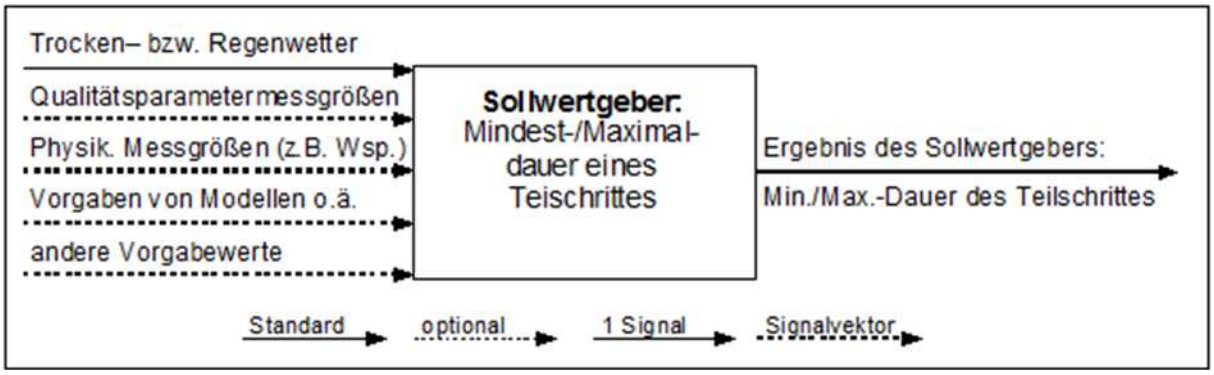


Abb. 7.11: Grundprinzip eines Min-/Max-Sollwertgebers (nach *Wiese et al. [2005B]*)

Es gilt jedoch anzumerken, dass in vielen Fällen (v. a. im Trockenwetterbetrieb) die minimale und maximale Dauer eines Schrittes während der großtechnischen Erprobung identisch gewählt wurde; dies gilt für die Schritte die nur gesteuert und nicht geregelt wurden.

Schrittkettensteuerung [22]

Die Schrittkettensteuerung basiert bei der auf der KA Messel umgesetzten Version auf 21 Schritten (Abbildung 7.12). Die Art der jeweiligen Schrittkette und die prinzipielle Definition, welche Stellglieder (z. B. Rührwerke, Gebläse, Dekanter) während dieser Phase aktiviert werden können, wurde in den Automationscode implementiert, ebenso wie die Vorgabewerte für die Mindestdauer der jeweiligen Teilschritte. D. h. diese Vorgaben können vom Betriebspersonal nur nach Absprache mit dem Administrator des Prozessleitsystems verändert werden. Diese Maßnahme wurde aus Sicherheitsgründen gewählt, um sicherzustellen, dass keine verfahrenstechnisch wenig sinnvollen Schrittfolgen gewählt werden bzw. eine Mindestreinigungsleistung auch bei einer ungünstigen Wahl der frei parametrierbaren Vorgabewerte sichergestellt ist.

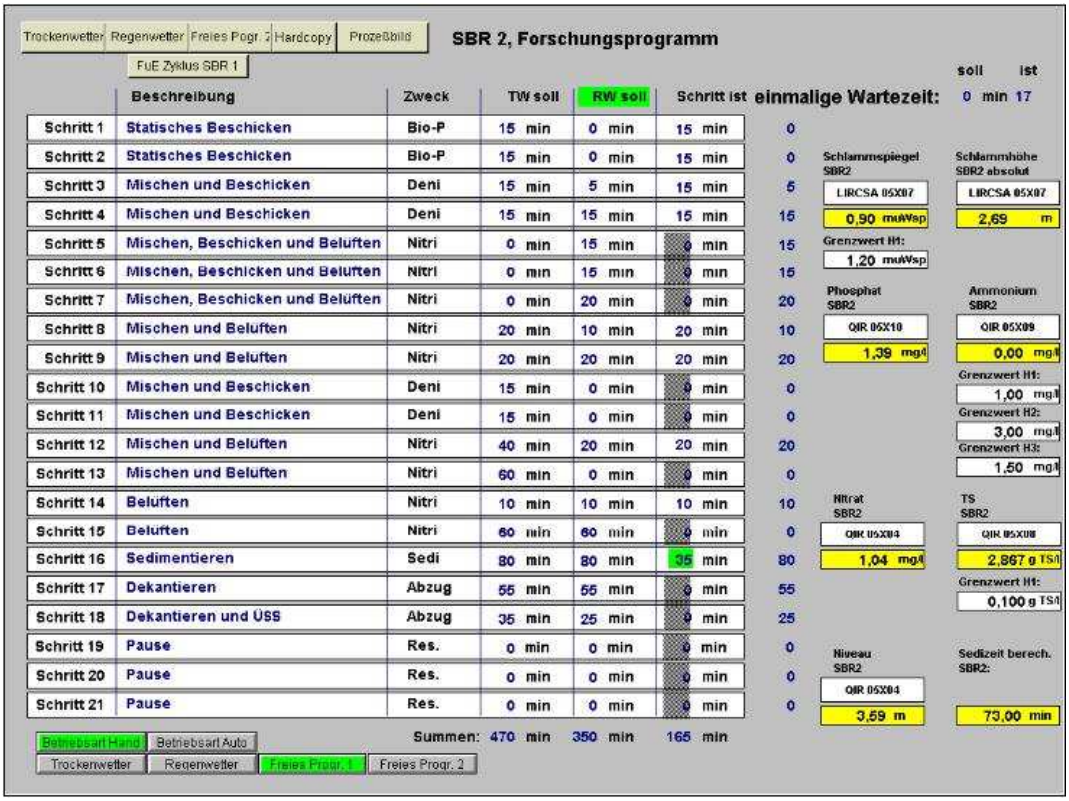


Abb. 7.12: Parametrier- und Informationsebene für die Zyklussteuerung (Bildquelle: Autor)

Weiterhin charakteristisch für die modifizierte Schrittkettensteuerung ist, dass der TW-/RW-Sollwertgeber permanent seine Ergebnisse ermittelt und an die Steuerung übergibt. D. h. im Gegensatz zur bisherigen Konzeption, bei der ein Umschalten der Reaktoren vom 8 h-Zyklus in den 6 h-Zyklus (bzw. wieder zurück) jeweils erst mit Beginn des neuen Zyklus des SBR 1

[22] Es hätte auch andere Möglichkeiten gegeben, das Problem zu lösen (z. B. mit ineinandergreifenden Control-Loops). Die Schrittenkettensteuerung wurde jedoch beibehalten, da dieses Prinzip dem Betriebspersonal einer jeden SBR-Kläranlage vertraut ist. Im Übrigen kann das Personal bei einer Schrittkettensteuerung die einzelnen täglichen Arbeitsschritte (z. B. händische TS/VSV-Ermittlung) einfacher planen.

erfolgte (bzw. bei einigen anderen Kläranlagen auch beim Erreichen bestimmter Sprungmarken), erfolgt die Umschaltung bei dem neuen Konzept sofort, d. h. sowohl der Zyklus im SBR 1 und der Zyklus im SBR 2 werden sofort den neuen Bedingungen angepasst, d. h. beim Umschalten von Trocken- in Regenwetterbetrieb wird der Zyklus sofort verkürzt bzw. beim Zurückschalten sofort wieder verlängert [23]. Dieser Vorgang kann mehrmals pro Zyklus erfolgen, sodass flexibel und schnell auf die jeweilige Zuflusssituation reagiert werden kann.

Frei zugängliche Parametrierebene

Alle Maximalwerte und die wichtigsten Soll- und Führungsgrößen für die Regelungskonzepte können durch das Betriebspersonal in einer sinnvollen Bandbreite frei parametriert werden (Abbildung 7.12). Auf dieser Parametrierebene sieht das Betriebspersonal auch sofort

- alle 21 Schritte mit ihrer jeweiligen Beschreibung und ihrem Zweck,
- die derzeitige maximale Dauer des jeweiligen Teilschrittes, die maximale Dauer des jeweiligen Zyklus bei Abarbeitung aller Teilschritte mit der jeweils maximalen Dauer,
- der aktuelle Zyklusschritt,
- die aktuellen Messgrößen der wichtigsten Messgrößen (PO_4-P, NH_4-N, NO_3-N, TS, Schlammspiegel) im jeweiligen Reaktor,
- das Ergebnis des Sollwertgebers „TW/RW“,
- die tatsächliche Dauer der bereits abgearbeiteten Schritte und die bisherige Gesamtdauer des Zyklus (hier: 165 min),
- der Zeitpunkt zu dem ggf. ein Umschalten vom Trocken- in den Regenwetterbetrieb und ggf. wieder zurück stattgefunden hat [24],
- die für die noch abzuarbeitenden Schritte geschätzte Dauer bzw. die bereits für den nächsten Zyklus abgeschätzten Schrittdauern,
- die errechnete und ggf. die tatsächlich abgewartete Wartezeit, die vom Zyklussynchronisationsprogramm errechnet wird und die aus dem Füllstand abgeschätzte erforderliche Mindestsedimentationsdauer bis zur ersten Freigabe des Dekanters.

Ferner kann das Betriebspersonal von hier aus jederzeit mit einem Mausklick in die bisherige Zyklussteuerung zurückschalten. Wie in allen anderen Bedienebenen des PLS sind wichtige Anzeigenbereiche mit Hilfstexten hinterlegt, die automatisch erscheinen, wenn der Mauszeiger mehrere Sekunden über der gleichen Stelle verharrt.

---

[23] Eine statistische Auswertung ergab, dass es im Mittel bisher 4:31 h dauerte bis der führende Reaktor (SBR 1) nach Erhalt des Umschaltsignals tatsächlich mit Beginn des neuen Zyklus in den 6 h-Zyklus umgeschaltet hat. Bei der bisherigen Strategie konnte es im Extremfall sogar bis zu 8 h dauern bis der führende Reaktor (SBR 1) in den verkürzten 6 h-Zyklus umschaltete. Da der SBR 2 mit 3 h-Zyklusversatz folgte, wurde im ungünstigsten Fall die maximale hydraulische Leistungsfähigkeit dann erst nach 11 h erreicht.

[24] In diesem Fall erfolgte das Umschalten in Schritt 4, da Schritt 3 noch im TW-Zyklus abgearbeitet wurde bzw. die Schritte 5 bis 7 nicht abgearbeitet wurden (Schritte ist: 0 min grau hinterlegt).

Nachfolgend sollen die einzelnen Teilschritte vom Prinzip her erläutert werden.

- ***Schritt 1 und Schritt 2 (Statisches Beschicken)*** [25]***:*** Diese Schritte dienen der Substratakkumulation und dem Beginn der Phosphatrücklösung. In der praktischen Versuchsphase wurde die Dauer dieser Schritte nicht geregelt, zumal in der ersten halben Stunde noch keine zuverlässigen PO_4-P-Messwerte vorliegen. Im Trockenwetterfall werden die beiden Schritte mit jeweils 15 min abgearbeitet. Im Regenwetterfall wird auf die Phase des statischen Beschickens komplett verzichtet, da die Ergebnisse der Messungen im Zeitraum August bis Dezember 2003 gezeigt haben, dass die sichere Einhaltung des Phosphorüberwachungswertes bei Mischwasserzufluss unproblematisch ist [26].
- ***Schritt 3 und Schritt 4 (Mischen und Beschicken):*** Diese beiden Schritte dienen der Denitrifikation und einer weiteren Phosphatrücklösung. In der großtechnischen Versuchsphase wurden diese beiden Schritte nur bedingt geregelt: Bei Mischwasserzufluss werden im Falle von Nitratkonzentrationen < 1,0 mg/l NO_3-N diese beiden Schritte vorzeitig abgebrochen oder ganz übersprungen. Bei Trockenwetter wurden diese beiden Schritte genauso wie die Schritte 1 und 2 mit festen Dauern von jeweils 15 min abgearbeitet. Prinzipiell ist es aber möglich, auch diese Phasen in Abhängigkeit der NO_3-N-Sonde (Ende der Denitrifikation) bzw. ggf. auch der PO_4-P-Messung (Veränderung der Phosphatrücklösung über zwei Messwerte als Indikator für das Ende der Phosphatrücklösung) zu steuern; eine diesbezügliche Ergänzung der dynamisierten Steuerung ist aufgrund der gewählten Softwarestruktur möglich.
- ***Schritt 5 bis Schritt 7 (Mischen, Beschicken und Belüften):*** Diese drei Schritte dienen der Beschickung, der Abbau von Kohlenstoffverbindungen und Nitrifikation bei Mischwasserzufluss, den aus Sicht der Mischwasserbehandlung primären Zielen [27]. Bei Trockenwetter werden diese drei Schritte übersprungen, um die Stickstoff- und Phosphorelimination zu verbessern. Eine Regelung der Gebläseleistung erfolgt hier über die bereits implementierte O_2-basierte PID-Regelung, da in dieser Phase hoher Sauerstoffzehrung die Gebläse ohnehin auf Volllast fahren und die NH_4-N-Konzentration wegen der Beschickung sich noch erhöhen kann. Das Rührwerk wird für Zwecke eines besseren Sauerstoffeintrags eingeschaltet, da durch die erzeugte Kreisströmung der Aufstiegsweg der Sauerstoffblase erhöht wird. Die Min- und Max-Sollwerte sind im Falle der Schritte 5 bis 7 identisch.
- ***Schritt 8 und Schritt 9 (Mischen und Belüften):*** Diese beiden Schritte dienen wiederum der Kohlenstoffelimination und der Nitrifikation. Genauso wie im Falle der Schritte 5 bis 7 erfolgt die Gebläseregelung über die bisherige O_2-Regelung.
- ***Schritt 10 und Schritt 11 (Mischen und Beschicken):*** Diese beiden Schritte dienen bei Trockenwetter einer Verbesserung der Denitrifikation. In der Versuchsphase wurden diese

---

[25] Wie auch bei den nachfolgenden Schritten kann es vorkommen, dass einzelnen Zyklusphasen (z. B. statisches Beschicken, Mischen etc.) mehrere Schritte in der Schrittkettensteuerung zugewiesen wurden. Theoretisch wäre es möglich gewesen, diese Teilschritte zu einem Schritt zusammenzuziehen, jedoch könnten hieraus gewisse Nachteile resultieren (z. B. eine geringere Sicherheit gegen Fehlbedienung, langsameres Einschwingen der Reaktor-Synchronisation bei einer deutlichen Zyklusdauerverkürzung).

[26] Im Oberflächenabfluss ist meist kaum Phosphor enthalten, sodass dieser im Mischwasserzufluss stärker verdünnt wird als der CSB, der auch in höheren Konzentrationen im Oberflächenabfluss vorkommen kann.

[27] Aus Mischwasserentlastungsbauwerken im Kanalnetz können erhebliche Frachten an sauerstoffzehrenden Substanzen emittiert werden, die zu akutem Sauerstoffmangel und daraus resultierendem Fischsterben führen können. Auch hohe NH_4-N-Konzentrationen im Entlastungsabfluss können bei hohen pH-Werten von mehr als 8 zu einer Ammoniakvergiftung von Organismen führen.

beiden Schritte nicht geregelt, um nicht gleichzeitig an zu vielen Stellschrauben zu drehen und das System übersichtlich zu halten; jedoch ist es auch hier prinzipiell möglich, eine Regelung auf Basis der NO_3-N-Sonde zu implementieren; eine entsprechende Ergänzung der dynamisierten Steuerung ist auch in diesem Fall problemlos möglich. Bei erhöhtem Mischwasserzufluss werden diese beiden Schritte übersprungen.

- ***Schritt 12 und Schritt 13 (Mischen und Belüften):*** Diese beiden Schritte dienen wiederum der Kohlenstoffelimination und der Nitrifikation. Gegen Ende des Forschungsvorhabens wurde hier eine modifizierte Gebläseregelung in das PLS implementiert. Auf der Grundlage von drei definierten Grenzwerten können in Alternative zur O_2-PID-Regelung bei Unterschreitung der gestaffelten Grenzwerte die Gebläse nacheinander runtergeregelt bzw. ggf. auch ganz abgeschaltet werden. Bei Mischwasserzufluss wird Schritt 13 übersprungen.
- ***Schritt 14 (Belüften):*** Dieser Schritt, in dem 10 min lang nur belüftet und nicht gerührt wird, dient einer zusätzlichen Sicherheit bei der Nitrifikation und auch einem „Abstoppen“ des Reaktorinhalts, der durch das Rührwerk zuvor in eine Kreisbewegung versetzt worden ist. Die Beobachtungen der ersten Projektphase haben gezeigt, dass sich der belebte Schlamm schneller absetzt, wenn vor Beginn der Sedimentation eine reine belüftete Phase liegt und keine gerührte Phase.
- ***Schritt 15 (Belüften):*** Dieser Schritt ist ein Notfallschritt, der zur sicheren Einhaltung des NH_4-N-Überwachungswertes dient und unabhängig von Trocken- bzw. Mischwasserzufluss ist. D. h. er wird nur aktiviert, wenn die NH_4-N-Konzentration zu Beginn dieses Schrittes über einem frei definierbaren Sollwert (z. B. der Überwachungswert von 3 mg/l NH_4-N) liegt. Anschließend erfolgt für eine gewisse Dauer eine automatische Nachbelüftung. Wird am Ende dieser Nachbelüftung noch immer der Sollwert nicht unterschritten, kann eine Alarmmeldung herausgegeben werden, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass es einen Defekt an den Gebläsen gibt, der vom PLS nicht erfasst wird (z. B. Keilriehmenriss). Ein Fehler des NH_4-N-Photometers wird über eine Plausibilitätsprüfung auf Basis der O_2-Messung (die ggf. noch um die Messdaten der NO_3-N-Sonde ergänzt werden kann) abgefangen.
- ***Schritt 16 (Sedimentation):*** In diesem Schritt werden alle Gebläse und das Rührwerk ausgeschaltet, es beginnt die Trennung des belebten Schlamms vom gereinigten Abwasser. Der Mindestwert für die Sedimentation wird in Abhängigkeit des Wasserspiegels abgeschätzt; die Grundlage für die Schätzung beruht auf Erfahrungswerten; im Falle der Umsetzung der CBR-basierten Steuerung würde die Schätzung vom CBR-Modell (siehe Kapitel 7.5) übernommen werden. Der Maximalwert wird auf jeweils 80 min begrenzt. In diesem Schritt gibt es keine Unterschiede zwischen Trocken- und Mischwasserzufluss.
- ***Schritt 17 (Dekantieren):*** In diesem Schritt beginnt der Dekantierprozess, der kontinuierlich von einer Schlammspiegel- und einer TS-Sonde, die 80 cm unterhalb des Wasserspiegels montiert ist, überwacht wird. Die beiden Grenzwerte die mindestens erfüllt werden müssen, damit dekantiert wird, können frei parametriert werden [28]. Bevor der Dekanter (wieder) geöffnet wird, müssen die Grenzwerte für eine gewisse Mindestdauer (die sog. Dekantersperrzeit), die ebenfalls parametriert werden kann, eingehalten werden; dies soll verhindern, dass der Dekanter zu oft auf und zu geht. Bei Erreichen eines definierten

[28] Der Schlammspiegelmesswert muss oberhalb, die TS-Konzentration unterhalb des Grenzwertes liegen.

Mindestwasserstands, der für Trocken- und Regenwetter unterschiedlich gewählt werden kann, wird automatisch in Schritt 18 weitergeschaltet.

- ***Schritt 18 (Dekantieren und ÜSS):*** Ist der Mindestwasserstand im Reaktor noch nicht erreicht, wird der Dekantierprozess mit Hilfe des in Schritt 17 beschriebenen Regelungskonzeptes fortgesetzt. Ferner wird mit dem Überschussschlammabzug begonnen, der auch geregelt werden kann.
- ***Schritt 19 bis Schritt 21 („Pause"):*** Die Schritte 19 bis 21 wurden als Reserveschritte eingearbeitet, falls die Zykluszusammensetzung später noch einmal variiert oder ergänzt werden soll; daher ist die Bezeichnung „Pause" eher verwirrend.

Sofern Messgeräte ausfallen oder offensichtlich unplausible Ergebnisse liefern, werden diese Zustände in den jeweiligen Regelungskonzepten durch Plausibilitätsprüfungen o. ä. erfasst und durch Ersatzwerte ersetzt.

7.4.1.4 Synchronisation der Reaktoren

Die Dynamisierung der Zyklussteuerung führt zwangsläufig dazu, dass auch die Synchronisation der einzelnen Reaktoren dynamisiert werden muss. Verwendet wurden dazu eine feedback-basierte, d. h. eine nachgeführte Synchronisation. Die erforderlichen Wartezeiten werden permanent neu errechnet, sodass auch flexibel auf plötzliche Verzögerungen in dem anderen Reaktor (z. B. bei einer erforderlichen automatischen Nachbelüftung) reagiert werden kann. Obwohl nach wie vor im Normalbetrieb das Prinzip „SBR 1 führt/SBR 2 folgt" zur Anwendung kommt, ist die Synchronisationsroutine auch in der Lage, mit außergewöhnlichen Belastungssituationen fertig zu werden, in denen der folgende Reaktor den führenden Reaktor überholt; in diesem Fall geht die Führungsfunktion automatisch auf den bisherigen folgenden Reaktor über und der ehemalige führende Reaktor wird neu synchronisiert. Die Synchronisation erfolgt primär über die Wartezeiten, die fakultativ bei Bedarf jedoch auch für andere Zwecke genutzt werden können, wie z. B. aerobe Schlammstabilisierung, Denitrifikation und Zwangsbeschickung, sodass diese Zeit bereits schon wieder für Reinigungszwecke genutzt werden kann. Unterprogramme stellen zudem sicher, dass gewisse Betriebszustände (z. B. beide Reaktoren dekantieren gleichzeitig, Dekantieren bei laufender Belüftung) nicht auftreten können. In besonders wichtigen Fällen sorgen auch Verriegelungen dafür, dass bestimmte Zustände nicht auftreten können (z. B. drei Gebläse auf einen Reaktor).

7.4.1.5 MSR-Strategien für die Auslaufbaugruppe

Der Auslaufbereich besteht aus den folgenden Baugruppen:

- Mengenausgleich im Ablauf mit integriertem Notüberlauf
- Flächenfilter
- Bypassleitung
- Armaturenschacht
- Auslaufbauwerk

Wenn der Zufluss zur Kläranlage erhöht werden soll, dann muss auch die Ablaufmenge erhöht werden. Aus hydraulischer Sicht stellt der Ablauffilter mit 230 m^3/h das schwächste Glied in der Behandlungskette dar. Da jedoch ein Schlammabtrieb aus den Reaktoren durch eine Überwachung des Dekantierprozesses mittels einer TS-Sonde verhindert wird, kann der Filter

im Teilstrom umgangen werden. Hierfür wurde die Steuerung und Regelung der Auslaufbauwerke modifiziert:

- Bei Trockenwetter wird weiterhin der gesamte Abfluss über den Filter geführt.
- Bei Mischwasserzufluss wird bei Überschreitung eines frei parametrierbaren Wasserstands im Mengenausgleich ein Elektroschieber in der Zulaufleitung zum Filter geöffnet, sodass ein Teilstrom am Filter vorbeigeführt wird. Der Regler ist so parametriert, dass dann ca. 480 m^3/h aus dem Mengenausgleich abfließen, wovon 200 bis 230 m^3/h über den Filter geführt werden. Der Rest wird über den Bypass abgeleitet; dieser wird bei Unterschreitung eines frei parametrierbaren Wasserstands (z. Zt. 0,8 m) wieder geschlossen.
- Der Notüberlauf wird nur aktiviert, wenn die Zyklusdauer auf unter ca. 4,0 h zurückgeht.

Der maximale Abfluss aus der Kläranlage beträgt ca. 700 m^3/h; dieser Wert wurde aber in der großtechnischen Erprobung nicht erreicht, da durch die Bypass-Regelung der Notüberlauf nicht aktiviert werden musste und der maximale Abfluss daher nur bei ca. 480 m^3/h lag. Im ersten Augenblick erscheint ein maximaler Kläranlagenablauf von 700 m^3/h (inkl. den 230 m^3/h, die über den Filter ablaufen) im Vergleich mit dem planmäßigen Wert von 230 m^3/h recht hoch. Vergleicht man diesen Wert aber mit den Volumina, die an den Sonderbauwerken im Kanalnetz in den Mörsbach entlastet werden, so relativiert sich dieser Eindruck. Bei der Langzeitsimulation (*Wiese [2004]*) auf Basis der Darmstädter Regenreihe konnten kurzzeitige Entlastungsspitzen – d.h. von wenigen Minuten Dauer – von bis zu 20.000 m^3/h (Häufigkeit: 1/a) errechnet werden (vgl. dazu Abbildung 7.13).

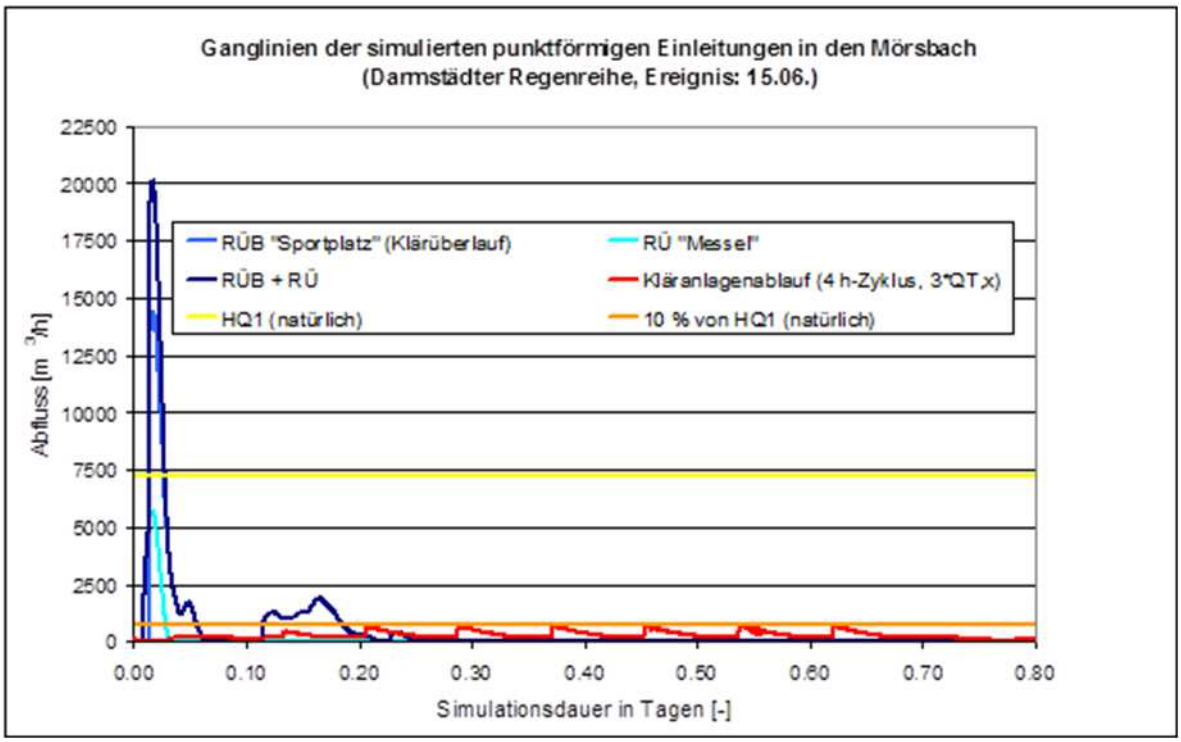


Abb. 7.13: Vergleich der hydraulischen Spitzen an den einzelnen punktförmigen Einleitstellen am Mörsbach mit dem HQ_1 (Quelle: *Wiese [2004]*)

Hinzu kommt, dass die Ablaufspitzen der Kläranlage wegen der Randbedingungen des Diskontinuitätsprinzips meist erst einige Stunden nach Beginn eines Regenereignisses

auftreten werden. Zu diesem Zeitpunkt wird die Wasserführung im Mörsbach wegen der angeschlossenen Regenauslässe der Trennkanalisation, Drainagen etc. bereits angestiegen sein. Durch Bewirtschaftung des Mengenausgleichs kann zudem der Kläranlagenablauf allmählich kontinuierlich gesteigert werden. Angesichts dieser Randbedingungen sind negative Auswirkungen auf den Mörsbach durch hydraulischen Stress eher durch die Entlastungsbauwerke zu erwarten als infolge einer erhöhten Kläranlagenablaufmenge. Im Übrigen beträgt der maximale Abfluss der Kläranlage etwas weniger als 10 % des naturnahen jährlichen Durchflussscheitelwertes HQ_1 von 7.200 m^3/h. Nach dem *BWK-Merkblatt M 3 [2001]* ist demnach alleine aus dem Kläranlagenablauf kein ökologisch unverträglich hoher Einleitungsabfluss zu erwarten.

7.4.1.6 Verbesserungspotenzial und Alternativen

Im Großen und Ganzen hat sich das neue Automationskonzept bewährt, wie auch die nachfolgend dargestellten Ergebnisse belegen, wurden während der großtechnischen Erprobung einige Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert, die noch umgesetzt werden können:

- Einige Schritte werden nach wie vor nur gesteuert. Trotz der sehr guten Reinigungsleistung wäre es sicherlich sinnvoll, auch diese Schritte durch Einbindung von Regelungselementen zu dynamisieren. Dies gilt vor allem für die Denitrifikations- und Bio-P-Phasen, deren Optimierung nicht primäres Ziel des Forschungsvorhabens war.
- Durch das gewählte Steuerungsprinzip und die flexible Softwarestruktur können auch externe Informationen für Steuerungs- und Regelungszwecke herangezogen werden; es ist daher auch vorstellbar Messsignale von nahe gelegenen Gewässergütemessstellen in die Entscheidungsfindung der Sollwertgeber einzubinden [29].
- Die feedback-orientierte (d. h. reagierende) Synchronisation der Reaktoren hat sich vom Prinzip her bewährt. Jedoch können Situationen (z. B. Umschalten von Trocken- in den Regenwettermodus bei ungünstigen Randbedingungen) auftreten, bei denen diese Synchronisationsform nur langsam einschwingt. D. h. es kann kurz nach dem Umschalten im Einzelfall zu längeren (ca. 30 bis 60 min) Wartezeiten des folgenden Reaktors kommen, die im Verlauf der weiteren Zyklen manchmal nur langsam abgebaut werden, was die hydraulische Kapazität der Anlage – zumindest kurzzeitig – mindern kann. Diesbezüglich Abhilfe schaffen könnte eine vorausschauend agierende Synchronisation. Dafür wären jedoch prädiktive Elemente zur Prognose bestimmter Betriebszustände wünschenswert.
- Auch aus Sicht einer Optimierung der einzelnen Reinigungsschritte wären prädiktive Steuerungselemente, die agieren und nicht nur reagieren, wünschenswert. Diesbezüglich könnte die dynamisierte Zyklussteuerung durch den Einsatz von deterministischen, stochastischen oder auf künstlicher Intelligenz basierenden Modellen ergänzt werden.
- Bei der Gefahr einer Überschreitung des Überwachungswertes könnte sogar vom PLS die Entscheidung getroffen werden, den Dekantierprozess nicht zu starten und stattdessen den Zyklus wieder neu zu beginnen [30].
- Eine Option zur Energieeinsparung besteht darin, das Mindestabsenkziel variabel zu handhaben und bei Trockenwetter den Reaktor – zwecks besserer Einblasbedingungen –

[29] Es gibt Containermessstellen, die die Gewässergüte mittels pH-, Temp.-, LF-, PO_4-P-, NH_4-N-, NO_3-N-, TOC-, SAK-, TS-Messungen o.ä. kontinuierlich erfassen können.

[30] Hierbei sollte jedoch auch die aktuelle Zuflusssituation, das freie Volumen in der Vorlage bzw. in den Reaktoren für die Entscheidungsfindung herangezogen werden.

aufzustauen. Bei Regenwetter würde das Absenkziel hingegen möglichst tief gewählt werden, um das Austauschvolumen zu maximieren.

- Weiterhin wäre es möglich, das Schlammalter in den Reaktoren online zu erfassen bzw. das aerobe Schlammalter abzuschätzen. Diese Daten wiederum könnten in eine Überschussschlammregelung sowie ggf. auch in Belüftungsregelung (z. B. zur Sicherstellung der aeroben Stabilisierung) eingebunden werden. Alle Daten, die für eine Erfassung dieser Kenngrößen nach *ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 131 [2000]* bzw. *ATV-Merkblatt M 210 [1997]* erforderlich sind, werden auf dieser Kläranlage kontinuierlich erfasst [31]. Prinzipiell stehen sogar genug Informationen zur Verfügung um das Schlammalter nach der Definition von *Grundacker [2002]* zu ermitteln, der die ersten Phasen der Sedimentation ebenfalls zur Berechnung heranzieht. Als problematisch hierbei erwiesen sich daher nicht die zur Verfügung stehenden Prozessdaten, sondern vielmehr die begrenzten hardwaretechnischen Ressourcen. Da der Rechner bzw. die SPS bereits mit der neuen Zyklussteuerung weitgehend ausgelastet ist, war es nicht mehr möglich, aufwändige Rechenroutinen (z. B. eine Integrierung oder gleitende Mittelwertbildung wichtiger Prozessgrößen über die Dauer eines Schlammalters) vorzunehmen.
- Die Ergebnisse der Erprobung der VSV-Sonde zeigten, dass diese durchaus geeignet ist, dem Betriebspersonal von Kläranlagen die alltägliche Arbeit zu erleichtern. Darüber hinaus ist aber auch die Einbindung der VSV-Messung in MSR-Konzepte denkbar:
  - Viele Betreiber von SBR-Anlagen streben im täglichen Betrieb ein nahezu konstantes Schlammvolumen an bzw. definieren VSV-Maximalwerte, die nicht überschritten werden sollen. Bei diesen Anlagen bietet es sich an, die VSV-Messung in ein Regelungskonzept – ggf. in Kombination mit der TS-Sonde – des Überschussschlammabzugs einzubinden.
  - Die VSV-Sonde kann auch für Steuerungszwecke eingesetzt werden: So kann etwa in Abhängigkeit der VSV-Messwerte die Dauer der Sedimentationsphase zu Gunsten/zu Ungunsten der Reaktionsphasen automatisch verkürzt/verlängert werden.
  - Wird neben dem VSV auch noch der Schlammspiegel online gemessen, so besteht auch noch die Möglichkeit, die Sedimentations- und Dekantierphase zu optimieren, etwa mit Hilfe eines Prognosetools. Die Ergebnisse der Prognose können dazu genutzt werden, um die Sedimentations- und Dekantierdauer bzw. die Abzugsleistung des Dekanters den aktuellen Randbedingungen anzupassen.

Bezüglich der Messgeräte können ebenfalls einige Alternativen bzw. Verbesserungsmöglichkeiten und Auswahlhinweise aufgezeigt werden:

- Um eine möglichst flexible Steuerung zu erreichen, wird es in den meisten Fällen erforderlich sein, für jeden Reaktor ein Messgerät anzuschaffen, da ansonsten die Synchronisation der Probenströme etc. zu aufwändig wird bzw. gar unmöglich ist.
- Auf SBR-Kläranlagen, die nicht so strenge NH_4-N-Überwachungswerte einhalten müssen (d. h. > 5 mg/l), kann sicherlich auf NH_4-N-Analysatoren verzichtet werden. Hier haben die

[31] Die Schlammmenge im Reaktor wird vom PLS erfasst, ebenso wie die Schlammmenge im Überschussschlamm. Ferner wird der Dekantierprozess von der TS-Sonde überwacht. Weiterhin stehen mit der NO_3-Sonde, der O_2-Messung und den Daten des Belüftungssystems (z.B. Gebläseleistungen, Schieberstellungen) bzw. dem Status des Rührwerks weitere wichtige Informationen kontinuierlich zur Verfügung.

Messungen auf der KA Messel gezeigt, dass ein Regler auf Basis einer Nitratsonde und einer O_2-Messung ausreichend ist.

- Die Verwendung einer Nitratsonde dürfte in vielen Fällen sinnvoll sein, da hierüber die Denitrifikationsphasen und ggf. die Belüftungsphasen geregelt werden könnten; dies gilt besonders dann, wenn die SBR-Anlage strenge N_{ges}-Überwachungswerte einhalten muss.
- Die Verwendung eines PO_4-P-Analyzers ist – zumindest aus Sicht einer erhöhten Mischwasserbehandlung – auf der KA Messel nicht erforderlich, da der dortige Überwachungswert auch bei einer Zyklusstauchung problemlos eingehalten werden kann. Bei SBR-Anlagen mit strengeren P_{ges}-Ablaufwerten (d. h. < 2 mg/l) kann ein einfaches PO_4-P-Messgerät jedoch durchaus sinnvoll sein, das ggf. auch zur Steuerung einer Sicherheitsfällung eingesetzt werden kann; dies gilt besonders dann, wenn die Phosphorelimination weitgehend auf biologischem Wege erfolgen soll.
- Auf SAK/TS-Messungen im Ablauf der Kläranlage kann verzichtet werden, wenn der Dekantierprozess über eine TS-Sonde geregelt bzw. überwacht wird und der CSB-Grenzwert nicht deutlich unter 45 mg/l liegt.
- Die Kombination aus Schlammspiegel und TS-Messung hat sich als sehr sicher und sehr zuverlässig erwiesen. Es wird daher empfohlen, auf anderen Anlagen dieses Konzept ebenfalls zu verfolgen, zumal die TS-Messung auch zur Ermittlung und ggf. zur Regelung des Überschussschlammabzugs eingesetzt werden kann.
- Vom Prinzip her ist es wünschenswert, im SBR-Prozess Messgeräte einzusetzen, die keine oder nur eine geringe Totzeit (< 5 bis 10 min) aufweisen. Es erwies sich jedoch als interessant, dass die nicht unerhebliche Totzeit der NH_4-N-Prozessanalysatoren nicht den negativen Einfluss auf die Regelung des Prozesses hatte wie ursprünglich erwartet.

7.4.1.7 Zwischenfazit

Bei der Umsetzung der neuen dynamischen Zyklussteuerung und der sich daran anschließenden Erprobung konnten die folgenden Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Umsetzung des neuen MSR-Konzeptes in die Praxis erfolgte weitgehend problemlos. Die dynamische Steuerung war für eine Dauer von 4 Monaten ohne Unterbrechung in einem wissenschaftlich begleiteten Betrieb aktiv. Nennenswerte Probleme, die ein Umschalten auf die alte Steuerung erforderlich gemacht hätten, sind nicht aufgetreten. Es waren im Zuge der Feineinstellung des Steuerungskonzeptes lediglich einige kleinere Anpassungen notwendig.
- Der maximale Zufluss konnte im Kurzzeitbetrieb von 230 auf 460 bis 500 m^3/h, d. h. um ca. 100 % erhöht werden.
- Aufgrund der Tatsache, dass das Einleitgewässer leistungsschwach ist und kurz unterhalb der Kläranlage ein Naturschutzgebiet liegt, wurde in Abstimmung mit der Behörde eine defensive Vorgehensweise, d. h. ein allmähliches Herantasten an die Leistungsgrenzen vereinbart. Die Parametrierung der dynamischen Zyklussteuerung wurde daher nicht – wie theoretisch möglich – auf eine Mindestzyklusdauer bei Mischwasser von 3 bis 3,5 h eingestellt, sondern lediglich auf ca. 4 h.

7.4.2 Ergebnisse der Großtechnik

7.4.2.1 Vorbemerkungen

Die praktische Erprobung des neuen Steuerungskonzeptes erfolgte zwischen Montag, dem 19. Januar 2004 und Donnerstag, dem 13. Mai 2004, d. h. über eine Dauer von 115 Tagen. Dies entspricht einem Äquivalent von etwas mehr als vier Schlammaltern. Eine derartige Dauer ist ausreichend, um gesicherte Aussagen über die Zuverlässigkeit und Stabilität eines Steuerungs- und Regelungskonzeptes machen zu können. Tabelle 7.3 verdeutlicht, dass die Kennzahlen der Erprobungsphase sich in einigen Bereichen deutlich von den korrespondierenden Werten der Vorphase unterscheiden. Da im weiteren Verlauf noch genauer auf die Randbedingungen der Erprobungsphase eingegangen wird, sollen an dieser Stelle lediglich zwei wichtige Bemerkungen gemacht werden:

- Jahreszeitlich bedingt lag die Abwassertemperatur deutlich niedriger als während der Vorphase; das Minimum lag bei nur 5,3 °C.
- Das Vergleichsschlammvolumen und der Schlammindex waren deutlich ungünstiger als während der Vorphase und lagen im Mittel im Bereich der Bemessungsgrößen; zeitweise auch deutlich darüber. Die Untersuchungen deuten darauf hin, dass Mikroorganismen vom Typ *Microthrix parvicella* ursächlich für die Probleme waren. Das zeitlich begrenzte Auftreten von Bläh- und Schwimmschlammtendenzen zu Jahresbeginn bzw. besonders während der Zeit des Übergangs vom Winter zum Frühling ist ein Phänomen, das auf vielen Kläranlagen beobachtet werden kann. Auch auf der KA Messel wurde dieses Phänomen bereits zuvor beobachtet, wenn auch nicht in diesem Ausmaß [32]. Die Gründe hierfür dürften auf die folgenden Ursachen zurückzuführen sein:
  - Die Abwassertemperatur lag 2004 lange Zeit sehr niedrig. Erst wieder ab der 12. KW 2004 wurden Abwassertemperaturen von mehr als 11 °C gemessen. Erst nach Ende der Erprobungsphase wurden wieder dauerhaft Abwassertemperaturen von über 12 °C registriert. Derartige Bedingungen werden allgemein als günstig für das Wachstum von *Microthrix parvicella* angesehen.
  - Wegen Terminschwierigkeiten mit der mobilen Schlammpresse, wurden die beiden SB-Reaktoren zeitweise zur Schlammlagerung genutzt, da der Schlammstapelbehälter bereits voll war. Dies führte dazu, dass Ende April 2004 – d. h. zu der Phase zu der die höchsten VSV- und ISV-Werte ermittelt wurden, zeitweise bis zu 17,3 t TS in den Reaktoren vorhanden waren; 5,3 t TS mehr als der Bemessungswert. Alleine aus dieser erhöhten Belebtschlammmenge resultierte eine Erhöhung des VSV-Wertes.
  - Aus der hohen Belebtschlammmenge resultierte wiederum eine niedrige Schlammbelastung, die zeitweise bei nur 0,015 kg BSB_5/(kg TS·d) lag; auch dies sind Bedingungen, die als günstig für das Wachstum von *Microthrix parvicella* angesehen werden (*Mudrack und Kunst [2003]*).
  - Ob auch die veränderte Beschickungsstrategie zu dem Anstieg des ISV beigetragen hat, kann nicht abschließend geklärt werden [33]. Da an den Sauerstoffsollwerten des O_2-

[32] Zum Vergleich: Bereits ein Jahr zuvor lag der ISV in der Periode Januar bis Mai 2003 im Mittel 35 % über den Vergleichswerten der Periode „September bis Dezember 2003“. Während der Erprobungsphase im Frühjahr 2004 lag der Wert etwas über 50 % über dem Vergleichswert.

[33] Die Reaktoren werden jetzt häufiger, dafür aber mit jeweils kleineren Mengen, beschickt.

Reglers keine Änderungen vorgenommen wurden, ist das *Microthrix parvicella*-Wachstum vermutlich auch nicht auf zu niedrige Sauerstoffkonzentrationen zurückzuführen [34]. Die Tatsache, dass der Schlammindex seit Ende der Schlammentwässerungsphase wieder langsam zurückging, spricht jedoch dafür, dass die oben genannten Punkte hauptsächlich für die zeitweise Erhöhung des Schlammindex bzw. des VSV waren.

Es kann somit festgehalten werden, dass die Betriebsbedingungen für die Erprobung des neuen Steuerungskonzeptes als nicht eben günstig bezeichnet werden können, da ein Teil der bemessungsbedingten Reserven (d. h. Temperatur, günstiger Schlammindex), die während weiter Teile des Jahres vorhanden sind, nicht zur Verfügung standen. Trotzdem wurden sehr gute Ergebnisse erzielt, die nun nachfolgend genauer beschrieben werden.

Tab. 7.3: Betriebliche Kennzahlen der KA Messel während der Vorphase bzw. der MSR-Erprobungsphase (Bildquellen: Autor)

Kennzahl	Einheit	Vorphase	MSR-Phase
behandelte Abwassermenge	[m^3]	128.801	190.870
Abwassermenge pro Tag (Min/MW/Max)	[m^3/d]	543/1.047/4.810	868/1.660/7.200
Abwassertemperatur (Min/MW/Max)	[°C]	9,6/13,6/17,6	5,8/10,1/13,2
Monatshöchstleistung (Min/MW/Max)	[kW]	84/88/94	85/100/120
Wirkarbeit pro m^3 Abwassermenge (MW)	[kWh/m^3]	0,672	0,496
Wirkarbeit pro Kalendertag (MW)	[kWh/d]	707	803
Wirkarbeit pro kg CSB-Zulauffracht (MW)	[kWh/kg CSB]	1,41 [35]	1,61
Wirkarbeit pro $EW_{CSB,120}$ (MW) (hochgerechnet)	[kWh/(EW·a)]	62 [36]	70
VSV bei 3,30 m (Min/MW/Max)	[ml/l]	205/406/540	342/543/> 1.000
ISV (Min/MW/Max)	[ml/g]	41/61/118	60/94/141
Belebtschlammmenge im System (Mittelwert)	[t TS]	13,0	12,1
Mittlere Verweilzeit des belebten Schlamms	[d]	45,0	40,0 [37]
Glühverlust (MW)	[%]	61	63

[34] Auch mit der neuen Steuerung werden phasenweise O_2-Konzentrationen im Reaktor von 1,8 mg/l erreicht.

[35] Zum Vergleich: Spezifische Energieverbrauchsgrößen für Kläranlagen der Größenklasse 2 (Belebtschlammverfahren) nach *ATV [1999]*: Medianwerte: 66 kWh/(EW·a), 80 %-Wert: 108 kWh/(EW·a)

[36] Zum Vergleich: Spezifische Energieverbrauchsgrößen für Kläranlagen der Größenklasse 2 (Belebtschlammverfahren) nach *ATV [1999]*: Medianwerte: 1,5 kWh/kg CSB, 80 %-Wert: 2,46 kWh/kg CSB)

[37] Bei der gewählten Parametrierung des neuen Steuerungskonzeptes dürfte das mittlere Gesamtschlammalter bei Trocken- und Regenwetter jeweils ca. 26 Tage betragen haben. Das minimale aerobe Schlammalter dürfte bei Trockenwetter über 21 Tagen liegen, bei Regenwetter über ca. 18 Tagen liegen.

7.4.2.2 Auswertung der Betriebsdaten der Erprobungsphase

Die von den online-Messungen ermittelten Konzentrationsverläufe wurden ausgewertet: Insbesondere die NH_4-N-, PO_4-P- und NO_3-N-Konzentrationsverläufe während der Dekantierphase wurde für jeden der 830 Zyklen im Erprobungszeitraum ausgewertet. Die Ergebnisse dieser statistischen Auswertung sind in Abbildung 7.14 dargestellt, ebenso wie die Vergleichswerte des Zeitraums Oktober bis Dezember 2003. In Tabelle 7.4 wurden zur besseren Übersichtlichkeit einige wichtige statistische Kennzahlen aufgelistet. Aus dieser Darstellung bzw. der Tabelle können folgende Erkenntnisse gezogen werden:

- Mit den neuen MSR-Konzepten werden bezüglich NO_3-N und PO_4-P sehr viel niedrigere Ablaufkonzentrationen erreicht als mit der bisherigen SBR-Zyklussteuerung:
  - Im Mittel liegen die NO_3-N-Konzentrationen mit 2,6 mg/l um 61 % unterhalb der in der Vorlaufphase gemessenen Werte (Mittelwert damals: 6,7 mg/l NO_3-N). Bezüglich der volumengewichteten mittleren NO_3-N-Konzentration, die z. B. für eine frachtbezogene Emissionsbetrachtung relevant ist, konnte mit 58 % eine ähnliche gute Verbesserung erzielt werden (2,6 vs. 6,2 mg/l NO_3-N).
  - Bezüglich PO_4-P lagen die Konzentrationen um 46 % unter dem Vergleichswert (1,5 vs. 2,8 mg/l PO_4-P); dies gilt sowohl für den normalen Mittelwert als auch für den volumengewichteten Mittelwert.

  Dies ist insofern bemerkenswert, da die mittlere Abwassertemperatur während der Erprobungsphase (10,1 °C) deutlich niedriger lag als in der Vergleichsperiode (11,9 °C).
- Bezüglich der Nitrifikationsleistung können keine signifikanten Unterschiede beobachtet werden, was aber insofern nicht verwunderlich ist, da bereits vorher schon die Nitrifikationsleistung im Mittel über 99 % lag. Mit dem neuen Steuerungskonzept können im Mittel nur marginal bessere Resultate erzielt werden, wie z. B. bei einem Vergleich der volumengewichteten NH_4-N-Konzentrationen deutlich wird (0,1 vs. 0,2 mg/ NH_4-N). Auch in diesem Zusammenhang gilt es die deutlich niedrigere Abwassertemperatur während der Versuchsphase zu beachten.
- Betrachtet man die Spitzen der NO_3-N-, NH_4-N- und PO_4-P-Konzentrationen, so kann man feststellen, dass es mit der neuen Steuerung bezüglich jedes dieser Parameter gelungen ist, die Anzahl und die Höhe einzelner Ausreißerwerte deutlich zu verringern:
  - Trotz der Tatsache, dass bei Mischwasserzufluss die Zyklusdauer jetzt sofort deutlich verkürzt wird, lag der Maximalwert bei NH_4-N nur bei 2,54 mg/l [38]. Der Überwachungswert von 3 mg/l NH_4-N wurde immer sicher eingehalten, was nicht zuletzt auf die automatische Nachbelüftungsphase zurückzuführen ist, da es ansonsten in einigen Fällen – wie früher – zu einer Überschreitung gekommen wäre.
  - Der Maximalwert lag bei 10,1 mg/l NO_3-N; der 95 %-Wert aber nur bei 5,7 mg/l.
  - Bezüglich PO_4-P konnten ebenfalls Verbesserungen erzielt werden; die Anzahl der Ausreißerwerte (> 3,5 mg/l PO_4-P) ist deutlich zurückgegangen. Dass überhaupt Phosphat-Konzentrationen über 3,5 mg/l und gar eine einzige Überschreitung des Überwachungswertes auftrat, ist auf die folgende Ursache zurückzuführen:

[38] Das Phänomen, dass die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten im Bereich zwischen 88 und 98 % für NH_4-N leicht über der Summenkurve der früheren Steuerung liegen, ist übrigens zu einem großen Teil darauf zurückzuführen, dass bei einem eintretenden Mischwasserzufluss der Zyklus dynamisch verkürzt wurde.

- Wie viele kleinere Kläranlagen verfügt auch die KA Messel über keine eigene Schlammeindickung; diese erfolgt alle paar Monate mit Hilfe einer mobilen Schlammentwässerung. Innerhalb von 3 bis 4 Arbeitstagen wird dann der gesamte Schlammstapelbehälter (ca. 1.000 m^3) abgepresst. Hieraus entsteht eine erhebliche Rückbelastung der Anlage mit Trübwasser, die jedoch bezüglich Phosphor bisher für die Kläranlage unproblematisch war, da die biologische Phosphorelimination weniger effektiv ablief. Es wurde daher bisher auch kein Fällmittel dem Trübwasser während der Pressphase zugegeben.
- Eine Schlammentwässerung erfolgte gegen Ende der Versuchsphase, d. h. zu einem Zeitpunkt, zu dem die biologische Phosphorelimination bereits sehr effektiv ablief. Als Folge kam es zu einer erheblichen Phosphatrückbelastung der Kläranlage und damit zu einem Anstieg der PO_4-P-Ablaufkonzentrationen über 3 mg/l.
- Für die Zukunft bedeutet dies, dass das Betriebspersonal während der Pressphase kurzzeitig Fällmittel zusetzen muss, um derartige Ausreißerwerte zu verhindern; hierfür ist eine einfache Dosierpumpe und ein 1.000 l Gebinde völlig ausreichend.
- Auf die übrigen Überwachungsparameter CSB, BSB_5, NH_4-N und N_{ges} hatte die Trübwasserrückbelastung keinen negativen Einfluss.
- Rechnet man die Pressphase heraus, lagen die Phosphatkonzentrationen im Klarwasser in weniger als 0,5 % über 3,0 mg/l, der Maximalwert bei 3,3 mg/l.

Aus diesen Randbedingungen resultiert, dass mit dem neuen Steuerungs- und Regelungskonzept ein erhebliches Potenzial zur Senkung der Überwachungswerte und damit zur Einsparung der Abwasserabgabe besteht.

- Basierend auf diesen Ergebnissen und den übrigen Daten des PLS wurden folgende Eliminationsleistungen abgeschätzt:
  - Wirkungsgrad der Nitrifikation: **> 99 %** (vorher: > 99 %)
  - Wirkungsgrad der Stickstoffelimination [39]: **ca. 90 %** (vorher: ca. 84 %)
  - Wirkungsgrad der biologischen Phosphorelimination: **ca. 68 %** (vorher: ca. 61 %)

  Diese Ergebnisse sind umso bemerkenswerter, da die behandelte Abwassermenge im Erprobungszeitraum im Mittel mit ca. 1.650 m^3/d sehr viel höher lag als die 1.050 m^3/d, die der KA Messel in der Vorbereitungsphase zuflossen [40]. Normalerweise geht man davon aus, dass die N_{ges}- und P_{ges}-Eliminationsraten einer Kläranlage mit steigendem Anteil an mitbehandelten Regen- und Fremdwasseranteil deutlich zurückgehen bzw. niedrige Ablaufkonzentrationen im Wesentlichen auch durch eine Verdünnung erzielt werden. Die Ergebnisse der Erprobungsphase belegen jedoch, dass die niedrigen Ablaufwerte vor allem durch eine Steigerung der Reinigungsleistung erzielt werden konnten. Ferner gilt es in diesem Zusammenhang zu beachteten, dass die mittlere Abwassertemperatur mit 10 °C deutlich niedriger war als in der Vergleichsperiode; zeitweise nur im Bereich von 5 – 7 °C.

[39] Unter Vernachlässigung des im gelöst-inerten CSB gebundenen Stickstoffs von ca. 1 mg/l.

[40] Der Zufluss in der Vorbereitungsphase kann als niedrig angesehen werden, da das 2. HJ 2003 sehr niederschlagsarm war und so die mitbehandelte Fremd- und Regenwassermenge ebenfalls sehr niedrig lag.

Tab. 7.4: Ablaufkonzentrationen (online) (alle Werte) im Zeitraum Januar bis Mai 2004 (Quelle: Wiese [2005])

Mengenausgleich	Anzahl	Mittelwert	Median	Minimum	95 %-Wert	Maximum
	[St.]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
NH_4-N	830	0,11	< 0,10	< 0,10	1,05	2,54
NO_3-N	830	2,63	2,27	< 0,10	5,73	10,06
$N_{ges,anorg}$	830	2,75	2,35	< 0,10	6,00	10,06
PO_4-P	830	1,53	1,54	0,67	2,30	4,93[41]

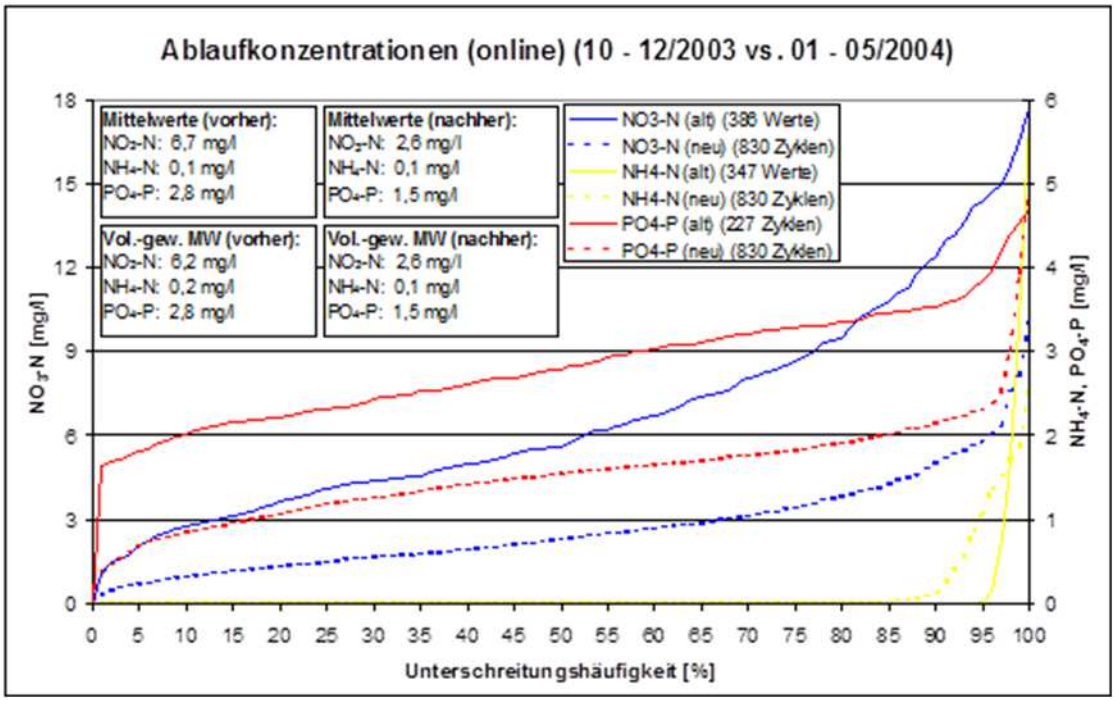


Abb. 7.14: Statistische Auswertung der während der Dekantierphase ermittelten NH_4-N-, NO_3-N- und PO_4-P-Konzentrationen während der Erprobungsdauer vs. den Vergleichswerten vor der Erprobung (Quelle: *Wiese [2005]*).

- Weiterhin kann man feststellen, dass die Reinigungsleistung der Kläranlage Messel im Verlauf der Erprobung (Tabelle 7.5) besser wurde, was wie folgt erklärt werden kann:
  - Ein wichtiger Faktor ist sicherlich die Feinabstimmung der Automation im Verlauf der Erprobung. Zwar wurden keine grundlegenden Veränderungen vorgenommen, jedoch wurden einzelne Stell- und Führungsgrößen neu parametriert bzw. nachgeführt.
  - Die Erprobung begann im Januar bei sehr niedrigen und endete im Mai bei deutlich höheren Abwassertemperaturen, die teilweise bereits über 12 °C lagen: So lag im Januar

[41] 3,27 mg/l PO_4-P ohne die Phase der Schlammentwässerung.

die minimale Abwassertemperatur im Zulauf zur Kläranlage bei 5,3 °C, im Februar bei 6,5 °C, im März bei 7,7 °C und im April bereits bei 9,0 °C.

Die N_{ges}-Eliminationsrate lag im April 2004 bei 93 %, die P_{ges}-Eliminationsrate bei 83 %; im Median lag die PO_4-P-Konzentration im Ablauf sogar unter 1 mg/l.

- Ferner wurde eine Auswertung durchgeführt, bei der nur die Ablaufkonzentrationen in der Zeit zwischen 6:00 und 16:00 Uhr Berücksichtigung fanden; in diesem Zeitraum erfolgt normalerweise die Fremdüberwachung durch die zuständige Aufsichtsbehörde: Tabelle 7.5 zeigt, dass es keine signifikanten Abweichungen gibt, d. h. morgendliche Tagesspitzen o. ä. bleiben ohne negative Auswirkung.
- Im Rahmen der Eigenüberwachung wurden sämtliche Überwachungswerte der KA Messel sicher eingehalten. Ein Blick auf die Maximalwerte in Tabelle 7.5 belegt ebenfalls die erhebliche Verbesserung, die mit der neuen Steuerung erzielt werden konnte und das Potenzial, das hieraus für eine Einsparung der Abwasserabgabe resultiert. Interessant ist auch ein Vergleich der CSB- und P_{ges}-Konzentrationen im Mengenausgleich mit den nach dem Filter gemessenen Werten (Tabelle 7.6). Die marginalen Differenzen von 2 mg/l CSB bzw. 0,1 mg/l P_{ges} belegen, dass das abgezogene Klarwasser nahezu frei von abfiltrierbaren Stoffen ist; dies spricht für die Zuverlässigkeit der Dekanterregelung [42].
- Betrachtet man den täglichen Energieverbrauch in der Erprobungsphase (Tabelle 7.3), so stellt man fest, dass dieser um ca. 14 % über dem Vergleichswert der Vorlaufphase liegt. Dies ist jedoch nicht verwunderlich, da die behandelte tägliche Abwassermenge im Mittel sogar um 58 % über dem Vergleichswert der Vorlaufphase lag[43]. Ein nicht unerheblicher Teil des Energiemehrverbrauchs ist daher auch auf die erhöhte Pumpenlaufzeit zurückzuführen sein. Hinzu kommt, dass im Zeitraum Januar bis Mai 2004 zweimal die mobile Schlammpresse angefordert werden musste, während in der Vorlaufphase die Schlammpresse kein einziges Mal zum Einsatz kam [44]. Dies scheint auch ein Vergleich einzelner Monate der Erprobungsperiode mit historischen Daten zu belegen: So lag im März 2003 (behandelte Abwassermenge 43.414 m^3) auf ähnlichem Niveau wie im März 2004 (behandelte Abwassermenge: 46.463 m^3). Der Energieverbrauch betrug im März 2003 23.333 kWh (0,537 kWh/m^3) bzw. im März 2004 bei 22.764 kWh (0,490 kWh/m^3). Die Leistungsspitze lag im März 2003 bei 111 kW bzw. im März 2004 bei 94 kW. D. h. der Energieverbrauch des neuen Steuerungskonzeptes dürfte unter vergleichbaren Randbedingungen vergleichbar mit dem alten Steuerungskonzept sein, jedoch dürften die Leistungsspitzen aufgrund der Zuschaltung der zweiten Einlaufpumpe tendenziell etwas höher liegen. Weiterhin gilt es anzumerken, dass das erklärte Ziel der Erprobungsphase die Erhöhung der hydraulischen und stofflichen Behandlungskapazität war und nicht die Verringerung des Energieverbrauchs.
- Bei der Kläranlage Messel handelt es sich um eine aerob-stabilisierende Kläranlage. Zur Kontrolle der Stabilisierung bedient man sich gerne des Parameters Glühverlust, da dieser im Vergleich zu anderen Verfahren einfach und kostengünstig ermittelt werden kann. Auch

---

[42] Die maximale Differenz zwischen den CSB-Konzentrationen im Mengenausgleich und dem Filterablauf betrug 8 mg/l; beim Phosphor betrug diese 0,55 mg/l. Auch dies spricht für die Zuverlässigkeit der Dekanterregelung.

[43] In diesem Zusammenhang gilt es zu beachten, dass das Abwasser auf der KA Messel zweimal gepumpt werden muss. Je nach Wasserspiegelunterschied zwischen Einlaufbauwerk und Vorreinigungsmodul bzw. Vorlagebehälter und SBR müssen dabei jeweils Höhen zwischen ca. 3,5 und 7,0 m überwunden werden.

[44] Sofern möglich, wird ein Teil des Überschussschlamms als Nassschlamm an die Landwirtschaft abgegeben.

auf der KA Messel wird dieser Wert regelmäßig im Rahmen der Eigenüberwachung kontrolliert. Abbildung 7.15 gibt eine Übersicht über den Jahresgang. Diese Abbildung verdeutlicht sehr anschaulich, dass der Glühverlust einem ausgeprägten jahreszeitlichen Verlauf unterliegt. Die Abbildung enthält ebenfalls die Werte, die während der Testphase ermittelt wurden. Ein Vergleich zeigt, dass es keine signifikanten Unterschiede gibt. Zieht man den Glühverlust als Maß für den Stabilisierungsgrad des belebten Schlamms heran, so gibt es keine erkennbaren Unterschiede zwischen dem alten und dem neuen Steuerungskonzept. D. h. das neue Steuerungskonzept lässt keine Verschlechterung der aeroben Stabilisierung erwarten. Dennoch könnten Situationen auftreten, in denen eine simultan-aerobe Stabilisierung gefährdet wäre, etwa im Falle einer sehr weitgehenden Energieoptimierung bzw. bei einer sehr langen Mischwasserzuflussphase. Aus diesem Grund wurde auf der KA Messel ein Berechnungswerkzeug in das PLS implementiert, das kontinuierlich das aerobe Schlammalter mit Hilfe der Prozessdaten abschätzt. Obwohl auf der Kläranlage Messel für eine derartige automatische Abschätzung prinzipiell genug Informationen zur Verfügung stehen (z.B. NO_X-N und O_2 in den Reaktoren, Statusmelder der Belüftungsaggregate und Rührwerke, MID und TS in der ÜS-Schlammleitung), erwies sich die Ermittlung als technisch schwierig; die Probleme sollten sich aber mit einem leistungsstärkeren Prozessleitrechner lösen lassen. Besteht die Gefahr, dass eine simultan-aerobe Stabilisierung nicht mehr gewährleistet ist, so könnte dann eine Überwachungsroutine entsprechende Gegenmaßnahmen einleiten, wie etwa Verlängerung der belüfteten Phase im Normalbetrieb.

Tab. 7.5: Veränderung der N_{ges}-, NH_4-N- und PO_4-P-Ablaufkonzentrationen (Quelle: *Wiese [2005]*) [45]

	Januar 2004	Februar 2004	März 2004	April 2004
$N_{ges,anorg.}$ (Min/MW/Max) [46]	0,3/5,0/10,1	0,2/2,7/7,2	0,3/2,1/6,3	0,2/2,4/6,5
NH_4-N (Min/MW/Max)	<0,1/0,1/2,5	<0,1/<0,1/2,0	<0,1/0,1/2,0	<0,1/0,2/2,5
PO_4-P (Min/MW/Max)	0,9/1,6/2,3	1,0/1,8/3,1	0,8/1,5/3,3	0,2/1,1/2,5

Tab. 7.6: Ablaufkonzentrationen (online) zwischen der Zeit von 6:00 Uhr bis 16:00 Uhr im Zeitraum Januar bis Mai 2004 (Quelle: *Wiese [2005]*)

	Anzahl	Mittelwert	90 %-Wert	95 %-Wert	98 %-Wert	Maximum
	[St.]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
NH_4-N	348	< 0,10	< 0,10	0,79	1,44	2,11
NO_3-N	348	2,45	5,01	5,62	7,58	10,06
$N_{ges,anorg}$	348	2,54	5,18	5,72	7,67	10,06
PO_4-P	348	1,50	2,12	2,29	2,59	4,68

[45] Auf die Darstellung der Werte bis 13. Mai 2004 wurde verzichtet, da die Werte aufgrund der 5-tägigen Schlammpresskampagne stark verfälscht werden.

[46] hier: $N_{ges,anorg} = NO_3\text{-}N + NH_4\text{-}N$

Tab. 7.7: Ablaufkonzentrationen (Eigenüberwachung, 2 h-Mischprobe) im Zeitraum Januar bis Mai 2004 (mittlere Abwassertemperatur: 10,1 °C) (Quelle: *Wiese [2005]*)

Mengenausgleich	Anzahl	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Standabweichung
	[St.]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
CSB	23	23,0	23	14	33	3,8
P_{ges}	23	2,11	2,00	1,03	3,87	0,77
Ablauf Filter	Anzahl	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Standabweichung
	[St.]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
CSB	24	21,0	21	13	31	3,4
BSB_5	21	4	4	2	7	1,3
NH_4-N	24	0,05	0,05	n.n.	0,15	0,03
NO_3-N	24	3,03	2,85	0,75	9,36	1,88
NO_2-N	24	0,01	0,01	n.n.	0,05	0,01
$N_{ges,anorg}$	24	3,09	2,92	0,81	9,54	1,91
P_{ges}	24	2,02	1,93	1,01	3,73	0,74

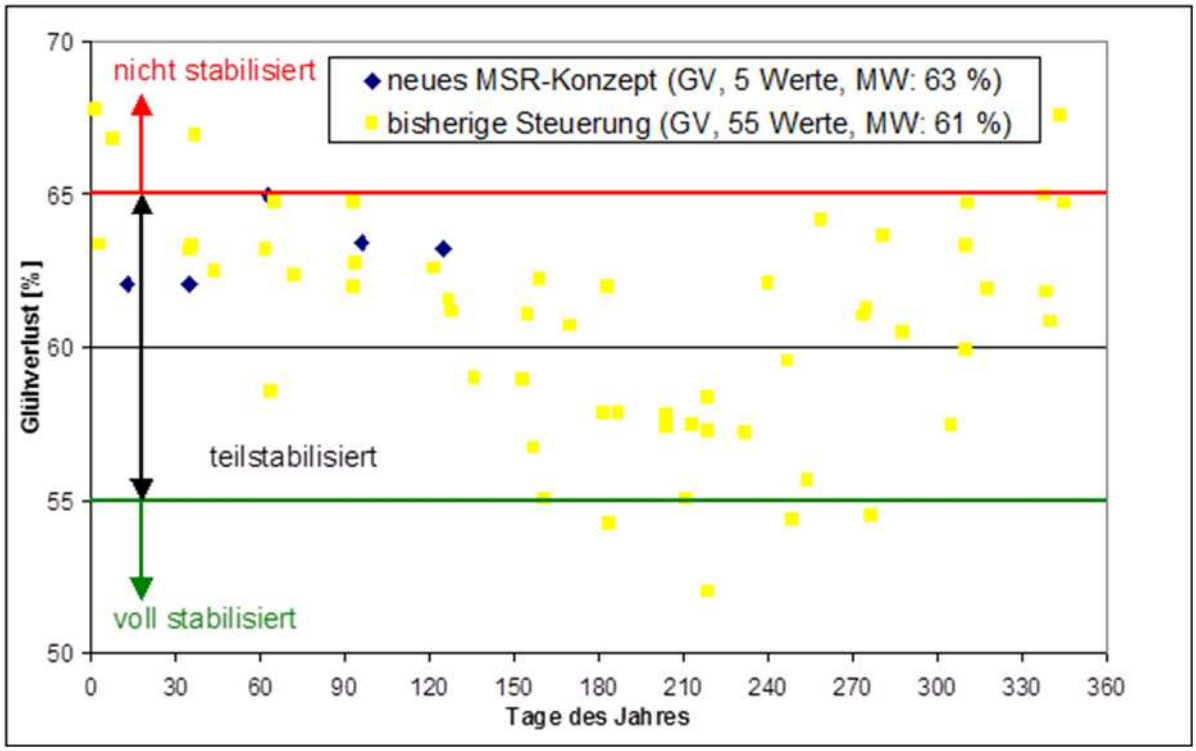


Abb. 7.15: Glühverluste in Abhängigkeit des Jahresverlaufs; die Angaben sind jeweils Mittelwerte der beiden Reaktoren (Quelle: *Wiese [2005]*)

7.4.2.3 Beispiel einer erhöhten Beschickung im Dauerbetrieb

In der Erprobungsphase gab es eine ganze Reihe von Regenereignissen. Nahezu alle waren jedoch kürzere Ereignisse mit geringer Niederschlagsintensität, die nur kurzzeitig zu einer Erhöhung der Zuflussmenge führten. Hierbei konnten kurzzeitige Zuflussspitzen von 460 bis 480 m^3/h von der neuen Steuerung verkraftet werden, ohne dass es zu Problemen oder gar einem Einbrechen der Reinigungsleistung gekommen wäre. Zu einem echten Belastungstest kam es hingegen bei einem mehrtägigen Niederschlagsereignis, das vom Donnerstag, 6. Mai 2004 bis zum Sonntag, 9. Mai 2004 andauerte. Die Randbedingungen dieses Niederschlagsereignisses können wie folgt zusammengefasst werden:

- Im Verlauf dieses Ereignisses kam es mehrfach zu Entlastungen aus dem Mischsystem.
- Im betrachteten Zeitraum wurden durch das Einlaufpumpwerk 19.200 m^3 gefördert.
- Der Gesamtniederschlag im betrachteten Zeitraum betrug 48 mm (6. Mai 2004: 11 mm, 7. Mai 2004: 17 mm, 8. Mai 2004: 20 mm).
- Die kurzzeitige maximale Zuflussspitze betrug ca. 500 m^3/h (Bem.: 230 m^3/h) (Abb. 7.16).
- Maximal wurden im Dauerbetrieb ca. 7.200 m^3/d bzw. 300 m^3/h behandelt (Bemessungswert: 200 m^3/h).
- Die Abwassertemperatur im Zulauf zur Kläranlage schwankte zwischen 10 und 13 °C (Bemessungswert: 10 °C).
- Der mittlere VSV (bezogen auf den Wasserspiegel bei 3,3 m) betrug im SBR 1 518 ml/l und im SBR 2 548 ml/l (Bemessungswert: 600 ml/l).
- Der Schlammindex in beiden Reaktoren betrug jeweils ca. 90 ml/g (Bemessung: 95 ml/g).
- Die Belebtschlammenge im System betrug ca. 11,4 t TS (Bemessungswert: 12 t TS).
- Im Ablauf des Filters wurden die SAK- und TS-Konzentration über die gesamte Dauer des Niederschlagsereignisses erfasst. In den Reaktoren wurden die üblichen Parameter erfasst: NH_4-N (10 min-Intervall), PO_4-P (10 min-Intervall), NO_3-N (3 min-Intervall), Schlammspiegel und TS (< 1 min-Intervall).

Obwohl die auf der KA Messel behandelte Abwassermenge stark erhöht wurde und wichtige Betriebskennzahlen nur unwesentlich günstiger waren als die korrespondierenden Bemessungswerte, wurden dennoch sehr gute Reinigungsergebnisse erzielt (Tabelle 7.8).

Tab. 7.8: Online-Ablaufkonzentrationen der KA Messel während des Niederschlagsereignisses vom 6. Mai 2004 bis 9. Mai 2004 (Quelle: *Wiese [2005]*)

Parameter	SAK [47]	TS [48]	CSB [49]	NH_4-N	NO_3-N	$N_{ges,anorg}$ [50]	PO_4-P
	[1/m]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Mittelwert	17,4	5,0	22,4	< 0,1	2,8	2,8	1,3
Maximum	24,4	17,8	36,5	0,4	8,2	8,2	3,4

[47] Im Ablauf des Filters ermittelt als 15 min-gleitender Mittelwert.
[48] Im Ablauf des Filters ermittelt als 15 min-gleitender Mittelwert.
[49] Hier abgeschätzt als 15 min-gleit. Mittelwert über: CSB-Konz. = SAK-Konz. + 1,0 mg CSB/mg TS · TS-Konz.
[50] Hier: $N_{ges,anorg} = NO_3\text{-}N + NH_4\text{-}N$

Die dargestellten Werte belegen, dass die Reinigungsleistung auch während dieses Ereignisses sehr gut war; die NH_4-N-, $N_{ges,anorg}$- und P_{ges}-Überwachungswerte wurden problemlos eingehalten. Eine Abschätzung des CSB-Wertes über die ermittelten SAK- und TS-Konzentrationen ergab, dass auch die CSB-Überwachungswerte mit hoher Wahrscheinlichkeit sicher eingehalten wurden. Abbildung 7.16 zeigt, dass es kurzzeitig zu einem leichten Anstieg der TS-Konzentrationen kommen kann. Dies ist auf folgendes Phänomen zurückzuführen:

- Die Konstruktion des Ablaufflächenfilters weist einige Defizite auf, insbesondere was die Rückspülung des Filters betrifft:
  - Der Filter kann nur im freien Gefälle zwischen Mengenausgleich, Filter und Vorlagebehälter mit Wasser rückgespült werden. Bei Regenwetter muss daher auf eine Rückspülung verzichtet werden, da dann der Füllstand im Vorlagebehälter in der Regel eine Rückspülung nicht mehr zulässt. Bei ausgeprägten Trockenwetterperioden kann ebenfalls keine Rückspülung erfolgen, da der Wasserstand im Mengenausgleich zu gering ist, um eine ausreichende Spülwirkung zu erzielen.
  - Die Spülwirkung ist über die Filterfläche höchst ungleichmäßig. Trotz einiger Modifikationen und einem Austausch der Filtereinbauten existiert dieses Problem weiterhin.
- Aus dieser Problematik resultiert, dass es während längerer Regenereignisse zu kleinen Filterdurchbrüchen kommen kann, die zwangsläufig zu einem Anstieg der TS-Konzentrationen führen. Da das dekantierte Klarwasser aufgrund der Dekantierregelung aber nahezu feststofffrei ist, hält sich dieses Problem jedoch in Grenzen; eine Gefahr einer CSB-Überschreitung resultiert hieraus nicht. Mit Umgehung des Filters könnte dieses Problem gelöst werden. Auf den meisten anderen SBR-Kläranlagen tritt dieses Problem ohnehin nicht auf, da diese über keinen Ablauffilter verfügen.

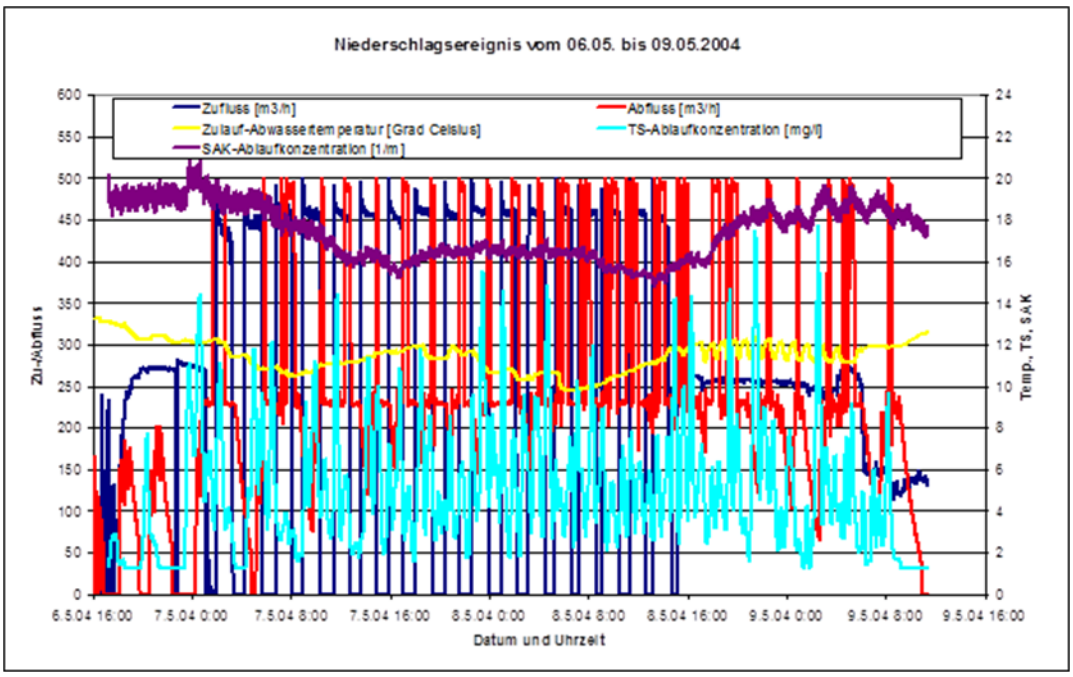


Abb. 7.16: Kläranlagenzu- und -abfluss, Zulaufabwassertemperatur, SAK/TS-Ablaufkonzentration während des Niederschlagsereignisses vom 6. Mai bis 9. Mai 2004 (Quelle: *Wiese [2005]*)

In Abschnitt 7.4.1.5 wurde ausgeführt, dass die Ablaufspitzen einer SBR-Kläranlage aufgrund des Diskontinuitätsprinzip meist erst einige Stunden nach Beginn eines Regenereignisses auftreten werden, also zu einem Zeitpunkt, zu dem die Wasserführung im Mörsbach bereits angestiegen ist. Die Abbildung 7.17 zeigt, dass dies im betrachteten Fall ebenfalls beobachtet werden konnte: Gegen 20:00 Uhr am 6. Mai 2004 stieg der Mischwasserzufluss im Zulauf zur Kläranlage auf ca. 270 m^3/h an. Der Abfluss wurde aber erst am 7. Mai 2004 gegen 01:45 Uhr über den bisherigen Maximalwert von 230 m^3/h gesteigert, d. h. fast 6 h nach Beginn des erhöhten Mischwasserzuflusses bzw. ca. 8 h nach Beginn des Niederschlagsereignisses. Abbildung 7.17 verdeutlicht, dass die deutlich erhöhte Mischwasserbeschickung der Kläranlage bei diesem Niederschlagsereignis zu einer deutlichen Gewässerentlastung geführt hat. Diese Abbildung zeigt vier Bilder, die im Abstand von ca. 15 min am Samstag, 8. Mai 2004 gegen 10:30 Uhr aufgenommen wurden. Die Bilder zeigen das Auslaufbauwerk des RÜB „Sportplatz“, die Brücke über den Mörsbach (zwischen Einleitstelle „RÜB Sportplatz“ und Einleitstelle „KA Messel“), den Ablauf des Filters bzw. das Auslaufbauwerk der KA Messel. Darüber hinaus wurden am Auslauf des Filters bzw. an der Mörsbachbrücke Stichproben genommen, die im Labor der TU Kaiserslautern analysiert wurden und ebenfalls in Abbildung 7.17 dargestellt sind.

Abb. 7.17: Ergebnisse der händischen Beprobung an den Messstellen „Mörsbachbrücke“ und „Ablauf des Flächenfilters“ (Quelle: *Wiese [2005]*)

Abbildung 7.17 erlaubt die folgenden Rückschlüsse: Mit Ausnahme des Phosphors liegen sämtliche andere analysierten Parameter, d. h. Gesamt-CSB, der filtrierte CSB, TKN, NH_4-N und NO_3-N im Ablauf des Filters der KA Messel deutlich unterhalb der im Mörsbach in der Höhe der Brücke gemessenen Konzentrationen, im Falle des CSB_{ges} lag die Konzentration im Gewässer sogar auf dem Niveau des CSB-Überwachungswertes der KA Messel. Dabei gilt es zu beachten, dass der Abfluss im Mörsbach nicht nur aus dem Entlastungsabfluss des RÜB

„Sportplatz“ bestand, sondern zu diesem Zeitpunkt auch noch im erheblichen Umfang Abflusskomponenten aus dem oberliegenden Teil des Mörsbachs sowie den diversen Drainageauslässen bzw. Auslässen aus dem Trennsystem (v. a. einem Sportstätten-Areal) enthielt [51]. Abbildung 7.17 verdeutlicht somit, dass die niedrigen Kläranlagenablaufkonzentrationen (mit Ausnahme des P_{ges}) zu einer Verdünnung der Konzentrationen im Mörsbach geführt haben. Die Abbildung 7.17 (rechtes untere Bild) zeigt zudem, dass der Abfluss aus der Kläranlage auch bei einer Spitze von 460 bis 500 m^3/h noch im freien Ausfluss erfolgt. Wie ebenfalls anhand dieser Abbildung deutlich wird, macht der Abfluss aus der Kläranlage – trotz erhöhter Beschickung – nur einen kleinen Teil des Abflusses im Mörsbach aus, was man deutlich anhand der Einmischturbulenzen an der Einleitstelle erkennen kann. Dieses Bild belegt, dass die potenzielle Gefahr eines hydraulischen Stresses in aller Regel nicht von einer Erhöhung der Abflussmenge der Kläranlage, sondern vielmehr von dem Anspringen der Entlastungsbauwerke, Regenauslässe etc. ausgehen dürfte.

Angesichts dieser positiven Ergebnisse kann folgendes Fazit gezogen werden:

- Obwohl der Zufluss zur Kläranlage bereits deutlich gesteigert wurde, besteht aufgrund der sehr guten Reinigungsleistung nach wie vor ein Verbesserungspotenzial, das jedoch nur schrittweise weiter genutzt werden sollte; vom Prinzip her erscheint sogar eine Erhöhung der maximalen täglichen Behandlungskapazität auf bis zu 8.300 m^3/d möglich.
- Dieses Beispiel belegt ferner, dass eine erhöhte Mischwasserbehandlung eine sinnvolle Form des Gewässerschutzes darstellen kann.
- Obwohl einige Bemessungswerte (z. B. ISV, TS) bereits erreicht wurden, sind erhebliche Reserven zur Behandlung erhöhter Mischwassermengen vorhanden.

7.4.3 Ökologische Bewertung der Erkenntnisse

7.4.3.1 Frachtbezogene Betrachtungen

Aufbauend auf den bisher dargestellten Erkenntnissen der Phase II des DBU-Forschungsvorhabens 17258 und den Ergebnissen der integrierten Modellierung (*Wiese [2004]*) wurde im nächsten Schritt eine frachtbezogene Abschätzung der Emissionsminderung durchgeführt (Tabelle 7.9). Derartige frachtbezogene Ansätze sind noch immer von großer Bedeutung im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft, wie etwa bei der Abwasserabgabe und dem Nachweis nach *ATV-Arbeitsblatt A 128 [1992]*. In Tabelle 7.9 sind die Ergebnisse dieser Abschätzung dargestellt. Es wird deutlich, dass bezüglich aller dargestellten Parameter bezogen auf das Gesamtgebiet eine Verringerung der frachtbezogenen Emissionen erzielt werden kann [52]. Besonders hoch ist diese Verringerung beim N_{ges} und P_{ges}. Aber auch bezüglich einer Verringerung der CSB-Emissionen kann eine Verbesserung erzielt werden; diese resultiert primär aus einer Reduzierung der Emissionen aus Mischwasserentlastungsbauwerken. Dies bedeutet, dass durch das neue Steuerungskonzept das verzögerte bis langfristige Gefährungspotenzial des Mörsbachs und der nachgelagerten Gewässersysteme infolge der Zehrstoff- (NH_4-N, BSB_5, CSB) und Nährstoffbelastung (N_{ges}, P_{ges}) nochmals reduziert werden kann.

[51] Der Zeitpunkt der Probenahme erfolgte ca. 42 Stunden nach Beginn des Niederschlagsereignisses.

[52] Der gelöst-inerte CSB stellt eine Ausnahme dar, da davon ausgegangen wird, dass dieser mit herkömmlichen Reinigungsverfahren nicht eliminiert werden kann; die Emissionsbilanz bleibt daher unverändert.

Tab. 7.9: Abschätzung der frachtbezogenen Emissionsminderung durch das neue Steuerungskonzept (JSM: 400.000 m^3/a, abflusswirksamer Niederschlag: 221.000 m^3/a, Entlastungsabfluss (vorher/nachher): ca. 67.000 bzw. 55.000 m^3/a (- 18 %), Konzentrationen gemäß Auswertung der Betriebsdaten bzw. des kalibrierten Schmutzfrachtmodels aus *Wiese [2004]*)

Kläranlage	bisherige MSR-Strategie [kg/a]	Neue MSR-Strategie [kg/a]	Differenz [kg/a]	Differenz [%]
CSB_{ges}	12.511	11.872	-640	-5
$CSB_{gelöst\text{-}inert}$	8.470	8.649	179	2
BSB_5	2.214	2.261	47	2
$N_{ges,anorg}$	3.643	1.470	-2173	-60
NH_4-N	210	57	-154	-73
N_{org}	554	565	12	2
P_{ges}	1.583	961	-622	-39
AFS	662	662	0	0
Kanalnetz	bisherige MSR-Strategie [kg/a]	neue MSR-Strategie [kg/a]	Differenz [kg/a]	Differenz [%]
CSB_{ges}	5.657	4.308	-1.349	-24
$CSB_{gelöst\text{-}inert}$	723	544	-179	-25
BSB_5	902	677	-225	-25
$N_{ges,anorg}$	254	190	-64	-25
NH_4-N	113	82	-31	-27
N_{org}	93	72	-21	-23
P_{ges}	17	12	-5	-28
AFS	4.611	3.838	-773	-17
Gesamtsystem	bisherige MSR-Strategie [kg/a]	neue MSR-Strategie [kg/a]	Differenz [kg/a]	Differenz [%]
CSB_{ges}	18.168	16.180	-1.989	-11
$CSB_{gelöst\text{-}inert}$	9.193	9.193	0	0
BSB_5	3.116	2.938	-178	-6
$N_{ges,anorg}$	3.897	1.660	-2.237	-57
NH_4-N	323	139	-185	-57
N_{org}	647	637	-9	-1
P_{ges}	1.600	973	-627	-39
AFS	5.273	4.500	-773	-15

7.4.3.2 Einzelereignisbezogene Betrachtung

Das Beispiel aus Kapitel 7.4.2 belegt, dass das integrierte MSR-Konzept auch aus Sicht von Einzelereignissen zu einer deutlichen Gewässerentlastung führen kann, ohne dass ein Gefährdungspotenzial von Seiten der Kläranlage (z. B. infolge einer Überschreitung des NH_4-N-Überwachungswertes) resultiert. Damit erscheint das neue Steuerungskonzept geeignet, die akute bis verzögerte Wirkung von entlastungsbedingten Zehrstoffemissionen zu verringern. Ein akutes Gewässergefährdungspotenzial kann aber auch durch das Einleiten toxischer Stoffe hervorgerufen werden. Im Zusammenhang mit Mischwassereinleitungen ist hierbei vor allem der Parameter Ammoniak zu nennen. Zwischen Ammonium (NH_4^+) und Ammoniak (NH_3) herrscht im Wasser ein Gleichgewichtszustand, der abhängig ist vom pH-Wert und der Temperatur, wobei Ammoniak erst bei pH-Werten ab 7,5 bis 8 im nennenswerten Umfang auftritt (vgl. dazu *Lammersen [1997]*). Die pH-Werte im Zulauf der KA Messel liegen zwar in der Regel bei Mischwasserzufluss unterhalb dieser Werte – Unterschreitungshäufigkeit (pH = 8,1) = 96 % –, allerdings wurden auch schon pH-Werte bei Mischwasserzufluss bis 8,5 im Zulauf dokumentiert. Hinzu kommt, dass es auch im Gewässer durch Photosynthese noch zu einem Anstieg des pH-Wertes (> 9) infolge biogener Entkalkung (siehe z. B. *Mudrack und Kunst [2003]*) kommen kann. Bei ungünstigen Mischungsverhältnissen, hohen Temperaturen und NH_4-N-Entlastungskonzentrationen von > 2 bis 3 mg/l kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass der als vertretbar angesehene Grenzwert im Gewässer von 0,1 mg/l NH_3-N überschritten werden kann. Abbildung 7.14 verdeutlicht, dass auch hier das neue Steuerungskonzept eine deutliche Verbesserung darstellt, da durch die automatische Nachbelüftung – mit einem frei parametrierbaren NH_4-N-Sollwert – die NH_4-N-Konzentrationen aus der Kläranlage unterhalb der potenziell kritischen Schwelle gehalten werden könnten [53]. Auch die NH_4-N-Spitzen im Mischwasserentlastungsabfluss können reduziert werden; dies wird indirekt anhand Tabelle 7.9 deutlich, da die NH_4-N-Entlastungsfracht mit -27 % stärker zurückgeht als der Entlastungsabfluss (-18 %). Letztendlich gibt es sogar Situationen, in denen einzelne Entlastungsereignisse durch ein integriertes Konzept ganz verhindert werden können. Während der Versuchsphase galt dies für mindestens ein Ereignis. Eine Abschätzung mit Hilfe des integrierten Kanalnetz-Kläranlagen-Modells ergab, dass durch das neue Steuerungskonzept die Anzahl der Entlastungsereignisse von 24 bis 29 (bei 200 bis 230 m^3/h Dauerleistung) auf 20 bis 21 (bei 288 bis 317 m^3/h Dauerleistung) pro Jahr reduziert werden kann. Da der Zufluss zur Kläranlage kurzfristig auf bis zu 460 m^3/h angehoben werden kann, kann ggf. die Anzahl der Entlastungsereignisse noch weiter reduziert werden.

7.4.4 Ökonomische Bewertung der Erkenntnisse

In *Wiese [2004]* wurden mit Hilfe des kalibrierten Kanalnetzmodells eine Vielzahl möglicher Varianten (z. B. Vergrößerung des Regenbeckenvolumens vs. Erhöhung des Drosselabflusses) durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass durch den Neubau eines Speicherbeckens von ca. 550 m^3 die gleiche Emissionsverringerung erzielt werden kann, wie durch eine etwa 50 %-ige Erhöhung des maximalen Mischwasserzuflusses zur Kläranlage. *Wiese [2004]* hat mittels Kostenvergleichsrechnungen auf Basis der damals gültigen Preise für abwassertechnische Bauwerke sowie Messgeräte für diese Gemeinde nachweisen können,

[53] Als Fernziel wäre es z.B. denkbar, den NH_4-N-Grenzwert in Abhängigkeit der Temperatur und dem pH-Wert im Mörsbach dynamisch anzupassen.

dass der Einsatz umfangreicher Mess- und Automationstechnik nicht nur ökologisch, sondern auch wirtschaftlich eine sinnvolle Alternative zum Ausbau der klassischen Mischwasserbehandlung (z. B. RÜB-Neubau) darstellt. Da die Baukosten seit 2005 stark gestiegen sind, die Kosten für Messgeräte aber aufgrund neuer Technologien tendenziell rückläufig waren, dürfte die Vorteilhaftigkeit bei den heutigen Randbedingungen eher noch zugenommen haben. D. h. auch ohne den Versuch einer monetären Bewertung der zahlreichen (nicht-)monetären Vorteile, wie zum Beispiel

- eine erhöhte Transparenz der Kläranlage,
- eine Reduzierung der Abwasserabgabe,
- eine erhöhte Betriebssicherheit,
- einem geringeren Arbeitsaufwand bei der Reinigung des Mengenausgleichs [54],
- ein sicheres Einhalten der Überwachungswerte [55] und
- eine signifikante Reduzierung der N_{ges}- und P_{ges}-Frachten im Normalbetrieb

ist das in Kapitel 7.4 beschriebene, modifizierte MSR-Konzept ökonomisch sinnvoll.

7.4.5 Zusammenfassung der großtechnischen Erprobung

Trotz der relativ ungünstigen Randbedingungen während der Erprobungsphase konnten sehr gute Ergebnisse mit dem neuen Steuerungskonzept erzielt werden. Die wesentlichen Erkenntnisse aus der Erprobungsphase können wie folgt zusammengefasst werden:

- Trotz einer deutlich erhöhten Mischwasserbeschickung der KA Messel konnten die Überwachungswerte sicher eingehalten werden.
- Die N_{ges}- und P_{ges}-Reinigungsleistung konnte auch bei Trockenwetterzufluss noch einmal deutlich gesteigert werden.
- Durch die neuen MSR-Konzepte können Konzentrationsspitzen bei NH_4-N, NO_3-N und PO_4-P reduziert werden, sodass eine deutliche Verringerung der Abwasserabgabe durch Reduzierung der P_{ges}- und N_{ges} -Überwachungswerte möglich erscheint.
- Es konnte ferner gezeigt werden, dass das neue Steuerungskonzept die Gefahr von Gewässerschädigungen reduzieren kann und damit aus ökologischer Sicht sinnvoll ist.
- Kostenbetrachtungen haben ergeben, dass das neue Steuerungskonzept auch aus ökonomischer Sicht sinnvoll ist.

In den vorangegangenen Abschnitten wurde ausgeführt, dass trotz der erzielten erheblichen Verbesserungen nach wie vor Optimierungspotenzial vorhanden ist, sowie noch einige Verbesserungen an der dynamischen Steuerung vorgenommen werden können. Aus diesem Grund wird im nächsten Abschnitt eine in der Abwassertechnik relativ unbekannte Form

---

[54] Seit Einführung der Dekantierregelung muss der Mengenausgleich weniger oft gereinigt werden als früher. Da für diese Arbeit aus Arbeitssicherheitsgründen mindestens 2 Personen eingesetzt werden müssen, ist diese Arbeit entsprechend zeit- und kostenintensiv. Dieser Umstand und einige Messkurven, die in der Vorlaufphase sprechen dafür, dass früher unter ungünstigen Bedingungen – wenn auch nur jeweils für wenige Minuten – kleinere Schlammfahnen abgezogen wurden, die zwar nicht zu einer Grenzwertüberschreitung geführt haben, jedoch den Mengenausgleich verunreinigten; der hierdurch eingesparte Arbeitsaufwand wurde mit 16 bis 20 h pro Jahr abgeschätzt.

[55] Wird im Rahmen der Fremdüberwachung eine signifikante Überschreitung der Überwachungswerte festgestellt, kann dies – von eventuellen zivil- und strafrechtlichen Konsequenzen abgesehen – auch schnell zu einer erheblichen finanziellen Mehrbelastung (im Einzelfall >> 10.000 €) der Kommune führen.

künstlicher Intelligenz vorgestellt, die tauglich erscheint, weiteres Optimierungspotenzial zu erschließen und zu nutzen.

7.5 Prädiktive Steuerungs- und Regelungsstrategien

7.5.1 Vorwort

Der Autor hatte im Rahmen seiner Doktorarbeit (*Wiese [2004]*) u. a. auch ein Konzept für ein CBR-basiertes Prognosemodell erstellt. Neben dem theoretischen Ansatz wurde dort auch ein Modell zur Prognose von Schlammspiegelververläufen während der Sedimentation getestet. In der Post-Doc-Phase wurden jedoch noch zwei weitere Modellkomponenten ermittelt (Prognose des Tagesgangs und Prognose der Denitrifikation während der Sedimentationsphase). Um ein vollständigen Überblick über dieses Konzept zu geben, wurden in diesem Abschnitt diese beiden Komponenten zusammengeführt.

7.5.2 Einleitung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde das Emissionsminderungspotenzial integrierter Ansätze vorgestellt. Ein großer Teil dieses Potenzials kann in Messel durch eine Erhöhung des Zuflusses bis auf ca. 300 m^3/h bereits jetzt mit dem neuen Steuerungskonzept aus Abschnitt 7.4 erschlossen werden. Um aber das gesamte Potenzial – auch in Hinblick auf eine Optimierung der Energie- und Betriebskosten – zu nutzen, bedarf es noch einiger Verbesserungen. In Hinblick auf einen echten dynamischen Betrieb einer SBR-Kläranlage und des dazugehörigen Kanalnetzes gilt es die folgenden Punkte zu beachten:

- Die vorgegebenen Überwachungswerte im Ablauf der Kläranlage müssen sicher eingehalten werden. Im Sinne einer Reduzierung der akuten und verzögerten mischwasserbedingten Emissionen muss die Abwasserreinigung für CSB und NH_4-N sehr weitgehend erfolgen. Um möglichst viel Abwasser behandeln zu können, sollte der Reinigungsprozess aber auch nicht länger als erforderlich andauern.
- Die Dauer des Reinigungsprozesses hängt neben dem angestrebten Reinigungsziel auch wesentlich von der stofflichen Belastung des Abwassers ab, diese kann jedoch besonders bei Mischwasserzufluss stark variieren. Bei sehr verdünntem Mischwasserzufluss dürfte es möglich sein, die Zyklusdauer auf 3 Stunden zu verkürzen.
- Die Leistungsfähigkeit einer SBR-Kläranlage und damit die erforderliche Zyklusdauer hängt aber nicht nur von der Belastung, sondern auch von zahlreichen anderen Faktoren ab, wie etwa der Abwassertemperatur, dem Trockensubstanzgehalt im Reaktor oder dem Schlammindex. Einige dieser Faktoren unterliegen aber – z. B. jahreszeitlich bedingt – starken Schwankungen.
- Der aktuelle Zyklusmodus bestimmt für einige Stunden die hydraulische Kapazität der Kläranlage. Da es nicht immer möglich ist – z. B. wegen bestimmter Restriktionen in der Zyklussteuerung oder strenger Überwachungswerte – die Dauer eines bereits begonnenen Zyklus beliebig an die neuen Randbedingungen anzupassen, können sich hieraus Zwangspunkte für einen dynamischen integrierten Betrieb ergeben.

- Je mehr Optimierungskriterien angestrebt werden, desto komplexer muss das MSR-Konzept werden; auf Basis konventioneller MSR-Strategien ist eine multi-kriterielle Optimierung (z. B. erhöhte Beschickung vs. Energieeinsparung) nur schwer möglich.

Um alle Reserven effektiv nutzen zu können, bedarf es daher eines komplexen Mess-, Steuerungs- und Regelungskonzeptes, das auch eine prädiktive Komponente besitzt, da es damit möglich erscheint, die aktuelle Leistungsfähigkeit der (Teil-)Systeme bzw. bestimmte Prozesse und ggf. auch die Belastung vorherzusagen. Dies würde neue Möglichkeiten zur Optimierung des gesamten Abwassersystems erschließen. Derart komplexe MSR-Strategien bauen in der Regel auf Methoden des Softcomputing („Künstliche Intelligenz (KI)“) bzw. deterministischen Computermodellen auf. Neben diesen Kanalnetz- und Kläranlagen(-teil-) modellen standen im Abwasserbereich bisher vor allem genetische Algorithmen (GA), Fuzzy Logik, Neuro-Fuzzy und neuronale Netze im Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses. Diese KI-Methoden haben jedoch aus siedlungswasserwirtschaftlicher Sicht nach Auffassung des Autors einige Nachteile:

- **Geringe Transparenz:** Die Entscheidungsfindung ist – von Fuzzy Logik einmal abgesehen – meist nicht oder nur eingeschränkt nachzuvollziehen. Eine hohe Transparenz ist jedoch wichtig, damit MSR-Konzepte dauerhaft vom Betriebspersonal akzeptiert werden und sich auch in der Praxis durchsetzen können.
- **Geringe Geschwindigkeit:** Einige Softcomputing-Methoden erscheinen in der Theorie zwar vielversprechend, scheitern aber in der Praxis noch immer an der verfügbaren Rechenleistung. Schnelle Entscheidungen sind z. B. mit genetischen Algorithmen nur möglich, wenn die Modelle stark vereinfacht oder der Optimierungsalgorithmus vorzeitig beendet wird; dies hat jedoch Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der Entscheidung.
- **Zuverlässigkeit der Eingangsdaten:** Für das Training neuronaler Netze o. ä. werden zuverlässige Daten – insbesondere Messwerte – benötigt, die aber im täglichen Betrieb von Abwasseranlagen wegen der ungünstigen Randbedingungen oft nicht oder nur zeitweise zur Verfügung stehen.
- **Schwierigkeiten bei der Beschaffung von Wissen:** Das Erwerben von Regel- und Expertenwissen ist oft aufwendig bzw. in Einzelfällen überhaupt nicht möglich.
- **Hohe Kosten:** Für die Entwicklung und Implementierung komplexer Mess-, Steuerungs- und Regelungsstrategien fallen häufig sehr hohe Kosten an, sodass sich deren Einsatz meist nur für größere Kläranlagen finanziell lohnt.

Mit Einschränkungen gelten diese Nachteile auch für deterministische Modelle. Dies trifft auch für online-Modelle zu, die ständig aktiv sind, verschiedene Betriebsstrategien testen und ggf. auch steuerungs- und regelungstechnisch in den Betrieb eingreifen. Im Übrigen gilt es zu bedenken, dass jedes Modell nur ein vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit darstellt und dessen Anpassung an eine bestimmte Anlage aufwendig sein kann. Es liegt daher nahe, über prädiktive Steuerungskonzepte nachzudenken, die eine Form von Softcomputing verwenden, das die erwähnten Nachteile nicht besitzt. Eine diesbezüglich vielversprechende Methodik ist das Case-Based Reasoning (CBR).

7.5.3 Prädiktive Zyklussteuerung mit multiplen CBR-Modellen

7.5.3.1 Allgemeines [56]

Das Case-Based Reasoning (CBR), im deutschsprachigen Raum auch als Fallbasiertes Schließen (FBS) bekannt, ist eine Form der künstlichen Intelligenz, die erst seit den 1990er Jahren allmählich an Bedeutung gewinnt; erste Ansätze gehen jedoch bereits auf die erste Hälfte der 1980er Jahre zurück. Nach *Kolodner [1993]* (zitiert in *Bergmann [1997]*) beruht CBR auf der Art und Weise, wie Menschen ihr Erfahrungswissen nutzen, um neue Probleme zu lösen und überträgt diesen Entscheidungsfindungsprozess auf den Computer: Der Mensch kann mit Hilfe seiner Erfahrungen die Lösung eines bekannten Problems auf ein neues Problem übertragen. Dabei kommt es selten vor, dass sich ein Fall, der bereits erfolgreich gelöst wurde, exakt wiederholt. Folglich ist auch eine alte Lösung häufig nur eine ungenaue, aber dennoch ausreichend genaue Lösung für ein neues Problem. Hier knüpft CBR an, dessen Idee darin besteht, neue Probleme zu lösen, indem sie mit bereits gelösten verglichen werden. Dies setzt die Annahme voraus, dass die Lösungen zweier ähnlicher Probleme ebenfalls ähnlich sind (Abbildungen 7.18 und 7.19). Die künstliche Intelligenz dieses datenbank-basierten Werkzeugs steckt somit in der Fähigkeit, Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Fällen zu erkennen. Vereinfacht kann der Lösungsweg durch den sogenannten CBR-Zyklus (Abbildung 7.19) beschrieben werden. Nach Eingabe des neuen Problems wird zunächst ein ähnlicher Fall aus der Fallbasis ausgewählt (Retrieval-Phase). In der Reuse-Phase wird die Lösung des ähnlichsten Falls übernommen. Im dritten Schritt (Revise-Phase) wird die Lösung auf ihre Brauchbarkeit getestet und bei Bedarf verändert. Die neue Lösung wird dann ggf. wieder in der Retain-Phase in das System eingebracht.

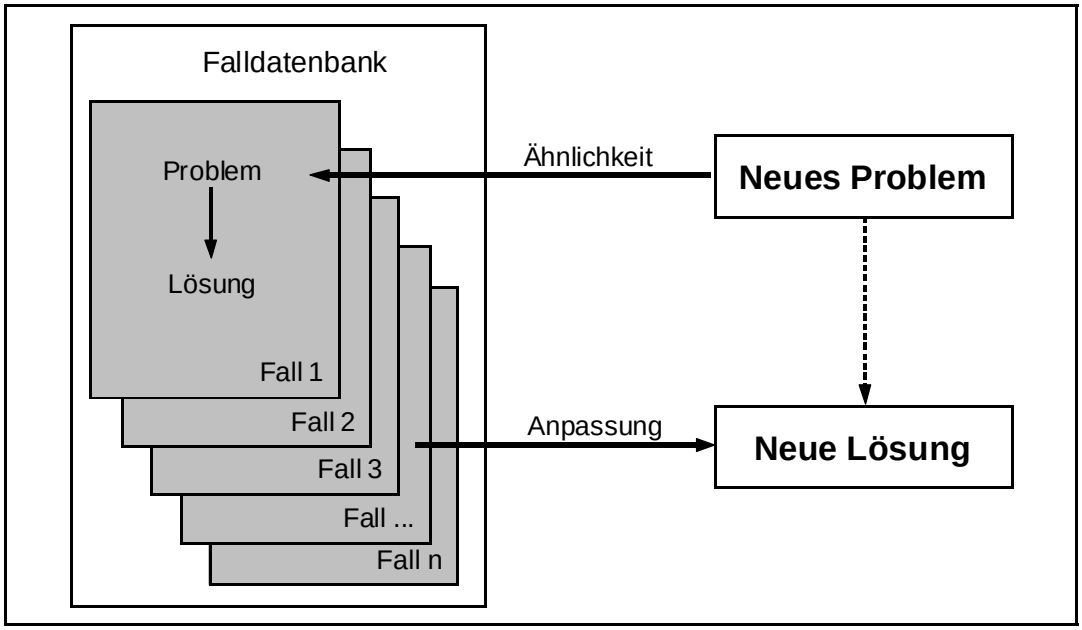


Abb. 7.18: Einfaches CBR-Modell (nach *Bergmann [1997]*)

[56] Dieser Abschnitt basiert auf *Wiese [2004]*.

Die Vorteile von CBR sind nach *Bergmann [1997]* in folgenden Aspekten zu sehen:

- Das Verfahren ist schnell und kommt daher auch mit großen Datenmengen zurecht.
- Das CBR-Modell baut auf realen Betriebsdaten auf und nicht auf Modellansätzen.
- Fallbasierte Systeme erfordern weniger spezialisiertes Wissen, wie z. B. Fuzzy Logik, das auf Regelwissen aufbaut oder deterministische Modelle, das Expertenwissen voraussetzt. Fallwissen ist zudem relativ einfach zu akquirieren, wohingegen das Erwerben von regelbasierten Wissen oder detailliertem Modellwissen oft recht aufwendig sein kann. Fallwissen ist zudem einfacher zu warten als Regelwissen, in einigen Fällen ist Modellwissen auch noch nicht vorhanden bzw. lässt sich mit den heutigen Mitteln noch nicht erwerben.
- Das Wissen in den Fallbasen, die Ähnlichkeitsbeurteilung und die Adaption von Lösungen können gelernt werden.
- Da sich CBR stark an der menschlichen Art Probleme zu lösen orientiert, ist das Prinzip leicht verständlich und die Art und Weise, wie eine Lösung ermittelt wurde, nachvollziehbar[57]. Dies gilt nicht zuletzt deswegen, weil der ausgewählte Fall bzw. die Lösungsanpassung dem Benutzer ausgegeben werden können. Damit ist eine wichtige Voraussetzung erfüllt, dass das Verfahren vom Betriebspersonal akzeptiert wird.
- Mit jedem Fall, der der Falldatenbank hinzugefügt wird, wächst die Wahrscheinlichkeit, dass beim nächsten Mal ein ähnlicher Fall gefunden werden kann, d. h. die Güte des CBR-Modells nimmt mit jedem Fall weiter zu. Durch geeignete Techniken, auf die hier nicht genauer eingegangen werden kann, lässt sich die Gefahr, Fehlentscheidungen aufgrund unzuverlässiger Daten zu treffen, vermindern.

Bergmann [1997] führt die Motivation für den Einsatz von CBR auf die folgenden Gründe zurück:

- Reduzierung des Akquisitionsaufwands für Wissen
- Einfache Wartung des Wissens
- Bessere Qualität der Lösungen
- Höhere Effizienz bei der Problemlösung
- Effektivere Nutzung vorhandener Datenbestände
- Höhere Benutzerakzeptanz

Case-Based Reasoning (CBR) ist eine leistungsfähige und vielversprechende Technologie, die ihr Potenzial bereits bei den verschiedensten industriellen Anwendungen unter Beweis gestellt hat (*Bergmann et al. [1999]*). Im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft ist diese Softcomputing-Methode jedoch noch nahezu unbekannt. Erst wenige Anwendungen werden in der Literatur beschrieben, z. B. von *Schmitt et al. [2002]*, die über ein CBR-basiertes Expertensystem zur Diagnose von Bläh- und Schwimmschlammproblemen und zur Ermittlung geeigneter Gegenmaßnahmen berichten. *Fenner und Saward [2002]* berichten über einen Ansatz für ein CBR-basiertes Expertensystem zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit und Abschätzung des Zustands von älteren Kanalnetzen. *Sànchez-Marrè [1996]* entwickelte das sog. „DAI-DEPUR“-System, das auf einer mehrstufigen Software-Architektur bzw. multiplen

[57] CBR ist daher auch sehr gut als Trainingshilfsmittel geeignet und kann mit dazu beitragen, das Systemverständnis des Betriebspersonals zu intensivieren.

Fall- und Regelbasen aufbaut, um die verschiedenen Anforderungen an ein Entscheidungsunterstützendes System auf Abwasseranlagen zu erfüllen. Im Rahmen dieses Expertensystems wurde CBR für Diagnosezwecke eingesetzt. Bezüglich Details dieser Technologie sei auf *Richter [2000]* bzw. *Aamodt und Plaza [1994]* verwiesen.

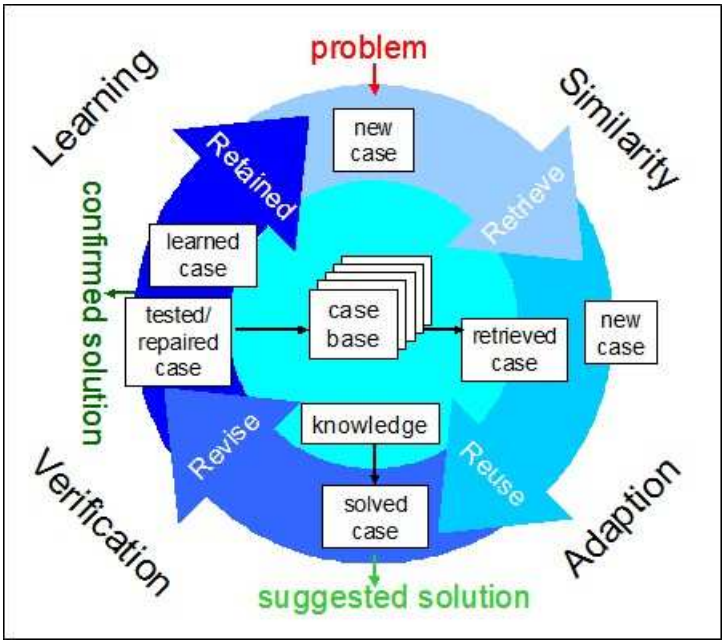


Abb. 7.19: CBR-Zyklus (nach einer Zeichnung in *Aamodt und Plaza [1994]*)

7.5.3.2 Einsatzmöglichkeiten für CBR im Bereich der SBR-Steuerung

Ein wesentlicher Modellbaustein eines prädiktiven Konzeptes könnte eine CBR-basierte Zyklussteuerung sein. Die Chancen für den erfolgreichen Einsatz von CBR erscheinen im Zusammenhang mit der Steuerung eines SBR aus folgenden Gründen erfolgsversprechend:

- Wegen des Zyklusprinzips sind Anfang und Ende des Reinigungsprozesses und jeder einzelne Teilschritt zeitlich klar definiert. Die zeitliche Komponente kann mit Hilfe des Prozessleitsystems exakt erfasst werden. Mit gewissen Einschränkungen ist es auch möglich, Anfang und Ende der Prozesse abzuschätzen; dies gilt besonders dann, wenn für den jeweiligen Prozess wichtige Größen messtechnisch erfasst werden.
- Bei üblichen Zyklusdauern durchläuft jeder SB-Reaktor zwischen 2 und 6 Zyklen pro Tag; einzelne Schritte (z.B. Beschickung, Belüften) können sich je nach Zyklusgestaltung auch häufiger wiederholen. Durch diesen Umstand lassen sich sehr schnell große Falldatenbanken aufbauen, sodass die Akquisition von Fallwissen kein Problem sein sollte.
- Da datenbankorientiert, ist CBR sehr schnell und besitzt gegenüber einigen anderen Werkzeugen, wie z. B. online-Modellen und Optimierungsalgorithmen (z. B. GA) einen deutlichen Geschwindigkeitsvorteil. Dieser Vorteil ist besonders in kleineren Einzugsgebieten von Bedeutung, da hier oft nur wenige Minuten zwischen Beginn eines Niederschlagsereignisses und einer deutlichen Erhöhung des Kläranlagenzuflusses liegen.

Wie bereits erwähnt, können bereits heute auf SBR-Kläranlagen zahlreiche Messgrößen erfasst werden. Der Einsatz dieser Messtechnik in Verbindung mit modernen Prozessleitsystemen würde es daher gestatten,

- den zeitlichen Verlauf wichtiger Prozessdaten (z.B. Schlammspiegelverlauf während der Sedimentations- und Dekantierphase) zu dokumentieren bzw.
- im Nachgang, die für den Reinigungserfolg erforderliche Dauer der einzelnen Phasen bzw. des Gesamtzyklus zu ermitteln und diese in einer Falldatenbank abzulegen.

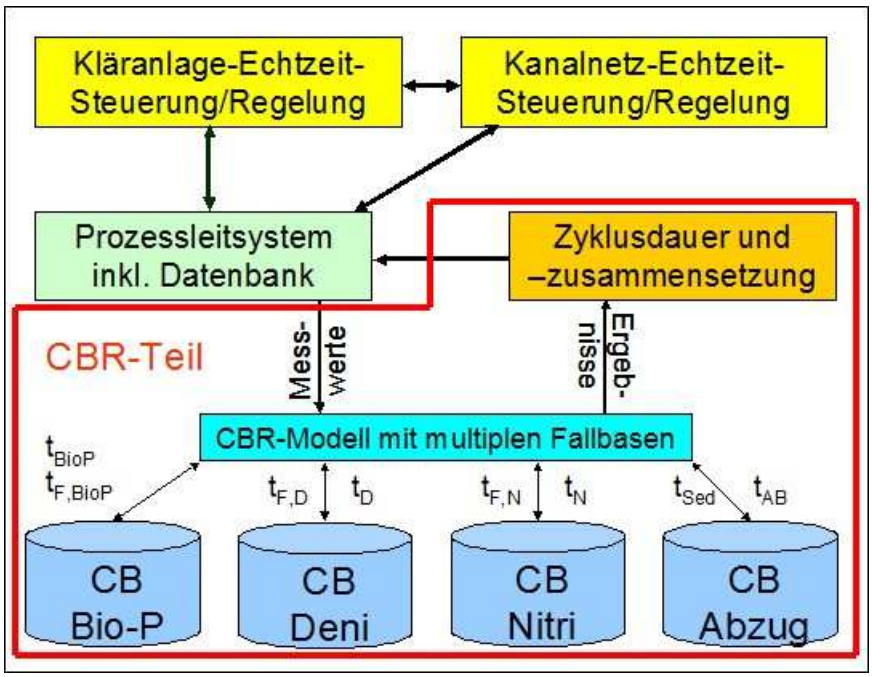


Abb. 7.20: Aufbau eines CBR-basierten prädiktiven SBR-Controller (Quelle: *Wiese [2004]*)

Damit ergeben sich interyessante Perspektiven für eine CBR-basierte prädiktive Steuerung von SBR-Anlagen. Wegen des Diskontinuitätsprinzips wäre es beispielsweise zu Beginn eines Regenereignisses denkbar, aufgrund bestimmter aktueller Prozessgrößen der Kläranlage (TS, ISV, Temperatur) sowie anderer Informationen (Anzahl der dem Regenereignis vorangegangener Trockenwettertage, Tageszeit etc.) die erforderliche Zyklusdauer abzuschätzen. Daraus kann wiederum die aktuell verfügbare maximale hydraulische Kapazität der SBR-Kläranlage abgeschätzt und dementsprechend das Kanalnetz gesteuert werden. Wegen der hohen Komplexität des Reinigungsprozesses und der damit verbundenen Vielzahl relevanter Prozessmessgrößen wäre es jedoch unzweckmäßig, eine solche prädiktive Steuerung auf nur einem CBR-Modell aufzubauen, da dies eine extrem hohe Anzahl von Fällen benötigen würde, um zuverlässig zu arbeiten. Sinnvoll wäre es hingegen, eine solche Steuerung auf verschiedenen CBR-Modellen aufzubauen, die jeweils die erforderliche Dauer eines Reinigungsschrittes prognostizieren (Abbildung 7.21). Aus den Ergebnissen aller CBR-Modelle könnte dann die erforderliche Dauer des Gesamtzyklus ermittelt werden; bei mehreren Reaktoren kann es erforderlich sein, aus Gründen der Synchronisation die Gesamtdauer dann auf volle viertel oder halbe Stunden aufzurunden. Nach einer entsprechenden Fallwissenakquisitionsphase (z. B. 0,5 bis 1,0 Jahr [58]) könnte ein solches System dann die Zyklussteuerung übernehmen.

[58] Die drei Technologiedemonstratoren haben auch gezeigt, dass die Lerndauer von Modell zu Modell unterschiedlich sein kann (z.B. das Modell zur Prognose des Schlammspiegelverlaufs kann bereits nach 3 Monaten brauchbare Ergebnisse liefern, im Falle der Zulaufprognose ist ca. ein ¾ Jahr Lernphase erforderlich).

7.5.3.3 Vorstellung einzelner Technologiebausteine

Nachfolgend werden offline-Modellbausteine vorgestellt, die entwickelt wurden, um die prinzipielle Machbarkeit des Konzeptes zu zeigen [59].

7.5.3.3.1 CBR-Modell zur Prognose des Schlammhöhenverlaufs

Wie bereits in der Literatur dokumentiert (z. B. *Keudel und Dichtl [2000]*) konnte auch auf der Kläranlage Messel beobachet werden, dass die Sinkgeschwindigkeit des Belebtschlamms unter anderem abhängig ist von dem Schlammvolumen zu Beginn des Sedimentationsprozesses und der Art des letzten Behandlungsschrittes vor Beginn der Sedimentationsphase. Hieraus folgt, dass Schlammspiegelverläufe unter ähnlichen Randbedingungen in der Regel auch ähnlich verlaufen, wie das Beispiel aus Abbildung 7.21 zeigt. Aus diesem Sachverhalt resultieren in Verbindung mit einer Schlammspiegelmessung – und ggf. einer Schlammvolumenmessung – aussichtsreiche Möglichkeiten in Bezug auf den Einsatz von CBR zur Prognose von Schlammhöhenverläufen, denn die in der Literatur beschriebenen Ansätze und Untersuchungen zur Beschreibung der Belebtschlamm-Wasser-Trennung (z. B. *Keudel [2002]*) zeigen, dass es diesbezüglich deutliche Unterschiede zwischen einzelnen Anlagen geben kann und damit keine einfachen allgemeingültigen deterministischen Modelle existieren, die das Absetzverhalten zuverlässig beschreiben. Aus diesem Grund wurde ein offline-CBR-Modell zur Prognose des Schlammhöhenverlaufs entwickelt, das als Technologiedemonstrator und zugleich als erster Baustein des zuvor beschriebenen CBR-basierten SBR-Controllers verstanden werden kann. Grundlage dieses Modells, das mit Hilfe des Programms CBR-works 4 (*EMPOLIS [2000]*) erstellt wurde, waren zahlreiche Betriebsdaten, die im Jahr 2001 über einige Monate in einem der beiden Reaktoren der KA Messel erhoben wurden. In diesem Modell wurde die Ähnlichkeit zweier Fälle durch einen Vergleich von vier unterschiedlichen Kriterien ermittelt, nämlich dem Wasserspiegel, dem Vergleichsschlammvolumen (noch händisch ermittelt), der Zyklusart [60] und der Temperatur (Abbildung 7.22). Die gemessenen Schlammspiegelverläufe wurden als Polynome angenährt und in der Falldatenbank abgelegt. Als Ähnlichkeitsfunktionen kamen nur lineare Funktionen – ermittelt nach dem Euklidschen Distanzmaß – bzw. Matrixähnlichkeiten (ja/nein) zur Anwendung. Die für jeden Faktor bzw. Fall ermittelten lokalen Ähnlichkeiten wurden wiederum mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren zu einer globalen Ähnlichkeit zusammengefasst. Auf der Basis der globalen Ähnlichkeit wurden anschließend die im Vergleich zum neuen Problem ähnlichsten archivierten Fälle gesucht. Weiterhin ist anzumerken, dass aus Vereinfachungsgründen bei dem Modell auf eine Anpassung des Abfragewasserspiegels an den Wasserspiegel des Vergleichsfalls verzichtet wurde, was zwangsläufig einen gewissen Fehler zur Folge hat.

Bereits mit diesem relativ einfachen CBR-Modell, dessen Falldatenbasis nur aus 30 repräsentativen Fällen – die allerdings mittels statistischer Kriterien aus über 120 als zuverlässig eingestuften Schlammspiegelverläufen ausgewählt wurden – besteht, konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Der prognostizierte Schlammspiegel wurde dabei als gewichtete Funktion der drei zur Anfrage ähnlichsten Fälle bzw. ihrer Schlammspiegelverläufe ermittelt. Abbildung

[59] Offline bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die drei Technologiedemonstratoren nicht parallel zum PLS ablaufen und ebenfalls noch keine automatische Aktualisierung der Falldatenbank möglich ist, da hierfür u. a. die Programmierung zahlreicher Schnittstellen nötig wäre. Die Demonstratoren dienen daher lediglich dem Nachweis einer prinzipiellen Machbarkeit des Konzeptes.

[60] Der letzte Schritt vor Sedimentation im TW-Zyklus ist „Mischen“, im Regenwetterzyklus dagegen „Belüften“.

7.23 zeigt ein Beispiel für eine gute Prognose des Schlammhöhenverlaufs, da die Abweichung zwischen dem vorhergesagten und dem gemessenen Verlauf immer kleiner als 0,15 m ist. Trotz dieser Vereinfachungen lagen die Abweichungen zwischen Prognose- und gemessenen Verlauf im ungünstigsten Fall nur bei etwa 0,5 m (Abbildung 7.24) [61]. Dies ist ein Wert, der deutlich geringer ist als übliche Mindestabstände (z. B. 0,8 bis 1,0 m) zwischen Wasser- und Schlammspiegel, die man aus Sicherheitsgründen beim Klarwasserabzug anstrebt, um Schlammabtrieb zu verhindern; bei einer Unterschätzung der Schlammspiegelsinkgeschwindigkeit sind größere Abweichungen ohnehin nicht von Bedeutung, da nicht die Gefahr eines Schlammabtriebs besteht. Wird in der Datenbank kein ausreichend ähnlicher Fall gefunden, besteht zudem die Möglichkeit, auf den herkömmlichen starren Zyklus auszuweichen, da dieser aus Sicherheitsgründen immer hinterlegt werden muss; schließlich muss der Betrieb der Anlage auch beim Ausfall wichtiger Messgrößen weiterlaufen.

