

Umformtechnisch hergestellte Formspulen zur Erhöhung des Kupferfüllfaktors in elektrischen Maschinen

Daniel Petrell, Institut für Bildsame Formgebung (IBF), RWTH Aachen

Florian Pauli, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen

Christian Hecker, Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Tristan Steibert, Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Marius Klausnitzer, Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Stefan Börzel, Breuckmann GmbH & Co. KG

Michael Schröder, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen

Kay Hameyer, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen

Abstract

An elektrische Maschinen im Antriebsstrang elektrischer Straßenfahrzeuge werden hohe Anforderungen an Leistungsdichte, Effizienz und Ressourceneinsatz gestellt. Eine Möglichkeit dies zu gewährleisten ist die Erhöhung des Kupferfüllfaktors. In modernen Wicklungssystemen mit Runddrähten besteht hierzu nur noch ein geringes Potential. Mit einer rechteckigen Leitergeometrie sind allerdings höher Kupferfüllfaktoren möglich.

Darum wird im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanzierten Verbundvorhabens *FlexiCoil* ein großserientauglicher und wirtschaftlicher Herstellungsprozess für umformtechnisch hergestellte Formspulen mit variabler Geometrie für den Einsatz in elektrischen Maschinen erforscht. Ausgangsmaterial für den Umformprozess ist konventioneller Draht aus ETP-Kupfer. Die Festlegung des hierfür geeigneten Umformprozesses und der notwendigen Prozessparameter sind ebenso Inhalt der Untersuchungen wie die Entwicklung eines geeigneten Isoliersystems.

Conical shaped coils for high copper filling factors using forming technology

For electric machines in the drive train of electric vehicles, high power density, high efficiency and a sustainable use of resources are desired. One way of ensuring these factors is to increase the copper filling factor. In modern winding systems with round wires there is only a low potential for this. With a rectangular conductor geometry, however, higher copper filling factors are possible.

For this reason, the FlexiCoil joint project, which is financially supported by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), is developing an economical production process for preformed coils with variable geometry. The developed coils are suitable for electrical machines which are manufactured in series production. The material, which is used for the forming process is conventional wire made of ETP copper. The determination of the suitable forming process and the necessary process parameters as well as the development of a suitable insulation system are part of the project.

1 Einleitung

Die Elektrifizierung des Individualverkehrs fordert künftig die Produktion einer hohen Stückzahl elektrischer Traktionsmotoren. Diese müssen hohe Wirkungsgrade und Leistungsdichten bei geringen Produktionskosten aufweisen [1]. Ein hoher Kupferfüllfaktor ist dabei eine Möglichkeit hohe Wirkungsgrade und Leistungsdichten zu erreichen. Der Kupferfüllfaktor K_{Cu} beschreibt den Anteil der gesamten Nutfläche A_{Nut} , welcher von der Querschnittsfläche der Kupferleiter A_{Cu} eingenommen wird:

$$K_{Cu} = A_{Cu}/A_{Nut} \quad (1)$$

Der elektrische Widerstand R eines Leiters der Länge l mit gleichbleibender Querschnittsfläche A_{Cu} ist durch

$$R = \frac{l}{\sigma \cdot A_{Cu}} \quad (2)$$

gegeben. Dabei ist σ die elektrische Leitfähigkeit des Kupfers.

Folglich sinkt der Wicklungswiderstand einer elektrischen Maschine mit gleichbleibender Nutgeometrie bei einer Vergrößerung des Kupferfüllfaktors. Ein verringerter Widerstand führt wiederum zu geringeren Kupferverlusten bei gleichbleibender Stromstärke. Da die Querschnittsgeometrie von Runddraht schon aufgrund des Formfaktors den Kupferfüllfaktor nach oben begrenzt, gibt es den Ansatz formschlüssige Geometrien zu verwenden. Unter Vernachlässigung der Isolierung ist der maximale Kupferfüllfaktor für Runddrähte bei theoretisch 90,7 % begrenzt, bei formschlüssigen Windungen bei theoretisch 100 %. Durch Isoliermaterial und Fertigbarkeit werden bei einer Nadelwicklung jedoch nur Kupferfüllfaktoren von bis zu 65% erreicht [8]. Die in diesem Artikel betrachtete Formspule soll einen Kupferfüllfaktor von mehr als 70 % erreichen.

