

Qualitäts- und Wirkungsgradverbesserung von Asynchronmotoren (ZS/2019/05/98943), Investitionsbank S-A (EFRE, FuE-Verbundförderung)

Projektzusammenfassung

Autoren: Frank Trommer, Matthias Neise

1 Projektziele

In der Vergangenheit kam es bei produzierten Asynchronmotoren des Projektpartners unter besonders schlechten Einsatzbedingungen zu Komplikationen während des Motorenbetriebs. Speziell in Entwicklungs- und Schwellenländern traten Anlaufschwierigkeiten der in den Tauchpumpen integrierten Asynchronmotoren auf. Durch umfangreiche Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass das Problem aus einer Kombination aus Netzschwankungen des lokalen Stromnetzes und fehlerhaften Anbindungen am Kurzschlusskäfig der Rotoren herrührt.

Mit dem Projekt sollten die Anbindungen der einzelnen Kupferkomponenten des Kurzschlusskäfigs optimiert werden, was zu einem robusteren Produktverhalten sowie einem höheren Wirkungsgrad der Motoren führen sollte. Im Speziellen betraf dies die Verbindung der Kurzschlussstäbe mit den Kurzschlussringen des Rotors, welche zur Zeit des Projektstarts durch eine Lötvariante realisiert wurde. *(Das Löten der Bauteile ist kritisch, da hier der Faktor Mensch eine Rolle spielt und sich das Lot fertigungsbedingt nicht immer gleichmäßig in die dafür vorgesehenen Lotspalte verteilt. Dadurch kommt es zu nicht verlöteten Bereichen an den Kupferwerkstoffen. Daraus resultieren höhere elektrische Übergangswiderstände im Kurzschlusskäfig während des Betriebs. Es entstehen höhere Temperaturen und der Wirkungsgrad des Motors ist dementsprechend geringer.)* Das Löten sollte durch das Fügen mittels Reibschweißen substituiert werden, um einen besseren Qualitätsstandard der Fügestellenverbindung gewährleisten zu können.

Der wissenschaftlich-technische Neuheitsgrad lag hier vor allem in der Auslegung der neuen Verbindungsstelle zwischen den Läuferstäben und dem Kurzschlussring und der praktischen Realisierung. Innovationscharakter wies das Projektvorhaben auch hinsichtlich der verwendeten Werkstoffe und deren möglichen Kombinationen auf. Der Werkstoff Kupfer ist durch seine Eigenschaften (u.a. sehr gute Wärmeableitung) als nur bedingt schweißgeeignet einzuordnen. Mit konventionellen Fügeverfahren sind Verbindungen in artgleicher Form (Kupfer – Kupfer) sowie in Mischbauweisen (z. B. Kupfer – Aluminium) nur unter bestimmten Voraussetzungen zu realisieren. Das Reibschweißverfahren kann hier entscheidende Vorteile bringen. Daher entstand die Idee, gewisse Kupfer- durch Aluminiumkomponenten zu ersetzen, um die jeweiligen Vorteile der Werkstoffe an geeigneten Stellen gewinnbringend anzuwenden. Neben vielversprechenden Materialkombinationen wurden auch unterschiedliche Herangehensweisen aus prozesstechnischer Sicht erarbeitet.

Ein zweites Ziel des Projektes, welches sich aus der kritischen Fertigungstechnologie Löten ableitete, bestand darin, eine geeignete Qualitätskontrolle der gefertigten Rotoren zu

entwickeln. Derzeit müssen die Rotoren aufwendig innerhalb des Herstellungsprozesses geprüft werden. Eine zerstörungsfreie Qualitätsbeurteilung des Läufers konnte im Vorfeld nur im fertig montierten Zustand des gesamten Motors, durch verschiedenste Motortests, erfolgen. Hierbei stellte sich jedoch eine Prüfzeit von 50 min bis 1,5 h je nach Baugröße der Motoren in Kombination mit einer Ausschussquote von 3% als sehr unwirtschaftlich dar. Nur über eine stichprobenartige zerstörende Qualitätskontrolle, die sich als sehr kostenintensiv darstellt, konnten direkt fertigungsbedingte Defekte sichtbar gemacht werden. Daher war es Ziel des Projektes eine Qualitätskontrolle zu entwickeln, mit der die gefertigten Rotoren direkt zerstörungsfrei beurteilt werden können.

2 Projektergebnisse

Nach der Aufnahme des Ist-Standes der aktuellen Fertigung der Rotoren beim Projektpartner fand eine Patentrecherche zum Einsatz des Reibschweißens in der Herstellung von Käfigläufern sowie eine Recherche bezüglich anderweitigen technischen Fertigungsmöglichkeiten, die dem Stand der Technik entsprechen, statt. Bei der Patentrecherche wurden neun Patente ermittelt, die das Reibschweißen explizit zum Fertigen von Käfigläufern erwähnen. Neben dem Verlöten der einzelnen Komponenten werden Käfigläufer herkömmlicherweise auch im Druckgussverfahren hergestellt. Weitere mögliche, jedoch nicht übliche, Fertigungsverfahren sind das Ultraschall-, Rührreib-, Stromimpuls-, Laserstrahl-, Plasma- und konventionelle Schutzgasschweißen sowie das elektromagnetische Pulsfügen.