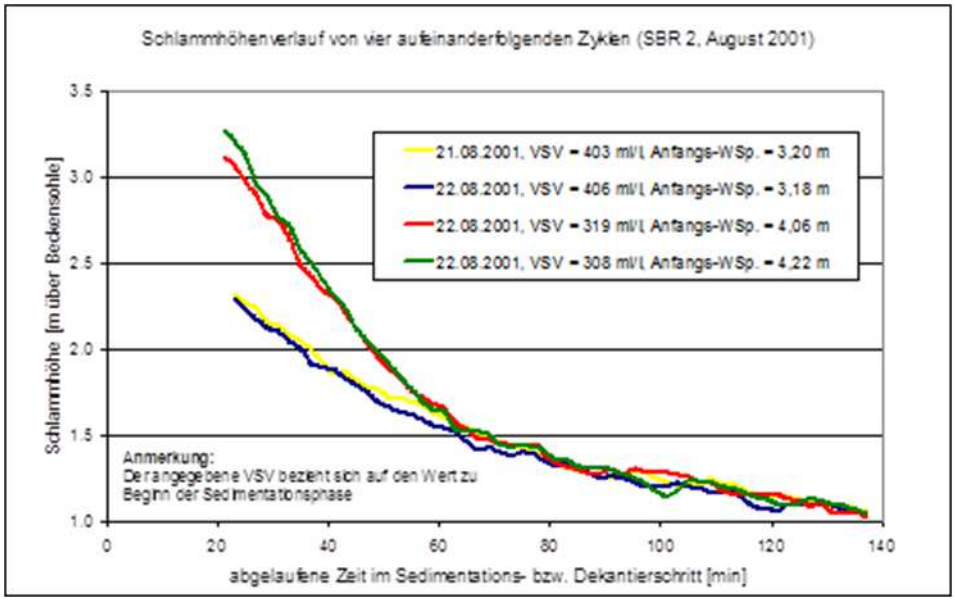


Abb. 7.21: Schlammhöhenverlauf während der Sedimentations- und Dekantierphase von vier auf einanderfolgender Trockenwetterzyklen. Der angegebene VSV ist bezogen auf das Schlammvolumen zu Beginn der Sedimentation. (Quelle: *Wiese [2004]*)

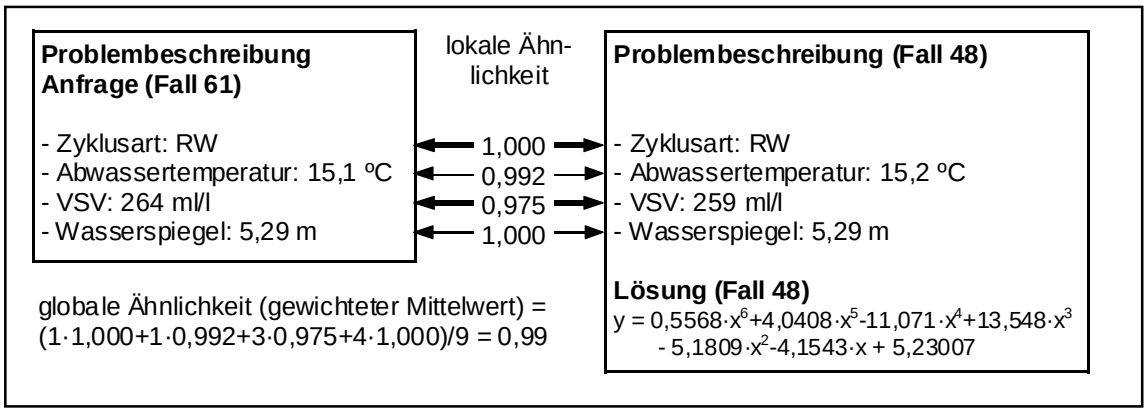


Abb. 7.22: Ähnlichkeitsberechnung bei der Problembeschreibung (Quelle: *Wiese [2004]*)

[61] Es gilt zu beachten, dass der Messfehler der Schlammspiegelsonde bis zu ca. 20 cm betragen kann.

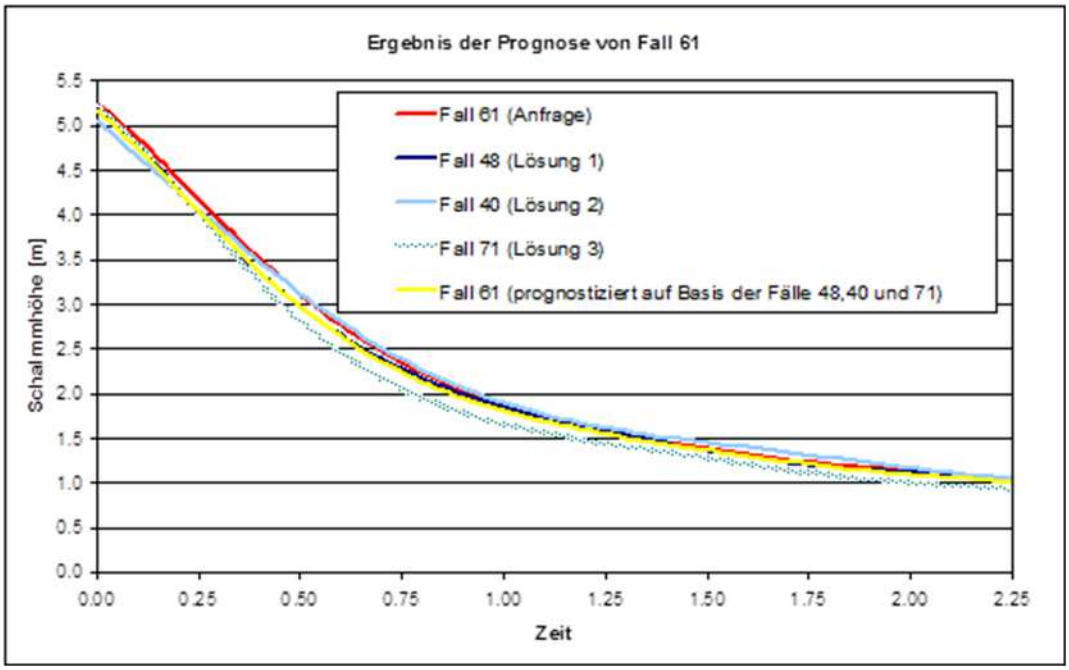


Abb. 7.23: Beispiel einer guten Prognose des Schlammhöhenverlaufs (Quelle: *Wiese [2004]*)

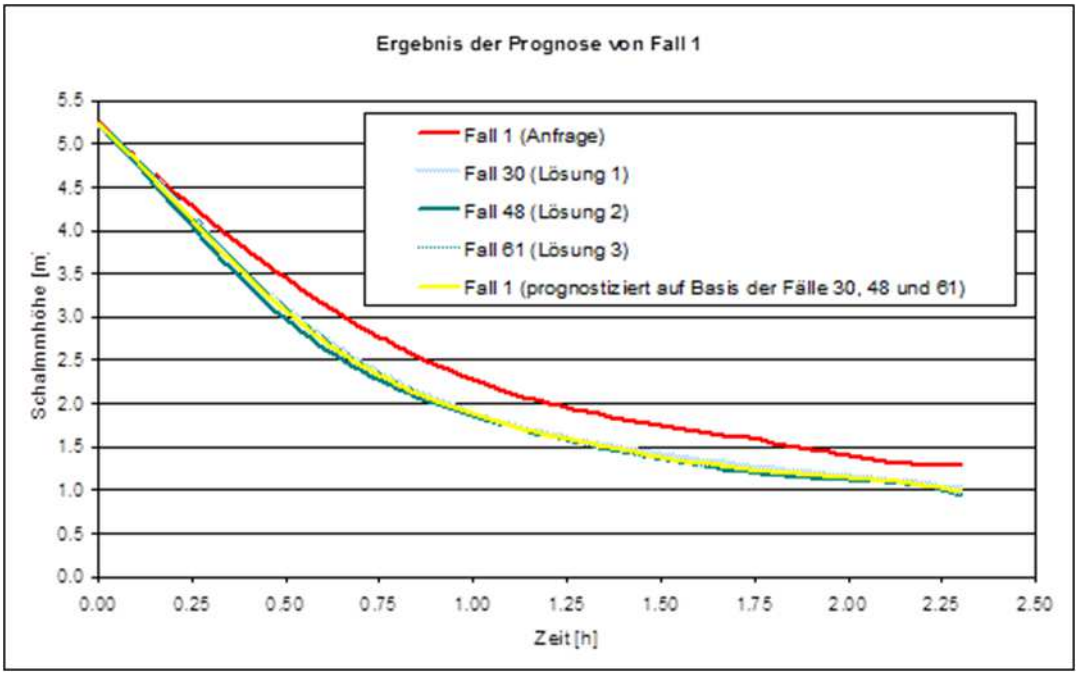


Abb. 7.24: Beispiel einer schlechten Prognose des Schlammhöhenverlaufs (Quelle: *Wiese [2004]*)

Ein solches CBR-Modell erscheint gut geeignet, die Grundlage für eine vollständige Ausschöpfung des Optimierungspotenzials der Sedimentations- und Dekantierdauer zu bilden. Da in der Regel Dekanterkennlinien zur Verfügung stehen bzw. sich aus den Betriebsdaten der Anlage ermitteln lassen, würde es ein CBR-Modell gestatten, die erforderliche Dauer der Sedimentations- und Dekantierphase unter den jeweiligen aktuellen Betriebsbedingungen recht genau zu prognostizieren und diese beiden Phasen dementsprechend zu steuern.

Zweckmäßigerweise wird man dennoch die Schlammspiegel- bzw. TS-Sonde in ein Sicherheitskonzept einbinden, um Schlammabtrieb für den Fall zu verhindern, dass das CBR-Modell den Schlammhöhenverlauf völlig falsch prognostiziert. Eine Weiterentwicklung des Modells erscheint somit sinnvoll, da zu erwarten ist, dass das Modell mit zunehmender Fallbasis immer genauer arbeiten wird und die Fehlerquelle „Händische VSV-Ermittlung“ durch den Einsatz einer VSV-Sonde reduziert werden kann.

7.5.3.3.2 CBR-Modell zur Prognose der Trockenwetterzulaufganglinie [62]

Für einige Fragestellungen (z. B. Energieoptimierung, Bewirtschaftung von Speichern, Optimierung der Denitrifikation) wäre es hilfreich, wenn man die Zulaufganglinie relativ zuverlässig prognostizieren könnte. Dies ist jedoch wegen der wechselnden Randbedingungen (z. B. Veränderung des Fremdwasserzuflusses) nicht ganz einfach. Bei einzelnen SBR-Steuerungskonzepten (z. B. beim DIC-SBR-Verfahren, *Holm et al. [2000]*) wird daher aus Vereinfachungsgründen ein typischer Tagesgang definiert, mittels dem die Beschickung der Reaktoren bzw. ggf. die Bewirtschaftung des Vorspeichers erfolgt. Das Problem bei dieser Vereinfachung ist, dass es – zumindest auf der KA Messel – keinen typischen Trockenwettertagesgang gibt, wie Abbildung 7.25 verdeutlicht. Ein Steuerungskonzept, das auf einer Typusganglinie aufbaut, muss daher zwangsläufig in vielen Fällen stark fehlerhaft und suboptimal sein; dies gilt auch für andere Ganglinien (z. B. Energieverbrauch). Daher wurde ein CBR-Modell erstellt, das in der Lage sein soll, eine 24 h-Prognose der Zuflussganglinie bei Trockenwetter abzugeben. Die Modelldatenbank basiert auf 134 Zuflussganglinien, die 2003 im Zufluss zur KA Messel gemessen wurden [63]. Als Modellparameter kamen die folgenden Attribute zur Anwendung:

- Das gleitende Minimum des Tageszuflusses der letzten 21 Tage, als Indikator für den Fremdwasseranteil. Diese Kennzahl wurde gewählt, da sie sich aus der PLS-Datenbank relativ einfach extrahieren lässt und durch die Einführung des *ATV-DVWK-Arbeitsblattes A 198 [2003]* an Bedeutung gewonnen hat.
- Der Wochentag ist ein weiteres wichtiges Attribut, da sich der Lebensrhythmus der Menschen und der Produktionsverlauf von Industrie und Gewerbe von Wochentag zu Wochentag stark unterscheiden kann (z. B. Werktage vs. Wochenende).
- Weitere Attribute sind Schul- bzw. Werksferien, da sie ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf den Schmutzwasseranfall haben können [64].
- Das letzte Attribut ist die Sommer- bzw. Winterzeit, da die Lebensgewohnheiten der Menschen im Sommer anders sind als im Winter.

Als Ähnlichkeitsfunktionen kamen lineare und nicht-lineare Funktionen bzw. numerische Matrixähnlichkeiten zur Anwendung. Die für jeden Faktor bzw. Fall ermittelten lokalen Ähnlichkeiten wurden wiederum mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren zu einer globalen Ähnlichkeit zusammengefasst. Auf Basis der globalen Ähnlichkeit wurden anschließend die drei im Vergleich zum neuen Problem ähnlichsten archivierten Fällen gesucht und gemittelt. Die Ergebnisse, die mit diesem einfachen Modell erzielt werden konnten, sind ermutigend (Abb. 7.26).

---

[62] Dieser Abschitt baut auf der englischsprachigen Veröffentlichung *Wiese et al. [2005A]*.

[63] Der Fremdwasseranfall unterlag 2003 erheblichen Schwankungen. Im Frühjahr wurden phasenweise Fremdwasseranteile von mehr als 50 % ermittelt, im Spätherbst hingegen war dieser vernachlässigbar gering.

[64] In Messel befindet sich ein großes Schulzentrum.

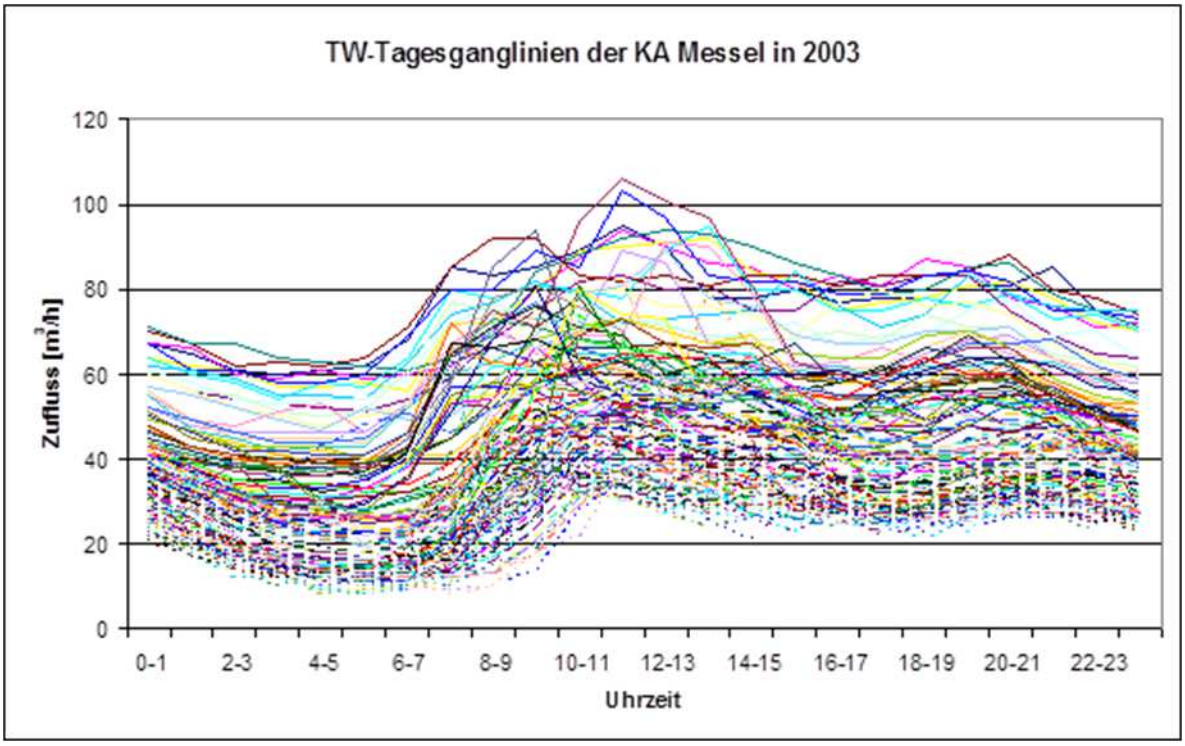


Abb. 7.25: Trockenwetter-Tagesganglinien im Kläranlagenzulauf in 2003 (Quelle: Autor)

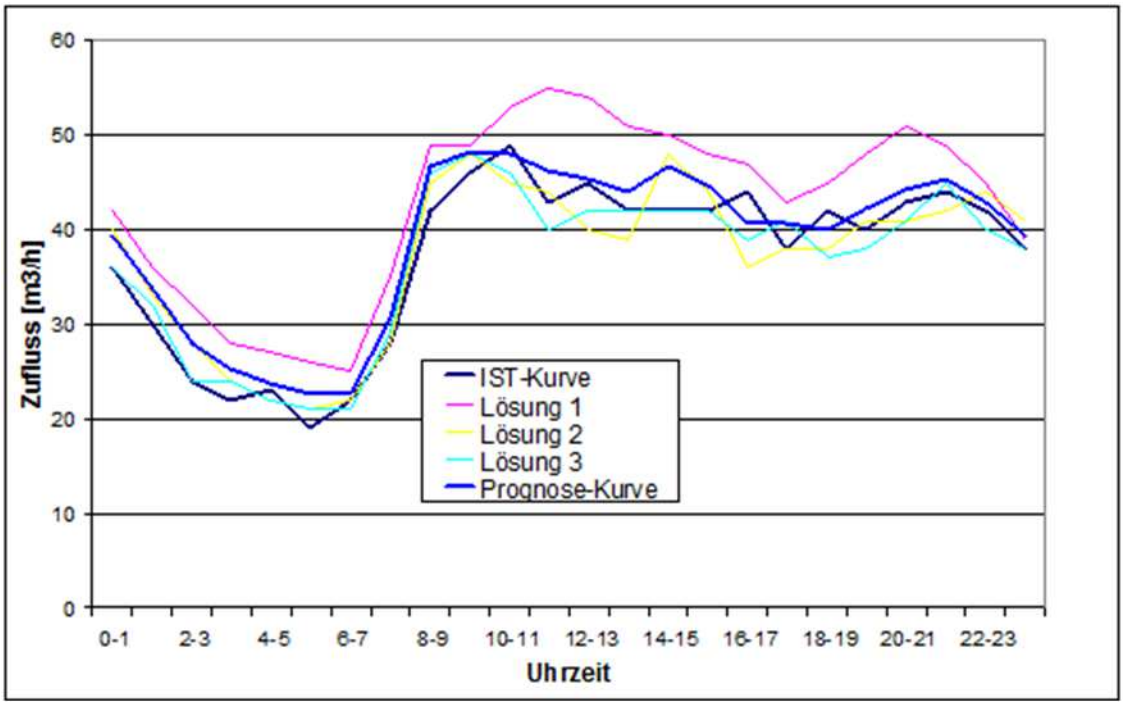


Abb. 7.26: Beispiel für eine gute Prognose der Zuflussganglinie (Quelle: Autor)

Abbildung 7.26 stellt keinen Einzelfall dar, wie die Abbildung 7.27 verdeutlicht; hier ist die Summenhäufigkeitskurve des Prognosefehlers für den Trainingsdatensatz aufgelistet: Es ist erkennbar, dass in 80 % der Fälle der Prognosefehler bezogen auf den 1 h-Wert kleiner war

als ± 5 m^3/h; in 95 % der Fälle lag er unter ± 10 m^3/h. Die maximale Abweichung betrug 33 m^3/h. Der maximale Progonosefehler bezogen auf den Tageszufluss betrug ca. 180 m^3/d.

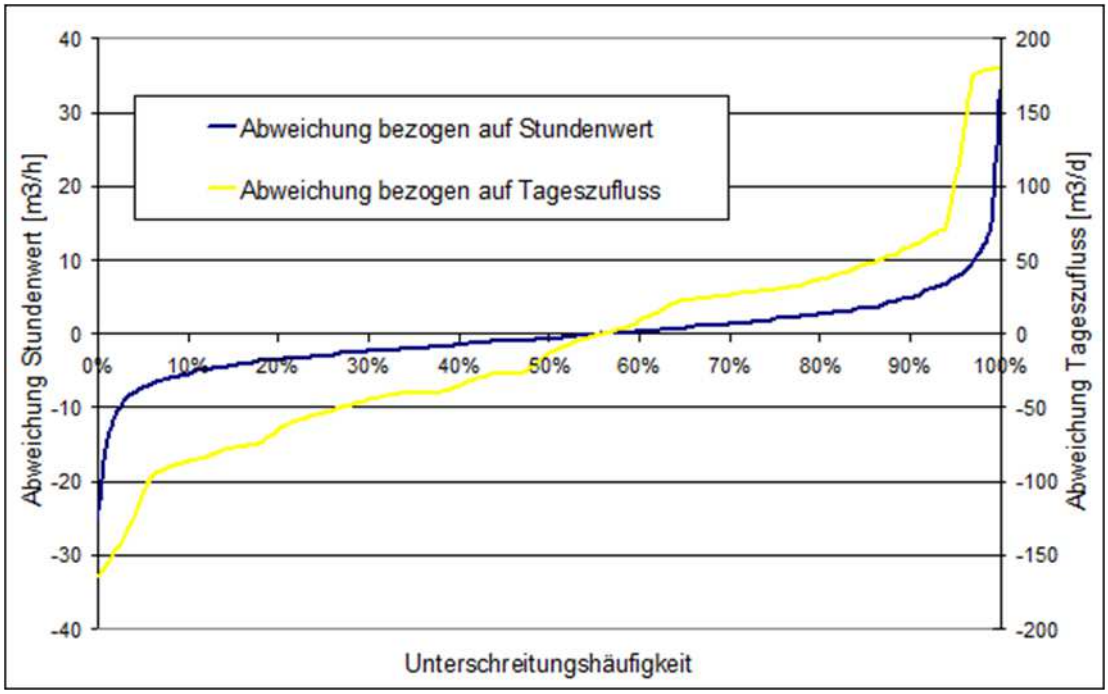


Abb. 7.27: Fehlerverteilung der Prognose bezüglich Stunden-/Tageszufluss (Quelle: Autor)

In der Literatur finden sich auch andere Ansätze zur Prognose der Zulaufmengen: *Lindqvist et al. [2005]* berichten etwa über ein Modell zur Prognose der Zulauffracht auf einer schwedischen Großkläranlage (425.000 m^3/d), wobei sowohl eine Prognose bei Trockenwetter als auch bei Regenwetter erfolgt: Der Trockenwetterzufluss wurde dabei auf Basis des durchschnittlichen Trockenwetterzuflusses der letzten Tage ermittelt. Der Regenwetterzufluss basierte zwar auch auf diesen Daten, jedoch wurden dann die Ergebnisse eines Niederschlags-Abfluss-Modells auf Basis von Regendaten als Eingangssignal berücksichtigt.

7.5.3.3.3 CBR-Modell zur Prognose der endogenen Denitrifikation [65]

Es wurde ebenfalls ein Versuch gestartet, biologische Prozesse mit Hilfe von CBR zu prognostizieren. Ausgewählt hierfür wurde die Denitrifkationsleistung während der Sedimentations-, Dekantier- und Pausenzeiten. Als Datengrundlage wurde 137 Messungen herangezogen. Als Attribute wurden die NO_3-N-Fracht bzw. -Konzentration, die Belebtschlammmenge im Reaktor, die Abwassertemperatur und der Wasserspiegel (jeweils zu Beginn der Sedimentationsphase gemessen) definiert. Weiterhin wurde die Nummer des Reaktors als Attribut verwendet, um zu testen, ob auch Datensätze des jeweils anderen Reaktors zur Prognose herangezogen werden können. Als Ähnlichkeitsfunktionen kamen vor allem lineare Ähnlichkeitsmaße zur Anwendung. Obwohl das CBR-Modell nur grob kalibriert wurde, konnten bereits mit diesem einfachen Modell eine bessere Prognose (Standardfehler der Prognose: 0,6 kg NO_3-N [66])

[65] Dieser Abschitt baut auf der englischsprachigen Veröffentlichung *Wiese et al. [2005A]*.

[66] Umgerechnet auf einen Reaktorinhalt von 900 bis 1.500 m^3 entspricht dies einem Fehler von 0,4 bis 0,7 mg NO_3-N/l. In vielen Fällen liegt dieser Wert damit bereits im Bereich der Messungenauigkeit der NO_3-N-Sonde.

erzielt werden als mit einem statistischen Modell auf Basis multipler Regression (Standardfehler der Prognose: 0,7 kg NO_3-N). Bei einer Weiterentwicklung könnte sich CBR sogar als eine sinnvolle und leistungsfähige Alternative zu deterministischen Modellen erweisen.

7.5.4 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde ein Konzept für ein prädiktives Steuerungs- und Regelungskonzept auf Basis von Case-Based Reasoning, einer datenbankbasierter Form künstlicher Intelligenz, vorgestellt, das dazu dienen soll, weiteres Optimierungspotenzial für SBR-Kläranlagen zu erschließen. Obwohl nicht im Umfang des DBU-Forschungsvorhabens 17258 vorgesehen, bot es sich wegen der günstigen Randbedingungen auf der KA Messel an, die Anwendbarkeit von CBR anhand verschiedener einfacher Modelle zu testen. Die zahlreichen Vorteile von CBR, u. a. die hohe Geschwindigkeit und Transparenz, lassen eine Entwicklung eines CBR-Controllers vielversprechend erscheinen. Dies belegen auch die positiven Resultate der drei offline-Technologiedemonstratoren, die zu Testzwecken entwickelt wurden. Die Beispiele verdeutlichen auch, dass es möglich sein sollte, ein gesamtes System auf Basis von CBR aufzusetzen. Dies ist insofern sinnvoll, da das Betriebspersonal nicht mit zu vielen verschiedenen MSR-Strategien, Optimierungstools etc. überfrachtet werden sollte, da darunter zwangsläufig die Akzeptanz eines solchen Systems leiden würde.

7.6 Fehlerdiagnosen und Entscheidungshilfen

In der Literatur finden sich verschiedene Arbeiten, die sich mit der Diagnose von Fehlern bzw. zur Ableitung geeigneter Lösungsvorschläge auf SBR-Anlagen beschäftigen:

Gerardi [2010] gibt praktische Hinweise zur Diagnose von Betriebsproblemen auf SBR-Kläranlagen, wobei er die folgenden Problemfelder abgrenzt:

- Probleme mit der Nitrifikation
- Probleme mit der Denitrifikation
- zu hohe BSB_5-Konzentrationen im Ablauf
- zu hohe TS-Konzentrationen im Ablauf („Schlammabtrieb“)
- unerwartete Änderungen bei pH-Wert und Alkalinität
- Probleme mit Bläh- und Schwimmschlamm
- zu niedrige Sauerstoffkonzentrationen

Neben allgemeinen Hinweisen und Informationen strukturiert *Gerardi [2010]* den Weg zur Identifikation des Problems entlang einer Checkliste, die auszugsweise und in der Übersetzung am Beispiel von Nitrifikationsproblemen wie folgt beschrieben werden kann:

- Schritt 1: Ist die oTS-Konzentration gering? (ja = Schritt 2, nein = Schritt 3)
- Schritt 3: Ist die Sauerstoffkonzentration während der belüfteten Phase niedrig? (ja = Schritt 4, nein = Schritt 5)
- Schritt 5: Ist der pH-Wert im normalen Bereich (6,8 – 7,2) oder hat sich der pH-Wert in den letzten 24 Stunden um mehr als 0,3 verändert? (ja = Schritt 6, nein = Schritt 7)
- Schritt 6: Identifizieren Sie die Ursache für die pH-Wertänderung und neutralisieren bzw. stabilisieren den SB-Reaktor oder den Kläranlagenzulauf

Da zahlreiche der hier aufgeführten Parameter entweder in Echtzeit oder regelmäßig im Labor ermittelt werden, könnte eine derartige Diagnose/Checkliste auch (teil)-automatisiert erfolgen, wie Abbildung 7.28 verdeutlicht.

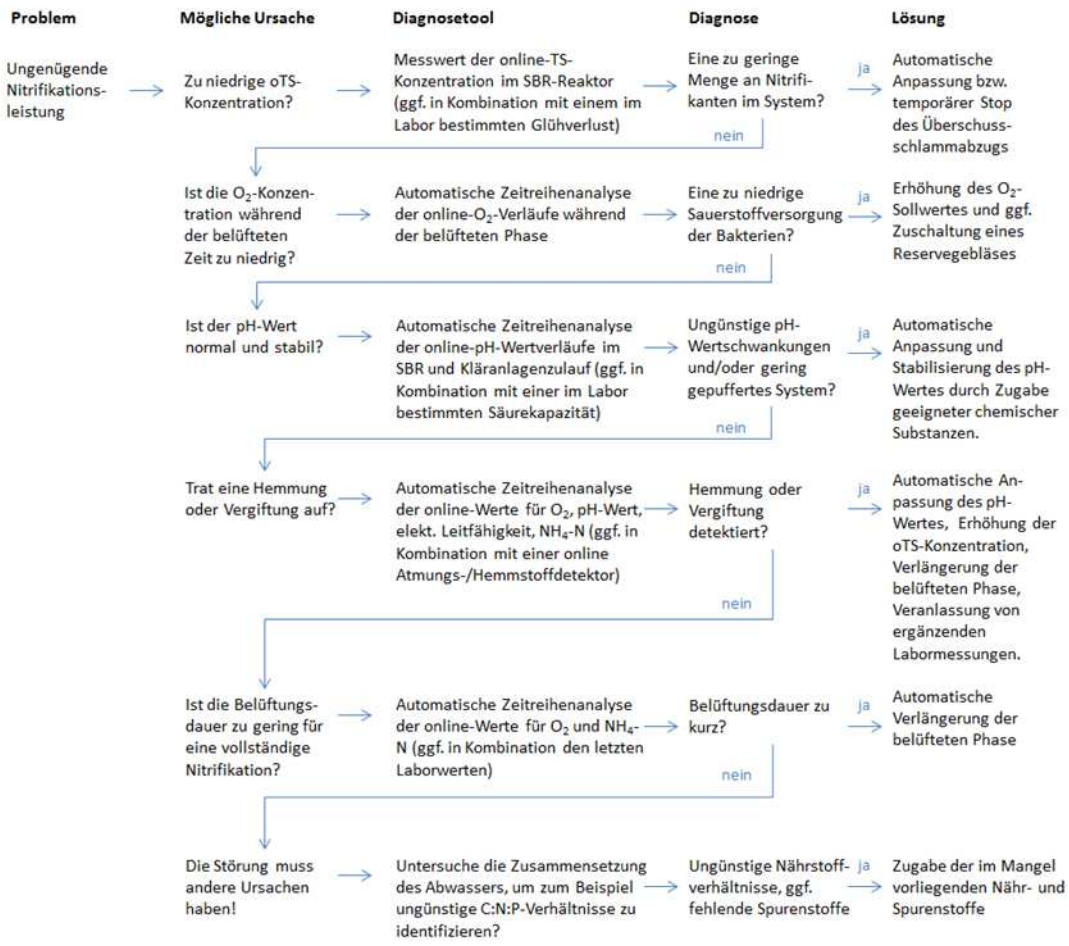


Abb. 7.28: Schematische Abläufe einer möglichen (teil-)automatisierten Fehlerdiagnose/-lösung am Beispiel „Ungenügende Nitrifikationsleistung“ (modifiziert und erweitert auf Basis einer Checkliste von *Gerardi [2010]*)

Ruiz et al. [2004] berichten ebenfalls über Versuche mit der von *Rubio et al. [2004]* beschriebenen halbtechnischen SBR-Versuchsanlage (1 m^3), verwenden aber einen anderen Ansatz: Die Autoren entwickeln ein System zur online-Zustandsbewertung auf Basis eines Hybridansatzes bestehend aus einer statistischen, multiplen Hauptkomponentenanalyse (Multiway Prinicipal Component Analysis) und einer daran anschließenden Fuzzy-Komponente. Die Einordnung in die Fuzzy-Klassen erfolgte dabei sowohl auf Basis von Analyseergebnissen als auch auf den Erkenntnissen aus der MPCA in fünf Gruppen: Probleme im Bereich der E-Technik (z. B. Stromschwankungen), Veränderung der Randbedingungen (z. B. Zulaufbelastung), Fehler in der Maschinentechnik (z. B. Rührwerke), Regenwettermodus und Normalzustand. *Aguado et al. [2005A]* nutzen die Ergebnisse eines Labor-SB-Reaktors zur erhöhten biologischen Phosphorelimination, dessen Prozess mit Hilfe von online-

Messgeräten für pH, Redox, elektrolytischen Leitfähigkeit, Temperatur und Sauerstoff überwacht wird. Aufbauend auf diesen Datensätzen benutzen die Autoren zwei verschiedene statistische Verfahren zur Hauptkomponentenanalyse, um Betriebszustände bzw. Störungen in der Anlagentechnik oder Messtechnik zu identifizieren (z. B. Rauschen oder Ausfall von Messgeräten, Ausfall von Rührwerken oder Belüftung).

Kim et al. [2005C] berichten über einen Ansatz zur automatischen Fehlererkennung maschineller Einrichtungen auf einer SBR-Laboranlage auf Basis von Vibrationsmessungen und Zeitreihenanalysen der Messdaten.

Die in Kapitel 4.5 aufgeführten neuen Ansätze für eine effektivere Mensch-Maschine-Kommunikation lassen sich auf SBR-Kläranlagen übertragen.

7.7 Zwischenfazit

Das Kapitel 7 verdeutlicht, dass durch eine Ergänzung der Messtechnik in Kombination mit einer softwaretechnischen Modifizierung der Automatisierung die Leistungsfähigkeit einer SBR-Kläranlage deutlich gesteigert werden konnte. Dabei konnte nicht nur die hydraulische Belastungskapazität deutlich erhöht, sondern gleichzeitig auch die Reinigungsleistung signifikant verbessert werden. Dieses Beispiel aus der Großtechnik verdeutlicht, dass durch den Einsatz von moderner Messtechnik und innovativen Automationskonzepte tatsächlich die Stärken der SBR-Technik ausgenutzt bzw. die Schwächen eliminiert werden können. Die Ergebnisse der offline-Technologie-Demonstratoren auf Basis von Case-Based Reasoning verdeutlichen, dass die Leistungsfähigkeit und Transparenz einer SBR-Kläranlage durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz nochmals gesteigert werden könnte. Weiterhin gibt es verschiedene Autoren, die bereits an Ansätzen zur Fehlerdiagnose und für ein Condition Monitoring von SBR-Kläranlagen arbeiten, sodass es realistisch erscheint, dass bereits mittelfristig SBR-Kläranlagen in sehr transparente Systeme umgewandelt werden können.

8 Einführung in die Biogasanlagentechnik

8.1 Historie der Biogastechnik

Die frühen Versuche mit der Gaserzeugung aus biogenen Stoffen werden in *Eder und Schulz [2006]* beschrieben: Demnach fing Ende des 18. Jahrhunderts der italienische Physiker und Naturforscher Alessandro Volta im Schlamm oberitalienischer Seen Sumpfgas auf, um damit Verbrennungsversuche durchzuführen. Es folgten weitere Versuche von Faraday, Avogardo oder Pasteur; letzterer experimentierte dabei 1884 mit der Erzeugung von Biogas aus Festmist, u. a. um das Problem des zahlreich in den Straßen Paris anfallenden Pferdemists zu lösen. Der erste dokumentierte Bau einer Biogasanlage erfolgte 1897 für ein Lepra-Krankenhaus in Bombay, Indien, bei der das Biogas aus organischen Abfällen und pflanzlichen Material erzeugt wurde. Zunächst zur Beleuchtung eingesetzt, soll aber bereits ab 1907 das Biogas zum Betrieb eines Motors zur Stromerzeugung genutzt worden sein.

Die Wurzeln der neuzeitlichen Biogastechnik (Anaerobtechnik) wurden Ende des 19. Jahrhunderts bzw. Anfang des 20. Jahrhunderts wesentlich durch die Siedlungswasserwirtschaft geprägt, die sich der Probleme einer ordnungsgemäßen Behandlung der immer mehr anfallenden Abwässer und der daraus resultierenden Gewässerverschmutzung und Trinkwasserverunreinigung annahm (*Bischofsberger et al. [2005]*): Besonders zu erwähnen sind hierbei der Mouras‘ Automatic Scavenger, einen luftdichten Tank zur Ausfaulung von Abwasser und Schlamm. Der 1895 entwickelte „Septic Tank“ von Cameron, England, wurde bereits zur Behandlung von Abwasser bis 20.000 m^3/d eingesetzt. Die Nutzung anaerober Vergärungsprozesse begann in Deutschland ab 1906 durch Prof. Karl Imhoff mit dem Bau einer zwei-stöckigen Abwasserreinigungsanlage in Essen-Recklinghausen; diese Konstruktion wurde in Folge vielfach kopiert. Danach wurde auch intensiv an der Entwicklung von beheizten Vergärungsbehältern („Faultürmen“) gearbeitet, d. h. getrennt vom eigentlichen Abwasserreinigungsprozess eingesetzte Anaerobreaktoren. Basierend auf einem Patent von 1914 baute Imhoff in den 1920er Jahren in Essen-Recklinghausen den ersten Faulturm zur anaeroben Klärschlammbehandlung, wobei ab 1927 das überschüssige Klärgas in das städtische Gasnetz eingespeist wurde. Diesem Vorbild folgten weitere Städte. Wegen der Treibstoffknappheit im 3. Reich wurde bereits vor dem 2. Weltkrieg damit begonnen, Klärgas in Druckflaschen abzufüllen („Treibgas“), um damit kommunale Kraftfahrzeuge zu betreiben. Zu dieser Zeit begann man wegen der steigenden Energienachfrage auch damit, die Klärgasproduktion durch Zugabe von organischen Abfallstoffen zu erhöhen; so wurde ab 1940 in Stuttgart erstmals Fettabscheidermaterial mitvergoren. Diese Zugabe dieser Stoffe wird seitdem auch als Kofermentation bezeichnet (*Eder und Schulz [2006]*).

Die Entwicklung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen von 1944 bis 1990 wird von *Baader [2011]* wie folgt beschrieben: 1944 wurde von Prof. Karl Imhoff eine landwirtschaftliche Anlage zur Erzeugung von Biogas aus Stallmist und landwirtschaftlichen Abfallstoffen errichtet. Direkt nach dem 2. Weltkrieg führten dann Reinhold und Noack umfangreiche Gärversuche im Labor für diverse landwirtschaftliche Stoffe durch. 1947 wurde an der Technischen Universität Darmstadt dann eine Biogasanlage für kleinere landwirtschaftliche Betriebe entwickelt, die auf dem Prinzip eines Pfropfenstromreaktors mit horizontalem Langachsrührwerk beruhte („System Darmstadt“). Zwischen 1946 und 1952 entwickelten Schmidt und Eggersglüß für

größere landwirtschaftliche Betriebe mit Schwemmentmistung einen Biogasanlagentyp, der in der Großtechnik etwa 20 Mal gebaut wurde. Auf dem Gebiet der DDR entwickelte die Technische Universität Dresden ab 1954 einen Biogasanlagentyp, von dem ebenfalls eine großtechnische Anlage errichtet wurde. Ab Mitte der 50er Jahren wurden viele Anlagen aber wieder stillgelegt: Einerseits lag dies an der nicht ausgereiften Technik und mangelnden Funktion der Anlagen, anderseits war ab 1955 der Preis für Heizöl o. ä. so gering, dass die Biogastechnologie für die damalige Zeit im Vergleich zu fossilen Brennstoffen zu teuer war. Einen Wiederaufschwung der anaeroben Vergärung gab es in der Bundesrepublik ab 1973 durch das Auftreten der 1. Erdölkrise. Infolge des Anstiegs der Energiepreise wurden regenerative Energien verstärkt gefördert, sodass nicht nur Biogasanlagen im Eigenbau entstanden, sondern auch bereits erste Firmen derartige Anlagen errichteten. Nach Abklingen dieser Krise entwickelte sich die Biogasnutzung wieder rückläufig. Es kam zur Stilllegung einiger Anlagen, da die Preise für fossile Energie wieder sanken. Auch in der DDR wurden ab 1982 wieder intensivere Entwicklungen durchgeführt, die im Bau von acht großtechnischen Anlagen mündeten. Zum Zeitpunkt der Wiedervereinigung 1990 waren in Deutschland etwa 80 Biogasanlagen in Betrieb.

Erst mit der Einführung des ab 1991 gültigen *Stromeinspeisungs-Gesetz [1990]* wurden jedoch die wirtschaftlichen Randbedingungen für den Bau der Biogasanlage deutlich verbessert; die beginnende Mitvergärung organischer Reststoffe erhöhte die Wirtschaftlichkeit weiter. Aber erst mit dem *EEG [2000]* und der garantierten Vergütung für Strom und Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung begann ein regelrechter Boom der Biogasanlage: In den letzten Jahren stieg die Zahl der Biogasanlagen in Deutschland, aber auch weltweit, stark an, vor allem wegen der in vielen Staaten mittlerweile praktizierten Förderung Erneuerbarer Energien. 2004 gab es in Deutschland bereits 2.050 Biogasanlagen mit einer Gesamtleistung von 390 MW_{el}, die etwa 1,4 TWh Strom aus Biogas erzeugten. Der Fachverband Biogas rechnete damit, dass bereits Ende 2012 in Deutschland etwa 7.589 Biogasanlagen mit ca. 3.200 MW_{el} in Betrieb waren, die 21,9 TWh Strom produzierten (*Fachverband Biogas [2013]*). Biogas ist heute im Übrigen auch international ein Topthema.

Während die Biogastechnik in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts einige Höhen und Tiefen erlebte, konnte sich die Anaerobtechnik in der Abwasserbehandlung behaupten und fand weltweite Verbreitung, wie zum Beispiel zur anaeroben Klärschlammbehandlung (Energiegewinnung, Hygienisierung) auf größeren Kläranlagen oder zur (Vor-)Behandlung von Industrieabwässern. Details können *Bischofsberger et al. [2005]* entnommen werden. Eine Übersicht über verschiedene Verfahrensprinzipien der anaeroben Abwasserbehandlung gibt *Zeeman [2011B]*. *ATV [2000]* und *ATV [2001]* geben eine Übersicht über beispielhafte Anwendungen für anaerobe Abwasseranlagen im Bereich der Industrie, wie zum Beispiel: Zucker-, Stärke und Pektinfabriken, Fabriken zur Gewinnung und Verarbeitung von Nahrungsfetten und -ölen, Kartoffelveredlungsindustrie, Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe sowie Tierkörperbeseitigungsanlagen, Fischverarbeitung, Verarbeitung von Milch und Milchprodukten, Fruchtsaft- und Erfrischungsgetränkeherstellung, Brauereien und Malzfabriken, Hefefabriken und Melassebrennereien, Wein- und Sektbereitung, Brennereien und Spirituosenbereitung, Süßwarenindustrie, Papier- und Zellstoffindustrie und Textilindustrie.

Diese Auflistung macht eindrucksvoll deutlich, in wie vielen Branchen sich die Anaerobtechnik für die Behandlung von Abwässern und Abfällen durchsetzen konnte.

8.2 Biogasprozess

Biogas entsteht aus organisch abbaubaren Stoffen in einem vierstufigen Prozess (Abb. 8.1) durch spezialisierte Mikroorganismen, in einem anaeroben Milieu (d. h. Sauerstoffmangel, Sauerstofffreiheit), bei Temperaturen von 30 bis 40 °C (mesophiler Bereich) oder 50 bis 60 °C (thermophiler Bereich), bei langen Aufenthaltsdauern des Substrats (oft > 30 Tage) und in einem pH-Wert-Bereich von 7 bis 7,7 (bei simultanem Betrieb). Biogas ist ein Gemisch aus Methan (CH_4: 50 - 75 Vol.-%), Kohlenstoffdioxid (CO_2: 25 - 50 Vol.-%), Wasser (H_2O: 2 – 7 Vol.-%), Schwefelwasserstoff (H_2S: 20 – 20.000 ppm), Stickstoff (N_2: < 2 Vol.-%), Wasserstoff (H_2: < 1 Vol.-%), Sauerstoff (O_2: < 1 Vol.-%). Der Heizwert von Biogas orientiert sich am Methangehalt und beträgt meist zwischen 5 und 7 kWh/Nm^3. Zum Vergleich: Der Heizwert von Erdgas ist mit ca. 10 kWh/Nm^3 höher, da dieser fast nur aus Methan besteht (*Bischoffsberger et. al. [2005]*).

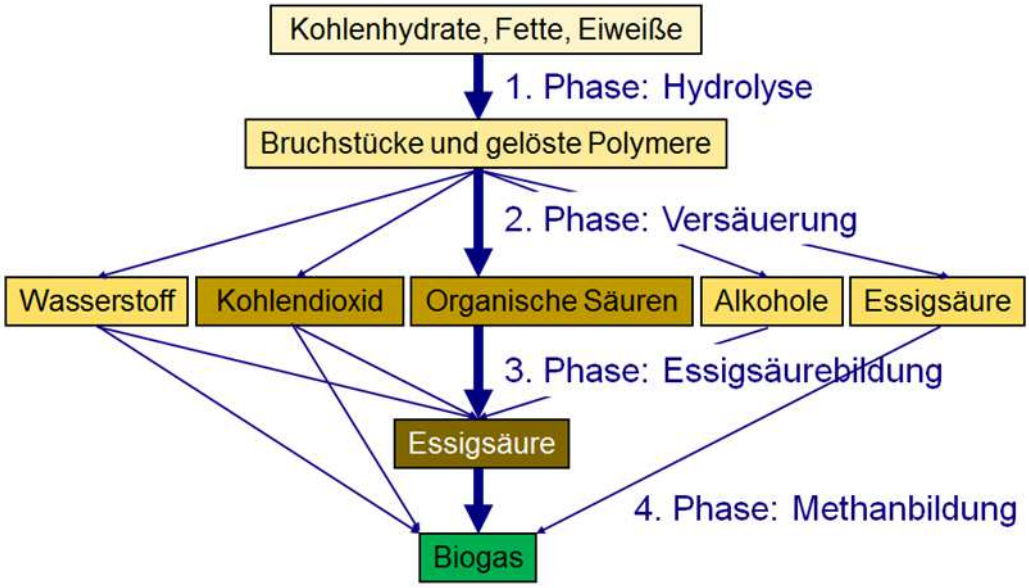


Abb. 8.1: Der Biogasprozess (vereinfachte Darstellung nach *Bischoffsberger et. al. [2005]*)

Der Biogasprozess, bei dem organische Stoffe schrittweise zersetzt werden, ist komplex und reagiert sensibel auf Störungen des Milieus (z. B. Hemmstoffe, pH-Wert- und Temperaturschwankungen). Vereinfacht lässt er sich wie folgt darstellen: In der ersten Stufe (Hydrolyse) werden die in den Eingangsstoffen enthaltenen Kohlenhydrate, Fette und Eiweiße in kürzere Stücke und gelöste Substanzen (z. B. Einfachzucker, Fettsäuren) zerlegt. In der Versäuerungsphase (2. Stufe) wandeln spezialisierte Mikroorganismen diese Zwischenprodukte durch Stoffwechselprozesse in kurzkettige organische Fettsäuren (z. B. Buttersäure, Essigsäure) um. Im geringen Umfang kommt es auch zur Bildung anderer Stoffe, vor allem Wasserstoff (H_2), Kohlendioxid (CO_2) und Alkoholverbindungen. In der Phase der eigentlichen Essigsäurebildung entsteht aus den organischen Säuren und den Alkoholverbindungen Essigsäure, die im abschließenden Schritt (Methanbildung) in Methan (CH_4) umgewandelt

wird. Die hierauf spezialisierten Mikroorganismen reagieren aber empfindlich auf Störungen des Prozesses (z. B. starke Temperaturschwankungen) [67].

8.3 Biogassubstrate

Biogas kann aus den verschiedensten organischen Substanzen erzeugt werden. In Deutschland teilt man diese in drei verschiedene Gruppen ein:

- Nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) (inkl. Wirtschaftsdüngern)
- Kosubstrate
- Abfallstoffe (oder auch organische Reststoffe genannt)

Diese Substrate weisen dabei große Unterschiede bezüglich ihres Biogasertrags auf. Die in den Anhängen 8.1 bis 8.3 aufgeführten Gärsubstrate sind mit repräsentativen Gasausbeuten auf Basis von Gärversuchen im Labormaßstab ermittelt worden. Diese mittlerweile als „KTBL-Werte“ bekannten Größen sind anerkannte Grundlage von Wirtschaftlichkeitsberechnungen und werden auch von den meisten Banken und Versicherungen zur Kontrolle genutzt. Der Autor hat aber festgestellt, dass in der Praxis – insbesondere beim Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen – deutlich höhere Gaserträge (oft 15 %) erzielt werden können, was damit erklärt werden kann, dass die Dauer eines Laborbatchversuches (z. B. 28 Tage) in der Regel deutlich geringer ist als die tatsächliche Vergärungsdauer in einem Fermenter (z. B. oft länger als 60 Tage), sodass auch schwerer abbaubare Faserstoffe zum Teil noch umgewandelt werden können. Diesen Aspekt gilt es bei der kritischen Durchsicht von publizierten Leistungsvergleichen von Anlagenbaufirmen o. ä. zu beachten, denn oft wird Bezug genommen auf die korrespondierenden KTBL-Werte bzw. diese als Benchmark-Werte angegeben.

8.3.1 Nachwachsende Rohstoffe (NawaRo)

In Deutschland gehören per Definition zur Gruppe der Nachwachsenden Rohstoffe auch die sogenannten Wirtschaftsdünger aus der Nutztierhaltung, wie Rinder- und Schweinegülle, Rinderfestmist oder Geflügeltrockenkot (Anhang 8.1). Ferner zählen zu den NawaRo die zahlreichen Feldfrüchte, die als Korn oder Ganzpflanze (Silage) zur Biogaserzeugung angebaut werden (Anhang 8.2), wie Getreidekörner, Mais, Gras, Zuckerrüben, Ölsaaten (Raps, Sonnenblumen), Futter- und Zuckerrüben. Biogasanlagen in Deutschland, die mit diesen Rohstoffen arbeiten, bekommen bei Einhaltung einiger weiterer Randbedingungen einen zusätzlichen Bonus auf die erzeugte elektrische Energie. Diese Förderung hat dazu geführt, dass Biogasanlagen auf Basis von NawaRo in den letzten Jahren besonders im ländlichen Raum eine weite Verbreitung gefunden haben. In anderen Staaten, in denen nicht genug Flächen für die Erzeugung von Nahrung verfügbar sind, liegen die Schwerpunkte anders: Neben der Vergärung von Kosubstraten und Abfallstoffen stehen dort – insbesondere im ländlichen Raum – die Vergärung von Wirtschaftsdüngern im Vordergrund. So widmet sich zum Beispiel *Choi [2007]* der Frage, wie und mit welchen Verfahren man Schweinegülle effektiv vergären kann. *Kreuger et al. [2008]* berichten über Versuche mit der Vergärung von Hanfpflanzen, die in Schweden offenbar höhere Felderträge bringen als andere Energiepflanzen.

[67] *Bischofsberger et al. [2005]*, Anaerobtechnik, Kapitel 2 „Mikrobiologische Grundlagen“

8.3.2 Kosubstrate

Aufgrund ihres hohen Energiegehaltes und teilweise erheblicher Entsorgungserlöse werden auch gerne organische Reststoffe zur Biogaserzeugung (Anhang 8.3) eingesetzt, wobei die folgenden Kosubstrate in Deutschland besonders beliebt sind: Speisereste (z. B. aus Großküchen), Futtermittel-, Gemüse- und Marktabfälle, Reste der Gelatineproduktion (z. B. Separatorfett), Reste der Nahrungsmittelproduktion, Altbrot und Teigabfälle, Altfrittier- und Flotatfette, Bier- und Rebentrester, Schlempen aus der Schnapsherstellung, Glycerin sowie Schlachtabfälle. Neben diesen in Deutschland weit verbreiteten Substraten gibt es international eine Vielzahl von anderen Substraten, die zum Teil auf den ersten Blick exotisch wirken: *Ruiz-Fuertes et al. [2007]* berichten über Versuche mit Laborfermenter (36 l) zur Vergärung von überlagerten Orangen: Dabei wurden zerkleinerte Orangen in verschiedenen Verhältnissen mit Rindergülle gemischt und erfolgreich vergoren, ohne dass es zu Hemmeffekten gekommen ist. *Koike et al. [2007]* führten halbtechnische Vergärungsversuche (30 m^3) mit Meeresalgen durch, die an die Strände der japanischen Küste angeschwemmt wurden. Diese mischten sie mit organischen Reststoffen aus der Milchverarbeitung. Die Autoren kamen zu der Erkenntnis, dass in dieser Kombination eine stabile Biogasproduktion möglich ist. *Shang und Bischoff [2011]* führten Gärversuche mit Reststoffen aus der Verarbeitung von Ingwerwurzeln und Rote Beete durch; beide Rohstoffe gewinnen seit Jahren in der Obstsaft- und Erfrischungsgetränkeindustrie an Bedeutung. Obwohl Ingwer eine antibakterielle Wirkung zugeschrieben wird, konnte der Treber problemlos vergoren werden.

8.3.3 Abfallstoffe und Klärschlamm

Auch Abfallstoffe, die einen Anteil an Restorganik besitzen, können für die Erzeugung von Biogas herangezogen werden, wie z. B.:

- Hausmüllabfälle
- Klärschlamm

Derartige Abfall- und Reststoffe werden in Deutschland aber praktisch ausschließlich auf dafür spezialisierten Anlagen behandelt, wie z. B. Mechanisch-Biologische Abfallanlagen (MBA) oder Kläranlagen mit einer anaeroben Schlammstabilisierung. Die *ASA [2010]* weist in ihrem Bericht für 2010/2011 in Deutschland insgesamt 48 mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen mit einer Gesamtkapazität von etwa 5,9 Mio. Mg/a auf. Hiervon werden 11 MBA als Vergärungsanlagen oder als kombinierte Vergärungs-/Kompostierungsanlagen aufgeführt mit einer Kapazität von ca. 1,2 Mio. Mg/a. Einen Überblick über die mechanisch-biologische Abfallbehandlung gibt *ATV [2002]*. Ferner gibt es eine Vielzahl weiterer organischer Substanzen, die für die Erzeugung von Biogas verwendet werden können: Im Prinzip sind alle Stoffe geeignet, die in weniger als 80 bis 100 Tagen organisch abbaubar sind und keine Gift-, Schad- oder Hemmstoffe enthalten. Eine beispielhafte Einordnung unterschiedlicher Kosubstrate nach ihrem Gefahrenpotenzial gibt *StMUGV [2004]* und *BayLfU [2004]*. Eine Kurzübersicht über den Status Quo und die Entwicklungspotenziale der mechanischen-biologischen Abfallbehandlung geben *Fricke et al. [2007]* und *Turk [2009]*.

Nichtsdestotrotz werden international seit einigen Jahren auch Versuche durchgeführt, um schwer abbaubare Stoffe anaerob zu behandeln: *Li et al. [2007]* berichten über Experimente mit einer zweistufigen Laboranlage zur anaeroben Behandlung von Abwässern aus der Pharmaindustrie, wobei der pH-Wert im Reaktor konstant gehalten wurde; das Abwasser

wurde mittels Gaschromatografie analysiert. Die Autoren stellten fest, dass die Essigsäurebildner in der ersten Stufe auch die langkettigen Moleküle zu kurzkettigen Verbindungen umwandelten, die dann wiederum im Methanreaktor in Biogas umgewandelt werden konnten. Durch diese Form der Vorbehandlung konnten die Verschmutzung der pharmazeutischen Abwässer offenbar reduziert werden. Auch *Zupančič und Gotvajn [2007]* berichten über Versuche mit einem Laborreaktor (30 l) zur anaeroben Behandlung von pharmazeutischen Abfällen unter Zuhilfenahme von Schweinegülle und Pflanzensilagen. Die Autoren beobachteten bei einer Raumbelastung von 1,8 kg CSB/(m^3·d) einen CSB-Abbaugrad von 79 %, wobei der Prozess bei mehr als 2 kg CSB/(m^3·d) instabil wurde und innerhalb von 20 Tagen zum Erliegen kam.

8.4 Vorteile von Biogas

Die Nutzung von Biogas bietet einige Vorteile, wie z. B.:

- Aus Biogas gewonnene Energie schont die fossilen Rohstoffreserven und schützt das Klima durch die Reduzierung von Treibhausgasen. D. h. es wird nur das Kohlenstoffdioxid freigesetzt, das zuvor in den Pflanzen etc. gebunden wurde. Methan ist darüber hinaus deutlich klimaschädlicher als CO_2. Ein erheblicher Anteil der unkontrollierten weltweiten Methanemissionen stammt aus der Landwirtschaft (z. B. aus der Viehzucht). D. h. durch anaerobe Nutzung der Wirtschaftsdünger kann das Methanpotenzial effektiv genutzt und zugleich der Ausstoß dieses Treibhausgases verringert werden.
- Da die in den Eingangsstoffen enthaltenen Nährstoffe wie Kali, Stickstoff und Phosphor im Gärrest zurückbleiben, kann dieser als effektiver Dünger wieder auf die Felder gebracht werden, sodass auch der Nährstoffkreislauf weitgehend geschlossen wird.
- Biogas fällt kontinuierlich an, sodass es auch kontinuierlich verstromt werden kann und damit grundlastfähig ist. Im gewissen Umfang kann Biogas in Niederdruckspeichern auch kostengünstig gespeichert werden, sodass im geringen Umfang auch die Spitzenstromproduktion möglich erscheint (z. B. *Loewen et al. [2011]*). Damit sind Biogasanlagen eine ideale Ergänzung zu anderen Formen Erneuerbarer Energie, die weder grundlast- noch spitzenlastfähig sind, wie Windenergie oder Photovoltaik. Durch Nutzung moderner Telekommunikation- und Automationstechnik ist es daher vielversprechend und auch möglich, mehrere Biogasanlagen (und andere Anlagen zur Erzeugung Erneuerbarer Energie) mit einander zu virtuellen Kraftwerken zu verknüpfen; ein erster Schritt für eine Alternative zu Großkraftwerken. Ein Beispiel hierfür stellt das „Regenerative Kombikraftwerk“ dar, ein Projekt der Firmen Enercon GmbH, Schmack Biogas AG und SolarWorld AG. Zwischen 2006 und 2007 wurden hierbei 20 Solaranlagen, 11 Windenergie- und vier Biogasanlagen und ein Pumpspeicherkraftwerk vernetzt (*Mackensen et al. [2008]*).
- Wegen der Energieeffizienz moderner Blockheizkraftwerke gewinnt die dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung im ländlichen Raum an Bedeutung. Ein Beispiel hierfür ist das Bioenergiedorf Jühnde-Barlissen in Niedersachsen, das sich durch Nutzung ihres örtlichen Biomassepotenzials bzw. den Bau einer Biogasanlage, einer Biomassefeuerung sowie eines Nahwärmenetzes zu einem energieautarken Dorf entwickelte (*FNR [2008A]*).
- „Vom Landwirt zum Energiewirt“ (Slogan der Grünen Woche 2005, Berlin): Dieser Trend wird noch dadurch begünstigt, dass sich Landwirte zunehmend ein zweites Standbein

aufbauen, indem sie ihre Biomasse zur Energieerzeugung nutzen, Dachflächen von Ställen mit Solarzellen nachrüsten o. ä.

- Es besteht noch ein hohes Potenzial in Deutschland und weltweit (siehe Abschnitt 8.6).
- Biogas aus Reststoffen ist mit Erzeugungskosten ab 8 ct/kWh$_{el}$ bereits heute recht nahe an den Gestehungskosten von Energie aus fossilen Energieträger. Dies gilt besonders dann, wenn die Wärme auch genutzt werden kann.

Das ausgegorene Gärsubstrat, auch Biogasgülle genannt, besitzt gegenüber herkömmlicher Gülle einige Vorteile, wie z. B.:

- Stabilisierung des pH-Wertes im neutralen Bereich und damit Verminderung der pflanzenschädigenden Ätzwirkung der Gülle oder anderer organischer Reststoffe
- Umwandlung des organischen Stickstoffs in das für Pflanzen leichter nutzbare Ammonium
- Verringerung flüchtiger, geruchsintensiver Stoffe: Diese geruchsintensiven Stoffe (z. B. Buttersäure) sind energiereich und werden im Anaerobprozess in Biogas umgewandelt.
- Durch den Abbau der Organik kommt es zu einer Volumen- und Massenreduzierung und einer Verbesserung der Fließeigenschaften.

Lens et al. [2004] bezeichnen daher die Nutzung von Biogas als einen integrierten und effektiven Kreislauf von Ressourcennutzung, Behandlung organischer Reststoffe, Nährstoffnutzung/-rückgewinnung und Erzeugung Erneuerbarer Energie. Eine Bewertung der Biogasanlagen im Hinblick auf den Klimaschutz erstellte *Rauh [2010]* anhand von Ökobilanzen, wobei der Einsatz von Reststoffen positiver bewertet wird als die Nutzung von Energiepflanzen.

8.5 Nachteile von Biogas

Einige Kritiker der Biogastechnik führen im Zusammenhang mit Biogas auch Nachteile auf, die aber zum Teil unbegründet sind und/oder mit dem aktuellen Stand der Technik im Biogassektor gelöst werden können, wie zum Beispiel:

- Geruch und Lärm: Viele Bürgerinnen und Bürger haben im Zusammenhang mit Biogasanlagen Angst vor Geruch und Lärm. Wie jeder andere Gewerbe- und Industriebetrieb, verursacht auch eine Biogasanlage Emissionen. Es gibt aber heute genügend Möglichkeiten, diese Emissionen auf ein Minimum zu reduzieren (z. B. gasdichte Gärrestlagerabdeckung). Dies geschieht auch aus Eigennutz, denn jeder Kubikmeter Biogas der entweicht, bedeutet einen wirtschaftlichen Verlust für den Anlagenbetreiber, denn dieses Biogas kann nicht mehr energetisch genutzt werden, hat aber zuvor einen finanziellen Aufwand verursacht (z. B. Substratkosten, Betriebskosten der Biogasanlage). Wichtige Maschinen können zudem eingehaust und schallisoliert werden (z. B. Gasmotor).
- Essen oder Tanken: Biodiesel, Bioethanol und Biogas wird oft vorgeworfen, dass durch deren Anbau nicht mehr genug landwirtschaftliche Fläche zur Verfügung stehen würde, um ausreichend Essen herzustellen bzw. dadurch den weltweiten Hunger zu verstärken. Dies ist insofern falsch, weil wir bereits heute eine weltweite Überproduktion an Lebensmitteln haben. Dies wird alleine schon daran deutlich, dass wir uns in Deutschland den zweifelhaften Luxus erlauben, jedes Jahr 15 Millionen Tonnen an Lebensmittel auf den Müll zu werfen (*Zeit online [2011]*). Für den Anbau, die Ernte, den Transport zu den Supermärkten bzw. die Entsorgung dieser weggeworfenen Lebensmittel werden zudem gewaltige Mengen an Energie (z. B. Kraftstoff) und Düngemittel verschwendet! In Zeiten ruinöser

Agrarpreise (z. B. Milch) und Überkapazitäten am Lebensmittelmarkt sorgt die Flächennutzung zu energetischen Zwecken daher für eine Preisstabilisierung in der Landwirtschaft.

- Verkehrsanstieg: Oft wird behauptet, dass durch Biogasanlagen das Verkehrsaufkommen stark ansteigen würde. Richtig ist, dass Biogasanlagen eine gewisse Logistik erfordern, um die Biomasse zur Anlage zu transportieren und die Gärprodukte anschließend auf die Felder auszubringen. Beim Einsatz von Wirtschaftsdüngern auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen gibt es jedoch in der Regel keinen zusätzlichen Verkehr, da auch vorher die Rohgülle auf die Felder ausgebracht werden musste. Für die restlichen Substrate muss tatsächlich eine Anlieferung erfolgen, jedoch ist das daraus resultierende Verkehrsaufkommen mit der klassischen Landwirtschaft vergleichbar, denn die Anbauflächen würden auch ohne die Biogasanlage bewirtschaftet werden. Durch die Nutzung verschiedener Substrate (Gras, Grünroggen, Mais), die zu unterschiedlichen Zeiten geerntet werden, kann zudem das Verkehrsaufkommen entzerrt werden.

8.6 Potenzial zur Biogaserzeugung

Es gibt zahlreiche Studien, die sich mit der Abschätzung des nationalen und internationalen Biogaspotenzials beschäftigen. Nachfolgend werden nur auszugsweise einzelne dieser Studie aufgeführt, um das gewaltige Potenzial darzustellen:

Der *Fachverband Biogas [2005]* beziffert in einer Studie (Tabelle 8.1) das theoretische Biogaspotenzial in Deutschland mit damals 418 PJ/a. Für 2020 errechnete der Fachverband Biogas ein Biogaspotenzial von bis zu 752 PJ/a. Der prognostizierte Anstieg wird u. a. darauf zurückgeführt, dass seit einigen Jahren von Saatgutherstellern spezielle Getreidesorten entwickelt werden, welche einen möglichst hohen Gasertrag aufweisen. Der Stand der Biogasnutzung in 2005 entsprach damals erst 3,7 % des theoretischen Potenzials in Deutschland. D. h. trotz des Baubooms der letzten Jahre dürfte der Markt noch lange nicht ausgeschöpft sein. Bis 2020 wurde daher prognostiziert, dass die in Deutschland installierte elektrische Leistung bei mindestens 9.500 MW liegen dürfte.

Tab. 8.1: Biogaspotenzialabschätzung in Deutschland (nach *Fachverband Biogas [2005]*)

Biogaspotenzial aus	Ist-Annahmen	Prognose 2020
Wirtschaftsdüngern	96,5 PJ/a	96,5 PJ/a
Energiepflanzen	236,0 PJ/a	570,0 PJ/a
Ernterückstände	13,7 PJ/a	13,7 PJ/a
Landschaftspflegematerial	12,0 PJ/a	12,0 PJ/a
Abfälle aus Industrie und Gewerbe	9,3 PJ/a	9,3 PJ/a
Abwasser	19,5 PJ/a	19,5 PJ/a
Deponien	18,0 PJ/a	18,0 PJ/a
Organische Siedlungsabfälle	12,5 PJ/a	12,5 PJ/a
Summe	**417,5 PJ/a**	**751,5 PJ/a**

Tab. 8.2: Zusammenfassung der Abschätzungen für das Biogaspotenzial in Deutschland (nach *IFEU [2006]*)

Biogaspotenzial aus	Abschätzung
Wirtschaftsdünger und Ernterückstände	113,8 PJ/a
Energiepflanzen	86,4 PJ/a
Industrielle Reststoffe	13,6 PJ/a
Kommunale Reststoffe	46,3 PJ/a
Summe	**260,0 PJ/a**

In der von der Fachagentur Nachwachsenden Rohstoffe e.V. bzw. dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz in Auftrag gegebenen Studie „Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz“ (*IFEU [2006]*) wurde ebenfalls versucht, das Biogaspotenzial in Deutschland abzuschätzen. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 8.2 zusammengefasst. Das in dieser Studie ermittelte Biogaspotenzial liegt mit 62 % deutlich unterhalb des von dem *Fachverband Biogas [2005]* abgeschätzten Biogaspotenzials (260 PJ/a vs. 418 PJ/a). Der größte Unterschied besteht darin, dass das Potenzial infolge Energiepflanzenanbau deutlich niedriger angesetzt wurde (86 PJ/a vs. 236 PJ/a).

Es gibt auch zahlreiche Studien zum aktuellen Stand bzw. zur Potenzialabschätzung des internationalen Biogaspotenzials, wie z. B.:

- Nach *Eder und Schulz [2006]* beträgt das technische Potenzial für Biogas in China ca. 145 Mrd. m^3 pro Jahr. Das hiervon noch nicht genutzte Potenzial soll ca. 97,5 % betragen. Dies entspricht 792 Mrd. kWh bzw. 2.851 PJ/a. Nach *Raninger et al. [2011]* sollen in China bis 2020 30 GW elektrische Leistung aus Biogasanlagen ans Netz gehen, wobei 2009 erst 42 MW_{el} am Netz waren. Hierbei ist aber anzumerken, dass ein Großteil der derzeitigen chinesischen Biogasanlagen das Biogas nur zur Wärmeerzeugung nutzt.
- In Dänemark waren 2009 nach *Grobrügge [2011]* die folgenden Anlagen in Betrieb: 76 landwirtschaftliche Biogasanlagen, 5 Kofermente-Biogasanlagen, 61 anaerob-stabilisierende Kläranlagen und 25 Deponiegasverstromungsanlagen. Diese 167 Biogasanlagen produzierten zusammen 1.165 GWh/a bzw. 4,2 PJ/a. Das Ziel für 2020 wird mit 4.325 GWh/a angegeben, was 11,4 % des Gesamtpotenzials entspricht. *Murton et al. [2007]* beschreiben ebenfalls die Entwicklung und Potenziale in Dänemark.
- Nach *Grobrügge [2011]* waren 2009 in Frankreich ca. 274 Anaerobanlagen im Einsatz, wovon 34 landwirtschaftliche Biogasanlagen waren, 25 Kofermente-Biogasanlagen, 162 anaerobe kommunale und industrielle Kläranlagen, 7 Bioabfallanlagen und 71 Deponiegasverstromungsanlagen. Die hierdurch erzeugte Energie betrug 3.300 GWh/a. Das Ziel für 2020 wird mit 12.023 GWh/a angegeben, was 3 % des Gesamtpotenzials entspricht.
- *Herter [2011]* beziffert das Gesamtenergiepotenzial für Biogas in Großbritannien auf 30.000 GWh/a.
- *Schweinfurth und Nasution [2011]* beziffern das Biogaspotenzial für Indonesien, das alleine aus einer Vergärung der energiereichen Abwässer der etwa 470 Palmölmühlen resultiert, auf fast eine Milliarde Kubikmeter Methan pro Jahr.

- Die Situation in Italien kann nach *Grobrügge [2011]* wie folgt beschrieben werden: ca. 300 landwirtschaftliche Biogasanlagen, 14 Bioabfallanlagen, 152 anaerobe Kläranlagen für kommunales und industrielles Abwasser und 141 Deponiegasverstromungsanlagen, die zusammen 5.360 GWh/a produzieren. Das Ziel für 2020 wird mit 9.484 GWh/a angegeben, was 13,1 % des Gesamtpotenzials entspricht.
- Selbst für Afrika wird ein hohes Biogaspotenzial abgeschätzt: So ermittelten *Schmidt et al. [2010]* für Kenia ein Potenzial für die Biogasproduktion aus organischen Reststoffen in Höhe von 80 MW_{el} bzw. 6.360 GWh/a) oder 8 % des Strombedarfs.
- Nach *Grobrügge [2011]* waren 2009 in Österreich ca. 600 Anaerobanlagen im Einsatz, wovon 350 landwirtschaftliche Biogasanlagen waren, 25 Kofermente-Biogasanlagen, 134 anaerob-stabilisierende Kläranlagen, 30 Biomüll-Anlagen und 62 Deponiegasverstromungsanlagen. Die hierdurch erzeugte Energie betrug 1.870 GWh/a. Das Gesamtpotenzial wird mit knapp 40.000 GWh/a angegeben.
- Nach *Haider [2009]* befanden sich in Polen 2011 fünf landwirtschaftliche Biogasanlagen zwischen 330 kW_{el} und 2 MW_{el} in Betrieb sowie 151 Klärgas- und Deponiegasanlagen. Das theoretische Potenzial für Biogasanlagen wird aufgrund der hohen landwirtschaftlichen Nutzfläche mit 20,2 GW angegeben, sodass das Langfristziel 2020 mit 2.000 Biogasanlagen nicht unrealistisch erscheint.
- *Kalyuzhnyi [2008]* erstellt eine Schätzung für das Biogaspotenzial in Russland: Demnach beträgt das Aufkommen aus landwirtschaftlichen Abfällen und Düngern 62,5 Mrd. m^3 Biogas pro Jahr. Weiteres Potenzial sieht der Autor im Bereich der kommunalen Abfälle (2,1 Mrd. m^3/a), der anaeroben Klärschlammbehandlung (0,6 Mrd. m^3/a) und der Deponiegasnutzung (ca. 1 Mrd. m^3/a).
- Die Situation in Schweden kann nach *Grobrügge [2011]* wie folgt beschrieben werden: 8 landwirtschaftliche Biogasanlagen, 17 Kofermente-Biogasanlagen, 144 anaerob-stabilisierende Kläranlagen und 58 Deponiegasverstromungsanlagen, die zusammen 1.359 GWh/a produzieren. Das Gesamtpotenzial wird mit über 100.000 GWh/a angegeben. *Murton et al. [2007]* beschreiben ebenfalls die Entwicklung und Potenziale in Schweden.
- In der Schweiz existieren nach *Grobrügge [2011]* die folgenden Anaerobanlagen: 86 landwirtschaftliche Biogasanlagen, 23 Bioabfallanlagen und 481 anaerobe kommunale und industrielle Kläranlagen, die zusammen 737 GWh/a produzieren.
- *Chen et al. [2007]* ermittelten das Biogaspotenzial für Taiwan mit 700 GWh/a, wobei sie sich ausschließlich auf Siedlungsabfälle konzentrierten.
- In der Tschechischen Republik waren 2009 nach *Grobrügge [2011]* die folgenden Anlagen in Betrieb: 138 landwirtschaftliche Biogasanlagen, 57 anaerob-stabilisierende Kläranlagen, 8 Bioabfallbehandlungsanlagen und 57 Deponiegasverstromungsanlagen. Diese 264 Biogasanlagen produzierten zusammen 1.510 GWh/a. Das Ziel für 2020 wird mit 5.282 GWh/a angegeben, was 14,2 % des Gesamtpotenzials entspricht.
- Nach *Kovacs und Fuchsz [2011]* betrug in Ungarn die installierte Leistung der Biogasanlagen Ende 2010 etwa 18 MW_{el}. Der ungarische Aktionsplan sieht bis 2020 einen Anstieg auf 100 MW_{el} bzw. 636 GWh/a vor, was jedoch nur einem kleinen Teil des Potenzials entspricht: Aufgrund der Tatsache, dass die Bevölkerungszahlen von Ungarn und der Tschechischen Republik in etwa vergleichbar sind, aber die landwirtschaftliche Fläche von

Ungarn ein Drittel größer ist, wird abgeschätzt, dass Potenzial Ungarn mindestens mit dem der Tschechischen Republik vergleichbar ist.

Diese Daten verdeutlichen nicht nur das große Potenzial für Biogas, sondern zeigen auch, dass in vielen Staaten das Biogaspotenzial trotz der zahlreichen Biogasanlagen, die im Boom der letzten Jahre gebaut wurden, noch bei Weitem nicht ausgeschöpft wird.

8.7 Milieu- und Prozessbedingungen

Der Biogasprozess ist ein komplexer biologischer Prozess, der nur dann effizient und stabil ablaufen kann, wenn zahlreiche Milieu- und Prozessbedingungen möglichst stabil eingehalten werden, da die für die Biogasproduktion verantwortlichen Mikroorganismen oft sensibel auf größere Prozess- und Milieuschwankungen reagieren. Details des Prozesses können u. a. *ATV [2002]*, *Bischofsberger et al. [2005]* [68], *Eder und Schulz [2006]*, *IWA [2002], Kaltschmitt und Hartmann [2001]* [69] und *van Eekert [2011A,B]* entnommen werden, an denen sich auch die nachfolgenden Abschnitte anlehnen.

8.7.1 Anaerobe Bedingungen

Der Anaerobprozess kann nur stattfinden, wenn kein gelöster oder chemisch gebundener Sauerstoff (z. B. Nitrat) im Fermenter vorhanden ist, da bei der Zugabe von Sauerstoff die methanogenen Bakterien (obligat anaerobe Mikroorganismen) in ihrem Stoffwechsel behindert werden.

8.7.2 Mindestfeuchtegehalt

Nach *Eder und Schulz [2006]* benötigen Methanbakterien Gärsubstrate mit einen Mindestfeuchtegehalt von 50 %, um arbeiten und sich vermehren können; d. h. in einer festen Phase können die Methanbildner nicht überleben. Dies ist auch einer der Gründe dafür, warum der Begriff „Trockenfermentation“ missverständlich ist, denn auch hier muss mittels Perkulation o. ä. ein Mindestfeuchtegehalt im Feststoff sichergestellt werden.

8.7.3 Substratzufuhr

Die Nahrung der Bakterien sind die in der Biomasse vorhandenen organischen Stoffe, deren Zusammensetzung meist nicht oder nur begrenzt kontrollierbar ist. Die Konsistenz (z. B. Substratart, Anmischung, Häcksellänge) der Biomasse und die Häufigkeit, mit der die Bakterien mit Substraten versorgt werden, können aber kontrolliert werden. Biologische Verfahren funktionieren bei einer regelmäßigen Substratzufuhr am besten. Sowohl Laborversuche als auch zahlreiche Praxisergebnisse zeigen, dass die Zufuhr der Biomasse kontinuierlich oder quasi-kontinuierlich (z. B. einmal pro Stunde) erfolgen sollte (z. B. *Eder und Schulz [2006]*).

8.7.4 Kontakt zwischen Biomasse und Bakterienmasse

Der Abbau der organischen Stoffe benötigt einen intensiven Kontakt der zugeführten Biomasse mit den Bakterien. Daher kommen in vielen Anaerobreaktoren auch Rührwerke zum Einsatz, um einerseits eine möglichst vollständige Durchmischung des Reaktorinhalts zu erzielen und andererseits Schwimm- und Sinkschichten zu vermeiden (*Bischofsberger et al.*

---

[68] *Bischofsberger et al. [2005],* Kapitel 3 „Einflussfaktoren auf die anaeroben biologischen Abbauvorgänge“
[69] *Kaltschmitt und Hartmann [2001],* Kapitel 15 „Biogaserzeugung und –nutzung“

[2005]). Um die spezifische Oberfläche und damit die Angriffsfläche für die Mikroorganismen zu verbessern, empfiehlt es sich, die (pflanzlichen) Eingangsstoffe möglichst weit zu zerkleinern; idealerweise geschieht dies bereits bei der Ernte. D. h. eine weitgehende Substratzerkleinerung hat einen positiven Einfluss auf die Ausbeute und die Abbaugeschwindigkeit. Eine Häcksellänge von 4 bis 8 mm hat sich dabei in der Praxis als günstig erwiesen und wird daher von manchen Anlagenbaufirmen sogar in den Gewährleistungsbedingungen vorgegeben. Auf der anderen Seite reagieren anaerobe Mikroorganismen empfindlich auf hohe Scherkräfte, die durch im Reaktor befindliche Rührwerke zwangsläufig erzeugt werden, u.a. weil sie zur Bildung von Kolonien tendieren, die hierdurch zerstört werden können. Hieraus resultiert, dass der Energieeintrag zwar ausreichend hoch sein sollte, um die oben genannten Ziele zu erreichen, aber auch nicht viel höher, da durch jede weitere eingetragene Energie die Scherkräfte ansteigen und die Gasbildungsrate potenziell absinkt (z. B. *Eder und Schulz [2006]*).

8.7.5 Verweildauer

Im Vergleich zu den säurebildenden Organismen (< 4 Tage) weisen die Methanbakterien lange Generationszeiten auf (> 5 bis 15 Tage) (*Seyfried und Saake [1986]*). Die Dauer des Vergärungsprozesses wird somit auch durch die lange Generationszeit der Methanbakterien bestimmt. Ohne Rückhaltung im oder Rückführung der Bakterien in den Reaktionsraum beträgt die Verweildauer meist deutlich mehr als 20 Tage, um eine Anreicherung der Bakterienpopulation zu gewährleisten. Da mit dem abgearbeiteten Substrat immer ein Teil der Bakterien ausgetragen wird, hat eine Unterschreitung der Verweildauer eine Minimierung der Bakterienkonzentration zur Folge. In dessen Konsequenz würde es zum Erliegen des Prozesses kommen. Die hydraulische Verweildauer ist daher auch eine der wichtigsten Prozessgrößen für den Anaerobprozess, da er u. a. den Abbaugrad der organischen Substanz bestimmt (z. B. *Eder und Schulz [2006]*). Weiterhin gilt es zu beachten, dass auch einzelne Substrate langsamer abbaubar sind und daher ebenfalls hohe hydraulische Verweildauer erforderlich machen.

8.7.6 Temperatur

Grundsätzlich werden chemische und biochemische Reaktion von der Temperatur beeinflusst. Anaerobe Prozesse finden zwar bei allen Temperaturen zwischen 0 und 70 °C statt, jedoch mit unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten (*Bischofsberger et al. [2005])*. Zwar findet auch bei niederen Temperaturen der Anaerobprozess statt, jedoch wird die optimale Reaktionsgeschwindigkeit nur in einem engen Temperaturbereich erzielt. Allgemein unterscheidet man bei der Methanbildung die relevanten Bakteriengruppen in mesophile und thermophile Organismen. In der Praxis werden meist die Temperaturbereiche 34 - 41 °C (mesophil) bzw. 52 - 55 °C (thermophil) verwendet. Die Reaktionsgeschwindigkeit im thermophilen Bereich ist im Vergleich zu dem mesophilen Bereich höher, jedoch reagieren die beteiligten Bakterien auf Temperaturschwankungen empfindlicher. Eine Übersicht über diese Zusammenhänge gibt Tabelle 8.3; welche aus einem Nomogramm aus *IWA [2002]* erstellt wurde. Es ist daher für die Stabilität des Biogasprozesses wichtig, dass möglichst keine extremen Temperaturschwankungen vorkommen.

Tab. 8.3: Umsatzraten von Methanbakterienstämmen in Abhängigkeit der Temperatur (nach *IWA [2002]*)

°C	0	5	10	15	20	25	30	32,5	35	37,5	39	40	42,5	45	47,5
%	0	3	6	11	20	35	56	69	83	94	100	100	93	63	0

8.7.7 pH-Wert

Der optimale Bereich des pH-Wertes für den Biogasprozess und somit für die Aktivität der methanbildenden Bakterien liegt zwischen 7 und 8. Der pH-Wert im Biogasbehälter hängt dabei vom Verhältnis zwischen den flüchtigen Säuren, der Säurekapazität und dem Kohlenstoffdioxid im Biogas ab. Der pH-Wert ist somit eine wichtige Größe zur Beschreibung der Stabilität des Anaerobprozesses. Abweichungen von vorgegebenen bzw. üblichen Werten sind oft ein Frühindikator für einen suboptimalen Betrieb bzw. bevorstehende Prozessstörungen (z. B. Überfütterung bzw. Beschickung mit falschen Substraten) (*Bischofsberger et al. [2005]*, *Kaltschmitt und Hartmann [2001]*).

8.7.8 Säurekapazität

Die Säurekapazität als Puffer gegen pH-Wert-Verschiebungen ist eine wichtige Größe zur Beschreibung der Prozessstabilität. D. h. ist die Säurekapazität aufgebraucht, droht eine schnelle pH-Wert-Änderung, was wiederum bis zum vollständigen Zusammenbruch des Anaerobprozesses führen kann (*Bischofsberger et al. [2005]*).

8.7.9 Redox-Potenzial

Das Redox-Potenzial ist eine wichtige Größe zur Beschreibung der Stabilität des Anaerobprozesses. Abweichungen von vorgegebenen bzw. üblichen Werten sind oft ein Indiz für einen suboptimalen Betrieb bzw. Störungen. Die Biogasproduktion läuft effektiv nur im anaeroben Milieu ab, d. h. das Redox-Potenzial muss kleiner sein als -330 mV. Um niedrige Redox-Potenziale zu erreichen, sollten dem Prozess möglichst wenig Oxidationsmittel zugeführt werden (z. B. Sauerstoff, Sulfate, Nitrate) (*Kaltschmitt und Hartmann [2001]).*

8.7.10 Feststoffgehalt, Trockensubstanz und Viskosität

Zu hohe TS-Konzentrationen im Reaktionsraum können sich ungünstig auf den Betrieb auswirken: Zum einen wird es durch die hohe Viskosität schwieriger, die Transport- und Diffusionslimitierung zu überwinden, andererseits begünstigen sie die Bildung von Schwimmschichten. Ferner lässt sich der Fermenterinhalt mit zunehmenden TS-Konzentrationen immer weniger gut durchmischen, sodass die hydraulischen Probleme im Reaktor schwieriger zu beherrschen sind. Als Folge einer unzureichenden Durchmischung kann es somit auch zu Ablagerungen kommen, die nicht nur das effektive Reaktionsvolumen reduzieren, sondern auch andere Einbauten (z. B. Heizungen) in ihrer Funktion beeinträchtigen können (*Bischofsberger et al. [2005]*, *Kaltschmitt und Hartmann [2001]).* Einzelne Autoren (z. B. *Langhans [2012]*) verweisen auch auf die Bedeutung der Viskosität auf das Ausgasungsverhalten, die richtige Wahl der Rührwerke und den Wärme- und Stoffstromübergang; dies gilt besonders bei Trockenvergärungsanlagen mit hohen TS-Konzentrationen.

8.7.11 Faulraumbelastung

Die Faulraumbelastung, die man nach verschiedenen Kenngrößen (z. B. der oTS-Raumbelastung in Kg oTS/($m^3 \cdot d$) (oft auch als oTM) oder der CSB-Raumbelastung in Kg CSB/($m^3 \cdot d$)) bestimmen kann, ist eine weitere wichtige Prozessgröße für den Anaerobprozess, da dieser die Belastung der Reaktoren mit organischer Masse angibt und damit ein gutes Signal dafür liefert, wenn die Gefahr einer Überlastung der Biogasanlage besteht. So zeigt die Praxis, dass viele Biogasanlagen stabil in einem Bereich zwischen 2 bis 3 Kg oTS/($m^3 \cdot d$) betrieben werden können. Belastungen unter 1 Kg oTS/($m^3 \cdot d$) gelten nach *Kaltschmitt und Hartmann [2001]* als unproblematisch, während bei hohen Faulraumbelastungen (z. B. 4 und 5 Kg oTS/($m^3 \cdot d$)) die Leistung der Bakterien und damit einhergehend die Gasproduktion absinkt (*Linke und Mähnert [2005]*). Pfropfenstromfermenter werden hingegen oftmals mit Raumbelastungen von über 5 Kg oTS/($m^3 \cdot d$) betrieben, jedoch sind hier vielfach niedrig-belastete Rührkesselreaktoren nachgeschaltet. Die Angabe der Faulraumbelastung in Kg CSB/($m^3 \cdot d$) ist in der anaeroben Abwasserbehandlung weit verbreitet: Eine Übersicht über die Grenzen der CSB-Raumbelastung verschiedener Behandlungsverfahren bzw. Reaktoren gibt *Kaltschmitt und Hartmann [2001]*.

8.7.12 Nähr- und Spurenstoffe

Wie alle Lebewesen benötigen auch die Mikroorganismen, die am Biogasprozess beteiligt sind, zum Zellaufbau und Stoffwechsel die essentiellen Grundelemente Kohlenstoff und Stickstoff. Der verbleibende Rest verteilt sich auf die Elemente Sauerstoff, Wasserstoff, Phosphor, Schwefel, Calcium, Magnesium, Natrium, Eisen, Zink, Kobalt, Nickel und Kalium. Alle diese Elemente müssen in einem richtigen Verhältnis der Zelle zur Verfügung stehen. Durch Elementaranalysen der beteiligten Bakterien lässt sich das optimale Verhältnis der Elemente bestimmen. Bei Substraten wie Gülle oder organischen Reststoffen beschränkt sich diese Analyse in der Regel jedoch auf die Bestimmung des Kohlenstoff/Stickstoff (C:N) – Verhältnisses, da in diesen Substraten die übrigen Elemente in ausreichender Menge vorliegen. Befindet sich zu wenig Stickstoff im Substrat, so kann der Kohlenstoff nicht vollständig verwertet werden. Bei einem Überschuss an Stickstoff kommt es zur Bildung von Ammoniak respektive Ammonium. Mikroorganismen benötigen (10) 15 bis 30 Mal mehr Kohlenstoff als Stickstoff, wobei in der Literatur als „ideal“ ein C:N-Verhältnis von 30 angenommen wird. Das C:N-Verhältnis der einzelnen Substrate schwankt sehr stark, sodass eine länger andauernde Dosierung von größeren Mengen an Substraten mit einem ungünstigen C:N-Verhältnis zu ungünstigen Prozessbedingungen führen kann. Defizite bei wichtigen Spurenstoffen wie Eisen (Fe), Nickel (Ni), Cobald (Co) und Molybdän (Mo) machen sich ähnlich wie ein Nährstoffmangel oder -überschuss in Form von ungünstigen Betriebsbedingungen oder einer geringen Gasbildungsrate bemerkbar (*Bischofsberger et al. [2005]*, *Kaltschmitt und Hartmann [2001]).* In den letzten Jahren wurden zahlreiche Untersuchungen zum Einfluss von Spuren und Nährstoffen auf den Anaerobprozess durchgeführt, nicht zuletzt, weil es bei Monovergärungsanlagen des Öfteren zu Mangelerscheinungen gekommen ist. Weitergehende Informationen können unter anderem *Hinken et al. [2008]* und *Lebuhn et al. [2008]* entnommen werden; letztere identifzierten vor allem Cobald, Molybdän und Selen als wichtige Spurenstoffe.

8.7.13 Ammonium und Ammoniak

Durch den Abbau von stickstoffhaltigen Eiweißen, deren Grundbestandteil Aminosäuren sind, kommt es zur Bildung von Ammoniak (NH_3) beziehungsweise Ammonium (NH_4^+). Dabei bildet das im Substrat enthaltene Wasser ein von Temperatur und pH-Wert abhängiges Gleichgewicht mit dem Ammoniak. Es ist aus diversen Untersuchungen bekannt, dass der anaerobe Abbauprozess durch die toxische Wirkung hoher Ammonium- bzw. Ammoniak- Konzentrationen gehemmt oder gar vollständig zum Erliegen kommen kann. Der Grenzwert für die Hemmwirkung ist dabei sowohl vom pH-Wert als auch von der Temperatur abhängig, wobei mit zunehmendem pH-Wert bzw. zunehmender Temperatur der Grenzwert immer niedriger wird, was vor allem an einer Verschiebung des NH_4 /NH_3 -Gleichgewichtes bzw. der toxischen Wirkung des Ammoniaks zusammenhängt (*Bischofsberger et al. [2005]*). Folglich muss auf eine ausgewogene Zufuhr von stickstoffhaltigen Nährstoffen geachtet werden. Dies ist einer der Gründe, warum in regelmäßigen Abständen der Biogasanlagen-Betreiber den pH-Wert und die Ammonium-Konzentration ermitteln sollte (*Bischofsberger et al. [2005]* bzw. *ATV [2002]*).

8.7.14 Fettsäuren

Im Verlauf der Methanbildung werden u. a. kurzkettige Fettsäuren (C_1-C_6) freigesetzt und dienen den Bakterien der nachfolgenden Phasen als Nährstoff. Hierbei nimmt die Propionsäure (C_3) eine wichtige Rolle ein. Nimmt ihre Konzentration zu, so wird die Aktivität der säurebildenden Bakterien gehemmt. Gekennzeichnet ist dies durch einen fallenden pH-Wert und eine Abschwächung der Gasproduktion, bei gleichzeitigem Anstieg der CO_2-Konzentration im Biogas. Es ist aus diversen Untersuchungen (z. B. *Bischofsberger et al. [2005]*) bekannt, dass der anaerobe Abbauprozess durch die toxische Wirkung hoher Essigsäure-Konzentrationen gehemmt oder gar vollständig zum Erliegen kommen kann. Der Grenzwert für die Hemmwirkung ist dabei primär vom pH-Wert abhängig, wobei er mit zunehmendem pH-Wert steigt.

8.7.15 Schwefelwasserstoff, Schwermetalle und Schadstoffe

Substrate, die Inhaltsstoffe wie etwa Antibiotika, Desinfektionsmittel, Herbizide, Insektizide oder Bakterizide enthalten, können auf die Mikroorganismen der Methanbildung toxisch wirken. Die Methanbildung wird auch durch das Vorhandensein größerer Mengen Sulfat (SO_4^{2-}) gehemmt. Schwefelwasserstoff (H_2S) kann im undissoziierten Zustand eine toxische Wirkung besitzen. Der Anteil der undissozierten H_2S- an der Gesamtkonzentration ist dabei auch abhängig vom pH-Wert (*Bischofsberger et al. [2005]*). Eine Hemmung der Methanbildung durch Schwermetalle ist in der Regel nicht zu erwarten. Da es in fast allen Fällen zur Bildung von Schwefelwasserstoff kommt, werden die Schwermetalle meist in Form von Metallsulfiden ausgefällt. Darüber hinaus gibt es zahlreiche weitere Hemmstoffe, die den anaeroben Gärprozess beeinflussen können, in der Regel sollten sie aber keinen Einfluss haben (*Kaltschmitt und Hartmann [2001]*).

8.7.16 Zusammenfassung

Die Tabelle 8.4 gibt eine Übersicht über wichtige Parameter und ihre optimalen Bereiche; einzelne Parameter können bereits heute mit online-Messtechnik zuverlässig bestimmt oder zumindest abgeschätzt werden.

Tab. 8.4: Wichtige Parameter zur Beurteilung der Prozessstabilität (aus *KTBL [2009]*) ([1] = online messbar, [2] = mit Hilfe von NIRS online schätzbar)

Parameter	**Einheit**	**Messwert**
pH-Wert [1]	-	7,4 - 7,9
FOS/TAC	-	0,2 - 0,6
Redoxpotenzial [1]	mV	< -330
Ammonium-Stickstoff (NH_4-N) [2]	mg/l	< 3.000
Essigsäureäquivalent (ESÄ) [2]	mg/l	1.000 - 2.000
Propionsäure [2]	mg/l	max. 50 % von ESÄ
Andere organische Säuren [2]	mg/l	< 50
Methan (CH_4) [1]	%	nie unter 50 %
Schwefelwasserstoff (H_2S) [1]	ppm	< 200
Ammoniak (NH_3) [1]	ppm	< 10
Wasserstoff (H_2) im Rohbiogas[1]	ppm	< 500

8.8 Überblick über verschiedene Verfahrensvarianten

Im Laufe der Zeit wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren zur Biogaserzeugung entwickelt. Diese Verfahren werden nach unterschiedlichen Methodiken eingeteilt.

8.8.1 Kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren

So unterscheidet das *Bayerische Landesamt für Umweltschutz (BayLfU [2004])* zwischen

- kontinuierlichen Biogasverfahren auf dem Prinzip des Durchflussverfahrens, Speicherverfahrens oder Durchfluss-Speicherverfahrens bzw.
- diskontinuierlichen Biogasverfahren nach dem Prinzip des Batchverfahrens oder modifizierten Sonderverfahren.

Das **Durchflussverfahren** ist dadurch gekennzeichnet, dass in der Regel mehrmals täglich Substrate in den Anaerobreaktor eingebracht werden, wobei gleichzeitig eine entsprechende Menge Gärsubstrats in einen Gärrestbehälter überführt wird. Beim Durchflussverfahren ist die Gasproduktion aufgrund quasi kontinuierlicher Beschickung auch quasi konstant. Die Durchmischung des Substrats erfolgt mit Rührwerken, sodass sich das dosierte Material durch die Vermischung mit bakterienhaltigen Material angeimpft und somit schneller biologisch zersetzt wird.

Anaerob- und Lagerbehälter bilden beim **Speicherverfahren** eine Einheit. Bei der Inbetriebnahme wird der Fermenter durch die ständige Zugabe mit Substrat langsam befüllt. Nach Beendigung des Faulprozesses wird dieser bis auf eine geringe Menge ausgefaulten Materials entleert. Dieses dient zur bakteriellen Animpfung des frischen Substrates, welches nach der Entleerung wieder langsam in den Fermenter eingebracht wird. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist eine nicht konstante Gasproduktion.

Das **Durchfluss-Speicher Verfahren** funktioniert ähnlich dem Durchflussverfahren jedoch mit dem Unterschied, das der Gärrest in einem zweiten Behälter weiter abgebaut wird und erst dann in ein Gärrestlager überführt wird. Solch ein Verfahren ist sinnvoll, da beim Durchfluss-verfahren die Möglichkeit besteht, dass auch frisch eingetragenes oder kaum abgebautes Material durch den Überlauf den Fermenter verlässt (Kurzschlussströmung). Um das nicht bzw. nicht komplett umgesetzte organische Material nutzen zu können, kann es im Nachgärer weiter abgebaut werden.

Beim **Batch Verfahren** wird der ganze Faulbehälter auf einmal befüllt und dann luftdicht verschlossen. Das Substrat fault bis zum Ende der gewählten Verweildauer aus, ohne dass Material zugeführt oder entnommen wird. Nach der Vergärungsphase wird wie beim Speicherverfahren eine Restmenge Gärsubstrat zur Animpfung von Frischmaterial im Reaktor zurückgelassen. Auch hier tritt das Problem einer ungleichmäßigen Gasproduktion auf.

8.8.2 Nassfermentation und Trockenfermentation

Darüber hinaus werden auch gerne die Begriffe Nassfermentation und Trockenfermentation verwendet, um verschiedene Typen von Biogasanlagen zu charakterisieren. In der zwischen 2004 und 2008 gültigen Version des Erneuerbare Energien-Gesetzes wurde für die Erzeugung von Biogas mit Hilfe der sogenannten Trockenfermentation ein Technologiebonus in Höhe von 2 ct/kWh$_{el}$ festgelegt. Damit sollte vor allem landwirtschaftlichen Betrieben ohne Viehhaltung die Möglichkeit gegeben werden, auch ohne Gülle eine Biogasanlage zu bauen und wirtschaftlich betreiben zu können. Die Ausführungen zum *EEG [2004]* definierte dabei den Begriff Trockenfermentation als ein Verfahren

- bei dem die durchschnittlichen Trockensubstanzgehalt im Eingangssubstrat bei mindestens 30 % liegt und
- bei dem die Raumbelastung bei mindestens 3,5 Kg oTS/(m^3·d) liegt und
- die Konzentration an organischen Säuren im Gärrest bei maximal 2.000 mg/l liegt.

Nassvergärungen sind damit Anlagen, die diese Kriterien nicht erfüllen. Dies hat in der Praxis – und auch im Ausland – zu zahlreichen Verwirrungen geführt, da auch bei der Trocken-fermentation Feuchtigkeit benötigt wird, damit der Biogasprozess ablaufen kann. Ferner gestattet es diese Definition, dass auch Anlagen, die vom Prinzip her als Nassvergärung einzustufen sind (z. B. Rührkesselreaktor), diese Auflage erfüllen konnten, da durch den Trockensubstanzabbau während der Vergärung der prozentuale Anteil des Wassers steigt und dadurch ein flüssiges Gärsubstrat entsteht, welches sich auch mit Tauchmotorrührwerken durchmischen lässt. Mit Inkrafttreten des *EEG [2008]* ist die Möglichkeit dieses Bonus für neu errichtete Anlagen entfallen. Für die Altanlagen gilt aber ein Bestandsschutz für die Dauer von 20 Jahren nach Inbetriebnahme der Anlage. Nach *Weiland et al. [2007]* handelt es sich bei 88 % aller in Deutschland gebauten Biogasanlagen um Nassvergärungsanlagen. Über den Stand der Technik der Trockenfermentation berichten *Schattauer und Weiland [2007]* und *DWA [2013]*.

8.8.3 Reaktortypen

Weit verbreitet ist auch die Charakterisierung der Biogasanlagen nach den dabei eingesetzten Reaktortypen:

- Rührkesselreaktoren
- Pfropfenstromreaktoren
- Batchreaktoren

8.8.3.1 Rührkesselreaktoren

Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein kontinuierliches Vergärungsverfahren, bei dem eine Zwangsdurchmischung zum Einsatz kommt (Abb. 8.2). In der Praxis erfolgt ein Betrieb der Rührkessel als Durchflussverfahren oder als Durchfluss-Speicherverfahren. Zum Einsatz kommen meist stehende Rührkessel (Typ 1), bei denen die Höhe oft deutlich geringer ist als der Durchmesser. In der Regel befindet sich auf diesen Reaktoren auch ein Gasspeicherdach. Beim Typ 2 handelt es sich um einen stehenden – meist ist die Höhe deutlich größer als der Durchmesser – Fermenter mit fester Decke und oft einem Senkrechtrührwerk. Mit der zunehmenden NawaRo-Vergärung, die lange hydraulische Aufenthaltsdauern erfordern, werden Rührkesselreaktoren auch oft mit anderen Reaktortypen kombiniert. Hierbei kommt zum Beispiel eine Kombination von Pfropfenstromreaktor und einem nachgeschalteten Rührkesselreaktor zum Einsatz. Letzter ist zumeist auch mit einem Gasspeicherdach ausgestattet, um auch die Funktion des Gasspeicherraums zu übernehmen. Weiterhin kommt eine Kombination von zwei Rührkesselreaktoren (Fermenter, Nachgärer) häufig zum Einsatz. Dabei kann auch zwischen den beiden Varianten gemischt werden (z. B. Fermenter: Rührkessel mit Senkrechtrührwerk und Festdach, Nachgärer: Rührkessel mit Tauchmotorrührwerken und Gasspeicherdach).

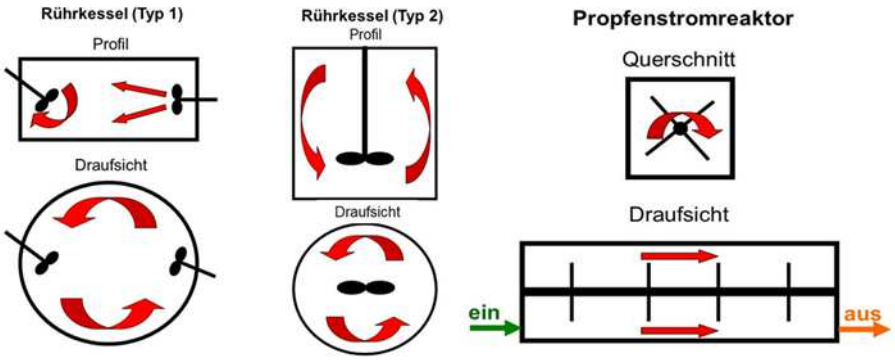


Abb. 8.2: Prinzip des Rührkessels (links) und des Pfropfenstromreaktors (rechts) (Bildquelle: Autor)

Da dieses Verfahren primär für NawaRo und feste Wirtschaftsdünger zum Einsatz kommt, ist in der Regel eine separate Störstoffentfernung nicht erforderlich.

Bei diesem Reaktortyp kommen verschiedene Rührwerke zum Einsatz:

- Tauchmotorrührwerke (Schnellläufer) (Typ 1)
- Horizontalrührwerke oder Schrägflügelrührwerke (Langsamläufer) (Typ 1/Typ 2)
- Senkrechtrührwerk (Langsamläufer) (Typ 2)

Besonders beim Typ 1 ist die Kombination von einem Tauchmotorrührwerk und einem Horizontalrührwerk/Schrägflügelrührwerk weit verbreitet. Beim dünnwandingen Typ 2-Reaktoren muss darauf geachtet werden, dass die Rührwerkskräfte sicher abgeleitet werden, da ansonsten die Gefahr besteht, dass der Behälter durch die Torsionskräfte Schaden nimmt.

Die Aufheizung des Fermenterinhaltes kann bei diesem Verfahren mit innenliegenden Heizungssystemen oder externen Wärmetauscher erfolgen. Bei den innenliegenden Heizungssystemen kommen die unterschiedlichsten Systeme zum Einsatz. Weit verbreitet sind mehr oder wenige flächige Heizungssysteme, welche an oder in den Wänden angebracht werden. Bei diesen Verfahren gilt es zu beachten, dass am Boden des Reaktors mit Ablagerungen (z. B. Sand) zu rechnen ist. Es ist daher sicherzustellen, dass diese Heizeinrichtungen nicht durch derartige Ablagerungen in ihrer Funktionsweise beeinträchtigt werden. Verbreitet ist auch der Einsatz von externen Wärmetauschern: Hier wird zum Beispiel das Gärsubstrat vor dem Eintrag in den Reaktor mittels Röhren- oder Spiralwärmetauschern auf die erforderliche Temperatur erhitzt. Bei einer ausreichenden Dämmung des Reaktors kann hierbei auf eine innenliegende Beheizung verzichtet werden.

In der Praxis haben sich die folgenden beiden Varianten der Niederdruck-Gasspeicherung des Biogases durchgesetzt:

- Interner Gasspeicher
- Externer Gasspeicher (eingehauster Gassack, ¾-Kugelgasspeicher)

Im Falle der internen Gasspeicherung wird eine Gasspeicherfolie über dem liegenden Fermenter aufgespannt. Der Vorteil ist, dass man auf einen separaten externen Gasspeicher verzichten kann. Es müssen jedoch Vorkehrungen getroffen werden, dass die Gasblase sich im entleerten Zustand nicht in den Reaktor absenkt, da dies zu einer Beschädigung der Folie durch die Rührwerke führen kann. Einhüllige Gasdächer sind zudem im halbgefüllten/leeren Zustand anfällig gegen widrige Witterungen (z. B. Schneefall, Sturm). Aus diesem Grund kommen hierbei meist Gasspeicher mit einem integrierten Tragluftdach zum Einsatz.

Zahlreiche Hersteller rüsten ihre Anlagen derart aus, dass eine Rezirkulation möglich ist. Hierdurch kann/soll sichergestellt werden, dass das Material im Rührkessel noch gerührt werden kann. Üblich sind Rezirkulationsmöglichkeiten vom Auslauf des Nachgärers zurück in den Zulauf des Fermenters. Im Einzelfall erfolgt nach der Vergärung eine fest-flüssig-Trennung des Gärrestes mit Hilfe von Schneckenpressen o. ä. Das dünnflüssige Material wird dann auch gerne rezirkuliert und/oder zur Anmischung der Feststoffe genutzt.

8.8.3.2 Pfropfenstromreaktor

Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein kontinuierliches Vergärungsverfahren, bei dem eine Zwangsdurchmischung zum Einsatz kommt (Abb. 8.2). Ein Pfropfenstromreaktor basiert auf dem Durchflussprinzip, weil das frische Gärsubstrat in Längsrichtung durch den Reaktor transportiert wird. Da sich das frische Material nur wenig mit dem ausgefaulten Material durchmischt, ist eine Animpfung des zugeführten Substrats mit Gärresten notwendig, um die Abbaurate zu steigern. In der Praxis durchgesetzt haben sich liegende Fermenter mit einer Zwangsdurchmischung. Andere Pfropfenstromreaktoren sind hingegen kaum verbreitet. Mit der zunehmenden Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen werden Propfenstromfermenter häufig mit anderen Reaktortypen kombiniert. Hierbei kommt oft eine

Kombination von liegenden Fermenter und einem nachgeschalteten Rührkesselreaktor zum Einsatz. Letzter ist zumeist auch mit einem Gasspeicherdach ausgestattet.

Da es sich um ein sogenanntes Trockenfermentationsverfahren handelt, kommen auch überwiegend feste organische Stoffe zum Einsatz:

- Nachwachsende Rohstoffe (z. B. Maissilagen, Grassilagen)
- Feste Wirtschaftsdünger (z. B. Rindermist oder Hühnertrockenkot)
- Bioabfälle („Braune Tonne“)
- Sonstige organische Abfälle (z. B. Speisereste, Marktabfälle)

Liegende Fermenter kommen traditionell bei der Behandlung von Bioabfällen oder sonstigen organischen Reststoffen zum Einsatz. Aufgrund der besonderen Förderung der Trockenfermentation im *EEG [2004]* erlebte dieser Verfahrenstyp aber auch bei der Vergärung von Nachwachsenden Rohstoffen und festen Wirtschaftsdüngern einen regelrechten Boom. Nachdem mit dem *EEG [2008]* der Trockenfermentationsbonus entfallen ist und nunmehr die Güllevergärung gefördert wird, kommt dieses Verfahren jedoch wieder seltener zum Einsatz.

Bei Biogasanlagen, welche organische Abfälle vergären, kommen oft Verfahren zur Störstoffentfernung zum Einsatz. Neben (teil-)automatisierten Sortieranlagen (z. B. Metallabscheidern) ist aber noch immer die händische Aussortierung verbreitet.

Bei diesem Reaktortyp kommen vorwiegend horizontale Langachsrührwerke zum Einsatz, die sich in der Regel über die gesamte Länge des Reaktors erstrecken. Im Detail bzw. je nach Hersteller bzw. je nach Gärsubstrat können sich diese Rührwerke stark voneinander unterscheiden. Gemeinsam ist ihnen jedoch, dass es sich um sogenannte Langsamläufer handelt, d. h. die Umdrehungsgeschwindigkeit liegt oft weit unter 120 Umdrehungen pro Minute; zum Teil nur wenige Umdrehungen pro Minute. Allgemein bleibt jedoch festzuhalten, dass diese Rührwerke die Schwachstelle des Verfahrens darstellen. In der Praxis treten Havarien auf: Neben dem Abreißen der Rührwerkswelle bzw. der Rührelemente oder dem Herausbrechen der Aufhängungen – was zum Teil mit monatelangem Stillstand der Anlage einhergehen kann – stellen auch die Durchführung durch die Fermenter eine Schwachstelle dar. Oftmals kommt es hier zu Leckagen, die meist nur geringe Mengen umfassen, aber optisch unschön wirken.

Die Aufheizung des Fermenters kann bei diesem Verfahren auf verschiedene Art erfolgen:

- Innenliegende Heizungssysteme
  - (flächige) Plattenheizkörper
  - (flächige) Heizspiralen
  - Rührwerke
- Externe Wärmetauscher

Bei den innenliegenden Heizungssystemen kommen die unterschiedlichsten Systeme zum Einsatz. Weit verbreitet sind mehr oder wenige flächige Heizungssysteme, welche an oder in den Wänden angebracht werden (z. B. Plattenheizkörper). Bei diesen Verfahren gilt es zu beachten, dass in den Ecken des liegenden Reaktors mit Ablagerungen (z. B. Sand) zu rechnen ist. Es ist daher sicherzustellen, dass diese Heizeinrichtungen nicht durch derartige Ablagerungen in ihrer Funktionsweise beeinträchtigt werden. Vereinzelt wird auch das horizontale Rührwerk für Zwecke der Wärmeübertragung eingesetzt: Hierbei erfolgt eine

Beheizung des Rührwerks, welches wiederum die Temperatur an das Gärsubstrat weitergibt. Weit verbreitet ist auch der Einsatz von externen Wärmetauscher: Hier wird zum Beispiel das Gärsubstrat vor dem Eintrag in den Reaktor mittels Röhrenwärmetauschern auf die erforderliche Temperatur erhitzt. Bei einer ausreichenden Dämmung des Reaktors kann hierbei auf eine innenliegende Beheizung verzichtet werden.

In der Praxis haben sich die folgenden beiden Varianten der Niederdruck-Gasspeicherung des Biogases durchgesetzt:

- Interner Gasspeicher
- Externer Gasspeicher

Im Falle der internen Gasspeicherung wird eine Gasspeicherfolie über dem liegenden Fermenter aufgespannt. Der Vorteil ist, dass man auf einen separaten externen Gasspeicher verzichten kann. Vielfach kommen auch externer Gasspeicher zum Einsatz: Üblich sind hierbei zum Beispiel eingehauste Gassäcke oder ¾-Kugelgasspeicher in Freiaufstellung.

Zahlreiche Hersteller rüsten ihre Anlagen derart aus, dass eine Rezirkulation möglich ist. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass das Material zu Beginn des Reaktors nicht zu zähflüssig ist. Üblich sind Rezirkulationsmöglichkeiten vom Auslauf des liegenden Fermenters zurück in den Zulauf, sowie – sofern ein Rührkesselreaktor nachgeschaltet – aus dem Ablauf eines nachgelagerten Reaktors. Im Einzelfall erfolgt nach der Vergärung eine fest-flüssig-Trennung des Gärrestes (z. B. mit Hilfe von Schneckenpressen). Das dünnflüssige Material wird dann auch gerne rezirkuliert und/oder zur Anmischung der Feststoffe genutzt. Die Praxis zeigt, dass in vielen Fällen ein Vielfaches (z. B. 600 %) der zudosierten Menge rezirkuliert wird. In diesen Fällen muss kritisch hinterfragt werden, ob der Reaktor dann noch die verfahrenstechnische Charakteristik eines Pfropfenstromreaktors aufweist.

8.8.3.3 Perkolationsverfahren

Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein diskontinuierliches Vergärungsverfahren, bei dem keine Zwangsdurchmischung zum Einsatz kommt. Bei den Perkolationsverfahren kommen in der Regel sogenannte Garagenfermenter zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um liegende Reaktoren, die mittels eines Tores an einer der Stirnseiten befüllt und entleert werden können. Die Anzahl der Garagen spielt eine wichtige Rolle bei der Auslastung der BHKW: Die Gasproduktion nimmt nach Befüllung der einzelnen Garagen zunächst zu, sinkt zum Ende eines Durchgangs aber dann stark ab. D. h. in dieser Zeit muss eine ausreichende Gasproduktion durch die anderen Garagen gewährleistet sein. Die Biogasproduktion ist daher umso konstanter je größer die Zahl der Garagen ist. Derartige Fermenter kommen gerne zum Einsatz, wenn das Gärmaterial mit Störstoffen (z. B. Glas, Kunststoff) vermischt ist, da dies bei anderen Reaktoren zu betrieblichen Problemen (z. B. Ablagerungen, Verzopfungen) führen kann. Auch im Falle von stapelbaren Feststoffen bietet das Verfahren Vorteile. Da dieses Sonderverfahren im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht betrachtet wird, sei auf die weiterführende Literatur (z. B. *DWA [2013]*) verwiesen.

8.9 Bauteile und maschinentechnische Ausstattung

Zum besseren Verständnis werden nachfolgend die wichtigsten Bauteile und maschinentechnischen Ausstattungen von Biogasanlagen genauer beschrieben. Im Wesentlichen erfolgt

dies an Beispielen von Rührkesselreaktoren auf Basis der Nassfermentation und des simultanen (Speicher-)Durchfluss-Prinzips, da dieser Verfahrenstyp die Praxis dominiert. Einige der Angaben (z. B. Energieerzeugung) gelten aber auch für die anderen Verfahren. In den Abbildungen 8.3 bzw. 8.4 sind die Fließschemata für eine NawaRo- und eine Kofermente-Biogasanlage aufgeführt. Die beiden Abbildungen verdeutlichen auch, dass die verfahrenstechnischen Unterschiede zwischen den beiden Anlagentypen gering sind. Einen guten Überblick über weitere Anlagentypen geben auch *Eder und Schulz [2006], Görisch und Helm [2006]* und *KTBL [2007]*.

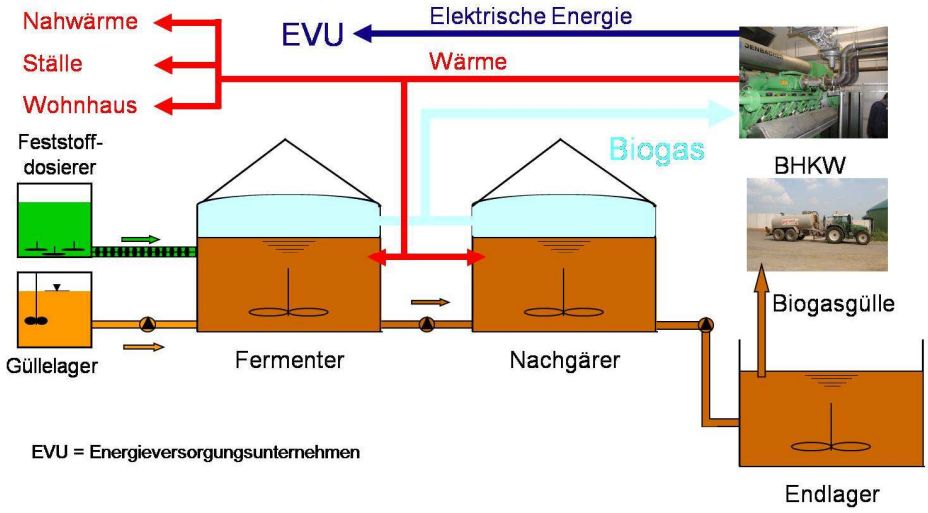


Abb. 8.3: Fließ- und Prinzipschema einer NawaRo-Biogasanlage (Quelle: *Wiese [2008]*)

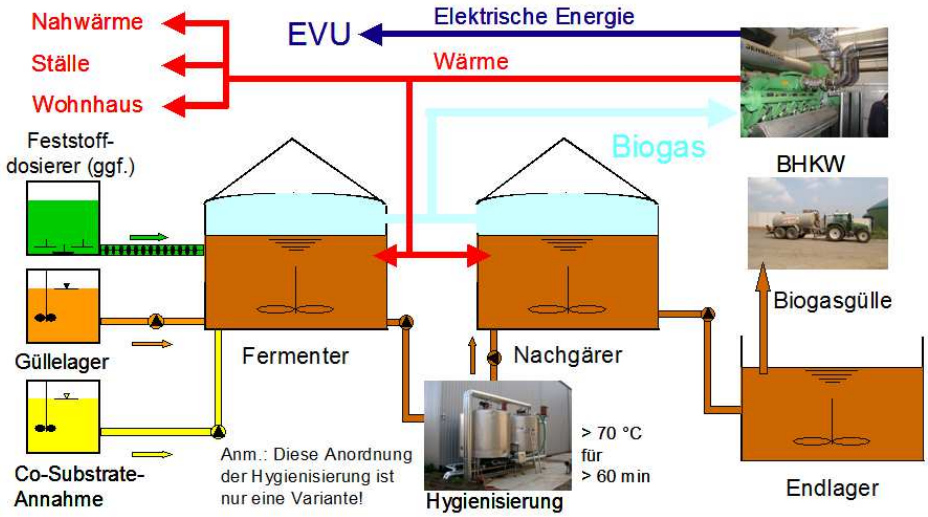


Abb. 8.4: Fließ- und Prinzipschema einer Kofermente-Biogasanlage (Quelle: *Wiese [2008]*)

8.9.1 Vorgruben und Güllebehälter

Vorgruben werden den Anaerobreaktoren vorgeschaltet. Bei diesen Behältern handelt es sich meist um Behälter aus Ortbeton oder Spannbetonfertigteilen. In der Vergangenheit waren die Behälter meist oben offen, in jüngerer Zeit setzen sich aber immer mehr Behälter mit fester Decke durch, die zum Teil sogar befahrbar sind; hierdurch soll auch eine Beeinträchtigung der

Nachbarschaft durch Geruchsemissionen weitgehend reduziert werden. In manchen Fällen wird der Behälterdeckel auch mit einer Luke ausgestattet, um bei Bedarf auch Feststoffe (z. B. Maissilage) zugeben zu können (z. B. im Falle eines längeren Ausfalls des Feststoffdosierers). In Einzelfällen werden Vorgruben auch mit Gasspeicherfolien nicht nur geruchsdicht, sondern bereits gasdicht gemacht. Die Beschickung der Behälter erfolgt meist über Rohrstutzen mit Standardanschlüssen oder direkt über den Stall. In den Vorgruben werden vor allem flüssige Wirtschaftsdünger (z. B. Rinder- und Schweinegülle) vor Einbringung in den Biogasprozess zwischengespeichert [70]. Ist der Anteil an sonstigen festen Biogassubstraten (z. B. Getreide) gering, können diese mittels Frontlader oder Förderschnecken ebenso in die Vorgrube eingebracht werden. Nach *Weiland et al. [2007]* kommt der Feststoffeintrag nach dieser Methodik aber in weniger als 10 % der Fälle zum Einsatz, da sich mittlerweile Schneckeneintragssysteme für Feststoff durchgesetzt haben. Vorgruben sollten dennoch auch mit Rührwerken ausgestattet sein, um Sinkstoffe aufmischen zu können. In vielen Fällen erfüllt die Vorgrube aber auch noch weitere Zwecke:

- Zwischenspeicherung der Silagesickersäfte aus den Flächensilos
- Zwischenspeicherung hochbelasteter Niederschlagsabflüsse
- Zwischenspeicherung des Kondensatwassers aus der Biogasentfeuchtung
- Möglichkeit zur Anmischung von Feststoffen (z. B. bei Ausfall des Feststoffdosierers)

An Messtechnik kommen in der Regel die folgenden **Messgeräte** zum Einsatz:

- Kontinuierliche Füllstandsmessungen
- Grenzfüllstand
- Schwimmschalter

Dabei erfüllen die Messgeräte die folgenden Funktionen:

- Überfüllsicherung (Grenzfüllstandsmessung)
- Notbeschickung (z. B. der Anaerobreaktoren, wenn Speichervolumen ausgeschöpft ist)
- Grundlage für einen Chargenbetrieb (z. B. über Min-Max-Steuerungen)
- Volumenstromabschätzung (z. B. über die Niveauänderung vorher – nachher)

Für die Beschickung der Fermenter werden meist die folgenden Betriebsweisen verwendet:

- Nach Homogenisierung durch das Rührwerk wird das zur Vergärung vorgesehene Material über eine Pumpe in den Fermenter (und bei Bedarf in den Nachgärer) gepumpt. Die Dosierung erfolgt dabei entweder über eine zeitbasierte Ablaufsteuerung oder durch Vorgabe einer definierten Menge (z. B. in Kombination mit einer Durchfluss- oder Füllstandsmessung).
- Bei Zugabe weiterer Substrate empfiehlt sich ein chargenweiser Betrieb, d. h.:
  - Schritt 1: Auffüllen des Güllebehälters mit Rezirkulat oder Frischgülle
  - Schritt 2: Einmischen von Feststoffen unter kontinuierlichen Rührwerksbetrieb
  - Schritt 3: Absenken des Güllebehälters durch Pumpen in den Fermenter

[70] Nach *EEG [2008]* muss jederzeit mehr als 30 % Gülle zugegeben werden, um den Güllebonus zu erhalten. D. h. hierfür muss zur Sicherstellung dieser Auflage eine entsprechende Zwischenlagerung erfolgen.

8.9.2 Silos für Feststoffe

Die festen (nicht pumpfähigen) Substrate werden auf der Siloplatte gelagert und in der Annahmehalle zwecks Einbringung in den Feststoffeintrag zwischengelagert. Die Fermenter werden somit direkt mit Feststoffen beschickt. Aus Kostengründen haben sich dabei in den letzten Jahren zunehmend Flachsilos durchgesetzt, d. h. meist asphaltierte Flächen, die durch Betonwände voneinander abgetrennt werden. Die Biomasse, oft gehäckselte Mais-, Ganzpflanzen- oder Grassilage wird dann in die Kammern eingebracht, verdichtet und dann weitgehend Luftdicht durch Folien abgeschlossen (Abb. 8.5).

Abb. 8.5: Flachsilos für Maissilage: 1 = Flachsilo mit Folie abgedeckt, 2 = Silo im Vortrieb (Bildquellen: Autor)

Darüber hinaus gibt es auch verschiedene Arten stehender Silos, die zur Lagerung von Feststoffen eingesetzt werden können. Zum Einsatz kommen derartige Lagerbehälter z. B. zur Lagerung von Maiskörner, Getreide und Zuckerrüben. Bei Getreide- oder Maiskörner ist eine Trockenlagerung möglich, oft werden die Substrate – Zuckerrüben nach Zerkleinerung – mit Wasser angemischt und nass konserviert; letztere können dann z. B. mittels Exzenterschneckenpumpen auch gepumpt werden.

8.9.3 Speicherbehälter

Auf Kofermente-Anlagen kommen oft verschiedene Substrate zum Einsatz. Flüssige Gärsubstrate wie Speisereste, überlagerte Lebensmittel und Rapsölfette werden mit Tankwagen angeliefert und in einen Annahmebehälter gepumpt. Da sich nicht alle Substrate miteinander mischen lassen bzw. die Substrate auch stark unterschiedliche Eigenschaften und Gaserträge aufweisen, empfiehlt es sich, die unterschiedlichen Substrate getrennt zu lagern. In Kombination mit Mess- und Automationstechnik gestattet dies mit Hilfe einer Art Rezepturverwaltung auch eine Dosierung nach dem (geschätzten) Energiegehalt. Um fetthaltige Stoffe auch im Winter flüssig zu halten, sollten die hierfür vorgesehenen Tanks beheizbar und isoliert sein. Hilfreich ist auch die Einrüstung eines Rührwerks für Zwecke der Homogenisierung.

8.9.4 Pumpen und Pumpstationen

Auch wenn oft versucht wird (z. B. um den Eigenstrombedarf zu senken), durch höhenmäßige Staffelung der einzelnen Behälter und den Einsatz von Überläufen auf den Einsatz von Pumpen zu verzichten, kommen an verschiedenen Stellen des Prozesses häufig auch

Pumpen zum Einsatz. Hierbei haben sich als Dickstoffpumpen vielfach Exzenterschneckenpumpen durchgesetzt. Es kommen aber auch oft Drehkolbenpumpen oder Hubkolbenpumpen zum Einsatz. Um eine Beeinträchtigung durch Störstoffe zu vermeiden, können den Pumpen auch Steinfänge, Cutter o. ä. vorgeschaltet werden.

