



Design und Fertigung von maßgeschneiderten Multimaterial-Komponenten für zukünftige elektrische Maschinen am InnovationsCampus Mobilität der Zukunft (ICM)

Im Rahmen des ICM forschen verschiedene Institute Baden-Württembergs gemeinsam an elektrischen Maschinen (EM) von Morgen. Im Projekt „FutureM“ arbeiten das Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) und das Institut für elektrische Energiewandlung (iew) der Universität Stuttgart, das Institut für Produktentwicklung (IPEK) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), sowie das LaserApplikationsZentrum (LAZ) und das Institut für Materialforschung (IMFAA) der Hochschule Aalen in einem interdisziplinären Team zusammen, um mit Hilfe der Lasertechnik neuartige Maschinentopologien zu ermöglichen.

Effiziente Elektromotoren (EM) sind Schlüsselkomponenten der Energiewende, insbesondere in der Elektromobilität. Die additive Fertigung von EM-Komponenten bietet neue Gestaltungsmöglichkeiten für innovative Motortechnologien, die konventionell nicht oder nur mit großem Aufwand herstellbar sind. Dies ermöglicht Optimierungspotential bei Wirkungsgrad, Größe, Leistung und Drehmoment sowie die Realisierung neuartiger Architekturen und Designs.

Das ICM-Projekt „FutureM“ erforscht neue Gestaltungsmöglichkeiten von EM, die mittels additiver und subtraktiver Fertigungsverfahren durch die gleichzeitige Verarbeitung unterschiedlicher Materialien erreicht werden können. Die Vision ist eine umfassende Gestaltungsfreiheit aller aktiven Materialien,

wie hart- und weichmagnetische, elektrisch leitfähige oder isolierende sowie strukturmechanische Materialien.

Das iew forscht an neuartigen Motortechnologien wie der Transversalflussmaschine (TFM), welche eine hohe Leistungs- und Drehmomentdichte aufweist. Jedoch stellen die dabei resultierenden dreidimensionalen magnetischen Flüsse eine große Herausforderung für die konventionelle Fertigung dar, welche üblicherweise auf Blechstrukturen basiert und eine geringe Gestaltungsfreiheit bietet.

Um Wirbelstromverluste zu minimieren, müssen die magnetischen Flussquerschnitte aufgeteilt werden. Weichmagnetische Verbundwerkstoffe bieten hierbei mehr Gestaltungsfreiheit als Bleche,

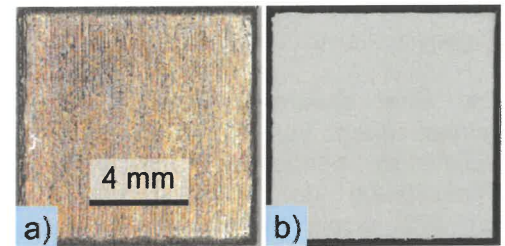


Abbildung 2: Defektfreie Prüfkörper aus FeSi6.5. a) Oberflächengüte, b) Querschliff in xy Ebene.

haben jedoch elektromagnetische und mechanische Nachteile, die simuliert werden können (siehe Abbildung 1a). Die additive Fertigung ermöglicht hierfür eine optimale Geometriegestaltung durch Integration feiner Schlitze zur Reduzierung von Wirbelströmen. Der daraus resultierende Eingriff in die strukturelle Integrität des Motors wird vom IPEK erforscht (siehe Abbildung 1b). Alternative Welle-Nabe-Verbindungen können dabei helfen die Integrität des Motors zu verbessern, was neue Maschinendesigns und die Nutzung des vollen Potentials neuartiger Motortechnologien ermöglicht.