Eine Wicklungstechnologie mit formschlüssigen Leitern stellen Steckspulen mit rechteckigem Leiterquerschnitt dar. Diese bedingen hierbei eine konische Form der Statorzähne, damit die Nuten parallelfankig sind. Eine Möglichkeit parallelfankige Zähne zu nutzen bietet ein sechseckiger Leiterquerschnitt [2]. Allerdings ist dafür eine sehr genaue Platzierung der Leiter notwendig, was zu einem aufwendigen Wickelprozess führt. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Einzelzahnwicklungen mit rechteckigen Leitern [3]. Im Fall von [3] werden diese gießtechnisch aus Aluminium hergestellt.

Da Aluminium eine geringere elektrische Leitfähigkeit als Kupfer hat, wird in diesem Beitrag eine umformtechnisch hergestellte Spule aus Kupfer betrachtet.

2 Definition der Spulengeometrie

Die umformtechnisch hergestellte Spule soll den in der elektrischen Maschine vorhandenen Bauraum so weit wie möglich ausnutzen. Als Erprobungsträger soll eine Maschine mit konischen Nuten zum Einsatz kommen. Die Spule soll

dementsprechend ebenfalls eine konische Form aufweisen. Nut und Spule sind im Querschnitt in Bild 1 dargestellt.

Einzelzahnwicklungen aus herkömmlichem Runddraht werden gefertigt, indem Kupferlackdraht um die Statorzähne gewickelt wird. Die Montage der umformtechnisch hergestellten Spulen erfolgt hingegen, indem die fertige Spule auf den Zahn gesteckt wird (vgl. Bild 1 (rechts)). Darum besitzt die elektrische Maschine keine ausgeprägte Zahnkopfgeometrie. Die Einzelzähne können mit montierter Spule zu einem kompletten Stator der elektrischen Maschine zusammengefügt werden.

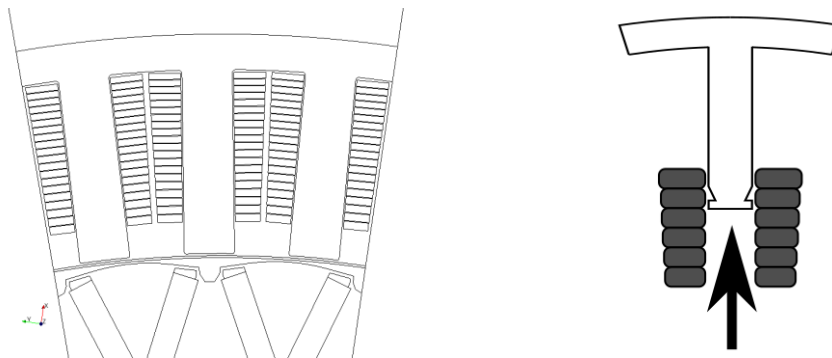


Bild 1: Nuten des Erprobungsträger mit Spulen (links); Montageprinzip der Spule auf einen Einzelzahn (rechts).

Der zur Verfügung stehende Bauraum der Spule wird, neben der durch die Nut gegebene Begrenzung, auch durch die benötigte Isolierung weiter eingeschränkt. Dazu werden Isolierschichtdicken von einem System mit einer vergleichbaren Runddrahtwicklung angenommen.

Die Zielgeometrie der Spule ist in Bild 2 (rechts) dargestellt. Der Querschnitt jeder Windung soll annähernd den gleichen Flächeninhalt aufweisen. Dies erklärt, unter Beachtung der konischen Form der Statornut, die verschiedenen Dicken der einzelnen Windungen.

3 Erprobungsträger

Der Erprobungsträger mit Formspulen und die Referenzmaschine mit herkömmlicher Runddrahtwicklung werden basierend auf den definierten Anforderungen entworfen und simulativ untersucht. In einem ersten Schritt erfolgt die Anpassung der Maschinengeometrie. Ziel der Anpassung ist ein kostengünstig herstellbarer Maschinenentwurf, welcher zur direkten Vergleichbarkeit eine identische magnetische Flussverteilung im Eisenkern von Technologieträger und Referenzmaschine gewährleistet. Anschließend werden die Maschinen elektromagnetisch berechnet und Eisen- und Kupferverlusten und der Wirkungsgrad bestimmt.

3.1 Anpassung an die Formspule

Unter Berücksichtigung der anfangs definierten Anforderungen und der Berechnungsergebnisse sowie dem Stand der Technik bezüglich der Primär- und Sekundärisolierung von Runddrähten, werden die in Bild 2 dargestellte Referenzmaschine mit Runddrahtwicklung und der Technologieträger mit Formspulen festgelegt.