Hinsichtlich der Qualitätskontrolle von Kurzschlussrotoren konnte recherchiert werden, dass schon etablierte Lösungen am Markt vorhanden sind. Beispielsweise kann ein sogenannter „Prüfsummer“ dazu eingesetzt werden. Weiterhin können der Mikro-Ohm-Widerstand an jeder Verbindung gemessen, industrielle Computertomographie, Transmissionselektronen-, Rasterelektronenmikroskopie oder eine Prüfung per Ultraschall eingesetzt werden. Die Firmen Baker (SKF) und Deltatronic Technology bieten fertige Lösungen zur Qualitätskontrolle von Kurzschlussrotoren an.

Vor Beginn der Reibschweißversuche mussten die zu untersuchenden Werkstoffe definiert werden. Der Kupferwerkstoff Cu-ETP sollte in jedem Fall betrachtet werden, da dieser derzeit für die Rotorenfertigung verwendet wurde. Die hohe volumenspezifische elektrische Leitfähigkeit des reinen Kupfers erlaubt eine kompakte Bauweise bei einem zugleich hohen Wirkungsgrad, was für Tauchpumpen bei vorgegebenen Brunnendurchmessern von Vorteil sein kann. Im Vergleich zum günstigeren und besser verfügbaren Werkstoff Aluminium besitzen Kupferrotoren jedoch ein höheres Gewicht und somit auch ein höheres Motorträgheitsmoment. Aluminium besitzt eine höhere dichtebezogene elektrische Leitfähigkeit als Kupfer. Zumeist lässt sich Aluminium auch leichter verarbeiten. Nachteile des Aluminiums sind in der Oxidschichtbildung, der Anfälligkeit für Kontaktkorrosion sowie in der Kriechneigung zu sehen. Alle drei Punkte können zu einem höheren elektrischen Widerstand und somit zu einer größeren Verlustleistung führen. Für die Untersuchungen im Projekt wurden letztlich die Kupferwerkstoffe Cu-ETP und CuCr1Zr sowie die Aluminiumwerkstoffe EN AW-1050A (Al99,5) und EN AW-6060 (AlMgSi0,5) ausgewählt. Die reinen Werkstoffe

bieten die beste elektrische Leitfähigkeit. Die legierten Werkstoffe können hingegen mit einer besseren chemischen Beständigkeit und Festigkeit, bei nur geringfügig niedrigerer elektrischer Leitfähigkeit, aufwarten. Mischbauweisen können die jeweiligen Vorteile der Werkstoffe an geeigneten Stellen ausnutzen.

Die durchgeführten Grundlagenuntersuchungen untergliederten sich somit in das Reibschweißen der folgenden Werkstoffpaarungen:

Cu-ETP	–	Cu-ETP	Cu-ETP	–	AlMgSi0,5
CuCr1Zr	–	CuCr1Zr	Cu-ETP	–	Al99,5
Cu-ETP	–	CuCr1Zr	Cu-ETP	–	Al99,5 – Cu-ETP

Die Reibschweißversuche wurden auf der horizontalen Reibschweißmaschine KUKA Genius Power durchgeführt. Diese verfügt über eine maximale Axialkraft von 300 kN.

Im Folgenden werden Erkenntnisse aus den Grundsatzuntersuchungen der unterschiedlichen Werkstoffpaarungen dargestellt. Ausgangsbasis waren stets Schweißungen von Rundstäben mit einem Durchmesser von d20 mm.

Schweißergebnisse Cu-ETP artgleich

Bei Schweißungen von artgleichen Cu-ETP-Rundstäben konnten keine guten Schweißwulstausbildungen (siehe Bild 1) realisiert werden (nicht reproduzierbar), da vermutlich eine zu niedrige Umfangsgeschwindigkeit und oder ein zu hoher Reibdruck vorlagen. Beide Einstellparameter befanden sich an der Maschinengrenze. Da die Schweißungen als nicht brauchbar eingestuft wurden, erfolgten keine Festigkeitsuntersuchungen. Während der Schweißungen traten hohe Drehmomente auf. Mit der vorhandenen Maschinenteknik verliefen die Prozesse dennoch vergleichsweise ruhig ab.



Bild 1: Schweißergebnisse Cu-ETP artgleich d20 mm

Bessere Ergebnisse konnte bei Proben mit einem Durchmesser d35 mm (siehe Bild 2) mit den folgenden Parametern in der Tabelle 1 erzielt werden. Die angegebenen Festigkeiten beziehen sich auf einen Prüfdurchmesser von d26 mm.

Tabelle 1: Zielführende Parametersätze – Cu-ETP artgleich d35 mm

Reibphase			Stauchphase			Ergebnis		
Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Verkürzung [mm]	Zugfestigkeit [MPa]	GWF [%]
25	0,4	3500	60	3	0	9,20	246,2	76,9
15	0,4	3500	60	3	0	6,38	232,7	72,7

60	0,3	3500	140	3	2450	4,36	504,4	87,3
----	-----	------	-----	---	------	------	-------	------

Bei Versuchen mit einem Probendurchmesser von d35 mm ist ein Stauchen in die drehende Spindel zwingend erforderlich, da sonst Spalte in der Fügezone nicht geschlossen werden. Um bei mehr Bauteilvolumen eine vergleichbare Verkürzung zu erhalten, muss die Reibzeit erhöht werden. Die höchste Festigkeit wurde mit dem Parameter aus Tabelle 3 erzielt, Bild 4 zeigt die dazugehörige Wulstausbildung.