In den letzten Jahren kommen mehr und mehr zentrale Pumpstationen zum Einsatz, sodass man in der Regel mit einer Pumpe auskommt. Derartige Pumpstationen erlauben es bei geschickter Konzeption mit dem dort installierten Verteilerbalken aus jedem Reaktionsraum bzw. Vorratsbehälter in jeden Reaktionsraum bzw. Vorratsbehälter zu Pumpen, sodass derartige Anlagen sehr flexibel betrieben werden können. Bezüglich der dort eingesetzten Armaturen gab es in der Vergangenheit ebenfalls Veränderungen: Waren früher Handschieber üblich, so haben sich in den letzten Jahren automatische Schieber (z. B. Pneumatikschieber) durchgesetzt, da nur so eine vollständige Automatisierung und die Nutzung der Flexibilität möglich ist.

Ferner eignet sich eine derartige Baugruppe auch für die zentrale Installation von Mess- und Analysetechnik. An Messtechnik können dabei die verschiedensten **Messgeräte** zum Einsatz kommen:

- Druckmessung und Unterdruckmessung zur Überwachung der Pumpe
  - Vermeidung von Druckstößen und Kavitation
  - Notabschaltung zum Schutz von Schiebern und Armaturen
  - Trockenlaufschutz
  - Erkennung von Verschleiß (z. B. Abnutzung der Drehkolben)
- Durchflussmessungen
  - Erfassung der Volumenströme
  - Überwachung und Kontrolle der zu dosierenden Mengen
  - Qualitätsmessungen
- pH-Elektrode
- Redox-Elektrode
- TS-Sonde
- Temperatur
- Elektrolytische Leitfähigkeit

Der Einsatz von Qualitätsmessungen in der zentralen Pumpstation bietet die Chance, dass durch Nutzung dieser Konstruktion jeder Reaktionsraum mit nur einem Satz Messgeräte mehrmals am Tag überwacht werden kann. Bei stündlichen Messfahrten ist somit eine quasi-kontinuierliche Kontrolle der wichtigsten Prozessparameter möglich.

Bei Kofermente-Biogasanlagen gibt es darüber hinaus eine Besonderheit: Die angelieferte Rohware wird bis zur Hygienisierung als „schwarzes“ Material betrachtet, das potenziell schädliche Keime enthalten könnte. Nach der Hygienisierung gilt das Material als „weiß“ (d. h. unbedenklich). Die Stoffströme müssen bei den Pumpvorgängen streng getrennt bleiben und werden durch jeweils eigene, separate Druckrohrleitungen gepumpt.

8.9.5 Feststoffdosierer

Feststoffdosierer kommen immer häufiger zum Einsatz, da sie mit festen Substraten befüllt werden können und dadurch die Anaerobreaktoren zeitlich- oder gewichtsgesteuert in kleinen Mengen mehrmals täglich – d. h. quasi-kontiniuierlich – beschickt werden können, ohne dass ein erhöhter Arbeitsaufwand entsteht. Dosierstationen erlauben somit eine möglichst gleichmäßige Fermentation und damit Biogasproduktion. Die Feststoffdosierer bestehen dabei aus einem Vorlagebehälter und einem Eintragssystem:

Vorlagebehälter: Die richtige Wahl des Vorlagebehälters ist dabei von großer Bedeutung. So empfiehlt es sich der Einsatz von Futtermischern (Abb. 8.6) zum Beispiel beim Einsatz von größeren Mengen von Festmist und Grassilage. Für andere nachwachsende Rohstoffe kommen jedoch häufig Behälter mit Schubböden (Abb. 8.7) oder Kratzketten zum Einsatz. Unabhängig davon muss der Wahl des richtigen Materials große Beachtung geschenkt werden: Die Praxis hat gezeigt, dass Behälter aus Schwarzstahl einer erheblichen Korrosion unterliegen; dies gilt besonders wenn Silagen zum Einsatz kommen, die niedrige pH-Werte aufweisen. D. h. derartige Behälter sollten an neuralgischen Stellen aus Edelstahl gefertigt oder zumindest mit säurebeständigem Material (z. B. PE) verkleidet werden.

Abb. 8.6: Feststoffdosierer mit einem Futtermischer: (1) vertikale Transportschnecke mit Stopfschnecke, (2) Futtermischwagen, (3) Mischeinrichtung (Bildquellen: Autor)

Eintragssystem: Aus diesen Vorlage- und Dosierbehältern kann dann der eigentliche Eintrag in den Reaktor auf verschiedene Art und Weise erfolgen.

- Förderschnecken
- Förderbänder
- Eintragskolben
- Einspüleinrichtungen

Förderschnecken und Förderbänder: Weit verbreitet (z. B. für Maissilagen) sind Förderschnecken. Bei Dosierstationen, die mit Förderschnecken ausgestattet sind, werden die Substrate unterhalb des im Anaerobreaktor befindlichen Flüssigkeitsspiegels zugeführt. Dadurch wird die Gefahr einer Sinkschichtenbildung oder Verklumpung des Materials reduziert, es ist allerdings die Bildung einer Schwimmdecke möglich. Bei der Materialwahl

gelten die gleichen Bemerkungen wie bei den Behältern. Förderbänder (mit anschließenden Stopfschnecken) kommen nur vereinzelt zum Einsatz.

Einspülvorrichtungen: In den letzten Jahren kommen bei NawaRo-Anlagen auch Einspülverfahren zum Einsatz, bei denen der Feststoff mit einem Rezirkulat vermischt wird, sodass ein pumpfähiges Material entsteht; dies Verfahren setzt jedoch voraus, dass das Rezirkulat ausreichend dünnflüssig ist.

Eintragskolben: Das Substrat kann auch durch Eintragskolben mit einem Hydraulikzylinder durch eine Öffnung in der Reaktorwand (meist kurz über der Behältersohle) in den Gärprozess eingeführt werden. Durch diese Einbringung wird die zugeführte Frischmasse direkt mit Gülle durchtränkt. Zwar wird hierdurch die Gefahr einer Schwimmdeckenbildung gegenüber nichtbodennaher Einbringung durch feststoffreiche Substrate reduziert, es besteht aber die Möglichkeit, dass sich Sinkschichten bilden und das eingepresste Material verklumpt.

Abb. 8.7: Feststoffdosierer mit einem Schubboden (1), Schubboden (2), horizontale Transportschnecke (3), vertikale Transportschnecke (4), Stopfschnecken für Fermenter (5) und Nachgärer (6) (Bildquellen: Autor)

An Messtechnik können die verschiedensten **Messgeräte** zum Einsatz kommen. Im Beispiel der Abbildung 8.7 sind es die folgenden Messgeräte:

- Feststoffbehälter:
  - Addierwiegeeinrichtung
  - Staumeldung Schubboden
- Hydraulikaggregat des Feststoffdosierers:
  - Max. Temperatur Hydrauliköl
  - Min. Füllstand Hydrauliköl
- Qualitätsmessung: NIRS

8.9.6 Anmischbehälter

Einige Anlagenbauer/-planer arbeiten auch mit Anmischbehältern, in denen Chargen aus verschiedenen Stoffen vor Zugabe in den Reaktor angemischt werden. Derartige Systeme kommen sowohl bei Kofermente- als auch NawaRo-Biogasanlagen zum Einsatz. Dabei erfolgt eine Beschickung des Anmischbehälters für feste Stoffe (z. B. Gras, Rindermist) in der Regel über einen Schneckeneintrag aus einem Feststoffdosierer, die flüssigen Wirtschaftsdünger und organischen Reststoffe werden aus den Vorlagebehältern zudosiert. Der Inhalt des Anmischbehälters wird durch Wägezellen kontinuierlich vom Prozessleitsystem erfasst. Mit Hilfe der Wägezellen und anderer Informationen (z. B. Art des zu dosierenden Stoffes) kann das Leitsystem eine bedarfsgerechte Beschickung der Biogasanlage durchführen. Der Anmischbehälter ist zwecksmäßig mit einem Rührwerk ausgestattet. Ggf. kann dort auch eine Vorerwärmung durch integrierte Heizsyteme erfolgen.

8.9.7 Hygienisierungsstufe

Gemäß *EU-Hygieneverordnung [2002]* müssen zahlreiche Kofermente – sofern sie nicht bereits vorhygiensiert wurden – im Laufe des Prozesses einer Hygienisierung unterzogen werden. D. h. das Material wird bei mindestens 70 °C mindestens eine Stunde lang sterilisiert. Durch diesen Prozess werden schädliche Keime, die im Substrat vorhanden sein könnten (z. B. Schimmel, Salmonellen) sicher abgetötet. Der Vorgang ist entsprechend zu dokumentieren. Zur Beheizung der Behälter wird meist ein Teil der Abwärme der BHKW genutzt. In der Praxis findet man auch Durchlaufhygienisierer, aber meist Batchreaktoren. Bei Letzteren werden in der Regel zwei bis drei Behälter parallel geschaltet, die nacheinander einen Prozess des Füllens, Aufheizen und Abkühlen des zu hygienisierenden Substrats durchlaufen. Der Vorteil der Parallelschaltung ist, dass beim Abkühlen des einen Behälters über Wärmetauscher der frisch beschickte Behälter aufgeheizt werden kann, sodass der Wärmeeinsatz verringert werden kann. Die Behälter sind neben einer Heizung meist auch mit einem Rührwerk ausgestattet.

Aufgrund der eingesetzten Stoffe sowie der Anlagenkonzeption kann eine Hygiensierung an verschiedenen Stellen zum Einsatz kommen, wie z. B.:

- Vorgeschaltete Hygienisierung der Stoffe (oft nur im Teilstrom)
- Hygienisierung zwischen Fermenter und Nachgärer (als Vollstrom)
- Nachgeschaltete Hygienisierung (als Vollstrom)

Die vorgeschaltete Hygienisierung hat den Vorteil, dass oftmals nur ein Teilstrom hygienisiert werden muss, d. h. nur die Stoffe, die der Hygieneverordnung unterliegen. Werden zahlreiche weitere, nicht hygienisierungspflichtige Stoffe eingesetzt, so hat diese Anordnung den Vorteil, dass die Hygienisierungsstufe deutlich kleiner ausgelegt werden kann und weniger Wärme benötigt. Nachteilig können Störungen sein, die durch den Eintrag nicht vorher abgetrennter Störstoffe (z. B. Steine, Besteck, Geschirrscherben) entstehen können.

Zwischenhygienisierung: Nach der Vorvergärung im Fermenter wird das Substrat zunächst in die Hygienisierungsbehälter gepumpt. Nach der Hygienisierung wird das Substrat mit einer Temperatur von noch ca. 45 °C in den Nachgärbehälter gepumpt, wo nach dem thermischen Aufschluss die restlichen vergärbaren Substanzen verarbeitet werden. Hierbei handelt es sich in aller Regel um eine Vollstromhygienisierung.

Nachgeschaltete Hygienisierung: Bevor das Material in das Gärrestlager gepumpt wird, wird es der Hygienisierung zugeführt, d. h. es handelt sich um eine Vollstromhygienisierung.

Der Prozess der Hygienisierung wird heute meist elektronisch gesteuert und lückenlos vom Leitsystem dokumentiert. An Messtechnik kommen die folgenden Messgeräte zum Einsatz:

- Füllstandsmessung zum Überwachen der Befüllung und Entleerung der Behälter
- Grenzfüllstandsmessungen zur Vermeidung einer Überfüllung
- Temperaturmessung im Hygienisierungsbehälter zur Überwachung des Hygienisierungsprozesses. Es empfiehlt sich der Einsatz von zwei Temperaturmessungen zwecks Abweichkontrolle.
- Temperaturmessungen im Vorlauf- und Rücklauf des Heizkreises des Hygienisierungsbehälters zwecks Regelung der Temperatur im Behälter

Als Steuerungs- und Regelungskonzepte kommen klassische Batchsteuerungen zum Einsatz mit einer hinterlegten Regelung für den Erhitzungs- und Abkühlungsprozess.

8.9.8 Fermenter

Bei dem in Abbildung 8.8 dargestellten Fermenter einer 500 kW_{el}-NawaRo-Anlage handelt es sich um einen Behälter aus Spannbetonfertigteilen. Alternativ sind auch Behälter aus Ortbeton, Edelstahl, Wickelfalzstahl und emaillierten Stahl möglich. Der dargestellte Behälter besitzt einen Durchmesser von ca. 20 m und ein Gesamtvolumen von ca. 1.800 m^3 und einem Nutzvolumen von ca. 1.550 m^3. In diesem Fall wurde der Reaktor auf eine durchschnittliche Verweildauer von 30 bis 40 Tagen dimensioniert; anschließend gelangt das bereits teilvergorene Substrat in den Nachgärbehälter.

Abb. 8.8: Fermenter mit Dämmung und Verkleidung aus Trapezprofilen (1), Tragluftdach mit integrierter Gasspeicherfolie (2), Tauchmotorrührwerk (3), Schrägflügelrührwerk (4), Flächige innenliegende Heizung (5), Spannbetonfertigteile (6), Schutzbeschichtung gegen H_2S-Korrosion (7) (Bildquellen: Autor)

Bei Betonbehältern empfiehlt sich in der Gasphase einen Schutzanstrich gegen H_2S anzubringen. Die oberhalb des Erdreichs gelegenen Bereiche der Behälter sind isoliert, um den Wärmeverlust zu begrenzen. Über der Isolierungsschicht befindet sich noch eine Verkleidung aus Trapezprofilblechen. Der Fermenter ist mit einer Gasspeicherfolie und mit einer Tragluftfolie (Wetterschutz) ausgerüstet und ist dadurch gasdicht abgeschlossen. Eine Wandheizung im Reaktor sorgt für eine meist mesophile (ca. 38°C) Betriebsweise. Der Vergärungsprozess

erfolgt bei Ausschluss von Luft (anaerobe Verhältnisse) unter Niederdruck, d. h. bis max. 5 mbar. Bei höheren Drücken oder Unterdruck (< 0 mbar) springen zum Schutz des Daches am Fermenter befindliche Über-/ Unterdrucksicherung (1 Kombi-Sicherung) an. Ein Tauchmotorrührwerk und ein Schrägflügelrührwerk sorgen dafür, dass sich in dem Fermenter keine Schwimm- und Sinkschichten bilden können; der Autor hat mit einer Kombination beider Rührwerkstypen gute Erfahrungen gemacht. (Nach *Weiland et al. [2007]* liegt der Anteil an Tauchmotorrührwerken mit 64 % deutlich über dem Anteil anderer Rührwerke: Zentralrührwerke ca. 12 %, Seitenrührwerke ca. 22 %, Gaseinpressung ca. 2 %).

Derartige Fermenter können mit folgenden Messgeräten ausgestattet werden:

- Niveaumessungen:
  - Kontinuierlicher Flüssigkeitsfüllstand
  - Grenzfüllstandsmessung/Schaumwächter
  - Höhe des Tauchmotorrührwerks
- Gasfüllstandsmessung: Kontinuierlicher Gasfüllstand
- Gasdruckmessung (Über-/Unterdruck)
- Schauglaskamera
- Temperaturmessungen (kontinuierlich):
  - Flüssigkeit
  - Vorlauf Heizung
  - Rücklauf Heizung

8.9.9 Nachgärer

Häufig ist dem Fermenter noch ein Nachgärbehälter nachgeschaltet, der oftmals baugleich ist. Bezüglich der baulichen und technischen Details gelten daher die Aussagen aus dem vorangegangenen Abschnitt. Der Nachgärbehälter erfüllt mehrere Funktionen:

- Vervollständigung der Biogasproduktion durch Nachvergärung
- Weitere Verringerung der Geruchsemissionen
- Bei Funktionsausfall des Fermenters kann der Nachgärbehälter dessen Funktion zeitweise übernehmen.
- Schaffung zusätzlichen Speicherraums
- Erhöhung der Betriebssicherheit

Das ausgefaulte und ausgegaste Endprodukt gelangt schließlich durch einen Pumpvorgang in das Gärrestlager. Das im Fermenter (> 80%) und im Nachgärbehälter (< 20%) entstehende Biogas gelangt über die Foliengasspeicher, über ein Absperrventil und einen Kondensatabscheider zu den Gasmotoren.

8.9.10 Gärrestbehälter

Der Gärrestbehälter (auch Endlager genannt) wird vor allem in den Wintermonaten, während dessen u. a. aus Gewässerschutzgründen keine Gülle auf die Felder ausgebracht werden darf, als Zwischenlagerraum genutzt. Das Nutzvolumen wird dementsprechend in der Regel auf eine Lagerdauer von mindestens 180 Tagen bemessen. Von März bis Oktober kann der

Gärrest dann auf die Felder ausgebracht werden. Dies bedeutet, dass der Gärrestbehälter bei einer Anlage von ca. 500 kW_{el} bereits ein Volumen von ca. 5.000 m³ aufweisen muss. Auch hier kommen wieder verschiedene Materialien für den Behälter infrage: Spannbetonfertigteile, Ortbeton, Edelstahl, Wickelfalzstahl und emaillierter Stahl. Früher waren diese Behälter überwiegend offen oder nur gegen Geruch abgedeckt, mit dem *EEG [2008]* werden die Behälter jedoch zunehmend gasdicht abgedeckt, wobei in der Regel einschalige Dächer zum Einsatz kommen. Bei Betonbehältern mit einem gasdichten Dach empfiehlt sich die Beschichtung des Behälterinnenraums gegen H_2S-Angriff. Das Biogas kann dann entweder direkt aus dem Gärrestlager oder aber indirekt über den Fermenter und Nachgärer abgezogen werden. Zum Schutz des Daches ist auch hier eine mechanischen Über-/ Unterdrucksicherung notwendig.

Derartige Behälter können mit folgenden Messgeräten ausgestattet werden:

- Niveaumessungen:
  - Kontinuierlicher Flüssigkeitsfüllstand
  - Grenzfüllstandsmessung/Schaumwächter
  - Höhe des Tauchmotorrührwerks
- Gasdruckmessung (Über-/Unterdruck): Aus Sicherheitsgründen und zum Schutz des Gasdachs kann der Über- und Unterdruck auch permanent online über einen Gasdrucksensor erfasst werden.
- Durchflussmessung an der Abgabestation zur Ermittlung des abgegebenen Gärrestes

Zusätzliches Lagervolumen für den Gärrest kann auch durch Verträge mit benachbarten landwirtschaftlichen Betrieben geschaffen bzw. abgesichert werden. Aber auch hier gilt es die Abgabe zu dokumentieren.

8.9.11 Gärrestabgabestation

Die Gärrestabgabe erfolgt im einfachsten Fall über einen Rohrstutzen, der über eine kurze Rohrleitung direkt oder über eine Pumpe mit dem Gärrestbehälter verbunden ist. Bei größeren Biogasanlagen befinden sich neben den Gärrestbehältern aber auch komplexere Gärrestabgabestationen (Abb. 8.9). Derartige Systeme in Kombination mit Mess- und Automationstechnik erlauben folgende Vorteile:

- Erfassung und Dokumentation der abgegebenen Güllemengen (z. B. mittels Durchflussmessung)
- Möglichkeit zur schnellen Beschickung verschiedener Typen von Güllefässern durch
  - wahlweise Abgabe von oben oder von unten zu füllenden Güllefässern und
  - Vorwahlmöglichkeit bei der Beschickung durch Vorgabe von Standardfassgrößen
  - Auswahl vorregistrierter Nutzer
- Durch Kombination dieser Maßnahmen lässt sich eine teil-automatische Beschickung der Güllefässer sicherstellen; lediglich das An- und Abkoppeln muss noch händisch erfolgen.
- Durch Verbindung mit einer Software können ggf. auch Menge und Abholer automatisch dokumentiert werden (z. B. in einem Betriebstagebuch).

Abb. 8.9: Gärrestabgabestation an einem Gärrestlager (1) mit wahlweiser Abgabe an von oben (2) oder von unten zu füllende Güllefässer (3), Durchflussmessung zur Bestimmung des abgegebenen Gärrestvolumens (4, 5) und Bedienstation für Vorwahl verschieder Güllefassgrößen bzw. verschiedener Gärrestabnehmer (6) (Bildquellen: Autor)

Mit steigenden Düngemittelpreisen steigt auch der wirtschaftliche Wert des Gärrestes erheblich an. Bei Gärrest aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen kann der Gärrest beispielsweise 3,5 bis 4 Kg N_{ges}/t, 1,5 bis 2 Kg P_2O_5/t, 4 bis 5 Kg K_2O/t und 0,3 bis 0,4 Kg S/t enthalten. Bei größeren Anlagen (z. B. 500 kW_{el}) kann der wirtschaftliche Wert daher mehr als 30.000 €/a betragen. Bei weiter steigenden Preisen für Düngemittel wird sich der Gärrest damit zunehmend zum Wirtschaftsgut entwickeln.

8.9.12 Biogasentschwefelung

Das im Fermenter entstehende Biogas enthält neben Methan und Kohlendioxid auch Spuren von Schwefelwasserstoff (H_2S). Vor der Verbrennung im Motor muss der H_2S- Gehalt von teilweise über 1.500 ppm auf möglichst deutlich weniger als 200 ppm verringert werden, um Korrosion an den Motorbauteilen zu vermeiden. Die Reduzierung der H_2S-Konzentration im Biogas ist damit eine wichtige Voraussetzung für einen effektiven und Lebensdauer schonenden Betrieb der Blockheizkraftwerke und einer möglichst langen Nutzungsdauer des Motorenöls. Zum Einsatz kommt dabei auf vielen Biogasanlagen die biologische Entschwefelung durch Einblasung von etwas Luft (und damit Sauerstoff) in den Gasraum. Mit Hilfe spezieller Entschwefelungsbakterien (*sulobakter oxydans*) wird der H_2S in elementaren Schwefel, Wasser und Schwefelsäure (H_2SO_4) umgewandelt. Auf den Oberflächen im Gasraum des Behälters können sich diese Bakterien ansiedeln. Der von den Organismen abgeschiedene Schwefel wird ausgespült, in das Gärrestlager gepumpt und gelangt als wertvoller Dünger auf die Felder. *Jenicek [2008]* haben nachgewiesen, dass diese Form der Entschwefelung keinen negativen Effekt auf die Biogaserzeugung hat. Bei größeren Anlagen bzw. stark schwankenden H_2S-Konzentrationen kommen auch externe biologische Filter zum Einsatz, die auf ähnlichen Prinzipien basieren. Andere Methoden Biogas zu entschwefeln sind das Verwenden von Aktivkohlefiltern, bei dem das Biogas durch einen Reaktionsbehälter mit imprägnierter Aktivkohle geleitet wird oder die Zugabe von Eisensalzen. Durch deren Einbringung in den Fermenter bilden sich aus eisenhaltigen Fällungsmitteln und H_2S schwerlösliche Eisensulfidverbindungen. Auch hier kann mit Hilfe einer online gemessenen H_2S-Konzentration eine automatisierte Dosierung des Fällmittels erfolgen. *Polster und Brummack*

[2009] geben einen Überblick über die zurzeit gängigen Verfahren zur Entschwefelung von Biogas: interne biologische Entschwefelung, externe biologische Entschwefelung, Eisenentschwefelung, Aktivkohleentschwefelung.

Es kommen bei den Belüftern in der Regel die folgenden Messgeräte zum Einsatz:

- Gasdurchfluss: Meist wird ein optischer Durchflussmesser genutzt („Schwebekegel“).

8.9.13 Biogastrocknung

Das im Anaerobreaktor entstehende Biogas enthält auch Wasserdampf [71]. Vor der Verbrennung im Motor muss dem Biogas die Feuchtigkeit entzogen werden, um u. a. Korrosion an den Motorbauteilen zu vermeiden. Die Trocknung kann dabei wie folgt erreicht werden:

- Ein Teil der Biogasleitung wird im Erdreich verlegt: Beim Durchströmen dieses Abschnitts wird das warme Biogas abgekühlt, sodass ein Teil des Wasserdampfs kondensiert. Die Rohrleitungen werden in einem Gefälle verlegt, sodass sich das Kondensat im Tiefpunkt in einem Kondensatschacht sammelt und mit Hilfe einer einfachen Tauchmotorpumpe abgepumpt (z. B. in den Gärrestbehälter) werden kann.
- Da diese Form der Trocknung unvollständig ist, kann der Biogasleitung eine aktive Gaskühlung nachgeschaltet werden. Durch eine Abkühlung auf eine Temperatur nahe dem Taupunkt (ca. 4 Grad Celsius) kann der überschüssige Wasseranteil weitgehend entfernt werden. Dieses Verfahren ist effektiv, aber benötigt den Einsatz von Strom.

Die Pumpen in den Kondensatschächten werden mit folgenden Messgeräten ausgestattet:

- Niveaumessungen:
  - Schwimmschalter
  - Grenzfüllstandsmessung (z. B. 3-Stab-Füllstandsmessung)

Im Bereich der aktiven Gaskühlung (oder nachgeschaltet) kommen die folgenden Messgeräte zum Einsatz:

- Gasdurchfluss: Volumenstrommessung für das Biogas (ggf. mit Druck und Temperaturkompensation)
- Biogasanlayse: Analysator zur Bestimmung der Biogaszusammensetzung (meist CH_4, CO_2, H_2S und O_2, manchmal auch H_2)
- Temperatur: Temperaturmessungen und Temperaturwächter
- Druck und Druckwächter: Druckmessung an diversen Stellen

8.9.14 Biogasnotfackel

Wegen der hohen Klimaschädlichkeit muss Methan abgefackelt werden, wenn es nicht energetisch genutzt werden kann (z. B. während einer Motorenwartung). Hierfür sind viele Biogasanlagen mit einer fest installierten Notfackel ausgerüstet, die nach Möglichkeit automatisch gezündet werden sollte. Bei kleineren Anlagen kommt auch des Öfteren eine mobile Fackel zum Einsatz, deren Verfügbarkeit innerhalb einer definierten Zeit auf der Anlage

[71] Nach *VDI [2008]* enthält z. B. Biogas bei 40 Grad Celsius etwa 48 g Wasserdampf pro Nm^3 trockenen Gases

gegeben sein muss. Derartige Mobilfackeln werden den Anlagenbetreiber oftmals von den Anlagenbaufirmen im Rahmen von Mietverträgen zur Verfügung gestellt.

8.9.15 Sickersaftschächte, Regenwassertanks o. ä.

Die hochbelasteten Silagersickersäfte bzw. der Niederschlagsabfluss belasteter Siloflächen werden oftmals in eigenen, unterirdischen Tanks gesammelt, die oftmals aus Beton oder Kunststoff bestehen. Diese Flüssigkeiten werden dann in der Regel durch Tauchmotorpumpen zur Biogasanlage (z. B. Güllebehälter oder direkt in den Fermenter) gepumpt. Bei der Dosierung der Silagesickersäfte muss darauf geachtet werden, dass diese nicht nur über niedrige pH-Werte und geringe Pufferkapazität verfügen, sondern auch hohe Konzentrationen organischer Säuren aufweisen. D. h. hier muss man bei der Dosierung größerer Mengen in einen bereits hoch belasteten Fermenter vorsichtig sein, da es ansonsten schnell zu einer Überlastung des Reaktors kommen kann. Auf einzelnen Biogasanlagen finden sich auch noch weitere Tanks und Speichermöglichkeiten, wie z. B.:

- Löschwassertanks oder Löschwasserteiche
- Regenwassertanks (z. B. für Niederschlagsabfluss unbelasteter Flächen) (ggf. inkl. Brauchwassernutzung für Spülwässer o. ä.)

Die Pumpen in den Kondensatschächten o. ä. können mit folgenden Messgeräten ausgestattet werden:

- Niveaumessungen:
  - Schwimmschalter
  - Grenzfüllstandsmessung

8.9.16 Rohrleitungsbau

Im Biogasanlagenbau kommen die verschiedensten Materialien für Rohrleitungen zum Einsatz. In höherwertigen Biogasanlagen sind Gas- und Substratleitungen zunehmend aus Edelstahl oder PE-HD hergestellt. Darüber hinaus gibt es aber auch viele Anlagen bei denen im Substratbereich PVC-Rohre zum Einsatz kommen. KG-Rohre werden z. B. als Kabelleerrohre oder als Kontrollschächte eingesetzt. Erdverlegte Leitungen müssen frostfrei und in einem Sandbett verlegt werden, im freien liegende Rohrleitungen sollten isoliert werden und/oder mit Rohrbegleitheizungen versehen sein. *Homann und Hüning [1997]* können umfangreiche Informationen zum Rohrleitungsbau im Bereich von Gasleitungen entnommen werden.

8.9.17 Betriebslabor

Die meisten Biogasanlagen verfügen über kein eigenes Betriebslabor. Dennoch kann auch auf einer mittleren Biogasanlage der Einsatz verschiedener Labor- und Handmessgeräte sinnvoll sein, wie z. B. Feuchtemesser zur Bestimmung des TS-Gehaltes, automatischer Titrator zur Bestimmung der flüchtigen organischen Säuren und der Alkalinität sowie Handmessgeräten für pH, Redox und elektrolytischen Leitfähigkeit.

8.10 Biogasnutzung

Das Biogas kann auf verschiedene Art und Weise energetisch genutzt werden, wie z. B.:

- Verbrennung in Gas- und Zündstrahlmotoren → Standardapplikation
- Nutzung in Mikrogas-Turbinen → in Deutschland eher selten
- Heizkessel → in Entwicklungs- und Schwellenländer
- Brennstoffzellen → nur Testapplikationen
- Biogas-Tankstellen → in Schweden populär
- Einspeisung in Erdgasnetze → starke Zunahme in den letzten Jahren

8.10.1 Gas- und Zündstrahlmotoren sowie Mikrogasturbinen

Üblicherweise erfolgt die Nutzung in Blockheizkraftwerken, die auf Gas- und Zündstrahlmotoren basieren (Abb. 8.10). Einen umfassenden Überblick über Gasmotoren gibt *Zacharias [2001]*. *Aschmann [2008]* berichtet über Untersuchungen bezüglich der Leistungsfähigkeit und Emissionen verschiedener Blockheizkraftwerke. Die elektrische Energie wird dabei von einem angekoppelten Generator erzeugt und in das Netz des zuständigen Netzbetreibers eingespeist. Vereinzelt kommen auch Mikrogasturbinen zum Einsatz, die zwar einen geringeren elektrischen Wirkungsgrad haben als Gas- und Zündstrahlmotoren, dafür aber deutlich weniger Wartung benötigen.

Abb. 8.10: Blockheizkraftwerk mit 537 kW_{el}-Gasmotor: 1 = Generator, 2 = Gasmotor, 3 = Peripherie des Blockheizkraftwerkes mit Heizungsverteilung (Bildquellen: Autor)

8.10.2 Biomethan-Erzeugung

In den letzten Jahren gewinnt die Einspeisung von gereinigtem Biogas (Biomethan) in das Erdgasnetz oder in Tankstellen immer mehr an Bedeutung (siehe z. B. *Urban [2009], Beil [2009]*). Eine Übersicht über die Biomethan-Einspeiseanlagen in Deutschland gibt *Bensmann [2011C]*. *Börjesson [2007]* bewertet die Vorteile der Nutzung von Biomethan als Kraftstoff und kommt zu dem Schluss, dass dieser Kraftstoff nicht nur direkt zu einer Reduzierung der Treibhausgase führt, sondern auch andere Umweltentlastungen bewirkt (z. B. Reduzierung von unkontrollierten Methanemissionen und Euthrophierung).

8.10.3 Brennstoffzellen

Einen Überblick über den Einsatz von Biogas in Brennstoffzellen geben *Trogisch und Baaske [2004].* Diese Technik wurde lange Zeit aufgrund hoher elektrischer Wirkungsgrade von bis zu 65 % als vielversprechend angesehen. Eine technische und wirtschaftliche Bewertung der Brennstoffzellennutzung mit Biogas nimmt *Pingel [2008]* vor: Den Vorteilen eines hohen Wirkungsgrades und der Umweltverträglichkeit steht demnach die gravierenden Nachteile der sehr hohen Investitionskosten und der Biogasaufbereitung gegenüber, die – von Demonstrationsprojekten einmal abgesehen – die Marktverbreitung erschweren. Ob sich daher angesichts des Ausstiegs der Fa. Tognum aus der Brennstoffzellenentwicklung bzw. dem Produkt „Hot Module“ die Brennstoffzelle letztendlich am Markt durchsetzen wird, muss kritisch hinterfragt werden, zumal auch moderne Gasmotoren bereits mehr als 40 % elektrischen Wirkungsgrad aufweisen.

8.10.4 Wärmenutzung

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird die bei der Verbrennung in Gas- und Zündstrahlmotoren sowie Mikrogasturbinen entstehende Wärme ebenfalls genutzt. Eine Faustformel besagt, dass die thermische Energie etwa dem 1,2 bis 1,8-fachen der elektrischen Energie entspricht. Abzüglich von Strahlungsverlusten bleibt somit viel thermische Energie übrig, die mittels Wärmetauscher genutzt werden kann, um

- den Eigenbedarf zu decken, wie z. B.:
  - Aufheizung der Fermenter und Nachgärer
  - Betriebsgebäude der Biogasanlage
  - Thermische Hygienisierung bei Kofermente-Biogasanlagen
- für Zwecke der Trocknung genutzt zu werden, wie z. B.:
  - Getreide
  - Holzhackschnitzel
  - Klärschlamm
  - Gärrest
- für die Umwandlung von Wärme in Strom, wie z. B.:
  - Stirling Motor
  - Organic Rankine Cycle
- in Nahwärmenetze eingespeist zu werden, um damit z.B. folgenden Gebäude zu heizen:
  - Öffentliche Gebäude (z.B. Schule, Rathaus)
  - Bürogebäude
  - benachbarte Wohngebäude und Wohngebiete
  - Industrie und Gewerbe
- Hofeinrichtungen zu beheizen, wie z. B.:
  - Ställe
  - Wohngebäude
  - Gewächshäuser

Diese und weitere Möglichkeiten zur Nutzung der überschüssigen Wärme sind in *Lube [2007]*, *Schulz et al. [2007]* und *Wiese [2007A]* dargestellt.

Hieraus resultiert, dass beim Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung und einer anschließenden Nutzung der Wärme, die Nutzung von Biogas energetisch sehr effizient ist, da hohe Gesamtenergienutzungsgrade erzielt werden können (> 80 %).

Bisher war der Ort der Biogaserzeugung meist identisch mit dem Ort der Biogasverwertung. Der Nachteil hierbei ist jedoch, dass nur in wenigen Fällen eine optimale Verwertung der anfallenden Abwärme möglich ist, da viele Biogasstandorte – insbesondere jene auf landwirtschaftlichen Betrieben – keine großen Wärmesenken aufweisen, sodass ein Großteil der Abwärme über Notkühler ungenutzt an die Umwelt abgegeben werden muss. Es ist daher naheliegend den Ort der Biogaserzeugung und der Biogasverwertung zu entkoppeln. Hierbei bieten sich zwei Alternativen an:

- Reinigung des Biogases von CO_2 und H_2S mit Hilfe von Druckwasserwäschern, Druckwechseladaption, Membranen, Aminwäschern o.ä. → Gaseinspeisung in das Erdgasnetz → Entnahme an einer Wärmesenke oder Tankstelle
- Aufbau eines Mikrogasnetzes (500 m bis 10.000 m) → Biogastransport an eine Wärmesenke → Verstromung in einem BHKW

Die erste Alternative erfordert den Einsatz von Aufbereitungstechnik, die sehr viel komplexer ist als die bisherigen Blockheizkraftwerke. Unabhängig davon wird bei komplexen Systemen auch eine Integration der Außenanlagen und Systemkomponenten in die Prozessleit- und Fernwirkebene erforderlich werden. Professionelle Energieversorger binden bereits heute ihre dezentralen Erneuerbare Energien-Anlagen sowie KWK-Anlagen mittels Fernwirktechnik an ihre Leitebenen (z. B. Netzleitwarte) an. Beides erfordert den Einsatz umfangreicher Mess- und Automationstechnik bzw. eine zweckmäßige Zusammenführung der einzelnen Automationsbausteine in ein anlagenweites oder ggf. sogar Systemgrenzen-überschreitendes Automationskonzept.

8.10.5 Mikrobielle Brennstoffzellen

In den letzten Jahren gibt es weltweit zahlreiche Forschungsvorhaben, die sich mit der Grundlagenforschung von mikrobiellen Brennstoffzellen beschäftigen: Ein Biofilm, der von organischen Reststoffen ernährt wird, lagert sich auf der Elektrodenoberfläche an und bewirkt als Katalysator eine Aktivierung der Redoxreaktionen (*Rabaey und Keller [2007]*). Der Vorteil dieser Technologie ist, dass man direkt aus dem Anaerobprozess heraus elektrische Energie erzeugen kann, ohne separate Stufen zur energetischen Nutzung des Biogases nachschalten zu müssen:

Wang et al. [2007] berichten über Experimente mit einer mikrobiellen Brennstoffzelle, welche Brauereiabwässer zur Energieerzeugung nutzt. Bei einer Temperatur von 30 °C wurde eine maximale Leistungsdichte von 483 mW/m^2 bzw. 12 W/m^3 erreicht.

Lefebvre et al. [2007] entwickelten eine mikrobielle Brennstoffzelle mit einer Kammer, die mit kommunalen Abwasser angeimpft wurde und anschließend mit Essigsäure beschickt wurde. Die Brennstoffzelle erreichte eine maximale Leistungsdichte von 139 mW/m^2 bzw. 6,9 W/m^3.

Virdis et al. [2007] berichten über Ergebnisse mit einer Brennstoffzelle (eine Kammer mit 336 cm^3), die Brauereiabwasser als Substratquelle nutzt. Die kontinuierlich beschickte Brennstoffzelle erreichte eine maximale Leistungsdichte von 34,6 W/m^3 erreicht. Gleichzeitig konnten 409 g NO_3-N/m^3 denitrifiziert werden, sodass die Brennstoffzelle neben der Energieerzeugung auch zur Stickstoffelimination genutzt werden konnte.

Freguia et al. [2007] widmen sich ebenfalls der Erforschung mikrobieller Brennstoffzellen. Sie untersuchten die Problematik, dass fermentative Bakterien die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle reduzieren können, da sie mit den anodophilen Bakterien um die Substrate konkurrieren. Weitere Probleme können durch eine ungewollte Wasserstoff- und Methanproduktion sowie pH-Wert-Verschiebungen resultieren. Mit Hilfe von Versuchen an einer mikrobiellen Brennstoffzelle, die im Batchbetrieb mit Glucose beschickt wurde, konnten *Fregura et al.* zeigen, dass die ungewollten Fermentationsprozesse mit steigender organischer Raumbelastung ebenfalls anstiegen, sodass die organische Raumbelastung eine geeignete Regelgröße für den Betrieb von mikrobiellen Brennstoffzellen ist.

Myint und Nirmalakhandan [2008] berichten über die Entwicklung einer 3-Kammer-Mikrobiellenbrennstoffzelle auf Basis von Rindergülle. Die im Batchprozess beschickte Brennstoffzelle erreichte eine maximale Leistungsdichte von 2,5 W/m^3 erreicht.

8.11 Planung und Bemessung von Biogasanlagen

8.11.1 Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen

In den letzten Jahren sind in der Literatur zahlreiche Veröffentlichungen zur Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen publiziert worden. Da es sich hierbei um eine komplexe Thematik handelt, soll hier nur eine Auflistung verschiedener Publikation erfolgen:

- *FNR [2005]* und *FNR [2008B]* analysierten im Rahmen zweier Biogasmessprogramme zahlreiche großtechnische Biogasanlagen. Neben einer technischen Analyse erfolgt auch eine ökonomische Bewertung der betrachteten Biogasanlagen.
- *Horatschek [2008]* gibt zunächst einen allgemeinen Überblick über die Rahmenbedingungen, bevor er anhand von Fallbeispielen auf die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen eingeht.
- *Philipp [2006]* untersucht in seiner Arbeit die Wirtschaftlichkeit verschiedener Betreibermodelle für Biogasanlage.
- Die *DLG [2006]* gibt Hinweise zur Betriebszweigabrechnung von Biogasanlagen.
- *Reimer [2009]* erläutert die Finanzierung von Biogasanlage aus Sicht der Finanzindustrie.
- *Reinhold [2009]* analysiert verschiedene Faktoren für die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen.
- *Toews [2009]* betrachtet einen Randaspekt, indem er die Logistikkosten von Biomassetransporten ermittelt.
- *Jäger et al. [2006]* berichten über einen im Internet verfügbaren Wirtschaftlichkeitsrechner des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), der eine Vielzahl von Randbedingungen berücksichtigt (z. B. die Gaserträge verschiedenster Gärsubstrate).

8.11.2 Rechtsgrundlagen

Die Rechtsgrundlagen für Planung, Bau und Betrieb von Biogasanlagen sind weltweit unterschiedlich. Aber bereits in Deutschland gibt es zahlreiche Gesetze und Verordnungen, die es zu beachten gilt: Neben Bundesrecht (z. B. Baugesetzbuch, BundesImmissionsSchutz-Gesetz) gibt es auch bundesländerspezifische Auflagen. Zum Teil kann man sogar beobachten, dass es bereits auf Ebene der Landkreise unterschiedliche Genehmigungspraktiken gibt. So machen die genehmigenden Behörden mancherorts schon bei kleineren Anlagen umfangreiche Auflagen (z. B. Einzäunung der Biogasanlage, Schutzwälle vor Leckagen an Fermentern, doppelwandige Substratrohrleitungen, stationäre Notfackeln), während andernorts derartige Auflagen vielfach gänzlich entfallen. Aufgrund dieser Entwicklungen gibt es mittlerweile umfangreiche Literatur zum Thema „Rechtsfragen rund um Biogasanlagen“, wie z. B. *StMUGV [2004], Peine et al. [2009]*, *Pielow und Schimansky [2008]* und *Loibl et al. [2010].*

8.11.3 Dimensionierung von Biogasanlagen

Auch wenn die Biogastechnik mittlerweile mehrere Jahrzehnte Erfahrungswissen umfasst, sind Dimensionierungsvorschriften hier weit weniger verbreitet als zum Beispiel bei der Abwasserreinigung. D. h. wurden in der Abwassertechnik mittlerweile nicht zuletzt aufgrund des umfangreichen Wirkens der DWA-Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ehemals ATV-DVWK) zahlreiche Regelwerke zur ordnungsgemäßen Dimensionierung von Abwasseranlagen erstellt, die vielfach den Status von allgemein anerkannten Regeln der Technik besitzen, ist dies bisher im Bereich der landwirtschaftlichen und gewerblich-industriellen Biogastechnik nicht gelungen. Ursächlich hierfür ist sicherlich, dass mittlerweile der Markt der Biogastechnik von sogenannten Generalübernehmern dominiert wird. In der Regel handelt es sich dabei um Biogasanlagenhersteller, die sowohl die Planung als auch den Bau einer Anlage als Generalplaner bzw. Generalunternehmer aus einer Hand anbieten. In einer Zeit, in der viele Biogasanlagenhersteller die gleichen maschinentechnischen Komponenten (z. B. Pumpen, Rührwerke, BHKW, Feststoffdosierer) verwenden, stellen somit individuelle Dimensionierungen ein wesentliches Abgrenzungskriterium untereinander dar. Ferner spiegelt die prozess- und verfahrenstechnische Dimensionierung auch das Erfahrungswissen der Anlagenbaufirmen wieder, d. h. sie stellen einen erheblichen Wert dar, den viele Firmen nur ungern mit anderen teilen wollen.

Aus der Literatur sind aber u.a. die folgenden Ansätze bekannt:

Kraslawski et al [1995] stellen ein Excel-basiertes Beratungssystem auf Basis von Case-Based-Reasoning für die Dimensionierung und Auswahl von Rührwerken vor: Auswahlfaktoren für dieses KI-System sind zum Beispiel das Reaktornutzvolumen, die rheologische Beschreibung (Viskosität und Dichte), die Partikelkonzentration, die Strömungsgeschwindigkeit und die Sinkgeschwindigkeit der Partikel sowie die Nutzungsart.

Brehmer und Kraume [2012] weisen auf die Bedeutung einer möglichst genauen rheologischen Beschreibung der Gärsubstrate im Hinblick auf das Strömungsverhalten und damit die richtige Auswahl und Dimensionierung der Rührwerke hin.

Noack [1955] gibt einen umfangreichen Überblick über den Stand der landwirtschaftlichen Biogasanlagentechnik bezüglich Planung, Bau und Betrieb kurz nach dem 2. Weltkrieg. Aufbauend auf den durchgeführten Gärversuchen von Wirtschaftsdüngern und Pflanzen lag

der Fokus der Dimensionierung der Anaerobstufe primär auf der Fauldauer und der damit einhergehenden erzeugbaren Biogasmenge. Darüber hinaus beinhaltet diese frühe Arbeit auch eine Analyse verschiedener damals in Betrieb befindlichen Typen von Biogasanlagen (Systeme „Darmstadt“, „Schmidt-Eggersglüß“, „Ducellier-Isman“ und „München“) einschließlich ihrer verfahrenstechnischen Konzeption und ihrer wichtigsten Betriebskennzahlen (z. B. System „München“: 30 Grad Celsius Reaktortemperatur, 30 Tage hydraulische Verweildauer im Reaktor). Diese Arbeit stellt somit eine Dimensionierungshilfe auf Basis der zusammengefassten Erkenntnisse verschiedener halb- und großtechnischer Versuche dar.

IBBK [2006] hat in Zusammenarbeit mit einer Anlagenbaufirma eine Berechnungs-CD mit Software zur Auslegung von Biogasanlagen erstellt, die neben Excel-basierten Berechungsdateien auch diverse Publikationen und Gesetztestexte enthält. Die Berechnungsdateien sind jedoch sehr einfach gehalten: Mit Hilfe des Kernmoduls „Raumbelastung“ wird auf der Basis der verfügbaren Rohstoffe und eines gewählten Fermentervolumens automatisch mittels hinterlegter Standardwerte die Raumbelastung, die Verweildauer und der theoretischer Gasertrag ermittelt. Einem echten Bemessungsprogramm (inkl. der erforderlichen Maschinentechnik), wie sie z. B. im Bereich der Abwassertechnik weit verbreitet sind, entspricht dieses Programm aber in keiner Weise.

KTBL [2007] beschreibt eine verfahrens- und prozesstechnische Anlagenauslegung auf Basis des Netto-/Brutto-Fermentervolumens, der Faulraumbelastung (wobei nur das Nettovolumen zur Berechnung der Faulraumbelastung maßgebend ist) in Kg oTM/($m^3 \cdot d$), einer hydraulischen Verweildauer (von > 30 Tagen) und der Wahl der Stufigkeit des Fermentationsprozesses (1-stufig, d.h. Fermenter oder 2-stufig, d.h. Fermenter und Nachgärer).

Mähnert [2008] entwickelte im Rahmen ihrer Promotion ein Bemessungsmodell auf Basis eines kinetischen Modells, welches sie aus zahlreichen Gärversuchen (Substrate: Mais, Rüben, Roggen, Rinder- und Schweinegülle als Monosubstrate oder in Kombination; Temperaturstufen: mesophil, thermophil). Das Modell gibt im Wesentlichen den Zusammenhang zwischen Biogasausbeute und Raumbelastung in Abhängigkeit verschiedener substrat- und prozessspezifischer Parameter wieder (siehe auch *Linke et al. [2008]*).

Wesselek und Schabach [2009] geben Dimensionierungshinweise, die im Wesentlichen auf der Raumbelastung und der Verweilzeit beruhen sowie allgemeine Hinweise bzgl. Durchmischung bzw. zu erwartender Gaserträge und zu erwartender Biogasqualität enthalten.

8.11.4 Simulation von Biogasanlagen

Die Modellierung anaerober Prozesse ist weit weniger verbreitet als die aerober/anoxischer Prozesse. Erste Anaerobmodelle wurden nach 1974 veröffentlicht. Weiterentwicklungen gestalteten sich jedoch wegen der analytischen Bedingungen im anaeroben Milieu als schwierig. *Lyberatos [1999]* weist daher auch bei einem Rückblick auf die Entwicklung von mathematischen Modellen zur anaeroben Modellierung auf den engen Zusammenhang zwischen Fortschritten in der Analytik und der Modellentwicklung hin. Die Liste der entwickelten Anaerobmodelle (zitiert in *Lyberatos [1999]*) ist lang: z. B. *Hill und Barth (1977)* (tierische Ausscheidungen), *Kleinstreuer (1982)* (verschiedene Substrate), Bryers (1985) (biologisch abbaubare partikuläre Substanzen), *Costello (1991)* (Kohlenhydrate), *Siegrist et*

al. (1993, 1995) (Klärschlamm), *Angelidaki et al. (1993)* (Gemisch aus Schweinegülle, Abwasser und Bentonitflüssigkeit), … . *Gerber [2010]* und *Lübken et al. [2011]* geben einen Überblick über die Modellentwicklung, die auch den Zeitraum der letzten Jahre umfasst.

Diese Modelle sind unterschiedlich komplex und bilden den Anaerobprozess mehr oder weniger vollständig ab. Keines der aufgeführten Modelle hat jedoch in größerem Maßstab Eingang in die Praxis gefunden. Der Verbreitung steht/stand oftmals die Komplexität der Modelle entgegen. Die Übersicht zeigt zudem, dass häufig Monosubstrate untersucht wurden bzw. sich die Untersuchungen auf geschwindigkeitslimitierende Schritte konzentrierten. Mit Einführung des IWA-Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM 1) (z. B. *Batstone et al. [2002]*) existiert jedoch ein allgemein gültiges Modell, das aber bisher vornehmlich in der anaeroben Abwasserbehandlung eingesetzt wurde. Es beinhaltet alle grundsätzlich in solch einem System zu erwartenden Stoffgruppen, Fraktionen und Prozesse. Deshalb ist dieses Modell einerseits sehr komplex (28 Prozesse), andererseits wurden Aspekte, die aus speziellen Anwendungsgebieten erwachsen, nicht berücksichtigt. Das ADM 1 stellt die in der Literatur verbreiteten Abbauschritte detailliert dar. Weiterhin enthält das Modell Fraktionen und Prozesse zur Abbildung des Puffersystems und der Gasstrippung. Die bereits angesprochene Vielzahl verfügbarer Modellgrundlagen basiert vornehmlich auf der in der Praxis vorhandene Vielfältigkeit des anaeroben Milieus. Das anaerobe Milieu wird u. a. durch die Substrate bestimmt mit denen eine Anlage zum anaeroben Abbau organischer Stoffe beschickt wird, sei es Abwasser, Schlamm, NawaRo oder Abfall. Ein Einsatz außerhalb der Abwassertechnik wird jedoch vereinzelt versucht, da bereits stöchiometrische und kinetische Parameter für andere Substrate (z. B. Gülle, Gelatine, Lebensmittelreste) veröffentlicht wurden *(IWA [2005])*.

Wichern et al. [2007] untersuchten die Eignung des ADM 1 zur Prozesssteuerung landwirtschaftlicher Biogasanlagen auf Basis von Rindergülle, Mais- und Grassilage. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass sich das Modell gut kalibrieren lässt und daher zur Modellierung landwirtschaftlicher Biogasanlagen und zur Bewertung/Erprobung verschiedener Steuerungsstrategien geeignet sei. Als geeignete Steuerungs- und Regelungsparameter wurden von den Autoren, die folgenden Parameter vorgeschlagen: CH_4-/CO_2-Verhältnis, Methanbildungsrate (als Produkt aus Methankonzentration und Gasmenge pro Zeiteinheit), pH-Wert, Wasserstoffkonzentration, Gehalt an organischen Säuren und der FOS/TAC. Es wurde allerdings festgestellt, dass ein online-Steuerungsmodell noch weiteren Forschungs- und Entwicklungsaufwand benötigen wird.

Gerber [2010] untersuchte in ihrer Arbeit verschiedene Modelle zur Simulation von Biogasanlagen auf der Basis von Literaturwerten, Betriebsdaten einer Laboranlage sowie von Betriebsdaten einer großtechnischen Anlage. Dabei betrachtete die Autorin nicht nur den Biogasprozess an sich, sondern auch den Strombedarf (Rührwerke, Dosiereinrichtungen, Pumpen etc.) und Wärmebedarf (z. B. Fermenterheizung). Die Modelle wurden in der Software „Aspen Custom Modeller“ implementiert:

- Zunächst überprüfte Gerber die Eignung verschiedener statistischer Modelle (*Boyle [1976]*, *Baserga [1998]* und *Keymer und Schilcher [2003]*) zur Prognose des Biogaspotenzials von Gärsubstraten: Dabei kam sie zu der Erkenntnis, dass das Modell von *Keymer und Schilcher* am besten für die stoffliche Bilanzierung geeignet sei.
- Anschließend untersuchte Gerber die kinetischen Modelle von *Andrews und Graef [1971]*, *Hill und Barth [1977]* sowie das ADM 1 (*Batstone et al. [2002]*):

- Dabei kam sie zu der Erkenntnis, dass sich das Modell von *Andrews und Graef* zwar für die Analyse der Prozessstabilität eignen würde, aber eine unbefriedigende Übereinstimmung mit den Daten der Großtechnik liefern würde.
- Auch mit dem Modell von *Hill und Barth* konnten keine zufriedenstellenden Übereinstimmungen mit den Betriebsdaten der großtechnischen Biogasanlage erreicht werden.
- Mit dem ADM 1 konnte die Autorin zufriedenstellende Ergebnisse sowohl für die Laboranlage als auch die großtechnische Biogasanlage erreichen.

Lübken et al. [2011] modifizierten das ADM 1 für die Simulation der Trockenfermentation auf Basis eines Pfropfenstromreaktors.

Liebetrau et al. [2012] stellen ein Modell des Deutschen Biomasseforschungszentrums in Leipzig vor: Das Modell berücksichtigt 12 Prozesse, 17 Komponenten und 28 Parameter. Im Vergleich zum ADM 1 ist es damit einfacher, im dargestellten Beispiel konnte dennoch eine gute Übereinstimmung zwischen der Simulation und der Realität beobachtet werden. Eine derartige Reduzierung der Modellkomplexität erscheint insbesondere im Hinblick auf eine Anwendung in modellbasierten Regelungskonzepten hilfreich.

Bezüglich der Simulation der Strömung in einem Reaktor wurden ebenfalls bereits Untersuchungen durchgeführt: *Hennig et al. [2006]* berichten über den Einsatz einer Strömungssimulation zwecks Auswahl einer optimalen Rührwerksausstattung. Das Modell soll anhand simulierten Geschwindigkeits-, Konzentrations- und Temperaturverläufe zuverlässige Rückschlüsse auf den Durchmischungszustand des Reaktors und damit die Eignung der ausgewählten Rührwerke zulassen. *Hennig et al. [2007]* zeigen Ergebnisse einer Modellberechnung für eine reale Biogasanlage mit einem vertikal durchmischten Fermenter.

Die zuvor beschriebenen Beispiele verdeutlichen, dass mit der anaeroben Modellierung von großtechnischen Biogasanlagen teilweise wissenschaftliches und technisches Neuland betreten wird; dies gilt vor allem bezüglich der Modellierung aller Teilkomponenten und Stoffströme. Auch zur Optimierung von Biogasanlagen im Normalbetrieb, aber auch in Extremsituationen und für Spezialapplikationen gibt es bereits zahlreiche Ansätze mit Hilfe der dynamischen Simulation, wie zum Beispiel:

Ramirez und Steyer [2007] berichten über eine Studie, die einen Ansatz zur Modellierung außergewöhnlicher Ereignisse, wie z. B. einer Prozessstörung eines Anaerobreaktors infolge toxischer Stoffe, verfolgt. Als Werkzeug wurde in diesem Fall ein modifiziertes Modell des ADM 1 eingesetzt. Als Datengrundlage dienten die Ergebnisse von Versuchen mit einer halbtechnischen Versuchsanlage (1 m^3) zur anaeroben Behandlung von Weinbauabwässern.

Picioreanu et al. [2007] integrierten das Modell ADM 1 in ein mathematisches Modell zur Simulation mikrobieller Brennstoffzellen. Das Modell beschreibt unter anderem die zeitliche Entwicklung wichtiger Prozessgrößen der Brennstoffzelle (Stromproduktion, Substratverbrauch, Wachstum der suspendierten und der dem Biofilm anhaftenden Bakterien) und dient damit als Grundlage für die Untersuchung des Verhaltens der mikrobiellen Brennstoffzelle bei unterschiedlichen Belastungen und Betriebsweisen.

Gadhamshetty et al. [2008] modifizierten das Modell ADM 1 anhand von Batchversuchen, um damit anaerobe Systeme zur Wasserstoffproduktion zu simulieren.

Schön [2010] untersuchte in seiner Dissertation den Einsatz der Möglichkeiten des ADM 1 auf Basis einer Kalibrierung mittels Laborversuchen für verschiedene Anwendungsmöglichkeiten, wie zur Optimierung der Bemessung und des potenziell kritischen Anfahrbetriebs.

Gaida [2011] berichtet über ein Projekt, bei dem ein Biogasanlagenmodell sowohl zur Projektierung von Biogasanlagen als auch zur Entwicklung einer nichtlinearen modellbasierten prädiktiven Regelung auf Basis des ADM 1 eingesetzt wurde.

Rodríguez et al. [2007] beschreiben die Ergebnisse der Entwicklung eines Computermodells zur Untersuchung und Weiterentwicklung von mikrobiellen Brennstoffzellen. Die Simulation dient dabei als Werkzeug im Hinblick auf eine Leistungs- und Effizienzsteigerung der mikrobiellen Brennstoffzellen sowohl bezüglich der Stromproduktion als auch des Abbaus organischer Stoffe. Das Modell berücksichtigt die Kinetik der anionischen und kationischen Elektroden, einen räumlichen mikrobiellen Biofilm, die mikrobiellen Prozesse, den Elektronentransport sowie weitere chemische und physikalische Mechanismen (Stoffstransport, Hydraulik, pH-Veränderungen). *Zeng et al. [2007]* berichten über die Ergebnisse eines ähnlich gelagerten Forschungsprojektes zur Modellierung von mikrobiellen Brennstoffzellen.

Salazar et al. [2007] modellierten einen anaeroben Festbettreaktor, der zur Behandlung von Weinbauabwässer eingesetzt wird. Dabei wurde das ADM 1 derart modifiziert, dass es auch die Vorgänge im Biofilm adäquat nachbildet. Nach der Anpassung lieferte das Modell eine sehr gute Übereinstimmung mit der Realität. Dieses Simulationswerkzeug soll daher unter anderem zur Optimierung der Verfahrensführung (z. B. Einfahrphase) eingesetzt werden.

Hidaka et al. [2007] modifzierten das ADM 1, um die thermophile Vergärung von Küchenabfällen und Klärschlamm zu modellieren. Die Ergebnisse des Modells wurden sowohl mit den Ergebnissen kontinuierlicher Versuche als auch von Batchexperimenten abgeglichen. Die Autoren sehen den Vorteil des modifizierten Modells in der einfachen Inputfraktionierung.

Palatsi et al. [2007] berichten über ein vereinfachtes Modell zur Bestimmung der anaeroben Abbaubarkeit von frischen Abwässern aus Schlachtereien, unter anderem sollen damit die Effekte unterschiedlicher Verhältnisse zwischen Fetten und Proteinen untersucht werden. Das Modell wurde anhand von Versuchsergebnissen kalibriert.

Els und van Deventer [2007] entwickelten ein mathematisches Modell zur Simulation eines UASB-Reaktors. Das Modell wurde mit Hilfe von Betriebsdaten einer Anlage zur Behandlung von Weinbauabwässern kalibriert und soll zur Planung und Dimensionierung zukünftiger UASB-Anlagen eingesetzt werden. Das Modell liefert eine Vielzahl von Informationen, wie zum Beispiel die Höhe des Schlammbetts, die Biomassekonzentration, Kurzschlussströmungen, die CSB-Fracht, pH, Temperatur und die Zusammensetzung der Biozönose.

Van Zyl et al. [2007] berichten über ein stöchiometrisches Anaerobmodell, welches die wesentlichen Stoffumwandlungsprozesse (Biomasse, Methan, Kohlenstoffdioxid) berücksichtigt. Das Modell soll der Auslegung von Anaerobreaktoren dienen und unter anderem die TS-Konzentration im Reaktor, das Reaktorvolumen, den pH-Wert, die Alkalinität, die Biogasproduktion und den Nährstoffbedarf ermitteln.

Retamal et al. [2007] widmeten sich einem Teilbereich und entwickelten ein mathematisches Modell, um den Einfluss der Temperatur auf die Hydrolyse- und Versäuerungsphase zu modellieren. Das Modell wurde mit Hilfe von Batchversuchen verifiziert und in einem Temperaturbereich zwischen 12 und 37 °C erprobt. Dabei wurde festgestellt, dass die maximale

Versäuerungsgeschwindigkeit um 82 % zurückgeht, wenn die Temperatur von 37 auf 30 °C absinkt.

8.11.5 Ex-Zonen auf Biogasanlagen

Auf Biogasanlagen treten diverse Ex-Zonen auf, in denen selbstverständlich auch bezüglich der eingesetzten Elektro- und Maschinentechnik die jeweils erforderlichen Ex-Schutzanforderungen erfüllt sein müssen. Einen guten Überblick über die Ex-Zonen-Problematik auf Biogasanlagen gibt auch *Bundesverband der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften [2002]*. Einen Überblick über die zahlreichen verschiedenen Normen, Regelwerken und Betriebsvorschriften bzw. dazu weiterführender Literatur gibt *Wraneschitz [2011]*.

8.11.6 Qualitätsstandards für Biogasanlagen

Die in den letzten 10 bis 15 Jahren gebauten Biogasanlagen weisen bezüglich der Qualität der eingesetzten Bau-, Elektro- und Maschinentechnik große Unterschiede auf. Dies hat dazu geführt, dass viele der frühen Biogasanlagen bereits nach wenigen Jahren wieder abgängig waren. Einzelne Autoren widmen sich daher auch diesen Problemen, wie z. B. *Görisch und Helm [2006]*. *Weiland und Gemmeke [2009]* untersuchten anhand von 60 großtechnischen Biogasanlagen die Schwachstellen der derzeitigen Anlagentechnik (Tab. 8.5); im Durchschnitt wurden je Biogasanlage 145 Arbeitsstunden für die Beseitigung von Störungen aufgewendet, wobei im Einzelfall auch über 500 Arbeitsstunden anfielen.

KTBL [2009] stellen die Ergebnisse der Untersuchung von 31 Biogasanlagen vor, wobei über ein Jahr die Störungen von den Betreibern dokumentiert wurden (Tabelle 8.6). Weiterhin ermittelten die Autoren folgende spezifische Störungskennwerte (Durchschnittswerte):

- Je 10 kW installierter elektrischer Leistung fallen 1,2 Betriebsstörungen pro Jahr an.
- Zur Behebung von Störungen fallen je 100.000 kWh erzeugter elektrischer Energie Lohnkosten in Höhe von 184 € an.

Schünemeyer [2006] berichtet über eine Auswertung der Prozessstörungen und technischen Störungen von untersuchten Biogasanlagen (Tabellen 8.7 und 8.8).

Tab. 8.5: Anteil Arbeitsaufwand zur Beseitigung von Störungen auf Biogasanlagen (nach *Weiland und Gemmeke [2009]*)

Komponente	**Anteil Arbeitsaufwand [%]**
BHKW	41
Feststoffeintragssystem	20
Rührwerken	14
Pumpen	8
Prozesse	4
Verstopfungen	3

Tab. 8.6: Störungen und Schäden an 31 Biogasanlagen (nach *KTBL [2009]*)

Komponente	**Störungen pro Jahr (bezogen auf alle 31 Anlagen)**
BHKW	532
Feststoffeintragssystem	151
Pumpen und Rohrleitungen	96
Rührwerke	83
Biogasprozess	54
Messtechnik	35
Stromausfall	35
Gasspeicher	31
Spannungsschwankungen	28
Steuer- und Regelungstechnik	27
Gasreinigung	23
BHKW-Aufstellraum	19
Heizung	13
Substratzerkleinerung	9
Unkontrollierter Gasaustritt	3
Substratannahme	3
Sonstige	25

Verschiedene Organisationen haben daher im letzten Jahrzehnt versucht, Qualitätskriterien für Biogasanlagen zu definieren, wie z. B. *RAL [2001]* und *VDI [2008]*. Diese Richtlinien geben zwar Hinweise bezüglich Gütekriterien, Anforderungsprofilen, Bauabwicklung, Auswahl geeigneter Maschinentechnik et cetera. Hinweise bezüglich der korrekten, detaillierten Dimensionierung einer Biogasanlage bleiben jedoch diese Werke schuldig. Auch einzelne Autoren (z. B. *Möller [2008]*) haben sich Gedanken über Qualitätsstandards für Bau und Betrieb von Biogasanlagen gemacht.

Tab. 8.7: Verteilung der Prozessstörungen nach *Schünemeyer [2006]* [72]

Komponente	**Anteil [%]**
Schwefelwasserstoff	56
Temperatur	38
Übersäuerung	31
Gasertrag	25
Schaum	25
Schwimmschicht	25
Gasqualität	18
Sinkschicht	6

Tab. 8.8: Verteilung der technischen Störungen nach *Schünemeyer [2006]* [73]

Komponente	**Anteil [%]**
BHKW-Motor, -Generator und –Kupplung	44, 18 bzw. 6
Rührwerke	37
Elektrik (Allgemein)	25
Gasanalyse	25
Rohre	18
Steuerung und Regelung	18
Substrateintrag	18
pH, Redox, Temperatur	12

8.12 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde ein umfangreicher Überblick über die Biogastechnik gegeben, um die Komplexität dieser Materie, in die verschiedenste Aspekte des Anlagenbaus, der biologischen, chemischen und physikalischen Verfahrenstechnik, der Landwirtschaft und der Reststoffentsorgung sowie rechtlich/administrativer Randbedingungen zusammenwirken, zu veranschaulichen. Im Kapitel 9 wird nun genauer auf die Mess- und Automationstechnik eingegangen bzw. die Anforderungen, die die Biogastechnik an diese Disziplin stellt.

[72] Die Daten wurden aus einem Diagramm abgelesen, sodass die Zahlen mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sein könnten.

[73] Die Daten wurden aus einem Diagramm abgelesen, sodass die Zahlen mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sein könnten.

9 Mess- und Automationstechnik auf Biogasanlagen

9.1 Stand der Verbreitung

Der Stand der Mess- und Automationstechnik auf den bisherigen Biogasanlagen kann nach *Wiese et al. [2007]* wie folgt zusammengefasst werden:

Echtzeitmessungen (online): Bis heute werden auf vielen Biogasanlagen keine oder nur wenige Betriebs- und Prozessdaten zeitnah oder gar in Echtzeit gemessen. Selbst einfach zu messende Größen (z. B. Füllstand, Durchfluss, Temperatur, Energieverbrauch/produktion) werden vielfach nicht oder nicht vollständig online gemessen. D. h. auf vielen Anlagen werden diese Betriebsgrößen regelmäßig per Hand erfasst. Wenn derartige Daten dennoch online erfasst werden, dann werden sie in vielen Fällen nur zur Überwachung und nicht zur Steuerung bzw. Regelung eingesetzt. Oft erfolgt weder eine kontinuierliche elektronische Speicherung der anfallenden Daten, noch eine Prüfung der Daten (z. B. auf Plausibilität).

Labormessungen (offline): Da sich einige Parameter noch nicht oder nur zu relativ hohen Kosten online bestimmen lassen (z. B. organische Säuren, Ammonium), sind regelmäßige Laboranalysen in der Anaerobtechnik nach wie vor von großer Bedeutung. Dennoch kann man auch hier beobachten, dass wichtige Prozessgrößen auf vielen Anlagen nicht oder nur selten (z. B.: 1 x pro Monat) erfasst werden. *Henkelmann und Meyer zu Köcker [2011]* geben anhand der Ergebnisse einer Umfrage an, dass sogar 26 % aller Biogasanlagenbetreiber überhaupt keine Laboranalysen durchführen. Dies gilt ebenso für Eingangsstoffe, deren Zusammensetzung in vielen Fällen ebenfalls stark schwanken kann. Hinzu kommt, dass in vielen Fällen, in denen Analysen durchgeführt werden, dies nicht in Übereinstimmung mit den Grundsätzen der analytischen Qualitätssicherung (AQS) erfolgt, wodurch die Aussagekraft der Ergebnisse oft in Frage gestellt werden muss. Die Ergebnisse, die *Henkelmann und Meyer zu Köcker [2011]* bezüglich von Ringversuchen veröffentlichten, sind daher auch nicht sonderlich ermutigend: So lagen bei Ringversuchen 8 von 37 Teilnehmern bei der Bestimmung der Essigsäurekonzentration – zum Teil weit – außerhalb der Toleranzwerte von ± 450 mg/l um den Mittelwert von ca. 2.300 mg/l; die Autoren fordern daher weitere Anstrengungen zur Etablierung einer AQS für Biogasanlagen.

Abb. 9.1: Händisch geführtes Betriebs- und Stoffstromtagebuch (links), Thermometer zum Ablesen der Temperatur in einem Fermenter (Mitte), Bedienfeld und Vorortbedienung einer größeren Biogasanlage (rechts) (Bildquellen: Autor)

Automation: Viele Biogasanlagen sind bis heute nicht oder nur geringfügig automatisiert, d. h. diese Anlagen werden überwiegend per Hand betrieben; im Ausland (z. B. Volksrepublik China) gilt dies zum Teil sogar für Anlagen, die nach 2010 gebaut wurden. Wenn man

Automation vorfindet, so handelt es sich in der Regel um einfache Konzepte (z. B. Fütterungssteuerung auf Basis von Wägezellen). Viele Biogasanlagen sind zudem nicht mit Prozessleitsystemtechnik ausgestattet oder die verwendeten Leitsysteme genügen nicht modernen Standards, wie wir sie aus der Industrieautomation kennen (Abb. 9.1). Selbst dort, wo moderne Leitsysteme zum Einsatz kommen, wird vielfach kaum Gebrauch von den umfangreichen Funktionalitäten dieser Systeme gemacht, sondern nur eine Grobvisualisierung und Grobbedienung realisiert.

Die hohe Fehlerquote im Bereich der Elektrik, Messtechnik und Automationstechnik der bisherigen Systeme (siehe Tabelle 8.6) verdeutlicht zudem die Notwendigkeit einer deutlichen Verbesserung dieser Komponenten.

Vom Blickpunkt der EMSR-Technik aus, entsprechen somit die meisten heutigen Biogasanlagen sogenannten Blackbox-Systemen, da keine oder nur wenige Betriebs- und Prozessinformationen zur Verfügung stehen. Diese Anlagen lassen sich daher nur schwer analysieren und optimieren. Die Praxis zeigt, dass viele Biogasanlagen suboptimal bzw. in kritischen Lastbereichen arbeiten, was wiederum die Gefahr einer Prozessstörung deutlich erhöht. Z. B. beträgt die durchschnittliche Auslastung älterer hessischer Biogasanlagen laut einer Studie (*HMUIRV [2006]*) nur 62 %, was u. a. mit fehlender Mess-/ Automationstechnik und fehlerhafter Maschinentechnik begründet wird. Aus dieser und anderen Quellen stammen die nachfolgen Zitate:

„[…] Die steigenden Anlagengrößen, die Anforderungen an den Betrieb der Anlage sowie der Einsatz verschiedener Substrate führen dazu, dass mess- und regeltechnische Komponenten zunehmend zur Überwachung und Steuerung von Biogasanlagen Verwendung finden. […]“

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (BayLfU [2004])

„[…] Auch die jährlichen Volllaststunden der BHKWs lagen mit durchschnittlich 6.000 unter der wirtschaftlich erstrebenswerten Marke von 7.500 – 8.000 h/a. Die Ausrüstung der untersuchten Anlagen mit erforderlichen Messstellen, Regel- und Steuerungssystemen sowie einer Datenerfassung und –auswertung war ungenügend. […]“

Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (HMUIRV [2006])

„[…] Messtechnik ist für einen effizienten Anlagenbetrieb unabdingbar. […]“

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR (Hrsg.) [2005])

„[…] Die Prozessüberwachung […] lässt in den meisten Fällen zu wünschen übrig. Eine […] „Kontrolleinrichtung“ ist für eine etwa 10 Jahre alte, kleine Anlage durchaus zeitgemäß, aber neue Anlagen sind sehr komplex und bedürfen einer durchgehenden, genauen Überwachung […]. Dennoch wird auch bei neueren, komplexen Anlagen die betriebliche Überwachung oft nicht ernst genug genommen, und auch die Möglichkeiten einer komplexen Steuerungstechnik häufig nicht genutzt […]. Nahezu alle Landwirte sprechen von „Gefühl“ und „Gespür“ […]. Die Prozessüberwachung muss zudem bei fast allen Anlagen als unzureichend bezeichnet werden. […] bedeutet in vielen Fällen, dass die Potenziale ihrer Biogasanlage nicht ausgeschöpft und technische sowie biochemische Fehler zu spät entdeckt bzw. unbefriedigend gelöst werden können. […]“

ForschungsZentrum für Erneuerbare Energien (FZEE [2006])

„[…] Die Überwachung des Biogasprozesses sollte kontinuierlich, auch durch Analysen direkt vor Ort, erfolgen. Dadurch wird eine Optimierung möglich und Störungen können frühzeitig erkannt werden. […]. Um einen stabilen Anlagenbetrieb zu erreichen und Störungen zu vorzubeugen, ist

es wichtig, die Parameter regelmäßig zu messen und über einen langen Zeitraum zu dokumentieren und zu beobachten. Nur so können anlagenspezifische Optimalbereiche abgeleitet werden. [...]."

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL [2009])

„[...] Die messtechnische Ausstattung moderner Biogasanlagen (Anm.: Anlagen die nach 2004 gebaut wurden!) ist zum Großteil unzureichend in Hinblick auf die reguläre Prozesskontrolle und frühzeitige Erkennung von Störungen. [...]"

Prof. Dr. Weiland, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (Weiland [2007])

Weiland [2007] hat zudem eine statistische Auswertung diverser auf Biogasanlagen im Einsatz befindlichen Biogasanlagen erstellt; es handelt sich dabei um Biogasanlagen, die ab 2004 erbaut wurden und damit relativ neu waren (Tab. 9.1).

Tab. 9.1: Häufigkeit diverser Messgeräte auf Biogasanlagen, die zwischen 1999 und 2003 (nach *Rieger und Weiland [2006]*) bzw. nach 2004 gebaut wurden (nach *Weiland [2007]*). (Anm.: Die Zahlen wurden aus Diagrammen abgelesen, die in den genannten Publikationen erschienen sind und können dadurch geringfügige Ungenauigkeiten aufweisen.)

Messgerät	Biogasanlagen zwischen 1999 und 2003 (*Rieger und Weiland [2006]*)	Biogasanlagen ab 2004 (*Weiland [2007]*)
Gasdurchfluss	78 %	70 %
Gastemperatur	k.A.	78 %
Gasanalysator	36 %	61 %
Stromzähler für Energieproduktion	91 %	95 %
Stromzähler für Energieverbrauch	k.A.	76 %
Substratmenge (flüssig)	k.A.	36 %
Substratmenge (fest)	34 %	78 %
Wärmemenge	18 %	82 %
bis auf Wärmemenge (komplett)	k.A.	25 %
Sonstige Messgeräte	6 %	4 %

Diese Übersicht verdeutlicht, dass viele Biogasanlagen im Bereich der Gasmessungen (Gasdurchfluss, Gasanalyse und Gastemperatur) erhebliche Defizite haben. Durchflussmessungen für Substrate o. ä. sind nur relativ selten vorhanden. Selbst eine Verwiegung der dosierten Feststoffe erfolgt noch nicht auf allen Biogasanlagen. Lediglich dort, wo Messtechnik finanziell abrechnungsrelevant ist, d. h. bei Strom- und Wärmemengenzählern ist eine umfangreiche Verbreitung gegeben. Besonders auffällig ist, dass Qualitätsmessungen („Sonstige Messgeräte"), wie z. B. pH oder Redox, nur in seltenen Fällen zum Einsatz kommen: In weniger als 4 % der Fälle kommen noch weitere Messgeräte zum Einsatz. So kam z. B. nur auf 2 (!!!) der untersuchten 400 Anlagen eine Redox-Messung zum Einsatz. Vergleicht man die Daten aus Tabelle 9.1 so stellt man aber fest, dass die Ausstattung besser geworden ist.

Die geringe Verbreitung von Mess- und Automationstechnik auf Biogasanlagen ist umso verwunderlicher, wenn man bedenkt, wie viel Automations- und Sicherheitstechnik bereits in den Gütern unseren täglichen Bedarfs vorhanden ist, wie der in Tabelle 9.2 dargestellte Vergleich zwischen einer Biogasanlage und einem PKW zeigt: Obwohl die Kosten für einen PKW nur einen Bruchteil der Investitionskosten einer Biogasanlage ausmachen, die Beanspruchung einer Biogasanlage ungleich höher ist als bei einem PKW und Unfälle auf einer Biogasanlage nicht nur erhebliche Personenschäden, sondern auch finanzielle Schäden – bis hin zur Gefährdung der wirtschaftlichen Existenz – zur Folge haben können, verzichten viele Biogasanlagenbetreiber sogar auf ein Mindestmaß an Sicherheitseinrichtungen, wohingegen jeder Normalbürger heute kein Auto mehr kaufen würde, das nicht über die in Tabelle 9.2 dargestellten Mindestsicherheitsstandards verfügt. Mit einer Professionalisierung der Branche werden aber zumindest in den Industrieländern zunehmend Anlagen gebaut, die bezüglich Ausstattung und Komplexität mehr und mehr mit industriellen Produktionsanlagen vergleichbar sind. In diesem Zusammenhang gewinnt der Einsatz von Mess- und Automationstechnik auf Biogasanlagen für Zwecke der Prozesskontrolle und der frühzeitigen Erkennung von Störungen langsam an Bedeutung.

Tab. 9.2: Vergleich einer Biogasanlage mit einem PKW hinsichtlich Kosten, Nutzen, Sicherheitsaspekten und Gefährdungspotenzial (Quelle: Autor)

Parameter	PKW	Biogasanlage
Investitionskosten	i.d.R. < 100.000 €	i.d.R. > 1.000.000 €
Laufdauer Motor pro Jahr	i.d.R. < 500 h/a	i.d.R. > 7.500 h/a
Einnahmen pro Jahr	i.d.R. keine Einnahmen	i.d.R. > 400.000 €/a
Gesamtkosten	i.d.R. < 20.000 €/a	i.d.R. > 350.000 €/a
Nutzungsdauer	12 Jahre	20 Jahre kalkuliert
Intensität der Belastung	selten am Limit (Motor und Fahrwerk meist unterlastet)	Motor und/oder Biologie oft am Limit betrieben
Zugangsvoraussetzung	Führerschein	keine
Erforderliche Substrate	i.d.R. < 3 t Kraftstoff	i.d.R. > 5.000 t Gärsubstrate
Sicherheitseinrichtungen (nur Standardausstattung)	Sicherheitsgurt Knautschzone Airbag Anti-Blockier-System (ABS) Anti-Schlupf-Regelung (ASR) Elektronisches-Stabilitäts-Programm (ESP)	(Gasanalysator) Gaswarngerät Über-/Unterdrucksicherung
Gefahr bei Unfall	Personenschäden (Verletzung/Tod)	Personenschäden (Verletzung/Tod) Umweltschäden
Auswirkungen bei (dauerhaften) Betriebsstörungen	gering, da Alternativen (z.B. Leihwagen/ÖPNV) möglich	hoch (ggf. Insolvenz des BGA-Betreibers)

9.2 Warum wird auf Biogasanlagen so wenig gemessen?

Gründe dafür, dass zurzeit auf Biogasanlagen so wenig gemessen wird, sind unter anderem in den folgenden Punkten zu suchen:

- Die Messbedingungen auf Biogasanlagen sind herausfordernd (*Wiese [2007B]*): Bei Biogassubstraten, beim Fermenterinhalt und dem Gärrest handelt es sich meist um inhomogene Vielstoffgemische, die sich prinzipiell schwierig messen lassen. Darüber hinaus sind darin Schmutzstoffe (z. B. Fette) enthalten, die ggf. kurze Reinigungsintervalle für die Messgeräte erforderlich machen. Weiterhin enthaltene zopfende und verstopfende Inhaltsstoffe können nicht nur Maschinen (z. B. Rührwerke) und Armaturen (z. B. Schieber) in ihrer Leistungsfähigkeit beeinträchtigen, sondern auch Messgeräte und damit ebenfalls kurze Reinigungsintervalle zur Folge haben; Steine oder andere Grobstoffe können auch zu mechanischen Schädigungen von Sensoren führen. Viele Messgeräte (z. B. Füllstand/ Temperatur an Reaktoren) befinden sich zudem im Freien und müssen Wind und Wetter standhalten. Ein weiteres Problem stellen Störstoffe dar, da diese zu Querempfindlichkeiten von Messgeräten führen können. Weiterhin können Schadstoffe einen erheblichen Einfluss auf die Alterung von Sensoren haben: Ein bekanntes Beispiel stellt die Elektrodenvergiftung von pH-Elektroden durch Sulfide dar. Schließlich stellen einzelne Bereiche von Biogasanlagen Ex-Zonen dar. D. h. hier eingesetzte Messtechnik muss über einen entsprechenden Ex-Schutz verfügen, was eine zusätzliche finanzielle Belastung darstellt. Dies führt dazu, dass die Standzeiten vieler Messgeräte gering bzw. die Ausfallquoten hoch sind: Hieraus resultiert wiederum, dass viele Anlagenbediener bereits nach kurzer Zeit von der Messtechnik genervt sind und fortan eine ordnungsgemäße Pflege und Wartung von Geräten unterlassen.
- Wegen der zuvor beschriebenen Randbedingungen können Messungen oft nicht auf den Biogasanlagen in Echtzeit durchgeführt werden, sondern werden nach einer Probennahme im Labor durchgeführt. Hieraus resultieren Transport- und Konservierungsprobleme sowie zusätzliche Kosten. D. h. trotz hoher Kosten kann sich der Betreiber oft nicht sicher sein, dass die Ergebnisse aus dem Labor stimmen, da zum Beispiel zwischen Probenahme und Probenanalyse oft mehrere Tage liegen und auch bei der Probennahme zahlreiche Fehler passieren können.
- Da es erst wenige Biogasanlagen mit moderner Mess- und Automationstechnik vorhanden sind, lässt sich der Mehrwert dieser Technik – insbesondere der finanzielle Vorteil – noch nicht ausreichend beziffern. Wegen der zuvor beschriebenen Randbedingungen sind die Kosten für die online-/offline-Analysen aber hoch: Hieraus resultiert, dass viele Biogasanlagenbetreiber nur sehr selten messen. Viele Betreiber von Biogasanlagen vertrauen daher ihren eigenen Erfahrungen mehr als der Mess- und Automationstechnik: „Wenn ich eine 10.000-Liter-Kuh füttern kann, dann kann ich auch eine Biogasanlage betreiben!“. Manche Betreiber fahren ihre Biogasanlagen sogar komplett im „Blindflug“.
- Lange war der Markt für Biogasmesstechnik für die großen Hersteller von Mess- und Automationstechnik wenig attraktiv, sodass Nischenanbieter ihre Produkte in geringen Stückzahlen angeboten haben. Hieraus resultierten zum Teil hohe Stückpreise, da die Allgemeinkosten (Forschung und Entwicklung, Marketing etc.) auf eine geringe Anzahl von Messgeräten umgelegt werden mussten.

- Viele Anlagenbetreiber stammen aus der Landwirtschaft und sind hohe Arbeitsbelastung und händische Arbeit gewohnt. Da Arbeitszeit nicht direkt in Form von Stundenlöhnen abgerechnet wird („Eh-da-Kosten“), sondern der Lohn der harten Arbeit das ist, was am Ende des Jahres in der Gewinn- und Verlustrechnung übrig bleibt, ist man gegenüber Arbeitszeiteinsparung sehr viel weniger sensibel als im Gewerbe und der Industrie. Professionelle und institutionelle Investoren in Biogasprojekte sehen dies naturgemäß anders und versuchen die Personalkosten so gering wie möglich zu halten.
- Auf weitere vielfach anzutreffende Vorurteile und Bedenken gegenüber dem Einsatz von Mess- und Automationstechnik wurde bereits im Kapitel 3.1 eingegangen.
- Unter denen bis 2008 geltenden EEG-Einspeisevergütungen und bei moderaten Substratkosten waren auch bei einem suboptimalen Anlagenbetrieb auskömmliche Renditen erreichbar, sodass der Handlungsdruck für eine Optimierung gering war. Aufgrund der rückläufigen Einspeisevergütung ist dies bei Neuanlagen jedoch immer seltener der Fall.

9.3 Warum sollte auf Biogasanlagen mehr Mess- und Automationstechnik zum Einsatz kommen?

Der Betrieb von Biogasanlagen wird immer komplexer, da mittlerweile nicht mehr nur eine Maximierung der Stromproduktion angestrebt wird. Aufgrund der zuvor beschriebenen Randbedingungen gilt es zunehmend multi-kriterielle Optimierungsprobleme zu lösen:

- Maximierung der Energieproduktion → Erhöhung der Einnahmen
- Maximierung der Durchsatzleistung → Erhöhung der Einnahmen
  → Vermeidung baulicher Erweiterungen
- Minimierung der Roh- und Betriebshilfsstoffe → Reduzierung der Ausgaben
- Verwendung verschiedener Eingangsstoffe → Nutzung von Marktchancen
- Minimierung der Betriebsrisiken → hohe Anlagenverfügbarkeit/-auslastung
- Minimierung des Eigenenergiebedarfs → Reduzierung der Ausgaben
- Minimierung des erforderlichen Arbeitseinsatzes → Reduzierung der Ausgaben
- Vermeidung von Havarien → keine Emissionen und Leckagen
- Erhöhung der Arbeits- und Anlagensicherheit → Einhaltung von Vorschriften
- Dokumentation des Anlagenbetriebs → Einhaltung von Vorschriften

Komplexe Probleme lassen sich jedoch auch hier nicht mehr nur alleine durch den „Einsatz des gesunden Menschenverstands“ lösen, umfangreiche Daten nicht mehr alleine per Hand dokumentieren. Hierzu bedarf es dem Einsatz von umfangreicher Mess- und Automationstechnik.

Schnell [2006] ordnet die Gründe für den Einsatz von Mess- und Automationstechnik auf Biogasanlagen verschiedenen Zielgruppen zu (Tab. 9.3). Allerdings dürfte die Interessenslage in vielen Fällen die Grenzen der Zielgruppe überschreiten: So ist sicherlich nicht nur die Bank, sondern auch der Betreiber an einem schnellen Mittelzufluss interessiert, ebenso wie der Betreiber auch kein Interesse an Schäden und Unfällen an seiner Anlage haben kann.

Weiterhin dient nach *Schnell [2006]* der Einsatz von Messtechnik in den verschiedenen Medien den Folgenden Aufgaben:

- Biogas (Emissionen, Optimierung der Energieerzeugung, Mengenbilanz, Zustand des biologischen Prozesses)
- Feststoffe (Mengenbilanz, Qualitätskontrolle des Inputs, Abrechnung mit Lieferanten, Prognose der Gasproduktion)
- Flüssigkeit (Mengenbilanz, Qualitätskontrolle des Inputs, Abrechnung mit Lieferanten, Prognose der Gasproduktion, Düngewert, Zustand des biologischen Prozesses)

Wie die Mess- und Automationstechnik eingesetzt werden kann, um diese Ziele zu erreichen, wird nachfolgend in den Kapitel 9 und 10 anhand von Beispielen genauer beschrieben.

Tab. 9.3: Zielgruppen und ihr Interesse am Einsatz von Messtechnik auf Biogasanlagen (nach *Schnell [2006]*)

Zielgruppe	**Interesse am Einsatz von MSR-Technik aus folgenden Gründen …**
Banken, Finanziers	Bessere Auslastung der Technik – Schnellerer Rückfluß des eingesetzten Kapitals
Betreiber	Betriebssicherheit
Berufsgenossenschaften, Versicherungen	Sicherheit gegen Schäden und Unfälle, auch Personenschäde
Umweltbehörden	Emissionen (Verluste im Normalbetrieb, Austreten von Substraten bei Störfällen)
Wissenschaftler	Bessere Daten für mathematische Prozessmodelle
Genehmigungsbehörden, Stromversorger	Nachweisführung für die Erfüllung gesetzlicher Vorschriften (EEG, Bioabfall-Verordnung)
Zertifizierungsorganisation, Ökostromanbieter	Freiwillige Selbstverpflichtung (z. B. kein Einsatz gentechnisch veränderter Substrate)

9.4 Was gilt es beim Einsatz von Messtechnik zu beachten? [74]

9.4.1 Was kann man auf Biogasanlagen online messen?

Nachfolgend werden Parameter aufgelistet, die bereits heute online oder quasi in Echtzeit (z. B. 1 x pro Stunde) gemessen werden können. Bezüglich weiterer Informationen wird auf das Kapitel 3 „Übersicht über Messgeräte auf Klär- und Biogasanlagen“ verwiesen:

Flüssig-/Festphase

- Füllstand (Lagerbehälter, Anaerobreaktoren o. ä.) → online
- Durchfluss (Beschickung, Pumpstationen o. ä.) → online
- Temperatur (Pumpstationen, Anaerobreaktoren, Heizkreise o. ä.) → online
- pH-Wert (Pumpstation, Anaerobreaktoren o. ä.) → online

[74] In Anlehnung an *Wiese [2007B],* aber ergänzt um umfangreiche Fremdliteratur.

- Redox (Pumpstation, Anaerobreaktoren o. ä.) → online
- TS-Konzentration (Pumpstationen, Anaerobreaktoren o. ä.) → online
- Leitfähigkeit (Beschickung, Reaktionsräume) → online
- Org. Säuren/Ammonium (Anaerobreaktor) → online

Gasphase (Biogas)

- Gaszusammensetzung (CH_4, CO_2, O_2, H_2S) → online
- Gasdurchflussmessung (ggf. Normkubikmetern) → online
- Gasfüllstand im Gasspeicher → online
- Gasdruck (+/-) → online
- Gastemperatur → online

Beschickung

- Art (Substrattyp) → ggf. online [75]
- Gewicht (Feststoffe) → online
- Volumenstrom (Flüssigkeiten) → online
- TS/TM-Konzentration (Pumpstationen, Feststoffdosierer o. ä.) → online

Energieverbrauch und Betriebszustände

- Maschinen und Apparate (Status, Schaltspiele o. ä.) → online
- Betriebszustand (Betriebsstatus/-dauer) → online
- Energieverbrauch / Leistungsaufnahme → online

9.4.2 Was ist sinnvoll auf Biogasanlagen online zu messen?

Im Zusammenhang mit den Kosten von Messtechnik stellt sich somit die Frage, welche Messgrößen auf Biogasanlagen sinnvoller Weise erfasst werden sollten. Aus Sicht des Autors gelten dabei folgende Auswahl- und Anwendungskriterien:

- Einfach und kostengünstig zu erfassende Prozessgrößen (Füllstände, Durchflüsse, Temperatur, Energieverbrauch, Betriebsstunden etc.) sollten auf modernen Anlagen kontinuierlich erfasst werden!
- Bei größeren Anlagen ist es technisch und wirtschaftlich sinnvoll, auch schwierigere Prozessgrößen (z. B. Gasdurchfluss, Gaszusammensetzung) kontinuierlich zu erfassen!
- Erfasste Messgrößen sollten nach Möglichkeit in Steuerungs- und Regelungsstrategien eingebunden werden!
- Die erfassten Messdaten sollten – nach Möglichkeit automatisch – auf Plausibilität (z. B. durch Bilanzen, Drift-/Shift-Prüfung) kontrolliert werden!
- Auf Basis zuverlässiger online/offline-Messdaten können weitere Prozessgrößen bzw. Betriebskennzahlen abgeschätzt werden!
- Bereits mit überschaubaren Mitteln können damit Biogasanlagen in Greybox-Systeme verwandelt werden, die sich einfacher analysieren und optimieren!

[75] In Ausnahmefällen ist eine online-Erfassung möglich (z. B. wenn Lagerbehältnisse immer mit den gleichen Substraten beschickt werden)

9.4.3 Wozu können Messgeräte eingesetzt werden?

Der Einsatz von online-Messgeräten dient nicht nur der Überwachung wichtiger Prozessgrößen, sondern gestattet in vielen Fällen auch die Einbindung in Steuerungs- und Regelungskonzepte. Die Tabellen 9.4 bis 9.7 zeigen die Wirklinien wichtiger Messgeräte. Die Tabellen basieren dabei auf *KTBL [2007]* und wurden durch eigene Erfahrungen und Überlegungen des Autors durch zusätzliche Messgeräte und/oder Anwendungen ergänzt. Wie die Nutzung dieser Messgeräte im Einzelnen aussieht, wird in den nachfolgenden Abschnitten sowie im Kapitel 10 anhand von Beispielen noch dargestellt.

Tab. 9.4: Wirklinien von Messgeräten im Bereich der Pumpstationen, Feststoffdosierer und Anaerobreaktoren (Teil 1) (modifiziert/ergänzt nach *KTBL [2007]*)

Messwert	Nutzen (Auwahl)
Durchfluss	Abschätzung der hydraulischen Verweildauer, Massenbilanzen, Sicherstellung einer ausreichenden Güllezugabe zwecks Erlangung des Güllebonus nach EEG (2009), Grundlage für Stoffstrombilanzen, Dokumentation der abgegebenen Gärreste
Wägezellen	Gewichtsbezogene Fütterung der Anaerobreaktoren, Grundlage für Stoffstrombilanzen und die Ermittlung wichtiger Kennziffern (z. B. Raumbelastung)
TS, oTS	Manipulation der Rührwerke (Taktung, Leistung, Niveau) bzw. der Pumpen (Leistung), Überwachung der flüssigen Inputstoffe und der Reaktoren, Manipulation der Rezirkulation und der Frischgüllezugabe, ggf. in Kombination mit TS/oTS-Erfassung der verwogenen, dosierten Feststoffe → Energiebezogene Fütterung, Bestimmung des TS im Gärrest (→ Abschätzung des Abbaugrades), Grundlage für Stoffstrombilanzen

Tab. 9.5: Wirklinien von Messgeräten im Bereich der Pumpstationen, Feststoffdosierer und Anaerobreaktoren (Teil 2) (modifiziert/ergänzt nach *KTBL [2007]*)

Messwert	Nutzen (Auwahl)
pH, Redox, Leitfähigkeit	Überwachung der flüssigen Inputstoffe bzw. der Prozessstabilität, Manipulation des Rezirkulatstroms bzw. der Frischgüllezugabe, Manipulation der Feststoffdosierung
Füllstand (Flüssigkeit)	Überfüllsicherung, Leckageerkennung, Abschätzung der hydraulischen Verweildauer (ggf. in Kombination mit der Verwiegung der Eingangsstoffe), Bestimmung der Eintauchtiefe von Tauchmotorrührwerken
Druck (+/-) (flüssig)	Überwachung der Pumpen (z. B. Druckstöße)
Temperatur	Überwachung der Prozessstabilität, Heizungsregelung für Fermenter und Nachgärer (Reaktor, Vor-/Rücklauf)
Org. Säuren, FOS, Ammonium	Überwachung Prozessstabilität (ggf. in Komb. mit pH/Temp.), Manipulation des Rezirkulatstroms bzw. der Frischgüllezugabe, Manipulation der Feststoffdosierung
Pufferkapazität, TAC	Überwachung der Prozessstabilität, Manipulation des Rezirkulatstroms bzw. der Frischgüllezugabe, Manipulation der Feststoffdosierung

Tab. 9.6: Wirklinien von Messgeräten im Biogasbereich (modifiziert/ergänzt nach *KTBL [2007]*)

Messwert	Nutzen (Auwahl)
Gasdruck	Ansteuerung des Motors, Manipulation der Substratdosierung (z. B. Zugabe leicht abbaubarer Stoffe), Sicherheitsfunktion (z. B. Alarmierung im Falle eines Versagens der mechanischen Über-/Unterdruck-sicherungen)
Gasfüllstand	Ansteuerung des Motors, Manipulation der Substratdosierung
CH_4, CO_2, H_2S	Überwachung der Prozessstabilität, Dosierung von Fällmitteln, Ansteuerung des Motors (CH_4)
O_2, H_2S	Steuerung/Regelung der biologischen Entschwefelung, Dosierung chemisch-physikalischer Fällmittel zur H_2S-Reduktion
Gasdurchfluss	Überwachung der Prozessstabilität, Manipulation der Substratdosierung, ggf. Normierung mit Gasdruck/-temperatur
Spezifischer Gasdurchfluss	Abschätzung der spezifischen Gasbildungsrate in Abhängigkeit des Gasdurchfluss und der dosierten Gärsubstrate (z. B. in Kombination mit Wägezellen)
Ex-Gase, H_2S	Raumüberwachung: Ex-Abschaltung, Detektion toxischer Gase, Ansteuerung von Raumlüftern

Tab. 9.7: Wirklinien von Messgeräten (Sonstiges) (modifiziert/ergänzt nach *KTBL [2007]*)

Messwert	Nutzen (Auwahl)
Dichte	Manipulation der Rührwerke, Manipulation des Rezirkulatstroms bzw. der Frischgüllezugabe, Manipulation der Feststoffdosierung
Strömung	Manipulation der Rührwerke
Stromaufnahme Rührwerke	in Einzelfällen Rückschlüsse auf Viskosität möglich
Stickstoff, Kalium, Phosphor	Bestimmung des Düngewertes im Gärrest, in Kombination mit einer Durchflussmessung für eine marktgerechte Bepreisung der abgegebenen Gärreste
LKW-Waage	Verwiegung der eingehenden und ausgehenden Stoffe, Grundlage für Stoffstrombilanzen, in Kombination mit TS/Futterwert-Bestimmung eine Grundlage für eine energiegehaltsbezogene Vergütung der Substrate
Wetterstation	„Beweissicherung“ bei der Gefahr einer Geruchsbelästigung der Nachbarschaft (z. B. über Windrichtung), Einbindung in Prozesssteuerung (bei starken Gasdruckschwankungen im Tagesrhythmus, bei Foliendächern bzw. bei Wetterumschwung)
Videoüber-wachung	Überwachung problematischer Bereiche, Bauwerke o.ä.
Endlagenüber-wachung	Überwachung der Schieber, ggf. automatische Spülung der Schieber
Energie (Strom/Wärme)	Stromproduktion/-verbrauch, Wärmeproduktion/-verbrauch → Energie-bilanzen; Verbrauch wichtiger Energieverbraucher → Optimierung des Energieverbrauchs (z. B. Lastabwurfsysteme)

9.4.4 Was kosten Messgeräte?

Beim Einsatz von Messgeräten kommt zwangsläufig die Frage nach den Kosten auf. Hierbei sind neben den Investitionskosten auch die laufenden Kosten (Betriebskosten) von Bedeutung. Tabelle 9.8 gibt eine Übersicht über die Listenpreise einzelner Messgeräte.

Tab. 9.8: Investitionskosten für Messgeräte (Preise ohne Mehrwertsteuer, Angaben auf Basis verschiedener Hersteller, in der Regel mit Einbauarmaturen) (Quelle: Autor)

Nr.	Messgerät	Einheit	Listenpreis
1	Magnetisch Induktive Durchflussmessung	€	≈ 2.000
2	Gasdurchfluss	€	≈ 2.500
3	Gasdruck (+/-)	€	< 1.000
4	Gasanalysator (CH_4, CO_2, H_2S, O_2)	€	4.000-12.000
5	Füllstand (Flüssigkeit)	€	≈ 1.000
6	Füllstand (Gasphase)	€	≈ 2.000
7	pH- oder Redox (digitale Elektrode) (ohne Einbauarmatur)	€	< 700
8	Elektrolytische Leitfähigkeit (digital) (ohne Einbauarm.)	€	< 700
9	TS Sonde (digital) (inkl. Einbauarmatur)	€	≈ 5.000
10	Universaler digitaler Messumformer für 7, 8 und 9	€	≈ 2.500
12	Nah-Infrarot-Spektrometer (NIRS)	€	≈ 30.000
13	Ex-geschützte Videokamera	€	≈ 7.000
14	Professionelle Wetterstation	€	≈ 3.000
15	Präzisionswaage zur TS/TM-Bestimmung	€	≈ 1.500
16	Automatischer Labortitrator	€	≈ 4,000
17	LKW-Waage (inkl. Einbau)	€	≈ 30.000
18	Wägezellen für Feststoffdosierer	€	3.000-5.000
19	Industrielles Prozessleitsystem (ohne Engineering)	€	≈ 15.000

Hierbei gilt es zu beachten, dass die Preise in der Praxis erheblich schwanken können. Unter anderem sind sie von folgenden Punkten abhängig:

- Werden Messgeräte nachgerüstet, können in Einzelfällen erhebliche Zusatzkosten entstehen, da Umbauarbeiten (z. B. an Rohrleitungen, Kernlochbohrungen) und/oder Erweiterungen in der Elektrotechnik (z. B. Verlegung zusätzlicher Kabel) erforderlich sind.
- Einige Messgeräte erfordern den Einsatz eigener Messumformer: Diese speziellen Messumformer erfordern dann erhebliche Zusatzkosten. Nach Möglichkeit sollte daher auf digitale Messgeräte mit Universalmessumformern umgestiegen werden.
- Bei der Lieferung der Messtechnik im Rahmen einer Generalunternehmerleistung werden von den Anlagenbaufirmen teilweise erhebliche Aufschläge auf den Listenpreis verlangt. Dies gilt insbesondere, wenn die Geräte optional angeboten werden. Nach Erfahrung des Autors können diese Zuschläge bis zu 100 % auf den Listenpreis ausmachen. Einzelne

Firmen verlangen zudem für die zusätzliche Einbindung der Messsignale optional angebotener Messgeräte in das Prozessleitsystem deutliche Aufschläge, die zum Teil bereits auch ohne Einbindung des Signals in ein Steuerungs- und Regelungskonzept, d. h. für eine einfache Visualisierung, über 1.000 € liegen können.

- Je nach Einbausituation, Druckverhältnissen und Wartungskomfort können die Kosten für Einbauarmaturen sehr stark schwanken. Insbesondere bei pH-, Redox- und Leitfähigkeit können die Zusatzkosten von wenigen hundert Euro bis weit über tausend Euro liegen.

Die Betriebskosten sind ebenfalls stark unterschiedlich: Während bei einigen Messgeräten kaum Wartungs- und Betriebskosten anfallen (z. B. MID, Gasdurchfluss, Füllstand), können insbesondere bei den Qualitätsmessungen (z. B. pH, Redox, Gasanalyse) erhebliche Zusatzkosten entstehen, wie z. B. für Ersatzelektroden und Prüfgase bzw. das regelmäßige Reinigen der Geräte. Bei derartigen Messgeräten empfiehlt sich auch der Abschluss von Wartungsverträgen. In Summe können dann für derartige Geräte Betriebskosten von mehreren Hundert Euro pro Jahr anfallen.

9.4.5 Auswahlkriterien für Messtechnik auf Biogasanlagen

Bei der Auswahl geeigneter Messgeräte für den Einsatz auf Biogasanlagen müssen die folgenden Aspekte beachtet werden:

9.4.5.1 Prozessmesstechnik versus Labormesstechnik

Eine Übersicht über die Vor- und Nachteile von Labor- und Prozessmessgeräten für Biogasanlagen gibt *Liebetrau [2006]* (Tabelle 9.9).

Tab. 9.9: Vor- und Nachteile von Labor- und Prozessmessgeräten (*Liebetrau [2006]*)

Kriterium	**Labortests**	**Online Messungen**
Verfügbarkeit	nicht permanent verfügbar, oft erst bei auftretenden Störungen gemessen	immer verfügbar
Trend	Trend bei hoher Messdichte erkennbar, sehr aufwendig	da hohe Messdichte gegeben ist, Trend immer erkennbar
Kosten pro Messung	Hoch	Niedrig
Zeitaufwand	Hoch	Niedrig
Verfügbarkeit des Ergebnisses	stark zeitverzögert, entsprechend ist der Regelungseingriff zeitverzögert	annähernd sofort, gut geeignet für sofortige Reaktion
Aussagekraft	Hoch	Unklar

Bei der Auswahl von Messgeräten muss daher stets kritisch hinterfragt werden, ob wirklich ein Echtzeit-Messgerät erforderlich ist oder ob nicht auch regelmäßige Labormessungen ausreichend sind. Daher gilt es bei der Entscheidung auch die folgenden Fragen zu beantworten:

- Welche Messintervalle werden benötigt, um den Prozessverlauf adäquat nachbilden zu können?
- Welche Messgenauigkeit wird benötigt, um den Prozessverlauf adäquat nachbilden zu können? Muss der Messwert wirklich genau sein oder nur den Trend wiedergeben?

- Wie ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis zwischen Prozess- und Labormesstechnik (Investitions- und Betriebskosten)?
- Lassen sich Prozessmessgeräte auch später noch (problemlos) nachrüsten?
- Sollen die Messgeräte „nur“ zur Kontrolle und Überwachung eingesetzt werden oder sollen sie die Grundlage für Steuerungs- und Regelungsstrategien sein? Wie kann ich dann die Qualität der Messdaten langfristig sicherstellen (z. B. AQS)?

Diese Fragen lassen sich nicht allgemeingültig beantworten, da sie zum einen von den spezifischen Randbedingungen der Biogasanlage (z. B. Größe, Substratart) als auch der persönlichen Risikobereitschaft des Anlagenbesitzers abhängig sind.

9.4.5.2 Kriterien bei der Auswahl der Messgeräte

Wie bereits in Abschnitt 9.2 ausgeführt, sind die Messbedingungen auf Biogasanlagen sehr problematisch und stellen hohe Anforderungen an die eingesetzte Messtechnik. Bei der Auswahl sollte daher auf robuste Messtechnik gesetzt werden. Weiterhin ist darauf zu achten, dass ein adäquater Service durch den Hersteller verfügbar ist und eine Ersatzteilversorgung dauerhaft sichergestellt ist bzw. Ersatzteile kurzfristig zur Verfügung stehen. Im Zweifelsfall sollte daher nicht das billigste Messgerät ausgewählt werden, da vermeintlich teurere Messgeräte sich aufgrund der oben genannten Punkte langfristig als günstiger herausstellen können („Lebenszykluskosten“).

Ferner gilt es (besonders bei der Nachrüstung auf Altanlagen) noch weitere Fragen bei der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen:

- Ist eine einfache Anbindung an die Automationsebene der Biogasanlage möglich?
- Sind ausreichende Reserven auf der Automationsebene vorhanden?
- Sind für das jeweilige Messverfahren digitale Messgeräte und Messumformer am Markt verfügbar?
  - Digitale Messgeräte bieten andere Möglichkeiten bezüglich vorausschauender Wartungskonzepte, Fehleranalyse etc. als analoge Messgeräte.
  - Durch digitale Messkonzepte lassen sich ggf. auch Investitionskostenvorteile erzielen (z. B. nur noch eine Controllerplattform).
- Wie aufwändig ist die Wartung der Messgeräte an der entsprechenden Stelle? (z. B. Zugänglichkeit und Bewegungsfreiheit)?
- Wie aufwändig/riskant ist der Einbau eines Messgerätes an einer bestimmten Stelle? (z. B. Kernlochbohrungen bei Spannbetonbehältern, Einbau in Stahlbehälter)?
- Ist die Messstelle repräsentativ für den Prozess?
- Müssen Ex-geschützte Messgeräte eingesetzt werden? (ggf. deutlich höhere Kosten)
- Kann ich es mir finanziell und vom Personalaufwand her leisten, in jedem Reaktionsraum zu messen oder kann ich mit einem Messgerät mehrere Reaktionsräume beproben? (z. B. durch Einbau der Messgeräte in eine zentrale Pumpstation)
- Art des Messverfahrens: in-situ, berührungslos … (Einfluss auf Reinigungs- und Wartungsintervalle).

Auch diese Fragen lassen sich nicht allgemeingültig beantworten, da sie Wesentlich von den spezifischen Randbedingungen der Biogasanlage abhängig sind.

9.4.5.3 Kriterien bei der Auswahl der Automationsebene

Bezüglich dieser Kategorie müssen die folgenden Aspekte beachtet werden:

- Für die Automatisierung von Biogasanlagen kann auf die vorhandenen Komponenten aus der Industrieautomation zurückgegriffen werden. D. h. die Industrieautomation stellt bereits heute alle Komponenten zur Verfügung, um auch Biogasanlagen nach dem Stand der Technik automatisieren zu können (Abbildung 9.2).
- Der intensive Einsatz von Steuerungs- und Regelungstechnik setzt das Vorhandensein automatisch manipulierbarer Maschinen und Apparate voraus (z. B. Automatikschieber)! Dies ist ein wichtiger Aspekt, der bei der Nachrüstung von Biogasanlagen mit Automationstechnik beachtet werden muss und vielfach sogar zum Scheitern der Nachrüstung führen kann (siehe Kapitel 9.8).
- Beim Bau einer Biogasanlage sollten bereits Reserven auf der Automationsebene eingeplant werden, sodass Messgeräte ohne größeren Aufwand nachgerüstet bzw. komplexere Steuerungs- und Regelungskonzepte nachgerüstet werden können!
- Nach Möglichkeit sollten auf der Automatisierungs- und Visualisierungsebene Standardschnittstellen vorhanden sein!

Abb. 9.2: Exemplarische Darstellung von Standardkomponenten aus der Anlagenautomation, die auch auf Biogasanlagen zum Einsatz kommen (Bildquellen: Autor)

9.4.5.4 Kriterien bei der Auswahl der Visualisierungs- und Bedienebene

Der derzeitige Stand der Visualisierungs- und Bedienebene auf Biogasanlagen kann wie folgt beschrieben werden:

- Viele Biogasanlagen sind nach wie vor nicht mit einer modernen Visualisierungs- und Bedienebene auf PC-Basis ausgestattet. In einigen Fällen kommen jedoch zumindest Operator Panels zum Einsatz, die zum Beispiel in Schaltschränke integriert sind. Standard

ist dies mittlerweile bei den Blockheizkraftwerken, die von professionellen Motorpackagern geliefert werden.

- Es kommt die gesamte Bandbreite von Leit- und Visualisierungssystemen zum Einsatz: von Eigenentwicklungen der Biogasanlagenhersteller über gängige Industrieleitsysteme der führenden Automationshersteller.
- Art und Umfang der Möglichkeiten variieren dabei aber sehr stark; dies gilt auch beim Einsatz professioneller Leitsystemtechnik. So gibt es zum Beispiel Biogasanlagen bei denen industrielle Standardsysteme nur für einfachste Visualisierungs-, Melde- und Bedienfunktionen zum Einsatz kommt, während andere Anlagenbauer auf Basis der gleichen Software komplexe Funktionalitäten realisieren, die dem Benutzer wichtige Informationen zur Verfügung stellen und eine einfache Bedienung bzw. Überwachung ermöglichen.
- Es ist weiterhin festzustellen, dass Lieferschnittstellen sich auch auf der Leitsystemebene bemerkbar machen. So gibt es Biogasanlagen auf denen zwei parallele und nicht mit einander verbundene Leitsysteme für die Biogasanlage und das Blockheizkraftwerk nebeneinander existieren.

Eine Übersicht über typische Komponenten und dazugehörige Messwerte, Statusmeldungen und Funktionalitäten, die auf modernen Biogasanlagen in Leitsystemen erfasst werden, geben die Tabellen 9.10 und 9.11. Es gilt hierbei aber zu beachten, dass Art und Umfang von Fall zu Fall sehr stark variieren können, d. h. nur in wenigen Fällen werden nahezu alle der nachfolgend aufgeführten Signale erfasst und dokumentiert.

Tab. 9.10: Komponenten und Messwerte, Statusmeldungen und Funktionalitäten, die auf Leitsystemen von Biogasanlagen erfasst werden (Teil 1) (Quelle: Autor)

Komponente	**Messwerte, Statusmeldungen**
Biogas	Gas- und Gastemperatur, Gasanalyse (CH_4, CO_2, H_2S, O_2)
BHKW (Motor-/ Generatordaten)	Soll-Leistung, Ist-Leistung, Betriebsstunden, Frequenz, cos Phi, Drehzahl Motor, Generatorspannung L1 bis L3, Generatorstrom 1 bis 3, Generatorfrequenz, Energieproduktionszähler (kontinuierlich, Jahr, Monat, Tag, Stunde), Drehzahl Zulaufventilator, Drosselklappenstellung, Schmieröltemperatur und -stand, Lade- und Gasdruck, Kühlwassertemperaturen (Gemischtkühlwassertemperatur, Motoreintritt, Motoraustritt, Rücklauftemperatur Notkühler, Raumtemperatur), Lamda Sondenspannung, Abgastemperatur, Öldruck, Heizwasservor- und -rücklauf, Startzahlen, Letzter Start, Letzter Stop, Nächste Wartung, Brennraumtemperaturen in den Zylindern und und und
Eigenenergiebedarf	Blindleistung, Wirkleistung, cos Phi, Außenleiterspannung, Außenleiterstrom
Entschwefelungsgebläse	Status und Bedienfunktionalitäten (An/Aus), Taktung, Grenzwerte O_2 und H_2S

Tab. 9.11: Komponenten und Messwerte, Statusmeldungen und Funktionalitäten, die auf Leitsystemen von Biogasanlagen erfasst werden (Teil 2) (Quelle: Autor)

Komponente	**Messwerte, Statusmeldungen**
Fermenter, Nachgärer	Volumen, Füllstand, Grenzfüllstand, Gasdruck und/oder Gasfüllstand, Temperatur
Fütterung	Soll-Menge, Ist-Menge, Aktuelles Gewicht, spezifische Dosiermenge, Status und Bedienfunktionalitäten (Auto/An/Aus/ Rechtslauf/Linkslauf), Historienfunktionen
Gärrestlager	Volumen und/oder Füllstand, Gasdruck und/oder Gasfüllstand, Grenzfüllstand
Gaskühlung, Gasverdichter, Gasfackel, Umwälzpumpen, Heizungspumpen, Mischerventile o. ä.	Status und Bedienfunktionalitäten (An/Aus)
Güllegrube, Sickersaftschacht, Lagerbehälter o. ä.	Volumen und/oder Füllstand, Grenzfüllstand
Heizung	Vorlauf-/Rücklauftemperatur, Druck Vorlauf, Wärmemenge
Pumpen	Status und Bedienfunktionalitäten (An/Aus), Durchfluss, Druck (vorher/nachher), Pumpläne
Qualitätsmessungen (pH, Redox, LF etc.)	Ist-Werte, Alarmwerte, Kurvenverläufe
Rührwerke	Status und Bedienfunktionalitäten (An/Aus/Rechts-/Linkslauf), Taktung, Motorspannung/-strom, Leistungsaufnahme, Drehzahl/-vorwahl, Frequenz, Betriebsstunden, Energieverbrauch
Schieber	Status und Bedienfunktionalitäten (Auto, Auf, Zu), Dauer bis zum Erreichen der jeweiligen Endlage (Auf/Zu)
Tragluftgebläse	Status und Bedienfunktionalitäten (An/Aus)
Sonstiges (für diverse Komponenten)	Alarmmeldungen, Alarmwerte, Soll-/Ist-Werte, Ein- und Ausschaltwerte, Min-Max-Werte, Kurvenverläufe, Summenzähler, Betriebsstunden, Wartungsinvervalle, Frostschutzfunktionen, Schaltschranktemperaturüberwachung, spezifische Werte (z. B. Tagesmittelwert)

Nach Auffassung des Autors ist der Informationsgehalt zahlreicher Leitsysteme von Biogasanlagen dennoch sehr gering, d. h. Daten werden zwar oftmals aufgezeichnet, aber in vielen Fällen nicht alle relevanten Informationen dokumentiert und visualisiert. Weiterhin fehlt vielmals die Funktionalität, die im Leitsystem vorhandenen Daten einfach und schnell über Standardschnittstellen herauszulesen bzw. an andere Programme zu übergeben.

9.5 Übersicht über übliche Mess- und Automationskonzepte

Im Abschnitt 9.4.3 wurden zahlreiche Messgeräte und mögliche Wirklinien für Mess- und Automationskonzepte aufgeführt. In der Praxis werden aber nur einige wenige dieser Ansätze auch umgesetzt. Eine Übersicht über gängige Mess- und Automationskonzepte geben die nachfolgenden Abschnitte.

9.5.1 Fütterung von Feststoffen

9.5.1.1 Zeitbasierte Fütterung von Feststoffen

Auf vielen, besonders älteren Biogasanlagen, sind die Dosiereinrichtungen für Feststoffe noch nicht mit Wägeeinrichtungen ausgestattet. Auf derartigen Anlagen erfolgt die Dosierung entweder durch manuellen Eingriff seitens des Bedieners oder durch einfache Fütterungskonzepte, wie z. B. zeitbasierte Ablaufsteuerungen (z. B. 1 x pro Stunde für 5 min Dauer). Eine händische Fütterung ist aber auch immer über die Vor-Ort-Bedienung möglich.

9.5.1.2 Gewichtsbezogene Fütterung

In den letzten Jahren werden Feststoffdosiereinrichtungen zunehmend mit Wägezellen ausgestattet. Hier kann eine Fütterung über den Messumformer der Wägezellen oder über eine übergelagerte Steuerung übernommen werden. Üblicherweise wird bei der gewichtsbezogenen Fütterung eine quasi-konstante spezifische Fütterungsmenge (z. B. Tonnen pro Tag) vorgegeben. Durch die Vorgabe des Fütterungsintervalls (z. B. 1 x pro Stunde) ergibt sich dann die jeweils zu dosierende Fütterungsmenge. D. h. in der Regel wird eine zeitbasierte Ablaufsteuerung mit einem Abbruchkriterium auf Basis der Fütterungsmenge umgesetzt. Abb. 9.3 zeigt einen Ausschnitt aus der Visualisierung einer solchen Fütterungsstrategie auf einem Prozessleitsystem. In der Grafik sind erkennbar die Feststoffmenge im Dosierbehälter (schwarz), die aufsummierte Fütterungsmenge pro Tag (blau), die Fütterung pro Stunde (rot) und die Gesamtmenge (z. B. im laufenden Jahr). Die Parametrierung einer solchen Steuerung erfolgt einfach am Leitsystem durch Eingabe eines Sollwertes für die zu dosierende spezifische Menge (z. B. Tageswert) und ggf. der Wahl des Fütterungsintervalls (z. B. 1 x pro Stunde). In einigen Fällen ist es möglich, sowohl den Fermenter als auch den Nachgärer mit Feststoffen zu beschicken. In diesen Fällen werden die Automationskonzepte so ausgelegt, dass beide Reaktoren wechselseitig nacheinander beschickt werden können.

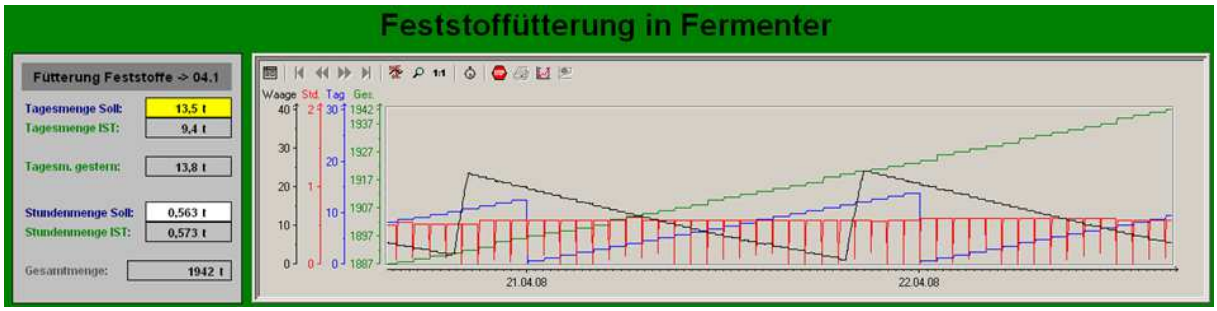


Abb. 9.3: Feststofffütterung in Abhängigkeit einer vorgegebenen Tagesfracht (Bildquelle: Autor)

9.5.1.3 Rezepturverwaltung – Kombination verschiedener Substrate

In Einzelfällen werden verschiedene Substrate zugegeben und/oder in Anmischbehältern zusammengeführt. In diesen Fällen kommen einfache Rezepturverwaltungen zum Einsatz, die sich im Wesentlichen an der in Abschnitt 9.5.1.2 beschriebenen Vorgehensweise orientiert, wie etwa „Dosiere jede Stunde je 2 Tonnen des Substrat A, 1 Tonne des Substrat B sowie 1 Tonne des Substrat C“. Wird ein Anmischbehälter eingesetzt, so sollte dieser daher mit Wägezellen ausgestattet sein. Eine solche Vorgehensweise kann auch dann sinnvoll sein, wenn schnell und langsam abbaubare Biomassen kombiniert werden.

9.5.1.4 Energiegehaltsbezogene Fütterung

Eine Fütterung, die sich am Energiegehalt der Biomasse orientiert, ist bisher – von Einzelprojekten abgesehen – noch nicht üblich. Es bietet sich in diesem Fall an, den TS-Gehalt der Biomasse als Führungsgröße zu nutzen (siehe hierzu auch Abschnitt 10.1.7).

9.5.1.5 Fütterung in Abhängigkeit von Prozesswerten

Hier sind beliebig komplexe Fütterungskonzepte vorstellbar, wie zum Beispiel: Wenn zum Beispiel online gemessene Prozessparamter wie CH_4/CO_2-Konzentration, pH-Wert und Redox-Potenzial für einen stabilen Prozess sprechen, so kann die Fütterungsmenge erhöht werden, wenn nicht genügen Biogas vorhanden ist, um den Motor voll auszulasten. *Tenbrinck [2012]* verweist zum Beispiel auf eine Redox-basierten Fütterungsregelung, die versucht, einen möglichst konstanten Füllstand bzw. Gasdruck in der Gasblase zu erreichen: Bei einem Gasanstieg wird die Fütterungsdauer reduziert, bei einem Gasrückgang wird die Fütterungsdauer erhöht; hierdurch kann unter anderem auch Überschussgasproduktion, welche ggf. abgefackelt werden muss, vermieden werden.

Rudolph [2013] berichtet über ein Mess- und Automationskonzept für einen vorgeschalteten Hydrolysereaktor: Auf einer landwirtschaftlichen Biogasanlage mit 250 kW_{el}-Leistung wurde ein Hydrolysebehälter mit 250 m^3 dem Fermenter vorgeschaltet. Einmal am Tag erfolgt die Beschickung des Hydrolysebehälters mit Hühner- und Rindermist sowie Mais- und Grassilage, wobei an dieser Stelle kontinuierlich Temperatur, pH-Wert und Füllstand gemessen wird. In Abhängig von weiteren Messgrößen (Methangehalt, Stromproduktion) wird einmal pro Stunde die Rezirkulatmenge von der Anaerobstufe zurück in den Hydrolysebehälter und die Fütterungsmenge für den Fermenter festgelegt. Die Vorteile sieht der Autor in einer hohen Auslastung und einem tendenziell höheren Biogasertrag.

9.5.1.6 Sicherheitsfunktionen

In einigen Fällen sind in den Dosierkonzepten auch Sicherheitsfunktionen implementiert. Vielfach üblich ist, die Dosierung an einen Maximalwert im Reaktor zu koppeln. D. h. wenn der maximale Füllstand von der Grenzfüllstandsmessung detektiert wird, erfolgt eine Sperrung der Dosierung, sodass keine weiteren Beschickungen mehr möglich sind, um ein Überfüllen zu verhindern. Da eine zuverlässige und möglichst kontinuierliche Fütterung für eine effiziente Biogasproduktion wichtig ist, sollte eine automatische Alarmierung des Bedieners erfolgen, wenn eine planmäßige Fütterung (z. B. Erreichen des Grenzfüllstands, leere Feststoffvorlage, Fehlfütterung aufgrund eines Fehlers) nicht erfolgt ist.

9.5.2 Fütterung von Flüssigstoffen

9.5.2.1 Einfachste Fütterung von Flüssigstoffen

Auf älteren Biogasanlagen finden man vielfach keine Durchflussmessungen: In diesen Fällen erfolgt die Dosierung entweder durch manuellen Eingriff seitens des Bedieners oder durch einfache Konzepte, wie z. B. zeitbasierte Ablaufsteuerungen (z. B. 1 x pro Stunde für 5 min Pumpen). Alternativ dazu kann diese Dosierung auch an eine Füllstandsänderung im Vorlagebehälter und/oder im Reaktor kombiniert werden. Derartige Funktionalitäten sind oft auch über das Leitsystem möglich.

9.5.2.2 Volumenbezogene Dosierung von pumpfähigen Stoffen

Neuere Biogasanlagen sind häufig bereits mit Durchflussmessungen für pumpfähige Substanzen ausgestattet. Üblicherweise wird bei der volumenbezogenen Dosierung eine spezifische Dosiermenge (z. B. m^3 pro Tag) vorgegeben. Durch die Vorgabe der Dosierintervalle (z. B. 1 x pro Stunde) ergibt sich dann das jeweils zu dosierende Volumen pro Zeiteinheit. Vielfach wird auch eine zeitbasierte Ablaufsteuerung mit einem Abbruchkriterium auf Basis der Fütterungsmenge umgesetzt.

