
Herstellung elektrischer Motoren mittels 3D-Multimaterialdruck

Johannes Rudolph ¹, Fabian Lorenz ², Ralf Werner ³

¹ johannes.rudolph@etit.tu-chemnitz.de

² fabian.lorenz@etit.tu-chemnitz.de

³ ralf.werner@etit.tu-chemnitz.de

^{1,2,3} Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe,
Technische Universität Chemnitz, Deutschland

DOI: 10.14464/awic.v3i0.275

ABSTRACT

Der Beitrag stellt ein neuartiges additives Fertigungsverfahren für elektrische Maschinen bzw. für Komponenten dieser vor. Das Verfahren wurde entwickelt, um konventionelle polymerbasierte Isolationsstoffe in elektrischen Maschinen, durch keramische Werkstoffe zu ersetzen. Diese weisen bessere thermische Eigenschaften, wie eine höhere thermische Beständigkeit und eine größere Wärmeleitfähigkeit auf. Dadurch ist eine Erhöhung der Leistungsdichte möglich und die Grenze der Einsatztemperatur kann deutlich nach oben verschoben werden. Das Verfahren ermöglicht ebenso eine vollständig freie dreidimensionale Geometriegestaltung, wodurch Maschinentopologien möglich werden, die mit konventionellen Fertigungsverfahren nur mit großem Aufwand bzw. gar nicht realisierbar waren. Zusätzlich lassen sich während des Druckprozesses spezielle Kühlstrukturen herstellen, die zu einer weiteren Steigerung der Leistungsdichte beitragen können. Damit stellt der 3D Multimaterialdruck eine zielorientierte Entwicklung zur Lösung eines vorhandenen Problems dar, wodurch es sich in dieser Hinsicht von den meisten anderen als 3D-Druck bezeichneten Herstellungsverfahren unterscheidet.

Keywords: *3D-Druck, gedruckter Elektromotor, keramische Isolierung, Leistungsdichte, Einsatztemperatur, additive Fertigung*

1 EINLEITUNG

Elektrische Maschinen sind aus der heutigen Welt nicht mehr weg zu denken. In fast allen Geräten des täglichen Lebens kommen sie zum Einsatz. Besonders im industriellen Umfeld macht der weitreichende Einsatz von elektrischen Antrieben moderne und effiziente

Fertigungsprozesse erst möglich. Dabei ist der Herstellungsprozess von Elektromotoren selbst ein hocheffizientes Verfahren, das auf Großserienfertigung hin optimiert wurde. Mit ihm lassen sich Motoren mit Wirkungsgraden über 90% kostengünstig herstellen.

2 GRUNDLAGEN KONVENTIONELLER FERTIGUNGSVERFAHREN

Je nach Maschinentyp und Art der elektrischen Wicklung, lassen sich Elektromotoren aus fertigungstechnischer Sicht in zwei Hauptkomponenten einteilen. Das sogenannte Blechpaket dient der Führung und lokalen Konzentration der magnetischen Flüsse, die durch die elektrische Wicklung hervorgerufen werden.

2.1 BLECHPAKET

Das Blechpaket eines Elektromotors besteht aus dünnen Blechen, die je nach Maschinentyp- und Größe, Dicken von ca.: 0,2 mm bis 1,0 mm aufweisen. Aus diesen wird die zweidimensionale Struktur des Rotors bzw. des Stators ausgeschnitten. In der Großserienproduktion kommen dabei Stanzwerkzeuge und in der Prototypen- und Kleinserienfertigung meist Laserschneidanlagen zum Einsatz. Die Bleche werden in axialer Richtung gestapelt und sind, um den Einfluss von Wirbelströmen zu minimieren gegeneinander elektrisch isoliert. Eine Führung der Magnetflüsse ist, bedingt durch diesen Aufbau, nur in radialer Richtung möglich. Bestimmte Maschinenkonzepte, z.B. die Transversalflossmaschine, lassen sich so nur schwer bzw. gar nicht realisieren.

