

elektrische Radnabenmotor, der direkt in der Felge des Fahrzeugs verbaut wird, ist für die Auslegung zukünftiger Elektrofahrzeuge ein interessantes Antriebskonzept. Allerdings wird das maximal zur Verfügung stehende Drehmoment des Radnabenmotors durch die Felgengröße limitiert. Formspulen mit konischer Kontur haben das Potenzial, den zur Verfügung stehenden Bauraum optimal auszunutzen. Zur Herstellung dieser konisch geformten Spulenkantur müssen neue Fertigungsverfahren für eine effiziente Massenproduktion entwickelt werden.

Effiziente Elektrobleche durch Kaltwalzen und Wärmebehandlung

Das Elektroblech ist ein weichmagnetisches Material, das üblicherweise in rotierenden Maschinen und Transformatoren verwendet wird, da es einfach magnetisiert und entmagnetisiert werden kann. Das in rotierenden Maschinen verwendete Elektroblech, das

auch als nicht kornorientiertes Elektroblech bezeichnet wird, weist in der Regel einen Siliziumgehalt von 2 bis 3,5 Gew.-% und eine Dicke von etwa 0,5 mm auf. Heute werden für die Bleche höhere Siliziumgehalte und geringere Blechdicken angestrebt. Die Herstellungsroutine beinhaltet das Warmwalzen, das Kaltwalzen und die Wärmebehandlung, siehe Bild 1. Danach wird das Elektroblech auf eine bestimmte Form geschnitten und paketierte, um anschließend einen Teil des Stators und des Rotors im Elektromotor zu bilden. Die magnetischen Eigenschaften des Elektroblechs werden stark von der Mikrostruktur des Materials beeinflusst. Um dies zu verstehen, muss der atomare Aufbau von Metallen betrachtet werden: Ein Metall besteht aus einer gewissen Anzahl von Kristallen, die unterschiedlich zueinander orientiert sind. Wenn ein magnetisches Feld durch dieses Metall fließt, werden einige Kristalle leichter und andere aufgrund

ihrer Orientierung schwieriger magnetisiert, siehe Bild 2. Die Verteilung dieser Orientierungen beziehungsweise ihre Textur⁴ kann durch die Prozessschritte des Kaltwalzens (Verformung und Rotation von Kristallen) und der Wärmebehandlung (Rekristallisation, Keimbildung und Kristallwachstum) verändert werden. Daher bemüht man sich, die gesamte Prozesskette zu kontrollieren, um die „gute“ Textur des Elektroblechs zu erhalten. Eine von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte interdisziplinäre Forschergruppe FOR1897 „Verlustarme Elektrobleche für energieeffiziente Antriebe“ konzentriert sich auf die gesamte Prozesskette und betrachtet die Wechselwirkungen zwischen den Schritten. Im Rahmen eines Teilprojektes erhält das Institut für Bildsamen Formgebung warmgewalzte Bleche vom Institut für Metallformung in Freiberg und untersucht daraufhin den Einfluss verschiedener Kaltwalzstrategien auf die Textur. Um die industrielle Prozessket-