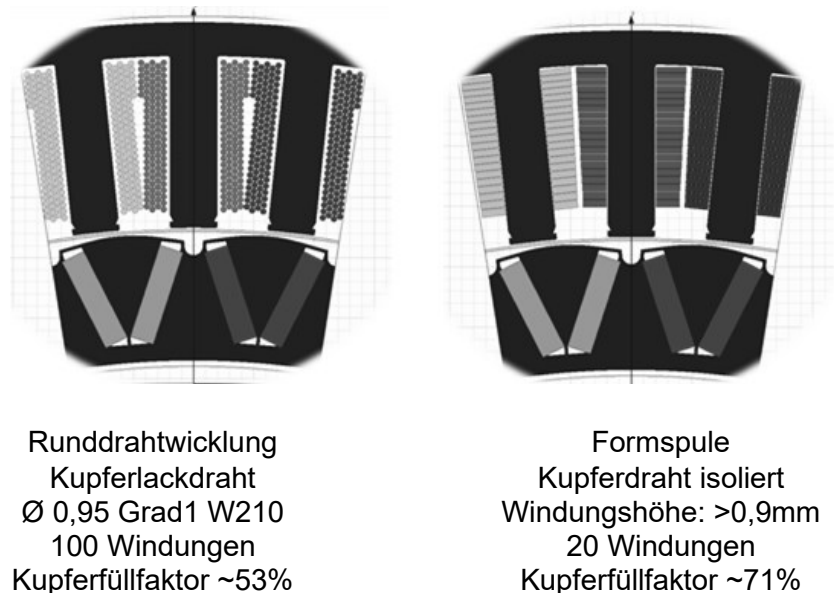


Bild 2: Gegenüberstellung Runddrahtwicklung der Referenzmaschine (links) und FlexiCoil Spulen des Technologieträgers (rechts).

3.2 Simulation

Durch die veränderte Spulengeometrie wird ein anderes elektromagnetisches Verhalten der Maschine erwartet. Berechnungen zeigen für geringe Drehzahlen um bis zu 22 % verringerte Kupferverluste. Dies kommt durch den erhöhten Kupferfüllfaktor von 71 % zustande. Bei höheren Drehzahlen bedingen sogenannte Skin- und Proximityeffekte jedoch wieder eine Erhöhung der Verluste. Diese sorgen für einen erhöhten effektiven Widerstand und werden von hohen Frequenzen und Leiterquerschnitten begünstigt.

Herkömmliche Runddrahtwicklungen für Traktionsantriebe werden meist mit Leitern mit einem Durchmesser von ca. 1 mm realisiert. Dies entspricht einer Querschnittsfläche von 0,79 mm². Der durch die Zielgeometrie definierte Querschnitt der Leiter der Formspule ist mit 4,78 mm² deutlich größer.

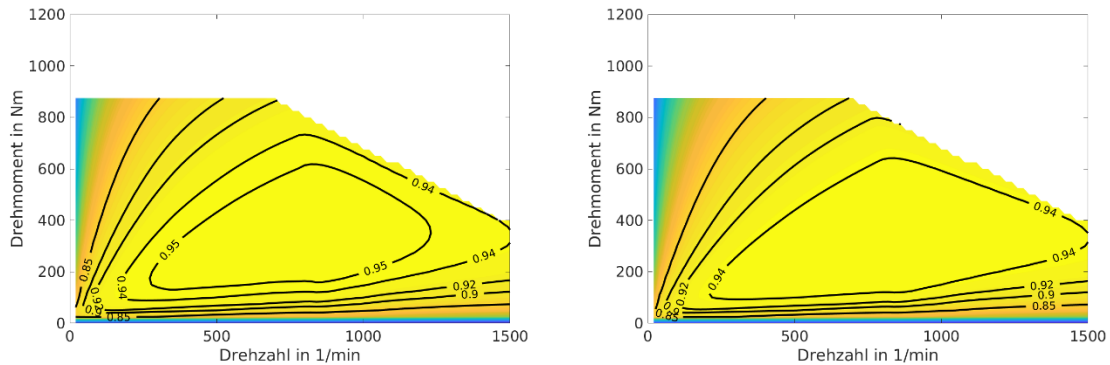


Bild 3: Wirkungsgrad von Erprobungsträger (links) und Referenzmaschine (rechts) in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl.

Die Wirkungsgradkennfelder von Technologieträger und Referenzmaschine sind in Bild 3 dargestellt. Die Maschine mit den Formspulen erreicht insbesondere im Bereich niedriger und mittlerer Drehzahlen $n < 1200 \text{ min}^{-1}$ höhere Wirkungsgrade.