Tabelle 3: Zielführender Parametersatz - CuCr1Zr artgleich d35 mm

Reibphase			Stauchphase			Ergebnis		
Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Verkürzung [mm]	Zugfestigkeit [MPa]	GWF [%]
60	1,2	2938	80	3	0	1,82	410,7	71,2



Bild 4: Schweißergebnis und Bruchbild des zielführenden Parametersatzes CuCr1Zr artgleich d35 mm

Die erzielten Festigkeiten bei größerem Probendurchmesser können bei Anpassung der Schweißparameter (höhere Stauchdrücke und Stauchdrehzahlen) nach Ansicht der Verfasser noch gesteigert werden. Mit der vorhandenen Maschinenteknik und den untersuchten Querschnitten war dies jedoch nicht mehr möglich.

Schweißergebnisse Cu-ETP - CuCr1Zr

Beim Schweißen von Cu-ETP mit CuCr1Zr stellten sich ein Stauchen in die drehende Spindel bei 2450 1/min (bzw. bei mindestens 50 % der Reibdrehzahl), eine reduzierte Reibzeit sowie ein reduzierter Reibdruck und ein hoher Stauchdruck als positiv dar. Die Prozessmomente ordnen sich betragsmäßig zwischen den beiden artgleichen Versuchsreihen ein.

Tabelle 4: Zielführende Parametersätze - Cu-ETP - CuCr1Zr d20 mm

Reibphase			Stauchphase			Ergebnis		
Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Verkürzung [mm]	Zugfestigkeit [MPa]	GWF [%]
25,5	0,4	3500	120	3	1750	8,83	312,7	97,7
25,5	0,4	3500	110	3	2450	10,16	314,3	98,2

Die Bruchbilder der in der Tabelle 4 angegebenen Parametersätze wiesen deutliche Einschnürungen nach den Zugversuchen auf. Es erfolgte kein Bruch in der direkten Fügezone (siehe Bild 5).



Bild 5: Schweißergebnisse und Bruchbilder der zielführenden Parametersätze Cu-ETP - CuCr1Zr d20 mm

Bei Schweißungen mit einem Probendurchmesser von d35 mm (siehe Bild 6) wurden nur Festigkeiten erzielt, die unterhalb der Festigkeiten der artgleichen Cu-ETP- sowie CuCr1Zr-Schweißungen lagen. Ein erhöhter Stauchdruck, ein Stauchen die die drehende Spindel sowie ein geringerer Reibdruck haben positiven Einfluss auf die Festigkeitsbildung.

Tabelle 5: Zielführender Parametersatz – Cu-ETP - CuCr1Zr d35 mm

Reibphase			Stauchphase			Ergebnis		
Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Verkürzung [mm]	Zugfestigkeit [MPa]	GWF [%]
25,5	0,6	3500	60	3	1750	6,83	210,4	65,6



Bild 6: Schweißergebnis und Bruchbild des zielführenden Parametersatzes Cu-ETP - CuCr1Zr d35 mm

Schweißergebnisse Cu-ETP – AlMgSi0,5

Die Mischverbindung Cu-ETP – AlMgSi0,5 wurde in einem Central-Composite-Design untersucht. Ein geringer Reibdruck, eine niedrige Reibzeit sowie Reibdrehzahl und eine hohe Stauchdrehzahl hatten positiven Einfluss auf das Schweißergebnis. Reibdruck, Reibzeit und

Reibdrehzahl dürfen in Kombination ein gewisses Minimum jedoch nicht unterschreiten, damit eine noch ausreichende Wärmeeinbringung zur Verbindungsbildung gewährleistet wird. Mit einer Vergrößerung dieser Parameter, bzw. mit zunehmender Wärmeeinbringung, entstehen größere intermetallische Phasendicken, was zur Abnahme der Festigkeit führt. Die Ergebnisangaben der Parametersätze in der Tabelle 6 sind Mittelwerte von Reproduzierbarkeitsuntersuchungen, bei denen mindestens 10 Schweißungen pro Parametersatz durchgeführt wurden.

Tabelle 6: Zielführende Parametersätze – Cu-ETP – AlMgSi0,5 d20 mm

Reibphase			Stauchphase			Ergebnis		
Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Verkürzung [mm]	Zugfestigkeit [MPa]	GWF [%]
30	0,75	1500	200	3	1050	5,70	217,5	101,2
30	0,75	1500	175	3	1050	3,10	233,1	108,4
30	0,75	1500	150	3	1050	2,70	200,0	93,0



Bild 7: Schweißergebnisse und Bruchbild der zielführenden Parametersätze Cu-ETP – AlMgSi0,5 d20 mm

Bei einem Stauchdruck von 200 MPa betrug die Standardabweichung der Zugfestigkeit 39,5 MPa (relative Abweichung 18,2 %). Ein Stauchdruck von 175 MPa führte zu einer höheren mittleren Zugfestigkeit bei zugleich geringerer Standardabweichung. Diese betrug hierbei 27,2 MPa (relative Abweichung 11,7 %). Eine weitere Reduzierung des Stauchdrucks auf 150 MPa führte zu einer Zugfestigkeit im Mittel von nur noch 200 MPa und einer Standardabweichung von 16,8 MPa (relative Abweichung 8,4 %). Dies bedeutet, dass sich die Streuung der Festigkeiten mit zunehmendem Stauchdruck vergrößert. Empfohlen wird daher ein Stauchdruck von 175 MPa. Dies führt zu hohen Festigkeiten bei einer angemessenen Streuung. Die Bruchbilder der Proben wiesen zumeist die im Bild 7 dargestellte Form eines Trennbruchs auf. Bei vereinzelt Proben kam es bei gleichen Parametern auch zu einem Scherbruch im Aluminiummaterial.