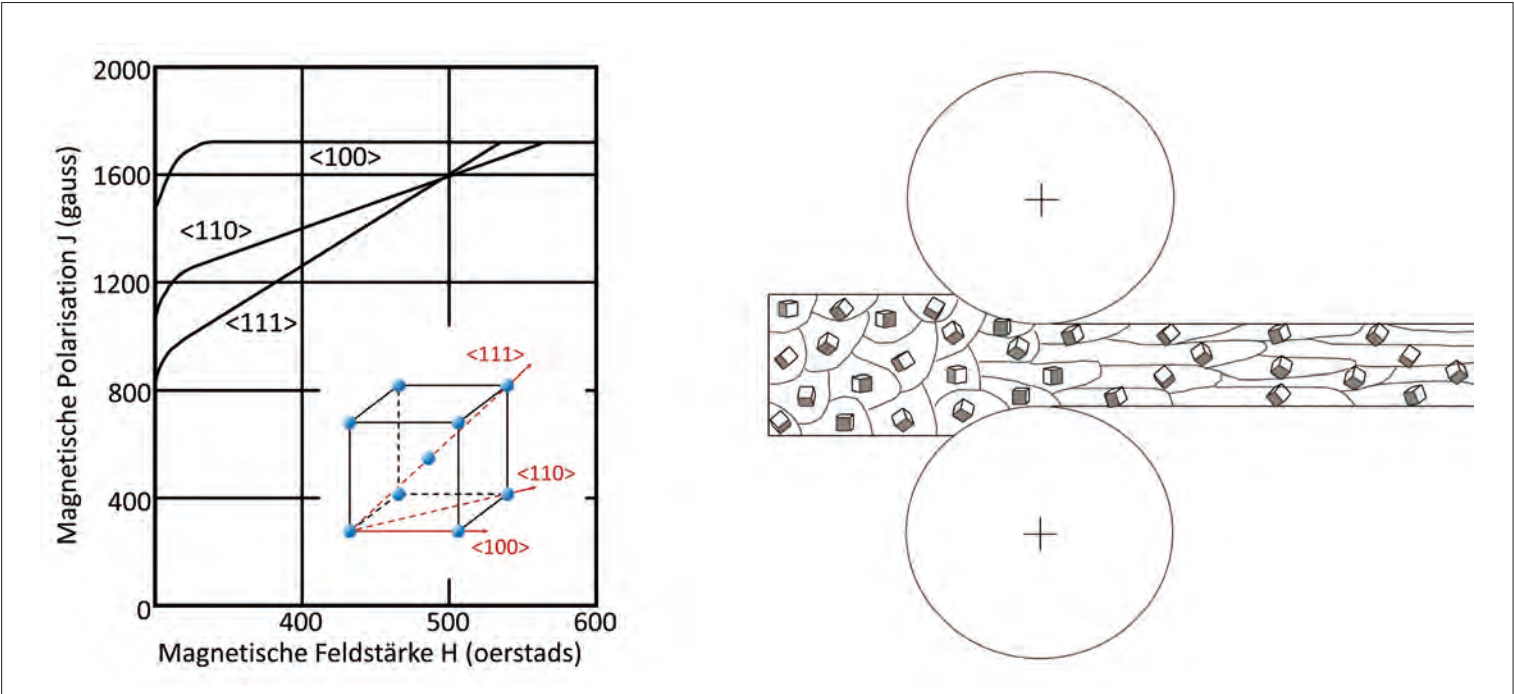


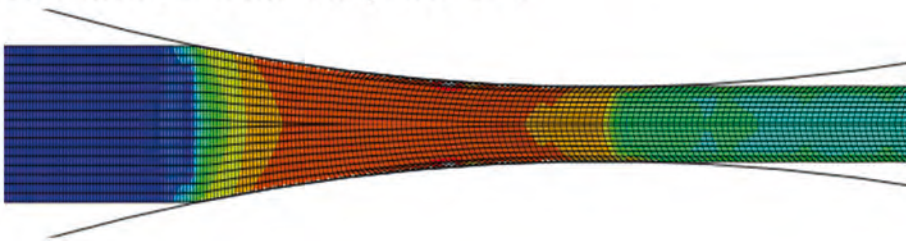
Bild 2: Magnetisierungskurven entlang verschiedener Richtungen eines Alpha-Eisen-Einkristalls (links); schematische Darstellung einer Orientierungsänderung beim Kaltwalzen (rechts).

¹Ortsfester Teil einer elektrischen Maschine
²Beweglicher/rotierender Teil einer elektrischen Maschine
³Durchlässigkeit von Materie für magnetische Felder (vom Lateinischen „permeare“)
⁴Die Präsenz und die Gesamtheit der Orientierungen der Kristallite eines vielkristallinen Festkörpers in der Kristallografie