3.3 Voruntersuchungen Umformbarkeit Werkstoff

Um die Umformbarkeit des Werkstoffs zu untersuchen, werden Zylindertauchversuche an Proben aus ETP-Kupfer bis zu Umformgraden von 1,1 durchgeführt. Die Versuchsmatrix ist multifaktoriell im Umformgeschwindigkeitsbereich von $0,01 \text{ s}^{-1}$ bis 1 s^{-1} und im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 500 °C ausgelegt. Eine optische Inspektion der Proben lässt dabei kein Materialversagen, z. B. Mikrorisse an der Oberfläche, erkennen. Die Ergebnisse der gestauchten Proben liefern Fließkurven, welche als Grundlage für die simulationsgestützte Konzeptentwicklung des Umformprozesses genutzt werden. Die Fließkurven zeigen den erwarteten Einfluss, dass die Fließspannung mit steigender Temperatur abnimmt und mit steigender Umformgeschwindigkeit zunimmt, wobei der Einfluss der Umformgeschwindigkeiten bei höheren Temperaturen ausgeprägter ist.

Da die Windungen bei manchen Herstellungskonzepten der Formspule während der Umformung miteinander in Kontakt stehen, werden des Weiteren Plattiersversuche durchgeführt, um die Gefahr des Kaltverschweißens während der Umformung abschätzen zu können. Bild_ zeigt das Ergebnis der Plattiersversuche bei unterschiedlichen Umformgraden. Bei einem Umformgrad von $\varphi \approx 0,4$ ist eine Trennung der beiden Teilproben noch möglich, während die Teilproben bei einem Umformgrad von $\varphi \approx 0,8$ und größer kaltverschweißen. Neben dem Einfluss des Umformgrades auf ein Kaltverschweißen der einzelnen Windungen werden auch verschiedene tribologische Systeme getestet: Graphit, Wollfett, Tiefziehöl und Bornitrid. Die Plattiersversuche mit Graphit, Wollfett und Tiefziehöl zeigen ein Abrutschen der beiden Kontaktpartner, während mit Bornitrid ein Kaltverschweißen auch bei hohen Umformgraden ($\varphi \approx 1,5$) verhindert werden kann.

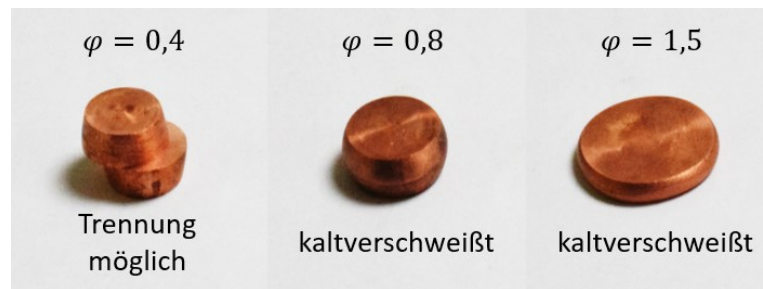


Bild 4: Ergebnis der Plattiersuche bei unterschiedlich stark umgeformten Zylinderproben.

4 Festlegung Prüfkriterien für die umgeformte Spule

4.1 Leitfähigkeit

Da bei der Umformung von Metallen die Versetzungsdichte erhöht und somit die Kristallstruktur des Materials gestört wird, wird eine Leitfähigkeitsuntersuchung durchgeführt. Dazu werden mehrere gerade Drahtabschnitte auf unterschiedliche Endhöhen gestaucht. Anschließend wird der elektrische Widerstand der Proben gemessen. Die Widerstandsmessung zeigt, dass sich der elektrische Widerstand einer nicht umgeformten Probe von $177 \mu\Omega$, bei einer Umformung bis zu einem Umformgrad von $\varphi \approx 1$, auf $182 \mu\Omega$ erhöht. Die relative Widerstandserhöhung beträgt damit 2,8 %. Nach der Umformung ist der Querschnitt des Drahtabschnittes entlang seiner Länge nicht mehr konstant, weshalb ein Teil der Widerstandsänderungen auch auf die Änderung der Leitergeometrie zurückgeführt werden kann. Der theoretische Widerstand der Proben berechnet sich zu $177,2 \mu\Omega$.

4.2 Teilendladungseinsetzspannung

Als Bewertungskriterien der qualifizierenden Isolierungsprüfung gilt die sogenannte Teilendladungseinsetzspannung (im Englischen: Partial Discharge Inception Voltage (PDIV)). Oberhalb dieser Spannung treten Teilendladungen auf, welche das Isoliermaterial schädigen. Da die Lebensdauer oberhalb der PDIV nur noch wenige Stunden beträgt [4], gilt dies als End-of-Life-Kriterium. Für die qualifizierenden Isolierungsprüfungen wird eine Spannung definiert, unterhalb derer Teilendladungen nicht auftreten dürfen.