Im Anschluss wurden Rohrgeometrien mit einem Außendurchmesser von d60 mm und einem Innendurchmesser von d40 mm geschweißt, um sich der Realgeometrie anzunähern. Gute Parametersätze sind in der Tabelle 7 angegeben. Die Proben wurden mittels einer Torsionsprüfung getestet. Dafür musste der Außendurchmesser der Proben auf d45 mm bearbeitet werden, da die vorhandene Prüfmaschine nicht genug Drehmoment zur Verfügung stellen konnte, um die Proben bei vollem Durchmesser bis zum Bruch zu testen. Die zielführenden Schweißproben sowie deren Bruchbilder zeigt das Bild 8.

Tabelle 7: Zielführende Parametersätze – Cu-ETP – AlMgSi0,5 mit $d_a=60$ mm und $d_i=40$ mm

Reibphase			Stauchphase			Ergebnis		
Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Verkürzung [mm]	Torsionsfestigkeit* [MPa]	GWF [%]
50	0,75	500	191	3	350	5,41	74,2	70,0
50	0,45	500	191	3	350	2,51	69,0	65,1
30	0,75	500	191	3	500	2,37	67,2	63,4

* geprüft bei $d_a=45$ mm und $d_i=40$ mm



Bild 8: Schweißergebnisse und Bruchbilder der zielführenden Parametersätze Cu-ETP – AlMgSi0,5 d60 mm

Schweißergebnisse Cu-ETP – Al99,5

Beim Schweißen von reinem Kupfer Cu-ETP mit reinem Aluminium Al99,5 führten ebenfalls geringe Reibzeiten zu einem positiven Ergebnis. Im Vergleich zu den vorhergehenden Schweißungen stellte sich ein Stauchen in die drehende Spindel weder als positiv noch negativ dar. Daher wurde sich in den weiterführenden Versuchen für ein Stauchen in die stehende Spindel entschieden. Der Stauchdruck sollte nicht unter 90 MPa liegen, gegebenenfalls sogar auf 100 MPa erhöht werden.

Tabelle 8: Zielführende Parametersätze – Cu-ETP – Al99,5 d20 mm

Reibphase			Stauchphase			Ergebnis		
Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Verkürzung [mm]	Zugfestigkeit [MPa]	GWF [%]
45,5	1,5	1800	90	3	0	12,37	93,9	109,2
35,5	1,0	2400	90	3	0	7,61	95,0	110,5
45,5	0,25	1800	90	3	0	5,46	90,7	105,5

Der in der Tabelle 8 erstgenannte Parametersatz wurde auf Reproduzierbarkeit geprüft. Generell war bei dieser Werkstoffkombination ein breites Parameterfeld zielführend. Die Effekte der Parameter waren nicht signifikant. Kein Einstellfaktor stellte sich als besonders bedeutend heraus.



Bild 9: Schweißergebnisse und Bruchbilder der zielführenden Parametersätze
Cu-ETP – Al99,5 d20 mm

Ein direktes Plandreihen beider Proben vor den Schweißungen wirkte positiv auf das Schweißergebnis. Da somit auch die Oxidschichten an den Fügeflächen entfernt werden, kann sich dies gegebenenfalls auch positiv auf die elektrische Leitfähigkeit der Verbindung auswirken, wenn die Oxidschichten während des Reibschweißprozesses nicht vollständig verdrängt werden. Für geringstmögliche Verkürzungen kann die Reibzeit auf bis zu 0,1 s reduziert werden. Hierbei werden weiterhin Festigkeiten über der Grundwerkstofffestigkeit erzielt. Längere Stauchzeiten führten zu keiner Verbesserung in den Untersuchungen. Die Schweißergebnisse der in der Tabelle 8 aufgeführten Parametersätze zeigt das Bild 9.

Den besten Parametersatz sowie dessen Ergebnis von Schweißungen mit Rohrgeometrie zeigt die Tabelle 9. Die erzielte Torsionsfestigkeit lässt sich als sehr gut im Vergleich zu den Versuchen mit AlMgSi0,5 einstufen. Die Grundwerkstofffestigkeit von Al99,5 beträgt nur ca. 40 % der von AlMgSi0,5. Demgegenüber lag die erzielte Torsionsfestigkeit der Cu-ETP – Al99,5-Verbindungen bei über 70 % gegenüber den Verbindungen mit AlMgSi0,5. Im Bild 10 ist das Schweißergebnis sowie ein Probenbild nach dem Torsionstest zu sehen. Im Test der Probe 3 bildete nicht die Schweißfläche die schwächste Stelle, sondern es erfolgte ein Tordieren im Grundmaterial des Aluminiums. Probe 10 und Probe 3 wurden mit den identischen Parametern der Tabelle 9 geschweißt.