Kaltwalzprozess



Simulation des Kaltwalzprozesses



Simulation der Texturentwicklung

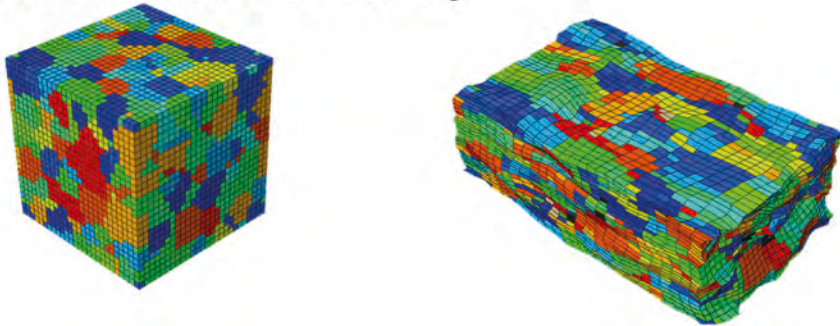


Bild 3: Prozesssimulation des Kaltwalzens und mikroskopische Simulation der Verformungsmikrostruktur in einem „Representative Volume Element“ (RVE).

te vollständig abzubilden, werden die Bleche anschließend in Zusammenarbeit mit dem Institut für Metallkunde und Metallphysik der RWTH wärmebehandelt. Der finale Fertigungsschritt, das Scherschneiden, findet am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) der TU München statt. Um die Eigenschaften des Blechs abschließend zu bewerten, nimmt das RWTH-Institut für Elektrische Maschinen (IEM) eine Charakterisierung der magnetischen Eigenschaften vor. Bei dem am Institut für Bildsamen Formgebung (IBF) durchgeführten Kaltwalzen hängt die sich einstellende Textur vor allem davon ab, in wie vielen Schritten die Dicke reduziert wird und bei welcher Temperatur das passiert. Normalerweise wird symmetrisch gewalzt, das heißt die obere und untere Walze drehen sich gleich schnell. Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass dies

zu einer ungünstigen Textur führen kann. Deshalb wird am IBF als Lösungsansatz auch das asymmetrische Walzen geprüft, bei dem eine Walze schneller dreht als die andere. Dies führt zu einer sogenannten Scherung im Werkstück, die eine Rotation der Kristalle bewirkt, sodass sich eine andere Textur einstellt. Dabei ist es völlig unmöglich, jeden Kristall im großen Walzblock einzeln zu simulieren. Also verwendet man ein Multiskalenmodell, bestehend aus einer makroskopischen und einer mikroskopischen Betrachtungsweise, siehe Bild 3. Ziel ist, die Texturentwicklung während des Kaltwalzens im Detail zu verstehen und die kaltgewalzte Textur vorherzusagen. Das makroskopische Modell betrachtet den gesamten Walzprozess und dient dazu, die Temperaturverteilung und die Verteilung der Spannungen und Dehnungen aller Materialpunkte unter der Annahme zu ermitteln, dass der Werkstoff völlig homogen ist. Anschließend werden diese Dehnungen extrahiert und ihr zeitlicher Verlauf als Randbedingung auf ein Mikromodell angewendet, welches das Verhalten der einzelnen Kristalle untersucht.

Die aktuellen Simulationsergebnisse zeigen, dass sich die Textur durch asymmetrisches Walzen sehr stark ändert. Asymmetrisches Walzen könnte ermöglichen, eine Textur für positive magnetische Eigenschaften einzustellen. Die experimentellen Walzversuche laufen zurzeit am Institut für Bildsamen Formgebung. Der Einfluss der sich einstellenden Textur auf die magnetischen Eigenschaften wird in zukünftigen Arbeitsschritten geprüft.