9.5.2.3 Pumppläne

Im Zusammenhang mit der in Abschnitt 9.5.2.2 beschriebenen Dosierung werden gelegentlich auch Pumppläne umgesetzt, wenn mehrere Vorlagebehälter und Reaktoren vorhanden sind. Bei derartigen Pumppläne kann über Pull-Down-Menues mit händischer Eingabe o. ä. vorgegeben werden, dass zum Beispiel jede Stunde von der Güllevorgrube 5 m^3 Gülle in den Fermenter und 5 m^3 Gärsubstrat vom Fermenter in das Gärrestlager gepumpt werden sollen.

9.5.2.4 Min-Max-Steuerungen

In Einzelfällen werden auch Min-Max-Steuerungen verwendet, d. h. bei Erreichen eines Minimum-Wertes erfolgt eine Beschickung des Behälters bis zu einem Maximalfüllstand oder beim Erreichen eines Maximalwertes erfolgt eine Entleerung bis zum Erreichen des Minimumwertes, ggf. auch bis zur vollständigen Entleerung. Neben Reaktoren, die mit wechselnden Füllständen betrieben werden, kommen derartige Konzepte auch zur Bewirtschaftung bzw. Entleerung von Speicherbehältern (z. B. Hygienisierung) zur Anwendung.

9.5.2.5 Fütterung in Abhängigkeit von Prozesswerten

Eine Dosierung von Flüssigstoffen kann auch an die Einhaltung bestimmter Prozesswerte gekoppelt werden:

- Automatisierte Eingangskontrolle: Beispielsweise kann die Fütterung von Flüssigstoffen gestoppt werden, wenn bestimmte Prozessparameter nicht eingehalten werden (z. B. pH-Wert im Flüssigsubstrat) (siehe hierzu auch Abschnitt 10.2.2).
- Energiegehalt: Im Abschnitt 10.1.7 wird ein Beispiel für eine großtechnische NIRS-Applikation vorgestellt. Die NIRS-Technologie erlaubt einen näherungsweisen Rückschluss auf den Energiegehalt (etwa über TS/oTS-Bestimmung), sodass auch eine energiegehaltsbezogene Fütterung von Flüssigstoffen vorstellbar ist.
- Prozessabhängige Fütterung: Im Abschnitt 10.1.6 wird auf die Dosierung von Zuckerrübenmus eingegangen; es bietet sich an, die Dosierung dieses energiereichen Substrates auch an bestimmte Prozessparameter (z. B. Gasfüllstand/Gasdruck) zu koppeln, um hierdurch

kurzzeitige Einbrüche in der Gasproduktion schnell kompensieren zu können. Weiterhin ist es möglich, die Dosierung von Flüssigstoffen auch an Prozessparameter im Fermenter zu koppeln (z. B. Dosierung von Frischgülle oder anderen Stoffen mit hoher Pufferkapazität bei einem Absinken des pH-Wertes).

9.5.2.6 Sicherheitsfunktionen

Auch bei den Pumpprogrammen sind in der Regel Sicherheitsfunktionen implementiert, d. h. die Dosierung zum Beispiel an den Füllstand zu koppeln. D. h. wenn der maximale Füllstand von der Grenzfüllstandsmessung detektiert wird, erfolgt eine Sperrung der Dosierung, sodass keine weiteren Beschickungen mehr möglich sind oder es wird alternativ eine Zwangsentleerung eingeleitet (z. B. bei Kondensat- und Silagesickersaftschächten). Weiterhin ist es üblich, den Druck vor und nach einer Pumpe (z. B. Drehkolbenpumpe) zu überwachen, um Drückstöße zu vermeiden oder im Falle einer Verstopfung eine Notabschaltung sicherzustellen. Da eine zuverlässige und möglichst kontinuierliche Fütterung für eine effiziente Biogasproduktion wichtig ist, sollte eine automatische Alarmierung des Bedieners erfolgen, wenn eine planmäßige Fütterung (z. B. fast leerer Güllebehälter, keine Dosierung aufgrund eines Schieberproblems) nicht erfolgt ist.

9.5.3 Rührwerke

9.5.3.1 Takt-Pause-Betrieb

Üblicher Weise werden die Rührwerke – Tauchmotorrührwerk als auch horizontale/ vertikale/ schräge Langachsrührwerke – im Takt-Pause-Betrieb angesteuert. Hierbei kann der Bediener in der Regel einstellen, wie lange ein Rührwerk laufen soll bevor eine – ebenfalls definierbare – Pause eintreten soll (z. B. 30 min Rührwerk an, 30 min Rührwerk aus, 30 min Rührwerk an, 30 min Rührwerk aus usw.).

9.5.3.2 Koppelung des Rührwerksbetriebs an die Beschickung

In den letzten Jahren werden die Rührwerke auch zunehmend an die Fütterung gekoppelt, d. h. es wird vorgegeben, dass ein Rührwerk mit einer gewissen Vorlaufzeit (z. B. 5 min) vor der Zudosierung von Feststoffen anlaufen sollen und nach einer gewissen Nachlaufzeit (z. B. 10 min) nach Ende der Fütterung die Rührwerke wieder abgeschaltet werden, um das Gärsubstrat schnell und effizient einzumischen. Neben der Taktung wird hierbei (z. B. bei Langachsrührern) vereinzelt auch die Leistung der Rührwerke mittels Frequenzumformern variiert (z. B. während der Fütterung 50 Hz, danach 30 Hz).

9.5.3.3 Alarmierung bei unveränderter Eintauchtiefe

Im Kapitel 10.2.3 wird ein Beispiel vorgestellt, bei dem die Eintauchtiefe der Tauchmotorrührwerke mit Hilfe einer Druckmessung überwacht wird. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass ein Tauchmotorrührwerk nicht zu lange in einer Höhe läuft, um die Bildung unnötiger Sink- und Schwimmschichten zu vermeiden. In diesen Fällen kann auch eine Alarmierung des Bedieners erfolgen, wenn ein Tauchmotorrührwerk über einen längeren Zeitraum (z. B. 2 Tage) nicht in der Höhe variiert wurde.

9.5.4 Sicherheitskonzepte

Der Einsatz von Sicherheitsmesstechnik findet auch in der Biogastechnik seit einigen Jahren langsam aber sicher Verbreitung: Die Arbeit auf Biogasanlagen kann ebenso wie auf Kläranlagen mit Gefahren für Leib und Leben verbunden sein, da das Personal auch hier nicht nur infektionsgefährdet ist, sondern unter Umständen auch explosiblen und toxischen Gasen ausgesetzt sein kann. Des Weiteren kann Gefahr von drehenden Teilen, Quetschungen, Elektrizität und dem zum Teil umfangreichen Verkehr auf der Anlage drohen. Dennoch findet man auch auf modernen Biogasanlagen in der Regel nur die vorgeschriebenen Mindeststandards (z. B. Brandmelder, Not-Aus-Schalter, Ex-Gas-Detektoren). Darüber hinaus gehende Sicherheitstechnik (z. B. Lichtschranken zum Notabschalt von Maschinen) finden sich hingegen praktisch kaum. Besondere Bedeutung hat auf Biogasanlagen die Vermeidung von Unfällen durch explosible und toxische Gase, da es hierdurch bereits mehrfach nicht nur zur Explosionen und Bränden, sondern auch zu tödlichen Arbeitsunfällen gekommen ist. Dabei sind die folgenden Gase besonders problematisch:

- Schwefelwasserstoff (H_2S) riecht in geringen Konzentrationen nach faulen Eiern, ist brennbar, führt zu Atemnot und wirkt als starkes Nervengift. Oberhalb von 200 ppm beginnt eine Lähmung des Geruchssinns, was dieses Gas besonders tückisch für den Menschen macht, da derartige Konzentration im Biogas deutlich über diesen Wert liegen können. Ab 500 ppm wirkt es lebensgefährlich in 30 min, ab 1.000 ppm wirkt es lebensgefährlich in wenigen Minuten und ist bei 5.000 ppm bereits in wenigen Sekunden tödlich, wobei die Bewusstlosigkeit bereits deutlich früher eintreten kann (*IFA [2011]*).
- Methan (CH_4) ist ein farbloses und geruchloses Gas, kann aber explosionsartig mit Sauerstoff, Luft und Chlor reagieren: zwischen einem Luftvolumenanteil von 5 bis 15 Prozent bildet es explosive Gemische (*IFA [2011]*). Da es im Biogas in hohen Konzentrationen (> 50 %) auftritt, geht von Leckagen eine erhebliche Gefahr aus.
- Ammoniak (NH_3) ist ein stark stechend riechendes, farbloses und giftiges Gas, das zu Tränen reizt und erstickend wirkt. Ammoniak-Luft-Gemische sind im Bereich von 15,5 bis 30 Vol.-% Ammoniak explosionsfähig. Ammoniak wirkt auf Haut und Schleimhäute (insbesondere auch auf die Augen) ätzend. Ein Ammoniakgehalt der Luft von 1,5 bis 2,5 g/m³ wirkt nach 30 bis 60 Minuten tödlich (*IFA [2011]*). Vor allem bei Substraten mit hohen Ammoniumkonzentrationen und hohen pH-Werten kann die Gefahr bestehen, dass dieses Gas in höheren Konzentrationen entweicht.
- Kohlenstoffdioxid (CO_2) ist ein farb- und geruchloses Gas. Ab 5 Vol.-%-Anteil kommt es zum Auftreten von Kopfschmerzen, Schwindel und Bewusstlosigkeit. Ab 8 Vol.-% tritt Bewusstlosigkeit bzw. Eintreten des Todes nach 30 - 60 Minuten. Immer wieder kommt es zu Unfällen mit CO_2, da z. B. in Futtersilos und Jauchegruben durch Gärprozesse beträchtliche Mengen an CO_2 gebildet werden können. Wenn nicht für ausreichende Entlüftung gesorgt ist, bilden sich gefährliche Konzentrationen, und zwar aufgrund der höheren Dichte von CO_2 im Vergleich zu Luft vor allem in Bodennähe (*IFA [2011]*). Ähnliche Gefahren können auch von Kohlenstoffmonoxid ausgehen (CO).

Aus diesem Grund sollte auf jeder Biogasanlage ein tragbares Gaswarngerät (Abbildung 9.4, Bild 4) vorhanden sein, welches die oben genannten Gase messen und bei Gefahr durch akustische/optische Signale und ggf. Vibration den Bediener warnen kann.

Auch geschlossene Räume in Ex-Zonen-Bereiche (z. B. BHKW-Raum/-Container) können mit Hilfe stationärer Gasmessgeräte überwacht werden (Abb. 9.4, Bild 3). Auch einzelne toxische Gase (z. B. H_2S) lassen sich so bei Bedarf überwachen (z. B. in Annahmehallen von Kofermentationsanlagen). Auf derartigen stationären Sensoren aufbauend lassen sich aber auch noch andere Sicherheitskonzepte realisieren, wie das Beispiel aus Abbildung 9.4 (Bild 1) zeigt. In dieser Applikation werden auf einer Biogasanlage explosible Gase im Zwischenraum eines Tragluftdachs detektiert: Über einen Probenschlauch wird ein kleiner Abluftteilstrom aus dem Zwischenraum der Gasspeicherfolie und der Wetterschutzfolie zu einem stationären Gaswarnsensor geführt, der bei Gefahr Alarm schägt, so dass Leckagen und/oder Löcher in der Gasmembran detektiert werden können; eine derartige Applikation erscheint auch vor dem Hintergrund der klimaschädlichen Wirkung von Membran interessant, da bei vielen Dächern oft über Monate und Jahre unbemerkt Biogas entweicht. Zur Vermeidung von unkontrollierten Biogasemissionen und als weiterer Schutz der empfindlichen Gasspeicherfolie kann es zudem sinnvoll sein, im Gasraum den Gasdruck mittels eines kontinuierlichen Drucksensors zu erfassen, um bei Bedarf entweder eine Zwangseinschaltung des BHKW zu ermöglichen oder die Notfackel automatisch zu zünden. Hierdurch lässt sich das Risiko einer Havarie (z. B. durch nichtfunktionierende oder falsch eingestellte Überdrucksicherungen) reduzieren. Derartige Drucksensoren lassen sich auch in Druckrohrleitungen unterbringen (z. B. nach Pumpen), um zu vermeiden, dass Druckstöße zu einem Überschreiten der zulässigen Drücke für Einbauarmaturen o. ä. führen. In BHKW-Räumen/-Container besteht die Gefahr von Bränden, sodass hier Brandmelder installiert werden, die ggf. auch ein Notabschalten bzw. durch Einbindung in ein Störmeldesystem auch eine automatische Alarmierung (z. B. per SMS) auslösen können. Im Einzelfall kann die Installation von Brandmeldern auch an anderen Stellen (z. B. Lagerhallen) sinnvoll sein. Eine weitere potenzielle Gefahrenquelle stellen Leckagen dar, wobei es mittlerweile sowohl software- als auch hardwaretechnische Möglichkeiten gibt, diese unmittelbar zu erkennen. Abbildung 9.4 (Bild 2) zeigt daher nur eine Möglichkeit, eine Leckage automatisch zu detektieren: Hierbei handelt es sich um eine bodennahe Grenzfüllstandsmessung in einer zentralen Pumpstation, die im Falle einer Auslösung automatisch die Pumpe abschaltet sowie alle Pneumatikschieber automatsich schließt; weiterhin wird eine Meldung per SMS an den Betreiber abgesetzt. Eine passive Leckageerkennung kann derart erfolgen, dass kontinuierlich der Füllstand in den einzelnen Behältern überwacht wird. Wird hierbei ein Absinken des Füllstands beobachtet, obwohl keine Pumpvorgänge o. ä. aktiv sind, erfolgt eine Alarmierung. Auf die Möglichkeiten zum Einsatz von Videotechnik für Sicherheitszwecke wurde bereits im Abschnitt 3.7 eingegangen.

Zusammenfassend können auf Biogasanlagen die folgenden Sicherheitskonzepte zum Einsatz kommen:

- Not-Aus-Schalter an Maschinen und Schaltschränken
- Raumluftüberwachung (explosible Gase, Brandmelder, ggf. H_2S)
- Leckagedetektion von flüssigen Stoffen
- Überwachung der Füllstände in Behältern → Detektion von Flüssigleckagen
- Überwachung von Leckagen aus Gasspeichern
- Mobile Gaswarngeräte (H_2S, CO, CO_2, NH_3)
- Gasdrucksensoren (z. B. Alarmierung, wenn der Gasdruck im Gasspeicher aufgrund zugefrorener Überdrucksicherungen, zu sehr ansteigt)

- Drucksensoren (z. B. zur Vermeidung von Druckstößen bei Pumpen)
- Überwachung von Grenzwerten bei diversen Aggregaten (z. B. Motortemperaturen)
- Überwachung der Endlagen von Schiebern etc.

Abb. 9.4: Gaswarntechnik: 1 = stationärer Gaswarnsensor zur Detektion explosibler Gase in der Abluft eines Tragsluftdachs, 2 = Grenzfüllstandsmessung als Leckagesensor in einer zentralen Pumpstation, 3 = stationärer Gaswarnsensor zur Detektion explosibler Gase unter der Decke eines BHKW-Raum (Bildquellen: Autor)

9.5.5 Entschwefelung

9.5.5.1 Biologische Entschwefelung

Viele Biogasanlagen sind mit internen biologischen Entschwefelungen ausgestattet: Hierbei wird etwas Luft in den Gasraum eingeblasen, um auf biologischem Wege eine Entschwefelung zu erreichen. Da in der eingeblasenen Luft aber nicht nur der Sauerstoff (21 %) enthalten ist, der für die biologische Entschwefelung benötigt wird, sondern auch Stickstoff (78 %) sowie andere Gase (ca. 1 %), führt dies zwangsläufig zu einer Biogas-Verdünnung. Der Autor hat die Erfahrung gemacht, dass häufig unnötig große Mengen an Luft eingeblasen werden, was dazu führen kann, dass der Motor aufgrund geringer Methankonzentrationen unruhiger läuft bzw. der Wirkungsgrad schlechter wird. Gleichzeitig kann eine zu niedrige Luftzugabe dazu führen, dass die Schwefelwasserstoffkonzentration stark ansteigt, was ebenfalls negative Auswirkungen auf die Motorenleistung haben kann (z. B. Korrosion, Motorölalterung). Einzelne Anlagenhersteller haben daher schon früh angefangen, den Anlagenbetreibern einfache Nomogramme an die Hand zu geben, um die meist manuelle Einstellung der Luftdosierung zu vereinfachen. Derartige Nomogramme geben in Abhängigkeit der Biogasproduktion [m^3/d] und

eines Luftzuschlags in Vol.-% die erforderliche Dosiermenge an Luft [l/h] an. D. h. der Betreiber kann dann die erforderliche Menge am Schwebekegel (siehe Bild 3.17) einstellen. Trotz solcher Nomogramme zeigt die Praxis, dass eine bedarfsgerechte Luftdosierung in der Praxis schwierig ist, was nach Auffassung des Autors die folgenden Ursachen hat:

- Die Wirkzusammenhänge sind den Betreibern nicht ausreichend bekannt: So hat der Autor beispielsweise die Erfahrung gemacht, dass die gemessene Sauerstoffkonzentration im Biogas zum Teil deutlich über 1 Vol.-% lag (d. h. > 5 Vol.-% Luft) und die Belüftung weiterlief, während die H_2S-Konzentration bereits im untersten Bereich (< 10 ppm) lag; dies führt schnell zu einer Biogas-Verdünnung auf deutlich unter 50 % CH_4.
- Die Luftdosierung muss meistens manuell eingestellt werden und die Belüfter befinden sich oft an Stellen (z. B. dunkle Eckbereiche des Betriebsgebäudes), die der Bediener nicht jeden Tag in Augenschein nimmt und/oder wahrnimmt.
- Sowohl die Menge der Fütterung als auch die Art der dosierten Biomasse kann variieren, was zwangsläufig zu Schwankungen der H_2S-Konzentration im Gasraum führt; eine manuelle – zudem oftmals unregelmäßige – Anpassung der Luftmenge scheint daher nicht geeignet, diese Problematik zufriedenstellend zu lösen.

Eine angepasste Automationsstrategie kann daher wie folgt aussehen:

- H_2S und O_2 werden bereits heute auf vielen Biogasanlagen online mittels Gasanalysatoren gemessen: Es bietet sich daher an, die Belüfter der Entschwefelung an die gemessenen Konzentrationen zu takten. So ist es möglich, die Belüfter bei niedrigen H_2S und hohen O_2 auszuschalten. Weiterhin denkbar ist, dass eine Taktung „Betrieb/Pause“ hinterlegt wird, deren Betriebsdauer flexibel der H_2S-Konzentration und deren Veränderung/Trend angepasst werden kann.
- Weiterhin kann eine Alarmierung erfolgen, wenn ein definierter Maximalwert für Sauerstoff und/oder ein Minimalwert für Methan unterschritten werden, um den Anlagenbetreiber auf die Verdünnungsproblematik hinzuweisen.
- Die Zukunft wird es erlauben (bzw. erlaubt es heute ansatzweise) die Zusammensetzung von Gärsubstraten in Echtzeit zu erfassen (siehe Abschnitt 10.1.7): Dadurch könnte der Futterwert der dosierten Biomasse als vorausschauende Komponente in eine Steuerung/ Regelung der Luftdosierung eingebunden oder ggf. auch eine Pumpe zur Dosierung von Eisensalzen angesteuert werden; z. B. wenn eine ausreichende Entschwefelung alleine mit der biologischen Entschwefelung nicht zielführend sein wird.

9.5.5.2 Fällmitteldosierung

In einigen Fällen ist eine biologische Entschwefelung nicht ausreichend, um niedrige H_2S-Konzentrationen zu erreichen. In diesen Fällen können Eisensalze dosiert werden, um das H_2S durch Fällung bzw. chemisch-physikalisch zu entfernen. Oft erfolgt eine ungenaue Zugabe (z. B. durch Zugabe von Säcken mit festen Fällmitteln in den Feststoffdosierer oder durch Zugabe von flüssigen Eisensalzlösungen in den Güllevorlagebehälter). Da auf vielen Biogasanlagen aber H_2S online gemessen werden kann, bietet es sich an, die Zugabe von flüssigen Fällmitteln variabel an die H_2S-Konzentration im Rohbiogas anzupassen. Dies kann am Einfachsten über ansteuerbare Dosierpumpen erfolgen, die mittels Anschlussstutzen das Fällmittel entweder direkt in den Reaktor oder in den Vorlagebehälter dosieren, wobei im letzteren Fall erhebliche Totzeiten auftreten können.

9.5.6 Heizung

Zur Sicherstellung einer möglichst konstanten Temperatur im Reaktor sollte auf eine leistungsfähige Heizungsregelung geachtet werden. Derartige Konzepte lassen sich aus dem Heizungsbau übernehmen und sollen daher nicht Gegenstand dieser Ausführungen sein. Nach Erfahrung des Autors können sehr stabile Ergebnisse erzielt werden, wenn nicht nur die Temperatur im Anaerobreaktor, sondern auch die Temperaturen im Vor- und Rücklauf gemessen werden.

9.5.7 Hygienisierung

Gemäß *EU-Hygieneverordnung [2002]* müssen zahlreiche Kofermente – sofern sie nicht bereits vorhygiensiert wurden – im Laufe des Prozesses einer Hygienisierung unterzogen werden. D. h. das Material wird bei mindestens 70 °C mindestens eine Stunde lang sterilisiert. Die Automatisierung dieses Prozesses stellt daher eine Kombination aus Heizungsregelung und einer pumpenbasierten Steuerung zur Beschickung und Entleerung der Hygienisierungsbehälter dar. Hierbei handelt es sich um einen klassischen Batch-Prozess, wie er in artverwandter Weise auch in anderen Branchen (z. B. Chemieindustrie) weit verbreitet ist. Durch Anbindung an das Prozessleitsystem können alle relevanten Daten (Verläufe der Temperaturen und Füllstände) dokumentiert werden.

9.5.8 Motorensteuerung

Die BHKW werden zwar in der Regel vom Anlagenbauer mitgeliefert, dieser bedient sich aber meist den Diensten von Subunternehmen, die auf die Lieferung schlüsselfertiger Blockheizkraftwerke spezialisiert sind. Derartige Firmen liefern den Gasmotor, Generator und die sonstige Peripherie (inkl. Heizungssystem, Schornstein, Notkühler etc.) sowie der dazugehörigen Schaltschränke und Motorensteuerung. Änderungen an den Schaltschränken und der Motorensteuerung werden in der Regel nicht vorgenommen, d. h. es erfolgt meist nur eine Anbindung des Blockheizkraftwerks (z. B. über PROFIBUS), um die wichtigsten Motorendaten an das Prozessleitsystem zu übergeben; in vielen Fällen erfolgt aber lediglich eine Übergabe der aktuellen Leistung des Motors. Da die Motorensteuerung vom eigentlichen Betrieb des verfahrenstechnischen und prozessbiologischen Teils der Biogasanlage unabhängig ist, soll nicht weiter auf diese komplexe Thematik – die zudem meist als Know-how von den BHKW-Lieferanten streng gehütet wird – nicht näher eingegangen werden.

9.5.9 Gasdruck und Gasfüllstand zur Ansteuerung der Motoren

Auch wenn die eigentliche Motorensteuerung eine unabhängige Komponente darstellt, so werden dennoch oftmals Messsignale von der Biogasanlage an das BHKW übergeben, um dieses An bzw. Aus zu schalten bzw. die gewünschte Motoren-/Generatorenleistung vorzuwählen. Als Führungsgrößen haben sich mittlerweile der Gasdruck und/oder der Gasfüllstand etabliert. Dabei kommen verschiedene Konzepte zum Einsatz (Auswahl):

Min-Max-Regelung

- Vorgabe der Soll-Leistung für das BHKW
- Vorgabe des Gasdrucks zum Starten des BHKW (Maximalwert)
- Vorgabe des Gasdrucks zum Abschalten des BHKW (Minimalwert)

- Wahl der Messstelle als Führungsgröße (wenn sowohl Fermenter als auch Nachgärer über eine Gasdruckmessung verfügen)

Um einen möglichst gleichmäßigen Lauf und möglichst wenige Start-/Stopps sicherzustellen, kann neben diesen Werten auch noch ein Führungswert für den Gasdruck definiert werden, sodass dann zum Beispiel ein PI-Regler, die Feinansteuerung des Motors übernehmen kann. Analog können derartige Konzepte auch auf dem Gasfüllstand aufgebaut werden; weiterhin sind auch Mischformen möglich.

Rampenregelung

Weit verbreitet ist auch der Einsatz von Rampenregelungen, die zum Beispiel wie folgt aussehen können:

- Der Motor wird gestartet, wenn der Gasdruck einen bestimmten Wert (z. B. 1,5 mbar) überschreitet.
- Der Motor wird ausgeschaltet, wenn der Gasdruck einen bestimmten Wert (z. B. 0,5 mbar) unterschreitet.
- Liegt der Gasdruck über dem Oberwert der Rampenregelung (z. B. 1,2 mbar) läuft der Motor mit 100 % Leistung.
- Liegt der Gasdruck unter dem Unterwert der Rampenregelung (z. B. 0,7 mbar), aber noch oberhalb des Abschaltwertes läuft der Motor mit 50 % Leistung.
- Liegt der Gasdruck zwischen dem Ober- und Unterwert der Rampelregelung wird die Leistung des Motors in Abhängigkeit des Gasdrucks linear zwischen 50 % und 100 % angepasst, wie zum Beispiel: 0,7 mbar = 50 %, 0,8 mbar = 60 %, 0,9 mbar = 70 %, 1,0 mbar = 80 %, 1,1 mbar = 90 %, 1,2 mbar = 100 %.

Analog können derartige Konzepte auch auf dem Gasfüllstand aufgebaut werden; weiterhin sind auch Mischformen möglich.

9.5.10 Ansteuerung der Gasfackel

Nach ähnlichem Muster erfolgt die Ansteuerung einer automatischen Gasfackel: D. h. bei Überschreitung eines gewissen Gasdrucks oder Gasfüllstands wird die Gasfackel bei Nichtverfügbarkeit des BHKW automatisch gezündet. Üblich ist hierbei zum Beispiel die Vorgabe eines Einschaltwertes sowie eines Ausschaltwertes, wobei beide Werte einen ausreichenden Abstand zu den Aktivierungswerten der Über- und Unterdrucksicherung aufweisen sollten. In Einzelfällen kann auch die Methankonzentration in die Ansteuerung der Gasfackel eingebunden werden: Bei zu niedrigen Methankonzentrationen (< 45 %) ist eine energetische Nutzung in einem BHKW oft nicht mehr möglich, sodass das Biogas dann entweder abgefackelt oder einer anderen energetischen Nutzung (z. B. Brennkessel) zugeführt werden muss.

9.5.11 Eigenstrombedarf

Eine Biogasanlage produziert nicht nur Strom, sondern sie benötigt auch Strom für die Rührwerke, die Pumpen, das Feststoffeintragssystem, das BHKW et cetera. Aus dem unkoordinierten Zuschalten von elektrischen Verbrauchern können jedoch erhebliche, abrechnungsrelevante Lastspitzen beim Eigenstrombedarf resultieren. Um Lastspitzen zu vermeiden, können daher bei Bedarf weniger wichtige Verbraucher automatisch abgeschaltet werden

(Lastabwurfsysteme). Weitere Möglichkeiten zur Energieeinsparung bzw. Energiekosteneinsparung (Auswahl) sind:

- Einsatz von Frequenzumformern zum bedarfsgerechten Antrieb
- Anpassung der internen Rezirkulationsmenge
- Einbau von Blindleistungskompensationsanlagen
- Rührwerke intermittierend betreiben
- Einrichtung von „General-Aus“-Schaltern für außerhalb der Arbeitszeit nicht erforderliche Verbraucher
- Bewegungsmelder für Freiflächenbeleuchtungen

9.5.12 Monitoring von Qualitätsparametern

Wie bereits ausgeführt, sind vereinzelte Anlagen bereits mit Messgeräten zur Bestimmung sog. Qualitätsparameter ausgestattet, wie z. B. pH, Redox und elektrolytischen Leitfähigkeit. Derartige Messgeräte werden aber bis heute nur selten für Zwecke des Steuerns und Regelns eingesetzt, sondern dienen der Prozessüberwachung bzw. der Warnung.

9.5.13 Einbindung externer Experten in (teil-)automatisierte Prozesse

Im Abschnitt 4.5 wurde auf die häufig geführte Kontroverse „Vollautomatisierung versus Rückbesinnung auf den Menschen“ eingegangen. Auch im Bereich der Automatisierung von Biogasanlagen haben sich daher Mischformen entwickelt, die von dem noch geringen Umfang an Automation begünstigt werden (Auswahl):

Die Fa. UTEC (*Kopiske [2004], Zimmermann [2005]*) entwickelte eine Prozesskontrolle für eine einfache dynamische Betriebsführung von Biogasanlagen mittels Gasqualität (Menge, Methangehalt), pH und Redox. Die Versuche wurden an einem Laborfermenter durchgeführt und auch an einer großtechnischen Anlage getestet. Die Informationen, die zu diesem Vorhaben verfügbar sind lassen vermuten, dass es sich bei dem System eher um eine Entscheidungshilfe handelt und nicht um eine vollautomatisierte Steuerung bzw. Regelung. Kernstück der Entscheidungshilfe ist ein Entscheidungsbaum auf der Grundlage von pH, Redox, CH_4-Konzentration und Gasdurchfluss (Abbildung 9.5).

Einen ähnlichen Ansatz beschreibt *elbebioenergie [2006]*: Hier werden die in Echtzeit auf einer Biogasanlage erfassten Prozessdaten sowie ergänzende Labormessungen einem externen Experten (z. B. über Datenfernübertragung) zugänglich gemacht; weiterhin hat der Anlagenbetreiber die Möglichkeit über ein Servicetelefon direkt mit dem Berater in Verbindung zu treten. Auf der Grundlage der ihm vorliegenden Informationen führt der Berater diverse Auswertungen und Analysen durch. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse gibt der Berater dann in Form von Empfehlungen zur Betriebs- und Prozessführung an den Anlagenbetreiber weiter. Ein derartiges System ist dabei zum Teil unabhängig von Art und Umfang der messtechnischen Ausstattung der betreuten Biogasanlagen.

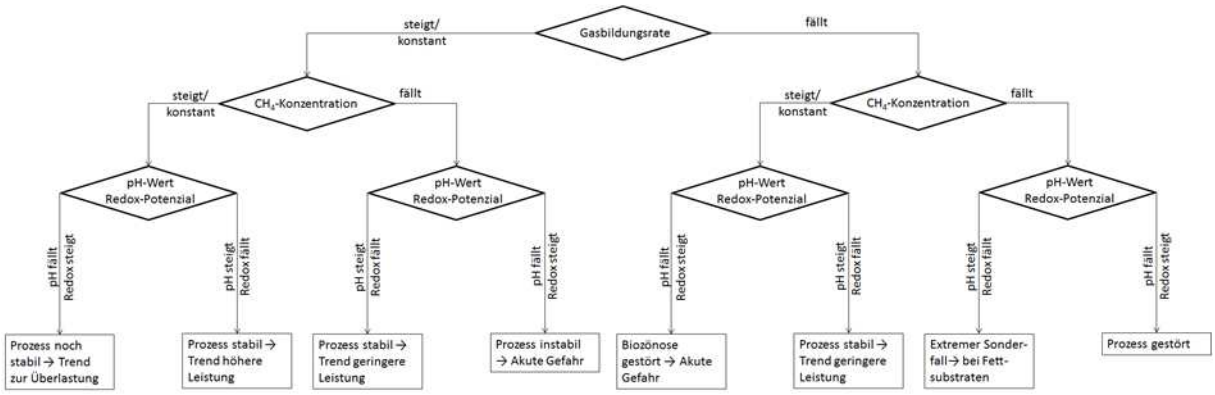


Abb. 9.5: Entscheidungsbaum zur Einschätzung der Prozessstabilität eines Anaerobreaktors nach *Zimmermann [2005]*

Müller et al. [2007] berichten über einen zweistufigen Überwachungsansatz bei dem die eingehenden Daten eines Fernüberwachungssystem (Stufe 1 ggf. mit direkten Warnmeldungen an den Betreiber) anschließend an ein Beratungsunternehmen übergeben werden, welche die Daten wiederum zur Prozessüberwachung mit Hilfe eines Simulationsprogramms verwenden (Stufe 2); aufbauend auf den Simulationsergebnissen werden dann Anweisungen an den Biogasanlagenbetreiber gegeben, um Prozessabstürze o. ä. zu vermeiden. Bei dem Modell handelt es sich um eine Eigenentwicklung, die einzelne Prozesse zusammenfassen (z. B. Hydrolyse und Versäuerung). Das Modell soll nach Auskunft der Autoren für beliebige Substrate und Substratgemische Anwendung finden. Anhand diverser Abbildungen erläutern *Müller et al.* die Modellergebnisse für die Anwendungsfälle „Absturz einer Biogasanlage“ und „Optimale Futterumstellung“.

Neiva Correia et al. [2008] schlagen eine Mischung folgender online- und offline-Parameter zur Prozessüberwachung einer Biogasanlage zur Behandlung biologischer Abfallstoffe vor: TS-Konzentration, Abbaurate, organische Raumbelastung, spezifische Gasproduktion, Methankonzentration, TKN, pH und flüchtige organische Säuren.

Scherer [2008A] berichtet über seine Erfahrungen bei der Überwachung von großtechnischen Biogasanlagen: Er schlägt ein Überwachungskonzept vor, das neben der Ermittlung des FOS/ TAC-Wertes auch auf dem pH-Wert, der Gasproduktion, der Methankonzentration im Biogas, elektolytischen Leitfähigkeit und regelmäßigen Bestimmungen der flüchtigen organischen Säuren mit Hilfe der Gaschromatographie beruht. Weiterhin gibt er Hinweise zur Biogasanlagenbilanzierung mit Hilfe der Kohlenstoffbilanz.

Jacobi [2012] schlägt ein Konzept für die Betreuung der NIRS-Technologie vor: Auf der Biogasanlage wird ein NIRS-basierten Mess- und Automationskonzept zur Überwachung und bedarfsgerechten Substratfütterung aufgebaut. Da es sich aber bei der NIRS-Technologie um eine anspruchsvolle Technologie handelt und partiell erhebliches Expertenwissen erfordert, bedienen sich die Betreiber derartiger Anlagen einem externen Dienstleister, der die Funktionsfähigkeit der Systeme überprüft, die Datenbanken pflegt und die Kalibrationsentwicklung und -pflege übernimmt.

9.6 Forschung und Entwicklung

An Mess- und Automationskonzepten für Biogasanlagen, die über die im Kapitel 9.5 vorgestellten Ansätze hinausgehen, wird schon seit langer Zeit geforscht (z. B. *Ahlgrimm [1983]*). Dennoch haben nur wenige dieser Ansätze den Sprung in die Praxis geschafft. Nachfolgend wird auf einige der veröffentlichten Projekte jeweils kurz eingegangen. Darüber hinaus erfolgt auch ein Überblick über artverwandte Ansätze aus der anaeroben Abwasserbehandlung. Neben diesen Projekten finden sich in der Literatur zahlreiche weitere Vorhaben, die sich mit dem Einsatz von Mess- und Automationstechnik auf Anaerobanlagen beschäftigen, wie z. B. *Punal et al. [2002, 2003]*, *Hansson et al. [2002]*, *Steyer et al. [2002A/B], Mailleret et al. [2003], Liebetrau [2006]* und *Gaida et al. [2013]*. Zum Abschluss dieses Teilkapitels erfolgt eine Diskussion über die Problematik des Transfers aus der Forschung in die Praxis.

9.6.1 Dosier- und Rezirkulatregelungen

Karlsson und Ejlertsson [2007] experimentierten mit der Dosierung von Salzsäure (HCl) zur Regulierung des pH-Wertes während des Vergärungsprozess. Das Laborexperiment diente der Optimierung einer großtechnischen Biogasanlage in Schweden, die proteinhaltige organische Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie verarbeitet. Die großtechnische Anlage arbeitete dabei im mesophilen Bereich (37°C) bei einem pH-Wert von 8,0 bis 8,2 und einer NH_4-N-Konzentration von 4 bis 6 g/l. Die Autoren betrieben zwei Laborfermenter analog zur Großtechnik, in zwei weiteren Laborfermentern wurden hingegen durch HCl-Dosierung der pH-Wert auf 7,6 bis 7,8 abgesenkt und dort konstant gehalten. Trotz dieser geringfügigen pH-Wert-Absenkung konnten die Autoren im konkreten Fall einen Anstieg des Methanertrags von bis zu 45 % beobachten.

Walker et al. [2007] beschäftigten sich im Labor mit der Optimierung eines zweistufigen Anaerobverfahrens zur Behandlung organischer Siedlungsabfälle. Bei der ersten Stufe handelte es sich um einen Hydrolyse-/Versäuerungsreaktor, die Methanbildung erfolgte in einer zweiten Stufe in Form eines anaeroben Filterreaktors. Die Autoren konnten beobachten, dass durch eine Regelung des pH-Wertes sowie der Rezirkulation des Ablaufs des Anaerobreaktors zurück in den Hydrolysereaktor eine siginifikante Leistungssteigerung auftrat, was unter anderem darauf zurückgeführt wurde, dass sich durch diese Maßnahmen die Auswaschung von Methanbakterien deutlich reduzieren lässt.

Bouallagui et al. [2008] untersuchten die Vergärung von Fischabfällen, Schlachthausabwässern, Klärschlamm sowie Frucht- und Gemüseabfällen in anaeroben Labor-SBR-Anlagen. Dabei kamen die Autoren zu der Erkenntnis, dass durch eine geschickte Kombination dieser Substrate auch ohne Chemikalienzugabe ein stabiler Prozess erreicht werden konnte: So erlaubte die Zugabe von Fischabfällen eine stabile und effizientere Vergärung der Frucht- und Gemüseabfälle. Aber auch die Effizienz konnte erhöht werden, wie etwa durch Einstellung eines optimalen C:N-Verhältnisses. Hieraus kann man ableiten, dass auch die Hinterlegung von Rezepturen in einem automatisierten Fütterungskonzept sinnvoll sein kann (siehe Abschnitt 9.5.1.3).

Brooks et al. [2008] erforschten die Möglichkeiten zur Vergärung organischer Reststoffe aus der Zuckerproduktion: Unter anderem testeten sie eine zweistufige Laborbiogasanlage mit je einem Hydrolyse- und Methanreaktor. Im Hydrolysereaktor, der mit bis zu 14 kg CSB/(m^3·d) belastet wurde, wurde der pH-Wert durch Zugabe von Natronlauge auf einem Niveau von pH

5 gehalten, um dauerhaft eine stabile Hydrolyse sicherzustellen. Alternativ zur Zugabe von Natronlauge erwies sich – wenn auch weniger erfolgreich – eine Teilstrom-Rezirkulation (25 %) aus dem Auslauf des Methanreaktors zurück in den Hydrolysereaktor.

Lü et al. [2008] untersuchten an einer Laboranlage den Einfluss einer Teilstrom-Rezirkulation aus dem Ablauf eines Methanreaktors zurück in den Hydrolysebehälter. Weiterhin wurde eine Kombination dieser externen Rezirkulation mit einer internen Rezirkulation im Hydrolysebehälter untersucht. Als Substrate kamen Gemüse- und Blumenabfälle zum Einsatz. Dabei stellten die Autoren fest, dass eine Rezirkulation aus dem Abfluss des Methanreaktors sowohl eine Verbesserung der Prozessstabilität als auch eine Leistungssteigerung im Hydrolysereaktor bewirkt. Das beste Ergebnis – insbesondere im Hinblick auf die cellulosehaltigen Inhaltsstoffe – ergab sich bei einem Verhältnis von externer zu interner Rezirkulation von 3:1.

Reuter et al. [2010] untersuchten in einem Forschungsprojekt (FNR-Förderkennzeichnen: 22014008) die Eignung des Redoxpotenzials zur Beurteilung der Stabilität des Anaerobprozesses auf Biogasanlagen und die Möglichkeiten einer Veränderung des Redoxpotenzials (z. B. durch Zugabe von Reduktionsmitteln) für Zwecke der Stabilisierung und Effizienzsteigerung. Die Untersuchungen wurden an verschiedenen Fermentergrößen (150 l bis 30 m^3) durchgeführt. Dabei wurde sowohl Ascorbinsäure als auch Natriumsulfid zugegeben, wobei nur beim Natriumsulfid auch in der Großtechnik ein positiver Effekt bei der Stabilisierung des Prozesses beobachtet werden konnte. Die Autoren weisen jedoch daraufhin, dass Natriumsulfid aufgrund seiner Stoffeigenschaften (u. a. konnten erhöhte H_2S-Konzentrationen im Biogas beobachtet werden) für die Praxis nicht geeignet ist.

9.6.2 Fuzzy Control und andere regelbasierte Ansätze

Liu et al. [2005] widmen sich in ihrer Arbeit der Optimierung der Biogasproduktion in einem aufwärts durchströmten anaeroben Festbettreaktor im Labormaßstab (1,8 l Volumen) mit synthetischen Abwasser (8.300 mg/l CSB). Das System beruht auf einem regelbasierten Überwachungssystem, welches den Zustand der Anlage anhand von acht Zustandsstufen bewertet, wobei die Einordnung von der Höhe der pH-Wert-Änderung abhängig ist. Ein innerer Regelkreis passt die Zuflussrate zum Reaktor alle 2,5 min an, wobei neben dem gemessenen pH-Wert auch der pH-Sollwert maßgebend ist. Ein äußerer Regelkreis passt in Abhängigkeit der Gasdurchflussmenge alle 30 min den pH-Sollwert an, wobei das regelbasierte Überwachungssystem stündlich Einfluss nimmt. Die Autoren zeigen, dass mit diesem System unter anderem ein schnelles Hochfahren eines derartigen Anaerobreaktors in der Startphase möglich ist.

Nacke [2006] berichtet über einen Fuzzy-Control-Ansatz zur Regelung der Zudosierrate am Beispiel einer Laboranlage. Als Eingangsgrößen für das Fuzzy-Control-Modell dienen die gemessenen Gaskonzentrationen (CH_4, CO_2 und O_2), Gasvolumenzähler und der pH-Wert, das Ausgangssignal beeinflusst die mittels einer Schlauchpumpe zu dosierende Substratmenge. Weiterhin berichtet *Nacke [2006]* über Versuche zur umfangreichen Prozessdatenerfassung auf der großtechnischen Biogasanlage Breitenworbis (320 kW_{el}). Auf dieser Biogasanlage werden die folgenden Prozessgrößen online erfasst: TS/oTS-Gehalt (mit einem Mikrowellensensor), Temperatur, pH-Wert und Redoxpotenzial im Fermenter, Gasanalyse (CH_4, CO_2, O_2 und H_2S) und Gasdurchfluss, Volumenstrom (Gülle) und Masse (nachwachsende Rohstoffe). Als Motivation für den Einsatz einer TS/oTS-Messung werden die

folgenden Gründe angegeben: Echtzeit-Ermittlung der Raumbelastung [kg oTS/(m^3·d)] und der Biogasausbeute [m^3/(g oTS·d)].

Neumann et al. [2007] berichten über Ergebnisse einer Langzeit-Monovergärung von Zuckerrüben in einer automatisierten Laboranlage mit zwei Reaktoren. Bei beiden Fermentern wurden der pH- und Redox-Wert, die Temperatur, der CH_4-Gehalt sowie die Gasmenge bestimmt. Ein Fuzzy Logic-Controller regelte die Substratzugabe. Die Autoren beobachteten nach einer gewissen Dauer ein Absinken der Gasbildung, obwohl der Prozess nach wie vor stabil lief, was auf einen Mangel an bestimmten Nährstoffen zurückgeführt wurde. Durch Zudosierung von Phosphat und Sulfat konnte die Gasbildung wieder erhöht werden, woraus die Autoren die Notwendigkeit ableiteten, dass bei der Monovergärung in regelmäßigen Abständen fehlende Nährstoffe zugegeben werden müssen.

Scherer et al. [2008] berichten über einen Fuzzy-Logic-Regler für einen kontinuierlichen Laborfermenter zur Monovergärung von Zuckerrübensilagen, wobei als Regelgrößen der pH-Wert, die Methankonzentration sowie die spezifische Gasproduktion zum Einsatz kamen. Da keine Gülle o. ä. eingesetzt wurden, war das System nur gering gepuffert. Die hydraulische Verweildauer betrug 6 Tage, die organische Raumbelastung zeitweise bis zu 15 kg oTS/(m^3·d) und die spezifische Gasproduktion bis zu 8 m^3 Biogas/(m^3·d). Dabei war der Fuzzy-Logic-Controller zweimal in der Lage, Überlastsituation zu erkennen und durch eine Reduzierung der organischen Raumbelastung gegenzusteuern.

Liebetrau [2006] entwickelte einen Fuzzy-Logic-Regler auf Basis der Gasbildungsrate, dem pH-Wert und der CH_4-Konzentration zur bedarfsgerechten Fütterung einer landwirtschaftlichen Biogasanlage; die Tests erfolgten an einer halbtechnischen Versuchsanlage mit 30 l Reaktoren.

Weitze und Kraft [2011] stellen einen regelbasierten Ansatz zur Erstellung einer Fütterungsempfehlung einer großtechnischen Biogasanlage vor: Aufbauend auf den beiden Zielen einer Prozessstabilität und einer hohen BHKW-Auslastung programmierten die Autoren unter MATLAB einen Regler „FuBiCo“ (Fuzzy Biogas Control), der eine Fütterungsempfehlung erstellt (Inputmenge/-zusammensetzung). Zur Verifizierung des Reglerkonzeptes wurden sowohl im halbtechnischen Maßstab im Labor (95 l) und der Großtechnik (1.344 m^3) parallele Versuche durchgeführt, die in der Regel auch übereinstimmende Ergebnisse lieferten.

9.6.3 Neuronale Netze

Dalmau et al. [2007] berichten über den Einsatz eines künstlichen Neuronalen Netzes zur Auswahl wichtiger Prozessinformation bei der anaeroben Vergärung von industriellen Abwässern. Das Neuronale Netz wurde dabei mit den Daten aus einem Expertensystem auf Basis von Fuzzy Logic trainiert, welches von *Lardon et al. [2005]* entwickelt wurde. Dieses Expertensystem verwendete neben der Zeit noch sieben online-Messwerte (Zuflussmenge, pH-Wert im Fermenter, Gasdurchfluss, H_2- und CH_4-Konzentrationen im Biogas, Konzentrationen an flüchtigen organischen Säuren und Gesamt-CSB im Fermenter) und lieferte darauf aufbauend sechs Diagnosezustände: Normalbetrieb, Unterlast, hydraulische Überbelastung, stoffliche Überbelastung, Übersäuerung des Fermenters, Störung durch toxische Substanzen. Die Ergebnisse wurden mit Hilfe einer Pilotanlage ermittelt. Das Neuronale Netz lieferte ein

Ergebnis, dass für einen zuverlässigen Anlagenbetrieb unter den gegebenen Randbedingungen die Verwendung der pH-Wert, die Konzentration flüchtiger organischer Säuren und die Zuflussmenge als zielführend erachtet wird.

Krassowski [2011] beschreibt ein Expertensystem zur Überwachung von Biogasanlagen, das auf Fuzzy Logic und Neuronalen Netzen basiert, wobei als Eingangsgrößen der Biogasvolumenstrom, die Methankonzentration, die Stickstoffdioxidkonzentration und der pH-Wert benutzt werden; das Ergebnis wird als einfache Zustandseinschätzung ausgegeben (gut, überwachungsbedürftig, schlecht); weiterhin soll das System auch zur Vorhersage von Prozesszuständen geeignet sein.

9.6.4 Modellbasierte Ansätze

Simeonov und Stoyanov [2003] berichten über einen dynamischen Controller im Labormaßstab. Der Controller beruht auf einem einfachen Modell und nutzt vor allem als Größen die Gasbildungsrate und den Anteil des organischen Anteils im Endsubstrat.

Lee et al. [2005B] berichten über die Entwicklung eines Modells (nicht-linearer Kernel, partial least squares-Ansatz) für einen großtechnischen anaeroben Filter zur Behandlung petrochemischer Abwässer, welches nach Auffassung der Autoren geeignet ist, um den Prozess zu optimieren.

Morel et al. [2005] berichten über einen Ansatz zur online-Schätzung wichtiger kinetischer Parameter des Anaerobprozesses auf Basis eines Softsensors und eines Fluoreszenzspektrometers zur Bestimmung von CSB und flüchtigen organischen Säuren im Ablauf der Kläranlage sowie der Gasdurchflussmessung. Gegenstand der Untersuchung war ein UASB-Reaktor im Labormaßstab (3,5 l Volumen). Der Softsensor basierte auf einem kinetischen Modell erster Ordnung und ist nach Auffassung der Autoren gut geeignet, um beim Ausfall der Messgeräte Ersatzwerte zu liefern bzw. um die Grundlage für ein modellbasiertes Automationskonzept zu sein.

Aceves-Lara et al. [2007] berichten über ein modellbasiertes Regelungskonzept zur Erhöhung der Wasserstoffproduktion in einem Anaerobreaktor (Labormaßstab) auf Basis eines dynamischen, nicht-linearen Modells. Als Messgeräte kommen Temperatur, pH und Redox zum Einsatz, wobei der pH-Wert durch NaOH-Zugabe konstant auf 5,5 gehalten wurde. Die Gaszusammensetzung und der Gasanfall wurden regelmäßig offline bestimmt. Auf der Basis dieser Daten ermittelt das Modell die optimale Zuflussrate zum Anaerobreaktor. Die Autoren berichten, dass durch dieses Regelungskonzept die Wasserstoffproduktion um 50 % erhöht und ein CSB-Abbaugrad von mehr als 95 % erreicht werden konnte.

Alferes et al. [2007] berichten über eine computergestützte Optimierung der Bewirtschaftung eines Vorlage- und Ausgleichsbehälters, der einem anaeroben Reaktor zur Behandlung von industriellen Abwässern vorgeschaltet ist. Dabei wurde der Speicherbehälter im Ausgangszustand nachfolgender Strategie bewirtschaftet: Füllung des Speicherbehälters bis zu einem definierten maximalen Füllstand, anschließende Entleerung des Speicherbeckens bzw. Beschickung des Anaerobreaktors bis zum Erreichen eines definierter Mindestfüllstand im Speicherbecken). Ziel der Optimierung war eine Erhöhung der Prozessstabilität und der Biogasproduktion, wobei das Regelungskonzept mit Hilfe einer Simulation auf Basis des ADM 1 entwickelt und getestet wurde: Dabei wird ein regelbasierter Controller für den Anaerobreaktor auf Basis einer online pH-Messung und einer online Biogasdurchflussmessung, um

eine ebenfalls regelbasierte Strategie zur Bewirtschaftung des Ausgleichsbehälters ergänzt. Das Ergebnis der Optimierung war, dass mit dem neuen Regelungskonzept der Betrieb von einer diskontinuierlichen Beschickung hinzu zu einer eher kontinuierlichen Beschickung umgestellt wurde, sodass auch das Austauschvolumen zurückging. Nach Angaben der Autoren konnte hierdurch die Biogasproduktion um ca. 30 % erhöht werden. Diese Ergebnisse sind jedoch nicht verwunderlich, da zahlreiche Praxisbeispiele zeigen, dass Anaerobreaktoren bei einer kontinuierlichen Beschickung leistungsfähiger sind als Anaerobreaktoren, die stoßweise beschickt werden.

Wolf et al. [2007] berichten über die Optimierung einer Fütterungssteuerung mit Hilfe eines Simulationsmodells einer landwirtschaftlichen Biogasanlage auf Basis des ADM 1. Die optimale Fütterungsration und -zusammensetzung wurde dabei mit Hilfe eines genetischen Algorithmus bestimmt. Die Autoren leiten aus den Simulationsergebnissen ein Optimierungspotenzial von bis zu 25 % bezüglich Prozess- und Energieeffizienz ab. *Ziegenhirt et al. [2010]* knüpfen an die Arbeit von *Wolf et al.* an und testeten für die Datensätze bzw. das Simulationsmodell verschiedene Formen künstlicher Intelligenz zur Parameteroptimierung. Getestet haben die Autoren dabei vier Optimierungsmethoden (Genetische Algorithmen, Particle Swarm Optimization, Differential Evolution und Covariance Matrix Adaptation Evolution). Als Ergebnis dieses Methodenvergleichs kam die Autoren zu der Erkenntnis, dass die Methoden „Differential Evolution“ und „Covariance Matrix Adaptation Evolution“ zu besseren Ergebnissen führen als die Methoden „Genetische Algorithmen“ und „Particle Swarm Optimization“ und gleichzeitig weit weniger aufwendig sind. Da bei einer großtechnischen Umsetzung modellbasierter Reglerkonzepte die zeitliche Geschwindigkeit des Optimierungsalgorithmus als auch die Anpassung und Nachführung des Modells an veränderte Prozessbedingungen auf der Biogasanlage zwei kritische Faktoren sein dürften, sind derartige Performance-Leistungsvergleiche im Vorfeld sinnvoll.

Jáuregui-Medina et al. [2009] berichten über den Einsatz eines Zustandsschätzers (Virtually Control Observer) für einen kontinuierlichen anaeroben Reaktor zur Abwasserbehandlung: Die Veranlassung für die Entwicklung eines solchen Systems sehen die Autoren in dem Umstand, dass ein zuverlässigen Steuerungs- und Regelungskonzept auf Prozessparameter, Statusinformationen und Eingangsgrößen angewiesen ist, die sich aber nicht immer zuverlässig messtechnisch erfassen lassen. Die Aufgabe des Zustandsschätzers ist es somit, mit Hilfe von messbaren Informationen und einem vereinfachten Prozessmodell fehlende Informationen zu schätzen. In diesem Fall errechnet der Zustandsschätzer die Biomassekonzentration im Reaktor sowie die Substratkonzentration im Zulauf.

9.6.5 Sonstiges

Boncz et al. [2008] berichten über Versuche in Brasilien mit einem UASB-Reaktor im Labormaßstab (40 l), der zur Behandlung von Abwässern aus der Maniokverarbeitung eingesetzt wurde. Der Laborreaktor wurde mit einem online-Monitoring/Control-System ausgestattet: Neben dem pH-Wert und der Temperatur wurde das Redox-Potenzial kontinuierlich bestimmt. Das Substrat wurde mit variabler Menge dem UASB-Reaktor zugeführt, wobei die Trübung mit Hilfe einer Trübungsmessung online erfasst wurde. Gasdurchfluss und Gaszusammensetzung (CO_2) wurden ebenfalls online ermittelt. In Abhängigkeit des pH-Wertes und des Gasdurchflusses wurde regulierend auf die Zudosierung der Substrate eingewirkt, sodass die organische Raumbelastung zwischen 0,75 und 1,5 kg CSB/($m^3 \cdot d$) eingestellt werden konnte.

Warmenhoven und Spanjers [2009] berichten über ein TOC-basiertes Automatisierungskonzept für einen großtechnischen EGSB-Anaerobanlage (Expanded Granular Sludge Bed) zur Behandlung von Abwässern eines Fruchtsaftproduzenten. Dieses Abwasser ist stark kohlenhydrathaltig und unterliegt sowohl bezüglich des Abwasseraufkommens als auch der Konzentration starken Schwankungen. Das Originalkonzept sah eine durchflussbasierte Beschickung der drei parallelen Anaerobreaktoren vor, was aber nicht nur aufgrund der zu gering dimensionierten Misch- und Ausgleichsbecken zu betrieblichen Problemen sowie einem instabilen und ineffizienten Anaerobprozess führte. Nach Einführung des TOC-basierten Regelungskonzeptes konnte die CSB-Abbaurate von 50 auf 82 % erhöht werden, obwohl die Belastung von 1.700 auf 2.100 kg CSB/d bzw. 11,3 auf 14 kg CSB/($m^3 \cdot d$) anstieg. Als Messgerät kam ein TOC-Analysator der Fa. Endress+Hauser zum Einsatz, das im Zulauf zum Ausgleichsbecken installiert wurde; weiterhin wurde der Füllstand im bzw. der Zufluss zum Ausgleichsbecken online erfasst. Der Regler orientierte sich dabei an der zulässigen Belastungsrate der EGSB-Reaktoren.

Murnleitner [2011] stellt ein Konzept für eine übergeordnete Regelung vor, die aus den Komponenten „Zustandserkennung“, „Fütterungsvorschlag“, „Vollautomatische Variation der Fütterung“ und „Intelligente Regelung der BHKW-Leistung“ besteht. Über Betriebsergebnisse werden jedoch keine Aussagen gemacht.

Einer Publikation von *Siemens [2011B]* kann folgende Textpassage entnommen werden:

“[...] The device operates with light in the near-infrared spectrum, which contains slightly less energy than that emitted by a heat lamp. “The spectrometer can measure the acidity of the mixture in the fermenter around the clock,” says Prof. Maximilian Fleischer, whose team at CT developed the device. Acid concentration is a key indicator of the conditions inside a fermenter. If it exceeds a critical level, the fermenting process will shut down. “Continual process monitoring therefore allows biogas plant operators to react very quickly to problems by, for instance, changing the bacteria feed composition as soon as acid concentrations rise,” Fleischer explains. If countermeasures are to function automatically, the measurement data must be interpreted and converted into clear commands such as “add corn” or “decrease slurry content.” Achieving this kind of transparency is the job of Volker Hirsch from the Siemens Industry Sector. “We use Simatic process controls that have already proved their value in the chemical industry,” he explains. Siemens technology is now used in Götz’s unit to collect data on temperature and gas composition.” [...]”

Aus diesem Zitat lassen sich die folgenden Rückschlüsse ziehen: Die Fa. Siemens entwickelt ein Nahinfrarotspektrometer, welches die Konzentration organischer Säure bestimmen soll und das mittelfristig ein integraler Bestandteil eines ebenfalls von Siemens in der Entwicklung befindlichen Automationskonzept sein soll. Weiteren Textpassagen kann man entnehmen, dass dieses System in naher Zukunft an einer großtechnischen Biogasanlage (860 kW_{el}) erprobt werden soll.

9.6.6 Aus der Theorie in die Praxis

Der zuvor dargestellte Stand der Literatur verdeutlicht, dass zwar im labor- und halbtechnischen Maßstab bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt wurden, der Nachweis der Praxistauglichkeit aber vielfach noch aussteht. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass einem Transfer in die Praxis oft große Hürden im Weg stehen:

- Im Labor und in der Halbtechnik ist es relativ einfach, quasi ideale verfahrenstechnische Randbedingungen zu schaffen. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Rührwerksproblematik: Während Laboranlagen dem Idealbild eines voll durchmischten Reaktors recht nahe kommen, kann dies von vielen großtechnischen Anlagen nicht angenommen werden; bei zu schwacher Rührwerksleistung können sich in der Großtechnik starke Konzentrationsunterschiede in den einzelnen Zonen einstellen. Hinzu kommt, dass sich das Regelverhalten von labor- und großtechnischen Aggregaten (z. B. Pumpen, Rührwerke etc.) meist stark unterscheiden.
- Die messtechnischen Randbedingungen sind bei Forschungsarbeiten im Labor oder der Halbtechnik nahezu ideal: In der Regel werden Messungen nur von qualifiziertem Personal durchgeführt bzw. Messgeräte regelmäßig gewartet und kalibriert oder über Vergleichsmessungen kontrolliert; die Grundsätze der Analytischen Qualitätssicherung (AQS) werden meist beachtet. In der Praxis sind die Bedingungen diesbezüglich sehr viel schlechter, da das Betriebspersonal (v.a. bei kleinen Anlagen) oft nicht über ausreichend Erfahrung, eine ausreichende Ausbildung und die nötige Zeit verfügt, um modernste Messtechnik zu bedienen und zu warten. Hinzu kommt, dass Laboranalysen nicht auf den Anlagen durchgeführt werden, sondern an externe Labore verschickt werden. Die Fehlerquoten bei der Probennahme, -aufbereitung, -konservierung und -analyse sind daher in der Praxis sehr viel höher, was zwangsläufig Auswirkungen auf das Regelverhalten und die Stabilität eines Mess- und Automationskonzeptes haben wird.
- Labor- und halbtechnische Anlagen werden in der Regel unter klar definierten Randbedingungen betrieben. Dies geht bei vielen Experimenten so weit, dass die Fermenter nur mit ausgewählten Mono-Substraten beschickt werden, deren Charakteristika klar definiert sind bzw. messtechnisch erfasst werden können. In der Praxis werden jedoch mehrere unterschiedlicher Substrate vergoren, die bereits innerhalb einer Substratsorte stark unterschiedliche Charakteristika aufweisen können und sich im Extremfall sogar negativ gegenseitig beeinflussen können.
- Die Praxis zeigt, dass die Biozönosen großtechnischer Biogasanlagen über ein beträchtliches Adaptionsvermögen verfügen, sodass im Labor gewonnene Erkenntnisse sich auch aus mikrobiologischer Sicht nicht immer in die Praxis übertragen lassen.

Auch andere Autoren kommen zu der Erkenntnis, dass bisher die Umsetzung zahlreicher Forschungsansätze nur im Labormaßstab bzw. halbtechnischen Maßstab erfolgt: So haben *Gaida et al. [2013]* weltweit 135 Veröffentlichungen untersucht, die sich mit Mess- und Regelungskonzepten von anaeroben Verfahren (meist Abwasseranlagen) beschäftigen. Das Ergebnis ist eindeutig: 43 % aller Versuche wurden nur mit Hilfe einer Computersimulation durchgeführt. 40 % der Versuche wurden im Labormaßstab durchgeführt; 16 % im halbtechnischen Maßstab. D.h. nur ein bis zwei Projekte wurden in der Großtechnik erprobt.

9.6.7 Computergestützte Entwicklung

In diesem Zusammenhang hat sich bereits in anderen Bereichen (z. B. Abwasserreinigung) der Einsatz von Computermodellen bewährt. Die Vorteile liegen auf der Hand:

- Die Entwicklung und Systemanalyse am Computer erfolgt deutlich schneller als in der Praxis, da biologische Prozesse oft träge auf betriebliche Veränderungen reagieren.

Computermodelle benötigen für einen Tag aber nur wenige Minuten. Daher lassen sich viele Szenarien testen.

- Einige relevante Messgrößen lassen sich noch nicht im Prozess messen. Mit kalibrierten Modellen können diese Werte jedoch errechnet werden. Die Auswahl, Anordnung und Einbindung der Messtechnik kann ebenfalls optimiert werden.
- Das kalibrierte Modell berücksichtigt die ungünstigen Praxisbedingungen. Eine Computergestützte Entwicklung reduziert daher die Gefahr großtechnischer Pannen, da kritische Lastfälle am Computer untersucht werden können. Hierdurch kann die Gefahr für die Umwelt bzw. hohe Kosten, die mit dem Versagen einer Anlage verbunden sind – im Gegensatz zu der „Versuch macht klug"-Methode (in der Praxis die Regel) – verringert werden.

9.7 Wirtschaftlichkeit von EMSR-Technik auf Biogasanlagen

Der Einsatz umfangreicher Mess- und Automationstechnik wirft zwangsläufig Fragen nach dem wirtschaftlichen Nutzen dieser Investitionen auf. Der Nutzen wird dabei kontrovers diskutiert, zumal es zweifelsfrei auch Biogasanlagen gibt, die ohne umfangreiche Mess- und Automationstechnik hohe Auslastungen erzielen. Dennoch verdeutlichen die in Abschnitt 9.1 zitierten Studien, dass es einen positiven Einfluss durch den Einsatz von EMSR-Technik gibt. Nachfolgend soll daher auf Basis eigener Betrachtungen und fremder Literaturquellen versucht werden, den wirtschaftlichen Nutzen von EMSR-Technik grob abzuschätzen:

Beispiel A: Vermeidung von Havarien infolge gestörter Prozessbiologie

In Kapitel 10.1.8 ist das Beispiel einer Störung der Prozessbiologie dargestellt, die durch eine übermäßige Zugabe von Silagesickersäften sowie von Niederschlagsabflüssen aus dem Silobereich hervorgerufen wurde. Diese Zugabe erfolgte innerhalb weniger Tage und wurde daher nicht durch die routinemäßige Laboranalytik, die im Zeitraum von 2 bis 4 Wochen erfolgte, detektiert. Die installierten pH- und Redox-Elektroden schlugen jedoch rechtzeitig Alarm, sodass umgehend Gegenmaßnahmen eingeleitet werden konnten. Hierdurch konnte eine Havarie vermieden werden, die ggf. sogar zum kompletten Absturz der Biologie hätte führen können. Auf dieser Grundlage erfolgt der Versuch einer Abschätzung des vermiedenen potenziellen Schadens:

- Die durchschnittliche Auslastung der Anlage im Normalbetrieb beträgt 516 kW_{el}.
- Zwischen dem Komplettabsturz einer Biologie und dem Wiedererreichen der Maximalleistung können ohne Weiteres drei Monate liegen (Entleerung, Wiederbefüllung/-aufheizung/-anfütterung). Es wird näherungsweise davon ausgegangen, dass in den drei Monaten die durchschnittliche Auslastung bei 50 % des Normalbetriebs liegt.
- Die Gesamtvergütung einer solchen Anlage kann inklusiver diverser Boni (Gülle, Nawaro, Immissionsschutz, KWK) und der Wärmeerlöse 20 ct/kWh_{el} und mehr betragen.
- Berechnung der entgangenen Erlöse bei einem Prozessabsturz: 516 kW_{el} · 24 h/d · 50 % · 90 d · 0,2 €/kWh_{el} = 111.456 €

Es wird deutlich, dass der potenzielle Schaden mit über 100.000 € (ohne sonstige Kosten, wie z. B. dem Abtransport des prozessbiologisch gestörten Gärsubstrats) bereits weit über den Investitions- und Betriebskosten der gesamten messtechnischen Ausstattung dieser Biogasanlage liegt. D. h. bereits mit einer vermiedenen Havarie hat sich die Mess- und Automationstechnik in diesem Fall amortisiert.

Beispiel B: Schneller und sicherer Anfahrbetrieb

Die Inbetriebnahme von Biogasanlagen stellt immer einen Kompromiss dar:

- Ein zu langsames Anfahren der Biogasanlage kostet Geld!
- Ein zu schnelles Anfahren der Biogasanlage gefährdet die Prozessstabilität!

In diesem Zusammenhang kann die intensive Nutzung der Messtechnik hilfreich sein, um das Optimum zu finden bzw. die Biogasanlage möglichst schnell, aber dennoch stabil, auf die Maximalleistung zu bringen. Während der Inbetriebnahme gilt es daher alle relevanten Betriebs- und Prozessparameter zu sammeln und zu analysieren, um dadurch rechtzeitig Rückschlüsse auf Änderungen in den Einstellungen vornehmen zu können (z. B. Anpassung des Fütterungsplans) auf der Grundlage einer durchgehenden Kontrolle der Gaszusammensetzung, der Gasanalyse und anderer relevanten Prozessparameter. Im Kapitel 10.2.5 wird ein Beispiel für das schnelle und sichere Anfahren einer Biogasanlage auf Basis von online-Messtechnik auch unter schwierigen Randbedingungen beschrieben. Da die Anlage vergleichbar ist mit dem Beispiel A erfolgt auf dieser Grundlage der Versuch einer Abschätzung des zusätzlichen Nutzens:

- Die durchschnittliche Auslastung der Anlage im Normalbetrieb beträgt 516 kW_{el}.
- Zwischen dem Start der Anlage und dem sicheren Erreichen der Maximalleistung bei gleichzeitig hoher Prozessstabilität können bei konventioneller Inbetriebnahme und vergleichbar schwierigen Randbedingungen etwa drei Monate liegen. Es wird näherungsweise davon ausgegangen, dass in den drei Monaten die durchschnittliche Auslastung bei 50 % des Normalbetriebs liegt.
- Im Beispiel im Kapitel 10.2.5 wurde bereits im ersten vollen Inbetriebnahmemonat eine durchschnittliche Motorenauslastung von 266 kW_{el} erreicht; im zweiten vollen Inbetriebnahmemonat konnten bereits durchschnittlich 476 kW_{el} oder 89 % erreicht werden.
- Die Gesamtvergütung einer solchen Anlage kann inklusiver diverser Boni (Gülle, Nawaro, KWK) und der Wärmeerlöse 20 ct/kWh_{el} und mehr betragen.
- Berechnung der Erlöse (konventionell) während der ersten 3 Monate: 516 kW_{el} · 24 h/d · 50 % · 90 d · 0,2 €/kWh_{el} = 111.456 €
- Berechnung der Erlöse (Messtechnik) während der ersten 3 Monate: (266 kW_{el} + 476 kW_{el} + 516 kW_{el})/3 · 24 h/d · 90 d · 0,2 €/kWh_{el} = 181.152 €

Auch wenn in diesem Fall infolge der höheren Auslastung auch höhere Betriebskosten (z. B. für Substrate) anfallen, verdeutlicht dieses Beispiel dennoch, dass bereits alleine durch eine schnellere, aber dennoch stabile Inbetriebnahme dank der EMSR-Technik erhebliche Zusatzerlöse erzielt werden können, die im Einzelfall bereits die Investitionskosten der Messgeräte deutlich überschreiten.

Beispiel C: Bessere Auslastung

Kujawski [2011] schätzt anhand einer vereinfachten Kosten-/Nutzen-Analyse den Mehrwert durch den Einsatz von MSR-Technik. Für zwei Biogasanlagen mit je ca. 500 kW_{el} auf Basis von Wirtschaftsdüngern und nachwachsenden Rohstoffen beziffert er die Mehreinnahmen nach einer Optimierung auf 7.000 bis 13.000 €/a bzw. 10.000 bis 20.000 €/a. Für eine

Kofermente-Biogasanlage in ähnlicher Größenordnung und sehr unterschiedlichen Eingangsstoffen sowie hohen Ammoniumkonzentrationen beziffert er die Mehreinnahmen auf 20.000 bis 30.000 €/a.

Beispiel D: Modell-basierte Regelungskonzepte

Gaida [2011] beziffert den Mehrwert eines modellbasierten Regelungskonzeptes für ein nicht näher beschriebenes Biogasanlagenmodell mit bis zu 650 €/d; anhand der errechneten idealen Substratmischung dürfte es sich dabei um eine Biogasanlage mit ca. 750 kW_{el} handeln. Ob bei dieser Größenordnung tatsächlich so hohe Mehreinnahmen erzielt werden können, muss jedoch angesichts der derzeitigen Vergütungssituation für Biogasanlagen kritisch hinterfragt werden. Es ist daher sicherlich interessant, welche Ergebnisse bei der geplanten Umsetzung auf einer großtechnischen Biogasanlage erzielt werden können.

Beispiel E: Effizienterer Betrieb

Scherer [2008A] gibt in einer tabellarischen Übersicht für Mindererlöse in Abhängigkeit des Reaktorvolumens und der gemessenen Konzentration organischer Säuren im Reaktor: Bei einem Reaktorvolumen von 2.000 m^3 und einer Konzentration organischer Säuren von 4.000 ppm errechnet er Mindererlöse von 18.240 €/a; bei 4.000 m^3 und 5.000 ppm errechnet Scherer 45.600 € Mindererlöse pro Jahr.

Beispiel F: Effizienterer Betrieb

KTBL [2009] untersuchte die Schwachstellen an Biogasanlagen und nahmen dabei auch eine ökonomische Bewertung für eine Beispielanlage vor (Tabelle 9.12).

Tab. 9.12: Finanzielle Auswirkungen von Schwachstellen an einer 500 kW_{el}-Biogasanlage (*KTBL [2009]*)

Kostenposition	Ursachen und Probleme	Mögl. Verlust
Arbeitszeit für Störungen	Reparatur und Störungsbeseitigung	6.695 €/a
Material für Störungen	Reparatur und Störungsbeseitigung	2.321 €/a
Elektrische Energie	Ungeeignete Rührwerke, mehrfaches Umpumpen, Notkühler	4.205 €/a
BHKW-Minderauslastung	Wirkungsgradverlust durch Teillastbetrieb	15.426 €/a
Anlagenverfügbarkeit	Minderauslastung durch Prozessstörungen, technische Ausfälle, Reparaturen usw.	30.852 a

9.8 Nachrüstung von Mess- und Automationstechnik

In der Literatur finden sich bisher nur wenige Beispiele für eine (nahezu) komplette Modernisierung bzw. Nachrüstung von Mess- und Automationstechnik auf älteren Biogasanlagen (z. B. *Siemens [2007]).* In der Zukunft dürfte die Nachrüstung von Mess- und Automationstechnik auf Altanlagen aber zunehmend an Bedeutung gewinnen, u. a. auch deswegen, weil zahlreiche Biogasanlagen im Laufe der Zeit erweitert und modernisiert werden. Dabei gilt es jedoch einige Aspekte zu beachten, da die Randbedingungen vor Ort oftmals die Nachrüstung einer Altanlage schwierig machen. So ist es mit der Nachrüstung von Messgeräten alleine nicht getan, sondern vielfach müssen handbediente Schieber gegen Automatikschieber, veraltete Schalttechnik gegen moderne Automationstechnik ausgetauscht

werden. In vielen Fällen reduziert sich durch diesen erheblichen Mehraufwand die Wirtschaftlichkeit der Nachrüstung von Mess- und Automationstechnik.

Es ist schwierig allgemein gültige Bewertungshinweise zu geben, ob und wann

1. eine Modernisierung der Mess- und Automationstechnik und
2. ggf. auch die Implementierung komplexer Steuerungs- und Regelungskonzepte

sinnvoll ist, denn es gibt eine Vielzahl im Detail sehr unterschiedlicher Biogasanlagen; die unterschiedlichen wirtschaftlichen Randbedingungen (z. B. Sustratpreise, Dauer der Lieferverträge) tun ein Übriges. Nachfolgend werden daher nur einige Kriterien aufgelistet.

Für eine Modernisierung der Mess- und Automationstechnik sprechen:

- Die Auslastung und der Effizienz der Anlage sind verbesserungsfähig.
- Der Rohstoffbedarf im Verhältnis zur Energieproduktion ist hoch.
- Es git diverse maschinentechnische Probleme.
- Es handelt sich um mehrstufige Systeme, die ggf. sogar indivuell betrieben und gefüttert werden können (z. B. Fermenter und Nachgärer, die beide mit Flüssig- und Festsubstraten beschickt werden können).
- Die Biogasanlage wird mit einer hohen Raumbelastung bzw. an der Grenze der Prozessstabilität betrieben.
- Der bauliche Zustand der Biogasanlage ist gut bis sehr gut, sodass noch eine lange Nutzungsdauer zu erwarten ist.
- Es gibt zahlreiche, flexible Fließwege und eine zentrale Pumpstation oder mehrere Pumpen.
- Es gibt bereits automatische Stellglieder oder diese können mit vertretbarem Aufwand ausgetauscht werden.
- Die Anlage verfügt bereits über eine gewisse Automation, auf die aufgebaut werden kann.
- Es gibt bereits diverse Messgeräte auf der Biogasanlage, die weiterverwendet werden können.
- Notwendige Messgeräte lassen sich einfach nachrüsten.

Nachteilig wirken sich die folgenden Punkte aus:

- Die Auslastung und die Effizienz der Anlage sind bereits überdurchschnittlich.
- Der Rohstoffbedarf im Verhältnis zur Energieproduktion ist niedrig.
- Es handelt sich um einstufige Verfahren.
- Die Biogasanlage wird mit einer niedrigen Raumbelastung betrieben, sodass der Prozess meist stabil abläuft (Ausnahme: dauerhafte Unterlast, die auch problematisch sein kann).
- Der bauliche Zustand der Biogasanlage ist unterdurchschnittlich oder gar schlecht.
- Es gibt keine Pumpen bzw. es wird mit freien Überläufen gearbeitet.
- Die Anlage verfügt überwiegend über manuell zu bedienende Stellglieder (z. B. Handschieber), die sich ggf. auch nicht so einfach gegen automatische Stellglieder austauschen lassen.
- Eine Automatisierung muss grundlegend neu aufgebaut werden.
- Es gibt keine oder nur wenige Messtechnik auf der Biogasanlage.

- Notwendige Messgeräte lassen sich nur aufwändig nachrüsten (z. B. Außerbetriebnahme von Behälter erforderlich, um Kernbohrungen zu setzen).

Einige der nachteiligen Faktoren machen deutlich, wie schwierig eine allgemein gültige Aussage ist: Einerseits würde man bei einer Biogasanlage, die nahezu alle Negativkriterien erfüllt, dazu tendieren, dass gerade eine derartige Anlage eine Modernisierung der Mess- und Automationstechnik benötigt. Der Autor hat aber aus der Begehung diverser Anlagen die Erkenntnis gewonnen, dass in diesen Fällen, der Aufbau einer zeitgemäßen Mess- und Automationstechnik die finanziellen Möglichkeiten der Anlagenbesitzer übersteigt.

9.9 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde auf den Stand der Mess- und Automationstechnik auf Biogasanlagen eingegangen: Es wurde deutlich, dass es im Vergleich zum Einsatz von Mess- und Automationstechnik in anderen Branchen erhebliche Defizite gibt. Positiv anzumerken ist, dass immer mehr Stakeholder (z. B. Anlagenbetreiber, Anlagenbediener, Banken, Investoren) die Notwendigkeit und Sinnhaftigkeit moderner Mess- und Automationstechnik erkennen. Auch wenn zunehmend mehr Messtechnik zum Einsatz kommt, sind hingegen die Automationskonzepte nach wie vor von einfacher Natur. Zwar gibt es in der Forschung und Entwicklung in den letzten Jahren zahlreiche vielversprechende Ansätze zum Aufbau leistungsfähiger Steuerungs- und Regelungskonzepte (z. B. Fuzzy Control), jedoch handelt es sich bisher überwiegend um Laborversuche und halbtechnische Anlagen; der Nachweis des Transfers (und der dauerhaften Bewährung) in der Großtechnik steht damit noch aus. Im nachfolgenden Kapitel 10 soll dargestellt werden, wie eine schrittweise Umwandlung einer Biogasanlage von Black-Box-System über ein Glass-Box-System bis hin zu einer „intelligenten“ Biogasanlage aussehen kann.

10 Von der Black-Box zur intelligenten Biogasanlage

Wie in Kapitel 9 ausgeführt, ist die messtechnische Ausstattung vieler – auch neuerer – Biogasanlagen oft noch relativ gering. Der „höchste“ Stand der messtechnischen Ausstattung einer mittleren bis größeren Anlage neueren Datums lässt sich nach den Ergebnissen von *Weiland [2007]* (siehe Kapitel 9.1) und den Erfahrungen des Autors dieser Arbeit grafisch wie folgt abbilden (Abb. 10.1).

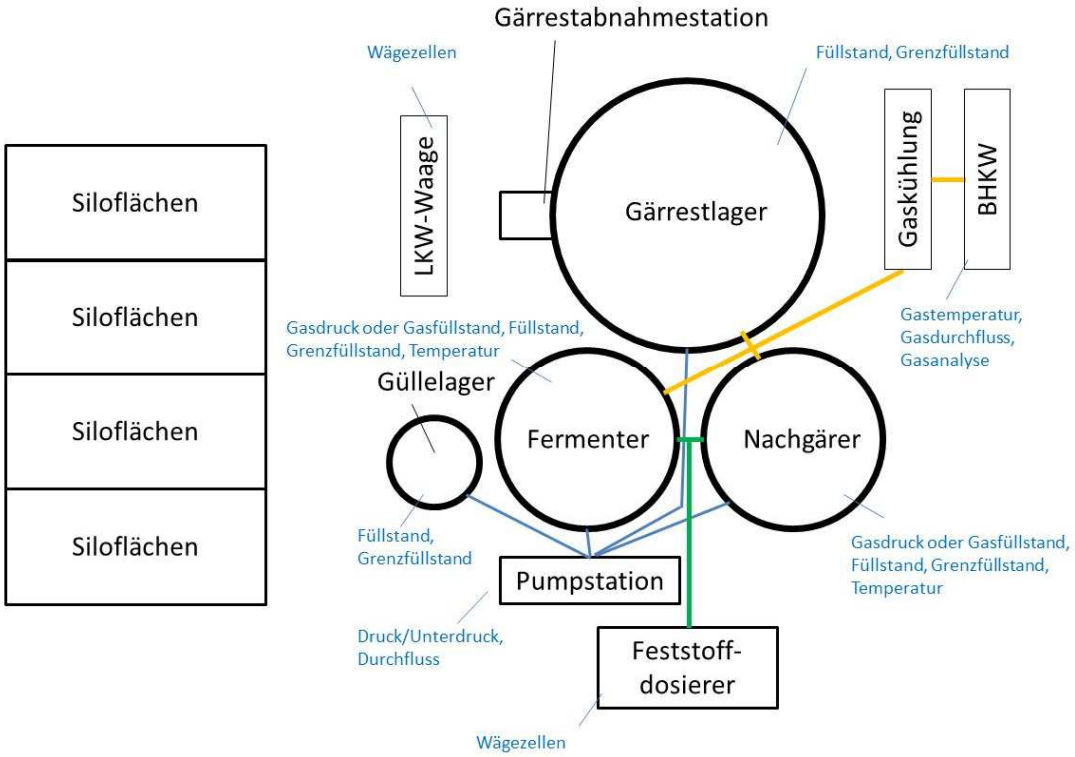


Abb. 10.1: Die messtechnische „Höchstausstattung“ einer derzeitigen Biogasanlage (Bildquelle: Autor)

Derartige Anlagen sind noch immer nahezu Black-Box-Systeme, da nur wenige Prozessinformationen in Echtzeit verfügbar sind, welche für Controlling/Benchmarking, Steuerungs- und Regelungskonzepte sowie für Zwecke einer Optimierung eingesetzt werden können. Nachfolgend sollen daher zwei Praxisbeispiele und zwei Visionen vorgestellt werden, wie durch den Einsatz moderner Mess- und Automationstechnik eine Wandlung von einem Black-Box-System hin zu einem Glass-Box-System bzw. im letzten Schritt in eine intelligente Biogasanlage erfolgen kann.

10.1 Vom Black-Box-System zum Grey-Box-System

Das erste Praxisbeispiel kann als ein Versuch gewertet werden, durch den Einsatz moderner Mess- und Automationstechnik aus einem Black-Box-System ein Grey-Box-System zu entwickeln, welches bereits so viele Prozessinformationen bereitstellt, dass sowohl eine Automatisierung auf hohem Niveau als auch ein Controlling und Benchmarking möglich wird.

10.1.1 Anlagenbeschreibung

Auf der nachfolgend beschriebenen Biogasanlage, die 2005 gebaut wurde, wird Biogas ausschließlich auf Basis von Wirtschaftsdüngern (Rindergülle, Hühnertrockenkot) und nachwachsenden Rohstoffen (Maissilage, Grünroggensilage, Zucker- und Futterrüben) produziert. Eine Übersicht über die Anlagenkomponenten gibt Abbildung 10.2.

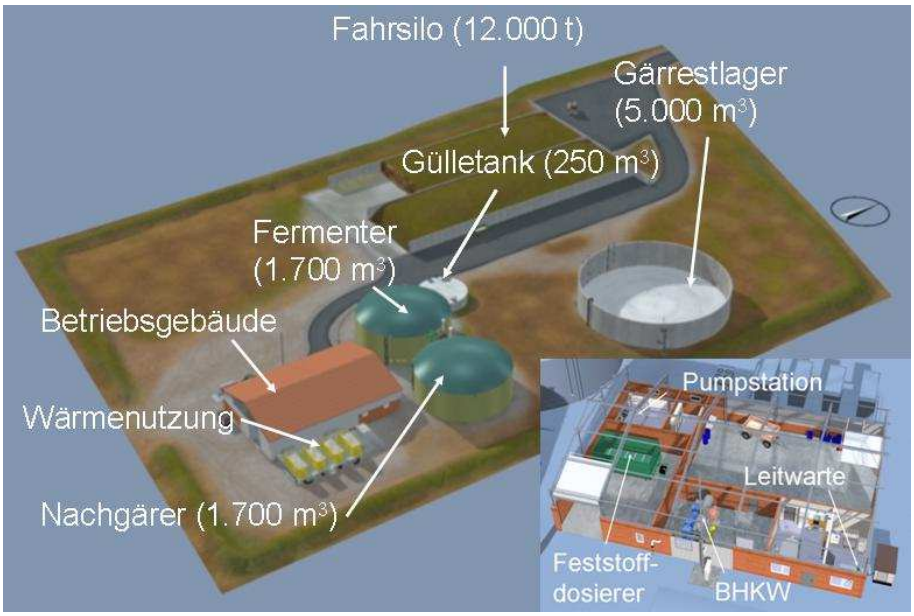


Abb. 10.2: Übersicht über die Biogasanlage (Bildquelle: *Wiese und Kujawski [2008])*

Die energetische Biogasverwertung erfolgt in diesem Fall über ein Blockheizkraftwerk mit einem Gasmotor mit Synchrongenerator. Der Motor hat eine max. Leistung von 530 kW_{el} elektrisch (Wirkungsgrad: 36 %) und 625 kW_{th} thermisch (Wirkungsgrad: 45 %). Ca. 70 kW_{th} werden zur Beheizung des Betriebsgebäudes und der beiden Anaerobreaktoren genutzt. Weitere ca. 400 kW_{th} werden zur Trocknung von Holzhackschnitzeln genutzt und zeitweise auch für einen mobilen Latentwärmespeicher. Die Biogasanlage wurde nach *Wiese und Kujawski [2008]* auf Basis folgender wesentlicher Entwurfsmerkmale geplant und gebaut:

- 2-Stufen mit Fermenter und Nachgärer zur Erhöhung der Betriebssicherheit nach dem Speicher-Durchflussverfahren auf Basis einer mesophilen (ca. 40 °C), simultanen Nassfermentation (5 – 9 % TS-Gehalt bei 7,3 – 7,8 pH)
- Hydraulische Verweildauer: > 60 Tage zwecks effizienter Nutzung der Maissilage
- Automatische, quasi-kontinuierliche Dosierung der Feststoffe über einen Container (68 m^3) mit Schubboden und Wägezellen sowie horizontalen/vertikalen seelenlosen Transport- und Stopfschnecken (Standardeinstellung: gewichtsbezogene Fütterung)
- Fermenter und Nachgärer sind baugleich, mit einer internen Heizung und jeweils mit einem Tauchmotorrührwerk sowie einem Langachsschrägflügelrührwerk ausgestattet; letztere sind mit einem Frequenzumformer ausgestattet.
- Zentrale Pumpstation mit einem Biocutter und pneumatischen Automatikschiebern
- Fermenter und Nachgärer besitzen Tragluftdächer mit integrierter Gasspeicherfolie
- Interne biologische Entschwefelung durch Einblasung von etwas Luft in den Gasraum von Fermenter und Nachgärer

Das Energie- und Materialflussschema ist in den Abbildungen 10.3 und 10.4 dargestellt.

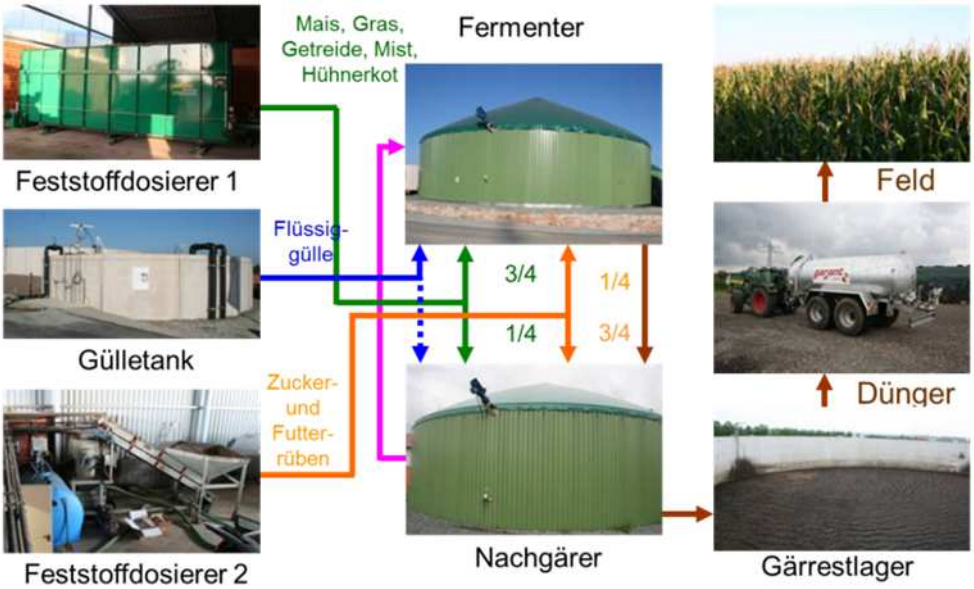


Abb. 10.3: Materialflussschema der Biogasanlage (Bildquelle: *Wiese und Kujawski [2007])*

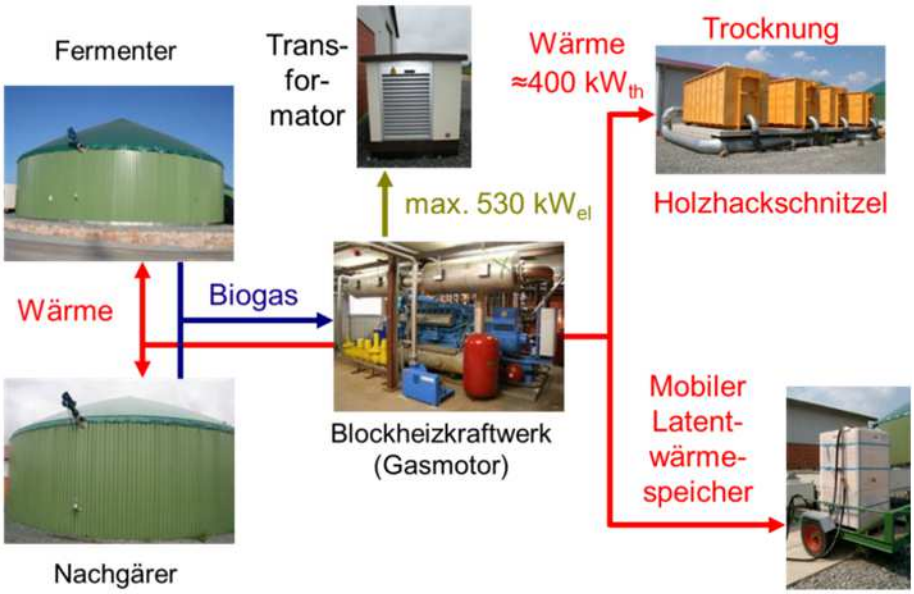


Abb. 10.4: Energieflussschema der Biogasanlage (Bildquelle: *Wiese und Kujawski [2007])*

10.1.2 Mess- und Automationstechnik

Die Biogasanlage ist auch nach heutigen Maßstäben mit leistungsfähiger Mess- und Automationstechnik ausgestattet: Die Anlage verfügt über eine Automatisierung („STEP 7“) mit einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (Typ: „S7-300“, Fa. Siemens), einem PC-basierten Leitsystem (Typ „WinCC 6“, Fa. Siemens), einem Störmeldesystems und zahlreichen Messgeräte (Tab. 10.1) (siehe auch *Siemens [2009A, 2011]*). Mittels Fernwirktechnik kann die Anlage praktisch von jedem Ort aus bedient werden. Wichtige Bauteile (z. B. Blockheizkraftwerk, Analysegeräte) sind über Profibus angebunden.

Tab. 10.1: Messtechnische Ausstattung der Biogasanlage (*Wiese und Kujawski [2008]*)

Bauteil	**Messtechnik**
Eingang	LKW-Waage
Vorlagebehälter	Füllstand, Grenzfüllstand
Feststoffdosierer	Wägezellen, Nah-Infrarot-Spektrometer (NIRS) (zeitweise)
Pumpstation	Druck (+/-), Durchfluss, Temperatur, pH, Redox, TS, NIRS (zeitweise)
Fermenter und Nachgärer	Füllstand (Flüssigkeit), Füllstand (Gasspeicher), Temperatur, Grenzfüllstand/Schaumbildung, Druckluftüberwachung Dächer
Gärrestlager	Füllstand (Flüssigkeit), Durchflussmessung, Grenzfüllstand
BHKW	Motor: Drehzahl, Leistung, Temperatur in jedem Zylinderkopf, Gastemperatur und zahlreiche weitere Daten Generator: Leistung, Blindarbeit, Wirkarbeit, cos phi etc.
Biogas	Gasdurchfluss, Gasanalyse (CH_4, CO_2, O_2, H_2S)
Wärmenutzung	Diverse Temperaturmessungen in den Heizkreisläufen, Wärmemengenzähler etc.
Rührwerke, Pumpen, Schieber etc.	Status, Frequenz, Laufzeitüberwachung, Betriebsdauer, Schaltspiele, Endlagenüberwachung, Energieverbräuche etc.
Labor	Trockenmassebestimmung, Handmessgeräte für pH, Redox und Leitfähigkeit

Die anfallenden Daten können für eine Vielzahl von Anwendungen genutzt werden, wie z. B.:

- Online bzw. quasi-kontinuierliche Überwachung wichtiger Prozessparameter
- Stoffbilanzen (fest, flüssig, gasförmig) und Energiebilanzen (Wärme, Strom)
- Vergleich gemessener und errechneter Gaserträge
- Bedarfsgerechte Fütterung fester und flüssiger Stoffe in Fermenter und Nachgärer
- Berechnung wichtiger Betriebsparameter (z. B. Hydraulische Verweildauer und spezifische Raumbelastung in jedem Reaktionsraum)
- Regelung der Temperatur im Fermenter und Nachgärer
- Frühzeitige Identifikation von Prozessstörungen durch Beobachtung verschiedener Parameter (z. B. pH, Redox, Gaszusammensetzung, Gasdurchfluss)
- Wechsel von Fermenter und Nachgärer im Falle einer Überlastung des Fermenters

Mit dieser soft- und hardwaretechnischen Ausstattung sind die technischen Voraussetzungen gegeben, um nahezu beliebig komplexe Automationskonzepte und Dokumentationssysteme zu implementieren.

10.1.3 Zentrale Pumpstation mit online-Messtechnik

Die Pumpstation mit dem zentralen Verteilerbalken erlaubt es, aus jedem Reaktionsraum bzw. Vorratsbehälter in jeden Reaktionsraum bzw. Vorratsbehälter zu pumpen, sodass die Anlage sehr flexibel betrieben werden kann. Ferner befindet sich in dieser Baugruppe eine Mess- und Analysestrecke (Abbildung 10.5). Im Übrigen besteht die Pumpstation aus den folgenden wesentlichen Komponenten:

- einer Drehkolbenpumpe mit vorgeschalteten Substratcutter und integriertem Steinfang
- einem Verteilerbalken mit je vier ankommenden Saug- bzw. abgehenden Druckleitungen zu den Lagerbehältern und Reaktionsräumen sowie einem freien Sauganschluss
- acht automatische Pneumatikschieber für die ankommenden/abgehenden Leitungen sowie eines automatischen Pneumatikschiebers zum Anschluss einer weiteren Dosiereinrichtung (z. B. für Zucker- und Fütterrübenmus o. ä.)
- einer Magnetisch-Induktiven Durchflussmessung (MID) zur Erfassung der Stoffströme
- einer online-Messung zur Erfassung der Trockensubstanzkonzentration (TS)
- einer online-Messung zur Erfassung des pH-Wertes
- einer online-Messung zur Erfassung des Redox-Wertes
- einer online-Spektrometer zur Ermittlung des Nah-Infra-Rot-Spektrums (zeitweise)

Abb. 10.5: Zentralisierte und voll-automatisierte Pumpstation (Bildquelle: *Wiese und Kujawski [2007]*)

D.h. mit Hilfe dieser zentralen Pumpstation sind zahlreiche Pumpwege möglich (Tabelle 10.2).

Tab. 10.2: Mögliche Pumpwege auf der Biogasanlage (beide Richtungen möglich)

	Vorgrube	Fermenter	Nachgärer	Gärrestlager
Vorgrube	X	X	X	X
Rübenmaschine		X	X	
Fermenter	X	X	X	X
Nachgärer	X	X	X	X
Gärrestlager	X	X	X	X

Somit laufen alle Pumpvorgänge über diese Pumpstation, weshalb weitere Betriebsparameter automatisch errechnet werden können:

- Analyse der Flüssigstoffe (z. B. Rindergülle, Niederschlagsabfluss) bevor sie in den Fermenter gepumpt werden. Hierdurch kann etwa eine Kontamination von Rindergülle durch Reinigungsmittel (z. B. durch pH/Redox-Veränderung) detektiert werden.
- Alle Pumpvorgänge und die damit einhergehenden Volumenströme werden von der Durchflussmessung erfasst. Auf Basis anderer Messungen (z. B. Füllstand im Fermenter) kann die hydraulische Verweildauer im Fermenter und Nachgärer automatisch errechnet werden. Diese Informationen dienen wiederum als Kontrollgröße für den Anlagenbetrieb.

Es kann auch Gärsubstrat aus verschiedenen Reaktionsräumen gepumpt werden (z. B. Rezirkulat aus Gärrestlager zur Verdünnung des Inputsubstrats) bzw. auch im Kreislauf gepumpt werden (z. B. zur quasi-kontinuierlichen Bestimmung von pH, Redox und TS in Vorlage, Fermenter, Nachgärer und Gärrestlager). Mittels der zentralen Pumpstation ist es auch möglich, Gärrest aus dem Ablauf des Nachgärers bzw. aus dem Gärrestlager zu rezirkulieren und wieder dem Prozess zuzugeben, um zum Beispiel

- im Gärrest vorhandenes Biogaspotenzial weiter zu nutzen. Dies ist aufgrund von ca. 80 Tagen hydraulischer Verweildauer aber nur in Ausnahmefällen sinnvoll.
- die durchschnittliche Trockensubstanzkonzentration (z. B. Maissilage TS = 25 bis 32 %, Getreideschrot TS = 80 bis 90 %) der Zugabemischung durch Verdünnung mittels Rezirkulat (TS ≈ 5 %) zu verringern.
- bei extremen Außentemperaturen bzw. Sonneneinstrahlungen die Temperatur im Anaerobreaktor auf einem effizienten Temperaturniveau (ca. 40 °C) zu halten, kann kühleres Rezirkulat aus dem Endlager (in der Regel ist die Temperatur nicht höher als 20 °C) dem Prozess wieder zugeführt werden.
- bei zu hohen Konzentrationen an organischen Säuren im Fermenter weniger belastetes Gärsubstrat zwecks Durchmischung zuzuführen.
- Im Falle einer ernsthaften Überlastung können sogar Fermenter und Nachgärer getauscht werden (siehe nächster Abschnitt).

10.1.4 Störungsoption – Tausch von Fermenter und Nachgärer

Fermenter und Nachgärer sind absolut baugleich und können auch beide mit Fest- und Flüssigstoffen beschickt werden, um ein hohes Maß an Redundanz sicherzustellen. D. h. wenn im Zuge einer Routinewartung oder einer Prozessstörung ein Reaktor außer Betrieb genommen werden muss, kann der Betrieb mit einem Reaktor (ca. 70 % Leistung) auch

weiterhin erfolgen. Zudem ist es durch die Redundanz und den hohen Automatisierungsgrad möglich, Fermenter und Nachgärer von der Funktionsweise her zu tauschen. Dies kann dann interessant sein, wenn der Fermenter Anzeichen einer Überlastung zeigt (z.B. pH-/Redox-Verschiebung, CH_4-/CO_2-Veränderung). In diesem Fall kann der Fermenter zum Nachgärer umgestellt werden, damit er sich entsprechend erholen kann bzw. der Nachgärer übernimmt in diesem Fall temporär die Funktion des Fermenters. Diese Umstellung ist mit Hilfe des Prozessleitsystems mit wenigen Mausclicks möglich. Da der Nachgärer immer etwa 25 % der Fütterungsmenge erhält (siehe Abbildung 10.3), kann er den plötzlichen Anstieg der Belastung besser verkraften, zumal hierdurch die Verschiebung der Belastung nicht ganz so dramatisch abläuft, wie folgendes Beispiel (Parallelbetrieb) zeigt:

- Fermenter: Reduzierung von 75 % auf 50 % (ggf. auch weiter herunter) der Gesamtfütterungsmenge
- Nachgärer: Erhöhung von 25 % auf 50 % (ggf. Extremfall auch höher) der Gesamtfütterungsmenge

10.1.5 Feststoffdosierer für Maissilagen

Der Feststoffeintrag (Abb. 10.6) erfolgt direkt in den Fermenter bzw. Nachgärer mit Hilfe eines Feststoffeintragssystems. Dieses besteht aus

- einem Schubbodenbehälter mit 68 m^3-Nutzvolumen inkl. Auflösewalze
- einer Horizontalförderschnecke
- einer Vertikalförderschnecke
- einer 45 °-Schrägförderschnecke zur Beschickung des Fermenters
- einer 45 °-Schrägförderschnecke zur Beschickung des Nachgärers

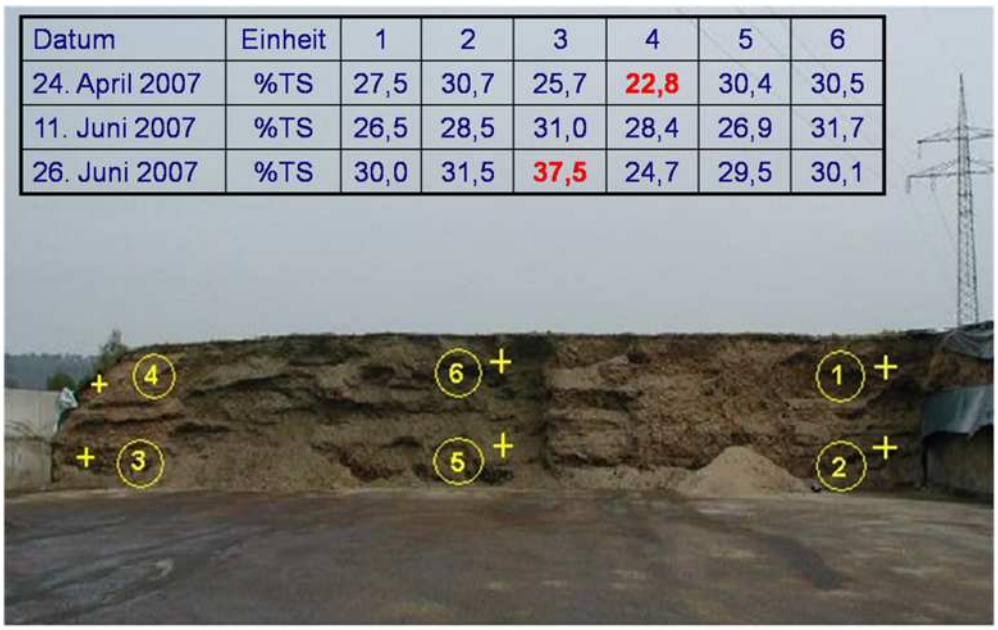
Der Schubbodenbehälter ist mit Wägezellen ausgerüstet, sodass die dosierte Feststoffmenge genau erfasst werden kann. Dank einer nachgerüsteten Auflösewalze können auch kritischere Substanzen (z. B. Grünroggensilage) dosiert werden. Über den Feststoffdosierer werden alle schütt- und stapelfähigen Inputstoffe (z. B. Maissilage) der Anlage zu dosiert. Die Automatisierung sieht ein gewichtsbezogene, quasi-kontinuierliche (1 x pro Stunde) Fütterungssteuerung auf Basis von Sollwerten für die Tagesrationen des Fermenters bzw. Nachgärers vor.

Diese weit verbreitete Fütterungsstrategie besitzt aber den Nachteil, dass sich aus dem Gewicht der dosierten Feststoffe nicht zwangsläufig der Gasertrag ableiten lässt. Ein gutes Beispiel hierfür ist in Abbildung 10.7 dargestellt (*Wiese und Kujawski [2007]*): Es zeigt die Ergebnisse einer Beprobung über den Querschnitt und den Vortrieb eines Fahrsilos angefüllt mit Maissilage. Beachtenswert ist die große Bandbreite von 22,8 bis 37,5 % TS. Dieses Beispiel macht damit eindrucksvoll deutlich, dass 1 t Substrat heute nicht den gleichen Energiegehalt haben muss wie morgen bzw. dass bei konstanten Dosiermengen an einem Tag so viel Biogas produziert wird, dass ggf. sogar die Gasfackel anspringt, während an einem anderen Tag nicht genug Biogas vorhanden ist, um das Blockheizkraftwerk auf Volllastniveau betreiben zu können.

Abb. 10.6: Feststoffdosierer als Schubboden mit horizontalen und vertikalen Förderschnecken sowie 45° Grad-Stopfschnecken (Bildquelle: Autor)

Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten der Optimierung:

- Eine Kombination von schwer/langsam (z. B. Maissilage) und leicht/schnell (z. B. Zuckerrüben, Getreide) Substraten, um kurzzeitige Gasdefizite auszugleichen. Dies ist bereits heute technisch machbar (siehe Abschnitt 10.1.6).
- Eine weitere Variante stellt die Umstellung von einer gewichts- oder volumenbezogenen Fütterung auf eine energiegehaltsbezogene Fütterung dar. Das einfachste Beispiel, das sich bereits heute – wenn auch noch zu hohen Kosten – realisiert lässt, ist die Nutzung eines NIRS-Sensors, der in Echtzeit die organische Trockensubstanz (oTS) eines Substrates bestimmen kann (siehe Abschnitt 10.1.7).



Datum	Einheit	1	2	3	4	5	6
24. April 2007	%TS	27,5	30,7	25,7	22,8	30,4	30,5
11. Juni 2007	%TS	26,5	28,5	31,0	28,4	26,9	31,7
26. Juni 2007	%TS	30,0	31,5	37,5	24,7	29,5	30,1

Abb. 10.7: Beprobung eines Fahrsilos mit Maissilage über den Querschnitt und über den Vortrieb (Bildquelle: *Wiese und Kujawski [2007]*)

10.1.6 Wasch- und Zerkleinerungsanlage für Rüben

Im letzten Jahrzehnt dominierte beim Energiepflanzenanbau zur Erzeugung von Biogas überwiegend Getreide und Maissilage. Der Einsatz von Getreide ist aber wegen der in den letzten Jahren sehr stark gestiegenen Weltmarktpreise für Weizen deutlich zurückgegangen. Auch beim Mais schaut man sich zunehmend nach Alternativen um:

- Der Maispreis ist nicht unabhängig vom Weizenpreis und ist daher in den letzten Jahren ebenfalls stark gestiegen, wenn auch bei weitem nicht so wie Weizen.
- Der Maisanbau ist in einigen Regionen (z. B. bei sandigen Böden und geringen Niederschlägen) bzw. Höhenlagen schwierig. Die Erträge sind dort entsprechend niedrig.

Eine interessante Alternative zu den zuvor genannten Substraten sind Rüben:

- Rüben können an vielen Standorten, an denen Mais nicht gut gedeiht, sehr hohe spezifische Erträge erzielen. Dies gilt nicht nur für Teile Deutschlands, sondern auch einige andere Länder (z. B. Skandinavien, Irland).
- Das Zuckerrübenmonopol in der Europäischen Union wurde aufgehoben, sodass erhebliche Überkapazitäten in der Landwirtschaft entweder abgebaut oder anderweitig (z. B. Biogas) eingesetzt werden können.
- Landwirte, die Zuckerrüben anbauen, schränken sich bisher bei der Stickstoffdüngung aufgrund der Vorgaben der Zuckerhersteller oft ein. Baut ein Landwirt hingegen Zuckerrüben für eine Biogasanlage an, so kann er so viel Stickstoff düngen, wie die Düngemittelverordnung zulässt. Hierdurch lassen sich deutlich höhere Flächenerträge erzielen, die teilweise sogar über 100 t/ha liegen können (siehe auch Tabelle 10.3).
- Rüben lassen sich schneller und leichter anaerob abbauen als Mais- oder Ganzpflanzensilagen, da diese mehr schwerer abbaubare Pflanzenbestandteile enthalten.
- Es kann nicht nur die Rübe an sich, sondern auch das Rübenkraut (sofern sauber) zur Biogasgewinnung eingesetzt werden. Hierdurch kann der spezifische Ertrag noch einmal deutlich gesteigert werden.

Tab. 10.3: Bandbreite spezifischer Methanerträge verschiedener Substrate

Parameter	Einheit	Maissilage	Zuckerrüben	Futterrüben	Grassilage
Methangehalt	CH_4 %	52,2	50,8	51,1	54,7
Biogasertrag	m^3_{Biogas}/t	125 – 222	132 - 162	81 – 99	108 - 243
Ernteertrag	t/ha	40 – 70	40 - 97	60 – 130	17 - 30
Methanertrag	m^3_{CH4}/ha	2.610 - 8.112	2.682 - 7.982	2.483 - 6.577	1.004 - 3.987

Hinderlich bei der Verarbeitung von Rüben zur Biogasgewinnung sind aber folgende Punkte:

- Die Lagerung von Rüben ist schwierig, sodass eine ganzjährige Verfügbarkeit nicht gegeben ist (bisher: frühestens September bis Anfang des Jahres). Zurzeit wird aber an Möglichkeiten geforscht, diesen Zeitraum zu verlängern (z. B. durch Lagerung in der Erde bzw. einer bedarfsgerechten Ernte). Hinzu kommt, dass Saatguthersteller an einer Optimierung der Rübe im Hinblick auf eine Erhöhung des Biogasertrags arbeiten („Biogasrübe“).

- Der hohe Erdanteil macht eine Verarbeitung der Rüben schwierig und kann somit zur Sedimentation in den Anaerobreaktoren führen.

Eine Übersicht über den Einsatz von Zuckerrüben für Zwecke der Biogaserzeugung geben unter anderem *Bensmann [2011A]*, *Bensmann [2011B]* und *Hartmann und Döhler [2011].*

Für einige Zeit befand sich daher wegen der interessanten Perspektiven auf der Biogasanlage der Prototyp einer Wasch- und Zerkleinerungsanlage (Abbildung 10.8) für Rüben o. ä. Dieses Aggregat der Fa. BMS bestand im Wesentlichen aus

- einem Aufgabebehälter,
- einem Förderband und
- einem Reaktionsraum in dem die Rüben zunächst durch Waschung von Erdresten befreit und anschließend zerkleinert werden.

Die halbtechnische Versuchsanlage, die einen Durchsatz von ca. 1 t/h hat, wurde automatisiert und in die Anlagensteuerung eingebunden. Das vorzerkleinerte Material kann anschließend in einem Lagertank zwischengespeichert werden, sodass bei Bedarf auch kurzfristig größere Substratmengen dosiert werden können. Die Parametrierung der Automatik ist an die Substratart anpassbar, sodass die Maschine vielseitig einsetzbar ist. Im Wesentlichen wurden aber Zucker- und Futterrüben eingesetzt. Insbesondere aufgrund der leicht abbaubaren Inhaltsstoffe kann die Zucker-/Futterrübe sehr gut zur Feineinstellung der Fütterung bzw. einer belastungsabhängigen Steuerung des Fermenters und des Nachgärers verwendet werden. Die Versuche zeigten, dass das zu Mus zerkleinerte Zucker- oder Futterrübenmaterial innerhalb von nur zwei Stunden zu einem signifikanten Gasanstieg führt (Abb. 10.9). Es können aber auch andere Stoffe (z. B. Kartoffeln, Karotten o. ä.) verwendet werden. Daher ist das Aggregat auch für Kofermente-Anlagen interessant, da oft größere Mengen von überlagertem Gemüse o.ä. am Markt angeboten werden.

Abb. 10.8: Wasch- und Zerkleinerungsmaschine für Zucker-, Futterrüben o. ä. (Bildquelle: *Wiese und Kujawski [2007]*)

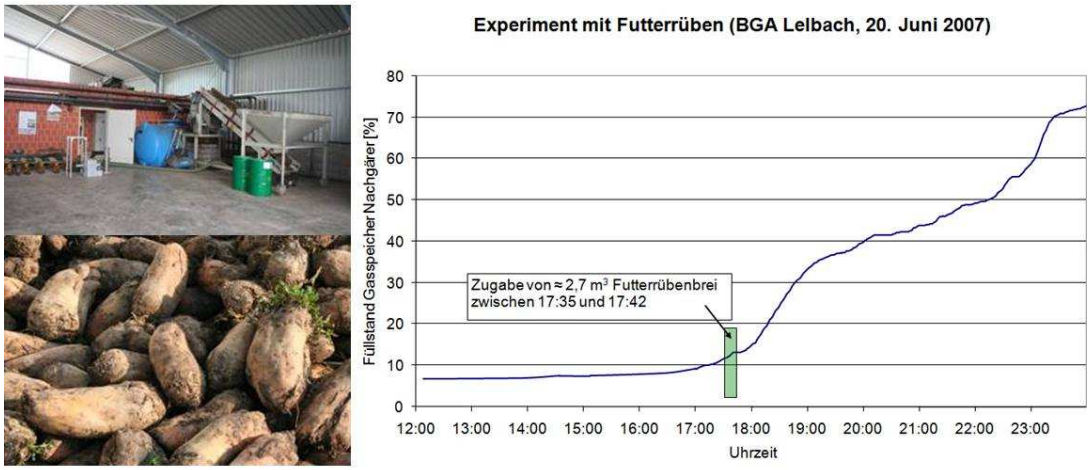


Abb. 10.9: Experiment einer Zudosierung von Futterrüben (Bildquelle: *Wiese und Kujawski [2007]*)

Dieses Beispiel zeigt auch, dass eine derartige Dosiereinrichtung in Kombination mit einem Lagerbehälter auch zur bedarfsgerechten, automatisierten Fütterung eingesetzt werden kann: So ist es denkbar, in Abhängigkeit eines online gemessenen Gasfüllstands und/oder Gasdrucks automatisch leicht abbaubare Substrate dem Prozess zuzugeben. Hierdurch können Gaseinbrüche infolge des in Abschnitt 10.1.4 beschriebenen Phänomens kompensiert werden. In diesem Sinne wurden zwischen Ende Januar 2007 und Mitte Mai 2007 Versuche mit Zucker- und Futterrüben durchgeführt (siehe Abb. 10.10). Es wurden zudem unterschiedliche Belastungen (3 bis 8 t/d) bzw. unterschiedliche Aufteilungen auf Fermenter und Nachgärer untersucht. Dabei zeigte sich, dass eine mehrheitliche Zugabe der Zuckerrüben in dem Fermenter (ca. 70 %) aufgrund der dort bereits vorhandenen hohen Raumbelastung zu einem Anstieg der Essigsäureäquivalente auf bis zu 1.500 mg/l führte. Nachdem die Zuckerrüben überwiegend dem Nachgärer (ca. 70 %) zugegeben wurden, sank die Konzentration der Essigsäure sofort wieder ab. Dies ist ein gutes Beispiel dafür, dass durch eine flexible Prozessführung/-steuerung das vorhandene Reaktionsvolumen effizient genutzt werden kann.

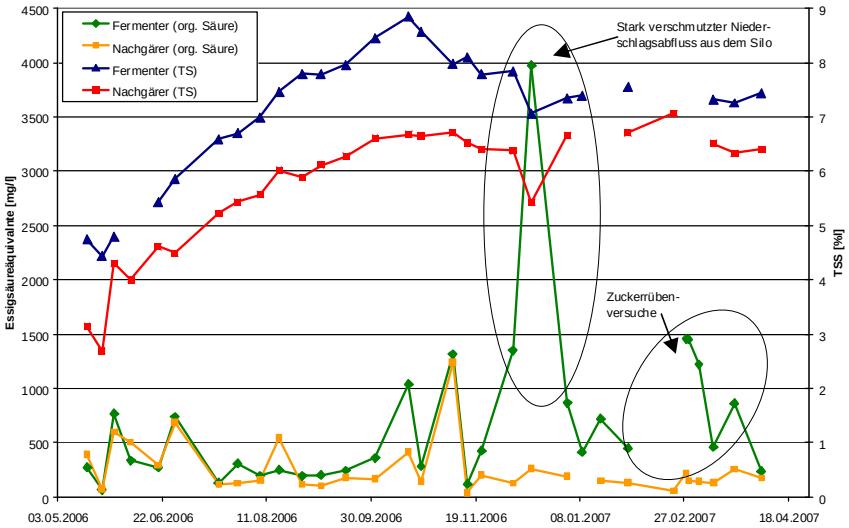


Abb. 10.10: Konzentrationsparameter (TS, Essigsäureäquivalente) im Fermenter und Nachgärer (*Wiese und Kujawski [2008]*)

10.1.7 Nah-Infrarot-Spektroskopie

Ein Messgerät, welches die organische Trockensubstanz und/oder den erwarteten Gasertrag im zu dosierenden Feststoff (z. B. Maissilage) in Echtzeit bestimmen könnte, würde es ermöglichen, eine energiebezogene Fütterung zu realisieren. Wie das nachfolgende Beispiel zeigt, erscheint der Einsatz eines Nahinfrarotspektrometers diesbezüglich vielversprechend: Im Mai 2007 wurde für mehrere Monate ein Nah-Infrarot-Spektrometer (NIRS) mit einem Messbereich von 800-1800 nm für Forschungszwecke nachgerüstet. Das NIRS-System der Fa. tenirs, Kiel, war mit zwei Messköpfen ausgestattet: ein Messkopf wurde am Feststoffdosierer installiert, um die Zusammensetzung der Feststoffe online zu detektieren, ein Messkopf wurde in der zentralen Pumpstation eingebaut, sodass eine Beprobung aller Reaktionsräume und Lagerbehälter (Vorlage, Endlager) möglich war (Abb. 10.11). Die Ergebnisse waren vielversprechend, u. a. war es möglich TS, oTS, Essigsäureäquivalente und Proteingehalt online hinreichend genau zu bestimmen.

Abb. 10.11: Zentrale Pumpstation mit Nah-Infrarot-Spektrometer (1), NIRS Sensor am Feststoffdosierer (2), NIRS Sensor vor Installation (Bildquelle: *Wiese et al. [2008A]*)

Abb. 10.12 zeigt, dass mit einer solchen Messung eine gute Korrelation zwischen den gemessenen und der mittels des chemometrischen Modells der NIRS-Messung vorhergesagter oTS-Konzentration erreicht werden konnte. D. h. durch Einbindung dieser oTS-Messung in eine gewichtsbezogene Steuerung könnte eine Sollvorgabe wie folgt aussehen: Dosiere 12 t oTS pro Tag! Abbildung 10.12 verdeutlicht zudem, dass mit der NIRS-Messung auch eine gute Korrelation für andere wichtige Prozessgrößen möglich ist:

- Die Kalibrierergebnisse für flüchtige organische Säuren waren – trotz vereinzelter Ausreißerwerte – vielversprechend (Abb. 10.12 – oben links).
- Auch die Kalibrierergebnisse für den Gesamtstickstoff waren ausreichend gut: D.h. auf der Basis dieser Ergebnisse ist es vorstellbar, für diesen wichtigen Wirtschaftsdünger einen Schätzer zur Ermittlung des Düngegehaltes und – bei Einbeziehung aktueller Marktpreise für Stickstoffdünger – des Düngewertes des Gärrestes zu programmieren.

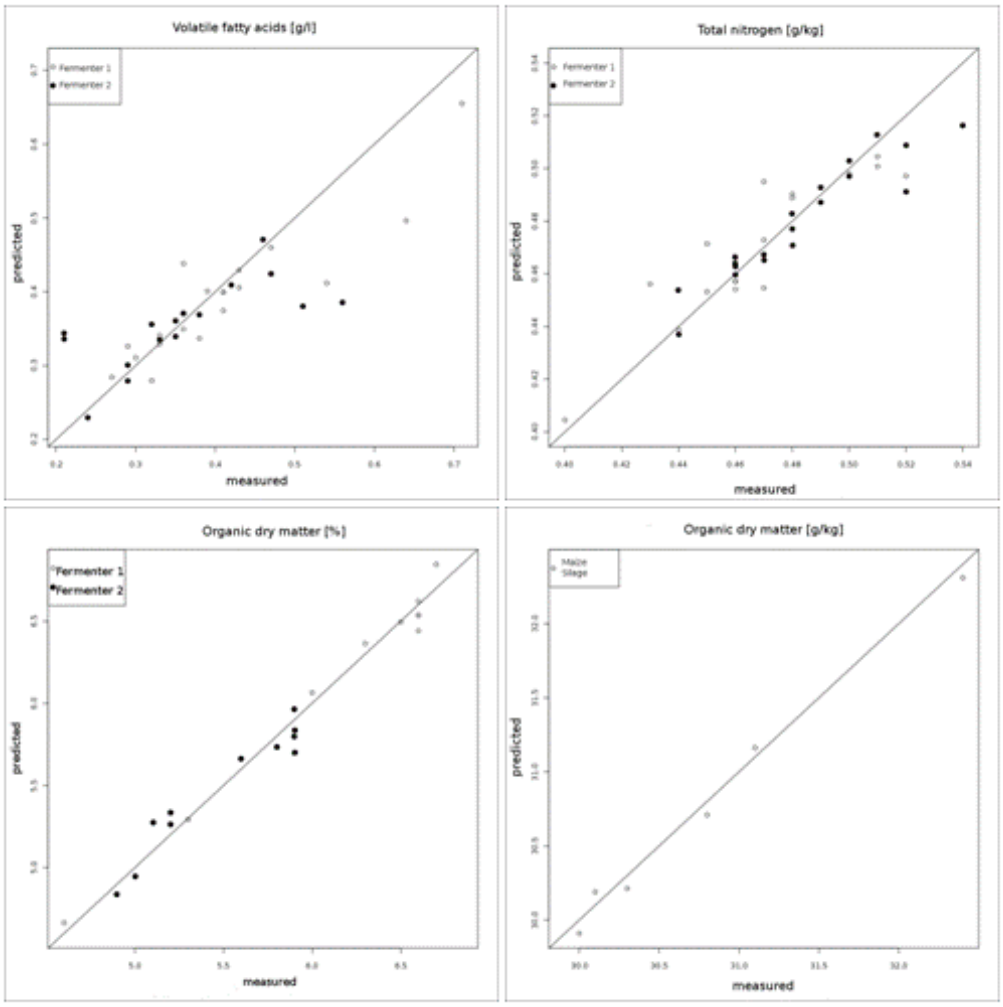


Abb. 10.12: Ergebnisse der NIRS-Kalibrierung: flüchtige organische Säuren (oben links), Gesamtstickstoff (oben rechts), organ. Trockenmasse (Flüssigkeiten: unten links, Feststoffe: unten rechts) (Anm.: Fermenter 1 = Fermenter, Fermenter 2 = Nachgärer, measured = Laborwert, predicted = NIRS) (*Wiese et al. [2008A]*)

10.1.8 Überwachung der Prozessstabilität

Die eingesetzte online-Messtechnik kann auch zur kontinuierlichen Überwachung der Prozessstabilität verwendet werden (*Wiese et al. [2008A]*): Verdeutlichen soll dies das nachfolgend aufgeführte Beispiel einer ernsten Prozess-Störung im Jahre 2006, die aus einer Dosierung mit stark belasteten Silage-Sickerwässern resultierte. Die vor der Anlage lagernde Maissilage war anstelle einer Plane mit einer Einsaat aus Grünroggen abgedeckt. Die Einsaat der Oberfläche reichte jedoch nicht aus, um das Silo wasserdicht zu halten. Als Folge kam es im Dezember 2006 nach lang anhaltenden Niederschlägen zu einem erheblichen Anfall stark saurer und stark belasteter Silagesickersäfte (Stichprobe vom 21.12.2006: pH 3,7, Redox +70 mV, elektrolytische Leitfähigkeit 8,3 mS/cm, Essigsäureäquivalent 17.430 mg/l, gelöster CSB 68.960 mg/l). Dieses stark verschmutzte Niederschlagswasser wurde zwischen dem 06.12.2006 und 19.12.2006 von den Anlagenbetreibern manuell über die Vorgrube dem Fermenter zugeführt, um dieses Energiepotenzial nicht zu verschwenden. Dies führte jedoch zu einem schnellen und gefährlichen Anstieg der Konzentration organischer Säuren (Abfall

des pH-Wertes, rote Linie) bei gleichzeitiger Abnahme der Pufferkapazität. Diese Störung wurde direkt vom Prozessleitsystem registriert, unter anderem aufgrund eines Anstiegs des Redox-Potenzials (grüne Linie) von -400 mV auf größer -330 mV bzw. eines Abfalls des pH-Wertes von 7,3 auf kleiner pH 7 (siehe Abbildung 10.13). Dank der rechtzeitigen Registrierung dieser Störung konnte sofort reagiert werden und die Prozessstörung durch die Reduzierung der Fütterung gestoppt werden. Jedoch reichte diese Maßnahme nicht aus, da zwei Tage später, am 22. Dezember, der Redox-Wert erneut stark anstieg. Erst durch die Zugabe von Frischgülle und Natriumbikarbonat konnte der Prozess soweit stabilisiert werden, dass von nun an die Gefahr einer Anlagen-Havarie gebannt war. Dank der Automatisierungstechnik und der Redundanz des Systems wurde sofort der Fermenter zum Nachgärer umgeschaltet (d. h. die Zugabe wurde stark reduziert), der Nachgärer – der immer auf einer Grundlast gefahren wird – übernahm die Aufgabe des Fermenters (d. h. die Zugabe wurde erhöht) (siehe Abschnitt 10.1.4). Trotz dieser Störung konnte im Monatsdurchschnitt noch ein Wert von 461 kW_{el} erreicht werden. Ohne die Prozess- und Fernüberwachung wäre die Störung der Anlage, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Havarie geführt hätte, nicht rechtzeitig registriert worden, zumal begleitende Laboranalysen in externen Untersuchungslaboratorien über die Weihnachtsfeiertage ebenfalls nicht zur Verfügung standen.