Tabelle 9: Zielführender Parametersatz – Cu-ETP – Al99,5 mit $d_a=60$ mm und $d_i=40$ mm

Reibphase			Stauchphase			Ergebnis		
Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Verkürzung [mm]	Torsionsfestigkeit* [MPa]	GWF [%]
45,5	0,25	600	90	3	0	7,50	53,2	N/A

* geprüft bei $d_a=45$ mm und $d_i=40$ mm



Bild 10: Schweißergebnis und Probenbild nach Torsionstest des zielführenden Parametersatzes Cu ETP – Al99,5 d60 mm

Schweißergebnisse Cu-ETP – Al99,5 - Cu-ETP

In einigen abschließenden Versuchen wurden Reibschweißungen mit d20 mm Proben durchgeführt, bei denen zwei Kupferproben aus Cu-ETP durch eine Aluminiumzwischen­schicht, bestehend aus Al99,5, miteinander verbunden werden. Vorteil dieser Methode ist, dass die Problematik der hohen Drehmomente einer Kupfer-Kupfer-Verbindung umgangen wird und gleichzeitig der Anteil an Aluminium gegenüber einer einfachen Kupfer-Aluminium-Verbindung gesenkt und damit die elektrische Leitfähigkeit verbessert wird. Nachteil ist, dass zur Herstellung des Verbundes zwei Schweißungen notwendig sind. Insgesamt wurden vier Proben hergestellt. Dazu wurde für beide Seiten des Verbundes der in der letzten Zeile in Tabelle 8 aufgeführte Parametersatz zum Schweißen verwendet. Im Ergebnis konnten ab einer Aluminiumzwischen­schicht von 2 – 3 mm nach der ersten bzw. vor der zweiten Schweißung Zugfestigkeiten von ca. 185 MPa im Gesamtverbund erzielt werden. Dieser Wert liegt über der doppelten Grundwerkstofffestigkeit des Reinaluminiums und ist sehr wahrscheinlich auf eine Kaltverfestigung des Aluminiums zurückzuführen. Größere Aluminiumschichten führten zur Reduzierung der Zugfestigkeit. Auffällig war, dass die zweite Schweißung deutlich weniger im Vergleich zur ersten Seite verkürzt (Vgl. 5,4 mm zu 0,5 mm bei 3 mm Zwischen­schicht). Die Verkürzung der zweiten Seite nahm zudem mit abnehmender Schichtdicke ab. Dies ist auf die fehlende Entfestigung zurückzuführen.



Bild 11: Schweißergebnisse und Bruchbilder der Schweißungen Cu-ETP mit Al99,5 Zwischenschicht d20 mm

Prüfstand zum Messen von elektrischen Widerständen

Innerhalb des Projektes wurde ein Prüfstand entwickelt, mit dem die elektrischen Widerstände von Prüflingen gemessen werden können. Über eine Vorrichtung konnte ein Prüfstrom von bis zu 400 A in die Proben eingeleitet werden. Der auftretende Spannungsabfall entlang des Prüflings wurde über ein hochgenaues Multimeter gemessen. Zum Vergleich wurde ein Micro-Ohmmeter angeschafft, das den Widerstand der Proben „direkt“ misst. Anhand einer Referenz-Kupferprobe (Cu-ETP; $R = 7,21 \mu\text{Ohm}$) wurden die Messmethoden mit unterschiedlichen Prüfspitzen einer Messsystemanalyse unterzogen. Dabei wurden Wiederhol- und Vergleichspräzision sowie die Stabilität analysiert.

Mit Hilfe des Prüfstandes wurden vier verschiedene Probenvarianten untersucht. Gelötete Proben, die aus einem Kurzschlussläufer herausgearbeitet wurden, stellten die erste Variante dar. Neben der gelöteten Variante wurden drei reibgeschweißte Varianten in den projektspezifischen Materialkombinationen Cu-ETP/CuCr1Zr, Cu-ETP/Al99,5 und Cu-ETP/AlMgSi0,5 untersucht.

Die Messungen zeigten, dass die gelöteten Proben insgesamt den höchsten Median und Mittelwert des elektrischen Widerstandes aufwiesen ($R = 7,73 \mu\text{Ohm}$). Zudem besaß die Stichprobe der gelöteten Bauteile die größte Streuung. Ein Ausreißer der Stichprobe besaß einen um ca. 6 % gegenüber dem Mittelwert erhöhten Widerstand. Dies verdeutlichte die auftretenden Qualitätsschwankungen der Lötfertigung. Die reibgeschweißten Proben besaßen eine deutlich geringere Streuung der Messwerte. Wie zu erwarten war, besaß die Mischverbindung aus den Werkstoffen Cu-ETP und CuCr1Zr den insgesamt kleinsten ohmschen Widerstand und damit die beste elektrische Leitfähigkeit ($R = 7,47 \mu\text{Ohm}$). Daran schloss sich die Werkstoffkombination Cu-ETP/Al99,5 an ($R = 7,59 \mu\text{Ohm}$). Bemerkenswert ist, dass die Mischkombination mit der Aluminiumlegierung AlMgSi0,5 einen nur unwesentlich schlechteren Leitwert gegenüber den anderen Werkstoffkombinationen aufwies ($R = 7,64 \mu\text{Ohm}$). Zudem war der Leitwert besser als der der gelöteten Proben. Die Wirkungsgradverluste bei der Herstellung eines Rotors in dieser Variante würden sich daher mit hoher Wahrscheinlichkeit in akzeptablen Grenzen befinden. Gegenüber der derzeitigen

Lötvariante könnte trotz des Einsatzes eines Aluminiumwerkstoffes sogar eine Wirkungsgraderhöhung erreicht werden.

Schweißen von Demonstratorbauteilen

Vor dem Beginn des Schweißens von Demonstratorbauteilen wurde in Vorversuchen die maximal schweißbare Fügefläche von artgleichen Cu-ETP-Werkstücken mit Rohrquerschnitt bestimmt. Daraus ergab sich, dass Bauteile mit einem Außendurchmesser von $d60\text{ mm}$ und einer Wandstärke von 9 mm , dies entspricht einer Fügefläche von ca. 1442 mm^2 , geschweißt werden können. Hierbei gelten jedoch sehr hohe Anforderungen an die Spanntechnik.