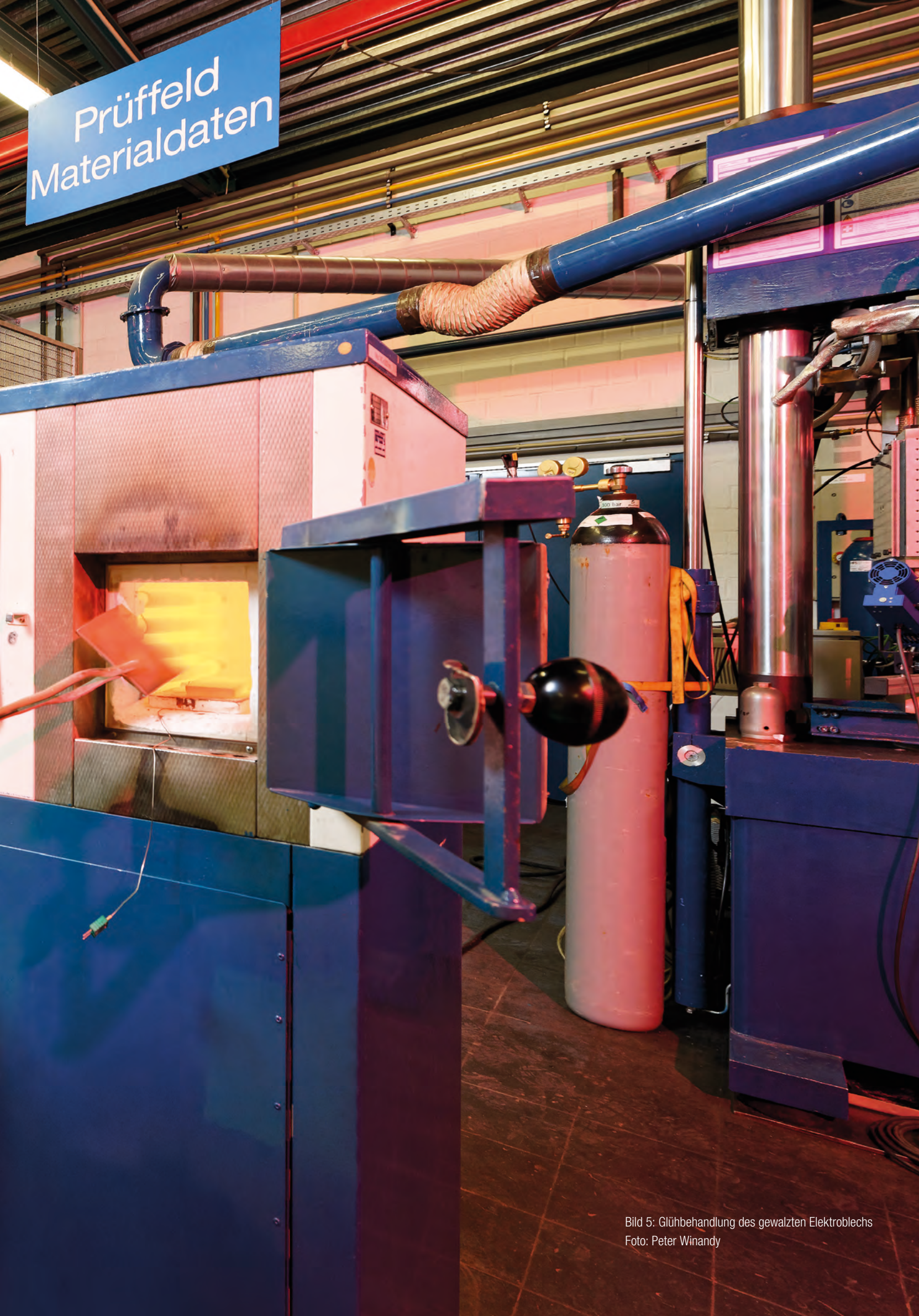
Erhöhung des Nutzfüllfaktors durch Formspulen

Durch die direkte Kopplung des Radnabenmotors mit der Felge des Fahrzeugs und dem damit verbundenen Wegfall des klassischen Antriebstrangs können mechanische Verluste und Gewicht reduziert werden. Darüber hinaus bietet der Radnabenmotor die Vorteile einer unterschiedlichen Drehzahl- und Drehrichtungsregelung der Räder und einer besseren Manövrierbarkeit. Durch den Wegfall des zentralen Motorraums entsteht zudem die Möglichkeit, neue Raumkonzepte der Fahrzeugplattform zu realisieren. Um das maximal zur Verfügung stehende Drehmoment des Radnabenmotors zu erhöhen, können die Felgen vergrößert oder der Anteil des elektrisch leitfähigen Kupfers in den Nuten des Stators erhöht werden. Da eine Vergrößerung der Felgen nur begrenzt möglich ist und die Fahrdynamik



Bild 4: Umformtechnische Herstellung von Formspulen am Institut für Bildsamen Formgebung (IBF)
Foto: Peter Winandy