2.2 WICKLUNG

Die Wicklung einer elektrischen Maschine ist aus Kupferleitern aufgebaut, die unabhängig von der Wicklungsart (z.B. Zahnspulenwicklung oder verteilte Wicklung), gegeneinander und gegen das Blechpaket elektrisch isoliert sind. Bezüglich der thermischen Belastbarkeit stellt die Wicklungsisolation die Schwachstelle der gesamten Maschine dar. Konventionelle polymerbasierte Materialien weisen Einsatztemperaturen von bis zu 200°C auf. Gleichzeitig stellen die Kupferleiter aufgrund von Stromwärmeverlusten die mit Abstand größte Wärmequelle dar. Das heißt, die Leistungsdichte, also die Leistung pro Maschinenvolumen, ist von der thermischen Belastbarkeit der Isolation bzw. der Möglichkeit, die entstandene Verlustwärme abzuführen, abhängig.

3 PROBLEMSTELLUNG

Die Verbesserung der Eigenschaften von elektrischen Maschinen, wie des Wirkungsgrades oder der Leistungsdichte, ist aufgrund des weitestgehend ausentwickelten

Fertigungsprozesses nur im unteren einstelligen Prozentbereich möglich und geht meist mit einer deutlichen Erhöhung des Fertigungsaufwands und steigenden Produktionskosten einher. Besonders die Erhöhung der Leistungsdichte bzw. der Überlastfähigkeit, ist in vielen Bereichen, wie der Elektromobilität sowie der Luft- und Raumfahrt, von großer Bedeutung.

Ein vielversprechender Ansatz zur Erhöhung der Leistungsdichte und der Überlastfähigkeit ist die Verbesserung der thermischen Eigenschaften des Isolationsmaterials. So kommen derzeit in Spezialfällen Kupferdrähte zum Einsatz, die statt der konventionellen polymerbasierten Isolationsschicht einen keramischen Überzug aufweisen. Dadurch lassen sich Einsatztemperaturen der Wicklung von deutlich über 300°C erreichen. Ungünstige mechanische Eigenschaften, wie geringe Flexibilität und hohe Sprödigkeit, erhöhen jedoch den Fertigungsaufwand und führen zu einer Steigerung der Herstellungskosten. Besonders der größere zu beachtende Biegeradius macht das Herstellen der Wicklung aufwändig und fehleranfällig. Zudem ist die thermische Anbindung an das umgebende Blechpaket schlecht, was sich ungünstig auf die Kühlung der Wicklung auswirkt. Hinzu kommen im Vergleich zu konventionellen Kupferlackdraht um ein Vielfaches höhere Materialkosten, wodurch sich dieser Lösungsansatz in der Breite bisher nicht durchsetzen konnte.

4 3D-MULTIMATERIALDRUCK

Ein alternativer Lösungsansatz zur Substitution der konventionellen polymerbasierten Isolationsmaterialien durch Keramiken stellen additive Fertigungsverfahren dar. Durch den gleichzeitigen Aufbau der Kupferleiter und der keramischen Isolationsschicht in ihrer endgültigen Form, ist die Einhaltung von Mindestbiegeradien nicht notwendig. Ein geeignetes additives Fertigungsverfahren muss die gleichzeitige Verarbeitung von Kupfer und Keramik ermöglichen, dabei möglichst flexibel sein und über eine hinreichende Strukturfeinheit verfügen.

Mit Hilfe von pulverbettbasierten Verfahren, wie dem Lasersintern, lassen sich sehr feine Strukturen mit hoher Baurate fertigen. Allerdings ist während eines Druckprozesses immer nur ein Material einsetzbar. Konventionelle 3D-Drucker, die nach dem FDM Verfahren (fused deposition modeling) arbeiten und mittlerweile auch im privaten Bereich weit verbreitet sind, dienen im allgemeinen der Herstellung von Körpern aus unterschiedlichen Kunststoffen und scheiden als mögliches Fertigungsverfahren ebenso aus. Darauf basierende Verfahren mit Filamenten, die keramische oder metallische Partikel enthalten gewinnen zunehmend an Bedeutung. Jedoch ist die Herstellung des Filaments relativ aufwändig und Änderungen der Zusammensetzung der eingebetteten Partikel sind immer mit der Herstellung eines neuen Filaments verbunden, was solche Verfahren zu unflexibel für die Untersuchung zahlreicher Materialkombinationen macht. Grundlegend erfüllte zu Beginn des Forschungsvorhabens kein etabliertes Fertigungsverfahren die Anforderungen, die an ein Verfahren gestellt werden, dass in einem Arbeitsgang mehrere metallische und keramische Werkstoffe gleichzeitig verarbeiten kann.

