

- 1 Gegossene Kupferspule für einen Radnabenantrieb.
- 2 Querschnitt gegossener Spulen (links) im Vergleich mit gewickelten Spulen (rechts).
- 3 Temperaturverteilung in einer gegossenen Spule bei 18 A/mm^2 Stromdichte analog zu 12 A/mm^2 bei konventioneller Wicklung.

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM

Formgebung und Funktionswerkstoffe

Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Busse
Wiener Straße 12
28359 Bremen

Kontakt

Dipl.-Wi.-Ing. Christoph Pille
Dipl.-Ing. Franz-Josef Wöstmann

Telefon +49 421 2246-227
Telefax +49 421 2246-300
casting@ifam.fraunhofer.de

www.ifam.fraunhofer.de

GIESSTECHNISCHE HERGESTELLTE SPULEN

An Wicklungen elektrischer Maschinen werden vielfältige Anforderungen gestellt. Einerseits soll durch einen hohen Nutzfaktor eine möglichst gute Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Bauraums erzielt werden. Andererseits muss eine möglichst gute Kühlung der Leiter gewährleistet sein und die Entstehung von Zusatzverlusten durch Stromverdrängung sollte vermieden werden. Übergreifend besteht der Wunsch nach kostengünstiger und automatisierbarer Fertigung und Montage der Spulen.

Vom Fraunhofer IFAM wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem eine gießtechnische Fertigung von Spulen für elektrische Maschinen ermöglicht wird. Die mit diesem Verfahren herstellbaren Spulengeometrien mit flacher Leiteranordnung (Abb. 1) bieten in allen genannten Aspekten entscheidende Vorteile gegenüber konventionell hergestellten Wicklungen.

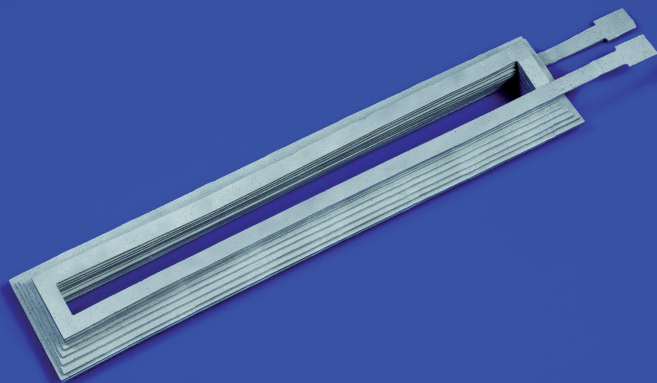
Füllfaktoren bis zu 90 Prozent

Die geometrischen Freiheitsgrade bei der gießtechnischen Herstellung ermöglichen die spezifische Anpassung des Leiterquerschnitts an den zur Verfügung stehenden Bauraum. Durch die vollständige Ausnutzung des Nutzfaktors elektrischer Maschinen können Füllfaktoren bis zu 90 Prozent realisiert werden (Abb. 2). Zusätzlich entfallen die bei Drähten notwendigen Biegeradien am Wickelkopf wodurch die Leiterlänge und der axiale Bauraumbedarf sinken. Gegenüber einer gewickelten Spule im gleichen Bauraum sinkt der elektrische Widerstand dadurch um bis zu 50 Prozent.

Ideale thermische und elektromagnetische Eigenschaften

Neben dem hohen Füllfaktor bietet die flache Leiteranordnung aus elektromagnetischer und thermischer Sicht weitere

4



Vorteile. Gegenüber einem gewickelten Draht mit gleicher Querschnittsfläche wird sowohl das thermische Verhalten signifikant verbessert, als auch der negative Einfluss der Stromverdrängung minimiert. Abhängig von der Spulengröße können so Dauerstromdichten zwischen 18 und 24 A/mm² realisiert werden (Abb. 3). Die Stromdichte in der Nut kann hierdurch gegenüber konventionell hergestellten Spulen verdreifacht werden.

Vielfältige Anwendungspotenziale

Die Kombination aus hohem Füllfaktor, exzellentem thermischen Verhalten und geringen Stromverdrängungsverlusten kann in der Maschinenauslegung auf vielfältige Weise genutzt werden. So können die Drehmoment- und Leistungsdichte sowie der Wirkungsgrad bei verringertem Materialeinsatz erheblich gesteigert werden. Die Erhöhung des Nutfüllfaktors ermöglicht zudem die Verwendung von Aluminium als Leiterwerkstoff (Abb. 4), wobei der elektrische Leitfähigkeitsnachteil ausgeglichen wird.