Der Einsatz weichmagnetischer Legierungen, wie etwa FeSi6.5, bietet elektromagnetische Vorteile, ist jedoch aufgrund der Sprödigkeit und Rissanfälligkeit schwer zu verarbeiten. Am LAZ wurde deshalb eine modulare Pulverbetteneinheit entwickelt, deren Bauplattform auf bis zu 500°C temperiert werden kann. Erste Untersuchungen zeigen, dass bereits bei Temperaturen über 350°C rissfreie Prüfkörper mit ei-

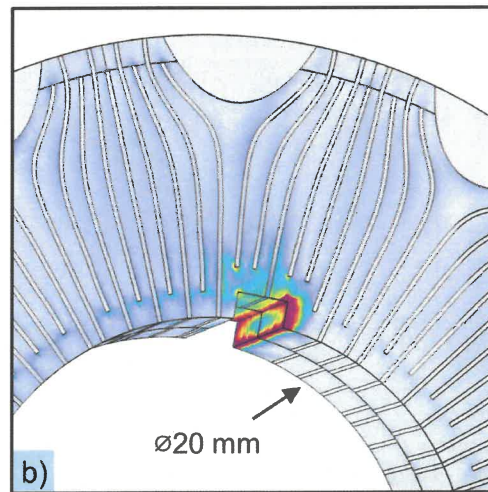
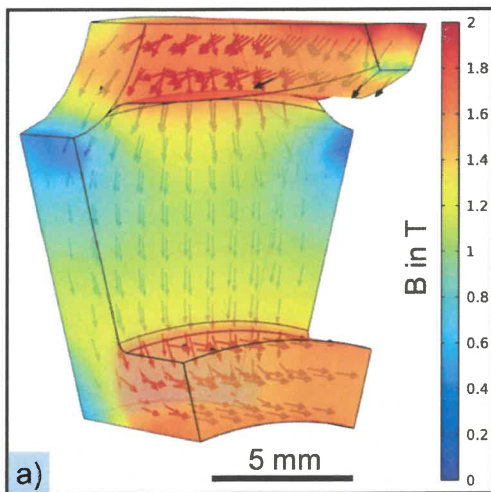


Abbildung 1: a) Simulierte räumliche Verteilung der magnetischen Flussdichte pro Volumeneinheit am Beispiel eines nicht geschlitzten Polzahns. b) Simulierte Spannungskonzentration im Bereich der Passfedernut eines geschlitzten Stators.

ner Bauteildichte von 99,99% gefertigt werden können (siehe Abbildung 2).

Die Verlustreduktion additiv gefertigter Statorhalbschalen einer TFM wurde vom IMFAA demonstriert. Hierfür wurden die Simulationsergebnisse vom iew mit Prozessparametern und Materialeigenschaften des PBF-LB/M-Prozesses abgestimmt, wodurch geschlitzte Demonstratoren aus Reineisen hergestellt wurden (siehe Abbildung 3a). Gezielt eingestellte Prozessparameter ermöglichen die Herstellung vollständig trennender, als auch überwiegend trennender Schlitze, um den Einfluss von Kurzschlüssen auf die elektromagnetischen Eigenschaften zu untersuchen.

Bei einer elektromagnetischen Anregungsfrequenz von 500 Hz konnten die vollständig trennenden Schlitze eine Reduzierung der Wirbelstromverluste um 57% erreichen, während überwiegend trennende Schlitze aufgrund von Kurzschlüssen nur eine Reduktion von 15% erzielten [1]. Die normalisierten Eisenverluste der unterschiedlichen TFM Statoren sind in Abbildung 3b dargestellt.

Die Leistungsfähigkeit der zuvor gezeigten TFM-Statoren ist allerdings immer noch begrenzt, da die realisierbaren Schlitzbreiten mit dem konventionellen PBF-LB/M-Verfahren auf 250 μm be-



Abbildung 3:

a) Additiv gefertigte Statorhalbschalen aus Reineisen, (oben) ohne Schlitze, (links) mit überwiegender Trennung und (rechts) mit vollständiger Trennung.
b) Normalisierte Eisenverluste der TFM Statoren aus Reineisen bei 0,1 T Peak-polarisation. Der Referenzwert (=1) bezieht sich auf die Eisenverluste der ungeschlitzten Komponente im Bauzustand bei 100 Hz. Bauteile im Bauzustand.

grenzt sind [1]. Um diese Grenze zu überwinden, hat das IFSW einen neuartigen Laserprozess entwickelt, welcher zwei Lasermaterialbearbeitungsprozesse kombiniert. Durch die Integration eines Ultrakurzpulslasers wird der rein additive Prozess um einen schichtweisen subtraktiven Ablationsprozess erweitert, wodurch Schlitzbreiten von $< 50 \mu\text{m}$ erreicht werden können.