4.1 VERFAHREN

Um die Substitution konventioneller polymerbasierter Isolationsmaterialien durch Keramik dennoch realisieren zu können, wurde ein eigenes additives Fertigungsverfahren entwickelt. Angelehnt an Verfahren, die zum Aufbringen und Dosieren von Klebstoffen u.ä. eingesetzt werden, kommen beim 3D-Multimaterialdruck hochviskose Pasten zum Einsatz. Diese werden aus dem entsprechenden Pulver und speziellen Bindemitteln hergestellt. Durch die Extrusion der Pasten durch feine Düsen, erfolgt der Aufbau des zu druckenden Körpers, wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt, schichtweise. Dabei ist ein lokales Aufschmelzen des zu verdruckenden Materials, wie dies bei Filament-basierten Technologien der Fall ist, nicht notwendig. Daran schließt sich eine Trocknungsphase an, nach der das Druckteil bereits über eine gewisse Festigkeit verfügt. Anschließend werden die gedruckten Teile einer Wärmebehandlung unterzogen, bei dem die Partikel der Pasten zu einem soliden Körper mit geringer Restporosität verschmelzen. Dadurch kommt es wie auch beim Trocknen zu einer definierten Volumenverkleinerung, die beim Design berücksichtigt werden muss.

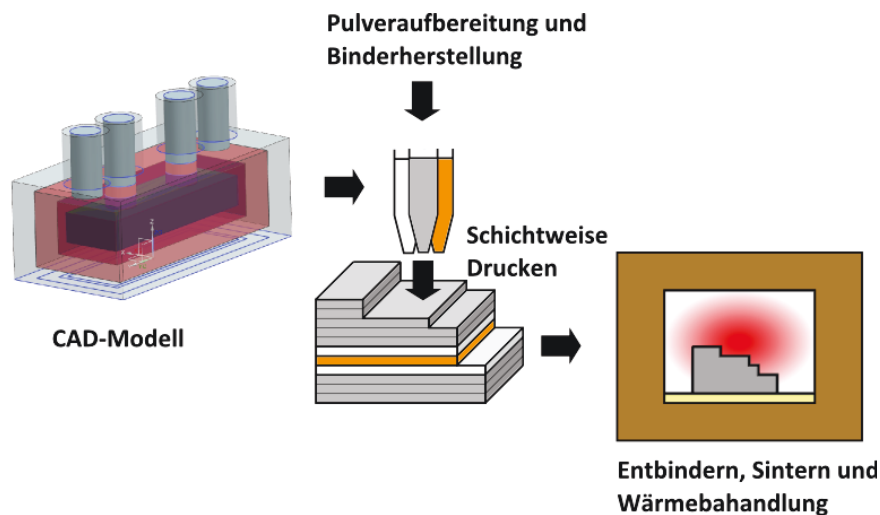


Abbildung 1: Schematische Darstellung des 3D-Multimaterialdruckverfahrens

Quelle: Johannes Rudolph (2015)

4.2 MÖGLICHKEITEN

Grundlegend lassen sich die Vorteile, die der 3D-Multimaterialdruck bietet, in zwei Kategorien einteilen. Zum einen lassen sich durch eine freie dreidimensionale Geometriegestaltung, Strukturen erzeugen, die mit herkömmlichen Verfahren nicht realisiert werden können und zum anderen können Werkstoffe verarbeitet werden, die über bessere thermische Eigenschaften verfügen.

Gestaltungsfreiheit

Durch die nahezu unbegrenzte Gestaltungsfreiheit, lassen sich Magnetkreise realisieren, die ähnliche Eigenschaften wie SMC (Soft Magnetic Compound) aufweisen und den

magnetischen Fluss in allen Raumdimensionen tragen können. Dadurch geraten alternative Maschinenkonzepte in den Fokus, die bisher nur mit großem Aufwand bzw. hohen Kosten herstellbar waren. Dazu zählen Transversalfeldmaschinen oder, wie in Abbildung 2 dargestellt, geschaltete Reluktanzmaschinen, mit innenliegender, kreisförmiger Bandwicklung. Zudem ist die Integration von elektrischen Leitern in Bereichen möglich, die bisher nicht bewickelbar waren. Auch eine Querschnittsänderung der Wicklung ist realisierbar, um beispielsweise Wickelköpfe weniger ausladend zu gestalten oder um, besonders im Hinblick auf Bandwicklungen mit großen Querschnitten, einen optimalen Nutzfüllfaktor zu erzielen. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens besteht in der Möglichkeit, Kühlstrukturen auch in kleineren Maschinengrößen zu realisieren. Elektrische Hohlleiter, die von einem Kühlfluid durchströmt werden, stellen eine besonders effiziente Form von Kühlstrukturen dar. Diese ermöglichen einen zügigen Abtransport der entstehenden Verlustwärme vom Ort an dem sie entsteht, was zu einer Steigerung der Leistungsdichte führt.