Prüffeld
Materialdaten

Bild 5: Glühbehandlung des gewalzten Elektroblechs
Foto: Peter Winandy

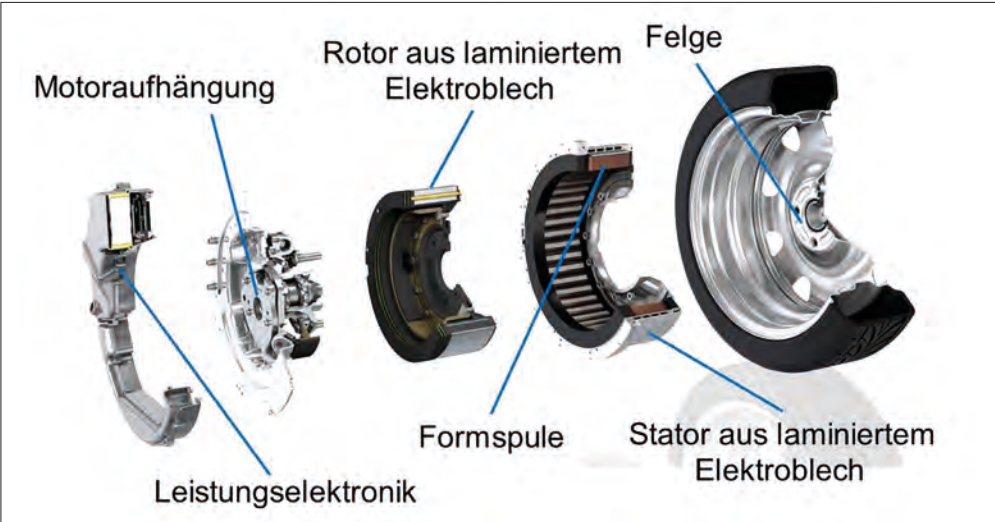


Bild 6: Explosionsdarstellung eines Radnabenmotors der Schaeffler AG

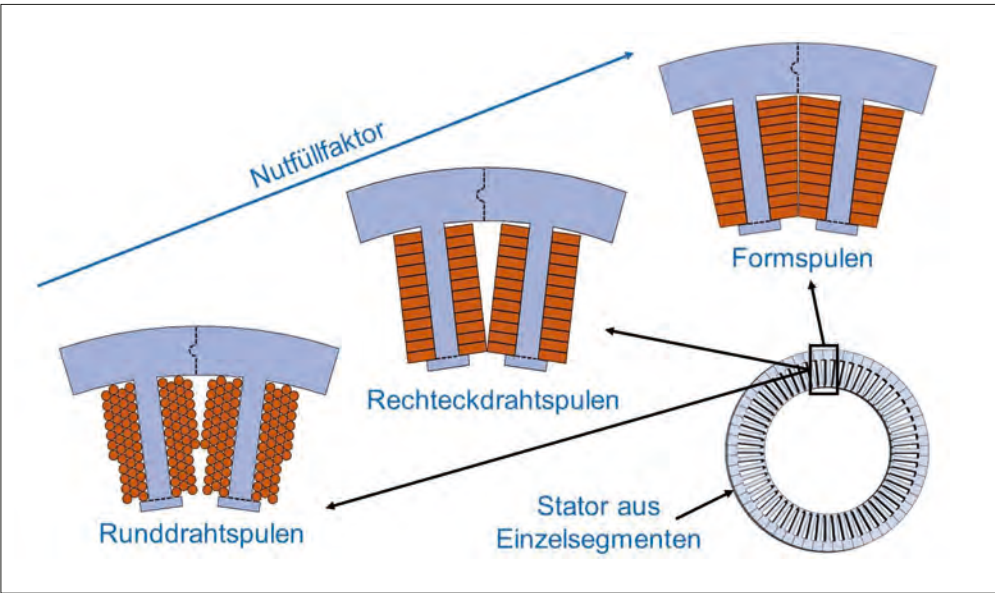


Bild 7: Ausnutzung des Spulenbauraums in den Nuten des Stators durch unterschiedliche Drahtquerschnitte der Spulen.