Der Erprobungsträger wird von einem Umrichter gespeist und ist somit besonderen Belastungen ausgesetzt. Die Klemmspannung des Umrichters ist schematisch in Bild 5 gegeben. Die Berechnung der Mindestspannung, welche in der qualifizierenden Prüfung erreicht werden muss, erfolgt in Anlehnung an DIN EN 60034-18-41 [5]. Für die als Erprobungsträger verwendete Maschine entspricht diese Grenze einer Teilendladungseinsetzspannung von 804 V und wird aus der Multiplikation der Zwischenkreisspannung von 300 V mit Sicherheitsfaktoren berechnet, die Überschwinger (k_{OS}), hysteretische Effekte des Isoliermaterials (k_{PD}), die Temperatur (k_T), den Zusammenhang zwischen maximaler Phase-Erde-Spannung und Zwischenkreisspannung ($k_{ph,gd}$) sowie die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der Spannung (k_w) berücksichtigen [5]:

$$U = k_{OS} \cdot k_{ph,gd} \cdot k_{PD} \cdot k_T \cdot k_w \cdot U_{DC} = 1,1 \cdot 1,5 \cdot 1,25 \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 300V = 804V. \quad (3)$$

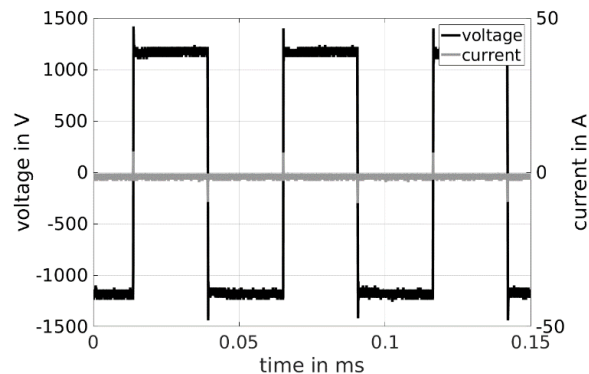


Bild 5: Rechteckspannung, die der Ausgangsspannung eines Umrichters ähnelt. Beim Schaltvorgang kommt es zu einem Überschwingen.

5 Umformtechnologie

Mit Hilfe von Umformsimulationen werden verschiedene Konzepte zur umformtechnischen Herstellung von Formspulen entwickelt und diese anschließend hinsichtlich der praktischen Umsetzung erprobt. Für alle Konzepte wird Rechteckdraht als Ausgangsmaterial zu benutzen. Bei hohen Stückzahlen ist dieses Ausgangsmaterial nicht mit einem wirtschaftlichen Nachteil verbunden und der Einsatz von Rechteckdraht reduziert die Wahrscheinlichkeit des Abrutschens einzelner Windungen gegeneinander. Die einzelnen Konzepte werden im weiteren Verlauf mit nachfolgenden Namen bezeichnet:

1. Freie Umformung.
2. Umformung mit Gegenhalter.
3. Umformung mit Gegenspule.
4. Mehrstufige Umformung.

Das einfachste entwickelte Konzept wird als „freie Umformung“ bezeichnet. Bei diesem Konzept wird ein vorgebogener Spulenrohling in ein Gesenk eines Werkzeuges, dessen Abmessungen der Zielgeometrie der Formspule entspricht, eingesetzt. Durch einen Stauchprozess sollen die Windungen im Gesenk ohne großen Formzwang („frei“) umgeformt werden, bis ihre Umformung durch das Anliegen am Container des Gesenks begrenzt wird. Die praktische Erprobung zeigt, dass dieses Konzept nicht geeignet ist, da die einzelnen Windungen ohne die Verwendung eines zusätzlichen Schmiermittels aufgrund des zu geringen Formzwangs gegeneinander abrutschen und somit kein definierter Drahtquerschnitt gewährleistet werden kann.