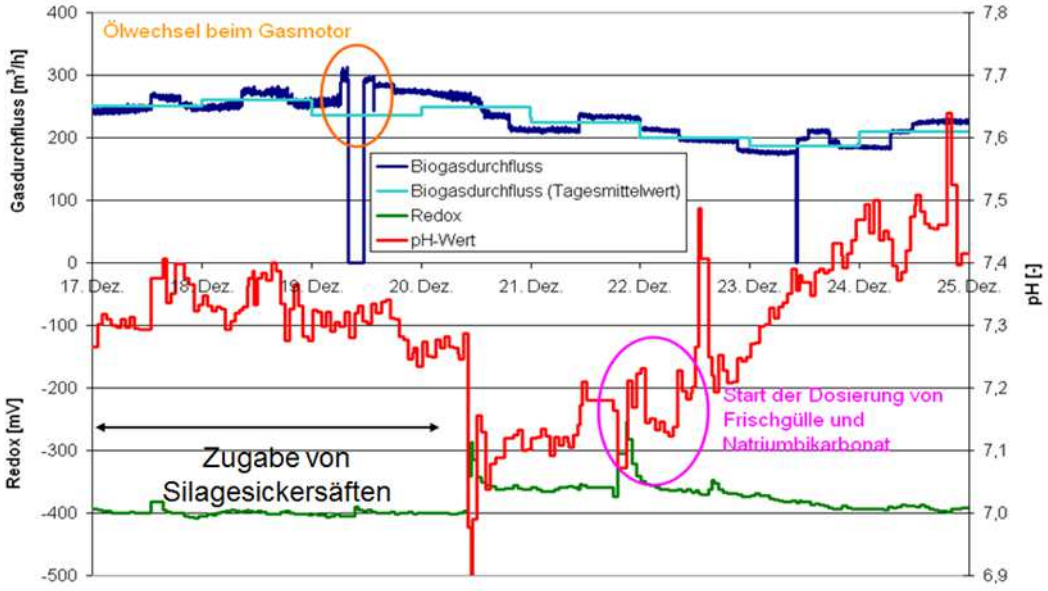


Abb. 10.13: Verlauf wichtiger Prozessgrößen für pH, Redox und Gasdurchfluss vor und während einer Betriebsstörung (Bildquelle: *Wiese et al. [2008A]*)

10.1.9 Mensch-Maschine-Interface

Die vielen Prozess- und Betriebsdaten müssen dem Bediener möglichst vollständig und übersichtlich zur Verfügung gestellt werden, damit dieser die Anlage zuverlässig bedienen kann. Über derartige Visualisierungsfenster kann die Bedienung und Parametrierung der jeweiligen Baugruppe vorgenommen werden. Dabei gilt es festzuhalten, dass es sich bei den in diesem Abschnitt vorgestellten Bedienkonzepten nicht um Neuheiten handelt, sondern dass es sich hier um erprobte Bedienkonzpte aus der Industrie handelt, die zum Teil bereits als vorkonfektionierte Bedienelemente in dem eingesetzten Leitsystem vorhanden sind.

10.1.9.1 Informationsvermittlung

Um die Bedienung für den Nutzer so einfach und anschaulich wie möglich zu machen, aber dennoch dem Bediener alle Informationen zur Verfügung zu stellen, wurden verschiedene Wege der Informationsvermittlung gewählt:

a) Fest definierte Bildschirmbereiche für einzelne Funktionalitätsbereiche

- Übersichtsbereich (ganz oben): Dieser Bereich besteht aus diversen Bedienknöpfen, die ein Umschalten und Navigieren zwischen den einzelnen Bedienfenstern bzw. den einzelnen Baugruppen (z. B. Pumpstation, Fermenter, Nachgärer) erlauben. Darüber hinaus erhält der Übersichtsbereich den Namen der Biogasanlage, Datum und Wochentag sowie die aktuelle Uhrzeit und den zurzeit angemeldeten Bediener (Abbildung 10.14).
- Meldebereich mit aktuellen Störmeldungen (direkt unter dem Übersichtsbereich)
- Windows-Befehlsebene: Im unteren Bereich befindet sich die Windows-Befehlsleiste, die ein Umschalten bzw. das Starten anderer Applikationen (z. B. Excel, Word) erlaubt.
- Grafik- und Bedienebene (Mitte): Im mittleren Bereich des PLS-Monitors wird das jeweils aktuelle Grafik- und Bedienfenster der ausgewählten Baugruppe dargestellt (z. B. der Fermenter – siehe Abb. 10.15). Über dieses Fenster kann die Bedienung und Parametrierung der Baugruppe vorgenommen werden. Dargestellt sind jeweils alle wichtigen Komponenten, wie z. B. im Falle eines Fermenters:
  - Baugruppen (hier: Eintragsschnecke, Tauchmotorrührwerk, Schrägflügelrührwerk)
  - Armaturen (hier: z. B. diverse Schieber mit/ohne Stellantrieb)
  - Maschinen und Aggregate (hier: z. B. die Antriebe der Rührwerke),
  - Messstellen (hier: z. B. pH-/Redox-/LF-/TS-Wert, Gasfüllstand, Gasdruck, Füllstand, Temperatur im Reaktor sowie der Vor- und Rücklauftemperatur der Heizung)
  - Betriebskenngrößen (hier: errechnete hydraulische Verweildauer im Fermenter)
  - Status-, Warn- und Alarmmeldungen (hier: z. B. PLS Hand)
  - Leitungswege (hier: z. B. Druckleitung Substrat, Saugleitung Substrat).
  - Sonstiges (hier: z. B. Stromaufnahme des Tauchmotorrührwerks, Frequenz des Frequenzumformers des Schrägflügelrührwerks)

Abb. 10.14: Übersichtsbereich eines Biogasanlagen-PLS (Bildquelle: *ASA/EnerCess [2005-2008]*)

b) Einfaches und klares Navigieren

Neben den Bedienknöpfen im Übersichtsbereich ist ein Navigieren zwischen den einzelnen Baugruppen auch über diverse Navigationsknöpfe im Grafik- und Bedienfenster möglich, die an den Start und Endpunkten der Leitungswege angeordnet sind und ein Weiterschalten zu den vor- und nachgeschalteten Baugruppen ermöglicht.

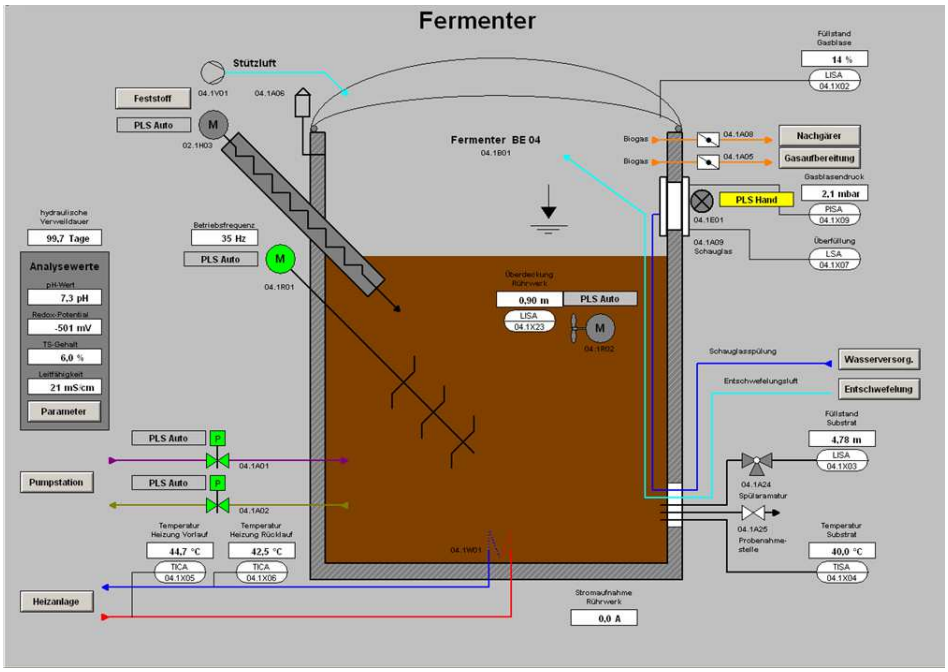


Abb. 10.15: Visualisierung eines Fermenters mit allen wichtigen Prozess-/Betriebsgrößen in der Grafik- und Bedienebene (Bildquelle: *ASA/EnerCess [2005-2008]*)

c) Einfache und durchgehende Bedienbarkeit

Von diesen zahlreichen Armaturen können die Schieber mit Stellantrieb, Pumpen, Rührwerke et cetera automatisch bzw. vom Bediener über das Leitsystem angesteuert werden. Durch Mausklick auf das entsprechende Symbol können verschiedene Fenster geöffnet werden, die eine Bedienung, eine Parametrierung und eine Information erlauben. Abbildung 10.16 verdeutlicht dies exemplarisch anhand eines Automatikschiebers.

Abb. 10.16: Bedienfenster (links), Infofenster (Mitte) und Parametrierfenster (rechts) für einen Schieber (Bildquelle: *ASA/EnerCess [2005-2008]*)

Bedienfenster (hier dargestellt am Beispiel eines Automatikschiebers):

Auto Ist der Funktionsknopf Auto aktiviert, so wird der entsprechende Schieber vom Leitsystem automatisch angesteuert; z. B. in Abhängigkeit des hinterlegten Fütterungsplans

Hand Ist der Funktionsknopf Hand aktiviert, so wird der entsprechende Schieber vom Bediener per Hand angesteuert:

- Ist der Funktionsknopf ZU aktiviert, so wird der entsprechende Schieber vom Bediener per Hand geschlossen.
- Ist der Funktionsknopf AUF aktiviert, so wird der entsprechende Schieber vom Bediener per Hand geöffnet.

Störung quittieren Wird der Funktionsknopf „Störung quittieren“ aktiviert, so wird eine eventuell vorliegende Störung quittiert.

Parametrierfenster (hier dargestellt am Beispiel eines Automatikschiebers):

Weiterhin können die entsprechenden Armaturen und Aggregate auch parametriert werden. So können zum Beispiel Parameter für die Überwachung der Schieber vorgegeben werden, um Defekte oder Verstopfungen zu identifizieren:

- Ansprechverzögerung Endlage: Hier wird definiert, wie viel Zeit vergehen darf, bis der Schieber die jeweilige Endlage erreicht
- Pause vor nächstem Versuch: Hier wird definiert, wie viel Zeit vergehen soll, bis ein neuer Versuch zum Öffnen bzw. Schließen des Schiebers gestartet wird
- Wiederholungen max.: Hier wird definiert, wie viel Versuche durchgeführt werden, den Schieber in die jeweilige Endlage zu bringen, bis ein Alarm ausgelöst wird.

Informationsfenster (hier dargestellt am Beispiel eines Automatikschiebers):

Im Infofenster können Informationen für den jeweiligen Schieber abgerufen werden, wie z.B.:

- Schaltspiele: Wie oft wurde der Schieber bisher geschaltet?
- Letzte Laufzeit AUF: Wie lange dauerte das letzte Öffnen des Schiebers?
- Letzte Laufzeit ZU: Wie lange dauerte das letzte Schließen des Schiebers?

Nach ähnlichen Prinzipien lassen sich auch Pumpen, Rührwerke, Messgeräte et cetera einfach und durchgehend organisieren (Tabelle 10.4). Hier sollten nach Möglichkeit auch Hinweise auf Betriebsstunden erkennbar sein.

Messstellenübersicht

Ferner sind alle wichtigen Messstellen schematisch im Grafik- und Bedienfenster dargestellt. Eine Messstelle wird oftmals gekennzeichnet durch ein liegendes Ovales „Messstellenschild“ (siehe Abb. 10.15). Sofern ein Messsignal kontinuierlich erfasst wird, so wird auch der aktuelle Messwert angezeigt: entweder in Form einer digitalen Anzeige des Wertes oder auch in Form eines Leistungsanzeigers in analoger Form. Sofern kontinuierlich ein Messsignal erfasst wird, so kann dieser Wert durch Mausklick auch angeklickt werden. In diesem Fall geht ein Unterfenster auf, dem zahlreiche weitere Informationen – insbesondere auch der historische Verlauf des Messsignals – entnommen werden können (Abbildung 10.17). Diese Informationen können unter anderem für eine Leistungsanalyse, Störungsanalyse o.ä. verwendet werden.

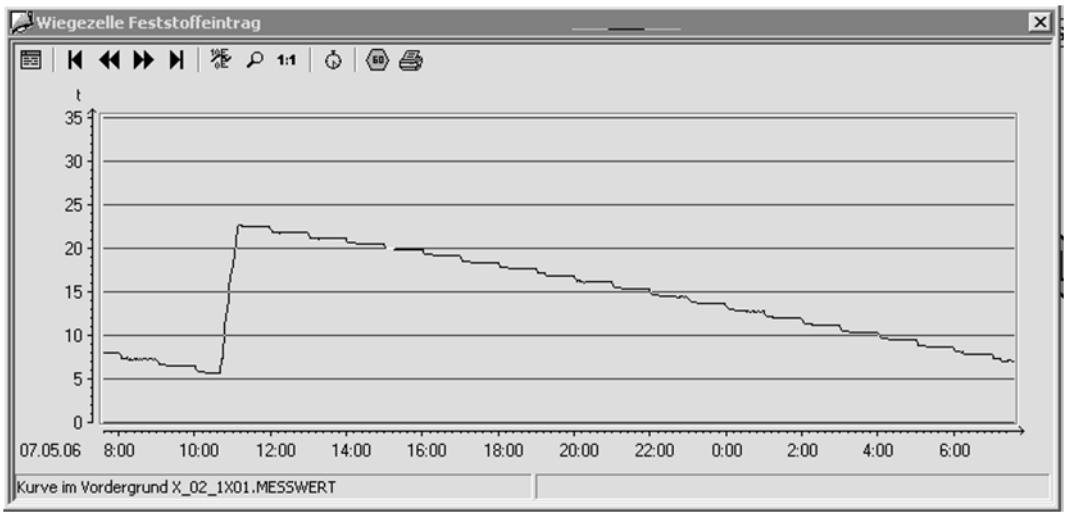


Abb. 10.17: Wiegezellemessweertverlauf (Bildquelle: *ASA/EnerCess [2005-2008]*)

d) Status-, Warn- und Alarmmeldungen

Alle wichtigen Status-, Warn- und Alarmmeldungen werden ebenfalls im Grafik- und Bedienfenster dargestellt (Ein / Aktiv / Auto: **Grün**, Aus: **Gelb**, Störung quittiert: **Rot**, Störung unquittiert: **Rot blinkend**).

Tab. 10.4: Bedienung, Parametrierung und Information für verschiedene Aggregate

Aggregate	Bedienung	Parametrierung	Information
Armaturen	Auto/Hand/Störung quittieren	Ansprechverzögerung Endlagen, max. Wiederholungen bis zum Erreichen der Endlage, Pause zwischen zwei Versuchen	Schaltspiele, Laufzeiten Auf/Zu
Messstellen	Störung quittieren	Physikalische Ober- und Untergrenzen, Hysterese, Verzögerung Grenzwert (zur Vermeidung kurzzeitiger Ausreißerwerte), Verzögerung Störmeldung, Schaltpunkte (z. B. Beschickung sperren), Warnpunkte, Alarmpunkte, Plausibilitätsgrößen (z. B. Durchfluss)	
Pumpen	Auto/Hand/Störung quittieren	Ansprechverzögerung Druck/ Durchfluss, max. Wiederholungen, Pause zwischen zwei Versuchen	Schaltspiele, Betriebsstunden
Förderschnecken	Auto/Hand/Störung quittieren/Halt		Schaltspiele, Betriebsstunden
Rührwerke	Auto/Hand/Störung quittieren	Dauerbetrieb an/aus, Takt-Pause-Schaltuhr	Schaltspiele, Betriebsstunden

10.1.9.2 Berichtswesen

Über CSV-Dateien können automatisch Reports in definierten Zeitabständen generiert werden, wie Tages-, Wochen-, Monats- und Jahresberichte. Derartige Berichte enthalten beispielsweise die folgenden Einträge:

Beispiel eines Tagesprotokolls:

1. Fütterungsdaten
   - Feststoffdosierer [t/d]
   - Flüssige Stoffe [m^3/d]
   - Rezirkulat [m^3/d]
   - Rübenmus [m^3/d]
2. Energieerzeugung
   - Gesamtbiogasproduktion (Endloszähler) [m^3]
   - Biogasgasverbrauch [m^3/d]
   - Lieferzählerstand (Endloszähler) [kWh]
   - Wirkarbeit [kWh/d]
   - Mittlere Wirkleistung des BHKW [kW]
   - Verfügbarkeit [%]
   - Mittlere Auslastung [%]
3. Energieverbrauch
   - Bezugszählerstand (Endloszähler) [kWh]
   - Wirkarbeit [kWh/d]
   - Mittelwert Wirkleistung [kW]
   - Maximalwert Wirkleistung [kW]
   - Maximalwert Scheinleistung [kVA]
   - Blindarbeit [kvarh]
   - Mittelwert Blindleistung [kvar]
   - Maximalwert Blindleistung [kvar]
4. Analysedaten Vorbehälter (Tagesmittelwerte)
   - pH-Wert [pH]
   - Temperatur [°C]
   - Redox-Potential [mV]
   - TS-Gehalt [%]
5. Analysedaten Fermenter (Tagesmittelwerte)
   - pH-Wert [pH]
   - Temperatur [°C]
   - Redox-Potential [mV]
   - TS-Gehalt [%]

6. Analysedaten Nachgärer (Tagesmittelwerte)
   - pH-Wert [pH]
   - Temperatur [°C]
   - Redox-Potential [mV]
   - TS-Gehalt [%]
7. Analysedaten Gärrestlager (Tagesmittelwerte)
   - pH-Wert [pH]
   - Temperatur [°C]
   - Redox-Potential [mV]
   - TS-Gehalt [%]
8. Analysedaten Biogas (Tagesmittelwerte)
   - Methangehalt [%]
   - Kohlendioxidgehalt [%]
   - Sauerstoffgehalt [%]
   - Schwefelwasserstoffkonzentration [ppm]
9. Stoffstrombilanz
   - Vorbehälter
     a. Gesamtzulauf [m^3/d]
     b. Gesamtablauf [m^3/d]
     c. Ablauf nach Vorbehälter [m^3/d] (für Messfahrt)
     d. Ablauf nach Fermenter [m^3/d]
     e. Ablauf nach Nachgärer [m^3/d]
     f. Ablauf nach Gärrestlager [m^3/d]
   - Rübenmus
     a. Gesamtablauf [m^3/d]
     b. Ablauf nach Vorbehälter [m^3/d]
     c. Ablauf nach Fermenter [m^3/d]
     d. Ablauf nach Nachgärer [m^3/d]
   - Feststoffeintrag
     a. Gesamtbefüllung [t/d]
     b. Gesamtentnahme [t/d]
     c. Fütterung nach Fermenter [t/d]
     d. Fütterung nach Nachgärer [t/d]
   - Fermenter
     a. Gesamtzulauf [m^3/d]
     b. Gesamtablauf [m^3/d]
     c. Ablauf nach Vorbehälter [m^3/d]
     d. Ablauf nach Fermenter [m^3/d] (für Messfahrt)
     e. Ablauf nach Nachgärer [m^3/d]

f. Ablauf nach Gärrestlager [m^3/d]
g. Mittlere Verweildauer [d]

- Nachgärer
  a. Gesamtzulauf [m^3/d]
  b. Gesamtablauf [m^3/d]
  c. Ablauf nach Vorbehälter [m^3/d]
  d. Ablauf nach Fermenter [m^3/d]
  e. Ablauf nach Nachgärer [m^3/d] (für Messfahrt)
  f. Ablauf nach Gärrestlager [m^3/d]
  g. Mittlere Verweildauer [d]
- Gärrestlager
  a. Gesamtzulauf [m^3]
  b. Gesamtablauf [m^3]
  c. Ablauf nach Vorbehälter [m^3/d]
  d. Ablauf nach Fermenter [m^3/d]
  e. Ablauf nach Nachgärer [m^3/d]
  f. Ablauf nach Gärrestlager [m^3/d] (für Messfahrt)
  g. Abgabe über Dosierstation [m^3/d]

Diese Daten lassen sich einfach in Excel importieren oder an andere Programme (z. B. digitale Betriebstagebücher) übergeben. Damit stellen sie die Grundlage für ein (teilautomatisiertes) Benchmarking und Controlling dar.

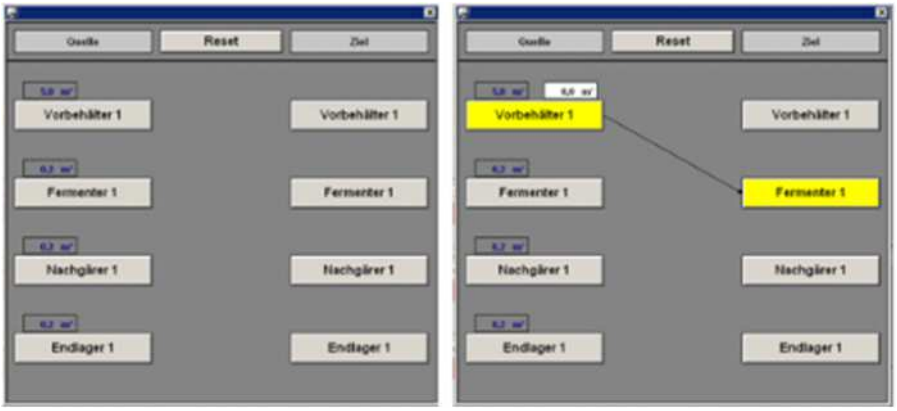


Abb. 10.18: Handbetrieb im Semi-Automatikbetrieb (links: direkt nach Öffnen des Menüs, rechts: nach Eingabe der gewünschten Charge: in diesem Beispiel werden 5 m^3 Substrat von dem Vorbehälter 1 in den Fermenter 1 gepumpt) (Bildquelle: *ASA/EnerCess [2005-2008]*)

10.1.9.3 Teilautomatisierung manueller Bedienschritte

Um den Bediener die Arbeit im Handbetrieb zu erleichtern bzw. die Arbeitseffizienz zu steigern, können Hilfstools entwickelt werden, welche manuelle Eingriffe erleichtern. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 10.18 dargestellt: Der Bediener hat hier die Möglichkeit, durch Anklicken der Quelle (d. h. der Behälter aus dem gepumpt werden soll) und durch Anklicken des Ziels (d. h.

der Behälter in den gepumpt werden soll) und durch Vorgabe des zu pumpenden Volumenstrom einen Semi-Automatikbetrieb zu wählen. In diesem Fall stellt das Prozessleitsystem anschließend die Pumpe und die erforderlichen Pneumatikschieber automatisch ein, um das gewünschte Ziel zu erreichen; die Anzahl der von den Bedienern durchzuführenden Handeingriffe wird dadurch reduziert. Während der Pumpzeit kann dem Anzeigefenster ebenfalls entnommen werden, wie viel Volumen (in m^3) bereits gepumpt wurden bzw. insgesamt gepumpt werden sollen.

10.1.10 Benchmarking, Controlling und Stoffstrombilanzen

Es gibt verschiedene Publikationen, in denen die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen beurteilt wird (z. B. *FNR [2005]*). In den letzten Jahren gab es zudem Versuche, Kennzahlensysteme für Biogasanlagen zu erarbeiten (z. B. *VDI [2008]*). Ferner wurden bereits erste Statistiken über Biogasanlagen veröffentlicht (z. B. *Weiland [2009], Effenberger et al. [2008]*). Die publizierten Werte stammen aber überwiegend von Anlagen, deren Prozessführung nicht oder nur kaum überwacht wird. Praktisch alle diese Bestrebungen haben somit eines gemeinsam: Es wurden einfach zu erhebende bzw. kontrollierende Kennzahl verwendet (z. B. Anschlussgröße der Anlage, Behältervolumina, Art der zu vergärenden Substrate). Dies ist insofern nicht verwunderlich, da ein funktionierendes Controlling- und Benchmarking-System unter anderem die folgenden Randbedingungen aufweisen sollte:

- Es muss eine ausreichend große Anzahl von Messwerten vorhanden sein, um ein Ergebnis statistisch absichern zu können. Die Verteilung der einzelnen Messwerte über die Zeit sollte dabei das Belastungsspektrum, jahreszeitliche Einflüsse etc. abdecken. Dies setzt jedoch eine regelmäßige Analyse wichtiger Prozessgrößen voraus; bisher genügen jedoch die wenigsten Biogasanlagen diesen Ansprüchen.
- Für die Zuverlässigkeit der Ergebnisse ist es wichtig, dass Plausibilitäts- und Bilanzkontrollen für die Gesamtanlage und einzelne Teilsysteme durchgeführt werden. Dies setzt jedoch voraus, dass die einzelnen Ein- und Austragspfade messtechnisch erfasst oder zumindest zuverlässig abgeschätzt werden können. Die Praxis zeigt jedoch, dass auf vielen Biogasanlage oft nicht einmal eine verhältnismäßig einfache Stoffstrombilanz für die Gesamtanlage möglich ist, da etwa die Inputstoffe nach Art und Menge nicht oder nur lückenhaft in den Betriebstagebüchern dokumentiert werden.
- Für eine Plausibilitätsprüfung kann es sinnvoll sein, einzelne Betriebskennzahlen redundant und auf verschiedene Art und Weise zu erfassen.

Bezüglich dieser Aspekte weist die beschriebene Biogasanlage entscheidende Vorteile auf, denn mit Hilfe der zahlreichen Messgeräte kann eine fundierte Datenbasis ermittelt werden, die ausreichend ist, um zuverlässige Daten für Benchmarking und Controlling zu gewinnen. Tabelle 10.5 zeigt einige Betriebsdaten der Biogasanlage im Vergleich zu zwei bisherigen Benchmarking-Studien:

- *FNR [2005]:* 59 Biogasanlagen bundesweit
- *HMUIRV [2006]:* 16 Biogasanlagen, welche zwischen 1996 und 2002 in Hessen gebaut wurden.

Tabelle 10.5 verdeutlicht, dass die Betriebsergebnisse sehr gut sind, obwohl die eingesetzten Stoffe (z. B. Rindergülle, Maissilage) eine geringere Energiedichte aufweisen als die

Eingangsstoffe einiger andere Biogasanlagen der Vergleichsstudien, die mit Eingangsstoffen hoher Energiedichte (z. B. Altfett, Gylcerin) arbeiten. Vor allem die Auslastung des Gasmotors ist sehr hoch (95,1 %).

Tab. 10.5: Betriebsdaten (2 Volllast-Betriebsjahre) (NawaRo, 500 kW_{el}, Baujahr 2006) (Vergleichswerte nach *FNR [2005]* bzw. *HMUIRV [2006]*) (MD = Medianwert, MW = Mittelwert, B = Bandbreite) (*Wiese und König [2009A]*)

Betriebskennziffern	**Einheit**	**Wert**	**Benchmark**
Elektrische Produktion zu Input-Menge	kWh/t_{input}	249	53-570 B; 150 MD
Elektrische Produktion zu Biogas	kWh/m^3_{Biogas}	1,81	1,4-2,4 B
Energieverbrauch vs. Energieproduktion	%	7,7	3-14 B, *8 MW*
Methanproduktion zu Reaktorvolumen	$m^3_{CH4}/(m^3_R \cdot d)$	1,33	0,3-1,1 B; 0,7 MW
Auslastung des Gasmotors (530 kW)	%	96,1	*62,0 MD*
Abbaugrad der Biomasse	%	77,3	*61,5 MW*

Nicht nur für Zwecke des Benchmarkings, sondern auch für Dokumentationszwecke, für Zwecke der Optimierung und der Computersimulation sind zuverlässige Stoffstrombilanzen eine wichtige Grundlage. Dabei ist wichtig, dass sich durch Einsatz umfangreicher Messtechnik auch Bilanzen überbestimmen lassen, sodass sich diese auch zuverlässig schließen bzw. abgrenzen lassen; dies wiederum gestattet eine Fehleranalyse. Tabelle 10.6 verdeutlicht, dass es im vorliegenden Fall gelungen ist, die Bilanz recht genau zu schließen: Auf der Basis der vom Prozessleitsystem dokumentierten Feststoff-, Biogas- und Flüssigkeitsströme sowie ergänzender Labormessungen war es möglich, eine überbestimmte Bilanz aufzustellen. Die Tabelle 10.6 verdeutlicht, dass die zur Biogaserzeugung eingesetzten TM- und oTM-Frachten nahezu dem Gewicht des erzeugten Biogases entspricht. Die guten Werte lassen sich wie folgt erklären:

- Die Durchflussmessung kann über einen Abgleich der Veränderung des Füllstands in der Vorgrube (und der daraus resultierenden Volumenänderung) abgeglichen werden.
- Die Wägezellen des Ferststoffdosierers können über einen Abgleich des Gewichts des Radladers vor und nach der Beladung mit der LKW-Waage kontrolliert werden.
- Für die Anlage standen im betrachten Zeitraum zahlreiche Labormessungen zur Verfügung, die entweder vor Ort oder in einem externen Labor ermittelt wurden.

Abbildung 10.19 zeigt die monatliche Durchschnittsleistung des BHKW während der ersten 32 Monate nach Inbetriebnahme: Die durchschnittliche Auslastung liegt bei 515 kW_{el} (oder 4,5 Millionen kWh pro Jahr) oder 103 % des Bemessungswertes der Anaerobstufe (500 kW_{el}) bzw. 97,2 % der BHKW-Leistung.

Tab. 10.6: Teile einer Volumenstrom-/Massenbilanz für die Biogasanlage (August 2006 bis Juli 2008) (*Wiese und König [2009A]*)

(organische) Trockenmasse		**TM**	**oTM**
Eingangssubstrate	Mg	8.173	7.635
Gärrest	Mg	1.695	1.172
Massenänderung im Gärrestlager	Mg	28	21
Zwischensumme 1 ≈ Biogasproduktion	Mg	6.450	6.442
Biogasproduktion: 5.151.279 m³		**Biogas**	
CH_4 Produktion (2.797.564 m³)	Mg	1.971	
CO_2 Produktion (2.211.709 m³)	Mg	4.278	
Luftzufuhr (interne Entschwefelung)	Mg	189	
Zwischensumme 2 = Biogasproduktion	Mg	6.428	

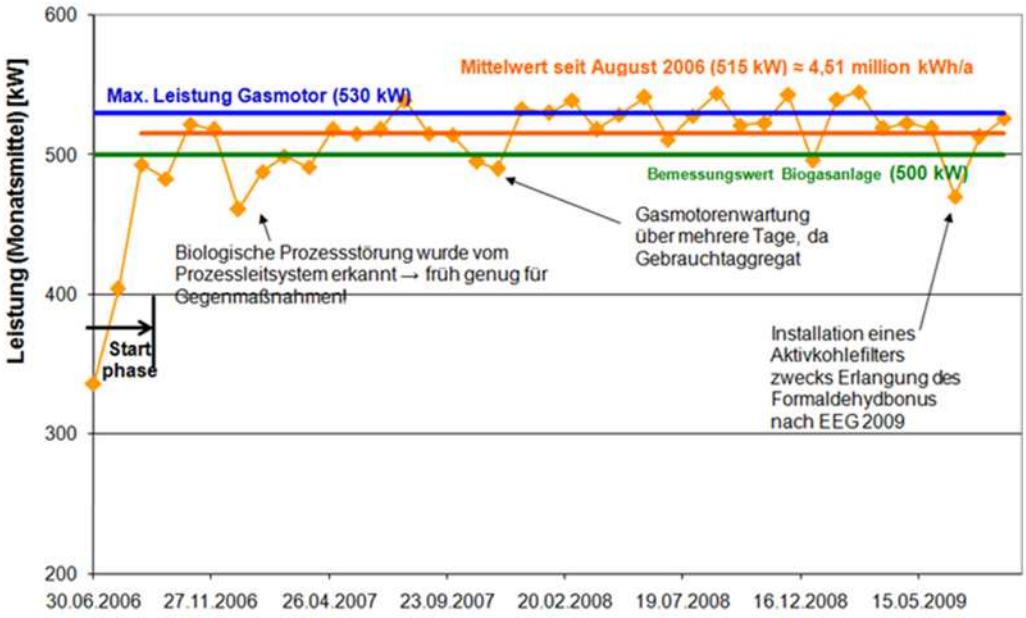


Abb. 10.19: Monatliche durchschnittliche BHKW-Leistung für einen Zeitraum von ca. 2,5 Jahren nach Inbetriebnahme (*Wiese und König [2009A]*)

Scherer [2008B] macht Vorschläge zur Bilanzierung von Biogasanlagen auf Basis einer Kohlenstoffbilanz. *Van Eekert [2011C]* gibt eine Einführung zur Massen- und CSB-Bilanzierung von anaeroben Abwasserreinigungsanlagen; einige Hinweise sind aber auch für die Bilanzierung von Biogasanlagen zur Behandlung organischer Reststoffe und Energiepflanzen interessant.

10.1.11 Simulation

Die zahlreichen erfassten Mess- und Prozessdaten waren eine gute Grundlage für die Erstellung eines dynamischen Computermodells für diese Anlage: *You und Bischoff [2008]* haben mit diesen Daten und dem Softwarepaket „MATLAB/SIMULINK/SIMBA“ ein Computermodell auf Basis des IWA-ADM 1 (*Batstone et al. [2002]*) für diese Biogasanlage aufgestellt. Bei „MATLAB“ handelt es sich um eine Sprache für technische Berechnungen. „SIMULINK“ ist eine Entwicklungsplattform für Systemmodellierung und Simulation, die auf „MATLAB“ aufbaut (*TheMathWorks [2004])*. Diese Software ist in zahlreichen Disziplinen der Ingenieurwissenschaften weit verbreitet, zumal der Hersteller viele Ergänzungsmodule anbietet. Ferner wurden von anderen Firmen Programme entwickelt, die auf „MATLAB/ SIMULINK“ aufbauen. Beispielsweise basiert das im deutschsprachigen Raum weit verbreitete Kläranlagensimulationsprogramm „SIMBA“ auf „MATLAB/SIMULINK“. Dieses Programmpaket, das von der ifak system GmbH, Magdeburg entwickelt und vertrieben wird, ist ein objektorientiertes Kläranlagensimulationsprogramm (*IFAK [2005]*), welches ebenfalls zur Simulation von Biogasanlagen eingesetzt werden kann. Abbildung 10.20 verdeutlicht, dass im Rahmen dieser Diplomarbeit bereits mit geringem Aufwand gute Übereinstimmung zwischen der Realität und dem Modell erzielt werden konnten.

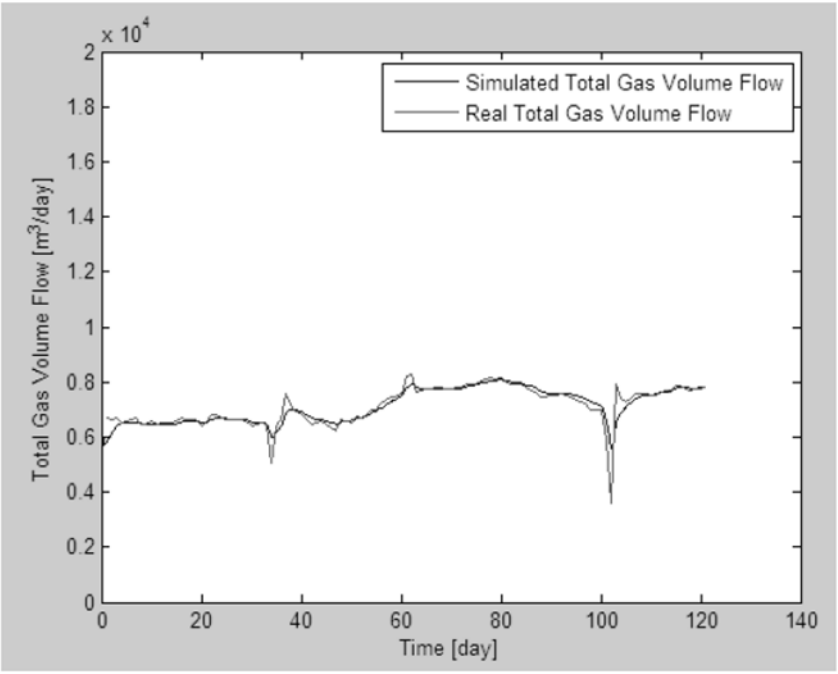


Abb. 10.20: Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Gasdurchfluss (*You und Bischoff [2008]*)

10.2 Vom Grey-Box-System zum White-Box-System

Das nachfolgende Beispiel stellt eine Weiterentwicklung des Anlagen- und Automationskonzeptes dar, welches bereits in Kapitel 10.1 beschrieben wurde. Die eingesetzte Maschinen- und Bautechnik dieser NawaRo-Biogasanlage (537 kW_{el} Gasmotor), die 2007 gebaut wurde, ist in fast allen Teilen identisch mit der dort beschriebenen Anlage, jedoch wurde das Mess- und Automationskonzept um die folgenden Komponenten erweitert.

10.2.1 Videoüberwachung eines Anaerobreaktors

Eine optimale Durchmischung eines Reaktors ist eine Voraussetzung für einen effizienten Anlagenbetrieb. Ferner können sowohl betriebliche Probleme (z. B. Schwimmschichten) als auch biologische Probleme (z. B. Schaumbildung) optisch-visuell an der Grenzfläche „Flüssigkeit/Gasphase“, d. h. der Oberfläche des Anaerobreaktors, abgelesen werden und lassen damit früher Rückschlüsse auf sich abzeichnende Probleme zu: Schaum-, Schwimm- und Sinkschichten beeinträchtigen die Leistungsfähigkeit des Anaerobprozesses und verursachen zudem betriebliche Probleme, da sich ab einer bestimmten Stärke die Schwimmschicht nicht mehr durch die Rührwerke zerstören lassen. Die übliche Vorgehensweise ist daher eine tägliche Sichtkontrolle durch Schaugläser. Die Praxis zeigt jedoch, dass diese Vorgehensweise mit zahlreichen Problemen behaftet ist, wie etwa eine schlechte Ausleuchtung des Reaktors, witterungsbedingte Störeinflüsse (z. B. Spiegelungseffekte am Schauglas bei starker Sonneneinstrahlung) und keine Möglichkeit der Ferndiagnose. Daher kann zwecks Überwachung des Fermenters eine Ex-Zonen-Videokamera mit Zoom- und Weitwinkelfunktion installiert werden; die ggf. auch an das Prozessleitsystem angebunden werden kann.

Eine derartige Kamera bietet die folgenden Möglichkeiten:

- Identifikation von Schwimm- und Schaumschichten
- Abschätzung des Entgasungsverhaltens (z. B. durch die Größe und Intensität der aufsteigenden Gasblasen)
- Komplettierung der Ferndiagnosemöglichkeiten durch das virtuelle Zuschalten von Experten. D. h. eine Kombination von Messwerten und optischen Eindrücken zur Verbesserung der Datengrundlage bei der Entscheidungsfindung.
- Nutzung der Kamera zur Optimierung der Rührwerke (siehe Abbildung 10.21), wie z. B.:
  - Schwimmschicht und Schaumprobleme können die Folge einer zu geringen Rührwerksintensität sein. Als Abhilfemaßnahme kann damit experimentiert werden, die Höhe des Tauchmotorrührwerks zu verändern und/oder die Pausenintervalle der Rührwerke zu verkürzen.
  - Wie lange benötigt das Tauchmotorrührwerk, um eine entstandene Schwimmschicht aufzubrechen?
  - Wie lange dauert es, bis das zugegebene Substrat voll untergemischt wurde?

Das Ergebnis derartiger Versuchsreihen lässt sich dann mit Hilfe der Videoaufzeichnungen sofort optisch-visuell analysieren. Ein Beispiel für eine derartige Anwendung zeigt Abbildung 10.21: Die hier dargestellte Kamera ist eine Lumiglas Kamera (Ex-Schutz) der Fa. Papenmeier (*Papenmeier [2007]*): Die Kamera besitzt einen ¼”-CCD Bildaufnehmer und ist ab einer Lichtempfindlichkeit von mindestens 2 Lux einsetzbar. Die Kamera liefert etwa 400.000 Bildpunkte und verfügt über einen 10-fachen optischen Zoom sowie einen 4-fachen digitalen Zoom. Die Investitionskosten für ein derartiges System betragen ab 7.000 €.

Abb. 10.21: Überwachung der Fermenteroberfläche mit Hilfe einer Ex-Zonen-Videokamera (c) mit Weitwinkel-Funktion (a) und Zoom-Funktion (b) (*Wiese et al. [2008B]*)

Da die Kamera von außen durch das Schauglas in den Reaktorraum hineinschaut, ist es wichtig, dass die Kamera durch eine vorgesetzte Haube von Lichteinfall abgeschottet wird. Über eine Schauglasleuchte in Ex-Ausführung an einem benachbarten Schauglas kann die für die Kamera erforderliche Ausleuchtung des Reaktorraums erfolgen. Es ist darauf zu achten, dass das Schauglas mit einem Scheibenwischer ausgestattet ist, da ansonsten schnell durch Bewuchs o. ä. eine Erblindung der Scheibe und damit der Kamera eintritt. Um die Reinigung weiter zu verbessern, empfiehlt sich die Installation einer Schauglasspülung von der Innenseite des Reaktors, die manuell oder automatisch (z. B. 1 x pro Stunde) eine Spülung des Glases erlaubt.

10.2.2 Eingangskontrolle von flüssigen Substraten

Auch flüssige Substrate können bezüglich ihrer stofflichen Eigenschaften erheblichen Schwankungen unterliegen. Damit besteht die Gefahr, dass auch für die Stabilität des Gärprozesses gefährliche Stoffe der Biogasanlage zugeführt werden. Bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen können diese zum Beispiel folgenden Stoffe sein:

- Flüssige Wirtschaftsdünger, die aufgrund von Reinigungsarbeiten im Stall übermäßig mit Reinigungs- und Desinfektionsmitteln belastet sind.
- Silagesickersäfte mit hohen Konzentrationen an organischen Säuren und niedriger Pufferkapazität.

Um die Zugabe derartiger Stoffe zu vermeiden oder zumindest eine unschädliche Dosierung in kleineren Dosen zu ermöglichen, bietet es sich an, Indirektparameter zur Erkennung derartiger Stoffe einzusetzen. Tabelle 10.7 zeigt, dass sich durch eine Kombination von pH, Redox, elektrolytische Leitfähigkeit und TS die Substrate sehr gut charakterisieren und unterscheiden lassen. Ist eine Biogasanlage mit einer zentralen Pumpstation und den entsprechenden Indirektparametermessungen ausgestattet, so lässt sich auch ohne den Einsatz komplexer Algorhytmen oder Künstlicher Intelligenz relativ einfach eine Eingangskontrolle („Dosiere ich Gülle, Reinigungsmittel oder Silagesickersäfte?“) sicherstellen: Weicht der Analysewert eines oder mehrerer Parameter bei der Dosierung aus der Vorgrube in den

Fermenter von den üblichen Erfahrungswerten ab, so wird die Beschickung gestoppt und der Betriebsleiter informiert. Bei Kofermente-Biogasanlagen, bei denen viele verschiedene Flüssigsubstrate zum Einsatz kommen, dürfte eine solche Qualitätskontrolle deutlich schwieriger zu implementieren sein. Aufgrund der größeren Störanfälligkeit können aber auch hier die oben genannten Parameter eine sinnvolle Kontrollmöglichkeit darstellen.

Tab. 10.7: Indirektparameter für ausgesuchte Substrate (ermittelt auf Daten zweier landwirtschaftlicher NawaRo-Biogasanlagen) (*Wiese und König [2009A]*)

Typ (Beispiele):	pH [-]	Redox [mV]	Elekt. LF [mS/cm]	TS [%]
Silagesickersäfte	< 4	> 0	≈ 8	< 1
Rindergülle	7,0 – 7,2	< -300	12 – 15	2 - 5
Schweinegülle	7,8 – 8,0	< -300	≈ 13	≈ 2

10.2.3 Niveauüberwachung von Tauchmotorrührwerken

Manuell höhenverstellbare Tauchmotorrührwerke kommen sehr häufig zum Einsatz, u. a. da sie durch Niveauanpassung sowohl Schwimmschichten aufbrechen als auch Sinkschichten aufwirbeln können. Die Praxis zeigt jedoch, dass Tauchmotorrührwerke oft über eine längere Dauer auf einem Niveau belassen werden, was zu Sink- und Schwimmschichten führen kann. Dies hat wiederum einen negativen Einfluss auf den Betrieb. Ferner kann man beobachten, dass viele Betreiber nicht genau wissen, auf welcher Höhe sich die Tauchmotorrührwerke zurzeit befinden, da etwa Markierungsstriche an den Seilwinden witterungsbedingt nach einiger Zeit nicht mehr erkennbar sind. In diesem Zusammenhang besteht die Gefahr, dass die Tauchmotorrührwerke zu weit angehoben werden, ggf. sogar in den Gasbereich. Hierdurch können potenziell kritische Situationen entstehen, wie z. B.:

- Die Unterdrucksicherung des Gasspeicherdaches springt an, wodurch Luft in den Gasraum eingesaugt wird. Hierdurch kann ein explosibles Luft-Methan-Gemisch entstehen, das wiederum durch einen Zündfunken (z. B. durch das nicht ex-geschützte Tauchmotorrührwerk) entzündet wird.
- Oftmals sind die Abfangkonstruktionen für die Gasmembran nicht flächendeckend oder im Laufe der Zeit lückenhaft (z. B. bei Netzkonstruktionen). Bei leerer Gasmembran kann dann die Folie absinken und durch ein Rührwerk beschädigt werden, wodurch schnell ein erheblicher Schaden entsteht.

Um diese Risiken zu reduzieren, hat der Autor gute Erfahrungen mit einer einfachen Konstruktion gemacht: Ein Tauchmotorrührwerk lässt sich kostengünstig mit einer Füllstandsmessung ausrüsten (Abb. 10.22), die zum einen das Rührwerk notabschalten kann (z. B. wenn eine Mindestüberdeckung zum Gasraum unterschritten wird) oder eine Alarmierung auslöst, wenn das Rührwerk über eine gewisse Dauer nicht bewegt wird. Die lückenlose Dokumentation der Höhenlage des Rührwerks kann zudem in Kombination mit den optischen Beobachtungen des Betreibers (z. B. Art und Umfang einer Schwimmschichtbildung) Rückschlüsse auf eine Optimierung der Rührwerke liefern.

Abb. 10.22: Tauchmotorrührwerk mit einer Niveaumessung auf Basis eines einfachen Drucksensors (*Wiese und König [2009C]*)

10.2.4 Spülautomatik für Schieber

Die Praxis zeigt, dass der Einsatz bestimmter Stoffe zu Problemen mit den Schiebern führen kann (z. B. Verstopfungen); dieses Problem kann auch beim Einsatz hochwertiger Schieber auftreten. Abbildung 10.23 zeigt ein Beispiel: Durch den Einsatz von größeren Mengen von Grünroggen-Ganzpfkanzensilage kam es nach einer gewissen Zeit zu einer Störung eines Pneumatikschiebers. Ursache hierfür war, dass sich einzelne Silageteilchen in der Schiebernut festgesetzt hatten, sodass er sich nicht mehr ordnungsgemäß schließen ließ.

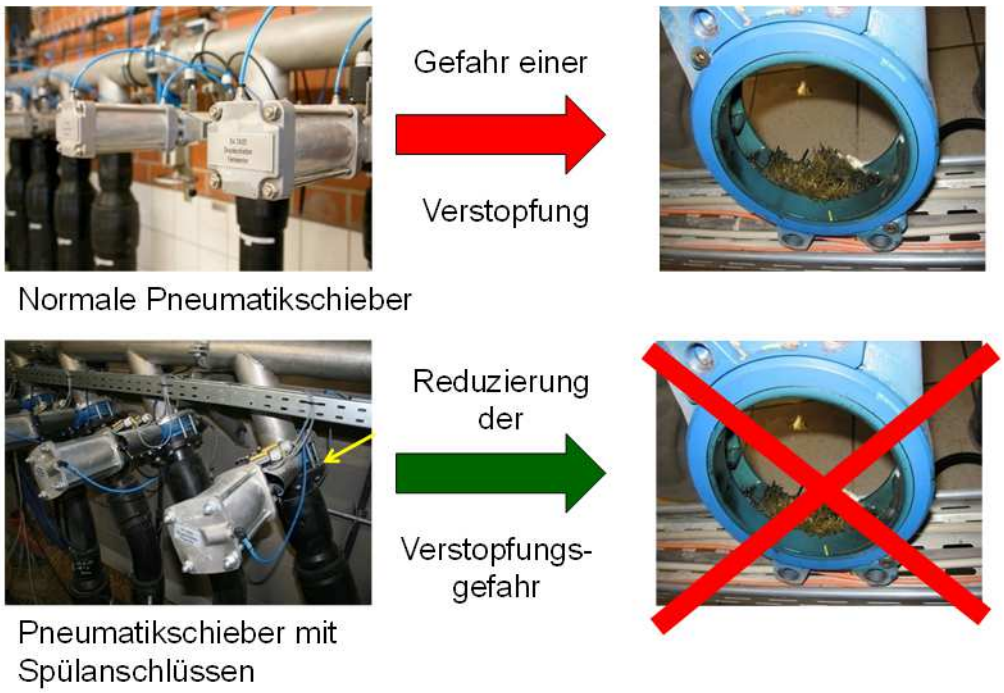


Abb. 10.23: Pneumatikschieber mit und ohne Spülanschlüssen (*Wiese und König [2009C]*)

Da der Aus- und Wiedereinbau eines Schiebers eine zeitaufwändige und zudem schmutzige Arbeit ist, wurde nach Alternativlösungen gesucht: Eine brauchbare Lösung ist der Einsatz von Schiebern mit Spülanschlüssen, die es gestatten, die neuralgischen Punkte der Schieber händisch oder automatisch zu spülen. Die Mehrkosten für derartige Spüleinrichtungen sind überschaubar. Eine automatische Spülung kann z. B. wie folgt aussehen:

- Präventive Spülung der Schieber (z. B. 1 x pro Tag)
- Bedarfsorientiere Spülung der Schieber: Da bei Automatikschiebern sowohl die Endlagen als auch die Dauer zum Öffnen/Schließen der Schieber überwacht werden können, kann bei Bedarf (z.B. beim Überschreiten einer definierten Schließdauer) eine Spülung automatisch veranlasst werden.

Beim Einsatz von Trinkwasser zu Spülzwecken ist unbedingt zu beachten, dass die Spüleinrichtung sauber vom Trinkwasseranschluss getrennt wird, da andernfalls die potenzielle Gefahr einer Rückverkeimung des Trinkwassernetzes besteht.

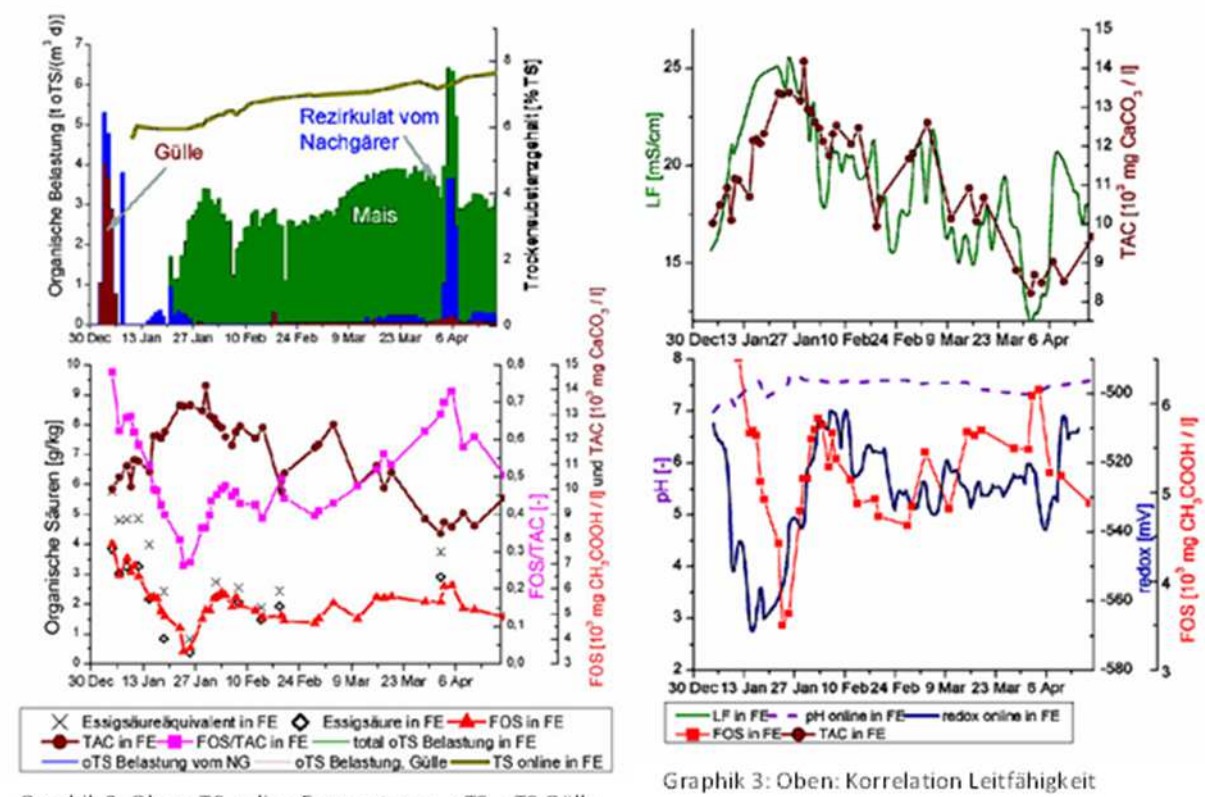
10.2.5 Inbetriebnahme mittels Messtechnik

Der Bau und Betrieb von Biogasanlagen erfolgt aus Sicht des Eigentümers einer Biogasanlage in erster Linie aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten, da die Biogasanlage zum Beispiel eine sinnvolle Ergänzung der Wertschöpfung des landwirtschaftlichen Betriebs des investierenden Landwirts darstellt. Die Inbetriebnahme und damit der Hochfahrbetrieb des Anaerobreaktors stellt damit immer eine Abwägung zwischen Profitabilität und Prozessstabilität dar (siehe Abschnitt 9.7). Um hier das Optimum zu finden, empfiehlt es sich die Startphase intensiv zu begleiten und möglichst viele Informationen über den Anlagenbetrieb bzw. den Prozessverlauf zu sammeln.

Auch diesbezüglich kann der Einsatz umfangreicher Messtechnik von Vorteil sein, wie das nachfolgende Beispiel einer Inbetriebnahme mittels Prozessinstrumentierung zeigt: Die Abbildung 10.24 verdeutlicht die weitgehend störfreie Inbetriebnahme durch Erfassung der wichtigsten Prozessgrößen während der ersten vier Monate des Anlagenbetriebs. Der Fermenter wurde zunächst mit etwas Frischgülle und dem Biogassubstrat einer benachbarten Trockenfermentationsanlage aufgefüllt. Ferner wurde etwas Gärsubstrat aus dem Nachgärer, welcher aufgrund der Bauablaufplanung bereits etwa zwei Wochen zuvor in Betrieb genommen wurde, in den Fermenter zurück gepumpt. Aufgrund der hohen Konzentration organischer Säuren (ca. 10.000 mg/l) des Animpfmaterials aus der Trockenfermentationsanlage, wurde beschlossen, die Zugabe der Maissilage erst dann zu starten, wenn die Konzentration an organischen Säuren signifikant abgenommen hat. Bis zum 20. Januar resultierte aus dieser Vorgehensweise ein deutlicher Rückgang der Essigsäurekonzentration und des FOS-Wertes bzw. ein Anstieg des TAC-Wertes. Besonders interessant ist, dass die Konzentration des FOS-Wertes gut mit dem Redox-Wert bzw. der Verlauf des TAC-Wertes gut mit dem Verlauf der Leitfähigkeit korreliert; dies gilt mit leichten Abweichungen für die gesamte Dauer des betrachteten Auswertezeitraums. Ab dem 20. Januar wurde mit der Fütterung der Maissilage in den Fermenter begonnen. Hierbei ist beachtenswert, dass die online gemessene TS-Konzentration im Verlauf der vier Monate kontinuierlich bis zum Erreichen des Zielwertes von 8 % TS ansteigt. Ein jeweils kurzfristiges (d. h. 3 bis 6 Tage) Absinken des TS-Wertes kann mit der Zugabe von Frischgülle, einer Rezirkulation aus dem Nachgärer oder einer Rücknahme der Feststofffütterung plausibel erklärt werden. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass ein TS-

Sensor nicht nur zur kontinuierlichen Überwachung der Fermenterfütterung, sondern auch zur TS-abhängigen Ansteuerung der Rührwerke eingesetzt werden kann, da bei niedrigen TS Werten die energieintensive Rührleistung entsprechend angepasst werden kann. Interessant ist auch der Zeitraum zwischen Ende März und Anfang April: Die dauerhaft hohe Fermenter-Belastung führt zu einem sehr starken Anstieg des FOS/TAC-Wertes auf Werte von bis zu 0,75. Durch Erhöhung der Frischgülle- bzw. Rezirkulatmenge konnte der bevorstehenden Störung frühzeitig entgegengewirkt werden. Dieser Trend wurde auch durch die Leitfähigkeits-messung frühzeitig detektiert, wie Abbildung 10.24 verdeutlicht (*Wiese et al. [2008A]*).

Trotz schwieriger Anfahrverhältnisse konnte mit Hilfe der online-Messtechnik sowie ergänzender Labormessungen eine zügige Inbetriebnahme durchgeführt werden: Bereits im ersten vollen Inbetriebnahmemonat betrug die durchschnittliche Motorenauslastung 266 kW_{el} oder 50 %; im zweiten vollen Inbetriebnahmemonat konnten bereits durchschnittlich 476 kW_{el} oder 89 % erreicht werden.



Graphik 2: Oben: TS online Fermenter vs. oTS, oTS Gülle und Mais. Unten: Zeitlicher Verlauf FOS, TAC sowie FOS/TAC Konzentration im Fermenter

Graphik 3: Oben: Korrelation Leitfähigkeit mit Pufferkapazität im Fermenter
Unten: Korrelation Redox-Wert mit FOS Konzentration bei nahezu unverändertem pH Wert

Abb. 10.24: Inbetriebnahme einer Biogasanlage auf Basis diverser online-Messungen und ergänzender Labormessungen (*Wiese et al. [2008A]*): Graphiken links: TS online Fermenter vs. oTS, oTS Gülle und Mais (oben); zeitlicher Verlauf FOS, TAC sowie FOS/TAC Konzentration im Fermenter (unten); Graphiken rechts: Korrelation Leitfähigkeit mit Pufferkapazität im Fermenter (oben); Korrelation Redox-Wert mit FOS-Konzentration bei nahezu unverändertem pH-Wert (unten)

10.2.6 Schauglasspülung

Ein weiterer Sinn und Zweck der Automatisierung kann die dauerhafte Werterhaltung von Anlagenkomponenten sein. Ein einfaches Beispiel ist in diesem Zusammenhang die Schauglasspülung: Um einen möglichst dauerhaften Blick durch die Schaugläser zu ermöglichen, bietet es sich an, die Schaugläser von innen – da sie von dort nach Einbau nicht mehr zugänglich sind – neben einer händischen Scheibenwischeinrichtung auch mit einer Spüldüse auszustatten. Diese Spüldüse kann natürlich ebenfalls automatisiert werden, unter anderem um sicherzustellen, dass in definierten Abständen (z. B. einmal pro Tag) eine Spülung erfolgt, um nach Möglichkeit dauerhafte Anhaftungen zu vermeiden.

10.2.7 Abschätzung der hydraulischen Verweildauer

Die hydraulische Verweildauer (engl.: HRT = Hydraulic Retention Time) ist eine der wichtigsten Prozessgrößen, da er u. a. den Abbaugrad der organischen Substanz bestimmt. Daher ist es sinnvoll, diese Größe für Fermenter und Nachgärer auch kontinuierlich im Prozess zu errechnen, um z. B. zu vermeiden, dass aufgrund einer zur kurzen Aufenthaltsdauer nicht ausgegorenes Material die Biogasanlage verlässt. Dies ist nicht nur aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten, sondern auch ökologischen Gründen (z. B. Vermeidung des unkontrollierten Freitritts von klimaschädlichem Methan). Grundlage für die Berechnung/Abschätzung dieser Größe stellen die folgenden Messeinrichtungen dar:

- Durchflussmessungen
- Niveaumessungen

Näherungsweise kann damit die hydraulische Verweildauer wie folgt abgeschätzt werden: Der Füllstand in jedem Reaktionsraum wird kontinuierlich im Prozess gemessen. Eigentlich müsste jetzt zur Ermittlung der hydraulischen Verweildauer nur noch der Zulaufvolumenstrom erfasst werden, da die Fläche der einzelnen Reaktionsräume bekannt und konstant ist. Aufgrund der Problematik, dass vielfach sowohl Fest- als auch Flüssigstoffe zugegeben werden und viele Anlagen nach dem Speicher-Durchfluss-Prinzip betrieben werden, kann aber ggf. auch der Ablaufvolumenstrom pro Tag berücksichtigt werden:

$$HRT_{Ferm} = \frac{\left(A_{Ferm} \cdot h_{Ferm}\right)}{\int_{0:00}^{23:59} Q_{ab,Ferm,d}} \qquad \text{(Formel 10.2.7.1)}$$

Tab. 10.8: Bestandteile der Formel 10.2.7.1

Wert	Einheit	Kurzbeschreibung
$\int Q_{ab,Ferm,d}$	m^3/d	Abfluss aus dem Fermenter pro Tag
HRT_{Ferm}	D	Rechnerische hydraulische Aufenthaltsdauer im Fermenter
A_{Ferm}	m^2	Fläche des Fermenters
h_{Ferm}	M	Füllstand im Fermenter

Dies gilt besonders, da weniger der absolute Wert von Bedeutung ist, sondern die Veränderung bzw. Tendenz der hydraulischen Verweildauer über die Zeit. Um kurzzeitige

Schwankungen zu vermeiden, sollte nach Möglichkeit eine Glättung des errechneten Wertes erfolgen (z. B. Wochenmittelwert). Die Ergebnisse können nicht nur als Messwerte oder optisch visuell (z. B. über eine Ampel: Grün = Hydraulische Verweildauer ist ausreichend! Rot = Hydraulische Verweildauer ist zu niedrig!) dem Benutzer ausgegeben werden. Ggf. kann der Benutzer auch auf folgende Wirkzusammenhänge hingewiesen werden, wie z. B.:

- Eine zu niedrige hydraulische Aufenthaltszeit kann dazu führen, dass das Gasbildungspotenzial der dosierten Substrate nicht vollständig genutzt wird, was unwirtschaftlich ist. In Extremfällen kann die Gefahr eines Ausschwemmens bestimmter Bakterienstämme führen.
- Eine zu niedrige hydraulische Aufenthaltszeit kann dazu führen, dass unausgegorenes Substrat in das Endlager gelangt, was wiederum zu einer Geruchsbelästigung der Nachbarschaft sowie unkontrollierten Treibhausgasen führen kann.
- Eine zu hohe hydraulische Aufenthaltszeit kann dazu führen, dass das vorhandene Reaktorvolumen nicht effektiv genutzt wird. Dies kann ggf. dazu führen, dass nicht genug Biogas gebildet wird, um die Gasmotoren kontinuierlich zu betreiben.

10.2.8 Materialflussbilanzierung

Materialflussbilanzen sind eine wesentliche Voraussetzung für ein effektives Benchmarking und Controlling von Biogasanlagen oder einzelner Bauteile. Ferner sind diese die Grundlage für wichtige betriebliche Kenngrößen (z. B. hydraulische Verweildauer). Auf größeren Anlagen, die zudem mit einer zentralen Pumpstation ausgestattet sind, gibt es zudem verschiedene Fließwege. Um den Materialfluss sauber zu dokumentieren, bietet es sich daher an, den Materialfluss über das Leitsystem lückenlos zu erfassen und zu dokumentieren. Für den Benutzer hilfreich ist zudem auch eine visuelle Darstellung der Materialflüsse (Abb. 10.25): In diesem Beispiel sind die Materialflüsse zwischen den einzelnen Lagerbehältnissen (Vorgrube, Gärrestlager) und den Reaktionsräumen (Fermenter, Nachgärer) dargestellt. Weiterhin sind in diesem Beispiel sowohl die Soll- und Ist-Werte auf Basis der Tagesmenge aufgeführt. Die Soll-Werte sind zudem interaktiv und können von dem Benutzer frei gewählt werden, was aufgrund der visuellen Darstellung eine einfache und schnelle Bedienung erlaubt.

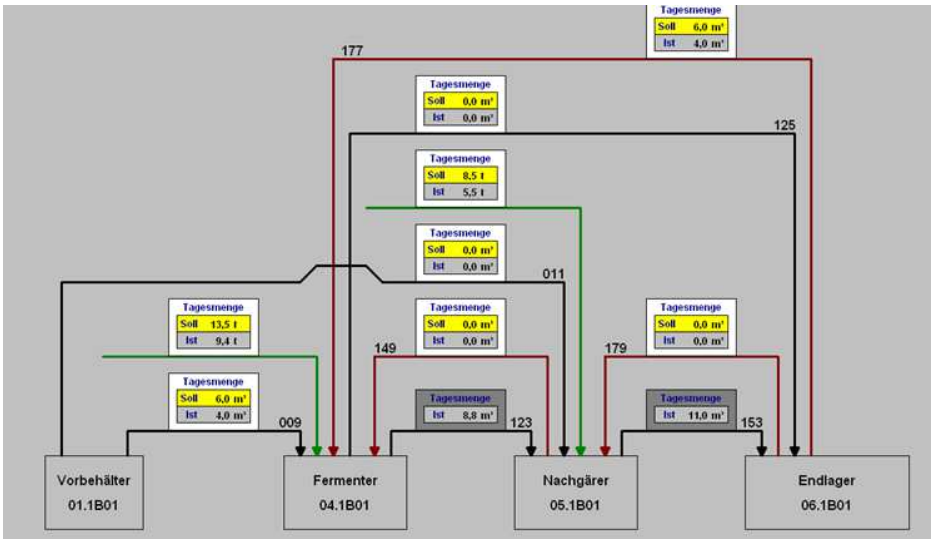


Abb. 10.25: Materialflussschema für flüssige und feste Stoffe (Bildquelle: *ASA/EnerCess [2005-2008]*)

10.3 Vision 1: Vom White-Box-System zum Glass-Box-System

Aufbauend auf den beiden zuvor beschriebenen, großtechnischen Praxisanlagen soll nachfolgend eine gedankliche Weiterentwicklung vorgenommen werden, um das White-Box-System im letzten Schritt in eine „gläserne“ Biogasanlage zu verwandeln (Abb. 10.26).

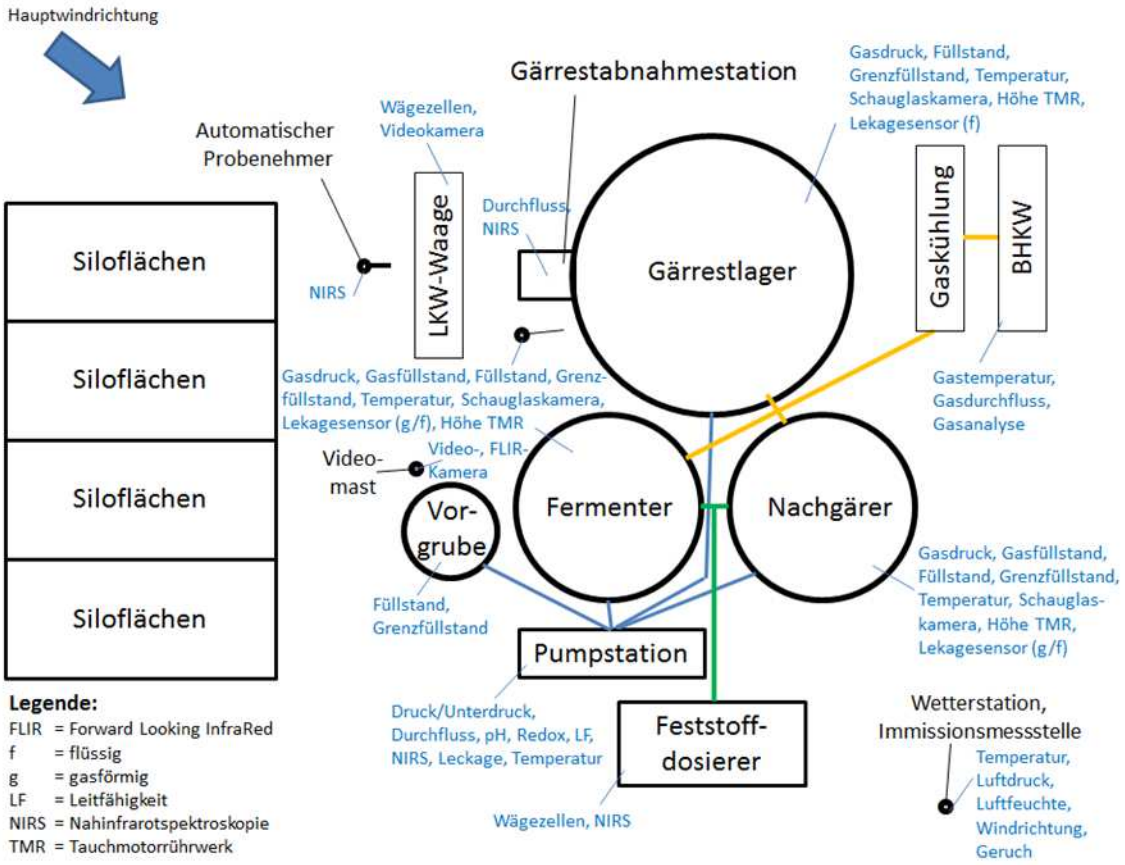


Abb. 10.26: Die gläserne Biogasanlage – Übersicht über mögliche Messstellen (Bildquelle: Autor)

10.3.1 Qualitätskontrolle der Eingangsstoffe

Die ankommenden LKW bzw. Abschiebewagen werden auf der LKW-Waage vor und nach der Entladung verwogen. Kennzeichen und Gewichte werden automatisch archiviert oder die einzelnen Lieferanten mittels drahtloser Funkübertragung automatisch erkannt. Dies ist bereits heute mit dem Stand der Wägetechnik und der peripheren Geräte (z. B. Software, Videoüberwachung) möglich. Das Beispiel aus Abbildung 10.7 verdeutlicht jedoch, dass die Qualität und der Energiegehalt der angelieferten Biomassen oftmals großen Schwankungen unterliegen können. Da aufgrund hoher Substratpreise diese Biomassen einen hohen Vermögenswert darstellen, der selbst bei einer mittleren Biogasanlage schnell einige Hundert Tausend Euro jährlich betragen kann, bietet es sich durchaus an, eine zuverlässige Qualitätskontrolle der angelieferten Substrate zu realisieren. Vielfach wird dies schon heute zum Teil realisiert: So werden oft Stichproben von Erntewagen händisch genommen, um den TS-Gehalt dann im Labor zu bestimmen. Bei großen Mengen ist dies zwangsläufig mit einem erheblichen personellen und finanziellen Aufwand verbunden. In diesem Zusammenhang gilt es zu beachten, dass bei größeren Biogasanlagen erhebliche Substratmengen angeliefert werden:

Bei einer 1,5 MW_{el}-Biogasanlagen werden 30.000 bis 40.000 Mg Gärsubstrat pro Jahr benötigt; bei extrem großen Anlagen (z. B. > 5 MW_{el}) kann der Bedarf auch über 100.000 Mg Substrat pro Jahr liegen; über die Dauer des Anlagenbetriebs entspricht der Wert der eingehenden Substrate damit einem hohen zweistelligen Millionenbetrag. Dies stellt nicht nur große Anforderungen an die Logistik, sondern wirft auch die Frage auf, ob sich eine Qualitätssicherung nicht auch (teil-)automatisieren lässt; dies gilt besonders da bei Großanlagen in der Regel die Substratlieferanten und die Anlagenbesitzer oft nicht identisch sind. Hier bietet es sich an, einen Blick auf die Lösung ähnlicher Probleme in den artverwandten Branchen des Mühlenwesens und der Lebensmittelindustrie zu werfen:

Erling [2008] beschreibt im Handbuch „Mehl- und Schälmüllerei“ Möglichkeiten zur Qualitätskontrolle des Getreides bei der Annahme für Zwecke einer differenzierten Einlagerung und einer adäquaten Abrechnung mit den Lieferanten. Hierbei wird unter anderem auf die Möglichkeiten einer ferngesteuerten, pneumatischen Probennahme mit Hilfe stationärer Probenehmer berichtet. Diese Probenehmer sind auf einem festen Sockel installiert, verfügen über ein Drehgelenk und haben mit Hilfe eines Hebelarms bzw. einer Teleskopeinrichtung einen Schwenkbereich von etwa 9 m. Mit einer Sauglanze können so aus einer Getreideanlieferung Proben entnommen werden. *Erling* gibt ferner Hinweise, wie diese Probenahme möglichst repräsentativ genommen werden kann (z. B. bei einer 25 t Anlieferung: 1 Probe in der Mitte sowie 4 Proben mit jeweils 50 cm Abstand von den Seitenwänden des LKW). Die genommenen Proben können anschließend mit einem Probeteiler automatisch für die verschiedenen Zwecke aufgeteilt werden (z. B. Rückstellprobe, Laborprobe zur Protein- und Feuchtebestimmung, Probe für das elektrische Käfersieb).

Graves und Batchelor [2003] berichten über den Einsatz von Mess- und Videoverfahren (z. B. Mono- und Stereo-Videokameras, Fluroszenz- und Infrarot-Messtechnik, Röntgenstrahlen) in Kombination mit Bildverarbeitungstechniken (z. B. Farb- und Texturerkennung) im Bereich der Qualitätssicherung und -analyse von natürlichen Produkten, wobei auch diverse Beispiele aus der Lebensmittelindustrie aufgeführt werden (z. B. Eingangskontrolle von Kartoffeln, Reifegradbestimmung von Früchten).

Transferiert man diesen Ansatz auf den Biogassektor, so könnte eine nahezu lückenlose Qualitätskontrolle der angelieferten Gärsubstrate wie folgt aussehen: Ein Fahrzeug mit Gärsubstrat erreicht den Eingang der Biogasanlage und wird an der LKW-Waage zunächst verwogen. Ein neben der Waage installierter stationärer, automatischer Probenehmer nimmt automatisiert eine repräsentative Probe des angelieferten Materials. Ein Teil der Probe wird als Rückstellprobe eingefroren, ein anderer Teil wird auf die TM-Konzentration o. ä. analysiert. Ggf. kann auch diese Analyse automatisch erfolgen, z. B. mit Hilfe eines abgesetzten NIRS-Messkopf, der entweder im Labor vorhanden ist oder ggf. auch an dem Saugrüssel des automatischen Probenehmers installiert sein könnte (z. B. analog zu den im Auswurfkrümmer von Maisdreschern installierbaren NIRS-Messköpfen). Zwei installierte Videokameras würden Bilder der Oberfläche der angelieferten Materialien machen und mit Hilfe einer automatischen Bildverarbeitung daraus weitere Rückschlüsse auf die Qualität (z. B. Reifegrad, Häcksellänge und ggf. Störstoffe) ziehen. Das leere Fahrzeug wird anschließend wieder verwogen. Die Summe aller Informationen wird dem Lieferschein beigefügt und kann damit die Grundlage für eine qualitätsgerechte Entlohnung der gelieferten Substrate sein. Durch ein derartiges Konzept ließe sich eine nahezu lückenlose Dokumentation und Qualitätskontrolle der

Eingangsstoffe einer Biogasanlage realisieren. Sicherlich wird sich ein solches Konzept aufgrund des hohen finanziellen Aufwands nur für große Biogasanlagen realisieren lassen.

10.3.2 Qualitätskontrolle der Gärreste

Analog zu der in Abschnitt 10.3.1 beschriebenen Eingangskontrolle ist auch eine lückenlose Ausgangskontrolle der Gärreste nach folgendem Muster denkbar:

- Durchflusserfassung am Abgabestutzen sowie Dokumentation der Daten (Wer nimmt den Gärrest ab? Wie viele Kubikmeter Gärrestvolumen wurden abgegeben?) und/oder
- Verwiegung der Fahrzeuge vor und nach der Beladung mit Gärrest (z. B. bei abgepressten Feststoffe infolge einer Fest-Flüssig-Trennung).
- Die Qualität des Gärrestes könnte über einen NIRS-Sensor im Abgabestutzen messtechnisch erfasst werden. Langfristig wirtschaftlich interessant ist hierbei angesichts steigender Düngemittelpreise die Echtzeit-Erfassung des Düngewertes (z. B. Kalium, Gesamtstickstoff, Ammonium, Phosphor) der Gärreste. So wäre es denkbar, den Gärrest zu aktuellen Marktpreisen (ggf. mit entsprechenden Abschlägen) monetär zu bewerten und mit den Substratlieferungen (z. B. der Maissilage) zu verrechnen.
- Ferner würde eine Überprüfung der Konzentration der organischen Säuren auch Rückschlüsse auf das Geruchspotenzial des Gärrestes ermöglichen. Dies wäre hilfreich, um Vorurteile („Biogasgülle stinkt!“) anhand einer lückenlosen Messwerterfassung zu entkräften. Ein zu hohes Restgaspotenzial würde zudem auf Defizite in der Betriebs- oder Prozessführung hindeuten.
- Wenn das Zugfahrzeug oder das Güllefass mit einem GPS-Sensor ausgestattet ist, wäre zudem eine lagegenaue Zuordnung der Dosierorte, Dosiermengen und Düngemittel auf das jeweilige Feldstück möglich. Dies wäre bezüglich der Dokumentation gegenüber den Aufsichtsbehörden sowie zum Abbau der Vorurteile (z. B. Geruchsbelästigung, Beeinträchtigung des Grundwassers durch Überdüngung) hilfreich.
- Es gibt bereits erste Güllefässer, welche mit Hilfe von Messtechnik (Durchfluss und Qualität über NIRS) am Abgabestutzen ausgerüstet sind, sodass dies Kontrolle des ermittelten Düngemittelwertes auf der Abnehmerseite sowie eine flächengenaue Zuordnung der Ausbringung erleichtern würde. Ein solches System bietet zum Beispiel die Fa. Zunhammer („VAN-Control“) an (*Zunhammer [2007]*).

Jäger et al. [2006] publizierten auf Basis verschiedener Düngemittelpreise für Reinnährstoffe (Gesamtstickstoff 430 €/t, Phosphat 540 €/t, Kali 360 €/t) für die Gärreste einer 350 kW_{el}-NawaRo-Biogasanlage einen Düngewert von 53 Tsd. € pro Jahr. Dieses Beispiel macht deutlich, dass bei langfristig steigenden Düngepreisen und einer Abgabe der Gärreste an externe Abnehmer ein derartiges Konzept zur Ausgangskontrolle schon mittelfristig (wirtschaftlich) interessant sein könnte; dies gilt besonders bei einer weiteren Verschärfung der Dokumentationspflichten gegenüber Behörden.

10.3.3 Online-Bilanzierung der Material- und Energieströme

Bereits in den vorangegangenen Abschnitten wurde auf die Möglichkeit eingegangen, mit Hilfe umfangreicher Messtechnik Material- und Energieströme zu erstellen. Bisher sind derartige Bilanzen jedoch entweder nur zum Teil automatisiert umgesetzt worden oder für deren Komplettierung und Zusammenführung der Teilbilanzen ist noch umfangreiche händische

Arbeit erforderlich. Ein Beispiel hierfür ist die in Abschnitt 10.1.10 aufgestellte Bilanz, da hierfür diverse online-Messwerte, verschiedene Stoffstrombilanzen und zahlreiche Labormessungen manuell zusammengeführt werden mussten. Die Erfassung und Bilanzierung der Materialströme (d. h. Feststoffe, Flüssigstoffe, Gase) und Energieströme (d. h. Strom, Wärme) ist aus verschiedenen Gründen sinnvoll:

- Zur Beurteilung der Effizienz und ggf. Entdeckung von Verbesserungsmöglichkeiten ist eine Erfassung und Bilanzierung der Material- und Energieströme unerlässlich, da viele der für Controlling und Benchmarking üblichen Kennwerte auf diesen Größen aufbauen.
- Die Kosten für die Eingangsstoffe, aber auch die Einnahmen aus einem Verkauf der Ausgangsstoffe (z. B. Strom- und Wärmeerlöse, Düngewert) erfordern eine korrekte Erfassung der – zumindest wichtigsten – Material- und Energieströme.
- Der Einsatz modellbasierter Steuerungs- und Regelungskomponente erfordert die Messung oder zumindest eine Abschätzung einiger Prozessvariablen.
- Eine Grundlage für den zuverlässigen Einsatz von komplexen Automatisierungskonzepten sind funktionstüchtige und zuverlässig arbeitende Messgeräte. Hierfür kann die Erfassung und Bilanzierung der einzelnen Ströme sehr hilfreich sein, da durch den Einsatz statistischer Verfahren die Möglichkeit besteht, Fehlerquellen zu identifizieren bzw. auf Plausibilität zu prüfen (z. B. durch Massen- und Volumenbilanzen).
- Ebenso hilfreich können Bilanzen für die Beurteilung der Stabilität sowie der Effizienz des Biogasprozesses sein. So lassen etwa oTS/oTM-Bilanzen oder N_{ges}/NH_4-N-Bilanzen Rückschlüsse auf den Abbaugrad der organischen Substanz zu.

Jedoch ist es unrealistisch und auch auf Dauer nicht praktikabel, dass derartige Bilanzen manuell erstellt werden, weil sich ein derartiger Aufwand nur im Rahmen von Forschungsprojekten rechtfertigen lässt und dem normalen Biogasanlagenbetreiber auch hierfür die Ausbildung fehlt. Daher erscheint es erforderlich, dass zukünftig die verschiedenen Teilbilanzen automatisch zu einer Gesamtbilanz zusammengeführt und anschließend statistisch ausgewertet bzw. daraus wichtige Betriebskennziffern und mögliche Fehlerquellen automatisch abgeleitet werden. Dies setzt voraus, dass auch die zahlreichen Labormessungen über Zeitstempel, Ortsangaben etc. zweifelsfrei in die Bilanzdaten übernommen werden können. Die Fortschritte in der Labormesstechnik, insbesondere im Zusammenhang mit der analytischen Qualitätssicherung von Prozessmessgeräten (z. B. Abgleich eines Prozessmesswertes mit dem Laborwert der Referenzprobe) lässt dies technisch möglich erscheinen.

Einen ersten Schritt in diese Richtung beschreibt *Nacke [2011]*: Aufbauend auf dem Einsatz von Mikrowellenmessgeräten zur Bestimmung der TS- und oTS-Konzentration sowie des Wassergehaltes bei den Eingangs- und Reststoffen bzw. der Bestimmung der Gasmenge sowie der CH_4- und CO_2-Konzentration im Biogas beschreibt der Autor einen Ansatz zur automatisierten Stoffbilanzierung; den Nutzen sieht Nacke u. a. als Grundlage für effektive Automatisierungskonzepte.

10.3.4 Die „riechende“ Biogasanlage

Ein großes Vorurteil, welches Biogasanlagen entgegengebracht wird, liegt im Bereich der potenziellen Geruchsbelästigung, obwohl eine ordnungsgemäß geplant, gebaut und betriebene Biogasanlage Geruchsemissionen weitgehend vermeiden kann. Gemäß dem

Grundsatz „Wehret den Anfängen!“ ist es denkbar, diesem Vorurteil auf verschiedene Art und Weise entgegen zu treten:

Erfassung von Wetterdaten

Der Autor hat die Erfahrung gemacht, dass sich Beschwerden über Geruchsbelästigungen im Zusammenhang mit Biogasanlagen oftmals als falsch oder zumindest nicht bedingt durch die Biogasanlage erwiesen haben (z. B. wurden Geruchsemissionen aus der Ausbringung frischer Gülle benachbarter Landwirte fälschlicherweise einer naheliegenden Biogasanlage zugeordnet oder gemeldete Geruchsemissionen konnten an der benannten Stelle an diesem Tag aufgrund der vorherrschenden Windrichtung/-stärke definitiv nicht von der Biogasanlage stammen); in Einzelfällen gibt es sogar bereits Beschwerden über Geruchsbelästigungen noch bevor eine Biogasanlage in Betrieb geht. Daher erscheint es sinnvoll, eine Wetterstation auf dem Anlagengelände zu errichten, die wichtige Wetterinformationen wie Windstärke und Windrichtung lückenlos dokumentiert. So berichtet *Siemens [2007]* über eine Erneuerung der Mess- und Automationstechnik einer Biogasanlage, wobei auch eine Wetterstation an das Prozessleitsystem angebunden wurde.

Geruchsemissionen

Leider besteht bis heute noch keine Möglichkeit, Gerüche in der Umgebungsluft zuverlässig in Echtzeit zu erfassen, jedoch wird zurzeit sehr viel in dem Bereich der Geruchsmessung geforscht, um zum Beispiel Abluftbehandlungsanlagen effektiv steuern und/oder Filterdurchbrüche detektieren zu können. Einen Überblick über aktuelle Entwicklungen im Bereich „Odour Control“ geben *Niemeyer et al. [2010]*. Langfristig erscheint es aber durchaus vorstellbar, online-Geruchssensoren an neuralgischen Punkten (z. B. am Gülletank, Silagesilo) und/oder auf dem Grundstück einer Biogasanlagen zu installieren, um das Ausmaß möglicher Geruchsemissionen zu dokumentieren.

Erfassung von Treibhausgasemissionen

Neben der Erfassung möglicher Geruchsbelästigungen gibt es aber noch andere Gründe, Emissionen zu messen. Aufgrund der Klimaschädlichkeit von Methan wurde in den letzten Jahren begonnen, diffuse Treibhausgasemissionen auf Biogasanlagen abzuschätzen:

- *Bachmaier et al. [2009]* haben versucht, für modellhafte Biogasanlagen die Emissionen von Treibhausgasen zu errechnen: Im Bereich der eigentlichen Biogasanlage verweisen die Autoren auf Emissionen aus Überdrucksicherungen und offenen Gärrestlagern, wobei die diffusen Methanemissionen mit ca. 1 % der Methanproduktion angesetzt werden.
- *Clemens et al. [2009]* haben auf Biogasanlagen Messungen durchgeführt und kamen dabei zu den folgenden Erkenntnissen:
  - Im Bereich der Silagesilos konnten nur sehr niedrige Methanemissionen gemessen werden (0-60 mg CH_4-Äquivalente/kWh).
  - An den Feststoffeinträgen wurden bei den klassischen Systemen Methanemissionen von 0 bis 375 mg CH_4-Äquivalente/kWh gemessen; bei Anmischsystemen lagen die Werte jedoch sehr viel höher (bis 1.700 mg CH_4-Äquivalente/kWh).
  - Im Bereich der Foliendächer wurden Emissionen zwischen 0 und 66 mg CH_4-Äquivalente/kWh gemessen. Die Emissionen aus offenen Gärrestlagern betrugen zwischen 730 und 3.700 mg CH_4-Äquivalente/kWh, wobei beim Einschalten der Rührwerke ein Vielfaches dieser Werte gemessen wurde.

- Eine wesentliche Emissionsquelle stellen auch die BHKW dar, wo aufgrund der hohen Volumenströme zwischen 0,6 und 4,8 mg CH_4-Äquivalente/kWh) gemessen wurden.
- Umgerechnet in CO_2-Äquivalente lagen in Summe die Methanemissionen aber meist unter 100 g CO_2-Äquivalente/kWh, was zudem im Vergleich zum deutschen Energiemix (624 g CO_2-Äquivalente/kWh) nur einen Bruchteil darstellt.
- Aufgrund ihrer Erkenntnisse empfehlen *Clemens et al.*, durch regelmäßige Wartung und Leckagekontrolle die Emissionen weiter zu verringern.

Mittel- bis langfristig könnten daher folgende Messungen zum Einsatz kommen, um diese Emissionsquellen zu überwachen:

- Dokumentation der organischen Säuren im Gärrestlager (sofern nicht abgedeckt) und des abgegebenen Gärrestes (z. B. mit NIRS) und ggf. auch im Inhalt der Güllevorlage zur Abschätzung dieser Komponenten diffuser Emissionen.
- Ermittlung der Methankonzentration im Bereich potenzieller Leckagequellen im Bereich der Gasspeicher, wie z. B. im Bereich der Über-/Unterdrucksicherungen oder der Auslässe der Tragluftdächer (z. B. bei Rissen in der Gasspeicherfolie).

Da es bei dieser Aufgabenstellung eher um die Detektion einer potenziellen Leckagequelle anstatt einer genauen Bestimmung der Konzentration geht, könnten vereinfachte Verfahren zur Detektion zum Einsatz kommen; vorstellbar sind etwa Messsysteme, die Ähnlichkeiten zu den existierenden mobilen und stationären Gaswarngeräten aufweisen. Weiterhin lassen bereits heute Gasdrucksensoren im Gasraum Rückschlüsse auf mögliche Leckagen zu, zum Beispiel wenn die Gasdruckwerte signalisieren, dass die Überdruck- oder Unterdrucksicherung angesprungen sind. In Kombination mit einer entsprechenden Alarmmeldung an den Betreiber kann hierdurch einfach sichergestellt werden, dass diese Leckagequelle durch sofortiges Wiederauffüllen der Wassertassen minimiert werden. Ein weiterer Ansatz zur Detektion möglicher Methan- und Geruchsemissionen soll im nachfolgenden Abschnitt 10.3.5 beschrieben werden.

10.3.5 Die „sehende“ Biogasanlage

Der Einsatz von Videotechnik ist in weiten Teilen der Industrie verbreitet (siehe Abschnitt 3.7). Auch in der Biogastechnik sind verschiedene Anwendungen vorstellbar und werden zum Teil bereits eingesetzt:

- Videotechnik als Grundlage zur Objektsicherung vor Diebstahl und Vandalismus
- Videotechnik in Kombination mit Messtechnik (z. B. automatische Nummernschilderkennung bei Fahrzeugwaagen mit Übertragung der Daten in Wägescheine)
- Videotechnik zur Überwachung des Anaerobprozeses (siehe Kapitel 10.2.1)
- Videotechnik zur Überwachung bestimmter Schlüsselbauteile (z. B. Feststoffdosierer)
- Mobile Wärmebildkameras zur Identifizierung von Wärmeverlusten

Dank der Fortschritte im Bereich der Speichertechnologien und der Datenübertragung können die dabei erzeugten Datenmengen mittlerweile kostengünstig gespeichert oder auf zentrale Leitwarten aufgespielt werden. Die Fortschritte im Bereich der automatischen Bilderkennung lässt auch die automatisierte Auswertung von Bildern in den oben genannten Bereichen langfristig denkbar erscheinen, sodass derartige Informationen als ein Bestandteil in das Konzept einer intelligenten Biogasanlage integriert werden könnten (z. B. als zusätzliche Information

bei einer Fehlerdiagnose), was zudem – ähnlich wie bei vergleichbaren Ansätzen beim Betrieb dezentraler Kläranlagen – aus einer zentralen Leitwarte – z. B. der zentralen Netzleitwarte eines Energieversorgungsunternehmens – überwacht werden. Im Abschnitt 3.8.7 wurde zudem auf ein FLIR-Gerät hingewiesen, welches in der Lage ist, nicht nur Wärmebildaufnahmen zu erzeugen, sondern auch Methanemissionen zu detektieren. Es ist – sofern die Kosten für derartige Geräte stark im Preis fallen – langfristig vorstellbar, dass man an einem Videomast mit 360 Grad-Schwenkvorrichtungen auf dem Biogasanlagengelände sowohl optische Videokameras zur Objektsicherung als auch ein schwenkbares Messgerät zur Methan- und Wärmeverlustdetektion installieren:

- Objektsicherung vor Diebstahl und Vandalismus
- Wärmebildkamera zur Detektion möglicher Probleme bei der Silage
- Wärmebilder zur Detektion von Wärmeverlusten der Bauwerke und Maschinentechnik
- Methanemissionen aus Vorgruben, Fermenter, Nachgärer und Gärrestlager
- Methanschlupf des BHKW

Durch geeignete Anordung von Fermenter, Gärrestlager und BHKW sowie der emissionsrelevanten Einzelkomponenten (z. B. Über-/Unterdrucksicherung, Luftauslässe der Tragluftfolie, Kondensatschacht, BHKW-Schornstein, Schaugläser, Wanddurchführungen der Feststoffeintragssysteme) erscheint es möglich, mit einem zentralen Videomast auszukommen.

10.3.6 Mensch-Maschine-Interface

Nach Auffassung des Autors wird der Einsatz von Mess- und Automationstechnik im Bereich der Biogasanlagen auch dadurch gehemmt, dass es bisher nicht wirklich gelungen ist, aus den Messdaten leicht verständliche Informationen für den Bediener zu erzeugen, die ihm den Betrieb der Anlage erleichtern. Aus Sicht des Autors gibt es daher besonders für die beiden folgenden Fragen erhebliches Entwicklungspotenzial:

- Welche Information und Handlungsbedarf stecken hinter dem Messwert?
- Wie zuverlässig ist der Messwert?

10.3.6.1 Welche Information steckt hinter dem Messwert?

Denkbar sind verschiedene Formen der Informationsvermittlung, wie z.B.:

- Ampelprinzip
- Diagramme (z. B. Spinnendiagramme)
- Messwert mit Regelwissen verknüpfen

Optische Darstellung der Ergebnisse nach dem „Ampelprinzip“

Die Ampel ist als wesentliches Element im öffentlichen Verkehr jedem Bürger vertraut. Die drei Farben der Ampel sind uns von jüngster Kindheit an vertraut und unmissverständlich belegt: **Rot** = Halt, da Gefahr! **Grün** = keine Gefahr! **Gelb** = Achtung, ein Wechsel von Grün auf Rot (oder umgekehrt) steht unmittelbar bevor!

Es bietet sich daher an, dieses eindeutige Warn- und Informationssystem auch für die Vermittlung von Messwerten bzw. ihrer aktuellen Bedeutung zu verwenden. Wie so etwas aussehen könnte, wird nachfolgend am Beispiel des pH-Wertes verdeutlicht: Der optimale

Bereich des pH-Wertes für den Biogasprozess und somit für die Aktivität der methanbildenden Bakterien liegt zwischen 7 und 8. Der pH-Wert im Biogasbehälter hängt dabei vom Verhältnis zwischen den flüchtigen Säuren, der Säurekapazität und dem Kohlendioxid im Biogas ab. Hieraus resultiert, dass der pH-Wert im Prozessverlauf auch gewissen Schwankungen unterliegt. Es ist daher naheliegend zu überwachen, dass der aktuelle pH-Wert sowohl im Bereich zwischen dem Minimum und Maximum liegt als auch eine Veränderung des pH-Wertes (ΔpH) über die Zeit ein bestimmtes Maß nicht überschreitet (z.B. Δ 0,1 pro Tag). Für die Abgrenzung zwischen Rot und Gelb bzw. Grün und Gelb würde es sich etwa anbieten, einen Schwellenwert knapp ober- bzw. unterhalb der Grenzwerte zu definieren. Hierauf aufbauend könnte eine Darstellung der Ergebnisse nach dem Ampelprinzip wie folgt aussehen:

- **Rot** = Gefahr eines zu hohen ($pH_{online} > 8$) bzw. zu niedrigen ($pH_{online} < 7$) pH-Wertes oder einer hohen pH-Wert-Änderung ($|\Delta pH_{IST}| > \Delta$ 0,1 -/d)
- **Gelb** = Achtung: Relativ hoher ($7{,}8 < pH_{online} \leq 8$) oder niedriger pH-Wert ($7 \leq pH_{online} < 7{,}2$), aber geringe pH-Wert-Änderung ($|\Delta pH_{IST}| \leq \Delta$ 0,1 -/d)
- **Grün** = pH-Wert im günstigen Bereich ($7{,}2 \leq pH_{online} < 7{,}8$) und keine unzulässige pH-Wertänderung ($|\Delta pH_{IST}| \leq \Delta$ 0,1 -/d)

Derartige Ampelsignale können natürlich auch für andere prozessrelevante Größen eingerichtet werden, wie z.B. Redox, elektrolytische Leitfähigkeit, CH_4/CO_2-Konzentration.

Spinnendiagramm

Beim Anlagenbetrieb gilt es zahlreiche verschiedene Parameter im Auge zu behalten, um zweifelsfrei die Stabilität des Anlagenbetriebs bzw. Probleme möglichst frühzeitig erkennen zu können. Diesbezüglich bietet es sich an, über den Einsatz von Spinnendiagrammen nachzudenken, die dem Benutzer auf einen Blick zeigen, ob „alles im grünen Bereich“ ist. In Abbildung 10.27 sind beispielhaft verschiedene Kenn- und Messwerte dargestellt:

- Mit grünen Punkten dargestellt sind die aktuellen Betriebswerte, die mit grünen Linien untereinander verbunden sind.
- Des Weiteren sind als rote Punkte obere und untere Alarmwerte aufgeführt, die mit roten Linien untereinander verbunden sind.
- Die oberen Alarmwerte könnten zudem für bestimmte Parameter dynamisch generiert werden, da zum Beispiel die Schwellenwerte für eine beginnende Hemmung durch Ammonium oder organische Säuren vom pH-Wert abhängig sind.

Ein solches Spinnendiagramm kann vom Benutzer einfach interpretiert werden:

- Befinden sich alle relevanten Betriebsparameter „im grünen Bereich“, d. h. in dem Bereich zwischen den oberen und unteren Schwellenwerten ist alles in Ordnung!
- Befindet sich einer oder mehrere Betriebsparameter außerhalb der Schwellenwerte sollte zweckmäßiger Weise eine Alarmierung des Bedieners erfolgen (ggf. kombiniert mit entsprechenden Ratschlägen).

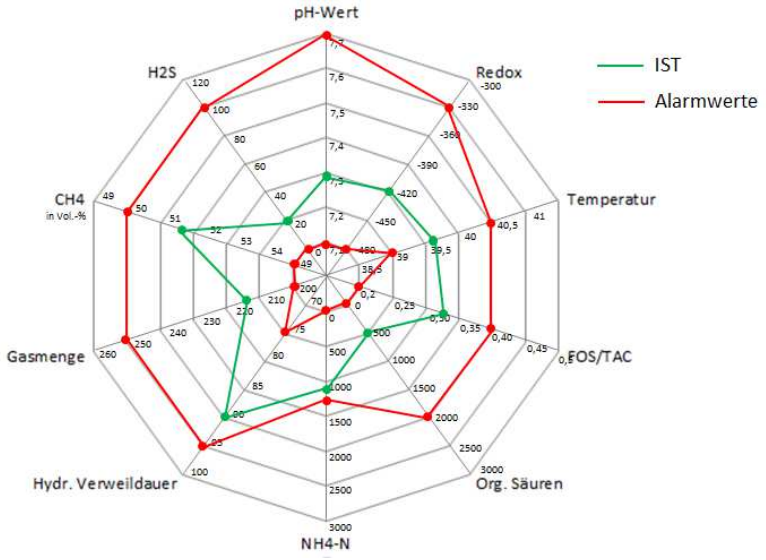


Abb. 10.27: Beispiel für ein Spinnendiagramm mit charakteristischen Kenn- und Messwerten von Biogasanlagen (Bildquelle: Autor)

Messwerte mit Regelwissen verknüpfen

Im Laufe der Zeit hat sich in Forschung und Praxis ein Pool von Regeln angehäuft, der in vielen Fällen geeignet erscheint, dem Betreiber praktische Hinweise zur Identifikation und ggf. sogar zur Problemlösung zu liefern. Beispielhaft sind nachfolgend einige Regeln für den pH-Wert aufgeführt:

- Ein starkes Absinken des pH-Wertes kann (auf)
  - eine Überlastung des Reaktors signalisieren!
  - eine Störung des biochemischen Gleichgewichts hindeuten!
- Was können Sie dagegen tun?
  - Kontrollieren Sie die Nährstoffverhältnisse regelmäßig durch Labormessungen!
  - Kontrollieren Sie den pH-Wert regelmäßig!
  - Dosieren Sie möglichst regelmäßig und konstant. D.h. eine quasi-kontinuierliche Fütterung kleiner, konstanter Mengen ist sehr viel verträglicher als große, unregelmäßige Dosierungen!
  - Bei einem Absinken des pH-Wertes können Sie
    - die Substratzugabe reduzieren oder gar stoppen oder
    - Gärsubstrat aus dem Nachgärer in den Fermenter rezirkulieren oder
    - ausgegorenes Material aus dem Gärrestlager in den Fermenter rezirkulieren oder
    - Wasser in den Fermenter dosieren oder
    - Impfschlamm aus einer anderen Biogasanlagen hinzugeben oder
    - fehlende Nährstoffe dosieren oder
    - zur Anhebung und Stabilisierung des pH-Wertes Neutralisationmittel hinzugeben!

Je nachdem, ob weitere Informationen zur Verfügung stehen, könnten automatisiert die Regeln weiter eingegrenzt und/oder die Ratschläge konkretisiert werden.

Messwerte als Prozesszustände darstellen

Jacobi [2012] stellt eine qualitative Einordnung von Prozesszuständen mit Hilfe einer Spektrenklassifizierung auf Basis einer Hauptkomponentenanalyse dar. Diese Darstellung ermöglicht eine anschauliche Filterung der enormen Datenmengen, indem das Diagramm in zwei Bereiche unterteilt wird. Liegt das Ergebnis im grünen Kernbereich deutet dies auf einen stabilen Prozess; liegt der Wert hingegen im roten Bereich, so deutet dies auf einen gestörten Prozess und bedingt das Eingreifen des Bedieners; der genaue Wert ist dabei von untergeordneter Bedeutung.

10.3.6.2 Integration von Dokumentations- und Informationssystemen

Moderne Biogasanlagen stellen komplexe Systeme dar. Hinzu kommt, dass die Anaerobprozesse zwar langsamer ablaufen als anoxische oder aerobe Prozesse, dafür aber komplizierter und vielschichtiger sind. In diesem Zusammenhang sollten zukünftige Biogasanlagen auch über ein Dokumentations- und Informations-System verfügen. Dies gilt besonders, da die Betreiber bzw. das Betriebspersonal der Biogasanlagen in der Regel nicht über eine sorgfältige Ausbildung im Bereich „Biogasverfahrenstechnik“ verfügen.

Hyperlink-Funktionalitäten

In diesem Zusammenhang stellt eine Hyperlink-Funktion im Prozessleitsystem, die eine Verknüpfung zu zahlreichen Dateitypen (z.B. *.doc, *.pdf, *.xls) gestattet, die einfachste Form dar. Hierdurch lässt mit relativ überschaubarem Aufwand ein brauchbares Informationssystem aufbauen. Darüber hinaus erscheint eine zentrale bzw. semizentrale Verwaltung und Bereitstellung wichtiger Daten, Dokumente nach folgendem Muster sinnvoll:

- Allgemein gültige Dokumente (z. B. Arbeitsschutzregeln, standardisierte Arbeitsabläufe, AQS- und TQM-Vorgaben etc.) bzw. nicht vertrauliche Daten könnten zentral bereitgestellt und regelmäßig an die Anlagenbetreiber verteilt werden (z. B. durch die Anlagenbaufirma). Hierdurch kann sichergestellt werden, dass jeweils aktuelle Vorschriften etc. vorhanden sind.
- Interne Daten der Betriebe werden dezentral auf dem Leitwarte-PC gespeichert, aber nach dem gleichen Prinzip bzw. der gleichen Software-Plattform bearbeitet.
- In besonderen Fällen (z. B. Kontrolle der Eigenüberwachung, bei Planungen etc.) erscheint es ratsam, auch Externen eingeschränkte Zugriffsrechte auf das System zu gestatten, wie z. B. Aufsichtsbehörden oder am Planungsprozess beteiligten Ingenieurbüros oder Forschungspartnern.

Langfristig erscheint es aber sinnvoll, eigenständige Dokumentations- und Informationssysteme einzusetzen, die aus folgenden Bausteinen bestehen könnten:

- Arbeitssicherheit und Dienstanweisungen
- Betriebsdaten, Controlling und Benchmarking
- Ressourcennutzung
- Workflowmanagement und Arbeitsprozesse
- Wissensmanagement
- Analytische Qualitätssicherung
- Virtuelle Modelle

Tool: Arbeitssicherheit und Dienstanweisungen

Bezüglich Arbeitssicherheit sind zahlreiche Dokumente, Betriebsanweisungen etc. im Internet frei verfügbar; viele davon bereits im pdf-Format. Einige dieser Dokumente beziehen sich explizit auf Biogasanlagen (z. B. Sicherheitsregeln für landwirtschaftliche Biogasanlagen), andere lassen sich mit wenig Aufwand (z. B. Hinweise bezüglich Absturzsicherung) aus anderen Arbeitssicherheitsanweisungen extrahieren. Es sollte daher möglich sein, diese in das Prozessleitsystem einzubinden. Ferner kann es sinnvoll sein, bauteilspezifisch und/oder verrichtungsorientiert einzelne Arbeitssicherheits- und Dienstanweisungen zusammen zu fassen, die dann ggf. durch Mausklick auf das entsprechende Bauteilsymbol im PLS geöffnet werden können.

Tool: Betriebsdaten, Controlling und Benchmarking

Die Erhebung von Betriebsdaten wird heute immer wichtiger, nicht nur um den immer schärferen Dokumentationspflichten nachkommen zu können. Wichtig ist daher in diesem Zusammenhang die Erstellung eines digitalen Betriebstagebuchs für Biogasanlagen. Neben der automatischen Übertragung der online erfassten Messdaten und Betriebsinformationen sollte ferner ein händischer Eintrag (z. B. Labordaten) möglich sein. Neben Eigenlösungen diverser Anlagenbaufirmen existieren auch bereits Betriebstagebücher diverser Softwarefirmen, sodass dieser Punkt einfach abgehandelt werden kann.

Tool: Ressourcennutzung

Grundsätzlich können in Biogasanlagen viele verschiedene Gärsubstrate eingesetzt werden. Jeder dieser Stoffe weist unterschiedliche Charakteristika bezüglich Gärfähigkeit, Gasertrag, Zusammensetzung et cetera auf. Es erscheint daher sinnvoll, dass für die wichtigsten Substrate (z. B. Rindergülle, Schweinegülle, Mais, GPS Roggen) Informationen in Form von pdf-Files ausgegeben werden und in das PLS eingebunden werden.

Tool: Workflow-Überwachung

In vielen Fällen ist es im Nachhinein sehr schwierig nachzuvollziehen, wie es zu Fehlern und Störungen gekommen ist. Die industrielle Prozessleittechnik bietet bereits die Möglichkeit sogenannte Audit Trails zu erzeugen, in denen durchgeführten Arbeitsschritte und Einstellungsänderungen lückenlos und fälschungssicher dokumentiert werden (z. B. *Siemens [2009B]*). Abweichungen zur üblichen Vorgehensweise könnten hierdurch identifiziert und analysiert werden.

Tool: AQS – Analytische Qualitätssicherung

Im Bereich der Abwassertechnik gewinnt seit einigen Jahren die Analytische Qualitätssicherung immer mehr an Bedeutung. Aufbauend auf dem *DWA-Arbeitsblatt A 704 [2007]* wurden auch diverse Kontrollkarten (*DWA [2010]*) entwickelt, die zum Teil auch in digitaler Form (z. B. als Excel-Dateien) verfügbar sind. Derartige AQS-Tools könnten mit geringfügigen Anpassungen auch auf die Anforderungen des Biogassektors angepasst werden.

Tool: Virtuelle Modelle

Abbildung 10.2 zeigt Elemente eines virtuellen Modells einer Biogasanlage. Dabei handelt es sich um eine getreue Abbildung einer real existierenden Anlage, die in abgewandelter Form mehrfach gebaut wurde. Mit Hilfe einer selbsterklärenden Navigation können die einzelnen Anlagenbauteile mit einem hohen Detailierungsgrad vom Betrachter in Augenschein genommen werden; die Beschriftung erfolgte mehrsprachig. Das Modell wurde ursprünglich für Marketingzwecke entwickelt, jedoch hat der Autor die Erfahrung gemacht, dass es sich auch sehr gut für didaktische Zwecke eignet. Der Erfolg des virtuellen Modells und die intuitive Bedienung legen nahe, über andere Anwendungsmöglichkeiten nachzudenken, etwa in Kombination mit einer mobilen Visualisierung, zumal die heutigen Softwarewerkzeuge eine relativ unproblematische Anpassung an die anlagenspezifischen Unterschiede, wie Farben (z. B. Behälterverkleidungen, Dachfarben, Gasspeicherfolien) oder die Behälter-/Gebäudegeometrien zulassen. Komplette Elemente (z. B. Fermenter, Pumpstationen) können zudem per Copy & Paste in ein anderes Modell integriert werden, was den Aufbau eines neuen Modells bzw. die Erweiterung eines vorhandenen Modells (z. B. bei einer Ausbauplanung) ebenfalls erleichtert. Größere Änderungen sind lediglich im Einzelfall beim Gelände erforderlich, sofern etwa eine detaillierte Gelände- und Fahrwegmodellierung erwünscht ist. D. h. ein entsprechendes virtuelles Teilelager vorausgesetzt, könnte für eine neue Biogasanlage ein kundenindividuelles Modell mit geringem Aufwand erstellt werden. Weiterhin denkbar sind vertonte Anlagenrundgänge (ggf. in verschiedenen Sprachen) sowie die vertonte Beschreibung einzelner Kernelemente (z. B. Feststoffdosierer, Pumpe). Die Verknüpfung einzelner Komponenten mit Dienst- und Betriebsanweisungen, Ersatzteillisten, Wartungsvideos et cetera ist ebenfalls möglich.

10.3.6.3 Mobile Informationsvisualisierung

Im Abschnitt 4.5.4 wurde bereits auf die Entwicklungen der letzten Jahre im Bereich der mobilen Informationsvisualisierung eingegangen. Auch wenn sich diese Beispiele überwiegend auf den Kläranlagenbereich beziehen, so sind diese vom Grundsatz aufgrund sehr ähnlicher Aufgabenstellungen direkt auch auf Biogasanlagen übertragbar. In diesem Zusammenhang ist insbesondere das von *Wölle et al. [2011]* (siehe Abschnitt 4.5.4) interessant, da es einige der zuvor beschriebenen Überlegungen bereits exemplarisch an einzelnen Testfällen beschreibt.

10.4 Vision 2: Die intelligente Biogasanlage

Im letzten Schritt soll aus der gläsernen Biogasanlage eine intelligente Biogasanlage gemacht werden, was den Einsatz von Methoden künstlicher Intelligenz und neuen Methoden zur Zustandsbewertung von Maschinen und Anlagen erfordert. Darüber hinaus ist es vorstellbar, diese Anlagen auch mit künstlichen Sinnen (z. B. Riechen, Hören, Sehen) auszustatten. In diesem Abschnitt sollen verschiedene Ideen entwickelt und diskutiert werden, die Einzelbausteine auf dem Weg zu diesem Ziel darstellen könnten.

10.4.1 Das Ziel: Vom Datenfriedhof zur Wissensschatztruhe

Die bisherigen Abschnitte von Kapitel 10 haben verdeutlicht, dass man heute mit überschaubarem finanziellem Aufwand eine Vielzahl von Informationen über den Prozess- und Betriebsverlauf sammeln kann. Langfristiges Ziel muss es aber sein, diese Information nicht

nur zur Überwachung einzusetzen, sondern daraus auch Wissen zu generieren, um zum Beispiel „Ursache-Wirkung-Beziehungen“ zu identifizieren und einen aus ökonomischen, ökologischen und sicherheitsrelevanten Aspekten optimalen Betrieb zu gewährleisten.

10.4.2 Condition Based Maintenance und Condition Monitoring

Randall [2011] beschreibt die verschiedenen Formen von Wartungskonzepten:

- „Run-to-break“: Eine Maschine o. ä. wird so lange betrieben bis es zu einem Defekt kommt. Erst dann erfolgt eine Wartung oder ggf. Reparatur. Dies reduziert die Wartungskosten, jedoch besteht die Gefahr, dass das Aggregat nicht nur kurzzeitig ausfällt, sondern derart geschädigt wird, dass es zu einem Totalausfall bzw. einer Ersatzbeschaffung kommt.
- „(Time-based) Preventive Maintenance“: Dabei wird – meist nach Vorgabe der Lieferanten der jeweiligen Komponenten – ein Wartungsintervall vorgegeben, dass sich entweder am Kalender (z. B. mindestens einmal pro Jahr) oder nach der Betriebsdauer (z. B. alle 1.000 Betriebsstunden) orientiert. Dabei gehen die Hersteller nach *Randall [2011]* oftmals von der Prämisse aus, dass im Wartungsintervall nicht mehr als 1 bis 2 % der Maschinen ausfallen sollten, d. h. dass die meisten Maschinen ohne Probleme auch sehr viel länger betrieben werden könnte.
- „Condition Based Maintenance (Predictive Maintenance)“: Beim letzten Wartungstyp erfolgt eine vorausschauende Wartung zum technisch- und/oder wirtschaftlichen optimalen Zeitpunkt. Derartige Konzepte setzen jedoch voraus, dass der Zustand der Aggregate kontinuierlich überwacht wird („Condition Monitoring“).

Im Biogassektor ist zurzeit eine Mischung aus den Wartungskonzepten „Run-to-break“ und „Time-based Preventive Mainteance“ üblich:

- „Run-to-break“ kommt oft zum Einsatz, wenn der Ausfall der Maschine nicht zu einem Totalausfall führt, sondern es lediglich Verschleißteile betrifft. Ein übliches Beispiel sind die Drehkolben oder Rotoren/Statoren von Pumpen, die oft – unabhängig von der Effizienz der Förderung – solange betrieben werden, bis diese Teile funktionsuntüchtig werden. Weiterhin ist dieses Wartungskonzept häufig bei Messgeräten zu beobachten: Die Messgeräte werden solange betrieben bis der Messwert erkennbar falsch ist.
- „(Time-based) Preventive Maintenance“ kommt meist dann zum Einsatz, wenn die Gefahr eines Totalausfalls besteht und/oder mit einem Zusammenbruch der Anlage erhebliche finanzielle Verluste verbunden sind. Ein typisches Beispiel hierfür sind die Blockheizkraftwerke, deren Motoren in der Regel alle 1.000 Betriebsstunden gewartet werden. Die meisten Biogasanlagenbetreiber kommen bei den meist mehrere Hundert Tausend Euro teuren BHKW dieser Wartung pünktlich nach, da mit diesen Aggregaten in der Regel das Geld verdient wird.

Im Gegensatz zu modernen Kläranlagen, bei denen man ein hohes Maß an Redundanzen (z. B. Stand-By-Ersatzpumpen, Stand-By-Ersatzgebläse) beobachten kann, ist die Idee eines redundanten Konzeptes im Biogassektor aufgrund damit einhergehender Mehrkosten kaum verbreitet. Im Abwasserbereich ist oftmals zudem eine umfangreiche Lagerhaltung von Ersatzteilen feststellbar: D. h. neben den ohnehin verfügbaren Stand-By-Reserveaggregaten halten viele Anlagenbetreiber für wichtige Aggregate auch Ersatzantriebe o. ä. vor. Auch diese Einstellung ist im weitgehend privatwirtschaftlich organisierten Biogassektor kaum anzutreffen,

da sich auch hier die Erkenntnis durchgesetzt hat, dass eine umfangreiche Lagerhaltung finanziell aufwändig ist und Kapital bindet. Es gibt daher gute Gründe für Biogasanlagenbetreiber, diese beiden Formen der Wartung zu überdenken:

- Ein Ausfall wichtiger Komponenten kann zu erheblichen Betriebsproblemen führen: So kann ein Ausfall eines Rührwerks nicht nur zu (zum Teil irreversiblen) Sinkschichten und (meist reversiblen) Schwimmschichten führen, sondern auch eine Ausgasung behindern, was wiederum zu biologischen Prozessstörungen führen kann.
- Der Ausfall wichtiger Komponenten (z. B. BHKW) kann zu erheblichen finanziellen Einbußen führen, da Erträge meist nur dann erwirtschaftet werden, wenn Strom und Wärme erzeugt werden, andererseits jedoch die Kosten (z. B. Energie für Rührwerke, Fütterung) weiterlaufen müssen, um weitere Betriebsprobleme zu vermeiden.
- Auf der anderen Seite sind jedoch mit regelmäßigen Wartungsintervallen auch unnötige Kosten verbunden, da zum Beispiel auf vielen Anlagen unnötig oft Öl gewechselt wird.
- Schließlich hat der Autor die Erfahrung gemacht, dass es trotz der Beachtung von Wartungsintervallen (insbesondere bei den BHKW) zu Ausfällen kommen kann.
- Schließlich hat das unerwartete deutsche Wirtschaftswunder der Jahre 2010/2011 gezeigt, dass eine Kombination von vollen Auftragsbüchern und leeren Lägern bei den Herstellern in Einzelfällen zu bisher ungeahnt langen Lieferzeiten bei der Versorgung mit Ersatzteilen oder Ersatzaggregaten führen kann. Eine vorausschauende Ersatzteilbeschaffung wäre daher sinnvoll, um unnötig lange Stillstandszeiten zu vermeiden.

Aus diesem Grund hat das „Condition Based Maintenance/Condition Monitoring“ ein erhebliches Potenzial, sodass mögliche Ansätze in diesem Abschnitt näher betrachtet werden.

Jiang [2011] und *Randall [2011]* identifizieren die folgenden Ansatzpunkte für eine Zustandserfassung (Condition Monitoring) von Maschinen:

- Abrieb/Verschleißpartikel/Ölanalysen
- Leistungsauswertung
- Vibrationen
- Akustische Signale
- Temperaturmessungen
- Wärmebildkameras
- Geschwindigkeit
- Drehmoment
- Druck

10.4.2.1 Alterung von Motorenölen

Die Alterung von Motorölen und die daraus resultierenden Ölwechselintervalle bzw. der Motorölverbrauch sind durchaus von Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen. Die Praxis zeigt, dass bei niedrigen Schwefelwasserstoffkonzentrationen in dem BHKW zugeführten Biogas und guten Motorenölen, die Ölwechselintervalle (auch bei Kofermente-Biogasanlagen) auf zum Teil mehr als 1.500 h angehoben werden können, während bei einer hohen Rohgasbelastung mit Schwefelwasserstoff oder anderen Störstoffen die Ölwechselintervalle teilweise weit unter 750 h liegen. So berichtet *Oelsner [2011]* über Erfahrungen mit

dem Betrieb zweier großen Biogasanlagen: Über eine Betriebsdauer von sieben Jahren lagen dabei die Ölwechselintervalle zwischen 400 – 3.000 Betriebsstunden; die Wechselintervalle für Zündkerzen werden mit 2.500 bis 7.000 Betriebsstunden beziffert. Da die Kosten für Motorenöle eine erhebliche Kostenposition darstellen bzw. verunreinigte Öle langfristige Betriebsprobleme verursachen können (z. B. Korrosion), werden von vielen Biogasanlagenbetreibern daher regelmäßig Motorölproben gezogen und an Prüflabore geschickt. Diese Prüflabore setzten zum Teil bereits heute Laborgeräte auf Basis der FT-IR-Spektroskopie ein, um das Ausmaß der Oxidation, Nitration und Sulfation zu ermitteln (z. B. *Oelcheck [2000]*). In Abhängigkeit der Ergebnisse erfolgt dann der Hinweis zu einem Ölwechsel oder der Vorschlag zur Wahl eines anderen Motorenöls.

Es ist daher angesichts der Fortschritte in der Messtechnik denkbar, dass mittel- bis langfristig zur automatisierten Echtzeitmessung der Alterung von Ölen die IR-Spektroskopie ebenfalls zum Einsatz kommt. D. h. ein IR-Sensor, welcher z. B. direkt am BHKW installiert ist, könnte die Alterung des Motorenöls messen und ggf. auch Probleme (z. B. Metallspäne im Motorenöl) frühzeitig identifizieren. Eine solche Messung könnte folgende wirtschaftliche Vorteile bieten:

- Reduzierung der Stillstandszeiten des BHKW
- Erhöhung der Lebensdauer des BHKW durch Reduzierung der Korrosion
- Vermeidung von Havarien
- Reduzierung der Betriebskosten
- Realisierung vorausschauender Wartungskonzepte
- Rückschlüsse auf die Funktionsweise und Zuverlässigkeit des jeweils eingesetzten Verfahrens zur Entschwefelung
- Hinweise für die Auswahl geeigneter Motorenöle

Ein derartiges System wird jedoch aus Gründen der Praktikabilität und Gewährleistung ein Bestandteil des Lieferumfangs des BHKW-Herstellers sein müssen, so wie dies heute bereits für die Gasdurchfluss- und Gasanalysemesstechnik zutrifft.

10.4.2.2 Leistungsauswertung

Einige der erfassten Betriebsdaten könnten zum Beispiel auch dazu genutzt werden, um vorausschauende Wartungskonzepte auf Basis einer kontinuierlichen Leistungsauswertung zu realisieren: Eine Zwangsstelle bei den beiden in Kapitel 10.1 und 10.2 vorgestellten Biogasanlagen ist die zentrale Pumpstation, die jeweils mit einer Drehkolbenpumpe ausgestattet sind, da hierüber alle Pumpvorgänge ablaufen. Um die Abnutzung der Drehkolben zu reduzieren, wurde jeweils ein Cutter vorgeschaltet, der Störstoffe (z. B. Steine) abscheidet und große Faserbestandteile o. ä. zerkleinert. Unabhängig davon unterliegen Drehkolben immer einem Verschleiß, was wiederum zu geringeren Durchflüssen bzw. im Umkehrschluss zu längeren Pumpenlaufzeiten und höheren Energiekosten führt. Auf Basis üblicher Wartungskonzepte werden die Drehkolben in regelmäßigen Abständen – oft aufgrund von Herstellervorgaben (z. B. 3 Monate) – ausgetauscht. In Einzelfällen kann man aber auch beobachten, dass die Drehkolben erst ausgetauscht werden, wenn die Pumpe gar nicht mehr funktioniert. Die Praxis zeigt jedoch, dass die Abnutzung der Drehkolben unterschiedlich schnell erfolgen kann, sodass im Einzelfall bereits ein Austausch nach wenigen Wochen, in anderen Fällen erst nach mehreren Monaten erfolgen muss. Auf dieser Erkenntnis aufbauend hat *Schneider [2008]* für die Betriebsdaten der in Abschnitt 10.1 beschriebenen Anlage nach einem Werkzeug zur

Bestimmung des kostenoptimalen Austauschs der Drehkolben gesucht. D. h. auf Basis der bereits gemessen Prozessgrößen „Durchflussmenge“ und „Pumpenlaufzeit“ sowie der bekannten spezifischen Kosten (Stromkosten, Ersatzteilkosten) wäre es möglich, ein automatisches Tool zu entwickeln, das den kosten-optimalen Zeitpunkt des Austauschs der Drehkolben dynamisch ermittelt. Interessant wäre hierbei auch, die Fütterungshistorie zu berücksichtigen, da sicherlich auch wechselnde Fütterungsmischungen einen Einfluss auf den Verschleiß haben können.

Ferner sind noch andere ähnliche Tools denkbar:

- Kontinuierliche Überwachung der Brennraumtemperaturen im BHKW-Motor mit Trenderkennung über den Abbau der Zündkerzen → Kosten-optimaler Zeitpunkt zum Wechsel der Zündkerzen detektieren
- Auf Basis der gemessenen H_2S-Konzentrationen im Biogas ist es weiterhin denkbar, einen Softsensor zu entwickeln, der den optimalen Zeitpunkt zum Ölwechsel vorhersagt.