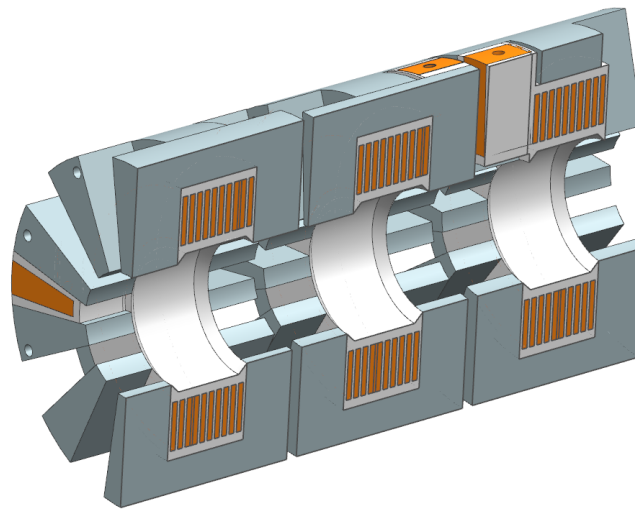


Abbildung 2: Schnittdarstellung einer dreiphasigen geschalteten Reluktanzmaschine mit innenliegender kreisförmiger Bandwicklung

Quelle: Johannes Rudolph (2017)

Thermische Eigenschaften

Der 3D-Multimaterialdruck ermöglicht es, die Leiter elektrischer Maschinen in keramische Isolationsmaterialien einzubetten. Dadurch können Luftspalte, die einen thermischen Widerstand darstellen, zwischen den verschiedenen Materialien vermieden bzw. reduziert werden. Durch die Infiltration konventioneller Wicklungen mit partikelgefüllten Harzen wird derzeit versucht eine bessere thermische Anbindung der elektrischen Leiter zu erreichen. Das Verfahren ist jedoch aufwändig und im Nachhinein lässt sich kaum überprüfen, ob nach dem Aushärten des Harzes Luft einschüsse zurückgeblieben sind. Aufgrund der durch den Druckprozess verbesserten thermischen Anbindung der verschiedenen Materialien untereinander, kann die entstehende Verlustwärme besser von den elektrischen Leitern zur

Oberfläche der Maschine abtransportiert werden. Dieser Effekt wird zusätzlich durch die bessere Wärmeleitfähigkeit von Keramiken verstärkt, die mit $5 - 20 \frac{W}{m \cdot K}$ deutlich über der von Kunststoffisolierungen liegt, die einen Wert von $< 0,5 \frac{W}{m \cdot K}$ aufweisen.

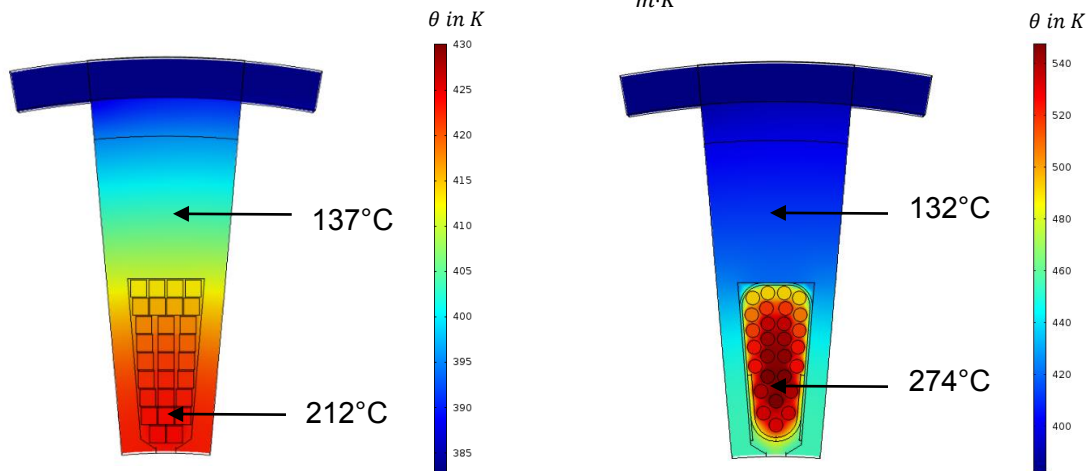


Abbildung 3: Wärmeverteilung und Endübertemperaturen im Nutsegment einer Drehfeldmaschine im Überlastfall. Links: gedruckte, keramisch isolierte Wicklung. Rechts: konventionelle, lackisolierte Wicklung