Diese Prozesskombination kann auch zur Veredelung der Oberflächen additiver Bauteile genutzt werden. Abbildung 4 zeigt die Kante eines additiven Bauteils aus reinem Eisen. Mithilfe ultrakurzer Pulse kann die raue Oberfläche der Außenkontur auf wenige Mikrometer genau abgeschnitten werden, wodurch Oberflächenrauigkeiten von $S_a < 1 \mu\text{m}$ erreicht werden können. Dies ist ein wichtiger Schritt zur Endkontur-Fertigung von Bauteilen aus dem Pulverbett.

Das ICM-Projekt „FutureM“ trägt durch Grundlagenforschung auf dem Gebiet neuartiger Fertigungsprozesse in der Lasermaterialbearbeitung zur Entwicklung der nächsten Generation elektrischer Maschinen bei. Die erfolgreiche Kooperation zwischen Instituten aus Stuttgart, Karlsruhe und Aalen, veranschaulicht die hervorragende Integration des InnovationsCampus Mobilität der Zukunft in die Forschungslandschaft von Baden-Württemberg.

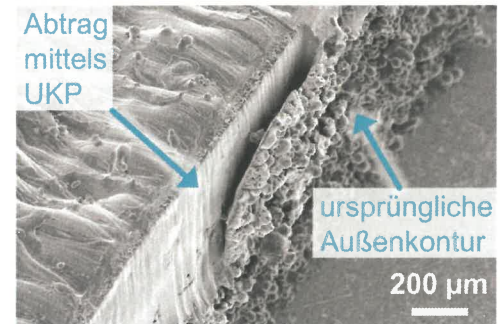
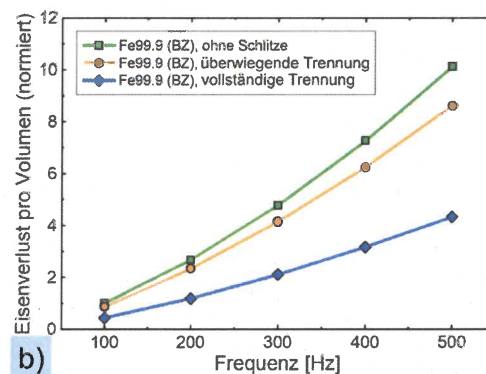


Abbildung 4: REM-Aufnahme eines additiv hergestellten Bauteils mit Kantenbearbeitung durch ultrakurze Pulse.

Danksagung:

Die Autoren danken dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg (MWK) für die Förderung im Rahmen des InnovationsCampus Mobilität der Zukunft.

Quelle:

[1] Kresse, T.; Schurr, J.; Lanz, M.; Kunert, T.; Schmid, M.; Parspour, N.; Schneider, G.; Goll, D. Additively Manufactured Transverse Flux Machine Components with Integrated Slits for Loss Reduction. *Metals* 2022, 12, 1875. <https://doi.org/10.3390/met12111875>

AUTOREN:

Manuel Henn
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW),
Universität Stuttgart
manuel.henn@ifsw.uni-stuttgart.de
www.ifsw.uni-stuttgart.de

Julian Schurr
Institut für Materialforschung (IMFAA),
Hochschule Aalen
julian.schurr@hs-aalen.de
www.hs-aalen.de/imfaa

Markus Hofele
LaserApplikationsZentrum (LAZ),
Hochschule Aalen
markus.hofele@hs-aalen.de
www.hs-aalen.de/laz

Martin Schmid
Institut für Elektrische Energiewandlung (iew),
Universität Stuttgart
martin.schmid@iew.uni-stuttgart.de
www.iew.uni-stuttgart.de

Simon Knecht
Institut für Produktentwicklung (IPEK),
Karlsruher Institut für Technologie
simon.knecht@kit.edu
www.ipek.kit.edu