Zur Herstellung der Demonstratorbauteile wurde die Werkstoffkombination CuCr1Zr – Cu-ETP verwendet. Das Prinzip der Schweißungen zeigt das Bild 12. Ein Kurzschlussring aus CuCr1Zr, der spindelseitig eingespannt wurde, wurde stirnflächig auf die Kurzschlussstäbe (Cu-ETP) sowie deren Stützscheibe (Cu-ETP) geschweißt. Die Fügefläche und Durchmesser entsprachen den Maxima aus den Vorversuchen. Als Startparametersatz wurde der Parameter der ersten Zeile aus der Tabelle 4 verwendet. Da die Volumina beider Fügepartner relativ klein im Vergleich zur Reibfläche sind, erhitzen diese sehr stark, da die Wärmemenge nicht schnell genug abgeführt werden kann. Aus diesem Grund war die resultierende Verkürzung des Demonstratorversuchs deutlich größer gegenüber der Verkürzung aus den Vorversuchen mit einem Probendurchmesser von $d20\text{ mm}$. Das Schweißergebnis des ersten Demonstratorversuchs ist im Bild 13 zu sehen.

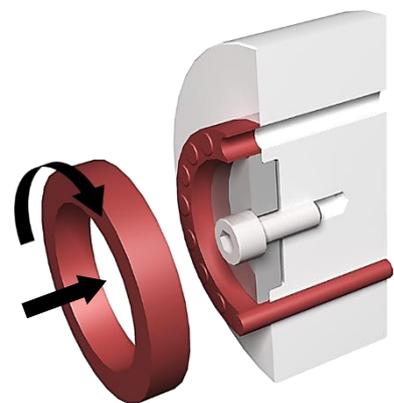


Bild 12: Konzept zum verreibenden Reibschweißen von Kupferstäben mit dem Kurzschlussring

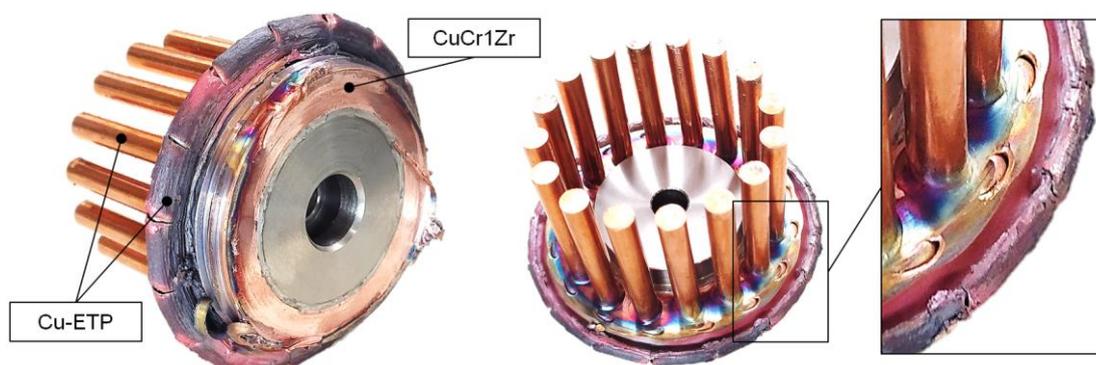


Bild 13: Demonstratorversuch 1

Aufgrund der schnellen Erhitzung und der damit einhergehenden schnellen Verkürzung im Schweißprozess, wurde im zweiten Versuch von der Vorgabe einer Reibzeit abgesehen und stattdessen ein Reibweg von 1 mm vorgegeben (Versuch 1: Reibweg 3,10 mm bei vorgegebener Reibzeit von 0,4 s). Daraus ergab sich eine Reibzeit von 0,145 s bei einer Gesamtverkürzung von 4,78 mm. Das Ergebnis ist im Bild 14 zu sehen. Versuch 1 und 2 ist gemein, dass sich extreme Spanmarken auf dem spindelseitigen Kurzschlussring abzeichneten. Zudem trieben die Bohrungen der Stützscheibe während der Plastifizierung nach außen und hinterließen sichtbare Fehlstellen auf der Rückseite (Lochleibung). Zu hohe Schweißverkürzungen führten zudem zum Prozessabbruch in der Stauchphase. Die Kurzschlussstäbe schienen in ihrer unmittelbaren Umgebung verschweißt zu sein.