Quelle: Johannes Rudolph (2015)

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 3 ein Segment einer elektrischen Maschine mit gedruckter keramisch isolierter Wicklung (links) und konventioneller Drahtwicklung (rechts) dargestellt. Es wird deutlich, dass die Temperatur der gedruckten Wicklung in der Nut deutlich niedriger und homogener verteilt ist.

4.3 GRENZEN

Neben den beschriebenen Vorteilen weist das Verfahren auch einige Limitierungen auf. Aufgrund der Partikelgröße und der Viskosität der Druckpasten, lassen diese sich nicht durch beliebig feine Düsen extrudieren. Grundsätzlich ist eine Reduzierung der Partikelgröße möglich. Dies führt allerdings zu einer deutlichen Steigerung der Materialkosten. Gleichzeitig steigt der Aufwand die Partikel zu dispergieren. Eine nennenswerte Absenkung der Viskosität ist ebenso nicht möglich, da für den Aufbau von Körpern eine gewisse Stabilität der Pasten unerlässlich ist. Besonders bei Überhängen, die mit dem Verfahren bis zu einem Winkel von ca. 45 Grad ohne Stützstrukturen möglich sind, ist dies von entscheidender Bedeutung. Derzeit kommen minimale Düsendurchmesser von 0,4 mm zum Einsatz. Geplant ist eine Reduzierung bis auf 0,3 mm. Geringere Düsendurchmesser sind mit dem Verfahren vorerst nur schwer zu erreichen. Damit sind mit dem 3D-Multimaterialdruck Strukturfeinheiten, wie sie beim Lasersintern (SLS) bzw. Laserschmelzen (SLM) erreicht werden, nicht zu realisieren.

Aufgrund dieser Einschränkung ist eine Fertigung konventioneller Maschinen mit kleinen Drahtquerschnitten und hohen Wicklungszahlen mit diesem Verfahren nicht sinnvoll. Zusätzlich ist die Anzahl der Materialien, die eingesetzt werden können, durch die anschließende Wärmebehandlung begrenzt. Niedrigschmelzende Werkstoffe, wie Kunststoffe, lassen sich nicht verarbeiten. Einen weiteren begrenzenden Faktor stellt die derzeitige Baurate dar. Diese liegt abhängig von der Düsendgröße, der Verfahrensgeschwindigkeit und der Anzahl der eingesetzten Materialien zwischen 10 ml und 150 ml pro Stunde.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der 3D-Multimaterialdruck wurde mit dem Ziel, konventionelle polymerbasierte Isolationsmaterialien elektrischer Maschinen durch keramische Werkstoffe zu ersetzen, entwickelt. Durch die deutlich besseren thermischen Eigenschaften kann die Leistungsdichte von Elektromotoren erhöht werden. Auf Grund der Tatsache, dass es sich um ein additives Herstellungsverfahren handelt, ergeben sich weitere Möglichkeiten hinsichtlich der Gestaltungsfreiheit bei der Auslegung und dem Design elektrischer Maschinen, was ebenso zur Erhöhung der Leistungsdichte genutzt werden kann. Abbildung 5 zeigt eine gedruckte keramisch isolierte Spule (links), die sich durch einen Dauerstrom von 80 A und einer Stromdichte von $16 \frac{A}{mm^2}$ als auf 300 °C erwärmt hat (rechts).



Abbildung 5: gedruckte Spule mit gedrucktem Magnetkreis (links), Wärmebildaufnahme bei 300 °C (rechts)

Quelle: Johannes Rudolph (2017)

In Abbildung 6 (links) ist der Stator des gedruckten Elektromotors in allen Prozessphasen dargestellt. Den Beginn stellt die Konstruktion bzw. die Generierung der CAD-Daten (Vordergrund) dar, bei der schon Aspekte und Besonderheiten des 3D-Multimaterialdrucks einfließen. Im Hintergrund ist das gedruckte Teil und in der Mitte der Stator nach der Wärmebehandlung zu sehen.