Das Konzept der Umformung mit Gegenhalter bietet, im Vergleich zum Konzept der „freien“ Umformung, einen deutlich höheren Formzwang. Bei diesem

Konzept wird ein vorgebogener Spulenrohling in ein Gesenk eingelegt, dessen Breite in vertikaler Richtung variiert. Im oberen Bereich besitzt das Gesenk eine Breite, die kaum größer ist als die initiale Drahtbreite, um einen hohen Formzwang zu gewährleisten. Die Breite des Gesenks im unteren Bereich entspricht der gewünschten Endbreite der Windungen. Durch einen Stauchprozess zwischen Stempel im oberen Bereich und Gegenhalter im unteren Bereich, der während der Umformung eine konstante Gegenkraft aufbringt, sollen die Windungen in einem Übergangsbereich zwischen schmalerem oberen und breiterem unteren Spalt homogen gebreitet werden. Die praktische Erprobung zeigt, dass auch bei diesem Konzept die Windungen leicht gegeneinander abrutschen. Insbesondere ist dieses Konzept eher ungeeignet für eine Serienproduktion, da wegen der Breitenbegrenzung des Stempels durch den schmalen oberen Spalt ein Grat an der obersten Windungen entsteht, der durch einen zusätzlichen Arbeitsschritt entfernt werden müsste.

Das folgende Konzept bietet den Vorteil, dass die Windungen nicht gegeneinander abrutschen können, da sie während der Umformung voneinander getrennt sind. Beim sogenannten Konzept mit Gegenspule wird ein vorgebogener Spulenrohling in eine 3D-gedruckte Gegenspule aus Maraging-Stahl heringedreht und anschließend gestaucht. Durch den Stauchprozess sollen die Windungen der Kupferspule zwischen den Windungen der Stahlspule auf die gewünschte Zielgeometrie der Formspule umgeformt werden. Warmumformversuche bei 300 °C zeigen, dass das Kupfer während der Umformung in das Spaltmaß zwischen Gegenspule und Gesenkcontainer fließt und dadurch einen nicht unerheblichen Grat bildet, was den Nachteil eines zusätzlichen Arbeitsschrittes zur Folge hat. Außerdem muss die Kupferspule nach der Umformung aus der Gegenspule herausgedreht werden, was insbesondere durch eine Gratbildung während der Umformung deutlich erschwert wird. Daher erscheint dieses Konzept für eine Umsetzung in einem Serienprozess ungeeignet.

Basierend auf der praktischen Erprobung der oben genannten Konzepte, wird das Konzept der mehrstufigen Umformung für die Auslegung eines Serienprozesses weiterverfolgt. Dieses Konzept ist ähnlich zu dem Konzept der „freien“ Umformung, mit dem Unterschied, dass die Gestalt des Gesenkcontainers stufenweise, ausgehend von einem vorgebogenen Spulenrohling, an die Zielgeometrie der Formspule angepasst wird, um einen höheren Formzwang zu erzielen. Für ein besseres Handling ist der Gesenkcontainer des Werkzeugs mehrgeteilt ausgelegt. Da bei einem Stauchumformprozess einer Spule in einem schmalen Gesenk hohe Horizontalkräfte entstehen, müssen diese, beispielsweise durch Keilspanner, kompensiert werden, wie in Bild 6 zu erkennen ist.

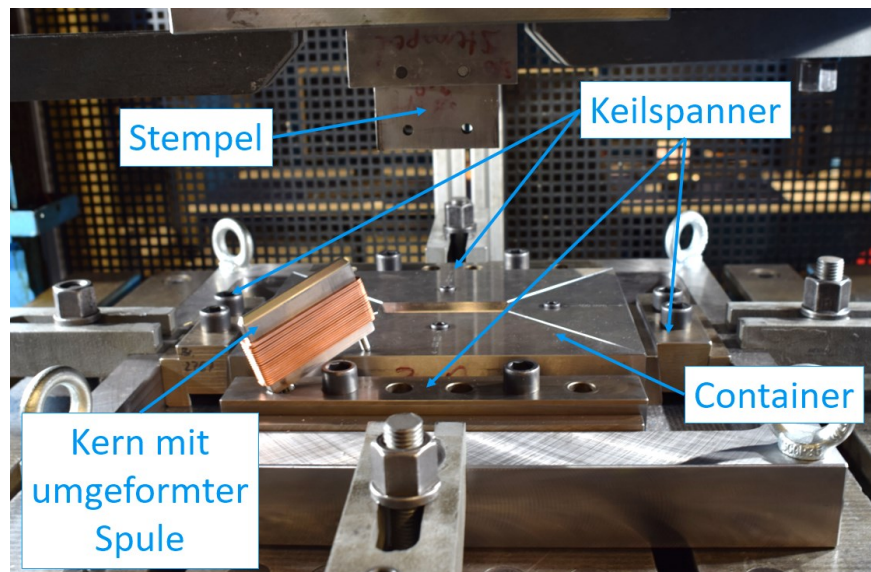


Bild 6: Werkzeug zur mehrstufigen Umformung von Kupferspulen in der Tiefziehpresse des IBF.