deutlich beeinflusst, ist eine Maximierung des elektrisch leitfähigen Kupfers in der Statornut⁵ wünschenswert. Das Verhältnis der Querschnittsfläche des elektrisch leitfähigen Materials zu der Querschnittsfläche der Statornut wird als Nutfüllfaktor bezeichnet. Bei herkömmlichen Spulen aus Runddraht wird die optimale Ausnutzung des Spulenbauraums durch die dichteste Kreispackung im Raum begrenzt. Auch Spulen mit rechteckigem Drahtquerschnitt und konstantem Breite-zu-Höhe-Verhältnis des Drahtes können wegen des kreisförmigen Umfangs des Stators die Statornut nicht optimal ausfüllen. Dies wäre erst mit neuartigen Formspulen möglich, deren Breite-zu-Höhe-Verhältnis des Drahtes sich aufgrund ihrer konischen Kontur entlang der Spulenhöhe ändern müsste. Die Herausforderung an den Herstellungsprozess solcher Formspulen ist, ein veränderliches Breite-zu-Höhe-Verhältnis des Drahtes bei konstant bleibender Drahtquerschnittsfläche einzustellen. Eine solche Fläche ist notwendig, um einen über die Länge der Spule gleichbleibenden elektrischen Widerstand zu gewährleisten und damit die Gefahr von lokalen Hotspots während des Betriebs zu reduzieren.

In einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt, initiiert vom Institut für Elektrische Maschinen, werden in Zusammenarbeit des Instituts für Bildsame Formgebung und der Firma Breuckmann GmbH zwei Konzepte zur umformtechnischen Herstellung von Formspulen entwickelt: Zum einen ein mehrstufiger Gesenkschmiedeprozess⁶, bei dem sich die Form des Gesenks⁷ ausgehend von der Geometrie

⁵Zur Verfügung stehender Bauraum zwischen zwei Statoreinzelzahnsegmenten
⁶Fertigungsverfahren: Pressen eines Werkstücks/Bauteils in einem offenen oder geschlossenen Gesenk
⁷Hohlform zum Pressen von Werkstücken

WE WANT YOU!

STARTEN SIE IHRE KARRIERE BEI SAURER.

eines vorgebogenen Spulenrohlings schrittweise an die Endgeometrie der Formspulen anpasst. Zum anderen entsteht ein Schmiedeprozess mit einer 3D-gedruckten Gegenspule aus Maraging-Stahl als zusätzliches Werkzeug. Vor der Umformung wird ein vorgebogener Spulenrohling in die Gegenspule eingedreht, sodass die Windungen des Spulenrohlings während der Umformung durch die Gegenspule voneinander getrennt sind und nicht gegeneinander verrutschen können. Nach der Umformung muss die Formspule durch Herausdrehen aus der Gegenspule entnommen werden. Mit beiden Prozessen entstehen Prototypen von Formspulen, die anschließend in einen Demonstratormotor eingebaut und mit einem Referenzmotor mit Runddrahtspulen und gleichem Magnetkreis verglichen werden.

Zukünftige Elektrofahrzeuge müssen hohen Effizienzanforderungen genügen. Die Umformtechnik ist dabei ein wichtiger Partner für die Elektrotechnik. Durch eine geeignete Auslegung der Prozesskette von Elektrolechen können die magnetischen Eigenschaften verbessert und somit die Eisenverluste verringert werden. Auch die Optimierung der Spulengeometrie spielt für die Effizienzsteigerung eine entscheidende Rolle. Durch die Berücksichtigung beider Motorkomponenten, Elektrolech und Spule, kann je nach Anwendungsfall die Reichweite von Elektrofahrzeugen erhöht oder der benötigte Bauraum der Batterien reduziert werden.



Wir suchen Berufseinsteiger als:

- **Entwicklungsingenieur (m/w)**
Mechanik/Elektrik/Software
- **Textiltechnologe (m/w)**
Anwendung/Grundlagen
- **Informatiker (m/w)**

Und für die Bereiche:

- **Product Management**
- **Sales**
- **Einkauf**



saurer.com

Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt ist Inhaber des Lehrstuhls und Leiter des Instituts für Bildsame Formgebung.

Stephan Hojda, M. Sc., Daniel Petrell, M. Sc., und Xuefei Wei sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Bildsame Formgebung.