Weitere Anwendungspotenziale können erschlossen werden, wenn die geometrischen Gestaltungsfreiheiten für die Entwicklung innovativer Kühlkonzepte genutzt werden. So kann durch eine gezielte Erhöhung des Leiterquerschnitts in thermisch hoch belasteten Bereichen (z. B. am Wickelkopf) die Bildung thermischer Hotspots vermieden werden oder axiale Kühlkanäle in die Leiter eingebracht werden, um eine optimale Kühlwirkung bei großer Austauschfläche zu erzielen.

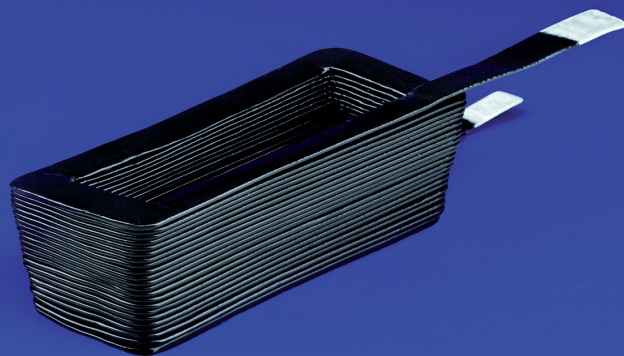
Flexible Fertigung mit unterschiedlichen Gießverfahren

Am Fraunhofer IFAM stehen unterschiedliche Gießverfahren zur Fertigung der Spulen zur Verfügung, mit denen Spulen in verschiedenen Größen und Stückzahlen gefertigt werden können. Im Feinguss lassen sich geringe Leiterhöhen (>0,7 mm) bei Spulenlängen bis zu 200 mm realisieren, während im Lost Foam-Verfahren gefertigte Spulen Kantenlängen bis zu einem Meter aufweisen können. Für große Stückzahlen führt die Fertigung der Spulen in Dauerformen zu geringsten Stückkosten. Zur Realisierung von Prototypen steht eine Feinguss-Prozesskette zur Verfügung, die in kurzer Zeit die Realisierung einer Spulengeometrie in Hardware ermöglicht.

Maßgeschneiderte Isolationsbeschichtung

Für die Isolationsbeschichtung stehen verschiedene Technologien zur Verfügung, mit denen maßgeschneiderte Lösungen zur Erfüllung der elektrischen und thermischen Kundenanforderungen entwickelt werden können. Die Optimierungsziele bestehen hierbei in der Gewährleistung der Isolationsfestigkeit, der Minimierung der Schichtdicke, sowie der Erhöhung der Temperaturfestigkeit und Alterungsbeständigkeit. Die in Abb. 5 dargestellte Aluminiumspule wurde z. B. mit einem epoxidbasierten Pulverlacksystem beschichtet. Für die Charakterisierung der Schichten hinsichtlich

5



Isolationsfestigkeit, Schichtdicke und Temperaturbeständigkeit stehen umfangreiche Analyseverfahren zur Verfügung.

Zusammenfassung

Die gießtechnische Herstellung von Spulen ermöglicht eine erhebliche Verbesserung der Leistungsdichte von elektrischen Maschinen bei gleichzeitiger Reduzierung der Produktionskosten. Durch Ausnutzung der Verfahrensvorteile lässt sich eine veränderliche Querschnittsgeometrie bei konstanter Querschnittsfläche realisieren, die Nutfüllfaktoren bis zu 90 Prozent erlaubt.

Unser Angebot

- Elektromagnetische Simulation und konstruktive Gestaltung der Spulengeometrie
- Fertigung und Beschichtung von Prototypenserien
- Grundlegende Verfahrensentwicklung für gießtechnisch hergestellte Spulen
- Entwicklung, Aufbau und Prüfung elektrischer Maschinen mit gegossenen Spulen
- Durchführung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen
- Beratung zum Aufbau von Pilotserien

4 *Gegossene Aluminiumspule.*

5 *Pulverbeschichtete Aluminiumspule.*