Das Konzept der mehrstufigen Umformung wird, basierend auf einer weiteren Versuchsmatrix, mit einem ähnlich zu dem in Bild 6 zu sehenden Werkzeug praktisch erprobt. Dabei stehen vor allem folgende Fragestellungen im Mittelpunkt:

- Mit welcher Maßhaltigkeit lässt sich die Spule herstellen?
- Welche Fehlerbilder treten an der hergestellten Spule auf?
- Wie ist das Handling des Werkzeuges?

Die praktische Erprobung zeigt, dass die Maßhaltigkeit der umgeformten Spule, insbesondere wegen des in Bild 7 zu sehenden Fehlerbildes, noch nicht optimal ist. Dieses Fehlerbild lässt sich gegebenenfalls durch eine Optimierung des Spulenrohlings vermeiden. Mögliche Einflussfaktoren auf das Fehlerbild werden zurzeit simulativ untersucht. Das Handling des Werkzeuges ist hingegen gut und bietet, durch die Verwendung von zusätzlichen Schiebersystemen, das Potential zum Einsatz in einer Serienproduktion.



Bild 7: Verjüngung der Drahtbreite in den Eckbereichen der Formspule.

6 Isolierung

Herkömmliche Kupferlackdrähte werden in einem kontinuierlichen Prozess beschichtet. Dabei durchläuft der Draht nacheinander verschiedenen Stationen, in denen wechselnd Isoliermaterial aufgebracht und in Öfen ausgehärtet wird. Solch ein Prozess ist für bereits umgeformte Spulen nicht möglich. Aus diesem Grund werden zwei Verfahren untersucht, mit welchen die Isolierung realisiert werden soll: Das Umformen eines bereits beschichteten Kupferlackdrahtes und das nachträgliche Aufbringen der Isolierschicht.

Zur Bewertung des Verfahrens, bei dem zunächst beschichtet und nachfolgend umgeformt wird, werden L-förmige Prüfkörper gefertigt (Bild 8 (rechts)). Diese umformtechnisch hergestellten Drahtsegmente werden aus Kupferlackdraht mit einem Durchmesser von 5 mm gefertigt. Nach der Herstellung findet eine optische Bewertung statt. Anschließend wird die TE-Einsetzspannung gemessen. Diese sind in Bild 8 (links) in Abhängigkeit von der Endhöhe der umgeformten Proben dargestellt. Für jede Endhöhe werden dabei 20 Proben betrachtet. Es ist zu erkennen, dass die Teilentladungseinsetzspannungen für die weiter umgeformten Proben (mit einer Endhöhe von 2 mm) deutlich verringert sind. Außerdem weisen 13 der 40 L-Stücke, die zur Fertigung der Proben verwendet werden Risse im Isolierlack auf.

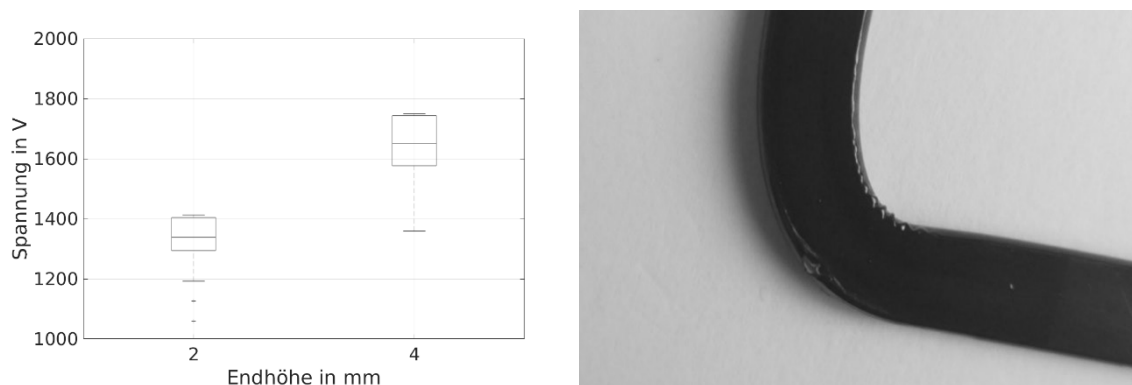


Bild 8: Gemessene TE-Einsetzspannungen in Abhängigkeit der Endhöhe der Proben (links), umgeformte Probe mit aufgeplatzttem Lack (rechts).

Während die thermischen Eigenschaften sowie die Lackschichtdicken bei herkömmlichen Kupferlackdrähten durch Normung definiert sind [5,6], ist dies bei Materialien, die im Nachhinein auf die Spule aufgebracht werden nicht der Fall. Darum müssen neben der TE-Einsetzspannung auch Temperaturbeständigkeit und Isolierschichtdicken untersucht werden.