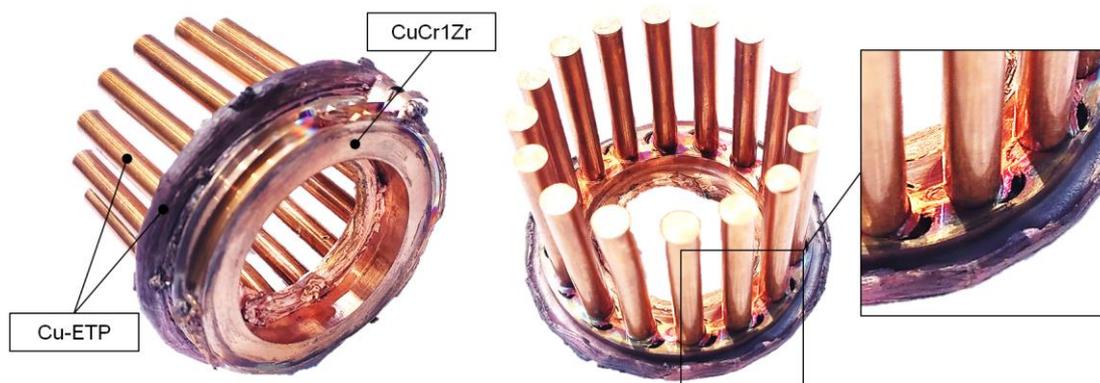


Bild 14: Demonstratorversuch 2

In den Demonstratorversuchen 3 und 4 wurde ein spindelseitiger Anschlag aus CuCr1Zr eingesetzt, um eine bessere Wärmeabfuhr am spindelseitigen Bauteil gewährleisten zu können. Dieses rutschte beim Versuch 3 jedoch zwischen den Spindelbacken durch und es kam zur Verschweißung von Bauteil und Anschlag. Daher wurde beim Versuch 4 der Spanndurchmesser auf d70 mm erhöht. Die Fügefläche blieb gleich. Zudem wurde die Reibdrehzahl auf 3000 1/min reduziert. Das Schweißergebnis, welches sich als sehr positiv herausstellte und als zielführend erachtet wurde, sowie dessen Schliffbild vom Querschnitt sind im Bild 15 dargestellt. Im Schliffbild ist zu erkennen, dass die Schweißverbindung nicht über die komplette axiale Höhe der Stützscheibe vorliegt. Dies bedeutet, dass die Stützscheibe tendenziell noch etwas niedriger gestaltet werden kann, um Material einsparen zu können. An den Stirnflächen der Kurzschlussstäbe hin zum Kurzschlussring liegt augenscheinlich eine

gute Anbindung vor. Insgesamt ergab sich eine Schweißverkürzung von ca. 5 mm bei einer Reibzeit von 0,157 s.

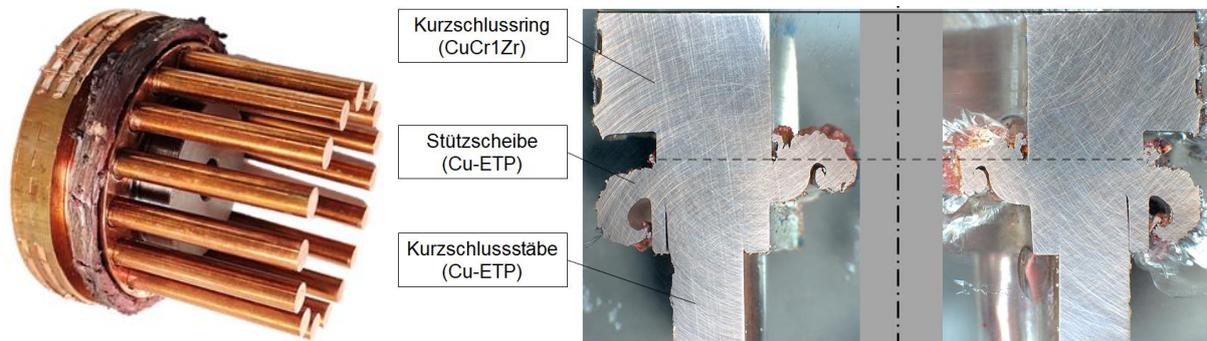


Bild 15: Demonstratorversuch 4

Im Versuch 5 wurde weiter in Richtung Serienfertigung gedacht. Bei unveränderter Fertigungsreihenfolge darf der Kurzschlussring hierbei keine Innenabstützung haben, da die Wellenenden des Rotorpakets hindurchragen. Der Kurzschlussring muss somit formschlüssig gespannt werden. Dazu wurde eine Vorrichtung für die Spindel konstruiert, die dies mittels 12 Stifte realisiert. Ein äquivalentes Bohrbild befand sich auf der Rückseite des zu verschweißenden Kurzschlussrings. Für den Versuch 5 wurden der Reibweg auf 1,5 mm und der Stauchdruck auf 70 MPa erhöht, da zum einen die Statorseite nicht planbearbeitet wurde (Einsparung von Fertigungsaufwand) und die Kurzschlussstäbe dadurch um ca. 0,75 mm aus der Stützscheibe herausragten, und zum anderen um eine bessere Verbindungsbildung in der Stauchphase zu realisieren. Das Ergebnis zeigt das Bild 16. Im Vergleich zu Versuch 4 sind die Stäbe bis zum Ende der Stützscheibe verbunden, jedoch sind ebenso wieder außenliegenden Fehlstellen vorhanden. Gegebenenfalls könnte als Kompromiss aus den Versuchen 4 und 5 eine weitere Schweißung mit einem Reibweg von 1 mm, unter Beibehaltung des Stauchdrucks von 70 MPa, ein noch besseres Schweißergebnis verwirklichen. Der zielführende Parametersatz für die Demonstratorgeometrie ist in der Tabelle 10 festgehalten.