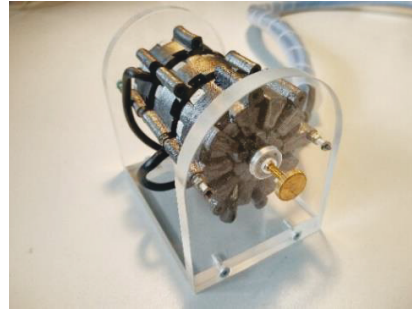
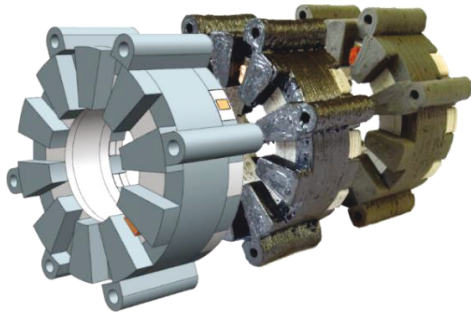


Abbildung 6: Linkes Bild: Stator des gedruckten Motors als CAD-Modell (Vordergrund), nach dem Druckprozess (Hintergrund) und nach der Wärmebehandlung (Mitte).
Rechtes Bild: Versuchsaufbau des gedruckten Motor.

Quelle: Johannes Rudolph (2018)

Der in Abbildung 6 (rechts) dargestellte fertige Motor stellt eine Sonderbauform elektrischer Maschinen dar. Die dreiphasige geschaltete Reluktanzmaschine mit innenliegender kreisförmiger Bandwicklung dient in erster Linie als Technologiedemonstrator für die Kombination der drei Materialien Kupfer, Eisen und Keramik in einem Druckvorgang. Vollständig gedruckte Maschinen sollen nicht in Konkurrenz mit derzeit auf dem Markt befindlichen hocheffizienten Elektromotoren (wie beispielsweise der permanenten Synchronmaschine) treten. Vielmehr sind sie für Einsatzbereiche und Anwendungsfälle (Aerospace, Tiefbohrtechnik u.v.a) konzipiert, bei denen konventionell hergestellte Maschinen aufgrund besonders harscher Umgebungsbedingungen (Hohe Temperaturen, Vakuum u.a.) nicht zum Einsatz kommen können. Der 3D-Multimaterialdruck stellt demnach kein alternatives Fertigungsverfahren für elektrische Maschinen dar, sondern ist als zusätzliche Herstellungstechnologie anzusehen, mit der Elektromotoren herstellbar werden, die Eigenschaften aufweisen, die bisher nicht erreichbar waren. Dies dient in erster Linie der Erweiterung des Einsatzbereichs von elektrischen Maschinen zukünftige Forschungen auf dem Gebiet werden sich zum einen mit der Optimierung der Prozesskette hinsichtlich eines Qualitätsmanagements beschäftigen müssen und zum anderen ist es notwendig die Grenzen der Technologie bezüglich der Strukturfeinheit und mit Hinblick auf die Prozessdauer weiter zu verschieben.

LITERATURVERZEICHNIS

Lindner M., Bräuer P., Rudolph J., Werner R., Studnitzky Th.: Utilization predictions for electrical machines with advanced materials and production technologies. Proceedings - 5th International Conference Magnetism and Metallurgy: Ghent: Belgium, June 20 to 22: 2012

Rudolph J., Lorenz F., Werner R.: 3D-Multimaterialdruck für die Fertigung von Komponenten elektromagnetischer Energiewandler. Freiburger Kolloquium Elektrische Antriebstechnik, 68. BHT - Freiburger Universitätsforum, A 925 Elektrische

Antriebstechnik, Freiberg, Herausgeber: Jana Kertzsch, ISBN: 978-3-86012-556-4, 2017

Lorenz F., Rudolph, J., Werner R.: Herstellung elektromagnetisch aktiver Strukturen mittels 3D Multimaterialdruck 11. *Workshop Magnetlagertechnik Zittau - Chemnitz, 2017.*

Cozonac D. et al.: Study on ceramic insulation wires for motor windings at high-temperature, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2014 IEEE Conference, Des Moines, IA, USA, DOI 10.1109/CEIDP.2014.6995757

Kruth J.P., et al.: Selective laser melting of iron-based powder, Journal of Materials Processing Technology, Volume 149, Issues 1–3, 10 June 2004, Pages 616-622