Zu diesem Zweck wird die TE-Einsetzspannung von lackbeschichteten Kupferleitern in drei Zuständen untersucht (Bild 9): Im nicht gealterten Zustand (Messreihe 1), nach einer Alterung bei 180 °C (Messreihe 2) und nach einer Alterung bei 190 °C (Messreihe 3).

Zudem ergibt eine Schichtdickenmessung der Isolierung Schichtdicken zwischen 145 µm und 453 µm.

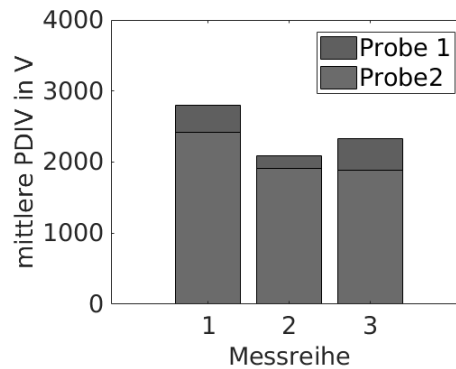


Bild 9: Mittlere PDIV von jeweils vier Proben nach verschiedenen Alterungszyklen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Eine simulative Betrachtung eines Erprobungsträgers zeigt bis zu Drehzahlen von 1200 min^{-1} höhere Wirkungsgrade als eine magnetisch identische Maschine mit Runddrahtwicklungen.

Die praktische Erprobung der vier entwickelten Umformkonzepte zeigt, dass das Konzept der mehrstufigen Umformung das einfachste Prozesshandling in Kombination mit einer guten Maßhaltigkeit der umgeformten Spulen bietet. Die einzelnen Umformkonzepte wurden detailliert beschrieben.

Die Isolierung der umgeformten Spulen muss nach dem Umformprozess aufgebracht werden. Erste Untersuchungen eines solchen Isolierstoffsystems motivieren ausführliche Lebensdauertests an Motoretten.

Zur Validierung sollen ein Erprobungsträger und eine Referenzmaschine aufgebaut im Prüfstand miteinander verglichen werden.

8 Danksagung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse entstehen im Rahmen des Verbundvorhabens „FlexiCoil“ (Förderkennzeichen: 02P16A012). Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Serienflexible Technologien für elektrische Antriebe von Fahrzeugen 2 (E-Antriebe 2)“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Die Auslegung der Erprobungsträger, sowie die Beschaffung und Schichtdickenuntersuchungen der Isoliermaterialien wurden von der *Schaeffler Technologies AG & Co. KG* durchgeführt und zur Verfügung gestellt.

Werkzeugauslegung und -erprobung finden in Zusammenarbeit mit der *Breuckmann GmbH & Co. KG* statt.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

9 Literatur

- [1] T. Finken, „Fahrzyklusgerechte Auslegung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge“, Dissertation RWTH Aachen, 2011.
- [2] D. Jaksic, “Getting rid of the air, or how to maximize winding fill factor”, 1st International Electric Drives Production Conference, Nuremberg, pp. 84-87, 2011.
- [3] Fraunhofer IFAM, „Aluminium statt Kupfer – Gegossene Aluminiumspulen senken Kosten und Gewicht“, Galvanotechnik 2/2014, Eugen G. Leuze Verlag, 2014.
- [4] K. Hameyer, A. Ruf and F. Pauli, “Influence of fast switching semiconductors on the winding insulation system of electrical machines”, International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia), Niigata, pp. 740-745, 2018.
- [5] DIN EN 60034-18-41, „Drehende elektrische Maschinen Teil 18-41: Qualifizierung für teilentladungsfreie elektrische Isoliersysteme (Typ I) in drehenden elektrischen Maschinen, die von Spannungsumrichtern gespeist werden“, November 2014.
- [6] DIN EN 60034-18-21, „Drehende elektrische Maschinen Teil 18-21: Funktionelle Bewertung von Isoliersystemen Prüfverfahren für Runddrahtwicklungen, Thermische Bewertung und Klassifizierung“, Juli 2013.
- [7] DIN EN 60172, „Prüfverfahren zur Bestimmung des Temperaturindex von Lackdrähten und bandumwickelten Drähten“, Februar 2016.
- [8] P. Stenzel, P. Dollinger, J. Richnow and J. Franke, “Innovative needle winding method using curved wire guide in order to significantly increase the copper fill factor”, 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou, pp. 3047-3053, 2014.