Tabelle 10: Zielführender Parametersatz – Demonstratorgeometrie Cu-ETP - CuCr1Zr

Reibphase			Stauchphase			Ergebnis	
Druck [MPa]	Weg [mm]	Drehzahl [1/min]	Druck [MPa]	Zeit [s]	Drehzahl [1/min]	Verkürzung [mm]	Reibzeit [s]
24,3	1 - 1,5	3000	70	3	1750	7,74	0,213

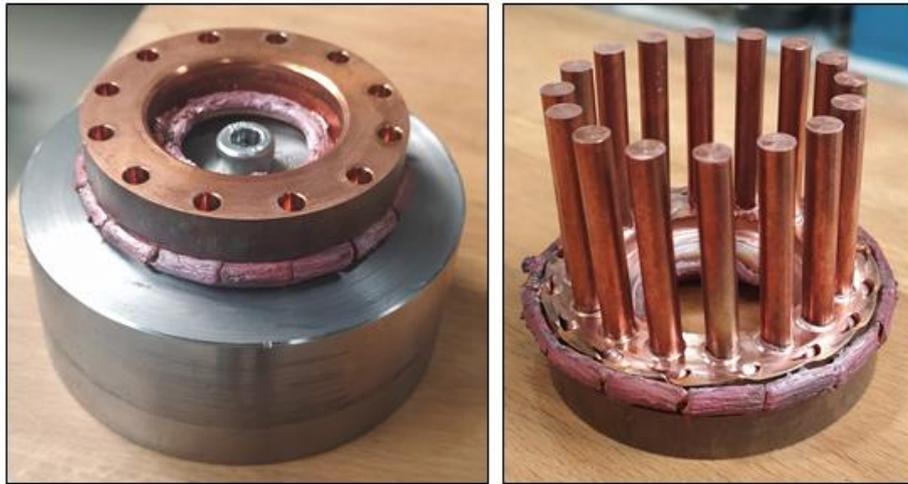


Bild 16: Demonstratorversuch 5

Varianten zur Herstellung eines Prototyps in Originalgröße

Im Folgenden werden abschließend drei fortführende Konzepte zur Realisierung eines ganzheitlichen Rotors dargestellt. Wie beim Versuch 5 erwähnt, wäre in der spindelseitigen Vorrichtung ein Durchgang erforderlich. Zudem müsste der Rotoraufbau angepasst werden. Er muss derart umgestaltet werden, dass die Kupferstützscheibe genug Freiraum an der Innenseite hat, damit sich der Schweißwulst während des Reibschweißprozesses ungehindert ausbreiten kann. Bild 17 zeigt drei mögliche Varianten. Bei allen Varianten wird, wie in den Demonstratorversuchen, ein Stützscheibe auf die Kurzschlussstäbe aufgepresst.

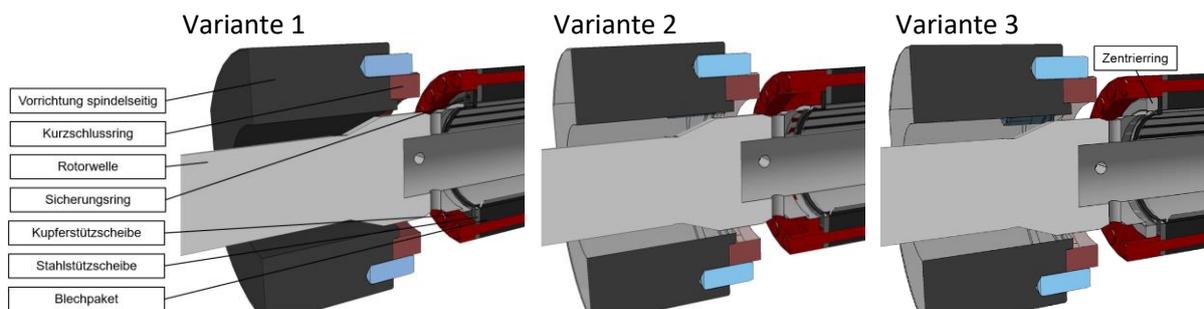


Bild 17: Varianten zur Herstellung eines Prototyps in Originalgröße

Die einfachste Ausführungsvariante der Kupferstützscheibe besitzt eine niedrige axiale Höhe und einen Innendurchmesser der größer als der Wellenaußendurchmesser ist. Durch Letzteres besteht die Möglichkeit, dass sich der Schweißwulst frei nach innen ausbreiten kann. Aufgrund des Ersteren wird jedoch die Kupferstützscheibe nicht auf der Rotorwelle zentriert und nicht in einer definierten Winkellage fixiert. Die vorliegende Schränkung der Kurzschlussstäbe

könnte eine exzentrische Position der Scheibe verursachen. Ohne Zentrierung könnten auftretende Querkräfte während der Schweißung ein Verrutschen der Scheibe verursachen.

In der zweiten Variante besitzt die Kupferstützscheibe eine größere axiale Höhe und zudem mehr Material auf der Innenseite, sodass die Scheibe auf der Rotorwelle zentriert werden kann. In diesem Fall wäre auch eine definierte Winkelausrichtung über eine innenliegende Nut und dem in dem Rotorpaket liegenden Läuferstab möglich. Nachteil ist, dass bedeutend mehr Kupfermaterial sowie mehr Kupfervorbearbeitung notwendig wäre. Um Kupfermaterial einzusparen, könnte das innenliegende Material durch einen zusätzlichen Zentrierring aus Stahl ersetzt werden. Dieser würde vor dem Sicherungsring des Blechpakets montiert werden. Eine definierte Winkelausrichtung wäre auch in dieser dritten Variante realisierbar. Der Schweißwulst fixiert nach der Schweißung den Zentrierring in seiner axialen Lage. Auch bei dieser Variante besteht der Nachteil darin, dass im Vergleich zur Variante 1 mehr Material für die Kupferstützscheibe notwendig ist und darüber hinaus ein zusätzliches Bauteil gefertigt werden muss.

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile der Varianten wurde die Variante 2 für eine reale Umsetzung favorisiert. Über das Projektende hinaus wird an der Herstellung eines Prototyps in Form dieser Variante gearbeitet.