10.4.2.3 Die „hörende“ und „fühlende“ Biogasanlage

Scholl [2011] beschreibt kurz und knapp eine Erfahrung, die schon viele Praktiker im Anlagen- und Maschinenbau gemacht haben: *„[…] Die Erfahrung zeigt, dass es in fast allen Anlagen Antriebe gibt die ‚schon immer‘ oder ‚von Anfang an‘ solche Geräusche gemacht haben, schon öfters repariert werden mussten ohne dass die Ursache bekannt wurde und die aus unerklärlichen Gründen immer wieder überraschend ausfallen. […]“.*

Damit ein Zustandserfassungssystem für Maschinen weite Verbreitung findet, muss es nach *Jiang [2011]* die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Einfach zu implementieren
- Robust, um auch in der industriellen Umwelt zu bestehen
- Kontaktlose Messungen mit Fernzugriff
- Echtzeiterfassung
- Kosteneffizient

Aus diesen Anforderungen leitet *Jiang [2011]* ab, dass ein ideales Zustandserfassungssystem für Maschinen in vielen Fällen auf akustischen Signalen beruhen sollte, da die hierfür erforderliche Messtechnik die zuvor genannten Anforderungen erfüllt. *Jiang* betont zudem, dass Geräusche eine Vielzahl von Informationen zur Verfügung stellen können, da physikalische Prozesse meist Geräusche produzieren, die wiederum Rückschlüsse auf den Status und die Stabilität des Prozesses zu lassen. Um die Einsatzmöglichkeiten zu verdeutlichen, geht *Jiang* im Detail auf eine akustische Zustandserfassung und –bewertung eines Dieselmotors ein: Mit Hilfe von fünf im Raum verteilten Mikrofonen werden die Geräusche eines Dieselmotors aufgezeichnet; die Nachhallzeit und Stör-/Hintergrundgeräusche können über spezielle Techniken (z. B. Filter) ausgeblendet werden. Anhand zahlreicher Diagramme führt der Autor aus, dass sich mit Hilfe der akustischen Zustandserfassung diverse Fehler am Dieselmotor zuverlässig diagnostizieren lassen, wie zum Beispiel:

- Fehler an den Kraftstoffeinspritzdüsen
- Fehler an den Ventilen
- Fehlzündungen

Dieses Beispiel der akustischen Überwachung eines Verbrennungsmotors lässt sich ohne große Fantasie auch auf Applikationen auf einer Biogasanlage übertragen: Naheliegend ist sicherlich die akustische Zustandserfassung des Blockheizkraftwerks, zumal es sich hierbei um das Herzstück einer Biogasanlage handelt, mit dem das Geld verdient wird. Ein suboptimaler Betrieb oder ggf. sogar eine Motorenhaverie ist daher immer auch mit erheblichen Verlustpotenzialen verbunden. Da sich am Markt größere und technologisch leistungsfähige BHKW-Packager immer mehr durchsetzen, dürfte langfristig der Einsatz einer solchen Technologie – auch vor dem Hintergrund großer Stückzahlen – vorstellbar sein. Denkbar wäre, dass ein BHKW-Container bereits ab Werk mit Mikrofonen und des dazugehörigen Monitoringsystems ausgestattet wird, ähnlich wie dies bereits heute bei wichtigen Prozessmessgeräten (z. B. Gasdurchfluss, Gasanalyse) oder Sicherheitsmesstechnik (z. B. Brandmelder, Sensor zur Detektion explosibler Gase) der Fall ist.

Jiang [2011] verweist zudem darauf, dass die derzeitigen und absehbaren Entwicklungen im Bereich der Sensorik, der Kommunikations- und Netzwerktechnik, der Signalverarbeitung und der Mustererkennung auch die Weiterentwicklung der akustischen Zustandserfassung begünstigen werden.

Damit ist mittel- bis langfristig auch für weitere Maschinen auf Biogasanlagen eine akustische Überwachung vorstellbar, wie zum Beispiel für Pumpen, Rührwerke, Feststoffdosierer und Verdichter. Vor diesem Hintergrund erscheint es realistisch, dass die Biogasanlage der Zukunft über ein intelligentes „Gehör“ verfügen wird, das den Zustand der wichtigsten Maschinen und Aggregate überwacht.

Einen ähnlichen Weg, aber mit einer anderen Form von Messtechnik verfolgt *Randall [2011]*: Dieser Autor setzt für die Umsetzung von Condition Monitoring-Konzepten auf den Einsatz kontinuierlicher und/oder temporärer Vibrationsmessverfahren (z. B. Laser, 2-Punkt-Vibrationsmessungen), um aus den aufgezeichneten Vibrationen Rückschlüsse auf den Aggregatezustand zu ziehen. Die Einsatzmöglichkeiten verdeutlicht *Randall* an diversen Beispielen (z. B. Gas- und Elektromotoren, Getriebe); alles Komponenten, die auch auf Biogasanlagen zum Einsatz kommen. Auf ein direkt übertragsbares Beispiel aus dem Biogassektor verweist *Hoogen [2012]*: Am Beispiel einer Wälzlagerüberwachung an einem Gasverdichter werden exemplarisch die Vibrationsmessergebnisse für eine langsame (Trendanstieg über Wochen bzw. Monate) und eine schnelle Schädigung (Trendanstieg über Stunden bzw. Tage) der Wälzlager dargestellt. Ersteres ließe sich damit auch über mobile Messungen in regelmäßigen Intervallen (1 bis 2 Monate) erkennen, letzteres ließe sich vermutlich nur mit einer kontinuierlichen Messung zuverlässig identifizieren. *Marwala [2012]* testete verschiedene Formen Künstlicher Intelligenz (z. B. Fuzzy, Neuronale Netze, Markov-Modelle) für deren Einsatz zum Condition Monitoring; zwei der überwachten Komponenten (Rollenlager und Transformator) finden auch auf Biogas- und Kläranlagen Anwendung.

10.4.3 Eine intelligente Substratdatenbank

10.4.3.1 Veranlassung

Grundsätzlich können in Biogasanlagen eine Vielzahl von gärfähigen Stoffen eingesetzt werden (siehe Abschnitt 8.3). Die Analyse der Substrate und Co-Substrate im alltäglichen Biogasanlagenbetrieb ist nicht oder nur selten für ausgewählte Parameter üblich, zumal viele Substratgemische schwierig zu messen sind. Zukünftig wird der Einsatz von Labor- und

Prozessmesstechnik zwar tendenziell zunehmen, jedoch wird es bezüglich der Kontrolle der Eingangssubstrate auch weiterhin Defizite geben. Hieraus resultiert die Idee einer nach Möglichkeit intelligenten Substratdatenbank. Als Substratdatenbank wird im nachfolgenden Sinne eine digitale Datenbank definiert, in der möglichst viele verschiedene Substrate für Anaerobanlagen mit ihren physikalischen, chemischen und biologischen Charakteristika (und ggf. anderen Daten) enthalten sind. Veranlassung für die Notwendigkeit einer derartigen Datenbank sind die folgenden Grundprobleme:

- Bei den Substraten und Co-Substraten handelt es sich um sehr heterogene Stoffgruppen: In der Literatur finden sich zu weit mehr als 300 Substraten Informationen zu deren Beschaffenheit, wobei bis zu 100 verschiedene Parameter (mit zum Teil unterschiedlichen Maßeinheiten) zu deren Charakterisierung verwendet werden. In Tabelle 10.9 hat der Autor unstrukturiert verschiede Kenngrößen aufgelistet, die bei einer Durchsicht diverser Literaturstellen aufgetaucht sind.
- Auch innerhalb einer Stoffgruppe kann es sehr starke Unterschiede geben (Abb. 10.7).
- Eine Analyse der Substrate/Co-Substrate ist aus diversen Gründen (z. B. Kosten) nicht oder nur vereinzelt üblich. Daran werden auch neue Messverfahren mittelfristig nichts ändern. → D.h. nur wenige Informationen sind tatsächlich im Betrieb verfügbar, wie z. B. Volumen bzw. Gewicht, ggf. auch der TS/TM-Gehalt.
- Die zuvor beschriebenen Probleme und die hohe Komplexität der Thematik legt nahe, über den Einsatz von Künstlicher Intelligenz, u. a. Case-Based Reasoning, nachzudenken und eine intelligente Substratdatenbank aufzubauen. Die Literaturwerte können eine erste Grundlage für den Aufbau einer solchen Datenbank darstellen.

Tab. 10.9: Unstrukturierte und unvollständige Auflistung verschiedener Kenngrößen und dazugehöriger Maßeinheiten, die in der Literatur verwendet werden (Quelle: Autor)

Lfd.Nr.	Parameter	Einheit	Lfd.Nr.	Parameter	Einheit
1	TS-Gehalt, TS-Konzentration	%, g/l	45	Anteil CaO	% TS
2	oTS-Gehalt	%, % TS	46	Anteil Na	g/kg TM
3	oTS/TS-Gehalt	-	47	Anteil Mg	% TM, g/kg TM
4	N_{ges}	% TS	48	Anteil MgO	% TS
5	C/N-Verhältnis	-	49	Anteil P	% TM, g/kg TM
6	Reifeindex	-	50	Anteil P2O5	% TS
7	Erntetage	d	51	Anteil S	% TM, g/kg TM, % TS
8	Gasausbeute	l/kg oTS, m3/kg oTS, m3/t FM, m3/ha, l/kg FM	52	Anteil Fe	mg/kg TM
9	Bruttoenergie	MJ/kg TS	53	Anteil Cu	mg/kg TM
10	Energiegehalte	MJ/kg oTS	54	Anteil Mangan	mg/kg TM
11	Heizwert	MJ/kg	55	Anteil Zink	mg/kg TM
12	Methangehalt	%, kWh/m3	56	Anteil Cl	% TM
13	Stromerlöse	€/t FM	57	Stärkeeinheiten	MJ/kg TS
14	variable Kosten	€/t FM	58	Netto-Energie-Laktation	MJ/kg TS
15	Ausbringungskosten	€/t FM	59	Metabolische Energie	MJ/kg TS
16	Kosten	€/t FM	60	umsetzbare Energie	MJ/kg TS
17	Grenzkosten	€/t FM	61	CSB_{hom}	g/l
18	Leistungsbedarf	kW/10 t FM	62	CSB_{filt}	g/l
19	notw. Grubenraum	m3/10 t FM	63	$BSB_{5,hom}$	g/l
20	Transportkosten	ct/kWh	64	$BSB_{5,filt}$	g/l
21	relativer Gasertrag	% pro Monat Lagerzeit	65	TOC	g/l
22	Frischmasseertrag	t FM/(ha*a)	66	N_{ges}	g/l
23	Lagerverluste	%	67	NH_4-N	g/l
24	TM-Ertrag	t TM/(ha*a)	68	P_{ges}	g/l
25	Anteil Wasser	% FM	69	lipophile Stoffe	g/l
26	Anteil Stärke	% TM, % FM	70	organische Säuren	g/l
27	Anteil Zucker	% TM, % FM	71	Absetzbare Stoffe	ml/l
28	Anteil Dextrin u. Pektin	% FM	72	Abfiltrierbare Stoffe	mg/l
29	Anteil Pentosane	% FM	73	BSB_5:N_{ges}:P_{ges}	-
30	Anteil Asche	% TM, % FM	74	Leitfähigkeit	ms/cm
31	Anteil Rohprotein	% TS, %TM, % FM, g/kg TS	75	Calzium	g/l
32	Anteil Rohfett	% TS, %TM, % FM, g/kg TS	76	Kalium	g/l
33	Anteil Rohfaser	% TS, %TM, % FM, g/kg TS	77	Magnesium	g/l
34	Anteil N-freie Extraktstoffe	% TS, %TM, % FM, g/kg TS	78	Sulfat	g/l
35	Anteil Lignin	% TS	79	Chlorid	g/l
36	Anteil Zellulose	% TS	80	Laktat	g/l
37	Anteil Hemizellulose	% TS	81	Zink	ppm
38	Anteil C	% TM	82	Kupfer	ppm
39	Anteil H	% TM	83	Cadmium	ppm
40	Anteil O	% TM	84	Magnesium	ppm
41	Anteil N	% TM, % TS	85	Nickel	ppm
42	Anteil K	% TM, g/kg TM	86	Blei	ppm
43	Anteil K2O	% TS	87	pH	-
44	Anteil Ca	% TM, g/kg TM			

10.4.3.2 Beispiel: Auf der Suche nach der optimalen Futtermischung

Die Kosten für die Biomasse stellen in der Regel den größten Kostenfaktor für den Betrieb einer Biogasanlage dar. Bei 500 kW_{el}-Biogasanlage auf Basis nachwachsender Rohstoffe können die Substratkosten etwa 300.000 € pro Jahr ausmachen. Weiterhin können die Preise im Verlauf mehrerer Jahre große Schwankungen aufweisen (z. B. Getreide 60 - 160 €/Mg, Maissilage 20 - 35 €/Mg). Aus diesem Grund wurde die Datenbank einer Biogasanlage ausgewertet, um sinnvolle Kombinationen von organischer Raumbelastung und kosten-optimalen Futtermischungen zu finden (Abbildung 10.28): Es ist erkennbar, dass eine brauchbare Korrelation zwischen der organischen Raumbelastung [kg TM/(m^3·d)] und der spezifischen Stromproduktion [kWh/kg TM] gefunden wurde. Es wird aber auch deutlich, dass die spezifischen Subtratkosten der jeweiligen Futterrationen sehr starken Schwankungen (6,0 bis 9,9 ct/kWh_{el}) unterliegen.

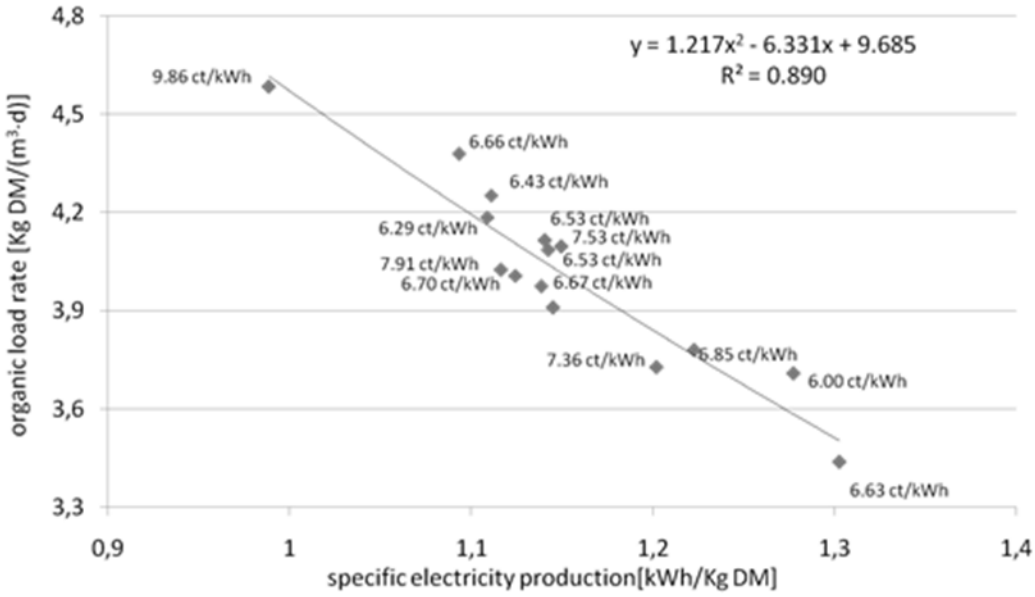


Abb. 10.28: Organische Raumbelastung (Organic load rate) versus spezifischer Energieproduktion (specific electricty production); ebenfalls dargestellt sind die spezifischen Substratkosten (Bildquelle: Autor)

Es bietet sich daher an, über die Entwicklung von Software-Tools nachzudenken, die sowohl eine kostenoptimale Futtermischung als auch eine optimale Raumbelastung ermitteln. Einen derartigen Ansatz verfolgt *Gaida [2011]*, jedoch geht er einen anderen Weg indem er mit Hilfe einer dynamischen Simulation und einer Optimierungsroutine optimale Futtermischungen ermittelt. Einen ebenfalls etwas anderen Ansatz verfolgen *Weitze und Kraft [2011]* mit einem regelbasierten Ansatz zur Erstellung einer Fütterungsempfehlung (Inputmenge/-zusammensetzung).

10.4.3.3 Einsatzgebiete

Einsatzgebiete für eine intelligente Substratdatenbank können aus derzeitiger Sicht in den folgenden Bereichen gesehen werden:

- Steuerung und Regelung von Biogasanlagen
- Einsatz im Rahmen von Substratbörsen
- Planungshilfe

Steuerung und Regelung von Biogasanlagen

Die Substratdatenbank könnte die Grundlage eines intelligenten Steuerungs- und Regelungskonzeptes für Biogasanlagen sein bzw. folgenden Zwecken dienen:

- Informationsmedium für den Betreiber (z. B. beim Einsatz neuer Substrate)
- Steuerung der Beschickung (z. B. belastungsabhängige Beschickung)
- Plausibilitätsprüfung (z. B. Kontrollgröße bei der analytischen Qualitätssicherung)
- Prognosewerte (z. B. zur Prognose der Gasbildungsrate einer Biogasanlage)

- Ersatzwertbereitstellung (da nicht alle Werte analytisch erfasst werden können, könnte jeder Charge eine Art „virtueller Laufzettel“ mit den Charakteristika des Substrates mitgegeben werden)
- Konfliktvermeidung (z. B. Verhinderung von ungünstigen Substratgemischen: nicht alle Substrate lassen sich beliebig miteinander mischen)
- Grundlage für Softsensoren (Werte die nicht im Prozess gemessen werden können, könnten über die Werte der Substratdatenbank und online/offline im Prozess ermittelten Werten abgeschätzt werden)
- Grundlage für modell-, wissens-, datenbank- und regel-basierte Modelle (Modelle benötigen Eingangsdaten; aus den zuvor erläuterten Gründen wird es auch hier nicht möglich sein, alle Eingangsdaten im Prozess/Labor analytisch zu erfassen)
- Grundlage für Bilanzierung, Controlling und Benchmark (die in der Substratdatenbank archivierten Werte könnten als Grundlage für Stoffstrom- und Energiebilanzen, technische und betriebswirtschaftliche Kenngrößenermittlung etc. eingesetzt werden)

Einsatz im Rahmen von Substratbörsen

Der Bioenergiesektor boomt in den letzten Jahren: Jeder Boom kann aber auch negative Folgen mit sich bringen. So hängt der wirtschaftliche Erfolg einer Biogasanlage von der Verfügbarkeit von Substraten ab. Insbesondere die Biogasanlagen, die keine langfristigen Lieferverträge abgeschlossen haben oder im ausreichenden Maße auf eigene Eingangsstoffe zurückgreifen können, können unter ungünstigen Marktbedingungen schnell in wirtschaftliche Bedrängnis geraten. Auch für Biogasanlagen, die in den nächsten Jahren in Betrieb gehen werden, dürfte die Situation schwieriger werden, da der „Kampf um die (letzten) guten Substrate“ immer schwieriger wird, zumal immer mehr Produzenten organischer Reststoffe erkennen, dass sie keine Abfallstoffe produzieren für deren Entsorgung sie bezahlen müssen, sondern Energierohstoffe für die sie sogar Geld verlangen können. Bereits heute existieren regionale Substratbörsen, die z. B. durch die Mitglieder von Biogasnachbarschaften organisiert werden. In der Regel handelt es sich aber hierbei um primitive Börsen, denn ein generelles Problem besteht immer: Während an einer konventionellen Börse durch Wertpapierkennnummern o. ä. eindeutig definiert ist, welches Produkt gehandelt wird und welche Rechte etc. mit einem Erwerb verbunden sind, ist dies im Bereich der Substratbörsen nicht der Fall. D. h. der Markt ist allein schon durch die Heterogenität der Substrate hochgradig intransparent. Eine effektive Börse setzt jedoch einen transparenten Markt voraus. Ein Schlüssel zur Lösung dieses Problems könnte eine intelligente Substratdatenbank sein, die dem Käufer die Möglichkeit gibt, sich über ein bestimmtes Substrat bzw. dessen Eigenschaften genauer zu informieren.

Planung

Eine Planung von Biogasanlagen sollte wirtschaftlich und technisch durchdacht sein. Insbesondere für eine realistische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind zuverlässige Informationen über zu erwartende Gaserträge etc. wichtig, da ansonsten die Gefahr besteht, dass Biogasprojekte bereits bei kleineren negativen Veränderungen unwirtschaftlich werden. Die intelligente Datenbank könnte Planern eine wichtige Hilfe liefern, um bestimmte Kenngrößen, deren Schwankungsbreite etc. zu ermitteln. Ferner könnte sie als Informationsmedium für Bauern bei Anbauentscheidungen dienen.

10.4.3.4 Anforderungskriterien für eine Substratdatenbank

Darüber hinaus sollte die Substratdatenbank die folgenden Anforderungskriterien erfüllen:

- offene Eingabefunktion für neue Substrate bzw. Co-Substrate
- Automatische Umrechnung
- Plausibilitätsprüfung
- Gasertragskurvenverläufe
- Statistische Auswertefunktionen
- CBR-Funktionalität zur effektiven Suche
- Ersatzwerte im Falle fehlender oder unzureichender Angaben
- ggf. zentrale Datenbank
- Beipackzettelfunktion

Offene Eingabefunktion für neue Substrate und Co-Substrate

Es wird niemals möglich sein, die Datenbank abzuschließen, da z. B.

- neue Substrate entwickelt werden (z. B. auf einen hohen Gasertrag gezüchtete Maissorten)
- im Ausland sicher weitere Substrate verfügbar sind, die bei uns jedoch (noch) unüblich sind, ggf. aber auch bei uns eingeführt werden,
- zurzeit zahlreiche Forschungsaktivitäten sich der Ermittlung von Substrateigenschaften beschäftigen.

Es ist daher wichtig, dass die Datenbank offen bleibt bzw. jederzeit neue Substrate hinzugefügt werden können.

Umrechnungsfunktionen

Weiterhin wird es nicht möglich sein, für jedes Substrat alle wichtigen Kenngrößen in der Datenbank vorzuhalten. Daher erscheint es wichtig, das System mit Umrechnungsfunktionen auszustatten, die es erlauben, fehlende Kennziffern aus bekannten Kennzahlen zu errechnen oder abzuschätzen. Diese Funktionalität kann ggf. nicht nur innerhalb eines Substrats zur Anwendung kommen (Trivialbeispiel: TS-Gehalt [%] · oTS/TS-Gehalt [-] → oTS-Gehalt [%]), sondern auch im Einzelfall innerhalb einer Substratgattung (z. B. Annahme: Wenn das bekannte C:N-Verhältnis der Maissorte A bei X % liegt, dann dürfte das unbekannte C:N-Verhältnis der Maissorte B mit einiger Wahrscheinlichkeit relativ nahe an X % liegen).

Plausibilitätsprüfung

Nicht alles, was in der Literatur veröffentlicht wird, muss auch verlässlich sein. Zudem ist nicht ausgeschlossen, dass bei der Eingabe der Kennzahlen in die Substratdatenbank Fehler gemacht werden (z. B. Zahlendreher). D. h. das System müsste über ein Mindestmaß an Plausibilitätsprüfungsalgorithmen verfügen, um größere Fehler zu vermeiden.

Gasertragskurvenverläufe

Die einzelnen Substrate weisen gravierend unterschiedliche Gasertragskurvenverläufe auf, d. h. manche Substrate lassen sich schnell, andere sehr langsam (> 30 Tage) abbauen. Dies hat zur Folge, dass eine zuverlässige Gasertragsprognoseabschätzung auch die Fütterungshistorie der letzten Woche berücksichtigen muss. In diesem Zusammenhang ist es hilfreich,

wenn die Datenbank auch gemessene oder geschätzte (z. B. über die Inhaltsstoffe abgeschätzt) Gasertragskurvenverläufe beinhalten würde.

Statistische Auswertefunktion

Das System sollte ebenfalls wichtige statistische Kennziffern errechnen können.

CBR-Funktionalität

Die vorangegangenen Ausführungen bezüglich der Randbedingungen zeigen, dass eine Suche innerhalb der Datenbank nicht trivial ist, zumal es relativ unwahrscheinlich ist, dass man einen exakten Treffer erhält. Es erscheint daher sinnvoll, die Intelligenz der Datenbank auf dem CBR-Prinzip aufzubauen. D. h. bei einer Anfrage werden die jeweils ähnlichsten Einträge aus einer Datenbank herausgesucht.

Ersatzwertbildung

Mit diesem Tool könnten Ersatzwerte für fehlende Kennziffern abgeschätzt werden.

Beipackzettelfunktion

Aufbauend auf der Vielzahl der Informationen könnten auch Beipackzettel automatisch erstellt werden:

- So könnten die wesentlichen Informationen über ein Substrat in ein pdf-File geschrieben werden, das wiederum dem Betreiber als Informationsmedium an die Hand gegeben wird; z. B. wenn er sich über die Eigenschaften eines neuen Substrats informieren will.
- Darüber hinaus ist es aber auch denkbar, jeder Charge einen virtuellen Beipackzettel mit zu geben, der ggf. in einige der zuvor angedachten Überwachungs- und MSR-Konzepte eingebunden werden könnten (z. B. Nährstoffzusammensetzung, Gasertragsverlauf).

10.4.4 Eine zielführende Fehlerdiagnose und Entscheidungshilfe

In der Literatur finden sich verschiedene Hinweise zur Diagnose von Fehlern bzw. zur Ableitung geeigneter Lösungsvorschläge:

Weijma [2011] gibt praktische Hinweise zur Diagnose von Betriebsproblemen auf anaeroben Kläranlagen und daraus abgeleiteten Gegenmaßnahmen, wobei die Diagnosefindung sehr strukturiert nach einer Checkliste erfolgt, wie folgendes Beispiel zeigt:

„Step 2.1 ‚Hydraulic Retention Time (HRT)‘: If HRT is too low than hydraulic overloading → Cause detected else go to Step 2.2"

Auch wenn sich diese Diagnosehilfen nicht immer direkt auf Biogasanlagen übertragen lassen, so könnte eine solche Checkliste das Grundgerüst für eine automatisierte Diagnosefunktion sein, die dem Biogasanlagenbetreiber zielgerichtet Hinweise auf die Ursachen des Problems und mögliche Gegenmaßnahmen gibt. Auch andere Autoren geben Hinweise zur Identifikation von Problemen auf Biogasanlagen, jedoch mit einer weniger stark strukturierten Vorgehensweise, sodass für ein Problem verschiedene Ursachen aufgelistet werden, die vom Betreiber noch genauer eingrenzt werden muss. So gibt *KTBL [2009]* eine tabellarische Übersicht über Probleme, Ursachen und Problemlösung (Tabelle 10.10).

Tab. 10.10: Exemplarische Auszüge für Probleme, Ursachen und Problemlösungen nach *KTBL [2009]*

Ort	**Problem**	**Ursachen**	**Behebung/Vorbeugung**
Fermenter	Sink- und Schwimm-schichten	Mangelnde Durch-mischung, Überfütterung der Anlage, unzureichende Zerkleinerung des Materials	Rührmanagement (Intervall, Dauer, Rührposition), verbesserte Substratauf-bereitung, weniger strukturreiches Material einsetzen, TS-Gehalt verringern
…	…	…	…
Rührwerk	Ausfall des Rührwerkes, dadurch extreme Schwimmdeckenbildung mit Füllstandserhöhung	Schäden an Steuerung, Motor, Getriebe durch Überhitzung, verursacht durch Schwimmschichten, Störstoffe, unzureichende Befestigung im Fermenter	Schnellst möglich rühren (eventuell externes Rührwerk) damit Biogas aus dem Substrat entweicht, ggf. Fermenter entleeren, robuste Ausführung und Befestigung
…	…	…	…
Biologie	Sinkender Methangehalt und dadurch schlechte Verbrennung im BHKW	Zuviel Lufteinspeisung, Undichtigkeiten im Gassystem, Temperatur-schwankungen, Störung der Biologie, eventuell Schwankung durch Futterumstellung	Kontrolle auf Undichtigkeiten, Kontrolle der Lufteinblasmenge (Entschwefelung), Biologie stabilisieren
…	…	…	…

Bereits *Köttner [2002]* hatte eine ähnlich strukturierte Tabelle mit Ratschlägen aufgestellt, die exemplarisch in Tabelle 10.11 dargestellt ist. Die Tabellen 10.10 und 10.11 geben jeweils nur eine stark verkürzte Übersicht der Originalquelle wieder, da hier lediglich eine exemplarische Übersicht darüber gegeben werden soll, wie diese Informationen strukturiert sind.

Ein Vergleich dieser Daten zeigt, dass sowohl die Notwendigkeit besteht, die Informationen dieser und weiterer Quellen zu einem Grundwissensschatz an Problemen, Ursachen und Lösungsvorschlägen zusammen zu fassen und diese dann anschließend – auch durch die Verarbeitung von online-Informationen – so weit zu strukturieren bzw. weiter einzugrenzen, dass entweder eine automatische Lösung des Problems möglich ist oder dem Bediener zumindest eine zuverlässige Diagnose an die Hand gegeben werden kann. Wie so etwas aussehen könnte ist beispielhaft in Abbildung 10.29 dargestellt. Die in Kapitel 3 und 10 gemachten Ausführungen machen deutlich, dass die für derartige Diagnosen erforderliche Messtechnik bereits vorhanden ist, sodass „nur noch“ die automatische Auswertung der Messwerte und Bildinformationen erforderlich wäre, wobei die Lösung zum Teil vollautomatisch umgesetzt oder in Form eines Vorschlags an den Bediener weitergegeben werden könnte. Dabei besteht die Möglichkeit, derartige Konzepte im Falle des Auftretens eines Problems zu aktivieren oder ggf. auch bereits zur Vermeidung des Problems den Prozess mit Hilfe von Softsensoren

kontinuierlich zu überwachen (z. B. durch eine kontinuierliche Zeitreihenanalyse der Rührwerksleistung und -taktung sowie der TS-Konzentration mit einer damit einhergehenden Alarmierung, sobald Sollwerte über- oder unterschritten werden).

Tab. 10.11: Exemplarische Auszüge für Probleme, Ursachen und Problemlösungen nach *Köttner [2002]*

Problem	**Ursachen**	**Behebung/Vorbeugung**
…	…	…
Schwimmschichten	Zu geringe Rührintensität, zu hoher TS-Gehalt des Gärsubstrates (Festmist, Silagen)	Rührintervalle verkürzen und Rührwerksposition neu einstellen, Trockensubstanzgehalt des Gärsubstrates auf max. 10 bis 12 % einstellen
Sinkschichten	Zu geringe Rührintensität, Substrate mit erhöhter Sinkschichtneigung (Hühnermist, Bioabfälle)	Rührintervalle verkürzen und Rührwerksposition neu einstellen, Schwerstoffe in der Vorgrube abziehen, Sinkschichten durch Schwerstoffabzug im Fermenter absaugen, eventuell Räumvorrichtung einsetzen
…	…	…
Geringer Methangehalt im Gas	Sauerstoffeintrag durch ungenügende Zerkleinerung, hohe Schwefel- und Ammoniakgehalte, zu hohe Luftdosierung bei der Entschwefelung	Substrat ausreichend zerkleinern, siehe auch Schaumbildung
…	…	…

Die Ausführungen aus Abschnitt 10.4.2 verdeutlichen zudem, dass die hier vorgestellten Bausteine eng miteinander verzahnt werden können bzw. von den Informationen des jeweils anderen Bausteins profitieren, wie zum Beispiel die im Rahmen des Condition Monitoring gewonnenen Informationen.

Abb. 10.29: Beispiel für eine mögliche automatisierte Problemdiagnose und geeigneter Lösungsvorschläge am Beispiel der Schwimschichtproblematik (Quelle: Wiese)

10.4.5 Eine Biogasanlage lernt von einer anderen Biogasanlage

Die Erziehungswissenschaft stimmt darin überein, dass jüngere Geschwister viel von älteren Geschwistern lernen können:

„Im Verlauf ihres zweiten Lebensjahres nehmen die jüngeren Kinder ihre älteren Geschwister immer häufiger zum Vorbild: über ein Viertel ihrer Interaktionen bezogen auf das ältere Geschwister stellt Nachahmungsverhalten dar. […]. Ältere Kinder treten ihren jüngeren Geschwistern häufig als Lehrende gegenüber. Ihr Lehrverhalten erstreckt sich auf physische Fähigkeiten, Namen von Dingen, Zahlen, Aussprechen von Wörtern, Spielregeln und Spielzeuggebrauch.“ Eckert und von Block [1999]

„Das Hüten von Kindern durch ihre älteren Geschwister ist ein kulturübergreifendes Phämomen. […] Schulaufgabenhilfe unter Geschwistern ist sehr häufig. […] Geschwister fungieren des Weiteren als Betreuer zweiter Order (‚second order caretakers‘). Wenn Mütter Forderungen ihrer Töchter nach Hilfe und Aufmerksamkeit ignorierten, setzte dies als indirekten Effekt eine prosoziale Interaktion zwischen den Geschwistern in Gang: Das Kind forderte und erhielt Hilfe von seiner Schwester.“ Schmidt-Denter [2004]

Im weiteren Sinne lässt sich dieses Konzept des Lernens und der Betreuung auch auf den Betrieb von verfahrenstechnischen Anlagen und damit auch auf Biogasanlagen übertragen:

Informations-, Wissens- und Erfahrungsaustausch: Verfahrenstechnische Anlagen durchlaufen im Laufe ihres Betriebes eine Vielzahl von unterschiedlichen Last- und Betriebssituationen, Störungen et cetera. Mit Hilfe des Konzepts der „gläsernen Biogasanlage“ bzw.

der Vielzahl von Informationen die von den dort installierten Messgeräten gesammelt werden, lässt sich diese Erfahrung in den Datenbanken der Prozessleitsysteme dokumentieren. Da in den letzten Jahren immer mehr Biogasanlagen standardisiert und sich daher bezüglich der Maschinen- und Verfahrenstechnik – zumindest die Baureihen einzelner Hersteller – immer ähnlicher werden, sollte es möglich sein, diese Erfahrung von einer älteren „Schwester"-Biogasanlage auf eine jüngere „Schwester"-Biogasanlage zu transferieren. Dieser Austausch könnte auch das Lernen der Biogasanlagen beschleunigen, denn verschiedene Formen der Künstlichen Intelligenz weisen folgende Defizite auf:

- Einzelne Verfahren (z. B. Neuronale Netze) sind nicht oder nur bedingt extrapolationsfähig. Da diese KI-Methoden mit existierenden Datensätzen trainiert werden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass Probleme im Betrieb auftreten, wenn es zu bis dahin unbekannten Situationen kommt. Durch den Austausch der Daten vieler Biogasanlagen untereinander, dürften Trainingsdatensätze eine umfangreiche und bessere Qualität aufweisen.
- In der Praxis werden KI-Methoden mit Hilfe von Betriebsdaten trainiert. Auf Kläranlagen ist dies in der Regel kein Problem, da derartige Automationskonzepte meist nachgerüstet werden, sodass sich in den Datenbanken vielfach brauchbare Trainingsdatensätze finden. Auf Neuanlagen stehen derartige Information aber zunächst nicht zur Verfügung. Hier liegt es nahe, als Startdatensatz einer Neuanlage die Betriebsdaten einer ähnlichen Altanlage zu übergeben; mit zunehmenden Betrieb der Neuanlage kann dann dieses externe Wissen sukzessive durch eigene Betriebsdaten/Erfahrungen ersetzt werden.
- Andere Verfahren (z. B. Case-Based Reasoning) können auch aus Fehlern lernen, sodass auch hier das KI-Expertensystem einer Biogasanlage, das bereits auf positiven und negativen Erfahrungen anderer Anlagen aufbaut, sehr viel schneller und zuverlässiger gute Ergebnisse liefern dürfte, da erneute Fehler vermieden werden.

Hüterfunktion: Weiterhin ist vorstellbar, dass ältere Biogasanlagen eine „Hüterfunktion" für jüngere Biogasanlagen übernehmen. Vorstellbar ist bei einer zentralisierten Datenauswertung, dass man in den Datenbanken der Anlagen gezielt nach Mustern und Anzeichen sucht, die im Vorfeld einer prozessbiologischen oder technischen Störung aufgetreten sind. Deuten die Messgeräte einer neuen Biogasanlage an, dass sich ein ähnliches Muster wie auf einer anderen Biogasanlage erneut wiederholt, könnte vorausschauend entgegengesteuert werden, um erneute Probleme zu vermeiden.

Gleiche Sprache: Der Aufbau eines solchen Systems wird erheblichen Aufwand verursachen, weil die Systeme u. a. eine „gleiche Sprache" sprechen müssten (z. B. Schnittstellen). Wenn aber einmal dieses Ziel erreicht ist, so dürfte eine Maschine-Maschine-Kommunikation zwischen den einzelnen Anlagen effizienter und mit weniger Reibungsverlusten ablaufen als eine Mensch-Maschine-Kommunikation (z. B. Betreiber und Leitsystem) und Mensch-Mensch-Kommunikation (z. B. verbaler Austausch zwischen verschiedenen Betreibern). Insbesondere bei letzter Form der Kommunikation hat der Autor die Erfahrung gemacht, dass selbst zwei Menschen, die die gleiche Sprache sprechen, sich nicht zwangsläufig immer und eindeutig verstehen müssen: Ein Verfahrensingenieur ohne Erfahrung in der Landwirtschaft und ein Landwirt ohne Verständnis für die Komplexität der Biogastechnik können schnell aneinander vorbeireden.

10.4.6 Regelungs- und Steuerungskonzepte auf Basis künstlicher Intelligenz und modellbasierter Ansätze

Im Abschnitt 9.6.4 wurde bereits auf diverse Projekte zur Simulation von Biogasanlagen eingegangen. Unter anderem wurde dort auf die Arbeiten von *Müller et al. [2007], Wolf et al. [2007]* und *Gaida [2011]* eingegangen, die das Werkzeug der dynamischen mathematischen Simulation von Biogasanlagen in verschiedenen Formen zur Optimierung von Biogasanlagen eingesetzt haben. *Weinrich und Nelles [2011]* geben einen Überblick über die Modellierung des Biogasprozesses und gehen dabei auch auf wichtige zu beachtende Randaspekte (Anforderungen an die Messtechnik, Parameteridentifikation) ein, wenn diese als Grundlage für modellbasierte Regelungskonzepte verwendet werden soll.

Die Ausführungen des Kapitels 10 machen deutlich, dass auf Basis der umfangreichen Informationen, die eine moderne Biogasanlage kontinuierlich erfasst, eine derartige Simulation einer großtechnischen Biogasanlage – ggf. auch eine Echtzeitsimulation – möglich ist. Sicherlich kann die modellbasierte Simulation in Einzelfällen zu einer Optimierung von Biogasanlagen beitragen. In diesem Zusammenhang gilt es jedoch zu beachten, dass hiermit sowohl ein technischer als auch finanzieller Aufwand verbunden ist, der nicht nur aus der Modellerstellung, sondern auch aus der für eine Echtzeitapplikation erforderlichen Modellnachführung und Qualitätssicherung der Daten resultiert. Weiterhin muss beachten werden, dass die Transparenz für den Benutzer beim Einsatz eines modellbasierten Ansatzes nicht immer gegeben ist, was die Akzeptanz beim Nutzer erschweren kann. Diese Faktoren haben bereits in der Siedlungswasserwirtschaft dazu geführt, dass sich Echtzeitsimulationsmodelle für Kläranlagen – trotz vielversprechender Projekte – nicht durchsetzen konnten. Es bleibt abzuwarten, ob dies im Biogassektor auf Dauer anders sein wird.

Im Abschnitt 9.6 wurde zudem auf verschiedene Optimierungsansätze auf Basis künstlicher Intelligenz verwiesen. U. a. wurde dort auf die Arbeiten von *Nacke [2006]* (Fuzzy-Control), *Neumann et al. [2007]* (Fuzzy-Control), *Scherer et al. [2008]* (Fuzzy-Control), *Krassowski [2011]* (Neuro-Fuzzy-Control) und *Weitze und Kraft [2011]* (Fuzzy-Control) eingegangen; zum Teil wurden derartige Ansätze auch im großtechnischen Maßstab erprobt. Bezüglich dieser Ansätze gelten sinngemäß die gleichen Ausführungen wie bei der modellbasierten Simulation. D. h. eine moderne Biogasanlage, wie sie in verschiedenen Komplexitätsgraden im Kapitel 10 beschrieben wurde, stellt alle Informationen zur Verfügung, um derartige Ansätze realisieren zu können. Da bei derartigen Ansätzen jedoch der finanzielle Aufwand deutlich niedriger ist (z. B. Wegfall der Modellnachführung) als bei einer modellbasierten Steuerung und Regelung, stehen die Chancen für eine weite Verbreitung künstlicher Intelligenz in der Automationstechnik von Biogasanlagen deutlich besser; hoffnungsvoll stimmt diesbezüglich die Tatsache, dass Fuzzy- und Neuro-Fuzzy-Controller in der artverwandten Branche der Abwassertechnik bereits weite Verbreitung gefunden haben. Gleichwohl bleibt auch hier die Problematik, dass derartige Ansätze nicht in jeder Betriebssituation eine unmittelbar nachvollziehbare Entscheidung treffen.

10.5 Was muss passieren, damit die Visionen wahr werden?

Damit die hier vorgestellten Visionen mittel- bis langfristige Realität werden, müssen noch zahlreiche Herausforderungen überwunden bzw. brauchbare Lösungen gefunden werden.

10.5.1 Abbau von Wissensdefiziten und Vorurteilen

Man kann feststellen, dass zahlreiche Planer und Hersteller von Biogasanlagen erhebliche (Erfahrungs-)Defizite beim Einsatz von Mess- und Automationstechnik haben bzw. dieser Technik nicht die angemessene Beachtung schenken. Dies kann gravierende Folgen haben, denn zum Beispiel führt eine falsche Auswahl und/oder Installation von Messgeräten fast zwangsläufig zu unbefriedigenden Ergebnissen (z. B. Messungenauigkeit, hoher Wartungsaufwand) für den Biogasanlagenbetreiber. Hier besteht bei Planern und Anlagenbauern noch erheblicher Weiterbildungsbedarf!

10.5.2 Qualitätssicherung von Messwerten

Die Grundprinzipien einer analytischen Qualitätssicherung (AQS) von Messergebnissen, die in den anderen artverwandten Branchen (z. B. der Abwassertechnik) weit verbreitet und zunehmend akzeptiert bzw. umgesetzt werden, finden im Biogassektor bisher nur in Ausnahmefällen Anwendung. Auch die Dokumentation der Messdaten ist oftmals unzureichend. Hier besteht Bedarf für einfache AQS-Methodiken sowohl im Bereich der Laboranalytik (z. B. FOS/TAC) als auch der Echtzeitmesstechnik. Ähnlich verhält es sich auch bei sonstigen Messwerten: Wenn Echtzeit-Messgeräte zum Einsatz kommen, dann werden Messdaten oft nicht elektronisch gespeichert oder einer Datenkontrolle unterzogen. D. h. hier existiert Bedarf für intelligente Sensoren und Informationsmanagementsysteme (z. B. automatische Drift- und Shift-Erkennung, Erkennung der Alterung von Sensoren). Diese Hürden lassen sich jedoch überwinden, da geeignete Ansätze (siehe Abschnitt 3.9) bereits in anderen Branchen existieren und nur noch für die Biogastechnik adaptiert und konsequent umgesetzt werden müssen.

10.5.3 Anbindung der Messgeräte an die Automationsebene

Viele der auf Biogasanlagen eingesetzten Messgeräte sind nicht an eine übergeordnete Ebene angebunden, da in vielen Fällen keine Prozessleitsysteme vorhanden sind. Dies führt dazu, dass die Möglichkeiten, die Echtzeitmessgeräte bieten, nicht oder nur im begrenzten Umfang genutzt werden können. Weiterhin ist es in diesen Fällen nicht möglich, Messsignale miteinander zu verknüpfen. Dieses Problem ist aber eher auf Defizite bei Planern und Betreibern zurückzuführen, denn die moderne Industrieautomation bietet genug Standardkomponenten auf die zurückgegriffen werden kann. Insbesondere für kleinere Biogasanlagen wäre es jedoch hilfreich, einfache und kostengünstige Möglichkeiten zu schaffen.

10.5.4 Geeignete Einbauarmaturen

Bis heute werden die meisten Einbauarmaturen (z. B. für pH, Redox und TS) für Echtzeitmessgeräte, die in der Regel ebenfalls von den Messgeräteherstellern geliefert werden, für industrielle bzw. abwassertechnische Anwendungen entwickelt. Einige dieser Einbauarmaturen sind entweder sehr teuer (bis zu 3.000 € pro Stück) oder nicht geeignet für die eher schwierige Umgebung von Biogasanlagen. Hier besteht Bedarf für eine robuste, aber dennoch

günstige und einfach handhabbare Einbauarmaturen, welche es erlauben, Messgeräte unter Betriebsbedingungen einfach zu wechseln, zu reinigen und zu kalibrieren.

10.5.5 Robustere und wartungsarme Messgeräte

Viele Biogasanlagenbetreiber sind Landwirte, die sich sehr gut mit Maschinen und Bautechnik auskennen, aber in der Regel nicht das Hintergrundwissen bzw. auch nicht die Zeit haben, um sich zu Experten für Messgeräte und Automationstechnik weiter zu bilden:

- Hieraus resultiert ein Bedarf für sehr robuste und einfach verstehbare Messgeräte!
- Die Messgerätehersteller sollten zudem prüfen, inwieweit für diese Zielgruppen günstige Rund-um-Sorglos-Service-Pakete angeboten werden können. Ggf. sind hier auch Werkzeuge zur Ferndiagnose der Messgeräte zielführend.
- Die Zuverlässigkeit und Robustheit der Messgeräte muss weiter verbessert werden, um die Dauer zwischen zwei Fehlern (meantime between error) bzw. die Dauer zwischen zwei Wartungsintervallen (meantime between maintenance) weiter zu erhöhen.

10.5.6 Kostendegression

Leider sind zurzeit viele interessante neue Messverfahren, wie die Nahinfrarotspektroskopie oder Echtzeit-Titrationssysteme, bezüglich der Investitions- und Betriebskosten noch teuer, sodass nicht absehbar ist, wann ein ökonomischer Betrieb dieser Messgeräte auf normalen Biogasanlagen möglich ist. Um den Durchbruch am Markt zu schaffen, müssen die Kosten für diese Messverfahren um mindestens 50 bis 70 % reduziert werden. Die Entwicklung im artverwandten Bereich der Abwasserreinigung zeigt jedoch, dass es durch eine Kombination von neuen innovativen Verfahren und ständig steigenden Stückzahlen zu einer starken Kostendegression bei Messgeräten kommen kann (siehe Abb. 3.3). Da durch die Vielzahl neuer Biogasanlagen und das nach wie vor hohe Potenzial langfristig damit zu rechnen ist, dass es mehr Biogasanlagen als Kläranlagen geben wird, dürfte die Entwicklung bei den Messgeräten für Biogasanlagen ähnlich verlaufen, d. h. die Messgeräte günstiger werden.

10.5.7 Neue Messverfahren

Heute lassen sich zahlreiche Parameter in Echtzeit messen. Einige Messgeräte und Messverfahren entsprechen dem Stand der Technik, andere sind aber eher noch dem Stand der Forschung und Entwicklung zuzuordnen. Für einige interessante Parameter existieren bis heute keine, geschweige denn kostengünstige, Messgeräte. Interessant wären zum Beispiel:

- Geruchsmessungen, um angesichts häufiger Bedenken gegen Biogasanlagen in der Bevölkerung zu dokumentieren, ob und in welchem Ausmaß Geruchsemissionen von einer Biogasanlage ausgehen. Außerdem könnten hierdurch Leckagen, die nicht nur eine Geruchsbeeinträchtigung, sondern vielfach auch einen finanziellen Schaden darstellen, zeitnah identifiziert werden.
- Weiterhin hilfreich wäre es, wenn kostengünstige Messverfahren existieren würden, um den Energiegehalt von organischen Stoffen zur Biogaserzeugung abschätzen zu können, um eine energiegehaltsbezogene Fütterung vornehmen zu können. Dies ist zwar bereits heute mit NIRS oder Hochfrequenz ansatzweise möglich, allerdings zu hohen Kosten.
- Angesichts steigender Preise für Düngemittel (z. B. Kali, Stickstoff, Phosphor) wäre eine Ermittlung der Nährstoffgehalte im abgegebenen Gärrest nicht nur für Zwecke des

Precision Farmings, sondern auch für eine Bestimmung des finanziellen Wertes des Gärrestes interessant.

- Um Fehler bei der Probennahme zu vermeiden, sind auch automatische Probenehmer – wie sie in der Abwassertechnik bereits seit Jahrzehnten üblich sind – vorstellbar. Dies gilt besonders dann, wenn die Anforderungen des Staates an die Dokumentation weiter ansteigen sollten. Hier existiert noch erheblicher Bedarf für Forschung und Entwicklunng!

10.5.8 Vom Labormaßstab in die Großtechnik

Seit mehreren Jahren arbeiten weltweit Forscher an der Entwicklung von Mess- und Automationskonzepten für Anaerobanlagen (siehe Kapitel 9.6). Die meisten dieser Projekte wurden/werden aber im halbtechnischen oder Labormaßstab durchgeführt und/oder haben einen Fokus auf anaeroben Abwasserverfahren. MSR-Forschungen zu Biogasanlagen sind noch selten und beziehen sich oftmals auch auf Laborversuche, die zudem häufig mit Monosubstraten oder künstlichen Substraten durchgeführt wurden. Weiterhin kann man feststellen, dass bei den meisten Studien der Schwerpunkt auf der Optimierung eines Teilschritts (z. B. der Erhöhung der Biogasproduktion in einem Fermenter) liegt. In der Realität gilt es jedoch multi-kriterielle Probleme zu lösen bzw. die spezifischen Schwierigkeiten der Großtechnik (z. B. nicht voll durchmischte Reaktoren, Vielstoffsubstrate oder saisonale Einflüsse bei den Substraten) zu berücksichtigen. Obwohl es diesbezüglich Bemühungen in der Forschung gibt, wird es noch einige Jahre dauern, bis komplexe Mess- und Automationskonzept auch in der Großtechnik weite Verbreitung finden.

10.5.9 Bewusstsein: Eine Biogasanlage ist ein Industriebetrieb!

„[…] ‚Wir wollen die Branche industrialisieren‘, sagt Daubner. Statt in Tausenden weit verstreuten Silos soll der Brennstoff künftig in wenigen Großanlagen gewonnen werden. […]. Agricapital-Chef Daubner will den Wirkungsgrad der Technik erhöhen, indem er Größenvorteile nutzt. […]. Auch der Betrieb der Kraftwerke erinnert mehr an ein Industrieunternehmen als an einen Bauernhof. Die Anlagen steuert Agricapital fast komplett aus der Zentrale in Münster. Hinter Dutzenden Computerbildschirmen verfolgen Daubners Mitarbeiter Temperatur und Gasmenge in jedem der Faulbehälter. Und falls mal etwas schiefläuft, beantworten Mikrobiologen und Verfahrenstechniker Fragen des Personals vor Ort per Telefonhotline. […]. Die schwankenden Rohstoffpreise machen Daubner ebenfalls Sorgen. […]. ‚Es gibt einen großen Preisdruck im Moment, besonders am Spotmarkt merkt man das.‘ […].“ Werner [2011]

Dieses Zitat belegt, dass zumindest bei professionellen Biogas-Großinvestoren die Erkenntnis reift, dass es sich bei Biogasanlagen um komplexe Industriebetriebe handelt. Damit steigt auch das Bewusstsein, dass Mess-, Automations- und Fernwirktechnik ein Schlüssel zur Effizienzsteigerung ist. Bis sich diese Erkenntnis auch bei den Betreibern kleinerer und mittlerer Anlagen flächendeckend durchsetzt, wird es sicherlich noch eine Zeitlang dauern.

10.6 Rechtfertigen die Chancen den Aufwand?

Obwohl der endgültige Durchbruch der Mess- und Automationstechnik im Biogassektor noch nicht erfolgt ist und die existierenden Herausforderungen hoch sind, sind die **Chancen** viel höher und rechtfertigen die Weiterentwicklung neuer Automationskonzepte und Messgeräte für Biogasanlagen.

10.6.1 Steigerung der Wirtschaftlichkeit

Man kann feststellen, dass die Besitzer ein wachsendes finanzielles Interesse daran haben, einen möglichst hohen, aber dennoch stabilen Anlagenbetrieb zu erreichen. Beispiel: Die theoretische Stromproduktion einer 500 kW_{el} Biogasanlage beträgt 4,38 Millionen kWh pro Jahr. Die durchschnittliche Vergütung für Biogasstrom liegt in Europa zwischen 8 und 23 ct/kWh_{el}. D. h. eine 10 % höhere Anlagenauslastung führt zu höheren jährlichen Einnahmen zwischen 35 und 79 Tsd. €/a; gelingt diese Steigerung ohne einen nennenswerten Anstieg des Materialeinsatzes, so ist ein Großteil dieser Zusatzeinnahmen auch Gewinn. Im Umkehrschluss kann ein suboptimaler Anlagenbetrieb oder gar eine ernsthafte Betriebsstörung (z. B. durch eine Überlastung des Anaerobreaktors) zu ernsthaften finanziellen Problemen für den Biogasanlagenbetreiber führen. In beiden Fällen rechtfertigen die aufgeführten Beträge den Einsatz von Mess- und Automationstechnik! Biogasanlagen, die über moderne Automationstechnik sowie zuverlässige und angepasste Maschinentechnik verfügen, können dauerhaft sehr gute Betriebsergebnisse erzielen. Mit Auslastungsgraden der BHKW von deutlich mehr als 90 % des theoretischen Maximums können derartige Anlagen zuverlässig Grundlaststrom und -wärme produzieren.

10.6.2 Enormes Potenzial weltweit

Das weltweite Potenzial für Biogasanlagen ist extrem hoch: In Deutschland wird es mit mehr als 10.000 Biogasanlagen angenommen (zum Vergleich: in Deutschland gab es 2008 9.994 Kläranlagen). In anderen Staaten, in denen die Bevölkerungsdichte geringer und das Biomassepotenzial deutlicher höher ist (z. B. USA, Osteuropa, Indien), ist das Marktpotenzial noch deutlich höher. D. h. das weltweite Marktpotenzial für Mess- und Automationstechnik für Biogasanlagen sollte langfristig mindestens so groß sein wie das Marktpotenzial für derartige Technik auf Kläranlagen.

10.6.3 Synergieeffekte

Um Synergieeffekte bei Planung, Beschaffung und Bau von Biogasanlagen zu nutzen, haben viele Hersteller von Biogasanlagen angefangen, ihre Anlagen zu standardisieren. Diese Entwicklung ist eine große Chance für den Durchbruch von Mess- und Automationstechnik auf Biogasanlagen, weil Mess-, Steuerungs- und Regelungsstrategien sowie Entscheidungsunterstützende Systeme (EUS), die für eine standardisierte Biogasanlage entwickelt wurden, einfach auf eine Vielzahl weiterer Anlagen übertragen lässt.

10.6.4 Know-how-Transfer

Die Prozesse sowie die Verfahrenstechnik von Biogasanlagen sind durchaus vergleichbar mit der Abwassertechnik, die in Teilbereichen – insbesondere aber der EMSR-Technik – sehr viel weiter ist. D. h. der Biogassektor ist sehr interessant für Abwasserexperten, besonders wenn sie über Kenntnisse der Mess- und Automationstechnik verfügen.

10.6.5 Künstliche Intelligenz

Vom Datenfriedhof zur Wissensschatztruhe: Konventionelle Mess- und Automationskonzepte für Biogasanlagen basieren meist noch auf einfachen Konzepten, die oftmals auch manuelle Eingriffe durch den Betreiber bzw. Bediener erfordern. Aufgrund der komplexen Struktur und

Dynamik des Anaerobprozesses bzw. der Biogasanlagen können diese Konzepte problematisch sein. In diesen Fällen benötigt man komplexe Controller, welche zum Beispiel auf mathematischen Modellen oder künstlicher Intelligenz beruhen könnten: Je mehr Prozessdaten zur Verfügung stehen, umso interessanter sind derartige Ansätze. Derartige Werkzeuge können helfen, das Prozessverständnis zu vertiefen und den Betrieb zu optimieren. Auch wenn sich die Mess- und Automationsgeräte immer weiterentwickeln, wird das Problem fehlender Daten immer existieren, da viele Parameter entweder nur schwer (oder teuer) oder vielfach auch gar nicht (z. B. biologische Parameter) bestimmt werden können. Weiterhin ist im Einzelfall nicht auszuschließen, dass die Messdaten nicht repräsentativ für das Gesamtsystem sind. Dies bedeutet, dass Betreiber ihre Anlagen dann oftmals mit ihrer Erfahrung aus früheren Ereignissen betreiben müssen. Insbesondere wenn es darum geht, Entscheidungen aus Informationen abzuleiten, kann künstliche Intelligenz ebenfalls ein hilfreiches (Diagnose-) Werkzeug sein, wie zahlreiche Beispiele aus diversen Industriebereichen zeigen (*Bergmann et al. [1999]*). Denkbar sind Systeme zur Entscheidungsunterstützung, für Steuerungs- und Regelungskonzepte, für Aus- und Weiterbildung etc.

10.7 Zwischenfazit

Der Stand der Mess- und Automationstechnik ist auf vielen Biogasanlagen noch relativ gering (siehe Kapitel 9), sodass es sich bei Biogasanlagen häufig noch um Black-Box-Systeme handelt. In den letzten Jahren sind aber bereits Biogasanlagen gebaut worden, die aufgrund des Einsatzes moderner Mess- und Automationstechnik bereits den Status von Grey-Box- und White-Box-Systemen erreicht haben. Der Autor dieser Arbeit ist der Auffassung, dass sich dieser Trend weiter fortsetzen wird, da es Indizien dafür gibt, dass durch den Einsatz von Mess- und Automationstechnik der ökonomische und ökologische Nutzen von Biogasanlagen deutlich erhöht bzw. stabilisiert werden kann. Auch wenn es hoffnungsvolle Ansätze gibt, wird es sicherlich noch einige Jahre dauern, bis aus den Biogasanlagen nicht nur Glass-Box-Systeme, sondern gar intelligente Biogasanlage entstehen (Abbildung 10.30).

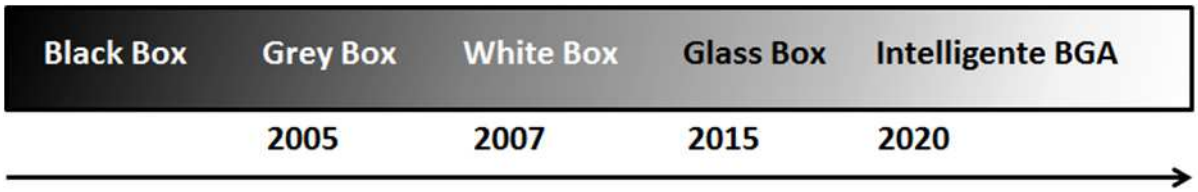


Abb. 10.30: Vom der Black-Box zur intelligenten Biogasanlage (*nach Wiese und König [2009B]*)

11 Biogas- und SBR-Anlagen – Komponenten zukünftiger Bioraffineriekonzepte?

In den letzten Jahren wird zunehmend über zukünftige Bioraffineriekonzepte diskutiert, wobei nicht mehr nur die Gewinnung von Bioethanol und Biodiesel im Vordergrund steht, sondern auch über Anlagen zur Produktion anderer Stoffe (z. B. Biokunststoffe) nachgedacht wird. In diesem Zusammenhang können – wie dieses Kapitel zeigen wird – sowohl Biogasanlagen als auch SBR-Anlagen sinnvolle Verfahrensbausteine zukünftiger Bioraffineriekonzepte sein. Darüber hinaus resultieren aus diesen Ansätzen interessante Perspektiven für den Einsatz und die Weiterentwicklung von Mess- und Automationstechnik auf SBR- und Biogasanlagen.

11.1 Einleitung

Biogasanlagen stellen nur einen Baustein in der stofflichen und energetischen Nutzung von biogenen Reststoffen und nachwachsenden Rohstoffen dar. Es gibt noch weitere Formen der energetischen Umwandlung von Biomasse, wie die thermische und thermochemische Nutzung von Festbiomassen (Verbrennung, Verschwelung, Vergasung, Verkohlung), die Erzeugung von Biokraftstoffen (Biodiesel, Bioethanol, Biomass-to-Liquid) oder Biogas bzw. Biomethan (siehe hierzu auch *Kaltschmitt und Hartmann [2001]*). Weiterhin gibt es auch Ansätze zur Umwandlung dieser Stoffe in sogenannte biobasierte Stoffe (z. B. biologisch abbaubare Kunststoffe). Nach *Kamm [2008]* kann darauf aufbauend langfristig ein Modell einer biobasierten Wirtschaft entstehen, das aus drei Säulen besteht (Abb. 11.1).

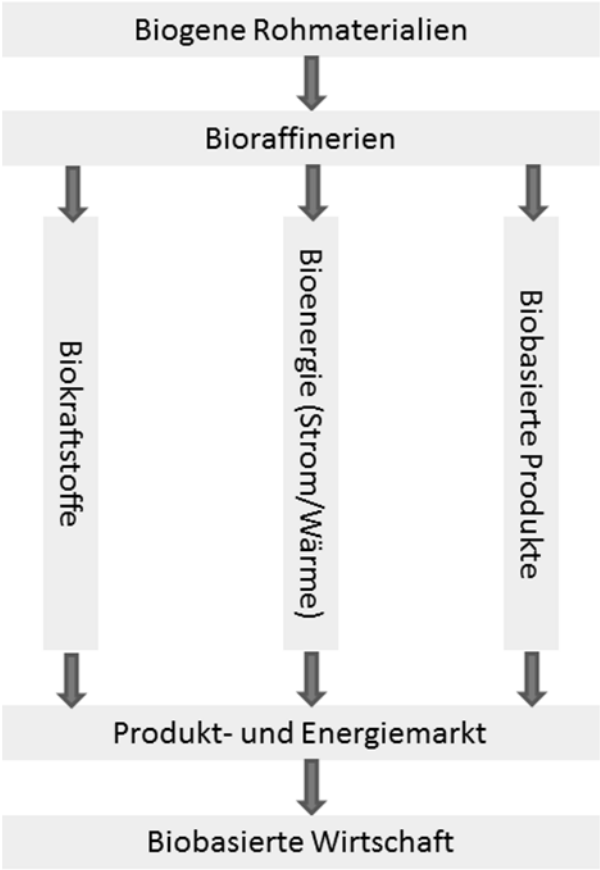


Abb. 11.1: Schema einer biobasierten Wirtschaft mit drei Säulen (nach *Kamm [2008]*)

Im Zentrum einer biobasierten Wirtschaft steht dabei die sogenannte Bioraffinerie, die nach *Kamm et al. [2007]* wie folgt definiert ist: *„Eine Bioraffinerie ist ein komplexes und integriertes System von Prozessen und Anlagen in welchem Biomasse in eine Vielzahl von Produkten umgewandelt wird. Bioraffinerie ist dem Konzept einer petrochemischen Raffinerie angelehnt. Bioraffinerien vereinen die Technologien zwischen den biogenen Rohstoffen und industriellen Zwischen- und Finalprodukten. Biorefining oder Bioraffination ist letztendlich nichts anderes als die Übertragung von Effizienz und Logik der fossil-basierten Chemischen und Stoffwandelnden Industrie sowie Produktion von Energie auf die Biomasse-Industrie.“*

Kamm et al. [2011] geben eine Übersicht über verschiedene Bioraffineriekonzepte, wie z. B.:

- Lignocellulose-basierte Bio-Produktion von Bioethanol,
- Cellulose-basierte Bio-Produktion von Bioethanol
- Lignocellulose-basierte Bio-Produktion von Furfural, Levulin- und Ameisensäure
- Zucker-basierte Bio-Produktion von Polyhydroxybuttersäure, Zucker und Bioethanol
- Bioraffinierie auf Basis einer Weizenganzpflanzensilage zur Erzeugung von Bernsteinsäure als Vorstufe für zahlreiche biobasierte Produkte (Hydrauliköle, biologisch abbaubare Kunststoffe)
- Bioraffinierien auf Basis von Kombinationen von thermochemischen und biologischen Prozessen zur Produktion von Synthesegas, organischen Säuren, Polyester und Alkoholverbindungen
- Bioraffineriekonzepte zur Erzeugung von Milchsäure aus Pflanzensäften (z. B. Kartoffeln)

Derartige und zukünftige Bioraffinerien (Abb. 11.2) werden verfahrenstechnisch komplexe Betriebe sein, die ähnlich wie heutige chemische Produktionsanlagen mit modernster Mess- und Automationstechnik ausgerüstet werden.

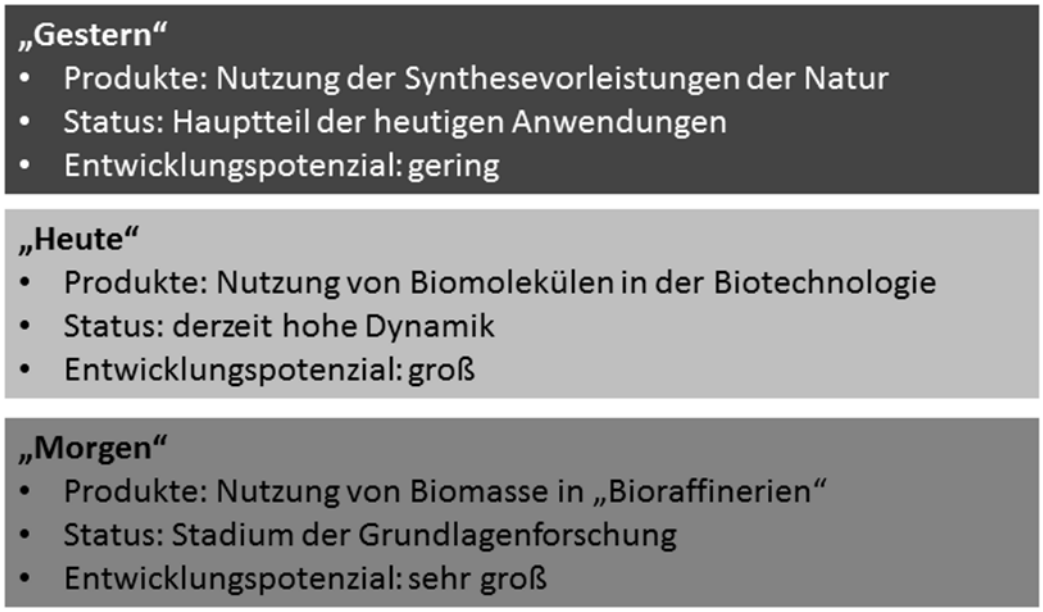


Abb. 11.2: Die drei Generationen der Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der Chemie (*Rothermel [2008]*)

Im Hinblick auf die Automation von Bioraffinerien beschreibt *Kamm [2008]* im Zusammenhang mit Bioraffinerien die folgenden Potenziale und Vorschläge:

- *„[...] Entwicklung von Prozess- und Regel-Technik*
- *Regelung der Sollwerte von Anlagenteilen*
- *Kombination von biotechnologischen und chemischen Prozess-Modulen*
- *Regelung über Kaskaden*
- *Entwicklung neuer Automatisierungstechnik kombiniert mit bekannten Techniken der Automatisierung […]"*

Diese Aufstellung macht deutlich, dass es bezüglich der Mess- und Automationstechnik bei Bioraffinerien ähnliche Fragestellungen zu lösen gilt, wie im Biogassektor.

11.2 Biogasanlagen als Ergänzung heutiger Bioraffinerien

Nach *Filho [2009]* sind für Bioraffinerien die folgenden Erfolgsfaktoren ausschlaggebend:

- Rohstoffauswahl
  - Pflanzenart und biochemische Faktoren
  - Landwirtschaftliche Faktoren
  - Logistikkosten
  - Bestimmung des Produktionsprozesses
  - Energiequellen für die Produktionsanlagen
  - Rohstoffbedingte Produktionskosten
- Niedrige Energiekosten
- Maximierung der Raum-Zeit-Ausbeute
- Produktverbund
- Robustheit und Fermentation
  - Reaktionsführung
  - Wahl des Produktionsorganismus
  - Anpassung des Produktionsorganismus
- Freie marktgetriebene Nachfrage
- Nachhaltigkeit

Offenkundig wird bei dieser Aufstellung, dass diese Erfolgsfaktoren in weiten Teilen identisch sind mit den Erfolgsfaktoren von Biogasanlagen, sodass durchaus Potenzial vorhanden sein sollte, um für einzelne Fragestellungen gemeinsame Lösungskonzepte zu finden. Noch interessanter ist, dass eine Biogasanlage ein zentraler Bestandteil einer Bioraffinerie sein könnte, denn die Reststoffe aus der Herstellung von Biokraftstoffen und biobasierten Produkten kann in einer Biogasanlage vor Ort zu Strom, Wärme, Kälte und Dampf umgewandelt werden, die wiederum für Produktionsprozesse in den anderen verfahrenstechnischen Teilen der Bioraffinerie genutzt werden könnten. Weiterhin denkbar ist, die beim Biogasprozess entstehenden Gase (besonders CH_4 und H_2) weiter zu nutzen. Der Gärrest kann ebenfalls weiterverarbeitet werden, zum Beispiel durch den Einsatz von Gärrestaufbereitungsanlagen, die daraus unter anderem Düngemittel erzeugen. In der Literatur finden sich bereits erste Ansätze, die derartige Ansätze verfolgen:

Angelidaki et al. [2007] stellen einen theoretischen Ansatz einer Bioraffinerie auf Basis von Lignocellulose vor, die neben Bioethanol auch Biomethan/-wasserstoff produzieren soll.

Langhans [2007] verweist darauf, dass bei der Produktion der verschiedenen flüssigen Biokraftstoffe, d. h. Biodiesel und Bioethanol, größere Mengen Raps-Presskuchen, Glyzerin und Brennereischlempen sowie Stroh anfallen; letztere Stoffmenge zwar nicht im Prozess, aber bei der Ernte. *Langhans* führt weiterhin aus, dass diese Reststoffe sehr gut zur Biogaserzeugung eingesetzt werden können.

Friedl [2007] gibt einen Überblick über die Bioethanolerzeugung, unter anderem stellt er auch das Fließschema einer kombinierten Bioethanol-/Biogasanlage vor.

Brooks et al. [2008] führten Versuche zur Vergärung von Reststoffen aus der Zuckerproduktion durch, um den Energiebedarf dieser Fabriken zu reduzieren. Basierend auf den Ergebnissen der labor- und halbtechnischen Versuche ging 2007 auf einer ungarischen Zuckerfabrik eine großtechnische Biogasanlage in Betrieb: Die Vergärung der Hälfte der organischen Reststoffe ermöglichte die Einsparung von 40 % des Erdgasbedarfs der Zuckerfabrik.

Drosg et al. [2008] untersuchten für eine Bioethanolfabrik mit einem jährlichen Anfall von 1,4 Mio. Mg Schlempen verschiedene Möglichkeiten der anaeroben Nutzung dieser organischen Reststoffe. Dabei untersuchten sie sowohl ein zentrales Konzept, d. h. eine große Biogasanlage direkt am Standort der Bioethanolfabrik, als auch ein dezentrales Konzept, d. h. zahlreiche kleinere Biogasanlagen im Umkreis der Fabrik. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass eine zentrale Lösung sinnvoll sei, was dafürspricht, die Bioethanolfabrik mit einer Biogasanlage zu einem Bioraffineriestandort weiterzuentwickeln.

Torrijos [2008] untersuchten im Labor sowohl die Verwertung organischer Reststoffe aus der Biodieselproduktion als auch die Nutzung aus Reststoffen aus der Pflanzenölproduktion (z. B. Sonnenblumenöl). Letztere Anlagen sind ebenfalls eine interessante Zielgruppe, da alleine in Frankreich 12 Pflanzenölpressen mit einer jährlichen Kapazität zwischen 50.000 und 800.000 Mg existieren; weiterhin gibt es dort auch sechs Pflanzenölraffinerien mit einer jährlichen Kapazität zwischen 25.000 und 250.000 Mg.

Maier [2011] berichtet über ein Forschungsprojekt welches das Ziel verfolgt, Ethylen anstatt aus Erdöl zukünftig aus Methan zu erzeugen; Ethylen ist ein wichtiges Ausgangsprodukt für zahlreiche chemische Produkte (z. B. Verpackungsfolien). Der Prototyp einer halbindustriellen Anlage wurde 2009 an der TU Berlin in Betrieb genommen; bereits diese sogenannte „Mini-Plant“ verfügt über 150 Sensoren und Aktoren. Ein solches Verfahren könnte einen weiteren Baustein einer Bioraffinerieanlage sein und zum Beispiel das in einer Biogasanlage entstehende Methan verarbeiten.

Rudolph [2011] berichtet über die großtechnische Umsetzung einer Bioraffinerie, die neben Bioethanol auch Biomethan herstellt sowie den Gärrest aufbereitet.

In Kapitel 11.6 wird ausgeführt werden, dass Forscher auch daran arbeiten, die Anaerobprozessführung derart zu modifizieren, dass die Wasserstoffproduktion in den Vordergrund tritt. Damit wäre dann die Biogasanlage nicht nur ein Bestandteil der von vielen Energie- und Klimaforscher propagierten Wasserstoffwirtschaft, sondern würde ein weiteres Ausgangsprodukt für eine Bioraffinerie erzeugen. In diesem Zusammenhang berichtet *Chen et al. [2011]* über eine Studie zur Produktion von Butanol mit Hilfe des Bakterienstamms *„clostridium beijerincki NRRL B592“*, wobei als Substrat der Auslauf eines Fermenters zur Wasserstoffproduktion zum Einsatz kam.

11.3 Exkurs: Chemische Verbundstandorte

Die BASF SE, der größte Chemiekonzern der Welt, hat in den letzten Jahrzehnten – ausgehend vom Stammwerk in Ludwigshafen – die Idee des Verbundstandortes konsequent umgesetzt und mittlerweile auch auf andere Standorte in der Welt kopiert. Nach *BASF [2011]* kann dieses Konzept wie folgt zusammengefasst werden:

„Der Verbund ist eine unserer Stärken, um Ressourcen effizient zu nutzen. An großen Standorten sind die Produktionsanlagen eng miteinander verknüpft. Es ergeben sich effiziente Wertschöpfungsketten – von Grundchemikalien bis hin zu hochveredelten Produkten wie Lacken oder Pflanzenschutzmitteln. Außerdem können die Nebenprodukte einer Fabrik an einer anderen Stelle als Einsatzstoff dienen. So sparen wir Rohstoffe und Energie, minimieren Emissionen, senken die Logistikkosten und nutzen in der Infrastruktur Synergien. […] Im Verbund werden Produktionsanlagen, Energiefluss, Logistik und Infrastruktur intelligent miteinander vernetzt. Chemische Prozesse können in diesem System mit geringem Energieeinsatz und hoher Ausbeute an Produkten ressourcenschonend ablaufen. […] Das Verbundprinzip gilt auch auf dem Gebiet der Energie. Im Energieverbund wird die Abhitze, die in den Produktionsbetrieben beim Ablauf chemischer Prozesse anfällt, direkt am Ort der Entstehung in Dampf umgewandelt, der den Betrieben als wertvoller Energieträger zur Verfügung steht. […] Ein dichtes Netz von Rohrleitungen verbindet die Produktionsanlagen. Diese Leitungen sind umweltfreundliche Transportwege, die Rohstoffe und Energieträger schnell und sicher ans Ziel bringen. […] Der Verbund eröffnet Möglichkeiten, Emissionen und Abfälle zu vermindern und den Ressourcenverbrauch zu senken; außerdem werden Transportwege auf ein Minimum reduziert. Somit ist der Verbund nicht nur eine wichtige ökonomische Stärke, sondern bringt zugleich ökologischen Nutzen. Zudem eröffnen sich neue Möglichkeiten, flexibler auf die Konjunktur zu reagieren. Denn im Verbund der BASF kommt alles aus einer Hand - dies hilft, unsere Produktion gut zu steuern, flexibel zu reagieren sowie selbstständig zu agieren. […]“

Im Kontext der biobasierten Wirtschaft und den von *Filho [2009]* genannten Erfolgsfaktoren für Bioraffinerien lässt sich dieser Gedanke des chemischen Verbundstandortes auch auf einen Verbundstandort verschiedener Bioenergie- und Biokraftstoffanlagen sowie Fabriken zur Erzeugung biobasierter Produkte übertragen. Bisher ist sowohl die Biogasbranche als auch die Biodiesel- und Bioethanolbranche noch stark mittelständisch geprägt: Wegen der Größe, Komplexität und des hohen Investitionsvolumens, die ein biobasierter Produktionsverbundstandort mit sich bringen würde, ist es vorstellbar, dass zukünftig auch die chemische Großindustrie verstärkt in derartigen Segmenten aktiv wird. Ähnlich dürfte sich die Situation im Anlagenbau entwickeln. In beiden Fällen wird dies die Umsetzung und Anwendung von Mess- und Automationstechnik begünstigen, da der umfangreiche Einsatz derartiger Technologien im Bereich des Großanlagenbaus und der Großchemie mittlerweile gang und gäbe ist.

11.4 Exkurs: Vorbehandlungs- und Desintegrationsverfahren

Dieser Exkurs gibt anhand ausgewählter Beispiele eine Übersicht über verschiedene Verfahren zur Vorbehandlung von organischen Stoffen und/oder zur Nachbehandlung von organischen Reststoffen. Diese Übersicht soll folgende Zusammenhänge vermittelt:

- Seit Jahren arbeiten Forscher aus den Bereichen der Abwasserreinigung, Abfallwirtschaft, Biogastechnik und artverwandten Disziplinen am Einsatz von Desintegrationsverfahren zur Vorbehandlung von Substraten und Nachbehandlung von Reststoffen. Dabei kommen unabhängig von der jeweiligen Disziplin ähnliche bis identische Verfahren zum Einsatz.

- Dabei zeigt sich, dass einzelne Behandlungsverfahren bei bestimmten Substraten erfolgreich eingesetzt werden können, während sie bei anderen Stoffen erfolglos sind. Weiterhin wird deutlich, dass in Einzelfällen auch die Kombination verschiedener Verfahren erfolgsversprechend ist.
- Bei allen Ansätzen zur Desintegration gilt es jedoch zu beachten, dass hierfür erhebliche Investitionskosten zu tätigen sind und auch die Betriebskosten (z. B. Energiekosten) nicht vernachlässigt werden dürfen.

Für zukünftige Bioraffinerien können daraus folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit könnte die Weiterentwicklung dieser Verfahren und insbesondere den Transfer in die Großtechnik voranbringen.
- Des Weiteren könnten bei derartigen Großanlagen auch Verfahren zum Einsatz kommen, die auf den bisher meist kleineren Biogasanlagen oder anaeroben Kläranlagen unwirtschaftlich sind, wie zum Beispiel eine Vorbehandlung der Eingangssubstrate zwecks einer schnelleren und effizienteren Nutzung schwer abbaubarer Inhaltsstoffe.
- Im Sinne der Verbundstandortidee könnten damit verschiedene Behandlungsanlagen zum Einsatz kommen, in denen bestimmte Stoffe effizient vorbehandelt und von dort aus auf die verschiedenen weiterführenden Produktionsanlagen am Standort weiterverteilt oder zunächst noch einer weiteren Vorbehandlungsmethode zugeführt werden. Durch die Nutzung von „Abfallprodukten“ anderer Prozessstufen (z. B. Abwärme) könnte zudem die Gesamtwirtschaftlichkeit verschiedener Desintegrationsverfahren verbessert werden.

Die nachfolgende Übersicht stellt lediglich eine Auswahl dar:

Chemische und enzymatische Behandlung: *Uellendahl et al. [2007]* untersuchten eine Vorbehandlung von Gülle und Mist mit Hilfe einer Nassoxidation durch Wasserstoffperoxid. *Sigge et al. [2007]* berichten über den Einsatz von Ozon und Enzymen zur Erhöhung der Abbaubarkeit organischer Stoffe in einem USAB-Reaktor, wobei in diesem Fall protein- und fettreiches Abwasser auf einer Kornschnapsbrennerei verwendet wurden. *Komatsu et al. [2007]* berichten über den Einsatz von Ozon zur Erhöhung der Klärgasbildung und Reduzierung der zu entsorgenden Klärschlammmenge. Am Beispiel einer Kläranlage mit 150.000 Einwohnerwerten ermittelten sie für die zusätzlich produzierte Strommenge Herstellungskosten von nur 3 ct/kWh$_{el}$. *Fernandes et al. [2007]* untersuchten im Labor den Einfluss einer chemischen Vorbehandlung zur Steigerung des Abbaugrads bei (stark) lignocellulosehaltigen Biomassen (Heu, Farnkraut und Stroh). Untersucht wurde dabei die Zugabe von Calciumhydroxid, Maleinsäure und Ammonium; anschließend wurde das Material einer mesophilen Vergärung unterzogen. Die Ergebnisse zeigen den positiven Einfluss der Vorbehandlung, jedoch mit unterschiedlicher Wirkung: Die Ammoniumbehandlung zeigte nur bei Stroh einen positiven Effekt, Calciumhydroxid führte bei allen Substraten zu einer Verbesserung der Abbauleistung und die Maleinsäure bewirkte den höchsten Anstieg des gelösten CSB im behandelten Material. *Lee et al. [2008]* untersuchten den Einfluss zweier chemischen Vorbehandlungen (Zugabe von Natronlauge oder Salzsäure) sowie zweier enzymatischer Vorbehandlungen (Zugabe von Cellulase oder Protease) auf die Vergärung von Schweinegülle, um die Abbaugeschwindigkeit zu erhöhen. Dabei zeigte sich, dass die Methanproduktion nach 20 Tagen durch die Zugabe von Cellulase um 29 % gesteigert werden konnte. *Boehler und Siegrist [2005]* führen eine Potenzialanalyse für die Desintegration von Klärschlämmen durch, da sie in der Desintegration nicht nur eine Möglichkeit sehen, die zu

entsorgende Schlammmenge zu reduzieren, sondern auch als Vorstufe für eine Rückgewinnung von Abwasserinhaltsstoffen (z. B. Phosphat als Düngemittel). Anhand von Massen- und Energiebilanzen am Beispiel der Ozonierung kamen sie zu dem Schluss, dass zwar der Klärschlammanfall mit 20 % deutlich reduziert werden kann, die Desintegration aber mehr Energie benötigt als in Form von zusätzlichen Biogas entsteht. Die Wirtschaftlichkeit sehen die Autoren daher zurzeit nur bei sehr hohen Schlammentsorgungskosten und/oder bei Anaerobreaktoren mit einer kurzen hydraulischen Aufenthaltszeit gegeben, da in diesen Fällen die Hydrolysedauer verkürzt werden kann. *Komatsu et al. [2011]* versuchten den Aufwand für die Ozonierung weiter zu reduzieren und experimentierten mit einer Kombination aus vorgeschalteter Ozonierung von Klärschlamm mit anschließender 2-stufigen anaeroben Vergärung (1. Stufe: thermophil, 2. Stufe: mesophil). Mit dieser Kombination erreichten die Autoren im halbtechnischen Maßstab bei 20 % niedrigerem Ozon-Einsatz dennoch eine 7,1 % erhöhte Klärgasproduktion: Für die großtechnische Umsetzung schätzen sie Entstehungskosten von 5,2 ct/kWh_{el} ab, sofern das Klärgas verstromt wird.

Ultraschall: *Han und Eom [2005]* berichten über Versuche zur Klärschlammdesintegration mit einem kombinierten Verfahren aus chemischen Aufschluss mit anschließender Ultraschallbehandlung: Dabei wurde zunächst in verschiedenen Dosen Natronlauge zugegeben (1 bis 50 g NaOH/100 g TS). Danach erfolgte eine Ultraschallbehandlung (40 bis 200 kHz) für eine Stunde. Die Autoren sind der Auffassung, dass eine derartige Vorbehandlung effektiver ist als eine thermische Vorbehandlung. *Wolff et al. [2007]* berichtet über Ergebnisse beim Einsatz von Hochleistungsultraschall zur Desintegration der Bakterienzellen, um dadurch einen schnelleren und effektiveren Abbau des Belebtschlamms eines Großklärwerks (330.000 Einwohnerwerte) zu erreichen. Die Autoren beobachteten durch den Einsatz von Ultraschall (90 Sekunden bei einer Intensität von 8 W/cm^2 und einer Frequenz von 31 kHz) eine erhöhte Klärgasbildung sowie einen Rückgang der zu entsorgenden Klärschlammmenge, was sich in einer deutlich positiven Kosten-Nutzen-Rechnung niederschlägt: Jahreskosten inkl. Abschreibung von 42 Tsd. € stehen demnach Mehreinnahmen in Höhe von 120 Tsd. € pro Jahr entgegen. *Kim et al. [2007]* untersuchten zwei Verfahren (Ultraschall, Venturi) zur Desintegration von Klärschlämmen mit Hilfe von Kavitation. Dabei stellten die Autoren fest, dass das Venturi-Prinzip bezüglich der Energiebilanz deutlich besser abschnitt.

Thermische Vorbehandlung: *Tsubota und Tsuno [2007]* berichten über Ergebnisse labortechnischer Versuche mit einer sog. „hyper-thermophilen“ Vorbehandlung: Organische Reststoffe aus der Kaffeeproduktion und weiteren Lebensmittelbetrieben wurden einer thermischen Vorbehandlung bei 80 °C unterzogen, wobei auch Überschussschlamm aus dem Anaerobreaktor untergemischt wurde. Im Falle der schwer abbaubaren Kaffeereststoffe konnte die Biogasproduktion um 35 % erhöht werden. *Takashima und Tanaka [2007]* berichten über eine nachgeschaltete Behandlung von Klärschlamm im Pilotmaßstab: Durch die Kombination von starker Erhitzung (170 °C) und einer pH-Wert-Absenkung (pH 5 - 6) durch die Zugabe von Schwefel- oder Salzsäure beobachteten die Autoren eine um 13 bis 22 % erhöhte Methanbildung und eine 20 bis 32 % bessere Schlammentwässerbarkeit. Bei der Zugabe von Schwefelsäure wurde zudem eine erhöhte Phosphatrücklösung beobachtet, was die Autoren im Hinblick auf die Möglichkeiten einer Phosphatrückgewinnung ebenfalls als positiv bewerten. *Chauzy et al. [2007]* berichten über eine großtechnische, thermische Klärschlammvorbehandlung. Dabei wird der Klärschlamm zunächst auf 160 °C für eine Dauer von 30 Minuten erhitzt und anschließend mesophil vergoren. Neben einer erhöhten Klärgasproduktion

beobachteten die Autoren eine Reduzierung der Schlammmenge um 40 %. *Schumacher et al. [2007]* berichten über die Ergebnisse einer Thermo-Druck-Hydrolyse, bei der Triticale und Mais in einer halbtechnischen Anlage bei 155 °C bei 6 bar Druck über eine Stunde behandelt und dann explosionsartig entspannt wurde („Steam Explosion"). Die Autoren beobachteten bei anschließenden Gärversuchen im Labor einen Anstieg des Methanertrags zwischen 6 und 34 % gegenüber dem unbehandelten Material. Nach Auskunft der Autoren ist das Verfahren auch geeignet, um die Ethanolfermentation deutlich zu steigern (+30 %). Damit liegt die Vermutung nahe, dass dieses Verfahren bei einer Bioraffinerie als gemeinsame Vorbehandlung für eine Biogasanlage und eine Bioethanolfabrik zum Einsatz kommen könnte. *Battimelli et al. [2008]* berichten über Versuche zur thermischen Vorbehandlung von Schlachthausabfällen bei 60°C, 120°C und 150°C über eine Dauer von drei Stunden; die Autoren beobachteten danach eine deutliche Erhöhung der Biogasproduktion. *Müller und Pröter [2009]* untersuchten in diesem Zusammenhang anhand von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Desintegrationsverfahren im Labormaßstab die Auswirkungen einer thermischen Desintegration und einer Ultraschallbehandlung, wobei Rindergülle und Maissilage zum Einsatz kamen. Dabei konnten die Autoren bei Batchversuchen mit einer niederthermischen Desintegration (70 °C) keinen positiven Effekt beobachten. Bei einer hochthermischen Desintegration (135 °C) konnte eine Steigerung der Biogasproduktion um 14 % beobachtet werden. Bei einer kontinuierlichen Desintegration konnte hingegen weder im nieder- noch im hochthermischen Bereich einen positiven Effekt beobachtet werden, was damit begründet wird, dass durch die Verdampfung der Fettsäuren ein positiver Effekt verhindert wird. Bei der Ultraschallbehandlung (8 min, 60 W) konnte ebenfalls kein positiver Effekt nachgewiesen werden. *Lay et al. [2011]* untersuchten den Einfluss einer thermischen Vorbehandlung (60 bis 90 ºC für 20 bis 60 min) von Klärschlamm zwecks einer Erhöhung der Biogas- und Biowasserstoffproduktion aus Cellulosehaltigen Stoffen; bei letzteren erwarteten die Autoren einen Anstieg aufgrund einer thermischen Hemmung der Wasserstoff-verbrauchenden Mikroorganismen. Bei der folgenden thermophilen Vergärung (55 ºC, pH 8,0) mit Klärschlamm beobachten die Autoren einen Anstieg der Wasserstoffproduktion von 3,6 mmol H_2/g Cellulose auf 4,3 mmol H_2/g Cellulose; bei der Methanbildung konnte ein Anstieg von 10,4 mmol CH_4/g Cellulose auf 11,6 mmol CH_4/g Cellulose festgestellt werden.

Mechanische Behandlung: *Kaparaju und Angelidaki [2007]* testeten Verfahren zur Nachbehandlung von Rindergülle. Die abgepressten Faserstoffe, die noch im Gärrest vorhanden sind, wurden dabei mit verschiedenen physikalischen und chemischen Methoden behandelt: mechanische Zerkleinerung der Fasern, Zugabe von Natronlauge, Belüftung (11 Tage bei 20 ºC und Untermischung von Kompost), Nassoxidation (O_2 für 10 min, 195 ºC, 12 bar), Mikrowellen (308, 462 oder 700 W für 15, 30, 45 oder 60 min), Kochen und Ultraschall (47 kHz). Von diesen Verfahren konnten die Autoren nur im Falle der Belüftung und der mechanischen Zerkleinerung eine Steigerung des Biogaspotenzials beobachten.

Bordeleau und Droste [2011] führten auf Basis einer Literaturrecherche Wirtschaftlichkeitsberechungen für verschiedene Verfahren zur Desintegration vor. Die Autoren ermittelten dabei die folgenden spezifischen Kosten pro m^3 Durchflussmenge der Kläranlage: Ultraschall 0,017 \$/m^3, chemische Vorbehandlung 0,022 \$/m^3, Erhitzung 0,012 \$/m^3 und Mikrowellen 0,012 \$/m^3.

11.5 Exkurs: Neue Verfahren zur Nutzung von Synthesegas

Hoogendoorn und van Kasteren [2011] berichten über neue Ansätze zur Erzeugung von Bioethanol, Biodiesel und Biomethan. Bezüglich der Erzeugung von Biomethan verweisen die Autoren auf Mikroorganismen, die in der Lage sind aus Synthesegas (H_2, H_2O, CO, CO_2), wie es bei der Vergasung von Biomasse (z. B. Holz) entsteht, Biogas zu erzeugen:

- So kann der anaerobe Bakterienstamm *Peptostreptococcus Productus* sowohl aus Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasser (H_2O) als auch aus Wasserstoff (H_2) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) Essigsäure erzeugen, aus der wiederum methanproduzierende Anaerobbakterien in einem Methanreaktor Biogas erzeugen können.
- Der Bakterienstamm *Methanobacterium Formicicium* ist in der Lage, aus Formiaten (z. B. Ameisensäure) Methan zu erzeugen.
- Andere Bakterienstämme (z. B. *Rhodopseudomonas Gelatinosa*) sind mit einer Wasser-Gas-Konvertierung in der Lage, Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasser (H_2O) in Wasserstoff (H_2) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) umzuwandeln.

Hoogendoorn und van Kasteren [2011] sehen in der biologischen Umwandlung von Synthesegas gegenüber den chemischen Umwandlungsverfahren die folgenden Vorteile:

- Niedrigere Investitionskosten, selbst wenn die Anlagen deutlich kleiner sind.
- Keine Kosten für teure Katalysatoren und Filtereinrichtungen
- Höhere Energieeffizienz
- Geringerer Aufwand für die Reinigung von Synthesegas vor der Weiterbehandlung
- Keine Rückerwärmung des Synthesegases erforderlich, da die biologischen Prozesse im für Anaerobprozesse üblichen niedrigen Temperaturbereich stattfinden.
- Die verschiedensten Eingangsstoffe können verwendet werden.
- Keine ungewollten katalytischen Reaktionen (z. B. Formaldehyd).

Demgegenüber werden die Nachteile im Wesentlichen in der geringeren Reaktionsgeschwindigkeit sowie der Notwendigkeit steriler Zustände gesehen. Schließlich stellen *Hoogendoorn und van Kasteren [2011]* auch verschiedene mehrstufige Verfahrensprinzipien und Prozessfließbilder für derartige Bioraffinerien dar: Aus den diversen Abbildungen wird deutlich, dass auch bei diesen Verfahren umfangreiche Mess- und Automationstechnik zum Einsatz kommen wird. Des Weiteren wird deutlich, dass hier klassische Aufgabenstellungen aus der anaeroben Behandlung von Abwasser und organischen Stoffen auf typische Konzepte aus der chemischen Verfahrenstechnik treffen. Die Erkenntnisse von *Hoogendoorn und van Kasteren* können den Gedanken einer integrierten Bioraffinerie weiter vorantreiben und dem Biogasprozess als wesentlichen Verfahrensbestandteil weiteren Auftrieb geben, da die Verwendung von Synthesegas als Eingangsstoff zur Biogaserzeugung das bisherige Anwendungsspektrum der Anaerobtechnik erweitert.

11.6 Exkurs: Wasserstoffproduktion aus Biogasanlagen

Viele Energie- und Klimaforscher verbinden mit dem flächendeckenden Einsatz von Wasserstoff („Wasserstoffwirtschaft“) als Kraftstoff und Brennstoff große Hoffnungen *(z. B. Tetzlaff [2010])*: Seit einigen Jahren wird daher intensiv daran geforscht, die Anaerobprozessführung derart anzupassen, dass die Wasserstoffproduktion in den Vordergrund tritt, jedoch

beschränken sich die Versuche noch auf labor- und halbtechnische Versuche, die zudem teilweise sehr unterschiedliche Ansätze verfolgen (Auswahl):

Montes-Moncivais et al. [2007] untersuchten den Einfluss verschiedener Impfschlämmen (Belebtschlamm, Granularschlamm, Kompost und Rindergülle), pH-Werte und Temperaturen auf die fermentative Wasserstoffproduktion. Bei einer Kombination von Granularschlamm als Inoculum, eine pH-Wert von 6,5 sowie einer Temperatur von 26 °C wurde die höchste Wasserstoffproduktion beobachtet, ebenso wie die höchste Produktion organischer Säuren.

Lin und Guiot [2007] untersuchten die fermentative Wasserstoffproduktion aus Glucose und beobachten die besten Ergebnisse bei pH-Wert 4 und einer Temperatur von 35 °C.

Liu et al. [2007] berichten über Laborversuche mit thermophilen Mikroorganismen im hohen Temperaturbereichen (70 °C), wobei als Substrat Küchenabfälle zum Einsatz kamen.

Schnitzhofer et al. [2007] berichten über ein europäisches Forschungsprojekt (HYVOLUTION) zur Erzeugung von Wasserstoff mit Hilfe von thermophilen und phototrophischen Bakterien. Einsatzmöglichkeiten werden zum Beispiel in der Kartoffelverarbeitenden Industrie gesehen. Die Autoren beziffern die derzeitigen Produktionskosten auf 4 €/kg H_2, was noch ein Mehrfaches über den Herstellungskosten konventioneller Verfahren liegt. Die Autoren gehen jedoch davon aus, dass sich die Produktionskosten innerhalb weniger Jahre auf ein Drittel reduzieren lassen.

Munoz-Paez et al. [2008] geben einen Überblick über den Stand der Forschung bezüglich einer biologischen Wasserstoffproduktion.

Tetzlaff [2010] schlägt vor, die frisch geernteten Silagen zunächst mit Hilfe von Schneckenpressen kalt zu pressen und den Presssaft einer Biogasanlage zuzuführen. Der Presskuchen soll hingegen einer thermischen Vergasung zugeführt werden. Im Biogas soll das CO_2 zunächst abgetrennt werden, sodass dann das Methan anschließend mit Dampfreformierung in Wasserstoff umgewandelt werden kann.

11.7 Exkurs: Algenproduktion

Kruse [2009] sieht in dem Einsatz von Mikroalgen ein interessantes Substrat für zukünftige Bioraffineriekonzepte, da Algen für die Gewinnung von Biowasserstoff, Biogas und Biodiesel eingesetzt werden könnten. Die Vorteile der Mikroalgen gegenüber anderen Substraten sieht der Autor in den hohen spezifischen Erträgen, der Nutzung der in Abwasser enthaltenen Nährstoffe für das Algenwachstum, dem geringen Wasserverbrauch, der Möglichkeit der CO_2-Abtrennung/-Nutzung von Biogas. *Putz [2009]* betrachtet die Nutzung von Algen als Energieträger und zur biotechnologischen Nutzung und verweist auf die sehr hohen spezifischen Erträge die je nach Algenzuchtverfahren zwischen 60 und 310 t/(ha·a) liegen können und damit weit über den Erträgen anderer Energiepflanzen. Ähnlich sieht es mit der Ölausbeute aus, die mit 35.000 l/(ha·a) ebenfalls deutlich über anderen Pflanzen (Rapsöl: 1.600 l/(ha·a), Palmöl: 6.000 l/(ha·a)) liegen. Die übrigen Vorteile sieht *Putz [2009]* in den folgenden Punkten:

- Hochwertige Inhaltsstoffe (variieren von Algenspezies zu Algenspezies)
  - Proteine (10 – 58 %)
  - Kohlenhydrate (12 – 32 %)
  - Fette und Fettsäuren (14 – 62 %)
  - Mineralstoffe, Pigmente, Vitamine

- Potenziell umfangreiches Anwendungsspektrum
  - Nahrungsergänzungsmittel
  - Futterzusätze
  - Grundstoffe für die chemische und pharmazeutische sowie kosmetische Industrie
  - Zusatzstoffe für Landwirtschaft und Aquakulturen (z. B. Biostimulatoren)
  - Abwasserreinigung
  - CO_2-Recycling
  - Biosorption von Schwermetallen
  - Ölgewinnung und Biokraftstoffe
- Keine Beanspruch landwirtschaftlicher Nutzflächen bei industrieller Algenzucht
- Weiterverarbeitbarkeit von Reststoffen aus der hochwertigen Verarbeitung von Algen (z. B. Pressreststoffe aus der Ölgewinnung)
  - Biogas
  - Synthesegas
  - Biowasserstoff
  - Mineralstoffe, Pigmente, Vitamine
- Hohe Effizienz und Flächenerträge, da saisonal unabhängiges Wachstum

Die Algenzucht stellt daher nicht nur für die Bioraffinerie-Konzepte, sondern auch für Biogasanlagen eine sinnvolle Kombination dar (*Gäth [2011]*):

- Nutzung der BHKW-Abwärme für optimale Temperaturen für das Algenwachstum
- Nutzung der Abwärme der Blockheizkraftwerke zur Trocknung der Algen
- Nutzung des CO_2 aus dem Biogas oder dem Abgas der Blockheizkraftwerke

Auf einem Areal im Landkreis Hersfeld-Rotenburg wurde nach diesem Ansatz eine landwirtschaftliche Biogasanlage mit 250 kW_{el}, eine Algenzuchtanlage mit vier Algenbecken (Mikroalgen), die mit Gewächshäusern überdacht sind, und eine Technikhalle zur Separation und Trocknung der Algen errichtet (*Gäth [2011]*).

Horn [2009] berichtet über den Einsatz von Makroalgen (Braunalgen) für die Produktion von Biogas und Bioethanol.

Craggs et al. [2011] schlagen vor, Mikroalgen für Zwecke der Abwasserreinigung einzusetzen und gehen davon aus, dass in Umlaufgräben ein Flächenertrag von bis zu 60 t/(ha·a) erzielt werden könnten. Durch die Kombination von Abwasserreinigung und Algenzucht könnte die Züchtung von Mikroalgen als Grundlage für Biokraftstoffe etc. wirtschaftlich werden. *Park und Craggs [2011]* untersuchten in diesem Zusammenhang auch den Einfluss einer CO_2-Zugabe in einen Algenteich auf die Stickstoffeliminationsleistung: Dabei kamen sie zu der Erkenntnis, dass durch eine CO_2-Zugabe die Leistungssteigerung verbessert werden kann und bei einer hydraulischen Verweilzeit von 8 Tagen etwa 60 % der Stickstoffracht im Abwasser abgebaut werden können. Diese beiden Beispiele aus der Abwasserreinigung verdeutlichen, dass die Kombination einer Biogasanlage (Nutzung der Abwärme und des CO_2 vom BHKW) mit einer Mikroalgenzucht auch eine interessante Kombination für die Abwasserreinigung sein kann. *Rusten und Sahu [2011]* untersuchten die Möglichkeit einer Algenproduktion aus Licht, dem CO_2 aus Klärgas und dem Zentratwasser aus der Schlammbehandlung, um sowohl die interne Rückbelastung der Kläranlage zu reduzieren als auch neue Substrate für den Klärgas-/ Biogasprozess zu produzieren.

11.8 Exkurs: SBR-Kläranlagen

Wie im Kapitel 1 ausgeführt und anhand von Beispielen in Kapitel 5 erläutert, werden SBR-Anlagen bzw. daraus abgeleitete Verfahrensvarianten zum Teil auch zur anaeroben Behandlung von gewerblich-industriellen Abwässern (z. B. *Alvarez et al. [2007]*) eingesetzt. In der Literatur finden sich Beispiele die belegen, dass das SBR-Verfahren auch eine geeignete Verfahrenstechnik darstellt, um die Abwässer aus Bioraffinerien oder Biogasanlagen zu behandeln: *Cassidy et al. [2008]* berichten über die Vergärung von Reststoffen aus der Bioethanolproduktion in einer anaeroben SBR-Laboranlage (2 l Volumen). Die Vergärung erfolgte bei 35 °C und mit folgender Zyklussteuerung: 15 min Füllen, 22,5 h Vergärung, 1 h Sedimentation und 15 min Klarwasserabzug. Dabei wurden verschiedene Schlammalter (8 bis 40 Tage) und Raumbelastungen (1,5 bis 22,2 kg CSB/(m^3·d)) getestet, wobei die CSB-Abbauleistung zwischen 62 bis 96 % lag; der größte Teil davon wurde in Methan umgesetzt. *Lindenblatt et al. [2008]* setzten einen halbtechnischen SB-Reaktor (100 l) mit nachgeschaltetem Sandfilter (2 x 0,825 m^2) ein, um stark stickstoffhaltiges Abwasser (bis 1.260 mg N_{ges}/l) aus einer Biogasanlage zu reinigen. Diese Testanlage erreicht sehr gute Reinigungsleistungen: CSB 82 %, NH_4-N 98 % und N_{ges} 90 %.

Schließlich werden in der Forschung auch SBR-Anlagen getestet, um fermentativ Biopolymere bzw. Biokunststoffe zu erzeugen, wie zum Beispiel Polyhydroxyalkanoates (PHA): *Majone et al. [2008]* untersuchten die Anreicherung von PHA im Belebtschlamm einer SBR-Laboranlage, die mit 85 % Essigsäure und 15 % Propionsäure beschickt wurde. Die Autoren variierten unter anderem den pH-Wert und konnten eine PHA-Anreicherung bis zu 389 mg PHA (als mg CSB pro g nicht-polymerer CSB) beobachten. *Mato et al. [2008]* verfolgten einen anderen Ansatz: Sie testeten ein zweistufiges Verfahrenskonzept im Labor zur Produktion von PHA aus Brauereiabwässern. In der ersten Stufe erfolgte eine Versäuerung der Abwässer in einem volldurchmischten Hydrolyse-/Essigsäurereaktor, die PHA-Produktion erfolgte dann in der zweiten Stufe in einem aeroben SBR. *Bengtsson et al. [2008A]* verfolgten einen ähnlichen Ansatz wie *Mato et al. [2008]*, benutzten aber das Abwasser einer Papierfabrik, wobei die Versuche im Labormaßstab durchgeführt wurden. Die Autoren konnten im Überschussschlamm der Anlage eine PHA-Produktion beobachten, die 0,1 kg PHA pro kg CSB im Zulauf entsprach. *Bengtsson et al. [2008B]* führten zudem ähnliche Versuche mit Zuckerrohrmelasse als Ausgangssubstrat durch. *Pozo et al. [2011]* berichten über Versuche zur Herstellung von PHA aus den Abwässern einer Zellstofffabrik und erreichten mit aeroben Batchversuchen Erträge bis zu 0,14 kg PHA pro kg CSB. *Ben et al. [2011]* führten Versuche mit einem Versäuerungsreaktor und zwei nachgeschalteten aeroben Labor-SBR-Reaktoren durch, um PHA herzustellen: Die Autoren untersuchten dabei die Nutzung von Abwässern aus einem spanischen Spanplattenwerk, wobei die Reaktoren mit einem Inoculum von Schlämmen einer Brauereikläranlage eingefahren wurden.

11.9 Exkurs: Nährstoffrückgewinnung

In den letzten Jahren wurden nachgeschaltete Systeme zur Gärrestaufbereitung entwickelt: Nach *Döhler [2007]* verfolgen diese Anlagen nicht nur das Ziel Nährstoffe (Stickstoff, Kalium, Phosphat und organische Verbindungen) aus dem Gärrest abzuscheiden und einer nutzbringenden Verwertung zuzuführen, sondern auch mögliche Umweltbeeinträchtigungen durch die Gärrestausbringung zu reduzieren. Anhand eines Modellbetriebs (500 kW_{el} Biogasanlage)

bewertet *Döhler* zudem eine Basisvariante und drei verschiedene Verfahren zur Gärrestaufbereitung:

- Gärrestausbringung ohne Vorbehandlung (IST-Situation)
- Separierung mit einem Pressschneckenseparator (fest-flüssig Trennung)
- Membrantechnik mit vorgeschalteter Separierung durch einen Dekanter
- Eindampftechnik

Für die Verfahren ermittelte *Döhler* spezifische Kosten zwischen 2,64 €/m^3 (Separation) und 8,94 €/m^3 (Membrantechnik), sodass die verschiedenen Gärrestaufbereitungsverfahren für die Beispielanlage weder arbeitstechnische noch betriebswirtschaftliche Vorteile bringen. Dies schließt jedoch nicht aus, dass derartige Behandlungsverfahren sowohl bei größeren Biogasanlagen und/oder im Rahmen eines Bioraffineriekonzeptes sinnvoll sein können. *Brüß [2009]* behandelt ebenfalls die Thematik „Gärrestaufbereitung“ und ermittelt für eine größere Biogasanlage mit 50.000 t Gärrest pro Jahr Kosten von 6,84 €/m^3 (Fest-flüssig Separation, Ultrafiltration und Umkehrosmose); für Regionen mit einer hohen Viehbestandsdichte ist die Gärrestaufbereitung nach *Brüß* eine Alternative zur herkömmlichen Gärrestausbringung.

Herbes [2009] gibt einen Erfahrungsbericht über den Betrieb einer Biogasanlage im industriellen Maßstab (20 MW_{el}) auf Basis nachwachsender Rohstoffe, aber ohne Gülle. Neben den Vorteilen, die der Autor unter anderem in den Skaleneffekten und dem professionellen Betriebspersonal sieht, gilt es jedoch auch Nachteile zu kompensieren, wie die erheblichen Logistik bezüglich Substratbeschaffung-/anlieferung und der Gärrestentsorgung. Letztere ist in diesem Fall sehr komplex: Nach einer fest-flüssig-Trennung mit Hilfe eines Schneckenpressenseparators wird der feste Rückstand (25 %TS) mit einen Bandtrockner getrocknet (85 %TS) und anschließend zu Pellets verarbeitet. Die Flüssigfraktion (4 %TS) wird in einem Vakuumeindampfer behandelt, sodass ein Konzentrat mit 12 % TS entsteht; das Kondensat wird mit einer Umkehrosmose behandelt. *Herbes [2009]* betont in diesem Zusammenhang auch die Notwendigkeit einer adäquaten Bewertung des Energiegehaltes bei der Beschaffung der Eingangssubstrate sowie eines generellen Qualitätsmanagements bei der Substratbeschaffung. Weiterhin verweist der Autor auf eine umfangreiche Prozesskontrolle mit Hilfe des eigenen Labors, die notwendig ist, um den Prozess – auch ohne Gülle – auf einem möglichst hohen, aber dennoch immer noch stabilen Niveau zu halten. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass industrielle Biogasanlagen sowohl bezüglich der Verfahrenstechnik als auch der Betriebskonzepte sehr komplex sind.

Aber auch in der Abwasserreinigung verfolgt man ähnliche Ansätze: *Abou Merhi [2011]* berichten über den Einsatz einer Ammoniak-Strippung auf der schweizerischen Kläranlage Kloten (90.000 EW): Der im Abwasser vorhandene Stickstoff wird als Ammoniak ausgeblasen und durch Schwefelsäure gebunden, sodass 290 t Düngerlösung pro Jahr entstehen. Details des Prozesses werden nicht genannt, jedoch wird erwähnt, dass alleine für die Messtechnik 150.000 Schweizer Franken ausgegeben wurden. *Berg et al. [2005]* untersuchen die Methoden zum Phosphorrecycling aus Abwasser: Die Autoren untersuchen verschiedene Verfahren zur Kristallisation von Calciumphosphat mit Hilfe verschiedener Verfahren (z. B. Batchverfahren). Die Kostenschätzung beläuft sich dabei je nach Verfahren auf 2,14 bis 2,90 €/(EW·a), was aber noch über den bisherigen Verfahren (1,90 €/(EW·a)) liegt. *Petzet und Cornel [2011]* zeigen, dass es technisch möglich ist, den gesamten im Abwasser vorhandenen Phosphor zurückzugewinnen, sodass selbst die Möglichkeit besteht, Phosphor aus der Asche von verbrannten Klärschlamm zurückzugewinnen.

11.10 Exkurs: Papierverarbeitende Industrie

Ein Blick über den Tellerrand verdeutlicht, dass auch andere Industrien vor ähnlichen Herausforderungen stehen wie der Biogassektor: Ein gutes Beispiel ist die papierverarbeitende Industrie. Nach *Ritala [2008]* können die Herausforderungen (Auswahl) im Hinblick auf die Papierindustrie im Jahr 2030 wie folgt beschrieben werden:

- Höhere Produktion mit weniger Rohstoffen, d. h. effizientere(r) Rohstoffeinsatz/-nutzung
- Nachhaltige Rohstoffversorgung
  - Nachhaltige Forstwirtschaft
  - effizientes Papierrecycling
  - Rohstoffe, Chemikalien und Energie aus Bioraffinierien
- Effizientere Energienutzung
  - Reduzierung des Energieverbrauchs
  - Erhöhung der Energieproduktion aus Reststoffen
- Optimierung des Lieferkettenmanagements (inkl. Logistik) von der Rohstoffversorgung über die Produktauslieferung bis hin zum Sammeln/Verwerten von Recyclingpapier

Um diese Herausforderungen zu erreichen, sieht *Ritala [2008]* die Notwendigkeit für den umfangreichen Einsatz von verschiedensten Simulationsmodellen. Ein Vergleich dieser Herausforderungen mit denen bei der Weiterentwicklung von Bioraffinierien und Biogasanlagen zeigt große Übereinstimmungen, wenn es auch im Detail Unterschiede gibt. Darüber hinaus gibt es noch weitere Schnittstellen mit der Biogas- und Abwassertechnik, denn zum Beispiel werden auch in der Papierindustrie anaerobe Reaktoren (z. B. zur Vergärung von Papierschlämmen) oder SBR-Anlagen zur Behandlung von Papierabwässern verwendet. Auch in anderen Bereichen kommen zum Teil ähnliche Verfahrenstechnik (z. B. Plug-flow Reaktoren) oder Mess- und Regelungsaufgaben (z. B. pH-Wert-Regelung) zum Einsatz. Daher lohnt auch ein Blick auf die Entwicklungen von Mess- und Automationstechnik in der Papierindustrie:

Ropponen et al. [2008] beschreiben einen nicht-linearen Ansatz zur dynamischen Validierung von chemischen Prozessmodellen, die parallel zum eigentlichen Produktionsprozess laufen sollen. Das Prozessmodell soll dabei zum einen in der Optimierung der Echtzeitautomation des Produktionsprozesses Anwendung finden als auch als Grundlage eines Entscheidungsunterstützenden System (Decision Support System) dienen.

Gren et al. [2008] betonen, dass für den effektiven Betrieb einer Papierfabrik sowohl Laboranalysen als auch eine Vielzahl von Echtzeitmessungen erforderlich sind. Die Laboranalysen dienen dabei zum einen der Qualitätssicherung der Eingangsstoffe und der Produkte, zum anderen der Überwachung der Echtzeitmessungen. Da Laboranalysen auch immer mit einem erheblichen personellen und damit finanziellen Aufwand verbunden sind, entwickelten *Gren et al.* einen mathematischen Ansatz zur Optimierung der erforderlichen Laboranalysen: Sie konnten mit ihrem Modell nachweisen, dass sich der Aufwand für Laboranalysen deutlich reduzieren lässt, da bisher deutlich zu viele Messungen durchgeführt werden.

Taylor et al. [2008] sehen die Notwendigkeit einer Prozessüberwachung, um Schwankungen in der Papierqualität, Maschinenbruch/-ausfälle durch frühzeitige Erkennung von Störungen etc. und Arbeitsunfälle zu vermeiden. *Taylor et al.* entwickelten daher ein Prozessmodell auf

Basis der Daten einer großtechnischen Papierfabrik: Kernstück des Modells ist ein künstliches Neuronales Netz zur Zeitreihenanalyse.

Turkama et al. [2008] sehen in der Papierindustrie eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten (Auswahl) für Softsensoren, die aus Messwerten anderer, abhängiger Betriebs- und Prozesswerte errechnet werden und testeten diese an Beispielen:

- Zusammenführung von Messwerten unterschiedlichster Messgeräte
- Erstellung von Massen-, Energie- und Stoffstrombilanzen
- Verbrauchsberichte
- Herausfiltern des Rauschens von Messwerten
- Modellierung (lineare und nicht-lineare Regression, verschiedenste Modellansätze)
- Datenabgleich

Dahlquist [2008] verweist auf die hohe Komplexität der Papierproduktion, sodass er daran zweifelt, dass einzelne Modellansätze alleine zielführend sein können, die optimale Entscheidung zu treffen. Er schlägt daher eine Kombination von statistischen und physikalischen Modellen vor. Im Bereich der Entscheidungsunterstützung schlägt er vor, ein physikalisches Modell mit einem Bayesschen Netz zu verknüpfen.

Diese Beispiele verdeutlichen, dass es auch bezüglich der Automatisierungstechnik in der Papierproduktion interessante Ansätze gibt, die in Einzelfällen auch für die Bioenergiebranche sinnvoll sein könnten. Schließlich gibt es auch schon Arbeiten zur Planung und Implementierung von biobasierten Produktionsprozessen in der Papierindustrie, die im Hinblick auf die Planung von Bioenergie-/Bioraffinerieprojekten interessant sind:

Janssen et al. [2010] berichten über die Entwicklung eines Systems zur multi-kriteriellen Entscheidungsunterstützung am Beispiel einer zur Modernisierung anstehenden kanadischen Papierfabrik. Die Autoren beziehen in die Entscheidungsfindung nicht nur ökonomische Faktoren ein, sondern auch Aspekte des Umweltschutzes und der Nachhaltigkeit, sodass unter anderem auch eine Optimierung der Logistik sowie die Implementierung von Ansatzpunkten für eine forstbasierte Bioraffinerie Berücksichtigung finden.

Chambost und Stewart [2010] widmen sich der Fragestellung, wie fortwirtschaftlich basierte Bioraffinerieprodukte entwickelt und deren Markttauglichkeit bewertet werden können, um diese zur Ergänzung der Wertschöpfung in eine bestehende Papierfabrik zu integrieren.

11.11 Exkurs: Planung und Simulation

Erste Autoren beginnen mit der Modellierung von Teilaspekten, deren Fragestellung im Kontext der biobasierten Stoff- und Energieproduktion für mehrere Bereiche relevant sind:

Sin et al. [2010] berichten über ein Modell zur Beschreibung der Hydrolyse von cellulosehaltigen Material, welches als Grundlage für die Dimensionierung von Anlagen zur Erzeugung von Biokraftstoffen dienen soll. Die Autoren sehen in diesem Bereich jedoch noch erheblichen Weiterentwicklungsbedarf.

Ausgehend von dem Gedanken, dass die Fermentation nicht nur in der Abwasserreinigung, sondern auch in anderen Bereichen (z. B. Bioethanolherstellung, Pharmazeutische Industrie, Lebensmittelherstellung) eine große Rolle spielt, entwickeln *Riegel und Luyben [2010]* einen Ansatz zur Planung und Regelung eines Fermenters mit einer Gasstrippung des Produktes,

der in verschiedenen Betriebszuständen arbeiten kann (Anaerobic Batch, Anaerobic Fed-Batch, Aerobic Fed-Batch).

Li et al. [2010] widmeten sich in ihrer Arbeit der Bewertung der Nachhaltigkeit für eine Region, in der eine Biobutanolproduktion aus Reisstroh angesiedelt werden könnte. Dabei werden neben ökonomischen und ökologischen Faktoren auch soziale Aspekte berücksichtigt. Diese Sichtweise wird bis heute kaum in Planungsprozessen berücksichtigt. Insbesondere für Staaten wie Deutschland, in denen es ländliche Gebiete gibt, die aufgrund der demografischen Entwicklung allmählich aussterben, kann eine biobasierte Energie- und Produkterzeugung eine langfristige Perspektive für den ländlichen Raum darstellen, da hierdurch eine neue Wertschöpfung (z. B. Biomasseanbau mit kurzen Transportwegen, Arbeitsplätze in der Produktion) entstehen kann.

Andere Autoren definieren bereits Anforderungsprofile an das zukünftige Design von Bioenergie- und Bioraffineriekonzepte:

Goettemoeller und Goettemoeller [2007] berichten über Ideen für „Regional Biomass Processing Center“, die die Aufgabe dezentraler Sammelpunkte und Vorbehandlungszentren für verschiedene Biomassen wahrnehmen sollen und auf Basis lokaler Eigentümer und Landwirte die regionale Wertschöpfung erhöhen könnten. Von diesen dezentralen Biomassezentren aus könnte dann eine Verteilung an große, überregionale Bioraffinerien erfolgen, wobei als Alternative zum LKW-Transport auch die Möglichkeit eines effizienten Biomassetransports über Pipelines (z. B. Maissilage, Holzchips) angesprochen wird.

Kokossis und Yang [2010] formulieren ausgehend von der Erkenntnis, dass zukünftige Bioraffineriekonzepte aufgrund einer Vielzahl möglicher Eingangsstoffe und zahlreicher biobasierten Produkten sowie der zahlreichen möglichen stofflichen und energetischen Produktionsmethoden äußerst komplex sind, die Herausforderungen an die Entwicklung zukünftiger Bioenergie- und Bioraffineriekonzepte; dabei wird auch die effiziente Planung der Versorgungs- und Logistikkette berücksichtigt.

Zamboni et al. [2010] konzentrieren sich in ihrer Arbeit auf Planungshilfen und die Optimierung der Versorgungs- und Logistikketten am Beispiel einer Bioethanolproduktionsanlage in Norditalien. Dabei werden sämtliche Schritte von dem Anbau der Feldfrüchte, über den Transport zur Bioraffinerie, die Bioethanolherstellung bis hin zum Transport des Bioethanols zu den Tankstellen beleuchtet. Einige der in dieser Arbeit gewählten Methoden und Ansätze lassen sich auch auf Großbiogasanlagen sowie zukünftige Bioraffineriekonzepte übertragen.

Ng et al. [2010] sehen aufgrund der Komplexität einer biobasierten Energie- und Produktherstellung die Notwendigkeit für einen hierarchischen Ansatz zur Analyse und Planung von integrierten Bioraffineriekonzepten.

Liu und Pistikopoulos [2010] verfolgen in ihrer Arbeit den Ansatz eines „Polygeneration Energy Systems“, d. h. einer Anlage zur Energieerzeugung und zur Erzeugung von mindestens einer Form von synthetischem Kraftstoff.

Schließlich finden sich auch Autoren, die sich Gedanken machen, wie „Abfallstoffe“ aus einer Bioraffinerieanlage als Wert- und Ausgangsstoffe für andere Produktionsprozesse genutzt werden können, was für die konsequente Umsetzung des Gedankens integrierter, biobasierter Verbundstandorte ebenfalls wichtig ist:

Jernigan et al. [2010] untersuchen die Frage, wie Rohglycerin aus der Biodieselproduktion sinnvoll weiterverwendet werden kann, um sowohl die Energie- und Umweltbilanz als auch die

Wirtschaftlichkeit der Biodieselherstellung zu verbessern. Die Autoren verweisen unter anderem darauf, dass Rohglycerin Ausgangstoff für die Herstellung einer Vielzahl chemischer Produkte ist: Acrylsäure, Acrolein, 1,2-Propandiol, 1,3-Propandiol, Propanol und viele weitere Stoffe. Die Autoren führen aber auch aus, dass die Wirtschaftlichkeit der Herstellung jedoch stark vom Rohölpreis abhängig ist. Das Beispiel von *Jernigan et al. [2010]* verdeutlicht somit, dass ein Verbundstandort auch aus einem anderen Grund Sinn macht: Je nach der Marktlage für Rohstoffe und Endprodukte können Stoffe bei einer biobasierten Verbundanlage auch zielgerichtet umgeleitet werden, um den maximalen Nutzen zu erzielen: So kann Glycerin auch sehr gut zur Erzeugung von Biogas bzw. Biomethan eingesetzt werden.

11.12 Zwischenfazit

Die Ausführungen in diesem Kapitel zu Bioraffinerien und anderen artverwandten Industrien (z. B. Papierindustrie, Zuckerindustrie) können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Verknappung vieler Ressourcen und der damit verbundene Preisanstieg für Energie und Rohstoffe führen dazu, dass sich in den betrachteten Branchen ähnliche Fragestellungen rund um einen effizienten Rohstoff- und Energieeinsatz sowie eine effiziente Logistik ergeben. Dies wird noch dadurch begünstigt, dass auch der Endkunde zunehmend nicht nur auf den ökologischen Charakter (Umweltverträglichkeit, biologische Abbaubarkeit) von Produkten, sondern auch deren ökologische Herstellung (CO_2-Fingerabdruck, Virtuelles Wasser, Einsatz Erneuerbarer Energien, regionale Herkunft) Wert legt.
- Die Anaerobtechnik zur effizienten Energieumwandlung von organischen Reststoffen und Nachwachsenden Rohstoffen kann daher eine Schlüsselkomponente in zukünftigen Bioraffineriekonzepten darstellen. Die SBR-Technik als flexibles Abwasserreinigungsverfahren im anaeroben, anoxischen und aeroben Bereich ist ebenfalls gut geeignet, um Abwässer aus Bioraffinerien und Biogasanlagen zu behandeln und dabei im Einzelfall auch noch Energie zu erzeugen und/oder Biopolymere zu erzeugen, die wiederum die Grundlage für andere biobasierte Produkte sein können.
- Die Forschungsergebnisse aus den Bereichen „Synthesegasproduktion“ und „Algenzucht“ zeigen, dass es vielversprechende Ansätze gibt, um die Wirtschaftlichkeit und Ökoeffizienz von Biogasanlagen weiter zu erhöhen sowie gleichzeitig auch das Anwendungsspektrum auszudehnen. Darüber hinaus zeigen die Literaturquellen, dass es zwischen den einzelnen Disziplinen interessante Schnittstellen gibt (z. B. eine Kombination aus Biogas-, Algenzucht- und Kläranlage).
- Die Komplexität der Wirkzusammenhänge verdeutlicht, dass – ähnlich wie im Bereich der klassischen Großchemie – zukünftig Verbundstandorte für Bioraffinerien entstehen könnten, die eine Ansammlung von Vorbehandlungsanlagen, Biogasanlagen, Biokraftstoffproduktionsanlagen und Produktionsbetrieben für biobasierte Produkte sowie geeigneten Abwasserbehandlungsanlagen und Nährstoffrecyclinganlagen sein werden, die Rohstoffe, Energie und Reststoffe effizient nutzen, um flexibel und marktgerecht Bioenergie, Biokraftstoffe und biobasierte Stoffe zu erzeugen. Wie SBR- und Biogasanlagen und deren Reststoffentsorgung in ein zukünftiges Bioraffineriekonzept integriert werden könnten, verdeutlicht exemplarisch Abbildung 11.3.

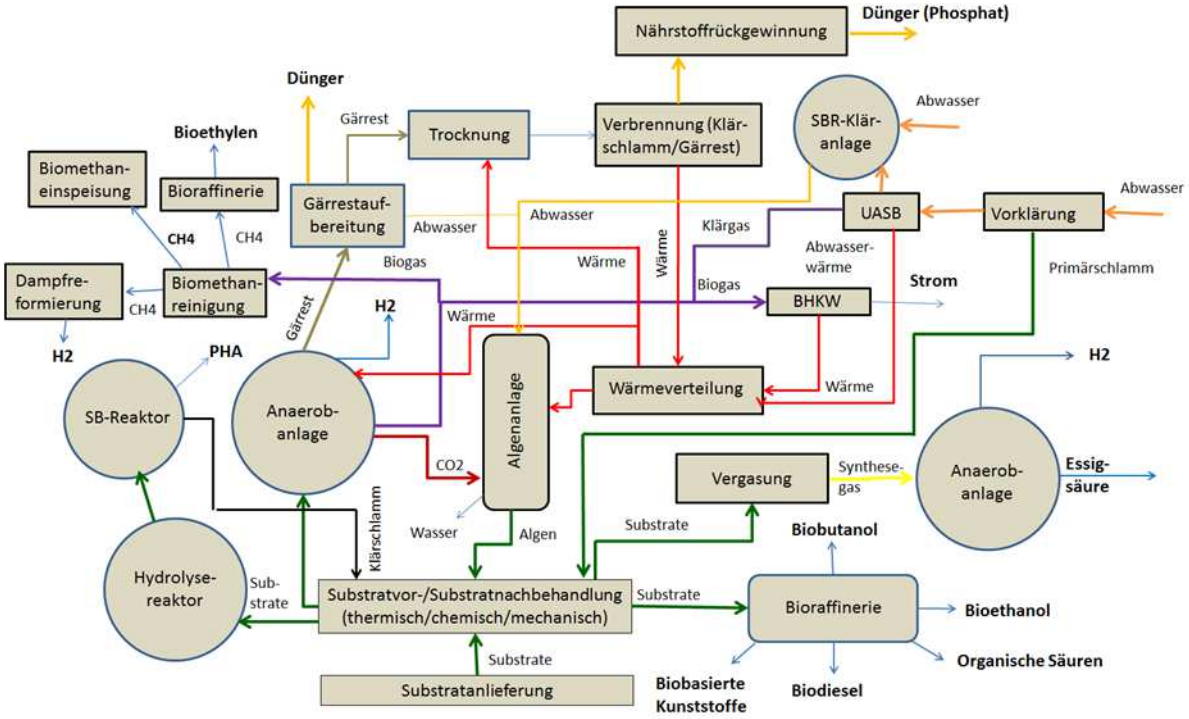


Abb. 11.3: Schematische Übersicht über die Möglichkeiten einer Integration von SBR- und Biogasanlagen in zukünftige Bioraffineriekonzepte (Bildquelle: Autor)

Aber auch im Hinblick auf die Mess- und Automationstechnik ergeben sich aus diesen Entwicklungen interessante Perspektiven für Biogas- und SBR-Anlagen:

- Papier- und Zuckerfabriken sowie Bioraffinerien erfordern – auch im Vergleich zu großen Biogasanlagen – gewaltige Investitionen. Damit relativieren sich auch die Investitionskosten für Mess- und Automationstechnik sowie die Entwicklung komplexer Steuerungs- und Regelungskonzepte. Dies gilt besonders, wenn dadurch signifikante Produktivitätsfortschritte erreicht werden können. Die Geschichte der Technikentwicklung hat gezeigt, dass technische – zunächst teure und aufwändige – Innovationen für Spezialanwendungen (oder im Luxussegment) wegen Skalen- und Synergieeffekten allmählich auch für andere Bereiche der Wirtschaft und des täglichen Lebens interessant wurden. In diesem Sinne bleibt zu hoffen, dass bei der Entwicklung derartige Ansätze für die Papierindustrie oder andere Bereiche „Abfallprodukte im Bereich der Mess- und Automationstechnik“ anfallen, die mit überschaubaren Aufwand auch der Biogas- und Abwasserbranche zugänglich gemacht werden; ein Schlüssel hierfür dürften die Hersteller von Automationskomponenten und Leitsystemen sein, wie zum Beispiel durch die Bereitstellung derartiger Applikationen in Standardbibliotheken.
- Neue Messverfahren und Auswertemethoden sollten von Anfang an so konzipiert werden, dass sie (zumindest in Teilen) auch in anderen Bereichen (z. B. Abwasserreinigung, Biogas-/Bioraffinierien) eingesetzt werden können, sodass sich hier Synergieeffekte sowohl bei der Entwicklung und Produktion als auch der Implementierung ergeben. Dies gilt nicht nur für die Messgeräte (z. B. NIRS wird bereits in der klassischen Petrochemie eingesetzt), sondern auch für die Automatisierungsgeräte. Diese Hypothese wird auch von ZVEI [2009A/B] gestützt: Die dort beschriebenen Zukunftsmärkte „Wasser/Abwasser“, „Biogas“ und „Bioraffinerien“ sowie die daraus abgeleiteten Anforderungsprofile an die Entwicklung

an die Mess- und Automationstechnik weisen deutlich erkennbare Überschneidungen auf (siehe Tabelle 11.1).

Tab. 11.1: Übersicht über Mess- und Automatisierungsbedarfe für Wasser, Abwasser, Bioraffinerien, Biogas und Biokraftstoffe nach *ZVEI [2009A]* und *ZVEI [2009B]*

	Wasser und Abwasser	**Bioraffinerie, Biogas und Biokraftstoffe**
Qualitätsanalyse	Messtechnik für Leitparameter, Spurenstoffe, Geruchsstoffe	Charakterisierung und Messung der Eingangsparameter
	Zustands- und Betriebserkennung von Wasser- und Abwassersystemen	Qualitätsanforderungen an Zwischen- und Endprodukte
Prozessoptimierung	Echtzeiterfassung der Ist-Werte	Echtzeiterfassung der Ist-Werte
	Intelligente Prozesssteuerung für Kanalnetze, Kläranlagen, Wasseraufbereitung etc.	Überwachung und Regelung anspruchsvoller bio- und thermo-chemischer Prozesse
Technologien	Messtechnik für Leitparameter	Optische, berührungsfreie Mess-verfahren
	Elektronische Nasen, Biosensoren o.ä.	Elektronische Nasen, elektronische Zungen
	Simulationsmodelle, Daten-management, Leitsysteme	Prozessmodelle und Parameter-bibliotheken für Leitssysteme
Allgemeine Bedarfe	Preiswerte, wartungsarme und zuverlässige Messtechnik	Messtechnik: kleiner, robuster, günstiger
	Integrale Systemlösungen	Integration bestehender Komponenten in Systemlösungen

12 Zusammenfassung und Ausblick

Umwelt- und Klimaschutz gewinnen weltweit immer mehr an Bedeutung, da man nicht nur in den Industrienationen, sondern auch in immer mehr Schwellen- und Entwicklungsländern erkennt, welche Folgekosten und gesundheitlichen Schäden ein dauerhafter Raubbau an der Natur mit sich bringen können. Innerhalb des direkten Umweltschutzes liegt einer der Schwerpunkte auf dem Aufbau einer zuverlässigen Abwasserreinigung, um nicht nur unsere Gewässer zu schützen, sondern auch unsere Trinkwasserversorgung langfristig zu sichern. Beim Klimaschutz liegt der Schwerpunkt neben einer Steigerung der Energieeffizienz vor allem auch im Einsatz Erneuerbarer Energien. Aus diesen beiden umfangreichen Themengebieten wurden in dieser Arbeit zwei Technologien genauer betrachtet:

- Das SBR-Verfahren als eine Technologie der Abwasserreinigung findet weltweit immer mehr Verbreitung, da es sehr flexibel und leistungsfähig ist. Aufgrund einer leichten Erweiterbarkeit ist dieses Verfahren auch prädestiniert für Gewerbe und Industrie sowie stark wachsende Schwellenländer.
- Die Biogastechnik hat in den letzten Jahren ebenfalls einen regelrechten Boom durchgemacht, da es eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Form Erneuerbarer Energie ist und weltweit noch ein gewaltiges ungenutztes Potenzial existiert. Insbesondere die Grundlastfähigkeit macht die Technik auch für Entwicklungs- und Schwellenländer interessant, da sie eine dezentrale, autarke Energieversorgung auch in ländlichen Gebieten ermöglicht und die landwirtschaftliche Wertschöpfung stärkt.

Bei beiden Technologien handelt es sich nicht um neue Erfindungen. Tatsächlich liegen die historischen Wurzeln dieser Verfahren mehr als 100 Jahre zurück. Einer der Gründe, warum sie sich in ihrerer jeweiligen Gattung zunächst nicht gegen andere Konzepte (z. B. Durchlaufkläranlagen, Kompostierung) durchsetzen konnten, lag auch daran, dass die Bau-, Maschinen- und Verfahrenstechnik noch nicht soweit war, dass diese Anlagen dauerhaft stabil funktionierten. Diese Probleme sind heute gelöst: Die Praxis der letzten Jahre zeigt, dass sowohl SBR-Kläranlagen als auch Biogasanlagen, sofern sie sachgerecht geplant, gebaut und betrieben werden, über viele Jahre zuverlässig arbeiten.

Gleichwohl zeigt die Praxis, dass es aufgrund der komplexen Randbedingungen und der teilweise sehr dynamischen Belastungsschwankungen immer wieder bei beiden Anlagentypen zu Betriebsproblemen kommen kann; dies kann sich zum Beispiel in einer ungenügenden Reinigungsleistung und/oder in einem instabilen oder ineffizienten Anlagenbetrieb manifestieren. In anderen Disziplinen, vor allem der Industrie, hat man sich bei ähnlich gelagerten Problemen schon früh der Mess- und Automationstechnik bedient, um den Anlagenbetrieb flexibel an die jeweiligen Randbedingugnen anzupassen. Vergleicht man den Stand der Mess- und Automationstechnik auf SBR-Kläranlagen und Biogasanlagen mit dem anderer Branchen, so muss man jedoch feststellen, dass hier noch erhebliche Defizite vorhanden sind. Neben einem spärlichen Einsatz von Messtechnik – vor allem bezüglich der Messung von Qualitätsparametern – beschränken sich die eingesetzten Steuerungs- und Regelungsstrategien in aller Regel auf einfache, lokale Konzepte. Aufgrund der wenigen Informationen aus dem Prozess kann man viele Biogas- und Kläranlagen bis heute daher als Black-Box-Systeme betrachten, die sich nur schwierig analysieren und optimieren lassen.

In den letzten Jahren gewinnt aber der Einsatz von Mess- und Automationstechnik auch auf Biogas- und SBR-Anlagen an Bedeutung, wobei dies im Wesentlichen auf die zunehmende Komplexität der Anlagenbetriebsführung zurückzuführen ist:

- In der Abwasserreinigung müssen immer strengere Überwachungswerte zuverlässig eingehalten werden. Gleichzeitig sind die Betriebskosten (z. B. Personal, Energie, Reststoffentsorgung) in den letzten Jahren stark gestiegen, sodass hier gegensteuert werden muss.
- In der Biogastechnik stehen sinkenden Einnahmen (z. B. durch rückläufige Einspeisevergütungen, fallende Entsorgungskosten für organische Reststoffe) steigende Betriebskosten (z. B. steigende Rohstoffkosten) gegenüber. Bei Neuanlagen können daher nur noch wirtschaftlich interessante Renditen erzielt werden, wenn die Biogasanlage „rund um die Uhr“ effizient läuft. Aber auch für viele bestehende Anlagen wird der Markt schwieriger, da auch diese mit steigenden Rohstoffkosten kämpfen müssen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher gezeigt, ob und wie Mess- und Automationstechnik geeignet ist, um diesen Herausforderungen gerecht zu werden. Dabei konnten unter anderem die folgenden Erkenntnisse gewonnen werden:

- Es wurde gezeigt, dass in der Zwischenzeit eine Vielzahl von Messgeräten existieren, mit denen wichtige Betriebsparameter auf Biogas- und Kläranlagen kontinuierlich in Echtzeit und zu vertretbaren Kosten zuverlässig erfasst werden können.
- Durch den konsequenten Einsatz dieser Messtechnik ist es möglich, aus den bisherigen Black-Box-Systemen transparentere Anlagen zu realisieren; die gewonnen Prozessinformationen können dann zur Betriebsoptimierung verwendet werden.
- Bei der Automatisierung von Kläranlagen und Biogasanlagen kann heute auf eine Vielzahl von Komponenten aus der Industrieautomation zurückgegriffen werden, die sich in anderen Branchen bereits über Jahre bewährt haben. Zusammen mit der umfangreichen Messtechnik lassen sich damit schon heute nahezu beliebig komplexe Mess- und Automationskonzepte auf Biogas- und Kläranlagen realisieren.
- Vorgestellte Beispiele für moderne Mess- und Automationskonzepte für Biogas- und SBR-Anlagen haben deutlich gezeigt, dass man durch konsequenten Einsatz von Mess-, Steuerungs- und Regelungskonzepten die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit dieser Verfahren deutlich erhöhen kann. Insbesondere gestattet es die Mess- und Automationstechnik die Schwächen dieser Verfahren zu reduzieren bzw. deren Stärken voll auszuspielen.
- Aus diesem Grund ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis für den Einsatz umfangreicher Mess- und Automationstechnik sowohl auf Biogasanlagen als auch auf SBR-Kläranlagen in der Regel deutlich positiv.

Trotz dieser vielversprechenden Entwicklungen und Ansätze gibt es jedoch noch erheblichen Verbesserungs- und Weiterentwicklungsbedarf:

- Im Bereich der Mensch-Maschine-Kommunikation gibt es in der Mess- und Automationstechnik noch erhebliches Verbesserungspotenzial, da auf den wenigsten Biogas- und Kläranlagen Betriebsingenieure oder Meister/Techniker vorhanden sind, die in der Lage sind, die Vielzahl möglicher Prozessinformationen zuverlässig zu interpretieren. Das Fehlen effizienter und einfacher Formen der Mensch-Maschine-Kommunikation sowie der

Systemdiagnose dürften einer der Gründe dafür sein, dass der Einsatz von Mess- und Automationstechnik auf kleinen und mittleren Biogas- und Kläranlagen noch immer schleppend verläuft und viele Versuche für alle Beteiligten enttäuschend verlaufen.

- Während wir heute in der Lage sind, einen prozessbiologischen Anlagenbetrieb durch den Einsatz von Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik zu realisieren, so gibt es nach wie vor Defizite im Bereich der Überwachung der eingesetzten Maschinentechnik; dies zeigen auch Auswertungen der gängigen Fehlerquellen. Weiteres Potenzial besteht daher im Einsatz von Methoden des Condition Monitoring und der automatisierten Entscheidungsunterstützung, um die Anlagenverfügbarkeit und -effizienz bei gleichzeitiger Minimierung der Wartungskosten zu verbessern.
- Bisherige Steuerungs- und Regelungskonzepte basieren meist noch auf einfachen, lokalen Ansätzen (z. B. Fütterungssteuerung), die vielfach auch manuelle Eingriffe erfordern (z. B. Vorgabe der Tagesdosis). Wenn Biogas- und Kläranlagen aber zukünftig im Optimum betrieben werden sollen (z. B. maximale Kapazität bei überschaubaren Risiken und minimalen Kosten) müssen die Automationskonzepte deutlich komplexer werden und einen anlageweiten Ansatz verfolgen. Hier können nicht zuletzt auch Computermodelle oder Methoden der Künstlichen Intelligenz hilfreich sein.
- Trotz der erzielten Fortschritte im Bereich der Messtechnik gibt es auch hier noch zahlreiche Ansatzpunkte zur Weiterentwicklung. Diese liegen nicht nur darin, die Messgeräte noch zuverlässiger, robuster und kosteneffizienter zu machen, sondern auch in der Entwicklung von Messgeräten für Parameter, die sich bisher nicht oder nur schwer im Prozess messen lassen (z. B. den Energiegehalt von Biomassen).
- Messgeräte müssen gewartet und kontrolliert werden! Eine praxistaugliche Analytische Qualitätssicherung ist daher wichtig, besonders wenn die Messtechnik für Steuerungen und Regelungen zum Einsatz kommen soll. Die Betreiber von Biogas- und Kläranlagen müssen entsprechend geschult bzw. für mögliche Probleme sensibilisiert werden.
- Bisher wird aus den teuer erworbenen Prozessinformationen noch zu wenig gemacht! Aus diesen Datenfriedhöfen sollten daher Wissensschatztruhen werden, um das enorme Prozesswissen, das in diesen Daten steckt, nutzbringend für alle Beteiligten (z. B. Anlagenbetreiber, Anlagebauer, Forscher) zu verwenden. Vorstellbar ist auch, dass man das „Wissen“ einer älteren, erfahrenen Anlage auf eine neue, bauähnliche Anlage überträgt, damit diese aus Fehlern der Vergangenheit lernen kann.
- Controlling und Benchmarking, zwei Werkzeuge die zum Leistungsvergleich in anderen Branchen bereits seit Jahrzehnten Anwendung finden, gewinnen langsam auch im Biogas- und Abwassersektor an Bedeutung. Für zuverlässige Aussagen sind jedoch belastbare Messkonzepte erforderlich; für eine wirtschaftliche Ermittlung dieser Kennzahlen wäre zudem eine automatisierte Datenaufbereitung zielführend.

Wenn diese Probleme noch gelöst werden können, dann wir es möglich sein, Biogasanlagen und SBR-Kläranlagen in gläserne Systeme zu verwandeln, die sich mittels künstlicher Intelligenz und leistungsfähiger Automation selber optimieren können.

Obwohl Biogas- und SBR-Anlagen auf den ersten Blick zwei unterschiedliche Verfahren sind, die zudem für unterschiedliche Zwecke eingesetzt werden, zeigen die Beispiele in dieser Arbeit deutlich, dass es zahlreiche Ähnlichkeiten gibt. Dies bezieht sich nicht nur auf die Herausforderungen, die diese Anlagen bewältigen müssen, sondern auch auf die Ansätze zur

Lösung dieser Probleme. D. h. es sind Synergieeffekte in den Bereichen Messtechnik, Steuerungs- und Regelungskonzepte, Entscheidungsunterstützung sowie des Condition Monitoring möglich. Dies gilt besonders, da die Grenzen zwischen den Verfahren teilweise verschwimmen: So gibt es zum Beispiel bereits anaerob betriebene SBR-Kläranlagen, die nicht nur zur Abwasserreinigung, sondern auch zur Energieerzeugung eingesetzt werden, oder SBR-Anlagen werden zur Behandlung von Abwässern aus der Biogasproduktion eingesetzt. Biogasanlagen und SBR-Kläranlagen können zudem sinnvolle Bausteine zukünftiger Bioraffineriekonzepte sein. Hieraus ergeben sich für diese Verfahrenstypen neue Anwendungsmöglichkeiten, was aber auch die Entwicklung angepasster Mess- und Automationskonzepte erforderlich machen wird.

Die Lösung dieser Herausforderungen wird Forscher und Entwickler noch einige Jahre beschäftigen. Das enorme Potenzial der Zukunftstechnologien „Abwassertechnik“ und „Biogas“ rechtfertigen jedoch diese Anstrengungen!

Anhang

Anh. 8.1: Richtwerte für Gasausbeuten aus Wirtschaftsdüngern (*KTBL [2007]*)

Substrat	TS	davon oTS	Biogas-ertrag	Methan-gehalt	Ertrag elektr. Strom
	[%]	[%]	[l_N/Kg oTS]	[%]	[kWh/Mg FM]
Hühnerkot (trocken, ohne Stroh)	45	75	500	65	351
Rindergülle (mit Futterrest)	8	80	370	55	42
Rindergülle (ohne Futterrest)	8	80	280	55	32
Rindermist	25	80	450	55	158
Schweinegülle	6	80	400	60	37

Anh. 8.2: Richtwerte für die Gasausbeuten aus NawaRo (*KTBL [2007]*)

Substrat	TS	davon oTS	Biogasertrag	Methan-gehalt	Ertrag elektr. Strom
	[%]	[%]	[l_N/Kg oTS]	[%]	[kWh/Mg FM]
Getreidekörner (zerkleinert)	87	98	700	53	1.012
Getreide-Ganzpflanzensilage	40	94	520	52	325
Gras (frisch und unbehandelt)	18	91	600	54	170
Gras (Silage, nass u. angewelkt)	25	88	560	54	213
Grünroggen (Silage, früh. Schnitt)	25	88	590	54	224
Kartoffeln (mittlerer Stärkegehalt)	22	94	730	52	251
Maissilagen (Milchreife)	22	95	570	52	198
Maissilagen (teigreif, körnerreich)	30	96	600	52	288
Maissilagen (wachsreif)	35	96	600	52	335
Massenrüben	11	88	700	52	113
Rübenblätter (siliert)	18	80	600	54	149
Weisskohlblätter (frisch)	13	82	610	55	114
Weizenstroh (kurzgehäckselt)	86	92	370	51	478
Zuckerhirse / Sudangras	18	91	550	53	153
Zuckerrübe (frisch)	23	92	700	51	242

Anh. 8.3: Richtwerte für die Gasausbeuten aus organischen Reststoffen (*KTBL [2007]*)

Substrat	TS	davon oTS	Biogasertrag	Methan-gehalt	Ertrag elektr. Strom
	[%]	[%]	[l_N/Kg oTS]	[%]	[kWh/Mg FM]
Altbrot	65	97	760	53	813
Obsttrester (frisch, unbehandelt)	22	98	520	52	187
Biertreber (frisch o. abgepresst)	24	96	530	59	231
Bioabfall	40	50	615	60	236
Erdnusskleie	93	90	520	62	864
Fettabscheider	5	90	1.000	68	98
Frittierfette	95	87	1.000	68	1.798
Schlempen (Alkoholprodukt.)	6	94	640	59	68
Getreidestaub	87	65	680	53	652
Glycerin	100	99	850	50	1.346
Kartoffelpülpe (abgepresst)	25	94	610	50	229
Kartoffelschlempe	6	87	670	56	63
Malzkaffeetreber (frisch)	20	98	510	57	182
Molke (frisch)	5	92	750	53	59
Panseninhalt	15	84	480	55	106
Quark (frisch)	22	95	670	67	300
Rapskuchen (15 % Restöl)	91	93	680	63	1.160
Speisereste (mittl. Fettanteil)	16	87	680	63	182

Literaturverzeichnis

Aamodt und Plaza [1994]: Aamodt A. und Plaza E., Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches, AI Communications, Vol. 7, No. 1, pp. 39-59, 1994, IOS Press, Niederlande

Abou Merhi [2011]: Abou Merhi S., Dünger vom Klärwerk, S. 8f, Endress+Hauser perspektiven 1/2011, Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG, Weil am Rhein, Deutschland

AbwAG [1994]: Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 1994, BGBl. I Nr. 80 vom 18.11.1994, S. 3370ff, Deutschland

AbwAG [2005]: Neufassung des Abwasserabgabengesetzes, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2005 Teil I Nr. 5, ausgegeben zu Bonn am 25. Januar 2005, Deutschland

AbwV [2009]: Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV) mit Ausfertigungsdatum vom 21.03.1997 in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 20 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) geändert worden ist, http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/abwv/gesamt.pdf, Deutschland

Aceves-Lara et al. [2007]: Aceves-Lara C. A., Latrille E., Bernet N., Buffière P., Steyer J. P., State estimation and closed loop control for optimization of hydrogen production in anaerobic digesters, Tagungsband, Session PP9A – Instrumentation and control, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Aguado et al. [2005A]: Aguado D., Portillo N., Montoya T., Seco A. und Ferrer J., The effect of unfolding on multivariate bilinear models for fault detection and isolation in a Sequencing Batch Reactor, Proceedings, S. 755 – 764, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, 19.-21. September 2005, Krakau, Polen

Aguado et al. [2005B]: Aguado D., Ribes J., Montoya T., Ferrer J. und Seco A., Development of a soft sensor based on neural networks for monitoring SBR systems, Proceedings, S. 1309ff, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, September 2005, Krakau, Polen

Aguado et al. [2005C]: Aguado D., Zarzo M., Ferrer J. und Seco A., A multivariate methodology for detecting operational shifts: application to a sequencing batch reactor, Proceedings, S. 1351 – 1355, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, 19.-21. September 2005, Krakau, Polen

Ahlgrimm H-J (1983). Steuerung der 100 m³-Biogas-Versuchsanlage der FAL nach betriebs-technischen Randbedingungen; Verfahrenstechnik der Biogaserzeugung aus land-wirtschaftlichen Roh- und Abfallstoffen, Tagung „Erkenntnisse aus Forschung und Praxis“, S. 65-69, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig, Deutschland

Albanez et al. [2007]: Albanez R., Canto C.S.A., Ratusznei S.M., Rodrigues J.A.D., Zaiat M., Foresti E., Optimization of nitrification and denitrification processes in a mechanically stirred sequencing batch and fed-batch reactor with draft-tube, Tagungsband, Poster Session PT02 – Anaerobic Nutrient Removal, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Alex et al. [2005]: Alex J., Ogurek M. und Jumar U., Simulation of energy consumption in wastewater treatment, Proceedings, S. 437-445, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Alex et al. [2011]: Alex J., Rönner-Holm S.G.E., Hunze M. und Holm N.C., A combined hydraulic and biological SBR model, S. 1025-1031, Vol. 64, No. 5, 2011, ISSN 0273-1223, Water Science and Technology, IWA Publishing, London, Großbritannien

Alex und Tschepetzki [2001]: Alex, J. und Tschepetzki, R., Simulation und regelungstechnische Optimierung von SBR-Anlagen, Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft, Band 14, 2001, Universität Kaiserlautern, Deutschland

Alferes et al. [2007]: Alferes J., Garcia-Heras J.L., Roca E., Garcia C. and Irizar I., Integration of equalisation tanks within control strategies for anaerobic reactors. Validation based on ADM1 simulations, Tagungsband, Session PP2C – Process Analysis, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Aliev et al. [2000]: Aliev R. A., Bonfig K. W. und Aliew F., Soft Computing – Eine grundlegende Einführung, ISBN 3-341-01238-9, VT Verlag Technik, Berlin, Deutschland

Alvarez et al. [2007]: Alvarez J.A., Lema J., Barros S. und Lara E., Treatment of distillery wastewaters (vinasses) by an anaerobic sequencing batch reactor in pilot plant, Tagungsband, Poster Session PT03 – Industrial Processes, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Amin et al. [2007]: Amin M. M., Ghasemian M., Morgenroth E. und Jaafarzadeh N., Biodegradation of MTBE and TBA in Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR) and Specific Methanogenic Activity (SMA) test, Tagungsband, Poster Session PT03 – Recalcitrants, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Andree et al. [2006]: Andree H., Thiessen E. und Hartung E., Potentiale von NIRS Sensorik zur prozessbiologischen Überwachung auf Biogasanlagen, Foliensatz, Workshop „Messen, Steuern und Regeln auf Biogasanlagen“, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 15. Dezember 2006, Kunsthalle Kiel, Deutschland

Andree et al. [2007]: Andree H., Mähnert P. und Völlmer G.-R., Online-NIRS-Messung an Biogasanlagen, 15. November 2007, Convention Center Messe Hannover, abgedruckt in Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung, Gülzower Fachgespräche, Band 27, S. 84 bis 99, 2008, Gülzow, Deutschland

Andrews und Graef [1971]: Andrews J.F. und Graef J.P., Dynamic Modelling and Simulation of the Anaerobic Digestion Process. Anaerobic Biological Treatment Processes. Advances in Chemistry Series, American Chemical Society, Washington D.C, USA (zitiert in Gerber [2010])

Angelidaki et al. [2008]: Angelidaki I., Alves M, Bolzonella D., Borzacconi L., Guwy A.J., Kalyuzhnyi S., Jenicek P., Campos L. und van Lier J.B, Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes: a proposed protocol for batch assays, Session 7B: Biogas Potential, biodegradability tests, 28. Mai 2008, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Angelidaki et al. [2007]: Angelidaki I., Kongjan P., Hedegaard Thomsen M. und Thomsen A. B., Biorefinery for sustainable biofuel production from energy crops; conversion of lignocellulose to bioethanol, biohydrogen and biomethane, Tagungsband, Session PP8A – Bioenergy 2, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Antakyali et al. [2008]: Antakyali D., Krampe J. und Steinmetz H., Dezentrale Abwasserreinigung in Ferienanlagen mit dem Ziel der Wasserwiederverwertung, Wasser/Abwasser - Das Gas- und Wasserfach, 149. Jahrgang 2008, Heft 13, ISSN 0016-3651, Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland

ASA [2010]: MBA-Steckbriefe 2010/2011 – Aktuelle Daten von MBA-, MBS- und MPS-Anlagen und Kraftwerken für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Deutschland, ASA – Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung (Hrsg.), Enningerloh, Deutschland

ASA [2005]: Beispielhafte Übersicht der Automatisierungs- und Leittechnik einer SBR-Kläranlage, ASA Anlagen- und Sondermaschinen Automation GmbH, Minden, Deutschland

ASA/EnerCess [2005-2008]: Betriebshandbücher der Biogasanlagen-Baureihe 500N, ASA Anlagen- und Sondermaschinen Automation GmbH (bis 2006) bzw. EnerCess GmbH (ab 2006), Bad Oeynhausen, Deutschland

Aschmann [2008]: Aschmann V., Kissel R., Effenberger M. und Gronauer A., Emissions and performance of biogas driven combined-heat-and-power-units (CHPU) in practice, Session 2B: Bioreactor and biogas technology, 26. Mai 2008, Proceedings, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

ATV [2002]: ATV-Handbuch „Mechanisch und biologische Verfahren der Abfallbehandlung“, 1. Auflage, ISBN: 3-433-01470-1, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, Deutschland

ATV [2001]: ATV-Handbuch „Industrieabwasser – Dienstleistungs- und Veredelungsindustrie “, 4. Auflage, ISBN: 3-433-01468-X, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, Deutschland

ATV [2000]: ATV-Handbuch „Industrieabwasser - Lebensmittelindustrie“, 4. Auflage, ISBN: 3-433-01467-1, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, Deutschland

ATV [1999]: ATV-Arbeitsbericht „Energiebilanzierung auf Kläranlagen“, ATV-Fachausschuss 3.1 „Allgemeine Fragen“, Abwassertechnische Vereinigung ATV, Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA) (Vertrieb), 1999, Hennef, Deutschland

ATV [1998]: Merkblatt ATV-M 205 Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser, Juli 1998, ISBN 978-3-927729-75-9, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ehemals ATV Abwassertechnische Vereinigung), Hennef, Deutschland

ATV [1997A]: ATV-Arbeitsbericht „Weitergehende Anforderungen an Mischwassereinleitungen – Grundlagen und Vorprüfung (Teil 2) sowie Hinweise zur biologischen Beurteilung mischwasserbelasteter Gewässer“, 2. Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 2.1.1 „Beeinflussung der Gewässergüte durch Mischwassereinleitungen“, KA - Korrespondenz Abwasser, Heft 5/1997, 44. Jahrgang, S. 922-927, 1993, GFA - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (Hrsg. und Verlag), Hennef, Deutschland

ATV [1997B]: Merkblatt ATV - M 210 „Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb“, Abwassertechnische Vereinigung (ATV), Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA) (Vertrieb), Hennef, Deutschland

ATV [1997C]: ATV-Arbeitsbereicht „Auswirkungen der Mischwasserbehandlung auf den Betrieb von Kläranlagen“, Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 2.12.1. In: Korrespondenz Abwasser, Heft 8, S. 1419-1428, 1997, GFA - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (Hrsg. und Verlag), Hennef, Deutschland

ATV [1997D]: ATV-Handbuch „Biologische und weitergehende Abwasserreinigung“, 4. Auflage, ISBN: 3-433-01462-0, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, Deutschland

ATV [1997E]: ATV-Handbuch „Mechanische Abwasserreinigung“, 4. Auflage, ISBN: 3-433-01461-2, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, Deutschland

ATV [1995]: Arbeitsblatt ATV-A 203 Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung, April 1995, ISBN 978-3-933693-36-5, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ehemals ATV Abwassertechnische Vereinigung), Hennef, Deutschland

ATV [1993]: ATV-Arbeitsbericht „Weitergehende Anforderungen an Mischwassereinleitungen – Grundlagen und Vorprüfung“, 1. Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 2.1.1 „Beeinflussung der Gewässergüte durch Mischwassereinleitungen“, KA - Korrespondenz Abwasser, Heft 5/1993, 40. Jahrgang, S. 802-806, 1993, GFA - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (Hrsg. und Verlag), Hennef, Deutschland

ATV [1992]: ATV-Arbeitsblatt A 128 „Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regentlastungen in Mischwasserkanälen“, Abwassertechnische Vereinigung (ATV) (jetzt DWA), Hennef, Deutschland

ATV [1991, 2000]: ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 131 “Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen”, Abwassertechnische Vereinigung (ATV), Hrsg., Hennef, Deutschland

ATV-DVWK [2003]: ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 198 „Bemessungsgrundlagen für Abwasseranlagen“, ATV-DVWK-Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ehemals Abwassertechnische Vereinigung (ATV), heute: DWA), 2003, Hennef, Deutschland

ATV-DVWK [2003]: ATV-DVWK-Merkblatt M 263 „Messung des Durchflusses von Biogas aus der anaeroben Stabilisierung von Klärschlamm“, ATV-DVWK-Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ehemals Abwassertechnische Vereinigung (ATV), heute: DWA), 2003, Hennef, Deutschland

ATV-DVWK [2002]: ATV-DVWK-Arbeitsbericht IG-5.4, Endokrin wirksame Substanzen in Kläranlagen – Vorkommen, Verbleib und Wirkung, 2002, ISBN 978-3-936514-18-6, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ehemals ATV-DVWK, heute: DWA), Hennef, Deutschland

Aveva [2008]: Aveva GmbH, Kraftwerksplanung nach allen Regeln der Kunst, S. 46-49, Economic Engineering 3/2008, Teil „digitalPlant Business+Engineering“, ISSN 1866-5004, Göller Verlag GmbH, Baden-Baden, Deutschland

Baader [2011]: Baader W., Entwicklung landwirtschaftlicher Biogasanlagen – 1944 bis 1990, BIOGAS Journal 1/2011, S. 38ff, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Bachmaier et al. [2009]: Bachmaier H., Bayer K., Gronauer A., Friedl G., Rauh S. und Pahl H., Treibhausgasemissionen der Energieproduktion aus Biogas. Nr. V -3/2009, Arbeitsgruppe V (Betriebs- und volkswirtschaftliche Bewertung) im „Biogas Forum Bayern“, http://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Treibhausgasemissionen.pdf, Biogas Forum Bayern, Freising, Deutschland

Banemann und Nelles [2008]: Banemann D. und Nelles M., Nacherwärmung vermeiden, BIOGAS Journal 3/2008, S. 40 bis 43, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Barat et al. [2008]: Barat R., Montoya T., Borras L., Ferrer J. und Seco A., Calcium phosphate precipitation in a SBR operated for EBPR: Interactions with the biological process, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 105-112, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Baserga [1998]: Baserga U., Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen, FAT-Berichte Nr. 512, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwissenschaft und Landtechnik, Tänikon, Schweiz (zitiert in Gerber [2010])

BASF [2011]: Verbund, BASF SE – Corporate Website, http://www.basf.com/group/corporate/de/about-basf/profile/verbund/index

Batstone et al. [2002]: Batstone D.J., Keller J., Angelidaki I., Kalyuzhnyi S.V., Pavlostathis S.G., Rozzi A., Sanders W.T.M., Siegrist H. and Vavilin V.A., The IWA Anaerobic Digestion Model No 1; Wat. Sc. & Tech., 45, No. 10, pp 65–73, UK

Battimelli et al. [2008]: Battimelli A., Torrijos M., Moletta R. und Delgenès J.P., Fatty slaughterhouse waste saponification to increase biogas yield, Session 8B: Characterisation, pre-treatment, post-treatment, 28. Mai 2008, Proceedings, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Baumann [2006]: Baumann T., Hemmstoffe und Hilfsstoffe für Biogasanlagen,15. IBBK-Jahrestagung „Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft“, Tagungsband, S.121 bis 138, Internationales Biogas und Bioenergie Kompetenzzentrum (IBBK), Fachgruppe Biogas, Wolpertshausen, Deutschland

BayLfU [2004]: Biogashandbuch Bayern – Materialienband, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg, Deutschland

Beierle und Kern-Isberner [2003]: Beierle C. und Kern-Isberner G., Methoden wissensbasierter Systeme – Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen, 2. Auflage, ISBN 3-528-15723-2, Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Wiesbaden, Deutschland

Beil [2009]: Beil M., Praxiserfahrungen bei der Substituierung von Erdgas durch Biomethan in Deutschland, Gülzower Fachgespräche, Tagungsband „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“, Band 32, S. 249 bis 258, ISBN 978-3-942147-00-2, Gülzow, Deutschland

Ben et al. [2011]: Ben M., Mato T., Lopez A., Vila M., Kennes C. und Veiga M.C., Bioplastic production using wood mill production, S. 1196-1202, Vol. 64, No. 6, 2011, ISSN 0273-1223, Water Science and Technology, IWA Publishing, London, Großbritannien

Bengtsson et al. [2008A]: Bengtsson S., Werker A. und Welander T., Production of poly-hydroxyalkanoates by glycogen accumulating organisms treating a paper mill wastewater, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 67-74, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Bengtsson et al. [2008B]: Bengtsson S., Pisco A.R., Werker A., Reis M. A. M. und Lemos P. C., Polyhydroxyalkanoates production from molasses by glycogen accumulating organisms, Poster Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 5-8, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Bensmann [2011A]: Bensmann H., Nordzucker AG verkauft Biogasrübe, BIOGAS Journal 2/2011, S. 54-58, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Bensmann [2011B]: Bensmann H., Der Gasproduktion Beine machen, BIOGAS Journal 2/2011, S. 60-63, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Bensmann [2011C]: Bensmann M., Kleine Dosis im Erdgasnetz, BIOGAS Journal 3/2011, S.28 bis 39, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Berg et al. [2005]: Berg U., Knoll G., Kaschka E. und Donnert D., Is phosphorus recovery from waste water feasible?, Proceedings, S. 51 – 58, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, 19.-21. September 2005, Krakau, Polen

Bergamo et al. [2007]: Bergamo C.M., Ratusznei S.M., Rodrigues J.A.D., Zaiat M., Foresti E., Effects of temperature at different organic loading levels on the performance of a fluidized-bed anaerobic sequencing batch bioreactor, Tagungsband, Poster Session PT03 – Process Analysis, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Bergmann et al. [1999]: Bergmann R., Breen S., Göker M., Manago M. und Wess S., Developing Industrial Case-Based Reasoning Applications, The INRECA-Methodology, LNAI 1612, Springer, Heidelberg, Deutschland

Bergmann [1997]: Bergmann R., Grundlagen fallbasierten Schließens, Unterlagen zur Vorlesung, Fachbereich Informatik, Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Deutschland

Bischofsberger et al. [2005]: Bischofsberger W., Dichtl N., Rosenwinkel K.-H., Seyfried C. F., Böhnke B. (Hrsg.), Anaerobtechnik, 2. Auflage, Springer-Verlag, ISBN: 3-540-06850-3, Deutschland

Boe et al. [2007]: Boe K., Steyer J.-P. und Angelidaki I., Monitoring and control of the biogas process based on propionate concentration using online VFA measurement, Session “9A – Instrumentation and control”, Proceedings, 11th IWA Specialist conference on anaerobic digestion “Bio-energy for our future - Renewable Energy from Waste”, Brisbane, Australien

Boehler und Siegrist [2005]: Boehler M. und Siegrist H., Potential of activated sludge disintegration, Proceedings, S. 691 – 704, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, 19.-21. September 2005, Krakau, Polen

Boncz et al. [2008]: Boncz M.A., Pinheiro Bezerra L., Nobuyoshi Ide C. und Loureiro Paulo P., Optimisation of biogas production from anaerobic digestion of agroindustrial waste streams in Brazil, Session 9A: Anaerobic Digestion, 28. Mai 2008, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Borchardt [1992]: Borchardt D., Wirkungen stoßartiger Belastungen auf ausgewählte Fließ-gewässerorganismen, Dissertation, Schriftenreihe der Fachgebiete Siedlungswasserwirt-schaft und Abfallwirtschaft, Universität – Gesamthochschule Kassel, Band 10, 1992, Kassel, Deutschland

Bordeleau und Droste [2011]: Bordeleau É.L. und Droste R.L., Comprehensive review and compilation of pretreatments for mesophilic and thermophilic anaerobic digestion, S. 291-296, Vol. 63, No. 2, 2011, ISSN 0273-1223, Water Sc. & Techn., IWA Publish., London, Großbritannien

Börjesson [2007]: Börjesson P., Biogas from waste materials as transportation fuel – benefits from an environmental point of view, Tagungsband, Session PP8A – Bioenergy 2, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Bouallagui et al. [2008]: Bouallagui H., Lahdheb H., Ben Romdan E., Hamdi N. und Hamdi M., Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition, Session 7A: Codigestion, 28. Mai 2008, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Bouwer [2011]: Bouwer D., Der neue Star am Feldbushimmel, S. 6-7, Endress+Hauser kurier 2/2011, Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG, Weil am Rhein, Deutschland

Boyle [1976]: Boyle W.C., Energy Recovery from Sanitary Landfills, in Microbial Energy Conversion, S. 119 – 138, Edited by: Schlegel H. G. und Barnea J., Pergamon Press, Oxford, UK (zitiert in Gerber [2010])

Brauer und Weiland [2009]: Brauer A. und Weiland P., Wasserstoffmessung – Kontinuierliche Wasserstoffmessung zur Beurteilung der Prozessstabilität von Fermentationsversuchen, Biogas 2009 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 2057, S. 237-247, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-092057-3, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Brehmer und Kraume [2012]: Brehmer M. und Kraume M., Bedeutung einer exakten rheologischen Beschreibung von Gärsubstraten für das Strömungsregime im Biogasfermenter, Foliensatz und Manuskript, 2. VDI-Konferenz „Prozessmesstechnik an Biogasanlagen“, VDI-Wissensforum, ISBN 978-3-942980-99-9, 9./10. Oktober 2012, Fulda, Deutschland

Brooks et al. [2008]: Brooks L., Parravicini V., Svardal K., Kroiss H. und Prendl L., Biogas from Sugar Beet Press Pulp as Substitute of Fossil Fuel in Sugar Beet Factories, Session 5B: Energy crops, 27. Mai 2008, Proceedings, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Brucker et al. [2008]: Brucker A., Bernhard H., Dornauf F., Grunert F. und Hofmann F., Durchflussmesstechnik, atp Praxiswissen kompakt, Band 5, ISBN 978-3-8356-3074-1, Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland

Brüß [2009]: Brüß U., Gärrestaufbereitung – Technologien, Märkte und Wirtschaftlichkeit, Biogas 2009 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 2057, S. 125-136, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-092057-3, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Brunert [2007]: Brunert U., Untersuchungsverfahren zur Überwachung und Optimierung von Biogasanlagen – Grundlagen, Diskussion, Ergebnisse, VDM Verlag Dr. Müller, ISBN 978-3-8364-2265-9, Saarbrücken, Deutschland

Buffiere et al. [2008]: Buffiere P., Frederic S., Marty B. und Delgenes J.-P., A comprehensive method for organic matter characterization in solid wastes in view of assessing their anaerobic biodegradability, Session 7B: Biogas Potential, biodegradability tests, 28. Mai 2008, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Bundesverband der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften e. V. [2002]: Arbeitsunterlage 69 - Sicherheitsregeln für landwirtschaftliche Biogasanlagen, Bundesverband der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften e. V., Weißensteinstraße 70 – 72, 34131 Kassel, Deutschland

BWK-Merkblatt M3 [2001]: BWK-Merkblatt 3 „Ableitungen von Anforderungen an Niederschlagswassereinleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse“, Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V., Hrsg., 2001, Düsseldorf, Deutschland

Carucci et al. [2008]: Carucci S., Milia G., Gioannis D. und Piredda M., Acetate-fed Aerobic Granular Sludge for the degradation of chlorinated phenols, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 321-328, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Cassidy et al. [2008]: Cassidy D. P., Hirl P. J. und Belia E., Methane Production from Ethanol Co-Products in Anaerobic SBRs, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 417-423, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Celis et al. [2006]: Celis E., Elefsiniotis P. und Singhal N., Biodegradation of agricultural herbicides in sequencing batch reactors under aerobic and anaerobic conditions, 5th IWA World Water Congress – Beijing 2006, Proceedings, Paper-No. 595694, Peking, Volksrepublik China

Chambost und Stewart [2010]: Chambost V. und Stuart P., Product Portfolio Design for Forrest Biorefinery Implementation at an existing Pulp and Paper Mill, S. 907 – 917, Proceedings of the Seventh International Conference on the Foundations of Computer-Aided Process Design, Design for Energy and Environment, ISBN 978-1-4398-0912-9, CRC-Press, Boca Raton, USA

Chauzy et al. [2007]: Chauzy J., Nawawi D., Bausseron A. and Cretenot D., The Benefits of using Thermal Pre-treatment on Waste Activated Sludge before Mesophilic Anaerobic Digestion, Tagungsband, Poster Session PT01 – Organic Solids, 11th IWA World congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Cheon et al. [2005]: Cheon S.P., Bac H., Kim S. und Park J.S., Survey for the open control system for data networks and system automation in water treatment systems, Proceedings, S. 193-200, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Chen et al. [2011]: Chen W.H., Chen S.Y., Chao S.J. und Jian Z.C., Butanol production from the effluent of hydrogen fermentation, S. 1236-1240, Vol. 64, No. 6, 2011, ISSN 0273-1223, Water Science and Technology, IWA Publishing, London, Großbritannien

Chen et al. [2007]: Chen W.-C., Chen W.-C. und Chen K.-T., Potential of Bio-Energy Recovery from Organic Fraction of Municipal Solid Wastes Digestion in Taiwan, Tagungsband, Poster Session PT01 – Bioenergy, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Choi [2007]: Choi E., Piggery Waste Management – Towards a Sustainable Future, ISBN 9781843391319, IWA Publishing, London, Großbritannien

Ciappelloni et al. [2005]: Ciappelloni F., Luccarini L., Fiocchi N., Ficara E., Canziani R., Ratini P., Pirani M. und Mariani S., Online monitoring of nitrification efficiency by set-point titration, Proceedings, S. 823 – 832, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, 19.-21. September 2005, Krakau, Polen

Clemens et al. [2009]: Clemens J., Hafermann C. und Cuhls C., Emissionen bei der Biogasproduktion – eine Analyse der Umweltrelevanz, Gülzower Fachgespräche, Tagungsband „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“, Band 32, S. 142 bis 147, 2008, ISBN 978-3-942147-00-2, Gülzow, Deutschland

Clemens und Hecht [2006]: Clemens J. und Hecht M., Erfahrungen mit einer einfachen Methode zur Bestimmung des Hydrogencarbonatpuffers als wichtiger Parameter zu Prozesssteuerung, Foliensatz, Expertentreffen „Messen, Steuern und Regeln auf Biogas-anlagen“, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 17.10.2006, Berlin, Deutsch-land

Cohen et al. [1997]: Cohen, A.; Janssen, G.; Brewster, S. D.; Seeley, R.; Boogert, A. A.; Graham, A. A.; Mardani, M. R.; Clarke, N. and Kasabov, N. K., Application of computational intelligence for on-line control of a sequencing batch reactor (SBR) at Morrinsville sewage treatment plant, Water Science and Technology, Vol. 35, No. 10, pp. 63-71, 1999, Pergamon by Elsevier Science Ltd., Großbritannien

Corominas et al. [2008]: Corominas L.I., Sin G., Puig S., Balaguer M. D., Vanrolleghem P. A. und Colprim J., Model-based evaluation of operational flexibility of a nitrogen removing SBR, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 179-186, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Corominas et al. [2005A]: Corominas L.I., Sin G., Puig S., Balaguer M. D., Colprim J. und Vanrolleghem P. A., Model-based evaluation of an on-line control strategy for SBRs based on OUR and ORP measurements, Proceedings, S. 359-367, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Corominas et al. [2005B]: Corominas L.I., Sin G., Balaguer M.D., Colprim J. und Vanrollegham P.A., Calibration and validation of a N-removing SBR only using on-line measurements of DO and historical off-line data, Proceedings, S. 1333 – 1338, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, 19.-21. September 2005, Krakau, Polen

Craggs et al. [2011]: Craggs R.J., Heubeck S., Lundquist T.J. und J.R. Bennemann, Algae biofuels from wastewater treatment high rate algae ponds, S. 660-664, Vol. 64, No. 3, 2011, ISSN 0273-1223, Water Science and Technology, IWA Publishing, London, Großbritannien

Crowcon [2011]: LaserMethane®mini Gen2 - Methane Detection at a Distance, M07688 Issue 2 06/10 English, www.crowcon.com, Abingdon, Großbritannien

Dahlquist [2008]: Dahlquist E., Combination of statistical and physical models for model based control and decision support in the pulp and paper industry, S. 101 - 111, Modelling and Simulation of Wet End Processes and Innovative Process Control, Cost E36 Modelling and Simulation in the Pulp & Paper Industry, Kappen J., Dietz W. und Grenz R. (Hrsg.), ISBN: 978-3-8334-7619-8, Books on Demand, Norderstedt, Deutschland

Dalmau et al. [2007]: Dalmau J., Comas J., Rodríguez-Roda I., Latrille E. und Steyer J.P., Using artificial neural networks for selecting relevant information in anaerobic digestion, Tagungsband, Session PP9A – Instrumentation and control, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Demant et al. [2009]: Demant C., Streicher-Abel B. und Springhoff A., Industrielle Bildverarbeitung – Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert, 3. Auflage, ISBN 978-3-642-13096-0, Springer Verlag, Heidelberg, Deutschland

Demoulin et al. [1997]: Demoulin, G.; Goronszy, M. C.; Wutscher, K. and Forsthuber, E., Co-current nitrification/denitrification and biological P-removal in cyclic activated sludge plants by redox controlled cycle operation, Water Science and Technology, Vol. 35, No. 1, pp. 215-224, 1997, Elsevier Science Ltd., Großbritannien

Demoulin [2008]: Demoulin G., Largest SBR Facility for Full BNR in Malaysia, Poster Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 29-32, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

DeStatis [2009]: Schulden der öffentlichen Haushalte, Fachserie 15, Reihe 9, 2009, http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Publikationen/Fachveroeffentlichungen/FinanzenSteuern/OeffentlicheHaushalte/Schulden/SchuldenOeffentlicherHaushalte2140500097004,property=file.pdf, Statistisches Bundesamt Deutschland, Deutschland

DIN EN 12255-14 [2004]: Kläranlagen - Teil 14: Desinfektion, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland

DIN 38 414-10:1984-10 [1984]: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S), Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland

DLG [2006]: DLG-Fachzentrum Land- und Ernährungswirtschaft Arbeitsgruppe Biogas, Betriebszweigabrechnung für Biogasanlagen, Band 200, Arbeiten der DLG, ISBN 3-7690-3156-3, DLG-Verlags- GmbH, Frankfurt am Main, Deutschland

Döhler [2007]: Döhler H., Behandlung und Verwertung von Gärrückständen, Biogas 2007 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 1983, S. 71-85, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-091983-6, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Dohse [2011]: Dohse D., Das Kosten-ABC im Lebenszyklus – Messtechnik von A wie Auslegung bis Z wie Zentrallager: eine Lebenszykluskosten-Betrachtung am Beispiel eines Drucktansmitters, S. 14-15, Endress+Hauser kurier 2/2011, Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG, Weil am Rhein, Deutschland

Donoso et al. [2007]: Donoso A.E., Carballa M., Ruiz-Filippi G. und Chamy R., Domestic wastewater treatment in an Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR): modelling and parameters adjustment, Tagungsband, Poster Session PT03 – Low Strength/Sewage, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Dror-Ehre et al. [2008]: Dror-Ehre A., Goronszy M.C. und Brenner A., Utilization of an equalization pond for optimal operation of a full-scale Sequencing Batch Reactor (SBR) system, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 34-40, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Drosg et al. [2008]: Drosg B., Wirthensohn T., Konrad G., Hornbachner D., Loderer C., Waltenberger R., Kirchmayr R. und Braun R., Comparing central and peripheral anaerobic digestion of stillage from a large-scale bioethanol plant to animal feed production, Session 3B: Anaerobic Digestion, 26. Mai 2008, Proceedings, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Dyes [2008]: Dyes M., Instrumentierung von Biogasanlagen, Tagungsband, Fachseminar Biogas der Fa. Hach Lange und Siemens AG, 09.09.2008, Braunschweig, Deutschland

DWA [2013]: Merkblatt DWA-M 389 Trockenvergärung biogener Abfälle und nachwachsender Rohstoffe (im Entwurf), DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland

DWA [2010A]: Energiepotenziale in der deutschen Wasserwirtschaft – Schwerpunkt Abwasser, April 2010, ISBN 978-3-940173-91-1, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland

DWA [2010B]: Kostenanalyse und Kostensteuerung in der Abwasserwirtschaft, ISBN 978-3-941897-14-4, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland

DWA [2010C]: IQK-Ordner zum DWA-A 704 „Dokumentation der internen Qualitätskontrolle in der Betriebsanalytik“, DWA-Landesverband Baden-Württemberg, 2. Auflage 2010, Loseblattausgabe mit Register für IQK-Karten 1-11 einschließlich Ordner, Musterkarten und CD, ISBN 978-3-939057-74-1, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland

DWA [2009A]: Merkblatt DWA-M 114 Energie aus Abwasser – Wärme- und Lageenergie, Juni 2009, mit Korrekturblatt August 2009, ISBN 978-3-941089-65-5, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland

DWA [2009B]: Merkblatt DWA-M 380 Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Juni 2009, ISBN 978-3-941089-63-1, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland

DWA [2009C]: Merkblatt DWA - M 210 „Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb (SBR)“, Juli 2009, ISBN 978-3-941089-72-3, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland

DWA [2008A]: Senkung des Stromverbrauchs auf Kläranlagen, Leitfaden für das Betriebspersonal – Systematisches Vorgehen zur Steigerung der Energieeffizienz durch Nutzung des Einsparpotenzials, Dr.-Ing. Peter Baumann und Dr.-Ing. Manfred Roth, DWA-Landesverband Baden-Württemberg, 2. Auflage, ISBN 978-3-940173-47-8, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland

DWA [2008B]: Merkblatt DWA-M 1100 - Benchmarking in der Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung, März 2008, ISBN 978-3-940173-50-8, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland

DWA [2008C]: Unternehmensbenchmarking als Bestandteil der Modernisierungsstrategie – Kennzahlen und Auswertungsgrundsätze, April 2008, ISBN 978-3-940173-64-5, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland

DWA [2008D]: DWA-Themen „Anthropogene Spurenstoffe im Wasserkreislauf – Arzneistoffe“, Mai 2008, ISBN 978-3-940173-74-4, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland

DWA [2007]: Arbeitsblatt DWA-A 704 „Betriebsmethoden für die Abwasseranalytik“, April 2007, ISBN 978-3-939057-71-0, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland

DWA [2005]: Merkblatt DWA-M 178 Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Retentionsbodenfiltern zur weitergehenden Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem, Oktober 2005, ISBN 978-3-937758-37-4, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland

Eckert und von Block [1999]: Eckert M. und von Block M. (Hrsg.), Handbuch Elternbildung, Band 2: Wissenswertes im zweiten bis vierten Lebensjahr des Kindes, ISBN 3-8100-2331-0, Leske+Budrich, Opladen, Deutschland

Eder und Schulz [2006]: Eder P. und Schulz H., Biogas Praxis – Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit, ÖkoBuch Magnum, ISBN-13: 9783936896138,, Deutschland

EEG [2012]: Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 25. Oktober 2008 (BGBl. I S. 2074), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. August 2012 (BGBl. I S. 1754) geändert worden ist, Deutschland

EEG [2008]: novellierte Fassung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) vom 6. Juni 2008 (BGBl. I S. 2074), Deutschland

EEG [2004]: novellierte Fassung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) vom 21. Juli 2004 (BGBl. I S. 1918), Deutschland

EEG [2000]: Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 29. März 2000 (BGBl. I S. 305), Deutschland

Effenberger et al. [2008]: Effenberger M., Lehner A. und Gronauer A., Performance Figures of Agricultural Biogas Plants for (Co-)Digestion of Energy Crops, Session 6B: Energy crops, 27. Mai 2008, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Effizienz Agentur NRW [2011]: http://www.pius-info.de/de/index.html, Effizienz Agentur Nordrhein-Westfalen, Duisburg, Deutschland

elbebioenergie [2006]: gasmax – Bioprozesskontrolle und –beratung, Produktbroschüre, Juli 2006, elbe bioenergie GmbH - Erneuerbare Energie und Umwelttechnik, Biederitz, Deutschland

Els und van Deventer [2007]: Els E. R. und van Deventer W., Modelling a winery wastewater anaerobic sludge blanket (UASB) reactor, Tagungsband, Poster Session PT03 – Modelling, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

EMPOLIS [2000]: empolis (ehemals tecInno GmbH), Reference Manual Version CBR Works 4, 2000, Kaiserslautern, Deutschland

Endress+Hauser [2013]: Der Biogasprofi, S. 8f, Endress+Hauser Kurier 1/2013, Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG, Weil am Rhein, Deutschland

Endress+Hauser [2012]: Dichte ist der Schlüssel, S. 16f, Endress+Hauser Kurier 2/2012, Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG, Weil am Rhein, Deutschland

Endress+Hauser [2011]: Ganz entspannt!, S. 14, Endress+Hauser perspektiven 1/2011, Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG, Weil am Rhein, Deutschland

Engler et al. [2009]: Engler N., Nelles M. und Fritz T., Der Rostocker Aktivitätstest – Entwicklung eines Verfahrens zur praxisnahen vergleichenden Quantifizierung der biologischen Aktivität von NawaRo-Biogasfermentern, Gülzower Fachgespräche, Tagungsband „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“, Band 32, S. 452 bis 453, 2008, Gülzow, ISBN 978-3-942147-00-2, Deutschland

Engler et al. [2012]: Engler N., Merrettig-Bruns U., Feher A., Fritz T. und Nelles M., Prozessbewertung auf der Grundlage eines Aktivitätstests für standardisierte Substrate, Foliensatz und Manuskript, 2. VDI-Konferenz „Prozessmesstechnik an Biogasanlagen“, VDI-Wissensforum, ISBN 978-3-942980-99-9, 9./10. Oktober 2012, Fulda, Deutschland

EPA [2010]: Homeland Security Research, http://www.epa.gov/nhsrc/aboutwater.html, Environmental Protection Agency, USA

Erling [2008]: Erling P. (Hrsg.), Handbuch Mehl- und Schälmüllerei, 3. Auflage, AgriMedia GmbH, Clenze, ISBN 978-3-86037-276-0, Deutschland

EU-Hygieneverordnung [2002]: EG (VO) 1774/2002 „Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte“

EU-WRRL [2000]: Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 327/1, DE, 22.12.2000

Fachverband Biogas [2013]: Branchenzahlen 2011 und Prognose der Branchenentwicklung 2012/2013, Fachverband Biogas, Freising, Deutschland

Fachverband Biogas [2011]: Deutsche Biogasanlagen ersetzen zwei Atomkraftwerke, BIOGAS Journal 1/2011, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Faulstich [2011]: Faulstich T., Energieverbräuche erfassen und bewerten – Energieoptimierung auf Kläranlagen, Seminarband, GKU-Seminar „Energie- und Prozessoptimierung auf Kläranlagen“, 7. Dezember 2011, GKU mbH, Fulda, Deutschland

Fachverband Biogas [2005]: Biogas – das Multitalent für die Energiewende – Fakten im Kontext der Energiepolitik-Debatte, Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Feng et al. [2007]: Feng X., Karlsson A., Svensson B. H. und Bertilsson S., Real-time-t-RFLP analyses of microbial community structures in biogas reactors treating food industry waste, Tagungsband, Poster Session PT02 – Microbial Diversity, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Fenner und Saward [2002]: Fenner R. A. und Saward G., Towards Assassing Sewer Performance and Serviceability using Knowledge Based Systems, Proceedings 9th International Conference on Urban Drainage, 2002, Portland, USA

Fernandes et al. [2007]: Fernandes T. V., Klaasse Bos G. J., Zeeman G., Sanders J. P. M., van Lier J.B., Effects of thermo-chemical pre-treatment on anaerobic biodegradability and hydrolysis of lignocellulosic biomass, Tagungsband, Poster Session PT01 – Organic Solids, 11th IWA World congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Figueroa et al. [2011]: Figueroa M., Val del Rio A., Campos J.L., Mosquera-Corral A. und Méndez R., Treatment of high loaded swine slurry in an aerobic granular reactor, S. 1808-1814, Vol. 64, No. 9, 2011, ISSN 0273-1223, Water Science and Technology, IWA Publishing, London, Großbritannien

Figueroa et al. [2008]: Figueroa M., Mosquera-Corral A., Campos J.L. und Méndez R., Treatment of saline wastewater in SBR aerobic granular reactors, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 161-168, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Filho [2009]: Filho M. V., Erfolgsfaktoren der Bioethanolproduktion, Biotechnologische Energieumwandlung – Gegenwärtige Situation, Chancen und zukünftiger Forschungsbedarf, Bley T. (Hrsg.), S. 37 – 56, ISBN: 978-3-642-01114-6, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Deutschland

Fiocchi et al. [2008]: Fiocchi N., Ficara E., Bonelli S., Canziani R., Ciappelloni F., Mariani S., Pirani M., Ratini P., Mazouni D. und Harmand J., Automatic set-point titration for monitoring nitrification in SBRs, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 225-231, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Fiocchi et al. [2005]: Fiocchi N., Ficara E., Canziani R., Luccarini L., Ciappelloni F., Ratini P., Pirani M. und Mariani S., SBRs on-line monitoring by set-point titration, Proceedings, S. 795-803, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Fischer [1998]: Fischer J., Einfluß von Mischwassereinleitungen auf den Stoffhaushalt und die Biozönose kleiner Fließgewässer im ländlichen Raum, Dissertation, Schriftenreihe der Fachgebiete Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft, Universität – Gesamthochschule Kassel, Band 19, Kassel, Deutschland

FLIR Systems [2011]: FLIR GF320 2 in 1 -> Infrarotkamera für Gasdetektion und klassische Infrarotthermografie, www.flir.com/thg, FLIR Systems, Danderyd, Schweden

FNR [2009]: Biogas-Messprogramm II - 61 Biogasanlagen im Vergleich, 1. Auflage, ISBN 978-3-9803927-8-5, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.) (FNR), Gülzow, Deutschland

FNR [2008A]: Wege zum Bioenergiedorf, ISBN 978-3-9803927-3-0, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.), Gülzow, Deutschland

FNR [2008B]: Biogas-Messprogramm II - 61 Biogasanlagen im Vergleich, 1. Auflage, http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_385-messprogramm_ii.html, ISBN 978-3-9803927-8-5, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.), Gülzow, Deutschland

FNR [2005]: Ergebnisse des Biogas-Messprogramms, http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_223ergebnisse_biogasmessprogramm.pdf, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.), Gülzow, Deutschland

Fogelman et al. [2009]: Fogelman S., Tait S., Carney C., Keller J. und Batstone D., Continuous Membrane Sample Preparation for Automated Analysis of Sewage Sludge Digestion Systems, Proceedings, IWA-ICA-Conference 2009, Cairns, Australien

Franke et al. [2007]: Franke M., Wegner A. und Faulstich M., Prozessregelung von Vergärungsanlagen mit Hilfe des Parameters Wasserstoff, 15. November 2007, Convention Center Messe Hannover, abgedruckt in Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung, Gülzower Fachgespräche, Band 27, S.121 bis 145, 2008, Gülzow

Freguia et al. [2007]: Freguia S., Rabaey K. und Keller J., Competition and Interaction Between Fermentation and Electricity Generation at Microbial Fuel Cell Anodes, Tagungsband, Session PP4A – Microbial Fuel Cells 1, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion 23-27 September 2007 Brisbane, Australien

Fricke et al. [2007]: Fricke K., Santen H., Bahr T. und Hüttner A., Status Quo und Entwicklungspotenzial der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung – mit besonderer Berücksichtigung der Vergärung und der energetischen Verwertung, Biogas 2007 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 1983, S. 115-128, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-091983-6, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf

Friedl [2007]: Friedl A., Eigenschaften von Ethanol und Möglichkeiten der Verwendung, Ethanol-Tagung in St. Pölten, 19.06.2007, http://ethanol.agrarplus.at/unterlagen/friedl.pdf

Früh et al. [2009]: Früh K.F., Maier U. und Schaudel D. (Hrsg.), Handbuch der Prozessautomatisierung – Prozesleittechnik für verfahrenstechnische Anlagen, 4. Auflage, ISBN 978-3-8356-3142-7, Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland

FTD [2011]: Computerkriminalität – Siemens-Anlagen stehen Hackern meilenweit offen, Financal Times Deutschland (FTD), 5. August 2011, http://www.ftd.de/it-medien/computer-technik/:computerkriminalitaet-siemens-anlagen-stehen-hackern-meilenweit-offen/ 60087951.html, G+J Wirtschaftsmedien AG & Co. KG, Hamburg, Deutschland

Fuhrmann [2010]: Fuhrmann K., Qualitätssicherung in der Betriebsanalytik jetzt auch für Prozessmesstechnik, Fachseminar zur Betriebsoptimierung „Laboranalytik und Prozess-Messtechnik“, Seminarunterlagen, Hach Lange GmbH, 2. Dezember 2010, Düsseldorf-Neuss, Deutschland

Fujita et al. [2005]: Fujita M., Tsuji K., Wada M. und Furumai H., Real-time estimation of readily- and slowly-biodegradable COD in influent using dynamic changes of ORP and pH in an A/O SBR, Proceedings, S. 805 – 812, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, 19.-21. September 2005, Krakau, Polen

Fux et al. [2003]: Fux C., Egli K., Roelof van der Meer J. und Siegrist H., EAWAG news 56, http://www.eawag.ch/publications/eawagnews/www_en56/en56d_screen/en56d_fux_s.pdf, S. 20f, EAWAG Eidgenössische Anstalt für Wasser, Abwasser und Gewässerschutz, Schweiz

FZEE [2006]: Feldstudie „Biogasanlagen in Bayern“, Abschlussbericht (Nr. 2006-09-20), ForschungsZentrum für Erneuerbare Energien, Neuburg an der Donaum Deutschland

Gadhamshetty et al. [2008]: Gadhamshetty V., Johnson D., Nirmalakhandan N., Smith G. und Deng S., Adapting ADM1 Model for Biohydrogen Studies, Session 3A: Hydrogen production, 26. Mai 2008, Proceedings, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Gaida [2011]: Gaida D., Optimale Betriebsführung von Biogasanlagen mit prozessbegleitender Simulation, Workshop „Steuerung, Regelung und Simulation von Biogasanlagen“ des IFAK e.V., Foliensatz, 17. Mai 2011, Magdeburg, Deutschland

Gaida et al. [2013]: Gaida D., Wolf C. und Bongards M., Regelung der Substratzufuhr von Biogasanlagen – Ein Review, Workshop „Steuerung, Regelung und Simulation von Biogasanlagen“ des IFAK e.V., Foliensatz, 28. Mai 2013, Leipzig, Deutschland

Galí et al. [2008]: Galí A., Dosta J., López-Palau S. und Mata-Álvarez J., SBR Technology for High Ammonium Loading Rates, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 217-223, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Galí et al. [2005A]: Galí A., Dosta J. und Mata-Álvarez J., Optimisation of nitrification-denitrification process in a SBR for the treatment of reject water via nitrite, Proceedings, S. 925 – 932, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, 19.-21. September 2005, Krakau, Polen

Galí et al. [2005B]: Galí A., Dosta J., Macé S. und Mata-Álvarez J., Comparision of reject water treatment with Nitrification/Denitrification via nitrite in SBR and SHARON chemostat process, Proceedings, S. 1409 – 1413, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, 19.-21. September 2005, Krakau, Polen

Gallent [1999]: Gallent, W., Ausführung von SBR-Anlagen für Mischabwasser, Wasser Abwasser Praxis (WAP), Heft 4, S. 27-32, 1999, Bertelsmann Fachzeitschriften GmbH, Gütersloh, Deutschland

Gamper [2011]: Gamper M., Externe Überwachung wesentlicher Prozessparameter von Biogasanlagen – Aufbau eines professionellen Monitoringsystems für Biogasanlagen, ISBN 978-3-639-31503-5, VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, Deutschland

Gäth [2011]: Das Projekt „Biogasanlage Hauneck-Bodes mit angegliederter Algenzuchtanlage“, Präsentation, Januar 2011, Deutschland

Geisler und Beyerer [2010]: Geisler J. und Beyerer J. (Hrsg.), Mensch-Maschine-Systeme, Wissenschaftlichen Kolloqium 5. März 2009, Fraunhofer IITB, Karlsruher Schriften zur Anthropolomatik, Band 3, ISBN 978-3-86644-457-7, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, Deutschland

Gerardi [2010]: Gerardi M. H., Troubleshooting the Sequencing Batch Reactor, Wastewater Microbiology Series, ISBN 978-0-470-05073-6John Wiley & Sons Inc. Publication, Hoboken, USA

Gerber [2010]: Gerber M., Modellierung des Biogasbildungsprozesses – Stoffliche und energetische Bilanzierung, ISBN 978-3-8381-1572-6, Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften AG & Co. KG, Saarbrücken, Deutschland

Gevatter [1999]: Gevatter H.-J. (Hrsg.), Handbuch der Meß- und Automatisierungstechnik, ISBN 3-540-59135-4, Springer Verlag, Heidelberg, Deutschland

Goettemoeller und Goettemoeller [2007]: Goettemoeller J. und Goettemoeller A., Sustainable Ethanol, ISBN 978-0-9786293-0-4, Prairie Oak Publishing, Maryville, USA

Göller und Nacke [2012]: Göller A. und Nacke T., Mikrowellen-TS-Sensorik für Biogassubstrate – praktische Einsatzfälle, Foliensatz und Manuskript, 2. VDI-Konferenz „Prozessmesstechnik an Biogasanlagen“, VDI-Wissensforum, ISBN 978-3-942980-99-9, 9./10. Oktober 2012, Fulda, Deutschland

Görisch und Helm [2006]: Görisch U. und Helm M. (Hrsg.), Biogasanlagen – Planung, Errichtung, Betrieb von landwirtschaftlichen und industriellen Biogasanlagen, ISBN 978-3-8001-483-8, Eugen Ulmer KG, Stuttgart, Deutschland

Graves und Batchelor [2003]: Graves M. und Batchelor B. (Hrsg.), Machine Vision for the Inspection of Natural Products, ISBN 1-85233-525-4, Springer Verlag, London, Großbritannien

Gren et al. [2008]: Gren J., Konkarikoski K. und Ritala R., Optimal quality measurement schedule for a paper machine, S. 37 - 44, Modelling and Simulation of Wet End Processes and Innovative Process Control, Cost E36 Modelling and Simulation in the Pulp & Paper Industry, Kappen J., Dietz W. und Grenz R. (Hrsg.), ISBN: 978-3-8334-7619-8, Books on Demand, Norderstedt, Deutschland

Grobrügge [2011]: Grobrügge H., European Biogas Association, 20. Biogasjahrestagung, Workshop 4 – Potenziale und Chancen verschiedener Exportmärkte, Nürnberg, Fachverband Biogas e.V., Deutschland

Grube [2011]: Grube M., Ein neues Konzept zur Diagnose elektrochemischer Sensoren am Beispiel von pH-Glaselektroden, Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Informatik/Automatisierungstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Band 29, KIT Scientific Publishing, ISBN 978-3-86644-705-9, Karlsruhe, Deutschland

Grundacker [2002]: Grundacker F., Untersuchung der Schlammstabilisierung bei diskontinuierlich belüfteten Belebungsanlagen bei tiefen Temperaturen, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz, Band 40, Österreich

Grüning [2002]: Grüning H., Ein Modell zur simultanen Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage unter Berücksichtigung resultierender Gewässerbelastungen, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum

Guisasola et al. [2005]: Guisasola A., Pijuan M., Baeza J.A., Carrera J. und Lafuente J., Improving the start-up of an EBPR system using OUR to control the aerobic phase length: a simulation study, Proceedings, S. 69-76, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Günther et al. [2011]: Günther L., Hofmann J. und Mikow U., BCM-Biogastest-1000 zur Bestimmung der maximalen Biogas- und Biomethanausbeute, gwf Gas Erdgas, 152. Jahrgang 2011, Heft 7-8, S. 454-457, ISSN 0016-4909, Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland

Günthert und Reicherter [2001]: Günthert F.W. und Reicherter E., Investitionskosten der Abwasserentsorgung, 2001, Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland

Guo et al. [2008]: Guo J., Peng Y., Yang Q., Wang S., Chen Y. und Zhao C., Theoretical Analysis and Enhanced Nitrogen Removal Performance of Step-Feed SBR, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 249-257, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Gustavsson et al. [2008]: Gustavsson D. J. I., Nyberg U. und la Cour Jansen J., Operation for nitritation of sludge liquor in a full-scale SBR, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 19-26, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Gujer [2002]: Gujer W., Siedlungswasserwirtschaft, 2. Auflage, ISBN 3-540-43404-6, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, Deutschland

Gwodzek [2007]: Gwodzek M., Lexikon der Videoüberwachungstechnik – Planung, Beratung, Installation, 4. überarbeitete Auflage, ecomed Sicherheit Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, ISBN 978-3-609-68432-1, Heidelberg, Deutschland

Hach [2011]: Homeland Security Technologies – Water quality and security from source to tap, http://hachhst.com/wp-content/uploads/2010/07/GUARDIANBLUE-BROCHURE.pdf, Hach Company, USA

Hach Lange [2011A]: AN-ISE sc Kombinationssensor für Ammonium und Nitrat, DOC 053.72.35007.Jan11, http://www.hach-lange.de/shop/action_q/download%3Bdocument/DOK_ID/14791221/type/pdf/lkz/DE/spkz/de/TOKEN/oOT82O9S06pwbpo6wLbcjWtl820/M/FBcFQw/DOC053.72.35007.Jan11.web.pdf, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2011B]: BioTector TOC-Messsystem "Einer für alles", Produktpräsentation, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2010]: Filtrax, Betriebsanleitung, 11/2010, DOC023.72.03045, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2007]: Zusätzliche Software LINK2SC® für DR 3800, DOC022.98.90014, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2005A]: 3700 sc Induktiver Leitfähigkeitssensor, Betriebsanleitung, DOC023.72.00022.Jul05, 10/2005, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2005B]: pHD sc Digitaler pH/ORPDifferentialsensor Handbuch, 10/2005, DOC023.72.03251.Jun05, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2005A]: LDO Betriebsanleitung, DOC023.72.03212.Apr05, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2005B]: Arbeitsvorschrift LCK 365 Organische Säuren Küvetten-Test, LCK 365 50 – 2.500 mg/l CH3COOH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2005C]: Arbeitsvorschrift LCK 302 Ammonium Küvetten-Test, LCK 302 47 – 130 mg/l NH4-N, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2005D]: Arbeitsvorschrift LCK 514 CSB Küvetten-Test, LCK 514 100 – 2.000 mg/l CSB, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2003A]: Arbeitsvorschrift LCK 303 Ammonium Küvetten-Test, LCK 303 2 – 47 mg/l NH4-N, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2003B]: Arbeitsvorschrift LCK 304 Ammonium Küvetten-Test, LCK 304 0,015 – 2 mg/l NH4-N, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2003C]: Prozessphotometer für Trübung und Feststoffgehalt SOLITAX, Bedienungsanleitung SOLITAX, DOC023.72.03108.Jul03, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2003D]: Arbeitsvorschrift LCK 339 Nitrat Küvetten-Test, LCK 339 0,23 – 13,5 mg/l NO3-N, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2003E]: Arbeitsvorschrift LCK 340 Nitrat Küvetten-Test, LCK 340 5 – 35 mg/l NO3-N, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2003F]: Arbeitsvorschrift LCK 341 Nitrit Küvetten-Test, LCK 341 0,015 – 0,6 mg/l NO2-N, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2003G]: Arbeitsvorschrift LCK 348 Phosphat (ortho/ges.) Küvetten-Test, LCK 348 0,5 – 5,0 mg/l PO4-P, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2003H]: Arbeitsvorschrift LCK 349 Phosphat (ortho/ges.) Küvetten-Test, LCK 349 0,05 – 1,5 mg/l PO4-P, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2003I]: Arbeitsvorschrift LCK 350 Phosphat (ortho/ges.) Küvetten-Test, LCK 350 2 – 20 mg/l PO4-P, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2003J]: Volitax Schlammvolumen-/SV-Index-Messung, Bedienungsanleitung, 01/2003, DOC023.72.03095.Jan03, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2002A]: Amtax Inter 2, Betriebsanleitung, 10/2002, DOC023.72.03107.OKT02, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2002B]: Phosphax compact – Prozess-Photometer, Bedienungsanleitung, DOC023.72.03102.Jan02, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2002C]: Sonatax plus - Schlammspiegel Sonde, Betriebsanleitung, 01/2002, DOC023.72.03100Jan02, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2001A]: UVAS plus/clear - Prozess-Sonden UV-Absorption, Bedienungsanleitung, DOC023.72.03066.Jul01, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [2001B]: Nitratax plus - Prozess-Sonde Nitrat, Bedienungsanleitung, BDA 372, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Hach Lange [1997]: Analytische Qualitätssicherung in der Betriebs-Analytik, Anwendungsbericht Ch. No. 52, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Häck [2007A]: Häck M., Messwertvalidierung als Grundlage moderner Regelungskonzepte, Proceedings, VDI/VDE-Jahrestagung „Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen: Konzepte – Erfahrungen – Trends“, VDI/VDE-Gesellschaft „Mess- und Automatisierungstechnik“, Tagung Wuppertal, November 2007, Deutschland

Häck [2007B]: Häck M., Messwertvalidierung als Grundlage moderner Regelungskonzepte, Foliensatz zum Vortrag, VDI/VDE-Jahrestagung „Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen: Konzepte – Erfahrungen – Trends“, VDI/VDE-Gesellschaft „Mess- und Automatisierungstechnik“, Tagung Wuppertal, November 2007, Deutschland

Häck et al. [2011]: Häck M., Simon J., Warnemünde S. und Seehaus T., Kostengünstige Prozessoptimierung durch den Einsatz standardisierter Steuer- und Regelmodule, Tagungsband, Mess- und Regelungstechnik in Abwassertechnischen Anlagen, Gemeinschaftstagung DWA/VDI/VDE, 25.10.2011 bis 26.10.2011, Fulda, Deutschland

Häck und Wiese [2006]: Häck M. und Wiese J., Trends in instrumentation, control and automation and the consequences on urban water systems, Water Science & Technology (WST), Vol. 54, No. 11-12, pp. 265-272, IWA Publishing, Großbritannien

Häck und Wiese [2005]: Häck M. und Wiese J., Wirtschaftlichkeit von Prozessmesstechnik zur Erfassung von Nährstoffparametern – Gestern – Heute – Morgen. VDI/VDE-Berichte 1890 Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen Konzepte – Erfahrungen – Trends, VDI/VDE-Gesellschaft „Mess- und Automatisierungstechnik“, Tagung Wuppertal, 22./23. November 2005, S. 241 – 248, ISBN 3-18-091890-X, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Haider [2009]: Haider P., Polen: 2.000 Biogasanlagen bis 2020, BIOGAS Journal 4/2009, S. 80, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Hamamoto et al. [1997]: Hamamoto, Y.; Tabata, S. and Okubo, Y., Development of the intermittent cyclic process for simultaneous nitrogen and phosphorus removal, Water Science and Technology, Vol. 35, No. 1, pp. 145-152, 1997, Pergamon by Elsevier Science Ltd., Großbritannien

Han und Eom [2005]: Han D.Y. und Eom T.K., Thermal, ultrasonic and alkaline co-pretreatment for an enhanced acidogenic fermentation process with waste sludge, 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation (IWA-ICA 2005), Proceedings, S. 845-851, Busan, Südkorea

Hansson et al. [2002]: Hansson M., Nordberg M., Sundh I. und Mathisen B., Early warning of disturbances in a laboratory-scale MSW biogas process; Wat. Science and Technology, Vol. 45, No. 10, pp 255 – 260, Großbritannien

Hartmann und Döhler [2011]: Hartmann S. und Döhler H., Lohnt die Zuckerrübenvergärung, BIOGAS Journal 2/2011, S. 64-67, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

He et al. [2006]: He S., Liu F., Chen C. und Kong H., Improving the Performance of SBR by the Addition of Zeolite Powder, 5th IWA World Water Congress – Beijing 2006, Proceedings, Paper-No. 596747, Peking, China

Heim [2006]: Heim M. J., Füllstandsmesstechnik, atp Praxiswissen kompakt, Band 3, ISBN 3-486-63062-8, Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland

Heim et al. [2009]: Heim J., Wolf C., Bongards M. und Müller G., Die dynamische Bildanalyse – Neues Online-Messverfahren auf Kläranlagen, wwt wasserwirtschaft wassertechnik, Heft 4, S. 26-30, ISSN 1438-5716, huss medien, Berlin, Deutschland

Hellmann und Riegler [2003]: Hellmann D.-H. und Riegler G. (Hrsg.), Maschinentechnik in der Abwasserreinigung – Verfahren und Ausführung, ISBN 3-527-30606-4, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KG, Weinheim, Deutschland

Helmreich et al. [2000]: Helmreich B., Schreff D. and Wilderer P.A., Full scale experiences with small sequencing batch reactors in Bavaria, Wat. Sci. Tech. Vol.41, No.1, 89-96, 2000, Großbritannien

Henkelmann und Meyer zu Köcker [2011]: Henkelmann G. und Meyer zu Köcker K., Die Qualität von Labordienstleistungen – Ergebnisse aus Ringversuchen, 20. Biogas Jahres-tagung und Fachmesse, Workshop 6, 11.01.2011, Fachverband Biogas e.V., Deutschland

Hennig et al. [2007]: Hennig T., Grän-Heedfeld J. und Deerberg G., Simulation der Strömung in Fermentern von Biogasanlagen, Chemie Ingenieur Technik, 2007, Jahrgang 79, No. 5, S. 643 – 650, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Deutschland

Hennig et al. [2006]: Hennig T., Grän-Heedfeld J. und Deerberg G., Simulation der Strömung in Fermentern von Biogasanlagen, Chemie Ingenieur Technik, 2006, Jahrgang 78, No. 12, S. 1859 – 1863, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Deutschland

Henze et al. [2000]: Henze M., Gujer W., Mino T. and Van Loosdrecht M.C.M., Activated Sludge Models ASM 1, ASM 2, ASM 2 d and ASM 3, IWA Scientific and Technical Report No. 9, IWA Publishing, London, Großbritannien

Herbes [2009]: Herbes C., Besondere Herausforderungen des Betriebs von Biogasanlagen in industrieller Dimension – Praxiserfahrungen aus industriell betriebenen Anlagenparks, Biogas 2009 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 2057, S. 137-154, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-092057-3, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf

Herbrich [2004]: Herbrich R., Stellventile, atp-Praxiswissen kompakt, Band 1, Oldenbourg Industrieverlag, ISBN 3-486-63055-5, Deutschland

Herter [2011]: Herter A., Großbritannien – Biogasindustrie im Aufbruch, BIOGAS Journal 4/2011, S. 100 - 101, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Hessenrecht [2010]: Abwassereigenkontrollverordnung (EKVO) des Landes Hessen vom 23. Juli 2010, Gesamtausgabe in der Gültigkeit vom 15.07.2011 bis 31.12.2015, http://www.rv.hessenrecht.hessen.de/jportal/portal/t/1okp/page/bshesprod.psml/action/portlets.jw.MainAction?p1=0&eventSubmit_doNavigate=searchInSubtreeTOC&showdoccase=1&doc.hl=0&doc.id=jlr-EigenkontrollVHE2010rahmen&doc.part=R&toc.poskey=#focuspoint

Hidaka et al. [2007]: Hidaka T., Hong F. und Tsuno H., Mathematical model for thermophilic anaerobic co-digestion of kitchen waste and sewage sludge, Tagungsband, Poster Session PT03 – Modelling, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Hilgers und Vogel-Heuser [2003]: Hilgers C. und Vogel-Heuser B. (Hrsg.), Interfaces in der Prozessautomatisierung – Projektierung - Explosionsschutz – Installationssysteme, ISBN 3-486-27040-0, Oldenbourg Industrie Verlag, München, Deutschland

Hill und Barth [1977]: Hill D. T. und Barth C. L., A Dynamic Model for Simulation of Animal Waste Degistion, in Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 10, S. 2129 - 2143 (zitiert in Gerber [2010])

Hinken et al. [2008]: Hinken L., Urban I., Haun E., Weichgrebe D. und Rosenwinkel K.-H., The Valuation of Malnutrition in the Mono-Digestion of Maize Silage by Anaerobic Batch Tests, Session 2A: Microbiology and basics of anaerobic process, 26. Mai 2008, Proceedings, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

HMUELV [2011]: Arbeitshilfe zur Verminderung der Phosphoremissionen aus kommunalen Kläranlagen, http://www.hmuelv.hessen.de/irj/HMULV_Internet?cid=e7842632fd81104badd2aaa8998526ef, Hessisches Ministerium für Umweltschutz, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Deutschland

HMUIRV [2006]: Biogas Hessen, Hessisches Ministerium für Umweltschutz, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, ISBN 3-89274-249-9, Deutschland

Hoffmann und Biermann [2004]: Hoffmann J. und Biermann J., Das Konzept Messfehler, in Taschenbuch der Messtechnik, 4. Auflage, J. Hoffmann (Hrsg.), ISBN 3-446-22860-8, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, Deutschland

Hoogen [2012]: Hoogen N., Prozessdaten Monitoring – Eine wesentliche Voraussetzung für die kontinuierliche Prozessoptimierung – Erfahrungen eines Anlagenbetreibers, Foliensatz und Manuskript, 2. VDI-Konferenz „Prozessmesstechnik an Biogasanlagen“, VDI-Wissensforum, ISBN 978-3-942980-99-9, 9./10. Oktober 2012, Fulda, Deutschland

Hoogendoorn und van Kasteren [2011]: Hoogendoorn A. und van Kasteren H., Transportation Biofuels – Novel Pathways for the Production of Ethanol, Biogas and Biodiesel, RSC Green Chemistry Series, ISBN 978-1-84973-043-3, Royal Society of Chemistry Publishing (RSP), Cambridge, Großbritannien

Holm et al. [2000]: Holm N.C., Schönfeld A., Lünenschloß H. und Mennerich A., Betriebs- und großtechnische Versuchsergebnisse mit dem DIC-SBR-Verfahren auf der Kläranlage Bruchmühlen, KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall (vormals: KA – Korrespondenz Abwasser), Jahrgang 47, Nummer 1, S. 73-81, 2000, GFA, Bad Hennef, Deutschland

Homann und Hüning [1997]: Homann K. und Hüning R. (Hrsg.), Handbuch der Gasrohrleitungstechnik, 2. Auflage, ISBN 3-486-26109-6, R. Oldenbourg Verlag, München, Deutschland

Horatschek [2008]: Horatschek R., Die Biogasanlage – Eine wirtschaftliche Betrachtung, ISBN 978-3-639-07304-1, VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, Deutschland

Horn [2009]: Horn S., Seaweed Biofuels – Production of Biogas and Bioethanol from Brown Macroalgae, ISBN 978-3-639-15307-1, VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, Deutschland

HSGSim [2008]: Hochschulgruppe "Erfahrungsaustausch Dynamische Simulation in der Siedlungswasserwirtschaft", Arbeitsgruppe Integrierte Modellierung, Integrierte Modellierung von Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer - HSG-Leitfaden der Arbeitsgruppe Integrierte Modellierung (Hrsg.), http://www.hsgsim.org/downloads/hsgsim2008.pdf, Deutschland

Hsieh et al. [2008]: Hsieh C., Wang C., Yu Y., Tan S. und Chou C., Performances of different acclimated sludges for treating TFT-LCD wastewater, Poster Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 9-12, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Hwu et al. [2005]: Hwu C.S., Wu Y.S. und Huang C.H., An automated multi-channel system for real-time monitoring of anaerobic biodegradability and activity, 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation (IWA-ICA 2005), Proceedings, S. 843-844, Busan, Südkorea

Iaconi et al. [2008]: Di Iaconi C., Del Moro G., De Sanctis M. und Ramadori R., Technological transfer to demonstrative scale of SBBGR technology for municipal wastewater treatment, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 329-366, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

IBBK [2006]: Berechnungs-CD mit Software zur Auslegung von Biogasanlagen, Internationales Biogas und Bioenergie Kompetenzzentrum (IBBK), Fachgruppe Biogas, Kirchberg/Jagst, Deutschland

IFA [2011]: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), GESTIS-Stoffdatenbank - Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, http://biade.itrust.de/biade/lpext.dll?f=templates&fn=main-hit-h.htm&2.0

IFAK [2005]: IFAK System GmbH, *Benutzerhandbuch SIMBA 6*, 2008, Magdeburg

IFEU [2006]: Klinski S., Studie Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz, Institut für Energie und Umwelt gGmbH, Leipzig, Deutschland

Inui et al. [2005]: Inui T., Tanaka Y., Okayasu Y. und Tanaka H., Quantification of immobilized microbial membrane activity and the improvement of sensitivity for toxicants in biosensors using nitrifying bacteria, Proceedings, S. 387-394, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Irizar et al. [2008]: Irizar I., Alferes J., Larrea L. und Ayesa E., Design, implementation and experimental validation of a real-time control architecture for nitrogen removal in SBR systems, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 171-178, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Irvine und Davis [1971]: Irvine R.L. und Davis W.B., Use of sequencing batch reactors for waste treatment, in CPC International, Corpus Christi, Texas, 26th Annual Purdue Industrial Waste Conference, Purdue University, pp. 450-462, West Lafayette: Ann Arbor Science Publication, zitiert in IWA [2001]

Irvine und Irvine [2008]: Irvine D.A. und Irvine R.L., Retrofit of the Kinnegar, Northern Ireland to SBR Control and Operation, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 3-10, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

ISA RWTH [2011]: BMBF/BMU Förderinitiative "Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor", http://www.phosphorrecycling.de/, Internetinformationsplattform des ISA – Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Deutschland

IWA [2005]: Anaerobic Digestion Model No. 1, Scientific and Report No. 13, 1. Auflage, ISBN: 1-900222-78-7, IWA Publishing, Großbritannien

IWA [2002]: Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1), IWA Task Group for Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes, ISBN 9781900222785, IWA Publishing, Großbritannien

IWA [2001]: Sequencing Batch Reactor Technology, Wilderer P.A., Irvine R.L. und Goronszy M.C., ISBN 9781900222211, Scientific and Technical Report Nr. 10, 2001, International Water Association (IWA), IWA Publishing, Großbritannien

IWA [2000]: Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, The IWA Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment, ISBN 9781900222242, IWA Publishing, Großbritannien

Jacobi [2012]: Jacobi F., Nahinfrarotspektroskopie an Biogasanlagen, Foliensatz und Manuskript, 2. VDI-Konferenz „Prozessmesstechnik an Biogasanlagen“, VDI-Wissensforum, ISBN 978-3-942980-99-9, 9./10. Oktober 2012, Fulda, Deutschland

Jacobi et al. [2009]: Jacobi F., Moschner C. und Hartung E., Use of near infrared spectroscopy in monitoring of volatile fatty acids in anaerobic digestion, OP01-5, Proceedings, 10th IWA International Conference on Instrumentation, Control and Automation, Cairns, Australien

Jabobi et al. [2008]: Jacobi H.F., Andree H., Thiessen E. und Hartung E., NIRS-Online-Monitoring of the Biogas Process, Session 2B: Bioreactor and biogas technology, 26. Mai 2008, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Jäger et al. [2006]: Jäger P., Niebaum A. und Döhler H., Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen, Der Biogasrechner im Internet - ein Projekt mit der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Tagungsunterlagen, ETH EnergieTage Hessen 2006, 18.11.2006, Wetzlar, Deutschland

Jami et al. [2012]: Jami M.S., Husein A.F., Kabashi N.A. und Abdullah N., Multiple Inputs Artificial Neural Networks Model For The Prediction Of Wastewater Treatment Plant Performance, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, No. 6 (1), S. 62-69, ISSN 1991-8178, Download: http://www.ajbasweb.com/ajbas/2012/January/62-69.pdf, Australien

Janssen et al. [2010]: Janssen M., Chambost V. und Stuart P., Choice of a Sustainable Forest Biorefinery Product Platform Using an MCDM Method, S. 389 – 398, Proceedings of the Seventh International Conference on the Foundations of Computer-Aided Process Design, Design for Energy and Environment, ISBN 978-1-4398-0912-9, CRC-Press, Boca Raton, USA

Jáuregui-Medina et al. [2009]: Jáuregui-Medina E. A., Alcaraz-González V., Méndez-Acosta H. O. und González-Álvarez V., Observer-based input estimation in continuous anaerobic wastewater treatment processes, Proceedings, 10th IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 14-17 Juni 2009, Cairns, Australien

Jeanbourquin et al. [2011]: Jeanbourquin D., Sage D., Nguyen L., Schaeli B., Kayal S., Barry D.A. und Rossi L., Flow measurements in sewers based on image analysis: automatic flow velocity algorithm, S. 1108-1114, Vol. 64, No. 5, 2011, ISSN 0273-1223, Water Science and Technology, IWA Publishing, London, Großbritannien

Jenicek [2008]: Jenicek P., Keclik F., Maca J. und Bindzar J., Use of microaerobic conditions for the improvement of anaerobic digestion of solid wastes, Session 5A: Substrate pre-treatment, 27. Mai 2008, Proceedings, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Jernigan et al. [2010]: Jernigan R., Hansrote S., Ramey K., Richardson L. und Seay J., Developing Sustainable Chemical Processes to Utilize Waste Crude Glycerol from Biodiesel Produktion, S. 361 – 369, Proceedings of the Seventh International Conference on the Foundations of Computer-Aided Process Design, Design for Energy and Environment, ISBN 978-1-4398-0912-9, CRC-Press, Boca Raton, USA

Jiang [2011]: Jiang J., Acoustic Condition Monitoring in Industrial Environments – A book renewing your understanding of traditional condition monitoring, LAP Lambert Academic Publishing, ISBN 978-3-8454-1895-7, Saarbrücken, Deutschland

Jin et al. [2005]: Jin G.J., Kwak J.H., Kim M., Hyun M.S., Yoon T., Sung N.C., Kang D.H., Yi D.H. und Kim H.J., Novel Toxicity Monitoring System using Microbial Fuel Cells, Proceedings, S. 1011-1013, 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation (IWA-ICA 2005), Busan, Südkorea

Jockenhöfer [1999]: Jockenhöfer R. (Hrsg.), Armaturen in der Gas- und Wasserverteilung, ISBN 3-8027-5408-5, Vulkan-Verlag, Essen, Deutschland

Jordy und Pfaff [2007]: Jordy M. und Pfaff B., Leistungssteigerung von Kläranlagen durch Fuzzy-Logic-gestützte Reglersysteme, Tagungsunterlagen VDI/VDE-Jahrestagung „Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen: Konzepte – Erfahrungen – Trends“, VDI/VDE-Gesellschaft „Mess- und Automatisierungstechnik“, Tagung Wuppertal, November 2007, Deutschland

Jungkurth [2008]: Jungkurth M., Einsatz erneuerbarer Energien bei einem mittelständischen Unternehmen in Chile, ISBN 9783836457255, VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, Deutschland

Junne et al. [2012]: Junne S., Kielhorn E., Cruz-Bournazou M. N. und Neubauer P., Steuerungs- und Regelungskonzepte für den Einsatz an Biogasanlagen, Foliensatz und Manuskript, 2. VDI-Konferenz „Prozessmesstechnik an Biogasanlagen“, VDI-Wissensforum, ISBN 978-3-942980-99-9, 9./10. Oktober 2012, Fulda, Deutschland

Kaltschmitt und Hartmann [2001]: Kaltschmitt M. und Hartmann H. (Hrsg.), Energie aus Biomasse – Grundlagen; Techniken und Verfahren, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Deutschland

Kalyuzhnyi [2008]: Kalyuzhnyi S.V., Energy Potential of Anaerobic Digestion of Solid Wastes Generated in the Russian Federation, Proceedinsg, 5th International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops (ISAD-SW&EC 2008), 24.-28. Mai 2008, Hammamet, Tunesien

Kamm et al. [2011]: Kamm B., Gruber P. und Kamm M., Biorefineries – Industrial Processes and Products, Status Quo and Future Directions, ISBN 978-3-527-32952-3, Wiley-VCH, Weinheim, Deutschland

Kamm [2008]: Kamm B., Bioraffination – Systeme und Anlagen, Forschungsinstitut biopos e.V. und Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Foliensatz zum Vortrag, ZVEI Branchenworkshop „Bioraffinerien – Trends, Bedarfe und Zukunftsmärkte für die Automation bis 2020+“, Berlin, 5. September 2008, Deutschland

Kamm et al. [2007]: Kamm B., Gruber P. und Kamm M., Biorefineries – Industrial Processes and Products, Ullmann’s Encyclopädia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH (zitiert in *Kamm [2008]*), Deutschland

Kaparaju und Angelidaki [2007]: Kaparaju P. und Angelidaki I., Effect of post-treatment on biodegradability and methane recovery from fibres separated from thermophilically digested cow manure, Tagungsband, Poster Session PT01 – Organic Solids, 11th IWA World congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Karg [2009]: Karg U., Effiziente Überwachung der Schlammdichte am Tankfahrzeug, Tagungsband, S. 97 bis 112, 20. Magdeburger Abwassertage, ISBN 978-3-8107-0064-3, Magdeburg, Deutschland

Karlsson und Ejlertsson [2007]: Karlsson A. und Ejlertsson J., Addition of HCl as a means to improve biogas production from protein-rich substrates, Tagungsband, Poster Session PT01 – Bioenergy, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Katsogiannis et al. [1999]: Katsogiannis A.N., Kornaros M.E. und Lyberatos G.K., Adaptive optimization of a nitrifying sequencing batch reactor, Water Research, Vol. 33, No. 17, pp. 3569-3576, 1999, Pergamon by Elsevier Science Ltd., Großbritannien

Kawada et al. [2005]: Kawada T., Nakamichi K., Hisano N., Kitamura M. und Miyahara K., Cell-Phone Based Assistance for Waterworks/Sewage Plant Maintenance, Proceedings, S. 51-58, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Kayser [2001]: Kayser R., ATV-DVWK-Kommentar zum ATV-DVWK-Regelwerk, Bemessung von Belebungs- und SBR-Anlagen, 2001, GFA - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (Hrsg.), Hennef

Kayser [1995]: Kayser R., Bemessung von Belebungsanlagen im Aufstaubetrieb, Das Gas- und Wasserfach, Heft 12, S. 625-627, 1995

Kazmi und Furumai [2000]: Kazmi A.A. und Furumai H., Field investigations on reactive settling in an intermittent aeration sequencing batch reactor activated sludge process, Water Science and Technology, Vol. 41, No. 1, pp. 127-135, 2000, Pergamon by Elsevier Science Ltd., Großbritannien

Keitlinghaus [2011]: Keitlinghaus H., Gasmengen- und Durchflussmessung (Konzepte und Eignung für Biogasanlagen), Tagungsunterlagen, VDI – Biogastagung 2011, Braunschweig, Deutschland

Keller [2005]: Keller J., Sequencing Batch Reactor Processes for Biological Nutrient Removal, Proceedings, S. 245 – 256, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, 19.-21. September 2005, Krakau, Polen

Keudel und Dichtl [2000]: Keudel L. O. und Dichtl N., Settling Characteristics of Activated Sludge in Sequencing Batch Reactors obtained from Full-scale Experiences, Proc. 2nd International Symposium on Sequencing Batch Reactor Technology, Vol. 1, pp. 75-83, 2000, Narbonne, Frankreich

Keudel [2002]: Keudel L.O., Bestimmung des Absetzverhaltens von belebtem Schlamm zur Bemessung von Kläranlagen nach dem Sequencing Batch Reactor (SBR)-Verfahren, Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Braunschweig, Heft 67, 2002, Braunschweig, Deutschland

Keymer und Schilcher [2003]: Keymer A. und Schilcher U., Biogasanlagen: Berechnung der Gasausbeute von Kosubstraten, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Deutschland (zitiert in Gerber [2010])

Kim et al. [2009]: Kim Y. J., Yoom H. S., Choi S. J., Bae H. und Kim C.W., Sludge settleability detection using automated SV30 measurement and comparisons of feature extraction methods, ICA 2009 – 10th IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 14.-17.06.2009, Poster Proceedings on CD, Cairns, Australien

Kim et al. [2007]: Kim H. J., Nguyen D. X., Maeng J. W., Lee E. Y., Heo A. H., Bae J. H. und Kim Y. O., Comparisons of two sludge disintegration systems using cavitation, Tagungsband, Poster Session PT03 – Process Analysis, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Kim et al. [2005A]: Kim C., Park T.-J., Kim S., Woo H., Hwang I. und Oh J.-E., ICA and Water in Korea – Overview, Proceedings, S. 1-10, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Kim et al. [2005B]: Kim J.R., Ko J.H., Im J.H., Park T.J., Kim C.W. und Woo H.J., Forecasting influent flowrate and composition with occasional data for supervisory management system by time series model, Proceedings, S. 209-217, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Kim et al. [2005C]: Kim S., Bae H., Choi D.W. und Kim Y.J., Automatic Fault Detection of Equipment by Vibration Signal Analysis Using Time-Series Data Mining, Proceedings, S. 949-959, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Kirchmayr et al. [2008]: Kirchmayr R., Proell T., Resch C., Waltenberger R., Voitl G., Gabauer W., Braun R. und Grossfurtner R., Anaerobic Digestion of Slaughterhouse Wastes: A Mass- and Energy Balance as a Base for an Energy-Autarkical Abattoir, Session 9A: Anaerobic Digestion, 28. Mai 2008, Proceedings, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Kishida et al. [2008]: Kishida N., Tsuneda S., Sakakibara Y., Kim J.H. und Sudo R., Real-time control strategy for simultaneous nitrogen and phosphorus removal using aerobic granular sludge, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 339-346, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Kleinsteuber et al. [2012]: Kleinsteuber S., Koch C., Müller S., Nikolausz M. und Schmidt T., Mikrobiologische Messmethoden für die Prozesskontrolle, Foliensatz und Manuskript, 2. VDI-Konferenz „Prozessmesstechnik an Biogasanlagen“, VDI-Wissensforum, ISBN 978-3-942980-99-9, 9./10. Oktober 2012, Fulda, Deutschland

Koike et al. [2007]: Koike Y., Osaka N., Matsui T., Amano T., Field Test of Methane Fermentation Using Mixtures of Seaweeds and Waste Materials, Tagungsband, Poster Session PT01 – Organic Solids, 11th IWA World congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Kokossis und Yang [2010]: Kokossis A.C. und Yang A., Future System Challenges in the Design of Renewable Bio-energy Systems and the Synthesis of Sustainable Biorefineries, S. 107 – 123, Proceedings of the Seventh International Conference on the Foundations of Computer-Aided Process Design, Design for Energy and Environment, ISBN 978-1-4398-0912-9, CRC-Press, Boca Raton, USA

Kolodner [1993]: Kolodner J., Case-based Reasoning, 1993, Morgan Kaufmann

Komatsu et al. [2011]: Komatsu K., Yasui H., Goel R., Li Y. Y. und Noike T., Novel anaerobic digestion process with sludge ozonation for economically feasible power production from biogas, S.1467-1475, Vol. 64, No. 7, 2011, ISSN 0273-1223, Water Science and Technology, IWA Publishing, London, Großbritannien

Komatsu et al. [2007]: Komatsu K., Yasui H., Goel R., Li Y. Y. und Noike T., Mesophilic-thermophilic hybrid anaerobic digestion of municipal sludge using ozone, Tagungsband, Poster Session PT01 – Bioenergy, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Kopiske [2004]: Kopiske G., Dynamische Betriebsführung von Biogasanlagen – Prozess-kontrolle und Dialoge mit der Fermenterbiologie, Tagungsband, International Workshop „Anaerobic Technology & Biogas“, Deutschland

Kottmair [2011]: Kottmair A., Online-Überwachung der Alkalinität in Biogasanlagen, Tagungsunterlagen, VDI – Biogastagung 2011, Braunschweig, Deutschland

Köttner [2002]: Köttner M., Wenn die Anlage plötzlich streikt, S. 102 – 103, Biogas Strom aus Gülle und Biomasse – Technik, Management, Rendite, topAgrar Fachbuch, ISBN: 3-7843-3174-2, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, Deutschland

Kovacs und Fuchsz [2011]: Kovacs A. und Fuchsz M., Ungarns ungenutzte Potenziale, BIOGAS Journal 3/2011, S.90 - 91, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Krampe [2001]: Krampe J., Das SBR-Membranbelebungsverfahren, Dissertation, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 163, 2001, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Universität Stuttgart, Oldenbourg-Verlag, München, Deutschland

Kraslawski et al [1995]: Kraslawski A., Koiranen T. und Nyström L., Case-Based Reasoning System for Mixing Equipment Selection, Computers chem. Engineering, Vol. 19, Suppl., S. 821-826, Elsevier Science Limited, Großbritannien

Krassowski [2011]: Krassowski J., Expertensysteme zur Prozessbewertung bei Biogasanlagen, Tagungsunterlagen, VDI – Biogastagung 2011, Braunschweig, Deutschland

Kreuger et al. [2008]: Kreuger E., Escobar F., Prade T., Svensson S.-E. und Björnsson L., Biogas production from hemp – evaluation of the effect of harvest time on methane yield, Session 4B: Energy crops, 27. Mai 2008, Proceedings, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Krüger [2006]: Krüger U., Sensorik für regenerative Energie – Einige praktische Erfahrungen, Foliensatz, Expertentreffen „Messen, Steuern und Regeln auf Biogasanlagen“, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, 17.10.2006, Berlin, Deutschland

Kruse [2009]: Kruse O., Mikroalgen als Substrat für Biogasanlagen in einem Bioraffineriekonzept, Biogas 2009 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 2057, S. 285-286, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-092057-3, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf

KTBL [2009]: Schwachstellen an Biogasanlagen verstehen und vermeiden, KTBL-Heft 84, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) e.V. (Hrsg.), ISBN 978-3-939371-46-5, Darmstadt, Deutschland

KTBL [2007]: Faustzahlen Biogas, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (Hrsg.) e.V., ISBN 978-3-939371-46-5, Darmstadt, Deutschland

Kühnert [2006]: Kühnert A., Prozessstabilität von elektrochemischen H2S-Sensoren bei kontinuierlicher Messung, Foliensatz, Expertengespräch „Messen, Steuern, Regeln an Biogasanlagen“, 17.10.2006, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin, Deutschland

Kujawa [2005]: Kujawa K., Anaerobic treatment of concentrated wastewater in desar concepts, STOWA rapportnummer 2005-14, ISBN 90.5773.303.x, UTRECHT, Niederlande

Kujawski [2011]: Kujawski O., Gewinnen und Aufbereiten der Messdaten für Steuerung und Regelung von Biogasanlage, Workshop „Steuerung, Regelung und Simulation von Biogasanlagen“ des IFAK e.V., Foliensatz, 17. Mai 2011, Magdeburg, Deutschland

Lammersen [1997]: Lammersen R., Immissionsbezogene Anforderungen an die Stadtentwässerung, SuG 38, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover, Hannover, Deutschland

Langhans [2012]: Langhans G., Neue Erkenntnisse zur optimierten Prozessführung bei der hoch belasteten Trockenfermentation unter Berücksichtigung des EEG 2012 für die Anlagenplanung, 6. Rostocker Bioenergieforum, Juni 2012, Rostock, Deutschland

Langhans [2007]: Langhans G., Agrarreststoffe und Abprodukte der Biotreibstoffproduktion als Gärsubstrate, Biogas 2007 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 1983, S. 47-55, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-091983-6, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Langmann [2010]: Langmann R. (Hrsg.), Taschenbuch der Automatisierung, ISBN 978-3-446-42117-7, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, Deutschland

Lardon et al. [2005]: Lardon L., Puñal A., Martínez J.A. und Steyer J.P., Modular expert system for the diagnosis of operating conditions of industrial anaerobic digestion plants, Water Science and Technology, 52(1-2), S. 427-433, Großbritannien

LAWA [1994]: Leitlinien der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen, Hrsg., 1994, 5. Auflage, Deutschland

Lay et al. [2011]: Lay C.H., Chang F.Y., Chu C.Y., Chen C.C., Chi C.Y., Hsieh T.T., Huang H.H. und Lin C.Y., Enhancement of anaerobic biohydrogen/methane production from cellulose using heat-treated activated slude, S. 1849-1854, Vol. 64, No. 9, 2011, ISSN 0273-1223, Water Science and Technology, IWA Publishing, London, Großbritannien

Lebuhn [2012]: Lebuhn M., Molekularbiologische Quantifizierung – Ein neues Messkonzept zur Bewertung des Prozessstatus von Biogasanlagen, Foliensatz und Manuskript, 2. VDI-Konferenz „Prozessmesstechnik an Biogasanlagen“, VDI-Wissensforum, ISBN 978-3-942980-99-9, 9./10. Oktober 2012, Fulda, Deutschland

Lebuhn et al. [2008]: Lebuhn M., Liu F., Heuwinkel H. und Gronauer A., Biogas production from mono-digestion of maize silage – longterm process stability and requirements, Session 4B: Energy crops, 27. Mai 2008, Proceedings, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Lee et al. [2008]: Lee Y. H., Chung Y.-C. und Jung J.-Y., Effects of chemical and enzymatic treatments on the hydrolysis of swine wastewater, Session 5A: Substrate pre-treatment, 27. Mai 2008, Proceedings, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Lee et al. [2005A]: Lee J.H., Yun C.H., Niazi J.H., Mitchell R.J., Kim B.C. und Gu M.B., Bioluminescent Cell Array Biosensors for Water Toxicity Analysis, Proceedings, S. 1047-1052, 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation (IWA-ICA 2005), Busan, Südkorea

Lee et al. [2005B]: Lee D.S., Lee M.W., Woo S.H. und Park J.M., Nonlinear kernel partial least squares modeling of a full-scale industrial anaerobic filter process, Proceedings, S. 939-947, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Lefebvre et al. [2007]: Lefebvre O., Al-Mamun A. und Ng H. Y., A compact and cost-effective microbial fuel cell for treatment of domestic and acetate wastewater, Tagungsband, Session PP4A – Microbial Fuel Cells 1, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion 23-27 September 2007 Brisbane, Australien

Lens et al. [2004]: Lens P., Hamelers B., Hoitink H. and Bidlingmaier W. (Hrsg.). Resource Recovery and Reuse in Organic Solid Waste Management, Integrated Environmental Technology Series, ISBN 1-84339-054-X, IWA Publishing, Großbritannien

Liang et al. [2007]: Liang D.W., Zhang T. und Fang H.H.P, Real-time quantifications of dominant anaerobes in an upflow reactor by polymerase chain reaction using a TaqMan probe, Session PP6C – Microbial Diversity 2, Tagungsband, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Li et al. [2010]: Li X., Singh A. und Lou H., Assessment of Regional Sustainability Associated with Biofuel Production, S. 531 – 550, Proceedings of the Seventh International Conference on the Foundations of Computer-Aided Process Design, Design for Energy and Environment, ISBN 978-1-4398-0912-9, CRC-Press, Boca Raton, USA

Li et al. [2007]: Li D.W., Gao X.P., He X.M., Xu Z.H. und Lan T., Experimental Study on Chinese Pharmacy Wastewater Treated by Two-Phase Anaerobic, Tagungsband, Poster Session PT03 – Recalcitrants, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Li et al. [2005]: Li J., Gu G.W., Wu S., Peng Y.Z. und Chi W.Q., Simultaneous nitrification-denitrification and control in a sequencing batch biofilm reactor, Proceedings, S. 1139-1146, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Liebetrau et al. [2012]: Liebetrau J., Mauky E. und Jacobi H. F., Prozesssimulation: Erkennen und Stabilisieren von Prozessstörungen an Praxisanlagen, Foliensatz und Manuskript, 2. VDI-Konferenz „Prozessmesstechnik an Biogasanlagen“, VDI-Wissensforum, ISBN 978-3-942980-99-9, 9./10. Oktober 2012, Fulda, Deutschland

Liebetrau [2006]: Liebetrau J., Regelungsverfahren für die anaerobe Behandlung von organischen Abfällen, Dissertation, Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Deutschland

Lim et al. [2005]: Lim B.S., Huang W.Z. und Kim H., Modelling of a Two-Reactor SBR System for Nitrogen and Phosphorus Removal Using a Simplified ASM2d, Proceedings, S. 1161-1163, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

LimnoTec [2007]: Prozesswasserbehandlungsanlage Gemüse-Meyer, http://www.limnotec.de/downloads/deutsche%20Prospekte/Gemüse-Meyer%20deutsch.pdf, LimnoTec Abwasseranlagen GmbH, Hille, Deutschland

Lin und Guiot [2007]: Lin M. und Guiot S.R., Comparison of hydrogen fermentative production from glucose by mixed culture at pH 4.0 and 5.5, Tagungsband, Session PP6A – Biohydrogen 1, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Lindenblatt et al. [2008]: Lindenblatt C., Wichern M., Yolkina A., Arab H. und Horn H., Activated pre-clarifier and sand filtration - Treatment of nitrogen rich wastewater from a biogas plant, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 425-432, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Lindorfer [2012]: Lindorfer H., Praxisbeispiele umgesetzter Messkonzepte an Biogasanlagen, Foliensatz und Manuskript, 2. VDI-Konferenz „Prozessmesstechnik an Biogasanlagen“, VDI-Wissensforum, ISBN 978-3-942980-99-9, 9./10. Oktober 2012, Fulda, Deutschland

Lindqvist et al. [2005]: Lindqvist J., Wik T., Lumley D. und Äijäla G., Influent load prediction using low order adaptive modelling, 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation (IWA-ICA 2005), Proceedings, S. 887-894, Busan, Südkorea

Linke et al. [2008]: Linke B., Mähnert P. und Vollmer G.-R., Kinetik der Biogasgewinnung, 15. November 2007, Convention Center Messe Hannover, abgedruckt in Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung, Gülzower Fachgespräche, Band 27, S. 100 bis 120, 2008, Gülzow, Deutschland

Linke und Mähnert [2005]: Linke B. und Mähnert P., Einfluss der Raumbelastung auf die Gasausbeute von Gülle und Nachwachsenden Rohstoffen. Tagungsband. Fachverband Biogas, Deutschland

Liu [2008]: Liu Y. (Hrsg.), Wastewater Purification – Aerobic Granulation in Sequencing Batch Reactors, ISBN 978-1-4200-5367-8, CRC Press, Boca Raton, USA

Liu et al. [2007]: Liu D.W., Zeng R.J. und Angelidaki I., Enrichment and adaptation of extreme-thermophilic (70 °C) H_2 producing bacteria to organic household solid waste by repeated batch cultivations, Tagungsband, Session PP7A – Biohydrogen 2, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Liu et al. [2005]: Liu J., Olsson G. und Mattiasson B., Extremum-seeking with variable gain control for intensifying biogas production in anaerobic fermentation, Proceedings, S. 277-285, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Liu und Pistikopoulos [2010]: Liu P. und Pistikopoulos E.N., Environmentally Benign Process Design of Polygeneration Energy Systems, S. 585 – 592, Proceedings of the Seventh International Conference on the Foundations of Computer-Aided Process Design, Design for Energy and Environment, ISBN 978-1-4398-0912-9, CRC-Press, Boca Raton, USA

Lodde und Charatjan [2007]: Lodde C. und Charatjan M., Optimierung der Stickstoffelimination durch Einsatz einer intelligenten Regelung, Tagungsunterlagen VDI/VDE-Jahrestagung „Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen: Konzepte – Erfahrungen – Trends“, VDI/VDE-Gesellschaft „Mess- und Automatisierungstechnik“, Tagung Wuppertal, November 2007, Deutschland

Loewen et al. [2011]: Loewen A., Ganagin W., Loewe K. und Wallmann R., Flexibel genug für Spitzenlast, BIOGAS Journal 2/2011, S. 82-85, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Loibl et al. [2010]: Loibl H., Maslation M. und von Bredow H. (Hrsg.), Biogasanlagen im EEG, 2., Auflage, Erich Schmidt Verlag, Berlin, Deutschland

Londong und Sauer [2001]: Londong, J. und Sauer, S., *MSR-Konzepte für Kläranlagen – Stand der Technik*, KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall (ehemals KA - Korrespondenz Abwasser), Heft 6/2001, 48. Jahrgang, S. 778-785, GFA - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (Hrsg.), Hennef, Deutschland

López et al. [2008]: López H., Ruscalleda M., Puig S., Ganigué R., Balaguer M. D. und Colprim J., pH control outcome as indicator of anammox SBR activity, Poster Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 91-94, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

López de Mántaras und Saitta [2004]: López de Mántaras R. und Saitta L. (Hrsg.), ECAI 2004 - 16th European Conference on Artificial Intelligence, Valencia, Spanien, 22-27 August 2004, Proceedings, ISBN 1-58603-452-9, IOS Press, Amsterdam, Niederlande

Lossie und Pütz [2008]: Gezielte Steuerung von Biogasanlagen mittels FOS/TAC, Praxisbericht Laboranalytik-Titration-FOS/TAC, DOC042.72.20011.Mar08, 03/2011, http://www.hach-lange.de/shop/action_q/download%3Bdocument/DOK_ID/14785860/type/pdf/lkz/DE/spkz/de/TOKEN/34Sgo1RPH2yaN-J5daxsqnqZ4hU/M/BIzeDw/DOC042.72.20011.Mar08.web.pdf, Hach-Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Lube [2007]: Lube T., Möglichkeiten zur Nutzung von Abwärme aus Biogasanlagen, Salzwasser Verlag, 1. Auflage, ISBN 978-3-86741-035-9, Deutschland

Lü et al. [2008]: Lü F., He P. J., Hao L. P. und Shao L. M., Impact of Recycled Effluent on the Hydrolysis during Anaerobic Digestion of Vegetable and Flower Waste, Session 4A: Modelling and Control, 27. Mai 2008, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Lübken et al. [2011]: Lübken M., Gehring T. und Wichern M., Modifikationen und Anpassung des ADM1 für die Simulation von feststoffvergärendeSimulation feststoffvergärenden Biogasanlagen, Workshop „Steuerung, Regelung und Simulation von Biogasanlagen“ des IFAK e.V., Foliensatz, 17. Mai 2011, Magdeburg, Deutschland

Luccarini et al. [2008]: Luccarini L., Mello P., Sottara D. und Spagni A., Artificial Intelligence based rules for event recognition and control applied to SBR systems, Poster Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 155-158, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Lyberatos und Skiadas [1999]: Lyberatos G. and Skiadas I. V., Modelling of anaerobic Digestion – A Review; Global Nest the Int. J. Vol. 1, No 2, pp 63-76, 1999

Macé et al. [2005]: Macé S., Gambús M., Dosta J. und Mata-Alavarez J., Optimisation of the nitrogen removal in a Sequencing Batch Reactor treating supernatant from the anaerobic digestion of Municipal Solid Wastes, Proceedings, S. 1185 – 1190, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, 19.-21. September 2005, Krakau, Polen

Mackensen et al. [2008]: Mackensen R., Rohrig K. und Emanuel H., Das Regenerative Kombikraftwerk, Abschlussbericht, http://www.kombikraftwerk.de/fileadmin/downloads/2008_03_31_Ma__KombiKW_Abschlussbericht.pdf

Magrí und Flotats [2008]: Magrí A. und Flotats X., Treating the liquid fraction of pig slurry in a sequencing batch reactor by nitrification-denitrification: model calibration, Poster Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 99-103, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Mähnert [2008]: Mähnert P., Kinetik der Biogasproduktion – Neue Erkenntnisse zur Bemessung von Biogasanlagen auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen, VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, ISBN 978-3-8364-9349-9, Deutschland

Mangels [2012]: Mangels T., Dynamische Prozessregelung mittels ISE-Sensoren senkt Energiekosten, S. 1954 – 1957, KA-Betriebsinfo, 42. Jahrgang, Nr. 2/2012, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland

Maier und Tauchnitz [2009]: Maier U. und Tauchnitz T., Prozessleitsysteme und SPS-basierte Leitsysteme, atp Praxiswissen kompakt, Band 6, ISBN 978-3-8356-8083-3, Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland

Mailleret et al. [2003]: Mailleret L., Bernard O. und Steyer J.P., Robust regulation of anaerobic digestion processes; Water Science and technology, Vol. 48, No. 6, pp 87 – 94, Großbritannien

Maier [2011]: Maier H.P., Ethylen aus Methan statt Rohöl, S. 18-19, Endress+Hauser kurier 2/2011, Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG, Weil am Rhein, Deutschland

Majone et al. [2008]: Majone M., Dionisi D., Villano M. und Beccari M., Effect of pH on the production of poly-hydroxyalkanoates by mixed cultures enriched under periodic feeding, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 43-50, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Martínez et al. [2004]: Martínez M., Sànchez-Marrè M., Comas J. und Rodríguez-Roda I., Case-Based Reasoning, a promising tool to face solids seperation problems in the activated sludge process, Workshop 23: Binding Environmental Sciences and Artificial Intelligence, Proceedings, S. 11-1 bis 11-5, 16th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2004), 23.-27. August 2004, Valencia, Spanien

Martinez-Sosa et al. [2007]: Martinez-Sosa D., Torrijos M., Buitron G., Sousbie P., Devillers P.H. und Delgenès J.P., Anaerobic SBR applied to the treatment of a fatty solid waste: Start-up period and establishment of the design criteria, Tagungsband, Session PP8C – Organic Solids 2, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Marwala [2012]: Marwala T., Condition Monitoring Using Computational Intelligence Methods – Application in Mechanical and Electrical Systems, ISBN 978-1-4471-2379-8, Springer Verlag, London, Großbritannien

Mato et al. [2008]: Mato T., Ben M., Kennes C. und Veiga M. C., PHA production using brewery wastewater, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 59-66, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

McAdam et al. [2011]: McAdam E.J., Lüffler D., Martin-Garcia N., Eusebi A.L., Lester J.N., Jefferson B. und Cartmell E., Integrating anaerobic processes into wastewater treatment, S. 1459-1466, Vol. 64, No. 7, 2011, ISSN 0273-1223, Water Science and Technology, IWA Publishing, London, Großbritannien

Merkl [2008]: Merkl G., Technik der Wasserversorgung – Praxisgrundlagen für Führungskräfte, ISBN 978-3-8356-3082-6, Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland

MfU-Saarland [2001]: Ministerium für Umwelt – Saarland, Aktion Wasserzeichen – Förderprogramm zur Regenwasserbewirtschaftung, 2001, Saarbrücken, Deutschland

Micro-Epsilon [2007]: wireSENSOR Seilzug-Wegesensoren, Produktinformationen, Fa. Micro-Epsilon-Messtechnik GmbH & Co. KG, Ortenburg, Deutschland

Möller [2008]: Möller A., Entwicklung eines Qualitätsstandards für Planung und Betrieb von Biomethanlagen, ISBN 978-3-7690-0723-7, DLG Verlag, Frankfurt am Main, Deutschland

Montes-Moncivais et al. [2007]: Montes-Moncivais A., Moreno G. und Buitrón G., Influence of inoculum source, pH and temperature on hydrogen Production, Tagungsband, Session PP6A – Biohydrogen 1, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Morel et al. [2005]: Morel E., Tartakovsky B., Guiot S.R. und Perrier M., On-line estimation of kinetic parameters in anaerobic digestion using observer-based estimators and multiwavelength fluorometry, Proceedings, S. 125-132, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Moreno-Andrade et al. [2008]: Moreno-Andrade Iván, Vargas A. und Buitrón G., Membrane Filtration in a Sequencing Batch Reactor Degrading an Inhibitory Compound, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 153-160, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Morikawa et al. [2005]: Morikawa A., Hirashiki I. und Furukawa S., Development of a coliforms monitoring system using an enzymatic fluroscence method, 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation (IWA-ICA 2005), Proceedings, pp. 777-785, Busan, Südkorea

Morling [2008]: Morling S., Long term experiences from four SBR-plants operated with cold wastewater; comparisons and synthesis, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 11-18, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Mikkelsen und Nyhuis [1996]: Mikkelsen K.A. und Nyhuis G., Dimensionierung von SBR-Anlagen, Handbuch des SBR-Verfahrens, 1996, Cyclar Abwassertechnik

Miksch et al. [2005]: Miksch K., Surmacz-Górska J. und Ostrowski P., Application of on-line respiratory measurement for wastewater treatment plants control, 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation (IWA-ICA 2005), Proceedings, pp. 335-340, Busan, Südkorea

Mudrack und Kunst [2003]: Mudrack K. und Kunst S., *Biologie der Abwasserreinigung*, Gustav Fischer Verlag, Deutschland

Müller und Pröter [2009]: Müller M. und Pröter J., Methoden zur Desintegration – stehen Aufwand und Nutzen im Verhältnis, Biogas 2009 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 2057, S. 71-80, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-092057-3, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Müller et al. [2007]: Müller M., Scholwin F., Fritsche B. und Pröter, Optimierung des Anlagenbetriebs durch Prozessüberwachung und –modellierung, Biogas 2007 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 1983, S. 129-138, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-091983-6, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Murnleitner [2011]: Murnleitner A., Auswahlkriterien und Erfahrungen mit Messtechnik an BiogasanlagenTagungsunterlagen, VDI – Biogastagung 2011, Braunschweig, Deutschland

Münchmeyer et al. [2009]: Münchmeyer W., Homann N., Walte A., Linke B., Baumstark I., Becker B., Wehrhan A. und Buchholz A., Gas-Sensor-Array-System zur Überwachung der Propionsäurekonzentration in Biogas-Fermentern, Biogas 2009 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 2057, S. 231-235, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-092057-3, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Munoz-Paez et al. [2008]: Munoz-Paez K. M., Garcia-Mena J. und Poggi-Varaldo H. M., Biological production of hydrogen: a review, Session 3A: Hydrogen production, 26. Mai 2008, Proceedings, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Murat et al. [2005]: Murat S., Insel G., Artan N. und Orhon D., Performance evaluation of SBR treatment for nitrogen removal from tannery wastewater, Proceedings, S. 865 – 873, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, 19.-21. September 2005, Krakau, Polen

Murton et al. [2007]: Murto M., Svensson M., Christensson K. und Angelidaki I., The development of biogas in Sweden and Denmark, Tagungsband, Poster Session PT01 – Bioenergy, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Muschalla et al. [2009]: Muschalla D., Schütze M., Schroeder K., Bach M., Blumensaat F., Kelpiszewski K., Pabst M., Pressl A., Schindler N., Wiese J. and Gruber G., The HSG Guideline Document for Modelling, Water Science & Technology (WST), Vol. 60, No. 8, pp 2065–2075, IWA Publishing, Großbritannien

Myint und Nirmalakhandan [2008]: Myint M. und Nirmalakhandan N., Bio-electricity Production from Cattle Manure via Microbial Fuel Cells, Tagungsband, Session 1A: Microbiology and basics of anaerobic process, 26. Mai 2008, Proceedings, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Nacke [2011]: Nacke T., Online-Massebilanzierung der Prozesssubstrate und Gaserträge als Basis für eine automatisierte Prozessführung von Biogasanlagen, VDI – Biogastagung 2011, Braunschweig, Deutschland

Nacke [2006]: Nacke T., Praxisbezogene Ansätze zum Online-Prozessmonitioring und für die Entwicklung von Prozessführungsstrategien an Biogasanlagen, Foliensatz, Experten-gespräch „Messen, Steuern, Regeln an Biogasanlagen“, 17.10.2006, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin, Deutschland

Nacke et al. [2009]: Nacke T., Barthel A., Haendly D., Beckmann D. und Göller A., Inline-Mikrowellensensorik zur Bestimmung des organischen Trockenmasseanteils in Prozess-medien von Biogasanlagen, Biogas 2009 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 2057, S. 221-229, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-092057-3, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Nacke et al. [2007]: Nacke T., Barthel A., Haendly D., Beckmann D., Göller A. und Vogelei S., Inline-Mikrowellen-Prozesssensorik zur Bestimmung des Trockenmasseanteils im Biogasfermenter, 15. November 2007, Convention Center Messe Hannover, abgedruckt in Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung, Gülzower Fachgespräche, Band 27, S. 32 bis 57, 2008, Gülzow, Deutschland

NAMUR [2012]: Automatisierung in der Prozessindustrie – NAMUR-Kompendium 2012, Oldenbourg Industrieverlag GmbH, ISBN 978-3-8356-3357-5, München, Deutschland

Neumann et al. [2013]: Neumann L., Tietjen C. und Rilling N., Vitalitätsanalys der methanbildenden Mikroorganismen, BIOGAS Journal 1/2013, S. 130 - 132, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Neumann et al. [2007]: Neumann L., Schmidt O., Unbehauen M. und Scherer P., Long Term Fermentor Studies about the Nutritional Requirement for Anaerobic Digestion of Fodder Beet Silage without Animal Manure, Tagungsband, Poster Session PT01 – Organic Solids, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Neiva Correia et al. [2008]: Neiva Correia C., Vaz F. und Torres A., Anaerobic digestion of biodegradable waste – operational and stability parameters for stability control, Session 1B: Bioreactor and biogas technology, 26. Mai 2008, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Ng et al. [2010]: Ng D.K.S., Pham V., El-Halwagi M.M., Jiménez-Gutiérrez A. und Spriggs H.D., A Hierarchial Approach to the Synthesis and Analysis of Integrated Biorefineries, S. 425 – 432, Proceedings of the Seventh International Conference on the Foundations of Computer-Aided Process Design, Design for Energy and Environment, ISBN 978-1-4398-0912-9, CRC-Press, Boca Raton, USA

Niemeyer et al. [2010]: Niemeyer B., Berger R. G. , Krüger K., Matz G., Otterpohl R. und Stegmann R. (Hrsg.), Odour Control, Hamburger Berichte, Band 36, Abfallwirtschaft, Technische Universität Hamburg-Harburg, ISBN 978-3-9812867-4-8, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, Deutschland

Nivert et al. [2009]: Nivert G., Lindqvist P., Lumley D., Rosenqvist F. und Gunnarsson J., Implementing auto-adjustment and auto-validation of on-line instrument signals, Proceedings, ICA 2009 – 10th IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 14.-17.06.2009, Cairns, Australien

Noack [1955]: Noack W., Biogas in der Landwirtschaft, Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Darmstadt, Deutschland

Novak et al. [2011]: Novak O., Keil S. und Fimml C., Examples of energy self-sufficient municipal nutrient removal plants, S. 1-6, Vol. 64, No. 1, 2011, ISSN 0273-1223, Water Science and Technology, IWA Publishing, London, Großbritannien

OAS [2011]: OAS AG, Fahrzeugwaagen für Biogasanlagen, http://www.oas.de/geschaeftsfelder/fahrzeugwaagen/biogas-fahrzeugwaagen.html, Bremen, Deutschland

Och et al. [2007]: Och H., Zimmermann A. und Wältring D., Vorgehensweise zur Realisierung einer ausreichenden IT-Sicherheit am Beispiel einer Kläranlage, Proceedings, VDI/VDE-Jahrestagung „Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen: Konzepte – Erfahrungen – Trends“, VDI/VDE-Gesellschaft „Mess- und Automatisierungstechnik“, Tagung Wuppertal, November 2007, Deutschland

Oelcheck [2000]: Mit der FT-Infrarot-Spektroskopie der Oxidation auf der Spur, http://www.oelcheck.de/wissen-von-a-z/pruefverfahren-und-geraete/ft-infrarot-spektroskopie-der-oxidation-auf-der-spur.html, OELCHECK GmbH, Brannenburg, Deutschland

Oelsner [2011]: Oelsner E., Erfahrungen mit Laboranalysen zur Optimierung des Anlagenbetriebes, 20. Biogas Jahrestagung und Fachmesse, Workshop 6, 11.01.2011, Fachverband Biogas e.V., Deutschland

Ogurek et al. [2009]: Ogurek M., Alex J. und Schütze M., Simulation as tool for development, test and failure-minimising implementation of wastewater systems control, ICA 2009 – 10th IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 14.-17.06.2009, Poster Proceedings on CD, Cairns, Australien

Okayasu et al. [2005]: Okayasu Y., Tanaka H., Inui T. and Tanaka Y. (2005). Biosensor-based control of nitrification inhibitor in municipal wastewater treatment plants, 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation (IWA-ICA 2005), Proceedings, pp. 405-418, Busan, Südkorea

Oles [1991]: J. Oles, Verfahren zur Dimensionierung von SBR-Anlagen zur Nitrifikation und Denitrifikation, 1991, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, ISSN 0724 – 0783, Hamburg, Deutschland

Ollson und Newell [1999]: Ollson G. und Newell B., Wastewater Treatment Systems – Modelling, Diagnosis and Control, 1999, ISBN: 1 900222 15 9, IWA Publishing, London, Großbritannien

Ollson et al. [2005]: Ollson G., Nielsen M.K., Yuan Z., Lyngaard-Jensen A. and Steyer J.P., Instrumentation, Control and Automation in Wastewater Systems, Scientific and Technical Report No. 15, ISBN 1900222833, IWA Publishing, London, Großbritannien

Orhon et al. [2005]: Orhon D., Artan N. und Yagci N., A unified basis of the kinetic description of Sequencing Batch Reactor of nutrient removal, Proceedings, S. 791 – 803, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, 19.-21. September 2005, Krakau, Polen

Palatsi et al. [2007]: Palatsi J, Fernández B., Vavilin V.A. und Flotats X., Anaerobic biodegradability of fresh slaughterhouse waste. Interpretation of results by a simplified model, Tagungsband, Poster Session PT03 – Modelling, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Papenmeier [2007]: Lumiglas-Visulex-Ex-Kamera, Typ K25-Ex, Datenblatt 07.75, Fa. F.H. Papenmeier GmbH & Co. KG, Schwerte, Deutschland

Park und Craggs [2011]: Park J.B.K. und Craggs R.J., Nutrient removal in wastewater treatment high rate algae ponds with carbon dioxide addition, S. 1758-1764, Vol. 63, No. 8, 2011, ISSN 0273-1223, Water Science and Technology, IWA Publishing, London, Großbritannien

Pawlenko [2008]: Pawlenko A., Plant Asset Management unterstützt durch empirische Datenanalyse – Erweiterung der PAM-Systeme: Prognostizieren des Verhaltens der Feldgeräte in der Zukunft, VDM Verlag Dr. Müller, ISBN 978-3-639-01414-3, Saarbrücken, Deutschland

Pehnt [2010]: Pehnt M. (Hrsg.), Energieeffizienz – Ein Lehr- und Handbuch, 1. Auflage, ISBN 978-3-642-14250-5, Springer Verlag, Heidelberg, Deutschland

Peine et al. [2009]: Peine F.-J., Knopp L. und Radcke A., Das Recht der Errichtung von Biogas-anlagen, ISBN 978-3-869 65-004-3, lexxion – der juristische Verlag, Berlin, Deutschland

Peng et al. [2001]: Peng, Y.; Gao, J.; Wang, S. and Sui, M., *Use pH and ORP as fuzzy control parameters of denitrification in SBR process*, Proceedings IWA World Congress, 2001, Berlin, Deutschland

Peng und Bischoff [2008]: Peng Z. und Bischoff M., Quantification and control of odour emissions of biogas plants, Diplomarbeit, Prof. Dr.-Ing. Bischoff, Fachhochschule Lübeck, Deutschland

Petta et al. [2008]: Petta L., Giordano A., Esposito G. und Pirozzi F., A mathematical explicit expression for the design of nitrogen removal in SBRs treating domestic wastewater, Poster Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 131-134, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Petzet und Cornel [2011]: Petzet S. und Cornel P., Towards a complete recycling of phosphorus in wastewater treatment – options in Germany, S. 29-35, Vol. 63, No. 1, 2011, ISSN 0273-1223, Water Science and Technology, IWA Publishing, London, Großbritannien

Philipp [2006]: Philipp S., Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen – Untersuchung verschiedener Betreibermodelle, Band 3, Reihe Nachhaltigkeit, Diplomica GmbH, ISBN 978-3-8324-9356-1, Deutschland

Picioreanu et al. [2007]: Picioreanu C., Katuri K.P., Head I.M., van Loosdrecht M.C.M und Scott K., Mathematical model for microbial fuel cells with anodic biofilms and anaerobic digestion, Tagungsband, PP5A – Microbial Fuel Cells 2, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Pielow und Schimansky (Hrsg.) [2008]: Rechtsfragen der Einspeisung von Biogas in Erdgasnetze, Band 53, Bochumer Beiträge zum Berg- und Energierecht, ISBN 978-3-415-04336-7, Richard Boorberg Verlag, Stuttgart, Deutschland

Pigan und Metter [2008]: Pigan R. und Metter M., Automatisieren mit ProfiNet – Industrielle Kommunikation auf Basis von Industrial Ethernet, 2. Auflage, ISBN 978-3-89578-293-0, Siemens Publicis Corporate Publishing, Erlangen, Deutschland

Pingel [2008]: Pingel L., Brennstoffzellennutzung in der Biogastechnik – Eine technische und ökonomische Analyse, Band 11, Reihe Nachhaltigkeit, Diplomica Wissenschaftlicher Fachverlag, ISBN 978-3-8366-0546-5, Hamburg, Deutschland

Pöppl [2011]: Pöppl H., Flexibler Prozess-Gaschromatograph für die neuen Anforderungen an Gasanalysegeräte, gwf Gas Erdgas, 152. Jahrgang 2011, Heft 7-8, S. 444-448, ISSN 0016-4909, Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland

Polster und Brummack [2009]: Polster A. und Brummack J., Entschwefelung in Biogasanlage, Biogas 2009 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 2057, S. 185-193, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-092057-3, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Poo et al. [2008]: Poo K.M., Im J.H., Jun B.H., Choi K.S., Kim C.W. und Woo H.J., Full-cyclic control strategy of SBR for nitrogen removal in strong wastewater using common sensors, Proceedings, S. 349-357, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Pozo et al. [2011]: Pozo G., Villamar A.C., Martínez M. und Vidal G., Polyhydroxyalkanoates (PHA) biosynthesis from kraft mill wastewaters: biomass origin and C:N relationship influence, S. 449-455, Vol. 63, No. 3, 2011, ISSN 0273-1223, Water Science and Technology, IWA Publishing, London, Großbritannien

ProNova [20XX]: Biogasanalystechnik, Produktinformationen, ProNova Analysetechnik GmbH & Co. KG, Berlin, Deutschland

Puchner [2011]: Puchner R., Fotografie – Die Fotoschule, http://www.puchner.org/

Puig et al. [2008]: Puig S., Coma M., Monclús H., van Loosdrecht M.C.M, Colprim J. und Balaguer M.D., Ethanol as a carbon source for biological nutrient removal from Wastewater, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 95-104, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Puig et al. [2005]: Puig S., Corominas L., Traore A., Colomer J., Balaguer M.D. und Colprim J., An on-line optimization of a SBR cycle for carbon and nitrogen removal based on on-line pH and OUR: The role of dissolved oxygen control, Proceedings, S. 369-377, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Punal et al. [2003]: Punal A., Palazzotto L., Bouvier J.C., Conte T. und Steyer J. P., Automatic control of volatile fatty acids in anaerobic digestion using fuzzy logic based approach; Wat. Sc. & Tech., Vol. 48, No. 6, pp 103, Großbritannien

Punal et al. [2002]: Punal A., Rodriguez J., Carrasco E.F., Roca E. und Lema J.M., Expert system for the on-line diagnosis of anaerobic wastewater treatment plants; Wat. Sc. & Tech., Vol. 45, No. 10 pp 195 – 200, Großbritannien

Putz [2009]: Putz O., Mikroalgen als Energieträger der Zukunft, Biotechnologische Energieumwandlung – Gegenwärtige Situation, Chancen und zukünftiger Forschungsbedarf, Bley T. (Hrsg.), S. 87 – 95, ISBN: 978-3-642-01114-6, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Deutschland

Rabaey und Keller [2007]: Rabaey K. und Keller J., Microbial fuel cell cathodes: from bottleneck to prime opportunity?, Tagungsband, Keynote, Plenary Session 2, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

RAL [2001]: RAL-Gütezeichen 629 „Erstellung (Bau und Montage) von Biogasanlagen“, RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V., Sankt Augustin, Deutschland

Ramirez und Steyer [2007]: Ramirez I. und Steyer J.P., Modeling Microbial Diversity in Anaerobic Digestion, Tagungsband, Session PP4B – Modelling, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Randall [2011]: Randall R. B., Vibration-based Condition Monitoring – Industrial, Aerospace and Automotive Applications, ISBN: 978-0-470-74785-8, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, Großbrittanien

Raninger et al. [2011]: Raninger B., Mingyu Q. und Renjie D., China entdeckt Biogas neu, BIOGAS Journal 3/2011, S.84 - 89, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Rauh [2010]: Rauh S., Biogasanlagen leisten Beitrag zum Umweltschutz, BIOGAS Journal 2/2010, S.60 - 62, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Reimer [2009]: Reimer H., Finanzierung von Biogasanlage aus der Sicht einer Bank, Gülzower Fachgespräche, Tagungsband „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“, Band 32, S. 87 bis 96, ISBN 978-3-942147-00-2, Gülzow, Deutschland

Reinhold [2009]: Reinhold G., Welche Faktoren bestimmen die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen, Gülzower Fachgespräche, Tagungsband „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“, Band 32, S. 76 bis 86, 2008, Gülzow, ISBN 978-3-942147-00-2, Deutschland

Retamal et al. [2007]: Retamal C., Carballa M., Ruiz-Filippi G. und Chamy R., Modelling the influence of temperature on hydrolysis and acidogenesis, Tagungsband, Poster Session PT03 – Modelling, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Reuter et al. [2010]: Reuter M., Diller S., Winter H., Sonnleitner E. und Roth K., Das Redoxpotential in Biogasanlagen: Messbare Regelgröße zur Beurteilung des Fermenterzustandes und Beeinflussung des Biogasprozesses durch gezielte Veränderung des Redoxwertes, Abschlussbericht, Schmack Biogas GmbH, FNR-Förderkennzeichen: 22014008, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22014008.pdf, Deutschland

Rey et al. [2008]: Rey G., Vilar A., Kennes C. und Veiga M.C., SBR system in the treatment of wastewater from a resin-producing factory, Poster Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 181-184, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Richter [2000]: Richter M. M., Fallbasiertes Schließen, Handbuch der künstlichen Intelligenz, S. 407 - 430, 2000, 3. überarbeitete Auflage, Oldenbourg-Verlag, München, Wien

Riegel und Luyben [2010]: Riegel K.A. und Luyben M.L., Design and Control of Fermentation Processes with Gas Stripping of Product, S. 415 – 423, Proceedings of the Seventh International Conference on the Foundations of Computer-Aided Process Design, Design for Energy and Environment, ISBN 978-1-4398-0912-9, CRC-Press, Boca Raton, USA

Rieger und Weiland [2006]: Rieger C. und Weiland P., Ausstattung von Biogasanlagen mit Mess-, Steuer- und Regelungstechnik – Ergebnisse aus 2 bundesweiten Bewertungsprojekten, Foliensatz, Expertengespräch „Messen, Steuern, Regeln an Biogasanlagen“, 17.10.2006, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin, Deutschland

Rieger et al. [2005]: Rieger L., Langergraber G. und Siegrist H., Uncertanties of spectral in-situ measurements in wastewater using different calibration approaches, Proceedings, S. 639 – 649, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, 19.-21. September 2005, Krakau, Polen

Rieger et al. [2001]: Rieger L., Koch G., Kuhni M., Gujer W. und Siegrist H., The EAWAG Bio-P module for activated sludge model No. 3., Water Science and Technologies 35(16), S. 3887-3903. IWA Publishing, London, UK

Ritala [2008]: Ritala R., Importance of Modelling and Simulation in view of the Technology Platform – Visions for 2030, S. 15 - 24, Modelling and Simulation of Wet End Processes and Innovative Process Control, Cost E36 Modelling and Simulation in the Pulp & Paper Industry, Kappen J., Dietz W. und Grenz R. (Hrsg.), ISBN: 978-3-8334-7619-8, Books on Demand, Norderstedt, Deutschland

Ritter und Tix [2005]: Ritter A. und Tix F., Einführung in die virtuelle Anlagenprojektierung und Demonstration eines Anlagenkonfigurators, Seminar „EDV-gestützte Angebots- und Kostenkalkulation für Einzel- und Variantenfertiger“, 24. November 2005, VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, Deutschland

Rodríguez et al. [2007]: Rodríguez J., Batstone D.J., Yuan Z. und Rabaey K., A comprehensive model to investigate microbial fuel cells, Tagungsband, Session PP5A – Microbial Fuel Cells 2, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion 23-27 September 2007 Brisbane, Australien

Rönner-Holm und Holm [2008]: Rönner-Holm S.G.E. und Holm N.C., Optimising studies of a full-scale SBR plant using the ASM3+EAWAG-BioP-model, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 187-196, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Ropponen et al. [2008]: Ropponen A., Konkarikoski K. und Ritala R., Dynamic validation of chemical reaction process models, S. 25 - 36, Modelling and Simulation of Wet End Processes and Innovative Process Control, Cost E36 Modelling and Simulation in the Pulp & Paper Industry, Kappen J., Dietz W. und Grenz R. (Hrsg.), ISBN: 978-3-8334-7619-8, Books on Demand, Norderstedt, Deutschland

Rösch et al. [2006]: Rösch C., Dusseldorp M. und Meyer R., Precision Agriculture: Landwirtschaft mit Satellit und Sensor, 1. Auflage, ISBN 978-3866410800, Deutscher Fachverlag, Frankfurt am Main, Deutschland

Rothermel [2008]: Rothermel R., Nachwachsende Rohstoffe in der chemischen Industrie – Voraussetzungen und Perspektiven, ZVEI Branchenworkshop „Bioraffinerien –Trends, Bedarfe und Zukunftsmärkte für die Automation bis 2020+“, Berlin, 05.09.2008, Deutschland

Rozaimah et al. [2006]: Rozaimah S. A. S., Adawiyah, I. P., Marzuki, M. M., Rakmi A. R., Hanif S. M. und Rusdi, Y. N., An Online Monitoring System Of Coagulation-Flocculation Process Via Image Analysis, 5th IWA World Water Congress – Beijing 2006, Proceedings, Paper-No. 586818, Peking, Volksrepublik China

Rubio et al. [2005]: Rubio M., Ruiz M., Teran M.F., F. Arroyo, Colomer J. und Colprim J., Fuzzy control of dissolved oxygen and on-line OUR estimation in a SBR pilot plant, Proceedings, S. 43-50, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Rubio et al. [2004]: Rubio M., Colomer J., Ruiz M., Colprim J. und Meléndez J., Qualitative Trends for Situation Assessment in SBR Wastewater Treatment Process, Workshop 23: Binding Environmental Sciences and Artificial Intelligence, Proceedings, S. 5-1 bis 5-9, 16th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2004), 23.-27. August 2004, Valencia, Spanien

Rudolph [2013]: Rudolph W., Hydrolysesteuerung leicht gemacht, BIOGAS Journal 1/2013, S.126 - 128, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Rudolph [2011]: Rudolph W., Ritterschlag für Bioraffineriekonzept, BIOGAS Journal 3/2011, S.46 - 49, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Ruiz et al. [2005]: Ruiz G., Molina F., Steyer J.P., Vanrollegham P.A., Zaher U., Roca E. und Lema J.M., Industrial scale validation of a new titrimetric sensor for anaerobic digestion processes: comparison of methodologies, 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation (IWA-ICA 2005), Proceedings, pp. 133-141, Busan, Südkorea

Ruiz et al. [2004]: Ruiz M. L., Colomer J., Rubio M., Meléndez J. und Colprim J., Situation Assessment of a Sequencing Batch Reactor using Multiblock MPCA and Fuzzy Classification, Workshop 23: Binding Environmental Sciences and Artificial Intelligence, Proceedings, S. 12-1 bis 12-10, 16th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2004), 23.-27. August 2004, Valencia, Spanien

Ruiz-Fuertes et al. [2007]: Ruiz-Fuertes M.B., Kaiser F.L., Andrade-Montealegre D.P., Povez-Loyola A.C. und Gronauer A., Methane Yield Improvement in Anaerobic Co-Digestion of Valencia Late Oranges and Cattle Manure, Tagungsband, Poster Session PT01 – Organic Solids, 11th IWA World congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Russel und Norvig [2003]: Russel S. und Norvig P. (Hrsg.), Artificial Intelligence – A Modern Approach, 2. Auflage, ISBN 0-13-080302-2, Prentice Hall Series in Artificial Intelligence, Pearson Education International, New Jersey, USA

Rusten und Sahu [2011]: B. Rusten und A.K. Sahu, Microalgae growth for nutrient recovery from sludge liquour and production of renewable bioenergy, S.1195-1201, Vol. 64, No. 6, 2011, ISSN 0273-1223, Water Science and Technology, IWA Publishing, London, Großbritannien

Salazar et al. [2007]: Salazar C., Cresson R., Latrille E., Escudié R., Bernet N. und Steyer J.P., Modeling the start-up of anaerobic biofilm processes, Tagungsband, Poster Session PT02 – Biofilms, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Sànchez-Marrè [1996]: Sànchez-Marrè M., DAI-DEPUR – An integrated Supervisory Multi-level Architecture, PhD thesis, 1996, Universitat Politècnica de Catalunya, Spanien

s::can [2011]: Spectrometer probes – spectro::lyser, http://www.s-can.at/text.php?kat=5&id=21&langcode=, scan Messtechnik GmbH, Wien, Österreich

Schattauer und Weiland [2007]: Schattauer A. und Weiland P., Biogaserzeugung durch Trockenfermentation – Stand der Technik, Biogas 2007 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 1983, S. 169-179, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-091983-6, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Scherer [2008A]: Scherer P., Operating Analytics of Biogas Plants to Ensure Process Stability, Session 1B: Bioreactor and biogas technology, 26. Mai 2008, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Scherer [2008B]: Scherer P., Efficiency Analysis of Biogas Plants by Following the Carbon Path, 26. Mai 2008, Poster, Proceedings, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Scherer et al. [2008]: Scherer P., Lehmann K., Schmidt O., Ergun S. und Demirel B., Application of a Fuzzy Logic Control System for Continuous Anaerobic Digestion of Low Buffered, Acidic Energy Crops as Mono-Substrate, Session 4A: Modelling and Control, , 27. Mai 2008, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Scherer et al. [2007]: Scherer P., Ergun S., Schmidt O., Löffelholz J., Henning-Jacob J., Vollmer G.-R., Entwicklung einer Fuzzy-Logic-Regelung für eine Hochdurchsatz-Biologie, 15. November 2007, Convention Center Messe Hannover, abgedruckt in Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung, Gülzower Fachgespräche, Band 27, S.146 bis 171, 2008, Gülzow, Deutschland

Scherff et al. [1999]: B. Scherff, E. Haese und H. R. Wenzek, Feldbussysteme in der Praxis: ein Leitfaden für den Anwender, 1999, Springer Verlag, Berlin, New York, Singapur

Schleypen et al. [1996]: Schleypen, P.; Michel, I. und Siewert, H. E., Einsatz der SBR-Technologie in kleineren Kläranlagen im ländlichen Raum, Wasser Abwasser Praxis (WAP), Heft 1/96, S. 46-51, Bertelsmann Fachzeitschriften GmbH (Hrsg. und Verlag), Gütersloh

Schilling [1996]: W. Schilling (Hrsg.), Praktische Aspekte der Abflusssteuerung in Kanalnetzen, 1996, R. Oldenbourg Verlag, München – Wien, Deutschland

Schmidberger et al. [2006]: Schmidberger T., Fay A., Drath R. und Horch A., Von Anlagenstrukturinformationen automatisch zum Asset-Management, atp, 48 (2006), S. 54-61, Deutschland

Schmidt et al. [2010]: Schmidt T., Fischer E., Hoera S. und Franz M., Potenziale und Chancen für die Biogasproduktion in Kenia, BIOGAS Journal 2/2010, S. 84-87, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Schmidt-Denter [2004]: Schmidt-Denter U., Soziale Beziehungen im Lebenslauf, 4. Auflage, ISBN 3-621-27563-0, Beltz Verlag, Programm PVU Pschologie Verlags Union, Basel, Schweiz

Schmitt [2009]: Schmitt T.G. (Hrsg.), KOMPLETT – Ein innovatives System zur Schließung von Wasser- und Stoffkreisläufen, Schriftenreihe der Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft, Band 28, Technische Universität Kaiserslautern, Deutschland

Schmitt und Hansen [2007]: Schmitt T.G. und Hansen J. (Hrsg.), Ökoeffizienz in der Wasserwirtschaft - Schwerpunkt Energieoptimierung von Kläranlagen, Schriftenreihe der Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft, Band 26, Technische Universität Kaiserslautern, Deutschland

Schmitt et al. [2002]: S. Schmitt, A. Stahl, and J. Hansen, A CBR Approach to Identification and Counteraction for Harmful Microorganisms in Wastewater Treatment Plants, Proceedings International Conference on Artificial Intelligence, 2002, Las Vegas, USA

Schneider [2008]: Schneider O., Erfassung und Bewertung von Betriebs- und Störungsinformationen als Grundlage für ein effizientes Instandhaltungs- und Maschinenmanagement von Biogasanlagen, Diplomarbeit, Fachhochschule Bielefeld, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Bielefeld, Deutschland

Schnell [2006]: Schnell R., Optimierung des Betriebs landwirtschaftlicher Biogasanlagen mit Hilfe zeitgemäßer Messtechnik, Foliensatz, Expertengespräch „Messen, Steuern, Regeln an Biogasanlagen“, 17.10.2006, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Deutschland

Schnitzhofer et al. [2007]: Schnitzhofer W., Schumacher M., Schönherr F., Modigall M., de Vrije T. und Claassen P.A.M., Non-thermal production of hydrogen from biomass: Concept and bioprocess development, Tagungsband, Session PP7A – Biohydrogen 2, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Schön [2010]: Schön M., Numerical Modelling of Anaerobic Digestion Processes in Agricultural Biogas Plants, Forum Umwelttechnik und Wasserbau, Band 6, Universität Innsbruck, ISBN 978-3-902719-61-4, innsbruck university press, Innsbruck, Österreich

Schönberger [1990]: Optimierung der biologischen Phosphorelimination bei der kommunalen Abwasserreinigung, Berichte aus Wassergütewirtschaft, TU München, Nr. 93, München, Deutschland

Scholl [2011]: Scholl U., Ökonomische Instandhaltung – Aber wie?, Firmeninformationsschrift, Industrieservice Scholl, Frankfurt, Deutschland

Schraa et al. [2005]: Schraa O., Tole B. und Copp J.B., Fault detection for control of wastewater treatment plants, Proceedings, S. 467-475, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Schreff [2003]: Schreff, D., SBR-Anlagen – Stand der Technik, Tagungsunterlagen, ATV-Lehrertag 2003, Wiesbaden-Naurod, ATV-DVWK-Landesverband Hessen/Rheinland-Pfalz/Saarland, Deutschland

Schreff [2001]: Schreff D., SBR-Anlagen – Stand der Technik, Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft, Band 14, Technische Universität Kaiserslautern Kaiserslautern, Deutschland

Schreff und Wilderer [1999]: Schreff D. und Wilderer P. A., Bestandsaufnahme und neue Entwicklungen bei der SBR-Technologie, 14. Kolloquium Dresden, Dresdner Berichte Band 14, S. 147-168, 1999, Institut für Siedlungs- und Industriewasserwirtschaft (Hrsg.), TU Dresden, Dresden, Deutschland

Schulz und Graf [2013]: Schulz A. und Graf P., Branchenkennzahlen Abwasserreinigung – Ein Beitrag zur Weiterentwicklung des Unternehmensbenchmarking, KA – Korrespondenz Abwasser, Abfall, Jahrgang 60, Nummer 2, S. 96-99, Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (Hrsg. und Verlag), Hennef, Deutschland

Schulz et al. [2007]: Schulz W., Heitmann S., Hartmann D., Jahn K., Manske S., Ehlers B., Peters Erjawetz S., Havran T., Risse S., Schnober M., Räbiger N. und Schlüter M., Leitfaden Verwertung von Wärmeüberschüssen bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen, bremer energie institut, Bremen, Deutschland

Schumacher et al. [2007]: Schumacher B., Oechsner H., Senn T. und Jungbluth T., Aufbereitung von Nachwachsenden Rohstoffen zur Optimierung der Biogasausbeute, Biogas 2007 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 1983, S. 157-168, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-091983-6, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Schünemeyer [2006]: Schünemeyer F., Prozessstabilität, Messtechnik und Betriebsweise, Tagungsunterlagen, ETH EnergieTage Hessen 2006, 18.11.2006, Wetzlar, Deutschland

Schweinfurth und Nasution [2011]: Schweinfurth A. und Nasution F., Indonesien – Biogas-Marktpotenziale in der Palmölproduktion, BIOGAS Journal 4/2011, S. 90 - 93, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Schwittalla et al. [2008]: Schwitalla P., Mennerich A., Austermann-Haun U., Müller A., Dorninger C., Daims H., Holm N. C. und Rönner-Holm S. G. E., NH4+ ad-/desorption in SBRs: simulation, lab and full-scale studies, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 249-256, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Seibert-Erling und Uecker [2005]: Seibert-Erling G. und Uecker F., Einsatz mobiler Endgeräte in wassertechnischen Anlagen – Anforderungen, Konzepte, Anwendernutzen, VDI/ VDE-Berichte 1890 Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen Konzepte – Erfahrungen – Trends, VDI/VDE-Gesellschaft „Mess- und Automatisierungstechnik“, Tagung, Wuppertal, 22./23. November 2005, S. 211 – 221, ISBN 3-18-091890-X, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Seibl [2011]: Seibl. F., Lebenszykluskosten – wichtiges Entscheidungskriterium bei Investitionen in Kläranlagen, Tagungsband, Mess- und Regelungstechnik in Abwassertechnischen Anlagen, Gemeinschaftstagung DWA/VDI/VDE, 25.10.2011 bis 26.10.2011, Fulda, Deutschland

Seintsch und Brucker [2011]: Seintsch S. und Brucker A., Feldgerätediagnose – wo stehen wir?, Tagungsband, Mess- und Regelungstechnik in Abwassertechnischen Anlagen, Gemeinschaftstagung DWA/VDI/VDE, 25.10.2011 bis 26.10.2011, Fulda, Deutschland

Seyfried und Saake [1986]: Seyfried C.F. und Saake M., Verfahren der anaeroben Reinigung von Industrieabwässern. Korrespondenz Abwasser, Heft 10/1986, S. 877-893, 1986, DWA (ehemals ATV), Deutschland

Shang und Bischoff [2011]: Shang J. und Bischoff M., Examination of Potential Influence of Ginger Pomace on Biogas Processing, Diplomarbeit, Fachbereich „Angewandte Naturwissenschaften“, Prof. Dr.-Ing. Bischoff, Fachhochschule Lübeck, Deutschland

Siebert und Herrmann [2007]: Siebert U. und Herrmann D., Sichere Fernbedienung über Internet und Funk, Proceedings, VDI/VDE-Jahrestagung „Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen: Konzepte – Erfahrungen – Trends“, VDI/VDE-Gesellschaft „Mess- und Automatisierungstechnik“, Tagung Wuppertal, November 2007, Deutschland

Siegrist et al. [2007]: Siegrist H., Salzgeber D., Eugster J. und Joss A., Anammox brings WWTP closer to energy autarky due to increased biogas production and reduced aeration energy for N-removal, Proceedings, 11th IWA Word Congress on Anaerobic Digestion, 23.-27. September 2007, Brisbane, Australien

Siekmann et al. [1999]: Siekmann + Partner, Steuerung von SBR-Anlagen zur biologischen Abwasserreinigung – Kläranlage Nürburgring, 1999, Forschungsvorhaben Deutsche Bundesstiftung Umwelt (zitiert in *Schreff [2001]*), Deutschland

Siemens [2011A]: SCADA System SIMATIC WinCC – Prozessvisualisierung mit Plant Intelligence, http://www.automation.siemens.com/mcms/human-machine-interface/de/visualisierungssoftware/scada-wincc/Seiten/Default.aspx, Siemens AG, München, Deutschland

Siemens [2011B]: Maximum Methane, The New Age of Electricity | Biogas, http://www.siemens.com/innovation/pool/en/publikationen/publications_pof/pof_spring_2011/pof_0111_strom_biogas_en.pdf

Siemens [2009A]: S7-300 Starterkit 2009 - Get off to an easy start with SIMATIC, http://www.automation.siemens.com/mcms/programmable-logic-controller/en/simatic-s7-controller/s7-300/starterkit/Pages/Default.aspx, Siemens AG, München, Deutschland

Siemens [2009B]: WinCC/Audit “Rückverfolgung von Bedienungen und Projektänderungen über Audit Trails“, http://www.automation.siemens.com/mcms/human-machine-interface/de/visualisierungssoftware/scada-wincc/wincc-optionen/wincc-audit/Seiten/Default.aspx, Siemens AG, München, Deutschland

Siemens [2007]: http://www.automation.siemens.com/providerv2/data/references/R_Sigma_GreenBiogasCaseStudy_en.pdf, Siemens AG, München, Deutschland

Sigge et al. [2007]: Sigge G.O., Gie L.-M. und Britz T.J., Improving the biodegradability of grain distillery wastewater for use as UASB substrate by combinations of ozonation/ enzymatic pretreatments, Tagungsband, Session PP9B – Industrial Processes, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Simeonov und Stoyanov [2003]: Simeonov I. und Stoyanov S., Modelling and dynamic compensator control of the anaerobic digestion of organic wastes, Chemical and Biochemical Engineering Quarterly, 17 (4), pp. 285-292

Simon et al. [2006]: Simon J., Wiese J. and Steinmetz H., A comparison of continuous flow and sequencing batch reactor plants concerning integrated operation of sewer systems and wastewater treatment plants, Water Science & Technology (WST), Vol. 54, No. 11-12, pp. 241-248, IWA Publishing, Großbritannien

Simon et al. [2003]: Simon R., Kleegrewe T., Birkhofer R., Jeske J. und Merget O., Field Device Tool – FDT – Die universelle Feldgeräteintegration, ISBN 3-486-27044-3, Oldenbourg Industrieverlag, München, Deutschland

Sin et al. [2010]: Sin G., Meyer A.S. und Gernaey K.V., Are Mechanistic Cellulose-hydrolysis Models reliable for Use in Biofuel Process Design? – Identifiability and Sensitive Analysis, S. 93 – 106, Proceedings of the Seventh International Conference on the Foundations of Computer-Aided Process Design, Design for Energy and Environment, ISBN 978-1-4398-0912-9, CRC-Press, Boca Raton, USA

Sin et al. [2005]: Sin G., Villez K. und Vanrollegham P.A., Application of a model-based optimisation methodology for nutrient removing SBR leads to falsification of the model, Proceedings, S. 667-675, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Spanjers und van Lier [2005]: Spanjers H. und van Lier J.B., Instrumentation in anaerobic treatment – research and practice, 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation (IWA-ICA 2005), Proceedings, pp. 105-124, Busan, Südkorea

Spanjers et al. [2005]: Spanjers H., Bouvier J.-C., Steenweg P., Bisschops I., van Gils W. und Versprille B., Implementation of in-line infrared monitor in full-scale anaerobic digestion process, Proceedings, S. 297-303, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Stein [1998]: Stein D., Instandhaltung von Kanalisationen, 3. Auflage, ISBN 978-3433013151, Verlag Ernst & Sohn, Berlin

Steinmetz [2001]: Steinmetz H., Bemessung von SBR-Anlagen, Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft, Band 14, 2001, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern

Steinmetz et al. [2005]: Steinmetz H., Wiese J., Ehret J. und Ebert A., Information visualisation on mobile devices – An efficient information management for wastewater facilities, Proceedings, S. 59-67, 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation, Busan, Südkorea

Steinmetz und Wiese [2006]: Steinmetz H. und Wiese J., Instrumentation, control and automation for full-scale sequencing batch reactor plants, Water Practice & Technology (WPT), wpt.2006.076, IWA Publishing, Großbritannien

Steyer et al. [2005]: Steyer J.P., Bernard O. und Batstone D., Lessons learnt from 15 years of ICA in anaerobic digestion, Proceedings, S. 267-276, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Steyer et al. [2002A]: Steyer J.P., Bouvier J.C., Conte T., Gras P. und Sousbie P., Evaluation of a four year experience with fully instrumented anaerobic digestion process, Instrumentation, Control and Automation 2001; Water Science and Technology Vol. 45, No 4-5, pp 485-502, Großbritannien

Steyer et al. [2002B]: Steyer J.P., Bouvier J.C., Conte T., Gras P., Harmand J. und Delgenes J.P., On-line measurements of COD, TOC, VFA, total and partial alkalinity in anaerobic digestion processes using infra-red spectrometry. Anaerobic Digestion IX, Wat. Sc. & Techn., Vol. 45, No 10, pp 133-138, Großbritannien

Strohmann [2007]: Strohmann F., Dokumentation von Messdaten auf Biogasanlagen, 15. November 2007, Convention Center Messe Hannover, abgedruckt in Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung, Gülzower Fachgespräche, Band 27, S.195 bis 201, 2008, Gülzow, Deutschland

Stromeinspeisungs-Gesetz [1990]: Gesetz über die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz vom 7. Dezember 1990 (BGBl. I, S. 2633), Deutschland

StMUGV [2004]: Biogashandbuch Bayern, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, München, Deutschland

Süddeutsche Zeitung [2005]: Giftanschlag auf Bodensee-Wasserversorgung, http://www.sueddeutsche.de/panorama/baden-wuerttemberg-giftanschlag-auf-bodensee-wasserversorgung-1.665949, sueddeutsche.de GmbH, München, Deutschland

Suh et al. [2005]: Suh C.W., Jeong H.S. und Shin H.S., Advanced Settling Velocity Function and Estimation of Sludge Settling Parameters from Batch Settling Experiment, Proceedings, S. 327-334, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Takashima und Tanaka [2007]: Takashima M. und Tanaka Y., Acidic Thermal Post-Treatment for Enhancing Anaerobic Digestion of Sewage Sludge, Tagungsband, Poster Session PT1 – Organic Solids, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Tan und Tang [2008]: Tan X.J. und Tang L., Variation of biological activity of activated sludge in SBR system, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 137-144, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

TAT [2000]: TAT Ingenieursgesellschaft m.b.H., Fuzzy-Belüftungssteuerung, Heft 2/2000, S. 32, Verlag Bauwesen, Berlin, Deutschland

Taron [2010]: Taron J., Prozess um PFT-Skandal, http://www.wdr.de/themen/panorama/28/pft_prozess/index.jhtml, Westdeutscher Rundfunk, 10.11.2010, Köln, Deutschland

Taylor et al. [2008]: Taylor M., Toft G. und Wang H., Data driven process modelling, S. 53 - 59, Modelling and Simulation of Wet End Processes and Innovative Process Control, Cost E36 Modelling and Simulation in the Pulp & Paper Industry, Kappen J., Dietz W. und Grenz R. (Hrsg.), ISBN: 978-3-8334-7619-8, Books on Demand, Norderstedt, Deutschland

Teichgräber [1998]: Teichgräber B., Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb – Bemessung und Anwendung, Korrespondenz Abwasser Heft 5/1998, 45. Jahrgang, S. 886-900, Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (Hrsg. und Verlag), Hennef, Deutschland

Tenbrinck [2012]: Tenbrinck J., Redox-Messung und Leistungsregelung mit EnviTec-Feedcontrol, Foliensatz und Manuskript, 2. VDI-Konferenz „Prozessmesstechnik an Biogas-anlagen“, VDI-Wissensforum, ISBN 978-3-942980-99-9, 9./10. Oktober 2012, Fulda, Deutschland

Tetzlaff [2010]: Tetzlaff K.-H., Wasserstoff für alle, ISBN 978-3-8370-6116-1, 3. Auflage, Books on Demand, Norderstedt, Deutschland

Thanikal et al. [2008]: Thanikal J. V., Torrijos M., Harmand J., Latrille E. und Delgenes J.-P., Characterization of the flocs from SBRs treating effluent from small cheese making plants and impact on compressibility and settleability, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 433-440, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

TheMathWorks [2004]: MATLAB – The Language of Technical Computing, Version 13, Users Manual, 2004, TheMathWorks Inc., USA

Thier [1997]: Thier B. (Hrsg.), Industriearmaturen – Bauelemente der Rohrleitungstechnik, 5. Auflage, ISBN 3-8027-2712-6, Vulkan-Verlag, Essen, Deutschland

Toews [2009]: Biomassetransport – Was kostet die Logistik von Gülle & Co?, Gülzower Fachgespräche, Tagungsband „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“, Band 32, S. 63 bis 75, 2008, ISBN 978-3-942147-00-2, Gülzow, Detuschland

Tomei und Annesini [2008]: Tomei M.C. und Annesini M.C., Removal of Xenobiotics in a Two Phase Sequencing Batch Reactor: Kinetics and Modelling, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 197-204, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Tomlins et al. [2001]: Tomlins Z., Thomas M., Keller J., Audic J.-M., Urbain V., Nitrogen Removal in a SBR Using the OGAR Process Control System, Proceedings IWA World Congress 2001, Berlin, Deutschland

Torrijos [2008]: Torrijos M., Kumar Thalla A., Bosque F. und Delgenès J.P., Anaerobic digestion of residues from production and refining of vegetable oils as an alternative to conventional solutions, Session 3B: Anaerobic Digestion, 26. Mai 2008, Proceedings, 5th IWA International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Hammamet, Tunesien

Trogisch und Baaske (Hrsg.) [2004]: Biogas Powered Fuel Cells – Case Studies for their implementation, ISBN 3-85487-626-2, Trauner Verlag, Linz, Deutschland

Tschepetzki et al. [2011]: Tschepetzki R., Seick I. und M. Ogurek, Ein simulationsbasiertes Werkzeug zur Optimierung von Biogasanlagen, Workshop „Steuerung, Regelung und Simulation von Biogasanlagen“ des IFAK e.V., Foliensatz, 17. Mai 2011, Magdeburg, Deutschland

Tsubota und Tsuno [2007]: Tsubota J. und Tsuno H., Improvement of AD process efficiency by hyper-thermophilic pre-treatment, Tagungsband, Session PP9C – Biosolids, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Turk [2009]: Turk T., Effektive Energiegewinnung von Abfällen – Vergärung von Bioabfällen – aktuelle Entwicklung, Technik und Wirtschaftlichkeit, Biogas 2009 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 2057, S. 57-70, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-092057-3, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf

Turkama et al. [2008]: Turkama T., Suojärvi M. und Koskinen J., Practical examples of soft sensors in pulp and paper mills, S. 59 - 65, Modelling and Simulation of Wet End Processes and Innovative Process Control, Cost E36 Modelling and Simulation in the Pulp & Paper Industry, Kappen J., Dietz W. und Grenz R. (Hrsg.), ISBN: 978-3-8334-7619-8, Books on Demand, Norderstedt, Deutschland

UBA [2008]: Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen, Texte 11/08, http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3347.pdf, ISSN 1862-4804, Umweltbun-des-amt, Deutschland

Uecker [2011]: Uecker F., Entwicklungen und Trends im Life-Cycle-Management von Automatisierungskomponenten für Abwassertechnische Anlagen, Tagungsband, Mess- und Regelungstechnik in Abwassertechnischen Anlagen, Gemeinschaftstagung DWA/VDI/VDE, 25.10.2011 bis 26.10.2011, Fulda, Deutschland

Uellendahl et al. [2007]: Uellendahl H., Mladenovska Z. und Ahring B. K., Wet oxidation of crude manure and manure fibers: Substrate characteristics influencing the pretreatment efficiency for increasing the biogas yield of manure, Tagungsband, Session PP8A – Bioenergy 2, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Ulrich [2009]: Ulrich A., Entwicklungsmethodik für die Planung verfahrenstechnischer Anlagen, Dissertation, Institut für Automatisierungstechnik, Helmut-Schmidt-Universität/ Universität der Bundeswehr, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren, Nr. 425, ISBN 978-3-18-342520-4, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf

Urban [2009]: Urban W., Biogaseinspeisung in das Erdgasnetz: neueste Marktentwicklungen im Bereich Gasaufbereitung und Netzeinspeisung, Gülzower Fachgespräche, Tagungsband „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“, Band 32, S. 237 bis 248, ISBN 978-3-942147-00-2, Gülzow, Deutschland

Van Eekert [2011A]: van Eekert M., Microbiological and biochemical aspects of anaerobic treatment, Course Programm 2011 “Principles of Anaerobic Wastewater Treatment” 2011, 23. März 2011, LeAF University of Wageningen, Niederlande

Van Eekert [2011B]: van Eekert M., Environmental factors – Temperature, pH, nutrients and toxicity, Course Programm 2011 “Principles of Anaerobic Wastewater Treatment” 2011, 23. März 2011, LeAF University of Wageningen, Niederlande

Van Eekert [2011C]: van Eekert M., Mass balance and COD, Course Programm 2011 “Principles of Anaerobic Wastewater Treatment” 2011, 23. März 2011, LeAF University of Wageningen, Niederlande

Van Zyl et al. [2007]: Van Zyl P.J., Ekama G.A. und Wentzel M.C., Stoichiometric modeling of the AD of low pH biodegradable substrate for the prediction of reactor pH and volume, Tagungsband, Poster Session PT03 – Modelling, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Vanrollegham et al. [2005]: Vanrolleghem P.A., De Clercq B., De Clercq J., Devisscher M., Kinnear D.J. and Nopens I., New Measurement Techniques for Secondary Settlers: A Review, 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation (IWA-ICA 2005), Proceedings, pp. 305-316, Busan, Südkorea

Vanrollegham et al. [2003]: Vanrollegham P.A., Insel G., Petersen B., Sin G., De Pauw D., Nopens I., Dovermann H., Weijers S. und Gernaey K., A comprehensive model calibration procedure for activated sludge models, Proceedings, 76th Annual WEF Conference and Exposition

Vargas und Buitrón [2005]: Vargas A. und Buitrón G., On-line concentration measurements in wastewater using nonlinear deconvulation and partial least squares of spectrometric data, Proceedings, S. 527-534, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Vargas et al. [2008]: Vargas M., Guisasola A., Casas C. und Baeza J. A., Simultaneous nitrite and phosphorus removal in an enriched nitrite-DPAO SBR monitored with titrimetry, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 113-120, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Vaßen [2012]: Vaßen P., Gasmengen und -durchflussmessung – Konzepte und Eignung für Biogasanlagen, Foliensatz und Manuskript, 2. VDI-Konferenz „Prozessmesstechnik an Biogasanlagen“, VDI-Wissensforum, ISBN 978-3-942980-99-9, 9./10. Oktober 2012, Fulda, Deutschland

VDI [2008]: VDI-RIchtlinie 4631 “Gütekriterien für Biogasanlagen”, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Fachausschuss Regenerative Energien, VDI Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Deutschland

VDI [2006]: VDI-Richtline 4630 „Vergärung organischer Stoffe - Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche“, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Fachausschuss Regenerative Energien, VDI Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Deutschland

VDI [2005]: VDI-Richtlinie 4075 Blatt 1 "Produktionsintegrierter Umweltschutz (PIUS) – Grundlagen und Anwendungsbereich“, VDI-Fachbereich Ressourcenmanagement in der Energie- und Umwelttechnik, VDI Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Deutschland

VDI/VDE [2005]: VDI/VDE-Richtlinie „3682 Formalisierte Prozessbeschreibungen“, VDI Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Deutschland

VDMA [1997]: VDMA-Einheitsblatt 24427 – Anlagen und Komponenten zur biologischen Abwasserreinigung mit SBR-Anlagen (Aufstauanlagen), Vereinigung Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer, Deutschland

Velmurugan und Veenstra [2008]: Velmurugan S. und Veenstra J. N., An optimization model for design and operation of sequencing batch Reactor, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 205-214, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Vereinigung Deutscher Gewässerschutz [2011]: http://www.virtuelles-wasser.de/, Vereinigung Deutscher Gewässerschutz e.V., Bonn, Deutschland

Virdis et al. [2007]: Virdis B., Rabaey K. und Keller J., Simultaneous Carbon and Nitrogen Removal in a Microbial Fuel Cell-Based System, Tagungsband, Session PP4A – Microbial Fuel Cells 1, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007 Brisbane, Australien

Vogel et al. [1998]: Vogel, F.; Hubele, C. und Riedel, G., Kommunale Abwasserreinigung in Potsdam-Nord mit zyklischen Belebungsverfahren, Wasser & Boden, Heft 12/98, 5. Jahrgang, S. 25-28, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, Deutschland

Walker et al. [2007]: Walker M., Banks C. J. und Heaven S., Effects of pH Control and Methanogenic Effluent Recycle on the Two-Stage Anaerobic Digestion of OFMSW, Tagungsband, Poster Session PT02 – Methanogenesis, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Walte et al. [2007]: Walte A., Münchmeyer W., Linke B., Härtge I., Becker B., Wehrhan A. und Buchholz A., Verwendung eines Propionsäure erkennenden Gas-Sensor-Arrays zur Regelung von Vergärungsprozessen, 15. November 2007, Convention Center Messe Hannover, abgedruckt in Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung, Gülzower Fachgespräche, Band 27, S. 72 bis 83, 2008, Gülzow, Deutschland

Wang et al. [2007]: Wang X., Feng Y. J. und Lee H., Electricity production from beer brewery wastewater using single chamber microbial fuel cell, Tagungsband, Session PP4A – Microbial Fuel Cells 1, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion 23-27 September 2007 Brisbane, Australien

Warmenhoven und Spanjers [2009]: Warmenhoven J.-W. und Spanjers H., TOC based control of anaerobic reactor treating wastewater from a fruit juice packaging factory, Proceedings, 10th IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 14-17 Juni 2009, Cairns, Australien

Weiland [2009]: Weiland P., Ergebnisse aus dem aktuellen Biogas-Messprogramm II, Gülzower Fachgespräche, Tagungsband „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“, Band 32, S. 14 bis 25, 2008, ISBN 978-3-942147-00-2, Gülzow, Deutschland

Weiland [2008]: Weiland P., Ergebnisse aus dem aktuellen Biogas-Messprogramm II, Gülzower Fachgespräche, Tagungsband „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“, Band 32, S. 14 bis 25, ISBN 978-3-942147-00-2, Gülzow, Deutschland

Weiland [2007]: Weiland P., Wichtige Messdaten für den Prozessablauf und Stand der Technik in der Praxis, 15. November 2007, Convention Center Messe Hannover, abgedruckt in Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung, Gülzower Fachgespräche, Band 27, S.17 bis 31, 2008, Gülzow, Deutschland

Weiland et al. [2007]: Weiland P., Rieger C., Schröder J., Kissel R., Bachmaier H., Plogsties V. und Vogtherr J., Stand der Technik bei der Erzeugung und Nutzung von Biogas unter Einsatz von NawaRo-Anlagen, Biogas 2007 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 1983, S. 89-102, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-091983-6, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Weiland und Gemmeke [2009]: Weiland P. und Gemmeke B., Bewertung von Schwachstellen anhand der bundesweiten Untersuchung von 60 Biogasanlagen, Biogas 2009 – Energieträger der Zukunft, VDI-Berichte 2057, S. 47-55, VDI-Gesellschaft Energietechnik, ISBN 978-3-18-092057-3, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Weiland und Rieger [2006]: Weiland P. und Rieger C., Prozessstörungen frühzeitig erkennen, Institut für Technologie und Biosystemtechnik, Abt. Technologie, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), BIOGAS Journal 4/06, Deutschland

Weijma [2011]: Weijma J., Operation and Maintenance, Course Programm 2011 "Principles of Anaerobic Wastewater Treatment" 2011, 24. März 2011, LeAF University of Wageningen, Niederlande

Weinrich und Nelles [2011]: Weinrich S. und Nelles M., Modellierung des Biogasprozesses, Tagungsunterlagen, VDI – Biogastagung 2011, Braunschweig, Deutschland

Weitze und Kraft [2011]: Weitze L. und Kraft E., Regelbasierter Applikationsalgorithmus zur Befütterungsempfehlung von großtechnischen Anlagen, Tagungsunterlagen, VDI – Biogastagung 2011, Braunschweig, Deutschland

Werner [2011]: Werner K., Geld stinkt doch, Capital 08/2011, S. 82-84, Gruner+Jahr AG & Co. KG, Hamburg, Deutschland

Wesselek und Schabbach [2009]: Wesselek V. und Schabbach T., Regenerative Energietechnik, ISBN 978-3-540-95881-9, Springer Verlag, Deutschland

Wett [2005]: Wett B., Solved Scaling Problems for implementing deammonification of rejection water, Proceedings, S. 389 – 396, IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, ISBN 83-921140-1-9, 19.-21. September 2005, Krakau, Polen

Wichern et al. [2008]: Wichern M., Lübken M., Schwarzenbeck N. und Horn H., Optimizing SBR reactor operation for treatment of dairy wastewater with aerobic granular sludge, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 355-361, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Wichern et al. [2007]: Wichern M., Lübken M., Koch K., Gehring T., Horn H., Fischer K., Schlattmann M. und Gronauer A., Eignung des Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM 1) zur Prozesssteuerung landwirtschaftlicher Biogasanlagen, 15. November 2007, Convention Center Messe Hannover, abgedruckt in Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung, Gülzower Fachgespräche, Band 27, S. 172 bis 194, 2008, Gülzow, Deutschland

Wichern et al. [2001]: M. Wichern, K.H. Rosenwinkel und M. Lübken, *Einsparpotenziale bei der Auslegung von SBR-Kläranlagen*, wwt/awt, Heft 7, 2001, S. 35 – 38, Verlag Bauwesen, Berlin, Deutschland

Wiese [2013]: Wiese J., Standardisierte Steuerungs- und Regelkonzepte für Kläranlagen – Erfahrungsbericht eines Betreibers, Seminarband, Fachseminar Laboranalytik und Prozess-Messtechnik, Fa. HACH LANGE GmbH, 6. Juni 2013, Frankfurt, Deutschland

Wiese [2012]: Wiese J., Die weitergehende Phosphatelimination aus Sicht eines Planers und Betreibers von Kläranlagen, Seminarband, Fachseminar Laboranalytik und Prozess-Messtechnik, Fa. HACH LANGE GmbH, 2012, Lahnstein, Deutschland

Wiese [2008A]: Wiese J., Erfassung, Messung und Monitoring der Wasserqualität in der Wasserver- und -entsorgung, Foliensatz zum Impulsreferat, ZVEI-Workshop „Wasserqualität“, ZVEI-Technologie-Roadmap „Trends, Bedarfe und Zukunftsmärkte für die Automation bis 2020+“, 20. Mai 2008, Berlin, Deutschland

Wiese [2008B]: Wiese J., Biogas-Technologien und Automationsbedarf, Foliensatz zum Impulsreferat, ZVEI-Workshop „Bioraffinerien – Kraftstoffe, Chemikalien & Produkte“, ZVEI-Technologie-Roadmap „Trends, Bedarfe und Zukunftsmärkte für die Automation bis 2020+“, 5. September 2008, Berlin, Deutschland

Wiese [2008C]: Wiese J., Anaerobtechnik – Von der Klärschlammbehandlung zur Erzeugung Erneuerbarer Energie, Foliensatz, Siemens Wassertag 2008, 19. Februar 2008, Bielefeld, Deutschland

Wiese [2007A]: Wiese J., Verwertung von Wärmeüberschüssen auf Biogasanlagen. Konferenz der Hochschule Bremen “Niedertemperatur- und Abwärmenutzung in kommunalen und industriellen Energieversorgungssystemen – Theorie und Praxis”, Haus der Wissenschaft – Bremen, 8. November 2007, Tagungsband, Bremen, Deutschland

Wiese [2007B]: Wiese J., Messen-, Steuern- und Regeln auf Biogasanlagen, Energietagung „Effiziente Biogaserzeugung“, 10. Oktober 2007, Foliensatz, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Triebischtal, Deutschland

Wiese [2006]: Foliensatz zum Vortrag “Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik auf EnerCess-Biogasanlagen“, Expertentreffen „Messen, Steuern und Regeln auf Biogasanlagen“, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), 17.10.2006, Berlin, Deutschland

Wiese und König [2009A]: J. Wiese and R. König, From a black-box to a glass-box system – The attempt towards a plant-wide automation concept for full-scale biogas plants, Water Science & Technology (WST), Vol. 60, No. 2, pp. 321–327, IWA Publishing, UK

Wiese und König [2009B]: J. Wiese and R. König, From Challenges to Opportunities – Intensive use of instrumentation, control and automation on full-scale biogas plants, Proceedings, IWA-ICA-Conference 2009, Cairns, Australien

Wiese und König [2009C]: Foliensatz zum Vortrag “From a black-box to a glass-box system – The attempt towards a plant-wide automation concept for full-scale biogas plants”. IWA-ICA-Conference 2009, Cairns, Australien

Wiese und König [2007]: Wiese J. und König R., Prozessbegleitende Überwachung auf Biogasanlagen – Praxisbericht, Laboranalytik & Prozessmesstechnik, Biogas, Anlagenüberwachung, http://www.hach-lange.de/shop/action_q/download%3Bdocument/DOK_ID/14782554/type/pdf/lkz/DE/spkz/de/TOKEN/nwq-KXQz2OJgkZAgfRbnx0ufP3k/M/4AhKxA/DOC040.72.00447.May07.web.pdf, Hach Lange GmbH, Düsseldorf, Deutschland

Wiese und König [2006]: Wiese J. und König R., Prozessbegleitende Überwachung auf Biogasanlagen, DVGW energie | wasser-praxis, 57. Jahrgang, ISSN 1436-6134, Heft 9/2006, S. 10-16, Deutschland

Wiese und Kujawski [2008]: J. Wiese and O. Kujawski, Operational results of an agricultural biogas plant equipped with modern instrumentation and automation. Water Science and Technology (WST), Vol. 57, No. 6, pp 803-808, IWA Publishing, Großbritannien

Wiese und Kujawski [2007]: J. Wiese and O. Kujawski, Operational results of an agricultural biogas plant equipped with modern instrumentation and automation. Vortragsfoliensatz, 24. September 2007, Session “2A - Bioenergy “, 11th IWA Specialist conference on anaerobic digestion “Bio-energy for our future - Renewable Energy from Waste”, Brisbane, Australien

Wiese und Simon [2006]: Wiese J. and Simon J., Dynamic simulation of an existing WWTP and a combined sewer system - Description of the modelling procedure, Proceedings, 7th International Conference on Urban Drainage Modelling, April 2006, Melbourne, Australia

Wiese et al. [2008A]: J. Wiese, O. Kujawski, R. König, K. Dickmann and H. Andree: Applying Instrumentation, Control and Automation for Biogas Plants – Results of Full-scale Applications. Proceedings, World Bioenergy Congress 2008, Schweden

Wiese et al. [2008B]: J. Wiese, O. Kujawski, R. König and K. Dickmann, Instrumentation, Control and Automation for Biogas Plants – Three Full-Scale Examples. Proceedings, IWA-Congress „Anaerobic Digestion of biosolids and energy crops“, Hammamet, Tunesien

Wiese et al. [2007]: Wiese J., Kujawski O. und König R., Mess- und Automationstechnik auf Biogasanlagen, VDI/VDE-Jahrestagung „Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen: Konzepte – Erfahrungen – Trends“, VDI/VDE-Gesellschaft „Mess- und Automatisierungstechnik“, Tagung Wuppertal, November 2007, Deutschland

Wiese et al. [2006]: Wiese J., Simon J. und Steinmetz H., A process-dependent real-time controller for sequencing batch reactor plants – Results of full-scale operation. Water Science & Technology (WST), Vol. 53, No. 4-5, pp. 143-150, IWA Publishing, Großbritannien

Wiese et al. [2005A]: Wiese J., Stahl A. und Hansen J., Applying and Optimizing Case-Based Reasoning for Wastewater Treatment Systems. AI Communications - The European Journal on Artificial Intelligence, Vol. 18, No. 4, pp. 269 – 279

Wiese et al. [2005B]: Wiese J., Simon J. und Steinmetz H., A process-dependent real-time controller for sequencing batch reactor plants – Results of full-scale operation. Foliensatz, 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation, Busan, South Korea

Wiese et al. [2004]: Wiese J., Stahl A. und Hansen J., Possible Applications for Case-Based Reasoning in the Field of Wastewater Treatment, Workshop 23: Binding Environmental Sciences and Artificial Intelligence, Proceedings, S. 10-1 bis 10-10, 16th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2004), 23.-27. August 2004, Valencia, Spanien

Wiese [2005]: Wiese J., Entwicklung von Strategien für einen integrierten Betrieb von SBR-Kläranlagen und Mischkanalisationen – Simulation und Großtechnik, Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft, Band 19, Technische Universität (TU) Kaiserslautern, Kaiserslautern, Deutschland (es handelt sich hierbei um die Dissertation, die um die Ergebnisse der großtechnischen Erprobung und des umfangreichen Messgeräteeinsatzes, die in der Post-Doc-Phase entstanden ist, ergänzt wurde)

Wiese [2004]: Wiese J., Entwicklung von Strategien für einen integrierten Betrieb von SBR-Kläranlagen und Mischkanalisationen, http://kluedo.ub.unikl.de/frontdoor.php? source_ opus =1762, Dissertation am Fachgebiet für Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität (TU) Kaiserslautern, Kaiserslautern, Deutschland

Wikipedia [2013A]: Strompreis, http://de.wikipedia.org/wiki/Strompreis

Wikipedia [2013B]: Haushund, http://de.wikipedia.org/wiki/Haushund

Wilderer und Irvine [1984]: Wilderer P.A. und Irvine R.L., Sequencing Batch Reactor Verfahren zur biologischen Abwasserreinigung – Konzept, Wirkungsmechanismen und Betriebserfahrungen, GWA Nr. 69, S. 521-548, Deutschland

Wilsenach [2005]: Wilsenach J., Desar options for seperate treatment of urine, STOWA Rapportnummer 2005-11, ISBN 90.5773.300.5, Utrecht, Niederlande

Winkler [2005]: Winkler S., Field properties and accuracy of in-situ water quality sensors, 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation (IWA-ICA 2005), Proceedings, pp. 153-163, Busan, Südkorea

Wolf et al. [2012]: Wolf C., Gaida D. und Bongards M., Geeignete Online-Messtechnik zur Optimierung und Regelung von Biogasanlagen, Foliensatz und Manuskript, 2. VDI-Konferenz „Prozessmesstechnik an Biogasanlagen“, VDI-Wissensforum, ISBN 978-3-942980-99-9, 9./10. Oktober 2012, Fulda, Deutschland

Wolf et al. [2007]: Wolf C., Bongards M. and McLoone S., Simulation-based feed-optimization of medium-sized agricultural biogas plants, Session PP4B – Modelling, Proceedings, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australia

Wolff et al. [2007]: Wolff H. J., Nickel K., Houy A., Lunden A. und Neis U., Two years experience on a large German STP with acoustic disintegration of waste activated sludge for improved anaerobic digestion, Tagungsband, Session PP9C – Biosolids, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Wölle und Ebert [2009]: Wölle J. und Ebert A., Hannah – Ein innovatives Werkzeug zur Prozessvisualisierung und –diagnose, S. 143-162, ISBN 978-3-941438-24-8, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, TU Kaiserslautern, Schriftenreihe, Band 28 „Komplett – Ein innovatives System zur Schließung von Wasser- und Stoffkreisläufen“, Kaiserslautern, Deutschland

Wölle et al. [2011]: Wölle J., Steffen D., Szczepanski T. und Tschepetzki R., Mobile integrierte Datenplattform für die prädiktive Überwachung von Kläranlagen, Tagungsband, Mess- und Regelungstechnik in Abwassertechnischen Anlagen, Gemeinschaftstagung DWA/VDI/VDE, 25.10.2011 bis 26.10.2011, Fulda, Deutschland

Wraneschitz [2011]: Wraneschitz H., Sicherheitsregeln einhalten, BIOGAS Journal 2/2011, S. 40-41, Zeitschrift des Fachverband Biogas e.V., Freising, Deutschland

Wratil und Kieviet [2010]: Wratil P. und Kieviet M., Sicherheitstechnik für Komponenten und Systeme, 2. neu bearbeitete Anlage, ISBN 978-3-8007-3276-0, VDE Verlag, Berlin, Deutschland

WTW [2011A]: WTW Varion Plus 700 IQ ISE-Sensor, http://www.wtw.de/de/produkte/online/stickstoff/in-situ-ise-sensoren.html, WTW GmbH, Weilheim, Deutschland

WTW [2011B]: Dynamische Prozessregelung mittels ISE-Sensoren senkt Energiekosten, ITT/WTW Waterworld, Ausgabe 22, April 2011, WTW Wissenschaftlich Technische Werkstätten GmbH, Weilheim, Deutschland

Wu et al. [2005]: Wu J., Pons M.N. und Potier O., Wastewater fingerprinting by UV-visible and synchronous fluorescence spectroscopy, Proceedings, S. 317-325, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

WVE [2007]: Kläranlagenüberwachung, Effiziente Sichtkontrolle durch Netzwerk-Video: Klare Vorteile für Kommunen, Westpfälzische Ver- und Entsorgungs GmbH (WVE), Kaiserslautern, Deutschland

Ye et al. [2009]: Ye L., Tang B., Zhao K., Pijuan M. und Peng Y., Nitrogen Removal via Nitrite in Domestic Wastewater Treatment using Combined Salt Inhibition and on-line Process control in SBR, Observer-based input estimation in continuous anaerobic wastewater treatment processes, Proceedings, 10th IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 14-17 Juni 2009, Cairns, Australien

Yoo et al. [2005]: Yoo C.K., Villez K., Lee I.B., Van Hulle S. und Vanrollegham P.A., Sensor validation and reconciliation for a partial nitrification process, S. 767 – 776, Proceedings, 2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation, Busan, Südkorea

You und Bischoff [2008]: You Y. und Bischoff M., Mathematical Simulation of a Biogas Plant, Diplomarbeit, Fachbereich „Angewandte Naturwissenschaften“, Prof. Dr.-Ing. Bischoff, Fachhochschule Lübeck, Deutschland

Yu et al. [1997]: Yu, R.-F.; Liaw, S.-L.; Chang, C.-N.; Lu, H.-J. and Cheng, W.-Y., Monitoring and control using on-line ORP on the continuous flow activated sludge batch reactor system, Water Science and Technology, Vol. 35, No. 1, pp. 57-66, 1997, Pergamon by Elsevier Science Ltd., UK

Yuan et al. [2005]: Yuan Z., Peng Y., Oehmen A., Lu H., Fux C. und Keller J., Sludge population optimisation in biological wastewater treatment systems through on-line process control: What can we achieve?, Proceedings, S. 565-580, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Zacharias [2001]: Zacharias F., Gasmotoren, 1. Auflage, ISBN 3-8023-1796-3, Vogel Fachbuch, Würzburg, Deutschland

Zamboni et al. [2010]: Zamboni A., Shah N. und Bezzo F., Bioethanol Production System in Northern Italy: Supply Chain Design and Cost Optimisation, S. 125 – 139, Proceedings of the Seventh International Conference on the Foundations of Computer-Aided Process Design, Design for Energy and Environment, ISBN 978-1-4398-0912-9, CRC-Press, Boca Raton, USA

Zeeman [2011A]: Zeeman G., Anaerobic wastewater treatment: the sustainable alternative, Course Programm 2011 “Principles of Anaerobic Wastewater Treatment” 2011, 23. März 2011, LeAF University of Wageningen, Niederlande

Zeeman [2011B]: Zeeman G., Anaerobic Reactor Systems, Course Programm 2011 “Principles of Anaerobic Wastewater Treatment” 2011, 23. März 2011, LeAF University of Wageningen, Niederlande

Zeit online [2011]: Müll statt Mahlzeit, http://www.zeit.de/kultur/film/2011-09/rezension-taste-the-waste/, Zeit online, Zeitverlag Gerd Bucerius GmbH & Co. KG, Hamburg, Deutschland

Zelezny und Wong [2005]: Zelezny M. und Wong G., Practical technology for business integration, Proceedings, S. 853-860, 2nd IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, 29.5.-2.6.2005, Busan, Südkorea

Zeng et al. [2007]: Zeng Y., Choo Y.F., Kim B.H., Mu S.J. und Wu P., Modeling and Simulation of Microbial Fuel Cell, Tagungsband, Session PP5A – Microbial Fuel Cells 2, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

Zhou et al. [2008]: Zhou Y., Pijuan M. und Yuan Z., Biological nutrient removal from abattoir wastewater using combined aerobic granular sludge and biofilm SBRs: improvement to the 2-sludge 3-stage concept, Platform Presentation, Proceedings of 4th IWA Specialised Conference on Sequencing Batch Reactor Technology, S. 449-456, 7-10 April 2008, S. Michele a Ripa, Rom, Italien

Ziegenhirt et al. [2010]: Ziegenhirt J., Bartz-Beielstein T., Flasch O., Konen W. und Zaefferer M., Optimization of Biogas Production with Computational Intelligence – A Comparative Study, http://maanvs03.gm.fh-koeln.de/webpub/CIOPReports.d/Zieg10a.d/ciop0310.pdf, FH Köln-Gummersbach, Deutschland

Zimmermann [2005]: Zimmermann C., Prozesskontrolle durch dynamische Betriebsführung, Foliensatz, Fachseminar der Landwirtschaftskammer Hannover, 22. November 2005, Nienburg, Deutschland

Zosel et al. [2007]: Zosel J., Oelßner W., Guth U., Zimmermann P., Petersson E. und Sensel K., Entwicklung eines Wasserstoffsensors für die Flüssigphase von Biogasanlagen, 15. November 2007, Convention Center Messe Hannover, abgedruckt in Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung, Gülzower Fachgespräche, Band 27, S. 58 bis 71, 2008, Gülzow, Deutschland

Zosel et al. [2011]: Zosel J., Schelter M., Oelßner W., Guth U., Mertig M., Habermann B., Ritzi E., Zimmermann P. und Winterberg R., Sensorkonzepte zur Bestimmung gelöster Gase in Biogasmedien, Tagungsunterlagen, VDI – Biogastagung 2011, Braunschweig, Deutschland

Zosel und Vonau [2012]: Zosel J. und Vonau W., Schädigung elektrochemischer Sensoren in Biogasprozessen, Foliensatz und Manuskript, 2. VDI-Konferenz „Prozessmesstechnik an Biogasanlagen“, VDI-Wissensforum, ISBN 978-3-942980-99-9, 9./10. Oktober 2012, Fulda, Deutschland

Zühlke [2012]: Zühlke D., Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen – Useware-Engineering für technische Systeme, 2. neu bearbeitete Auflage, ISBN 978-3-642-22073-9, Springer Verlag, Heidelberg, Deutschland

Zunhammer [2007]: Weltneuheit VAN-Control, http://www.zunhammer.de/Home/InfoNews/tabid/65/articleType/ArticleView/articleId/22/Weltneuheit-2007-VANControl.aspx, Zunhammer GmbH Gülletechnik Fahrzeugbau, Traunreut, Deutschland

Zupančič und Gotvajn [2007]: Zupančič G. D. und Gotvajn A. Ž., Anaerobic co-digestion of pharmaceutical waste fermentation broth mixed with pig slurry and corn-grass silage, Tagungsband, Poster Session PT03 – Recalcitrants, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australien

ZVEI [2009A]: Integrierte Technologie-Roadmap „Automation 2020+ Energie – Zukunftsmärkte und Technologieanforderungen“, ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Frankfurt, Deutschland

ZVEI [2009B]: Integrierte Technologie-Roadmap „Automation 2020+ Wasser und Abwasser – Zukunftsmärkte und Technologieanforderungen“, ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Frankfurt, Deutschland

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Prinzipskizze zur Erläuterung der Abgrenzung zwischen den einzelnen Stufen der in dieser Arbeit betrachten Systeme ... 9

Abb. 2.1: Schema eines „energie- und nährstoffautarken“ Lebensmittelbetriebs ... 15

Abb. 2.2: Multi-kriterielles Spannungsfeld der modernen Siedlungswasserwirtschaft ... 21

Abb. 3.1: Vergleich der Installation von In-Situ- und On-Site-Prozessanalysator ... 36

Abb. 3.2: Kostenentwicklung für Ammonium- und Phosphatprozessphotometern zwischen 1994 und 2005 ... 37

Abb. 3.3: Entwicklung der Jahreskosten für Ammonium-Prozessmesstechnik zwischen 1994 und 2009 ... 42

Abb. 3.4: Lösung für die Beprobung von zwei SB-Reaktoren mit je einem Satz Messgeräte ... 44

Abb. 3.5: Lösung für die Beprobung von zwei SB-Reaktoren mit einem Satz Messgeräte ... 44

Abb. 3.6: Vergleich zwischen im Prozess gemessenen NH_4-N-Konzentrationen und mittels Schnelltests ermittelten Laborwerten ... 45

Abb. 3.7: Vergleich zwischen im Prozess gemessenen NH_4-N-Konzentrationen und mittels Schnelltests ermittelten Laborwerten während eines Zyklus ... 45

Abb. 3.8: Ionenselektive Kombielektroden für NH_4-N und NO_3-N ... 46

Abb. 3.9: Konzentrationsverlauf für NH_4-N und NO_3-N in einer intermittierenden Belebungsanlage, die mittels Redox-Potenzial und O_2 geregelt wird. ... 46

Abb. 3.10: Beprobung im Kläranlagenzulauf: 1 = Temporäre Beprobung, 2 = Permanente Beprobung ... 49

Abb. 3.11: SAK-Tagesspektren im Kläranlagenzulauf mit diversen Ausreißerwerten ... 50

Abb. 3.12: Mobiler Sampler ... 50

Abb. 3.13: SAK-/TS-Tagesganglinien im Ablauf des Filters einer SBR-Anlage ... 51

Abb. 3.14: Temperatur- und Druckmessgeräte in der Anaerobtechnik ... 53

Abb. 3.15: Applikationen für Druckmessungen im Biogassektor ... 53

Abb. 3.16: Durchflussmesseinrichtungen auf Kläranlagen ... 55

Abb. 3.17: Durchflussmessungen auf Kläranlagen- und Biogasanlagen ... 55

Abb. 3.18: Gasdurchflussmessungen ... 56

Abb. 3.19: pH, elektrolytische Leitfähigkeit und Temperatur in Ex-Schutz-Ausführung ... 57

Abb. 3.20: Exemplarischer Verlauf von Messwerten für elektr. Leitfähigkeit und Durchfluss im Zulauf zu einer Kläranlage vor und unmittelbar nach Beginn eines Niederschlagsereignisses ... 58

Abb. 3.21: Membranfilitration in einem SB-Reaktor als Probennahmegerät ... 60

Abb. 3.22: Füllstandsmessungen auf Kläranlagen ... 62

Abb. 3.23: Langzeitverlauf der Biogaszusammensetzung einer NawaRo-Biogasanlage ... 65

Abb. 3.24: Auswahl von online-Gasanalyse-Geräten ... 65

Abb. 3.25: Installation einer Nitratmesssonde ... 68

Abb. 3.26: Schwimmbojenlösung zur Montage von in-situ-Sonden 69
Abb. 3.27: Vergleich zwischen im Prozess gemessenen NO_3-N-Konzentrationen und mittels Schnelltests ermittelten Laborwerten 70
Abb. 3.28: Vergleich zwischen im Prozess online gemessenen NO_3-N-/NH_4-N-Konzentrationen und mittels NO_3-N-/NH_4-N-Schnelltests ermittelten Laborwerten während eines Zyklus 70
Abb. 3.29: Rohrleitung in einer zentralen Pumpstation einer Biogasanlage mit Einbauarmaturen für pH- und Redox-Elektroden, TS-Sonde und Leitfähigkeitsmessung 75
Abb. 3.30: Vergleich zwischen im Prozess online gemessenen PO_4-P-Konzentrationen und mittels PO_4-P-Schnelltests ermittelten Laborwerten 77
Abb. 3.31: Elektrochemische Gelöst-Sauerstoffmessung 79
Abb. 3.32: Installation einer Schlammspiegelsonde in einem SBR 81
Abb. 3.33: Vergleich von Schlammspiegel- und Sichttiefenmessungen 82
Abb. 3.34: Installation einer TS-Messsonde in einem SBR und in einer Übersschuss-schlammleitung 86
Abb. 3.35: Vergleich zwischen im Prozess online gemessenen TS-Konzentrationen und im Labor ermittelten TS-Konzentrationen..... 86
Abb. 3.36: Beispiel für den Verlauf der online-TS-Messung in den verschiedenen Phasen eines Zyklus im SBR 2 87
Abb. 3.37: TS-Vergleichsmessungen: TS-Sonde vs. Labor 89
Abb. 3.38: Installation einer VSV-Messsonde in einem SBR 91
Abb. 3.39: Vergleich zwischen händisch ermittelten VSV-Werten und den Werten einer VSV-Sonde (in-situ) 92
Abb. 3.40: Wägevorrichtungen auf Biogasanlagen 93
Abb. 3.41: Tageslastgang (15 min-Werte) der elektrischen Leistung einer Kläranlage 94
Abb. 3.42: Wettermessgeräte..... 96
Abb. 3.43: Web-Cam zur Objektsicherung einer Biogasanlage, schwenkbare Videotechnik zur Überwachung einer Kläranlage, Ex-geschützte Videokamera zur Überwachung eines Anaerobreaktors..... 97
Abb. 3.44: Auswahl von Labormessgeräten auf Biogasanlagen 101
Abb. 3.45: Vergleichsmessungen zwischen Küvettentests und Norm-Analytik..... 102
Abb. 3.46: Ergebnisse einer Verdünnungsreihe zur Plausibilitätsuntersuchung organischer Säuren in der Fermenterprobe 104
Abb. 3.47: Aufstock- und Verdünnungsversuche zur Plausibilitätsuntersuchung organischer Säuren in einer Fermenterprobe 104
Abb. 3.48: Laserhandmessgerät zur Methanleckortung, Vermessung des Kopfteils eines Anaerobreaktors auf einer Kläranlage 109
Abb. 3.49: Ansatz zur Qualitätssicherung von Prozessmesswerten 1 113
Abb. 3.50: Ansatz zur Qualitätssicherung von Prozessmesswerten 2 113

Abb. 4.1: Informations- und Automationspyramide im Anlagenbau 117
Abb. 4.2: Handschieber zum Notabsperren von Pumpleitungen, Schieber mit Elektroantrieb, Handschieber an einer Gärrestabgabestation 120
Abb. 4.3: Pneumatikschieber mit Endlagenüberwachung und Spülanschlüssen, Druckluftversorgung 120
Abb. 4.4: Heizungssystem im BHKW-Raum, Anschlüsse an die Heizung des Fermenters 121
Abb. 4.5: Probenahmestutzen - flüssig, Probenahmestutzen - Biogas, Spülanschluss . 121
Abb. 4.6: Überdruck-/Unterdrucksicherung, Kondensatschacht, Notabsperrhahn für Gasleitung, Gasabsperrschieber an einem gasdichten Gärrestlager 121
Abb. 5.1: Typischer Prozessphasenablauf in einem SBR-Zyklus 134
Abb. 5.2: Konzentrationsverlauf wichtiger Prozess- und Verschmutzungsparameter während eines 8h-Trockenwetterzyklus mit einer Schrittkettensteuerung 136
Abb. 5.3: Grundprinzip verschiedener SBR-Verfahren 137
Abb. 5.4: Diverse Typen von Pumpwerken 147
Abb. 5.5: Bilder mechanischer Vorreinigungssysteme auf SBR-Anlagen 149
Abb. 5.6: Zwischenpumpwerke mit zwei Tauchmotorpumpen integriert in einen Vorlagebehälter 150
Abb. 5.7: Verschiedene Typen von Reaktoren 151
Abb. 5.8: Rundbecken mit vier Belüfterarmen und Schlauchmembranbelüftern, schwimmender Oberflächenbelüfter, Tellerbelüfter 151
Abb. 5.9: Gebläse in Außenaufstellung, Gebläse zwischen den beiden SB-Reaktoren witterungsgeschützt in einem Raum aufgestellt 152
Abb. 5.10: Installationen in einen Reaktor 152
Abb. 5.11: Mengenausgleichsbecken im Ablauf 155
Abb. 5.12: Behandlung des Kläranlagenablaufs 156
Abb. 5.13: Trübwasserspeicher, Schlammstapelbehälter, Tauchmotorpumpen zur gezielten Dosierung von Trübwasser in die Reaktoren 157
Abb. 6.1: Grundprinzip einer Regelung bzw. Steuerung 161
Abb. 6.2: Typische Messtechnische Ausstattung einer SBR-Kläranlage mit Vorlagebehälter und zwei SB-Reaktoren der Größenklasse 1 bis 3 162
Abb. 6.3: Übersicht der Automatisierungs- und Leittechnik einer SBR-Kläranlage der Größenklasse 4 166
Abb. 6.4: Status Quo – Begrenzung des Zuflusses auf ein definiertes Maximum 170
Abb. 6.5: Einlaufpumpwerk mit zwei abwechselnd betriebenen Tauchmotorpumpen 171
Abb. 6.6: Bewirtschaftung eines vorgelagerten Regenüberlaufbeckens 172
Abb. 6.7: Zyklusplan für eine SBR-Anlage mit kontinuierlicher Beschickung 175
Abb. 6.8: Zyklusplan für eine SBR-Anlage mit einer schubweisen Beschickung ohne Vorspeicher mit zwei SB-Reaktoren 175

Abb. 6.9: Zyklusplan für eine SBR-Anlage mit einer schubweisen Beschickung mit Vorspeicher und zwei SB-Reaktoren ... 176
Abb. 6.10: Beispiel einer zeit-/füllstandsbasierten Bewirtschaftung eines Zufluss-speichers ... 177
Abb. 6.11: SBR-Zyklus mit zeitlicher Ablaufsteuerung und exemplarischer Schrittkette .. 178
Abb. 6.12: Exemplarischer Auszug aus einer Schrittkettensteuerung ... 180
Abb. 6.13: Grobkonzept einer Steuerung und Regelung der Denitrifikationsphase ... 182
Abb. 6.14: Verlauf der Sauerstoffkonzentration im Verlauf eines Schwachlasttages ... 183
Abb. 6.15: Verlauf der Sauerstoffkonzentration im Verlauf eines Hochlastzyklus ... 184
Abb. 6.16: Vereinfachte Darstellung einer Regelung der Belüftung in Abhängigkeit der NH_4-N-Konzentration ... 185
Abb. 6.17: Vereinfachte Darstellung einer Regelung der Zugabe von Fällmitteln für Zwecke der chemisch-physikalischen Phosphorelimination ... 188
Abb. 6.18: Absetzversuch mit belebtem Schlamm in einem Standzylinder ... 189
Abb. 6.19: Vereinfachtes Konzept zur Regelung der Sedimentations-/Dekantierphase .. 190
Abb. 6.20: Vereinfachtes Konzept zur Regelung des Überschusschlammabzugs ... 191
Abb. 7.1: Wirkungsspektrum von Mischwassereinleitungen ... 203
Abb. 7.2: Prinzip eines integrierten Betriebs mit dynamischer Anpassung des Mischwasserzuflusses ... 203
Abb. 7.3: Übersicht über verfahrenstechnische Komponenten und Messstellen auf einer „transparenten“ SBR-Anlage sowie im Kanalnetz und Gewässer ... 204
Abb. 7.4: Prozessgrößen im SBR 1 während eines 6 h-Regenwetterzyklus ... 208
Abb. 7.5: Prozessgrößen im SBR 1 während eines 8 h-Regenwetterzyklus ... 209
Abb. 7.6: Prozessgrößen im SBR 2 während eines 8 h-Regenwetterzyklus ... 209
Abb. 7.7: Ganglinien wichtiger Prozessgrößen im SBR 1 ... 210
Abb. 7.8: Prozessgrößen infolge einer hohen Belastung im SBR 1 ... 211
Abb. 7.9: Grundprinzip der Trocken- und Regenwettererkennung ... 212
Abb. 7.10: Grundprinzip der dynamisierten Zyklussteuerung ... 215
Abb. 7.11: Grundprinzip eines Min-/Max-Sollwertgebers ... 215
Abb. 7.12: Parametrier- und Informationsebene für die Zyklussteuerung ... 216
Abb. 7.13: Vergleich der hydraulischen Spitzen an den einzelnen punktförmigen Einleitstellen am Mörsbach mit dem HQ_1 ... 221
Abb. 7.14: Statistische Auswertung der während der Dekantierphase ermittelten NH_4-N-, NO_3-N- und PO_4-P-Konzentrationen während der Erprobungs-dauer vs. den Vergleichswerten vor der Erprobung. ... 229
Abb. 7.15: Glühverluste in Abhängigkeit des Jahresverlaufs ... 232
Abb. 7.16: Kläranlagenzu- und -abfluss, Zulaufabwassertemperatur, SAK/TS-Ablaufkonzentration während des Niederschlagsereignisses ... 234
Abb. 7.17: Ergebnisse der händischen Beprobung an den Messstellen „Mörsbachbrücke“ und „Ablauf des Flächenfilters“ ... 235

Abb. 7.18: Einfaches CBR-Modell ... 242
Abb. 7.19: CBR-Zyklus ... 244
Abb. 7.20: Aufbau eines CBR-basierten prädiktiven SBR-Controller ... 245
Abb. 7.21: Schlammhöhenverlauf während der Sedimentations- und Dekantierphase von vier auf einanderfolgender Trockenwetterzyklen ... 247
Abb. 7.22: Ähnlichkeitsberechnung bei der Problembeschreibung ... 247
Abb. 7.23: Beispiel einer guten Prognose des Schlammhöhenverlaufs ... 248
Abb. 7.24: Beispiel einer schlechten Prognose des Schlammhöhenverlaufs ... 248
Abb. 7.25: Trockenwetter-Tagesganglinien im Kläranlagenzulauf in 2003 ... 250
Abb. 7.26: Beispiel für eine gute Prognose der Zuflussganglinie ... 250
Abb. 7.27: Fehlerverteilung der Prognose bezüglich Stunden- und Tageszufluss ... 251
Abb. 7.28: Schematische Abläufe einer möglichen (teil-)automatisierten Fehler-diagnose/-lösung am Beispiel „Ungenügende Nitrifikationsleistung“ ... 253
Abb. 8.1: Der Biogasprozess ... 257
Abb. 8.2: Prinzip des Rührkessels und des Pfropfenstromreaktors ... 272
Abb. 8.3: Fließ- und Prinzipschema einer NawaRo-Biogasanlage ... 276
Abb. 8.4: Fließ- und Prinzipschema einer Kofermente-Biogasanlage ... 276
Abb. 8.5: Flachsilos für Maissilage ... 278
Abb. 8.6: Feststoffdosierer mit einem Futtermischer ... 280
Abb. 8.7: Feststoffdosierer mit einem Schubboden ... 281
Abb. 8.8: Fermenter mit Dämmung und Verkleidung, Tragluftdach mit integrierter Gasspeicherfolie sowie diversen Details ... 283
Abb. 8.9: Gärrestabgabestation an einem Gärrestlager ... 286
Abb. 8.10: Blockheizkraftwerk mit 537 kW_{el}-Gasmotor ... 289
Abb. 9.1: Händisch geführtes Betriebs- und Stoffstromtagebuch, Thermometer, Bedienfeld und Vorortbedienung einer größeren Biogasanlage ... 301
Abb. 9.2: Exemplarische Darstellung von Standardkomponenten aus der Anlagenautomation, die auch auf Biogasanlagen zum Einsatz kommen ... 314
Abb. 9.3: Feststofffütterung in Abhängigkeit einer vorgegebenen Tagesfracht ... 317
Abb. 9.4: Gaswarntechnik ... 323
Abb. 9.5: Entscheidungsbaum zur Einschätzung der Prozessstabilität eines Anaerobreaktors ... 328
Abb. 10.1: Die messtechnische „Höchstausstattung“ einer derzeitigen Biogasanlage ... 341
Abb. 10.2: Übersicht über die Biogasanlage ... 342
Abb. 10.3: Materialflussschema der Biogasanlage ... 343
Abb. 10.4: Energieflussschema der Biogasanlage ... 343
Abb. 10.5: Zentralisierte und voll-automatisierte Pumpstation ... 345
Abb. 10.6: Feststoffdosierer als Schubboden mit horizontalen und vertikalen Förderschnecken sowie 45° Grad-Stopfschnecken ... 348

Abb. 10.7: Beprobung eines Fahrsilos mit Maissilage über den Querschnitt und über den Vortrieb ... 348
Abb. 10.8: Wasch- und Zerkleinerungsmaschine für Zucker-, Futterrüben o. ä. ... 350
Abb. 10.9: Experiment einer Zudosierung von Futterrüben ... 351
Abb. 10.10: Konzentrationsparameter (TS, Essigsäureäquivalente) im Fermenter und Nachgärer ... 351
Abb. 10.11: Zentrale Pumpstation mit Nah-Infrarot-Spektrometer, NIRS Sensor am Feststoffdosierer, NIRS Sensor vor Installation ... 352
Abb. 10.12: Ergebnisse der NIRS-Kalibrierung: flüchtige organische Säuren, Gesamtstickstoff, organ. Trockenmasse ... 353
Abb. 10.13: Verlauf wichtiger Prozessgrößen für pH, Redox und Gasdurchfluss vor und während einer Betriebsstörung ... 354
Abb. 10.14: Übersichtsbereich eines Biogasanlagen-PLS ... 355
Abb. 10.15: Visualisierung eines Fermenters mit allen wichtigen Prozess-/Betriebsgrößen in der Grafik- und Bedienebene ... 356
Abb. 10.16: Bedien-, Info- und Parametrierfenster für einen Schieber ... 356
Abb. 10.17: Wiegezellemessweertverlauf ... 358
Abb. 10.18: Handbetrieb im Semi-Automatikbetrieb ... 361
Abb. 10.19: Monatliche durchschnittliche BHKW-Leistung für einen Zeitraum von ca. 2,5 Jahren nach Inbetriebnahme ... 364
Abb. 10.20: Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Gasdurchfluss ... 365
Abb. 10.21: Überwachung der Fermenteroberfläche mit Hilfe einer Ex-Zonen-Videokamera ... 367
Abb. 10.22: Tauchmotorrührwerk mit einer Niveaumessung auf Basis eines einfachen Drucksensors ... 369
Abb. 10.23: Pneumatikschieber mit und ohne Spülanschlüssen ... 369
Abb. 10.24: Inbetriebnahme einer Biogasanlage auf Basis diverser online-Messungen und ergänzender Labormessungen ... 371
Abb. 10.25: Materialflussschema für flüssige und feste Stoffe ... 373
Abb. 10.26: Die gläserne Biogasanlage – Übersicht über mögliche Messstellen ... 374
Abb. 10.27: Beispiel für ein Spinnendiagramm mit charakteristischen Kenn- und Messwerten von Biogasanlagen ... 382
Abb. 10.28: Organische Raumbelastung vs. spezifischer Energieproduktion ... 393
Abb. 10.29: Beispiel für eine mögliche automatisierte Problemdiagnose und geeigneter Lösungsvorschläge am Beispiel der Schwimschichtproblematik ... 399
Abb. 10.30: Vom der Black-Box zur intelligenten Biogasanlage ... 406
Abb. 11.1: Schema einer biobasierten Wirtschaft mit drei Säulen ... 407
Abb. 11.2: Die drei Generationen der NawaRo-Nutzung in der Chemie ... 408
Abb. 11.3: Schematische Übersicht über die Möglichkeiten einer Integration von SBR- und Biogasanlagen in zukünftige Bioraffineriekonzepte ... 424

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Beispiel für die Verschärfung der Überwachungswerte im Ablauf einer kleineren Kläranlage mit 4.500 Einwohnerwerten ... 16
Tab. 2.2: Beispiel einer Kläranlage mit 4.500 Einwohnerwerte vor und nach dem Umbau in 2000 ... 17
Tab. 3.1: Messgrößen in Klär-/Biogasanlagen. ... 41
Tab. 3.2: Exemplarische Darstellung von CSB-Messungen (Labor) und SAK-/TS-Messungen (online) im Ablauf des Filters und des Mengenausgleichs ... 51
Tab. 3.3: Messverfahren zur Bestimmung des Durchflusses ... 54
Tab. 3.4: Übersicht über Phosphorkonzentrationen im Kläranlagenablauf nach Abwasserverordnung ... 76
Tab. 3.5: Einsatz verschiedener Messverfahren zur online-TS-Bestimmung im Klär- und Biogasanlagenbereich ... 84
Tab. 3.6: Vergleichsmessungen der Ergebnisse mit der TS-Sonde in der ÜS-Schlammleitung mit den Ergebnissen der Laboranalytik ... 87
Tab. 3.7: Ergebnisse der Vergleichsmessungen – Ionenchromatogramm der Fermenterprobe mit den Einzelkomponenten vs. Ergebnisse der Schnelltests ... 105
Tab. 3.8: FOS/TAC-Werte und daraus abgeleitete Maßnahmen ... 106
Tab. 4.1: Stellglieder und Armaturen auf SBR-Kläranlagen ... 118
Tab. 4.2: Armaturen und Stellglieder auf Biogasanlagen (Teil 1) ... 119
Tab. 4.3: Armaturen und Stellglieder auf Biogasanlagen (Teil 2) ... 120
Tab. 6.1: Messtechnisch erfasste Status-/Stellgrößen/Stellglieder, Abwasserparameter etc. auf einer SBR-Kläranlage ... 163
Tab. 6.2: Vergleich bauähnlicher SBR-Kläranlagen bezüglich der wichtigsten Messgeräte ... 164
Tab. 6.3: Übersicht über verschiedene Formen von Schritten und die daraus resultierende Ansteuerung der wichtigsten Aggregate ... 179
Tab. 6.4: Exemplarische Schrittkettensteuerung eines SB-Reaktors bei Trockenwetter 180
Tab. 6.5: Exemplarische Schrittkettensteuerung eines SB-Reaktors bei Regenwetter .. 181
Tab. 7.1: Liste der Messgeräte während der Erprobung der modifizierten MSR-Konzepte ... 206
Tab. 7.2: Zykluszusammensetzung während der Vorbereitungsphase ... 207
Tab. 7.3: Betriebliche Kennzahlen der KA Messel während der Vorphase bzw. der MSR-Erprobungsphase ... 226
Tab. 7.4: Ablaufkonzentrationen (online) im Zeitraum Januar bis Mai 2004 ... 229
Tab. 7.5: Veränderung der N_{ges}-, NH_4-N- und PO_4-P-Ablaufkonzentrationen. ... 231

Tab. 7.6: Ablaufkonzentrationen (online) zwischen der Zeit von 6:00 Uhr bis 16:00 Uhr im Zeitraum Januar bis Mai 2004 ... 231
Tab. 7.7: Ablaufkonzentrationen (Eigenüberwachung, 2 h-Mischprobe) im Zeitraum Januar bis Mai 2004 (mittlere Abwassertemperatur: 10,1 °C) ... 232
Tab. 7.8: Online-Ablaufkonzentrationen der KA Messel während des Niederschlagsereignisses vom 6. Mai 2004 bis 9. Mai 2004 ... 233
Tab. 7.9: Abschätzung der frachtbezogenen Emissionsminderung durch das neue Steuerungskonzept ... 237
Tab. 8.1: Biogaspotenzialabschätzung in Deutschland ... 262
Tab. 8.2: Zusammenfassung der Abschätzungen für das Biogaspotenzial in Deutschland ... 263
Tab. 8.3: Umsatzraten von Methanbakterienstämmen in Abhängigkeit der Temperatur ... 267
Tab. 8.4: Wichtige Parameter zur Beurteilung der Prozessstabilität ... 270
Tab. 8.5: Anteil Arbeitsaufwand zur Beseitigung von Störungen auf Biogasanlagen ... 298
Tab. 8.6: Störungen und Schäden an 31 Biogasanlagen ... 299
Tab. 8.7: Verteilung der Prozessstörungen ... 300
Tab. 8.8: Verteilung der technischen Störungen ... 300
Tab. 9.1: Häufigkeit diverser Messgeräte auf Biogasanlagen ... 303
Tab. 9.2: Vergleich einer Biogasanlage mit einem PKW hinsichtlich Kosten, Nutzen, Sicherheitsaspekten und Gefährdungspotenzial ... 304
Tab. 9.3: Zielgruppen und ihr Interesse am Einsatz von Messtechnik auf Biogasanlagen ... 307
Tab. 9.4: Wirklinien von Messgeräten im Bereich der Pumpstationen, Feststoffdosierer und Anaerobreaktoren (Teil 1) ... 309
Tab. 9.5: Wirklinien von Messgeräten im Bereich der Pumpstationen, Feststoffdosierer und Anaerobreaktoren (Teil 2) ... 309
Tab. 9.6: Wirklinien von Messgeräten im Biogasbereich ... 310
Tab. 9.7: Wirklinien von Messgeräten (Sonstiges) ... 310
Tab. 9.8: Investitionskosten für Messgeräte ... 311
Tab. 9.9: Vor- und Nachteile von Labor- und Prozessmessgeräten ... 312
Tab. 9.10: Komponenten und dazugehörige Messwerte, Statusmeldungen und Funktionalitäten, die auf Leitsystemen von Biogasanlagen erfasst werden (Teil 1) ... 315
Tab. 9.11: Komponenten und dazugehörige Messwerte, Statusmeldungen und Funktionalitäten, die auf Leitsystemen von Biogasanlagen erfasst werden (Teil 2) ... 316
Tab. 9.12: Finanzielle Auswirkungen von Schwachstellen an einer 500 kW_{el}-Biogasanlage ... 338
Tab. 10.1: Messtechnische Ausstattung der Biogasanlage ... 344
Tab. 10.2: Mögliche Pumpwege auf der Biogasanlage ... 346

Tab. 10.3: Bandbreite spezifischer Methanerträge verschiedener Substrate 349
Tab. 10.4: Bedienung, Parametrierung und Information für verschiedene Aggregate 358
Tab. 10.5: Betriebsdaten (2 Volllast-Betriebsjahre) 363
Tab. 10.6: Teile einer Volumenstrom-/Massenbilanz für die Biogasanlage 364
Tab. 10.7: Indirektparameter für ausgesuchte Substrate 368
Tab. 10.8: Bestandteile der Formel 10.2.7.1 372
Tab. 10.9: Unstrukturierte und unvollständige Auflistung verschiedener Kenngrößen und dazugehöriger Maßeinheiten, die in der Literatur verwendet werden 392
Tab. 10.10: Exemplarische Auszüge für Probleme, Ursachen und Problemlösungen 1 397
Tab. 10.11: Exemplarische Auszüge für Probleme, Ursachen und Problemlösungen 2 398
Tab. 11.1: Übersicht über Mess- und Automatisierungsbedarfe für Wasser, Abwasser, Bioraffinerien, Biogas und Biokraftstoffe 425
Anh. 8.1: Richtwerte für Gasausbeuten aus Wirtschaftsdüngern 430
Anh. 8.2: Richtwerte für die Gasausbeuten aus NawaRo 430
Anh. 8.3: Richtwerte für die Gasausbeuten aus organischen Reststoffen 431

Abkürzungen

Wortabkürzungen (Allgemein) und SI-Einheiten

Kürzel	Bedeutung
3 D	Dreidimensional
A	Arbeitsblatt
A	Jahr (Zeiteinheit: 1 a = 3.153.600 s)
Abb.	Abbildung
AbwAG	Abwasserabgaben-Gesetz
AbwV	Abwasserverordnung
ADM	Anaerobic Digestion Model
Anamox	Anaerobe Ammonium-Oxidation
Anh.	Anhang
ANISE	Ionenselektive Elektrode zur Bestimmung von Ammonium und Nitrat
AQS	Analytische Qualitätssicherung
ASA	Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung e.V.
ASM	Activated Sludge Model
ATV	Abwassertechnische Vereinigung (aufgegangen in ATV-DVWK)
ATV-DVWK	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (jetzt DWA)
AZ	Aktenzeichen
BA	Betriebsart
Bar	Druckeinheit: 1 bar = 10^3 mbar = 10^5 Pa = 10^5 kg/(s^2·m)
BayLfU	Bayerische Landesamt für Umweltschutz
Bem.	Bemessung bzw. Bemessungswert
BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIOMATH	BIOMATH research team, Ghent University, Belgien
Bio-P	Biologische Phosphorelimination
BWK	Bund für Wasser- und Kulturbau
bzw.	Beziehungsweise
CASS	Cyclic Activated Sludge System (SBR-Sonderform)
CAST	Cyclic Activated Sludge Technology (SBR-Sonderform)
CBR	Case-Based Reasoning (engl.) (deutsch: Fallbasiertes Schließen)
CCD	Charge-coupled Device (elektronischer Bildsensor)
CD	Compact Disc
C:N	Kohlenstoff- zu Stickstoffverhältnis
cos phi	Leistungsfaktor
CSV	Comma-separated values (elektronisches Datenaustauschformat)
Ct	Euro-Cent
D	Tag (Zeiteinheit: 1 d = 86.400 s)
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück

Deni	Denitrifikation
d. h.	das heißt
DIC-SBR	Differential Internal Cyclestrategy - SBR (SBR-Sonderform)
DIN EN	DIN-Norm (Deutsches Institut für Normung) / Europanorm
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V., Frankfurt
DVWK	Deutscher Verein für Wasser- und Kulturbau (jetzt: DWA)
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
E	Einwohner
E/A	Eingabe und Ausgabe
EAWAG	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Dübendorf, Schweiz
EDS	Event Detection System
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EEG	Erneuerbare Energie-Gesetz
EGSB	*Expanded Granular Sludge Bed*-Reaktor (Reaktortyp)
EMSR	Elektro-, Mess-, Steuerung- und Regelungstechnik
ESÄ	Essigsäureäquivalente
EUS	Entscheidungsunterstützendes System
EU-WRRL	Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union
et al.	und weiterer Autoren
etc.	et cetera
EW	Einwohnerwerte
$EW_{CSB,120}$	EW bezogen auf einen spezifischen CSB-Anfall von 120 g/(E·d)
Ex	Explosion
FBS	Fallbasiertes Schließen
FI	Füllstandsmessung (L), anzeigend (I)
FIR	Füllstandsmessung (L), anzeigend (I), registrierend (R)
FISA	Füllstandsmessung (L), anzeigend (I), schaltend (S), alarmierend (A)
FM	Frischmasse
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
FR	Füllstandsmessung (L), registrierend (R)
FTD	Financial Times Deutschland
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
FU	Frequenzumformer
G	Gramm (Gewichtseinheit: 1 g = 10^{-3} kg)
GC	Gaschromatograph
ggf.	Gegebenenfalls
GHz	Giga-Hertz (Frequenz: 1 GHz = 10^{9} Hz)
GK	Größenklasse oder alternativ Grundkonzept
GMW	Gleitender Mittelwert
GPRS	General Packet Radio Service (Datenpaketübertragung im GSM-Mobilfunknetz)
GPS	Global Positioning System (Globales Satellitennavigationssystem)

GSM	Global System for Mobile Communications (Mobilfunkstandard)
GW	Gigawatt (Leistung: 1 GW = 10^9 Watt)
GWh	Gigawattstunden (Energiemenge: 1 GWh = 10^9 W·h)
H	Stunde (Zeiteinheit: 1 h = 3.600 s)
Ha	Hektar (Flächeneinheit: 1 ha = 10^4 m^2)
HMUELV	Hessisches Ministerium für Umweltschutz, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
HMUIRV	Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (heute: HMUELV)
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie
HQ_1	Hochwasser (Jährlichkeit: 1/a) in m^3/h
HSGSim	Hochschulgruppe „Dynamische Simulation in der Siedlungswasser-wirtschaft“ deutschsprachiger SIWAWI-Institute
Hz	Hertz (Frequenz: 1 Hz = 1/s)
IBBK	Internationales Biogas und Bioenergie Kompetenzzentrum
IC	Ionen-Chromatograph
ICEAS	Intermittent Cycle Extended Aeration System
IDEA	Intermittently Decanted Extended Aeration-Verfahren
i.d.R.	in der Regel
IE	Neue Energieeffizienzklasse für Elektromotoren
IFA	Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, St. Augustin
IFAK	Institut für Automation und Kommunikation e.V., Magdeburg
IFEU	Institut für Energie und Umwelt gGmbH, Leipzig
IP	Internetprotokoll
IR	Infrarotstrahlung (1 mm bis 780 nm)
ISA RWTH	Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule Aachen
ISE	Ionen-selektive Elektrode
IWA	International Water Association (früher: IAWQ), London, UK
JSM	Jahresschmutzwassermenge in m^3 pro Jahr
KA	Kläranlage
KG	Kanalgrundrohr aus Polyvinylchlorid hart
Kg	Kilogramm (SI-Standardgewichtseinheit)
KHz	Kilo-Hertz (Frequenz: 1 KHz = 10^3 Hz)
KI	Künstliche Intelligenz
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt
kVA	Kilovoltampere (Maßeinheit für Scheinleistung: 1 kVA = 10^3 V·A = 10^3 kW)
kVAR	Kilovoltampere reaktiv (Maßeinheit für Blindleistung)
kVARh	Kilovoltamperestunden reaktiv (Maßeinheit für die Blindenergie)
kW	Kilowatt (Leistungseinheit: 1 kW = 10^3 W)
kWh	Kilowattstunden (Energiemenge: 1 kWh = 10^3 W·h)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung

l	Liter (bei Flüssigkeiten) (Volumeneinheit: 1 l = 10^{-3} m^3)
LCD	liquid crystal display (Flüssigkristallbildschirm)
LF	Elektrolytische Leitfähigkeit
LIRCSA	Füllstandsmessung (L), anzeigend (I), regelnd/steuernd (C), schaltend (S), alarmierend (A)
LISA	Füllstandsmessung (L), anzeigend (I), schaltend (S), alarmierend (A)
LKW	Lastkraftwagen
l_N	Normliter (bei Gasen) (1 l ausgefüllt bei 0°C und 1013 mbar)
LS	Füllstandsmessung (L), schaltend (S)
LSA	Füllstandsmessung (L), schaltend (S), alarmierend (A)
LTE	Long Term Evolution (Mobilfunkstandard)
M	Merkblatt
m	Meter (SI-Standardlängeneinheit)
m^3	Kubikmeter (Volumeneinheit)
MA	Mengenausgleich
Max	Maximum bzw. maximaler Wert
MBA	Mechanisch-Biologische Abfallanlagen
mbar	Druckeinheit: 1 mbar = 10^2 Pa = 10^2 kg/(s^2·m)
MD	Medianwert
Mg	Megagramm (Gewichtseinheit: 1 Mg = 10^3 kg)
mg	Milligramm (Gewichtseinheit: 1 mg = 10^{-3} kg)
MID	Magnetisch-induktive Durchflussmessung
Min	Minimum bzw. minimaler Wert
min	Minuten (Zeiteinheit: 1 min = 60 s)
Mio.	Million (10^6)
ml	Milliliter (Volumeneinheit: 1 ml = 10^{-3} l)
MP	Mischprobe
MPCA	Multiway Prinicipal Component Analysis
Mrd.	Milliarde (10^9)
MSR	Mess-, Steuerung- und Regelungstechnik
MW	Mittelwert oder
MW	Megawatt (Leistungseinheit: 1 MW = 10^6 W)
mW	Milliwatt (Leistung: 1 mW = 10^{-3} W)
MWSt.	Mehrwertsteuer
Namur	Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozess-industrie
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NIR	Nahinfrarot
NIRS	Nahinfrarot-Spektroskopie
Nitri	Nitrifikation
Nm^3	Normkubikmeter (bei Gasen) (1 m^3 ausgefüllt bei 0°C und 1013 mbar)
NRW	Nordrhein-Westfalen
o. ä.	oder ähnliches
OPC-UA	OLE for Process Control - Unified Architecture

ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
oTS	Organische Trockensubstanz
PC	Personal Computer
PE-HD	Polyethylen - High Density
pH	pH-Wert
PI	Regler mit Proportional- und Integralverhalten
PID	Regler mit Proportional-, Integral- und Differentialverhalten
PISA	Druckmessung (P), anzeigend (I), schaltend (S), alarmierend (A)
PJ	Petajoule (Energiemengeneinheit: 1 PJ = 10^{15} PJ)
PLS	Prozessleitsystem
PLSR	Partial Least Square Regression
Ppm	Parts per Million („Teile einer Million“)
PV	Photovoltaik
PVC	Polyvinylchlorid
Q	Durchfluss in [l/s], [m^3/h], [m^3/d] bzw. [m^3/a]
Q_F	Fremdwasserabfluss (in [l/s], [m^3/h] oder [m^3/d])
Q_M	Mischwasserzufluss zur Kläranlage (in [l/s], [m^3/h] oder [m^3/d])
Q_S	Schmutzwasserabfluss (in [l/s] oder [m^3/h])
$Q_{S,X}$	Tagesspitze für Schmutzwasserabfluss (in [l/s] oder [m^3/h])
Q_T	Trockenwetterabfluss = $Q_S + Q_F$ (in [l/s] oder [m^3/h])
$Q_{T,X}$	Tagesspitze des Trockenwetterabfluss (in [l/s] oder [m^3/h])
$Q_{ÜS}$	Durchfluss im Überschussschlamm (m^3/h)
QIR	Qualitätsparametermessung (Q), anzeigend (I), registrierend (R)
QISA	Qualitätsparametermessung, anzeigend, schaltend (S), alarmierend (A)
QR	Qualitätsparametermessung, registrierend
QRC	Qualitätsparametermessung, registrierend, regelnd/steuernd (C)
qRT-PCR	Quantitative Real-Time Polymerase Chain Reaction
RÜ	Regenüberlauf
RÜB	Regenüberlaufbecken
RW	Regenwetter
S	Sekunde (SI-Standardzeiteinheit)
SB	Sequencing Batch
SBBR	Sequencing Batch Biofilm Reactor
SBBGR	Sequencing Batch Biofilm Granular Reactor
SBR	Sequencing Batch Reactor
SBW	Sonderbauwerke im Kanal (z. B. Pumpstation, Regenüberlauf)
SCADA	*Supervisory Control and Data Acquisition* (deutsch: Prozessleitsystem)
SH	Schlammhöhe = Wasserspiegel – Schlammspiegel [in Metern]
SHARON	Single reactor system for High activity Ammonium Removal Over Nitrite
sim.	simulierter Wert
SIWAWI	Siedlungswasserwirtschaft
SKO	Stauraumkanal mit obenliegender Entlastung
SMS	Short Massage System

sog.	sogenannt(e)
SP	Stichprobe
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SQL	Standard Query Language
SSP	Schlammspiegel in m über Beckensohle
St.	Stück
Stabw.	Standardabweichung
Std.	Stunde (Zeiteinheit: 1 Std. = 1 h = 3.600 s)
StMUGV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz
t	Tonne (Gewichtseinheit: 1 t = 10^3 kg)
t_{TS}	Schlammalter in Tagen
Tab.	Tabelle
TBW	Trennbauwerk
TC	Temperaturmessung (T), regelnd/steuernd (C)
TCSA	Temperaturmessung, regelnd/steuernd, schaltend (S), alarmierend (A)
Temp.	Temperatur in Grad Celsius
TFT	Thin-film transistor (hier Flüssigkristallanzeige)
TI	Temperaturmessung, anzeigend (I)
TISA	Temperaturmessung, anzeigend, schaltend, alarmierend
TMAH	Tetra-Methyl Ammonium Hydroxide
TM	Trockenmasse
T-RFLP	Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism
TS	Trockensubstanz
TSA	Temperaturmessung, schaltend, alarmierend
TS_{BB}	TS-Konzentration im Belebungsbecken in kg/m^3
$TS_{ÜS}$	TS-Konzentration im Überschussschlamm in kg/m^3
Tsd.	Tausend
TU	Technische Universität
TU KL	Technische Universität Kaiserslautern (KL) (ehemals Universität KL)
TW	Trockenwetter
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Reaktortyp)
UBA	Umweltbundesamt
UK	Umschaltkriterium, bei dem die Reaktoren mit Beginn des nächsten Zyklus vom Trocken- in den verkürzten Regenwetterzyklus umschalten
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (Mobilfunkstandard)
US-$	Amerikanischer Dollar
ÜS	Überschussschlamm
usw.	und so weiter
UV	Ultraviolett
ÜW	Überwachungswert
u. Wsp.	unter Wasserspiegel [in m]
V_{BB}	Volumen des Belebungsbeckens [in m^3]

v.a.	vor allem
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V., Frankfurt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf
VDMA	Vereinigung Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e.V., Frankfurt
VIS	Sichtbarer Bereich des Lichtspektrums (380 bis 780 nm)
VLB	Vorlagebehälter
vs.	Versus
W	Watt (Leistungseinheit)
WLAN	*Wireless Local Area Network (lokaler Funknetzstandard)*
Wsp.	Wasserspiegel in m über Sohle
WVE	Westpfälzische Ver- und Entsorgungs GmbH, Kaiserslautern
X	Multiplikator
z. B.	zum Beispiel
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Frankfurt
z. Zt.	zur Zeit
€	Euro
€/kW_{el}	Spezifische Baukosten einer Biogasanlage in Euro pro kW installierte BHKW-Leistung
<<	deutlich kleiner
Δ	Differenzbetrag zweier Werte
°C	Grad Celsius
$_{el}$	Index für elektrische Leistung oder Arbeit
$_{th}$	Index für Wärmeleistung oder –menge

Hinweis: Sonstige in dieser Arbeit aufgeführten abkürzungsähnlichen Bezeichnungen sind Produktnamen von Herstellern, Namen von Forschungsprojekten o. ä. Um diese von Abkürzungen des Autors unterscheiden zu können, wurden diese Produktbezeichnungen in Anführungszeichen gesetzt.

Konzentrationsbezogene Kennwerte in den Abb. 7.5 bis 7.9 [76]

Kürzel	Einheit	Bezeichnung
S_{NH4}	mg/l	Konzentration des NH_4-N in der filtrierten Probe
S_{NO2}	mg/l	Konzentration des NO_2-N in der filtrierten Probe
S_{NO3}	mg/l	Konzentration des NO_3-N in der filtrierten Probe
S_{PO4}	mg/l	Konzentration des PO_4-P in der filtrierten Probe
X_{TS}	mg/l	Konzentration der abfiltrierbaren Stoffe (oder in g/m^3)

[76] analog zu *ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 198 [2003]*

Chemische Parameter

Kürzel	Einheit	Bezeichnung
2,4D	mg/l	2,4-Dichlorophenoxyacetic
AFS	kg/a	Abfiltrierbare Stoffe (hier als emittierte Jahresfracht)
BSB_5	mg/l	Biologischer Sauerstoffbedarf gemessen nach 5 Tagen
$CaCO_3$	mg/l	Calciumcarbonat
$Ca(OH)_2$	mg/l	Calciumhydroxid
CH_4	%	Methan
CO	%	Kohlenstoffmonoxid
CO_2	%	Kohlenstoffdioxid
CSB	mg/l	Chemischer Sauerstoffbedarf
DOC	mg/l	Dissolved Organic Carbon (gelöster organischer Kohlenstoff)
FM	t	Frischmasse organischer Substrate
FOS	mg/l	Flüchtige organische Säuren
GV	%	Glühverlust
H_2	ppm	Wasserstoff
HCl	g/l	Salzsäure
H_2O	%	Wasserdampf (im Biogas)
H_2S	ppm	Schwefelwasserstoff
H_2SO_4	g/l	Schwefelsäure
ISV	ml/g	Schlammindex
K_2O	kg/t	Kaliumoxid als Düngewertangabe im Biogasgärrest
LF	mS/cm	Elektrolytische Leitfähigkeit
N_2	%	Stickstoff (im Biogas)
N_{ges}	mg/l	Gesamt-Stickstoff
N_{ges}	kg/t	Gesamt-Stickstoff als Düngewertangabe im Biogasgärrest
NFE	% TS	Stickstoff-freie Extraktionsstoffe eines organischen Substrates
NH_3	ppm	Ammoniak
NH_4	mg/l	Ammonium
NH_4-N	mg/l	Ammonium-Stickstoff (Umrechnung: NH_4-N/NH_4 = 1/1,288) [mg/l]
NO_2	mg/l	Nitrit
NO_2-N	mg/l	Nitrit-Stickstoff (Umrechnung: NO_2-N/NO_2 = 1/3,284)
NO_3	mg/l	Nitrat
NO_3-N	mg/l	Nitrat-Stickstoff (Umrechnung: NO_3-N/NO_3 = 1/4,426)
NO_X-N	mg/l	Summenparameter für NO_3-N und NO_2-N
NaCl	mg/l	Natriumchlorid
Na_2CO_3	mg/l	Natriumcarbonat
$NaHCO_3$	mg/l	Natriumhydrogencarbonat
NaOH	g/l	Natriumhydroxid (Natronlauge)
pH	-	pH-Konzentration
Q	l/s	Durchfluss (auch in m^3/h bzw. m^3/d) bei Flüssigkeiten

Q	Nm^3/h	Durchfluss (Biogas)
O_2	%	Sauerstoff (im Biogas)
O_2	mg/l	Sauerstoff (gelöst in der wässrigen Phase)
Redox	Mv	Redox-Potenzial
P_{ges}	mg/l	Gesamt-Phosphor
PHA	g	Polyhydroxyalkanoates (auch in kg)
PO_4-P	mg/l	Ortho-Phosphat
P_2O_5	kg/t	Phosphorpentoxid als Düngewertangabe im Biogasgärrest
PFT	µg/l	Perfluorierte Tenside
S	kg/t	Schwefelgehalt als Düngewertangabe im Biogasgärrest
SAK	1/m	Spektraler Absorptionskoeffizient bei 254 nm
SO_4^{2-}		Sulfat-Anion
TAC	mg/l	Totales Anorganisches Carbonat bzw. alkalische Pufferkapazität
TC	mg/l	Total Carbon (Gesamter Kohlenstoff)
TIC	mg/l	Total Inorganic Carbon (Gesamter anorganischer Kohlenstoff)
TKN	mg/l	Kjehldahl-Stickstoff
TM	%	Trockenmasse
oTM	% TM	Organische Trockenmasse
TN_b	mg/l	Gesamter gebundener Stickstoff
TOC	mg/l	Total Organic Carbon (Gesamter organischer Kohlenstoff)
Trübung	FNU	Messung der Trübung gemäß der Norm ISO 7027
TS	kg/m^3	Trockensubstanz (ggf. auch in mg/l, t oder %)
oTS	% TS	Organischer Anteil der Trockensubstanz
VOC	mg/l	Volatile Organic Compounds (Flüchtige organische Verbindungen)
VSV	ml/l	Vergleichsschlammvolumen
anorg		Index für anorganischen Anteil
ges		Index für gesamt
gelöst		Index für den gelösten Anteil einer Substanz
inert		Index für den inerten Anteil einer Substanz
org		Index für organischen Anteil

SBR-spezifische Kennwerte

Kürzel	Einheit	Bezeichnung
f_A	-	$\Delta V/V_R$ [77]
t_R	min	Dauer der Reaktionsphase = $t_N + t_D$ oder
		$= t_Z - t_{Sed} - t_{AB} - t_{BioP} - t_{F,stat} - t_{Still}$ [2]
t_Z	min	Zyklusdauer [2]
t_{Sed}	min	Dauer der Sedimentationsphase [2]
t_{AB}	min	Dauer der Abzugsphase [2]
t_{BioP}	min	Dauer der anaeroben Bio-P-Phase [2]
t_F	min	Dauer der Füllphase [2]
$t_{F,stat}$	min	Dauer der statischen Füllphase [2]
t_N	min	Dauer der Nitrifikationsphase [2]
t_D	min	Dauer der Denitrifikationsphase [2]
t_{Still}	min	Dauer der Stillstandsphase [2]
$t_{ÜS}$	min	Dauer der Phase des Überschussschlammabzugs
V_R	m^3	Volumen des Aufstaubeckens bei Vollfüllung
V_{min}	m^3	Volumen des Aufstaubeckens bei Mindestfüllung
ΔV	m^3	abgezogenes Abwasservolumen während eines Zyklus [2]

[77] nach *ATV-Merkblatt M 210 [1997]*

Beruflicher Lebenslauf des Autors

seit 10/2008	Geschäftsführer der GKU Gesellschaft für kommunale Umwelttechnik mbH (www.gku-fulda.de), Fulda, einem Unternehmen des hessischen, kommunalen Energieversorgungers RhönEnergie Fulda GmbH. Die GKU ist spezialisiert auf folgende Geschäftsfelder: • Betriebsführung von Kläranlagen und Kanalnetzen • Ingenieurbüro für Umwelttechnik • GeoInformatik
weiterhin derzeit	Nebenberuflicher Geschäftsführer der folgenden Unternehmen bzw. Beteiligungen der Rhön Energie Fulda-Gruppe: • Biothan mbH (www.biothan.de): Die Gesellschaft betreibt eine Biogasanlage zur Entsorgung organischer Abfälle (62.000 t/a Biotonne, Speisereste o. ä.) mit anschließender Biogasaufbereitungsanlage und Biomethaneinspeisung sowie einer Nachkompostierung. • AgrarEnergie Hauneck-Bodes Verwaltungs GmbH und der AgrarEnergie Hauneck-Bodes GmbH & Co. KG: Die Gesellschaft betreibt eine Biogasanlage auf Basis von Gülle und Nachwachsenden Rohstoffen (z. B. Grassilage). • AgrarEnergie Rothemann GmbH, Eichenzell: Die Gesellschaft betreibt eine Biogasanlage auf Basis von Gülle und Nachwachsenden Rohstoffen (z. B. Gras- und Grünroggensilagen).
8/2006-9/2008	Leiter „Produktmarketing und Innovation“ der Fa. EnerCess GmbH, Bad Oeynhausen, einem Unternehmen der M.A.X. Automation AG, Düsseldorf. EnerCess war spezialisiert auf die Projektentwicklung, die Planung und den schlüsselfertigen Bau von Biogasanlagen.
8/2004-7/2006	Leiter „Forschung und Entwicklung/Systemanalyse“ der Fa. ASA – Anlagen- und Sondermaschinen Automation GmbH, Bad Oeynhausen (die ASA GmbH ging 08/2006 in der EnerCess GmbH auf)
4/2004-7/2004	Post-Doc bei tectraa - Zentrum für Innovative AbWassertechnologien (ehemals Technologietransferstelle Abwasser und Abfall, Rheinland-Pfalz), Technische Universität Kaiserslautern (Prof. Dr. T.G. Schmitt)
02/2004	Dissertation zum Doktor der Ingenieurswissenschaften (Dr.-Ing.) (Bauingenieurwesen), Technische Universität Kaiserslautern (Doktorvater: Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft)
3/1997-3/2004	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Siedlungswasserwirtschaft (Prof. Dr. T.G. Schmitt), TU Kaiserslautern
WS96/97	Diplom im Fach Bauingenieurwesen (Dipl.-Ing.), TU Kaiserslautern mit den Vertiefungsschwerpunkten Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft, Wasserbau und Wasserwirtschaft sowie Baubetrieb und Baumanagement
27.12.1969	geboren in Ludwigshafen am Rhein