

# Herstellung elektromagnetisch aktiver Strukturen mittels 3D Multimaterialdruck

Fabian LORENZ, Johannes RUDOLPH, Ralf WERNER

*Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe (EWA)*

*Technische Universität Chemnitz*

*Email: fabian.lorenz@etit.tu-chemnitz.de*

## **Kurzfasung**

Additive Fertigungsverfahren werden zunehmend für die Herstellung von Konsum- und Industrieprodukten eingesetzt. Neben den weit verbreiteten, kunststoffbasierten 3D-Druckverfahren sind Laser-Pulverbett-basierte Technologien etabliert, mit denen komplexe, hochbelastbare Funktionsbauteile hergestellt werden können. Die aktuell verfügbaren Anlagen sind jedoch weitestgehend auf die Verarbeitung nur eines Werkstoffes bzw. einer Werkstoffgruppe (Kunststoff) begrenzt. Die Herstellung komplexer Funktionsbaugruppen erfordert darüber hinaus die gleichzeitige Verarbeitung mehrerer Werkstoffe mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften. Der vorliegende Beitrag stellt ein neuartiges Fertigungsverfahren vor, das die Realisierung komplexer Multimaterialbauteile aus Metallen sowie Keramiken ermöglicht und somit die Herstellung physikalisch anspruchsvoller Baugruppen zulässt. Die Herstellung elektromagnetisch aktiver Strukturen steht dabei im Fokus.

**Keywords** – *additive Fertigung; elektrische Maschinen; 3D Multimaterialdruck; Hochtemperaturanwendung*

## **1 Einleitung**

Additive Fertigungsverfahren stellen eine interessante Möglichkeit dar, komplexe Bauteilgeometrien zu realisieren, die mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht umsetzbar sind. Der auf 3D-Druck basierende Umsatz betrug im Jahr 2016 allein in Deutschland ca. eine Milliarde Euro. Das entspricht einem Anteil von zehn Prozent am weltweiten Umsatz, der auf zehn Milliarden Euro beziffert wird [1]. Besonders kunststoffbasierte Verfahren wie FFF (Fused Filament Fabrication), FDM (Fused Deposition Modeling), STL (Stereolithografie), DLP (Digital Light Processing), MJM (Multi Jet Modeling) und FTI (Film Transfer Imaging) sind mittlerweile weit verbreitet. Grundlegend können mit Hilfe der genannten Verfahren geometrisch äußerst komplexe Bauteile hergestellt

werden, deren technischen Eigenschaften jedoch stark begrenzt sind. Strukturen mit neuartigen elektrischen, magnetischen oder mechanischen Eigenschaften lassen sich mit kunststoffbasierten Verfahren nicht herstellen. Parallel zu den kunststoffbasierten Verfahren haben sich im Bereich industrieller Fertigung in den letzten Jahren additive Verfahren entwickelt, bei denen Metalle oder Keramiken für den Aufbau von dreidimensionalen Strukturen eingesetzt werden. Die am weitesten verbreiteten Technologien SLS (Selective Laser Sintering) bzw. SLM (Selective Laser Melting) sind Pulverbettverfahren, bei denen metallische bzw. keramische Pulver mittels eines Lasers lokal gesintert bzw. verschmolzen werden. Neben komplexen Geometrien lassen sich gute mechanische Eigenschaften der Werkstoffe erreichen, was die Herstellung hochbelastbarer Funktionsbauteile ermöglicht.

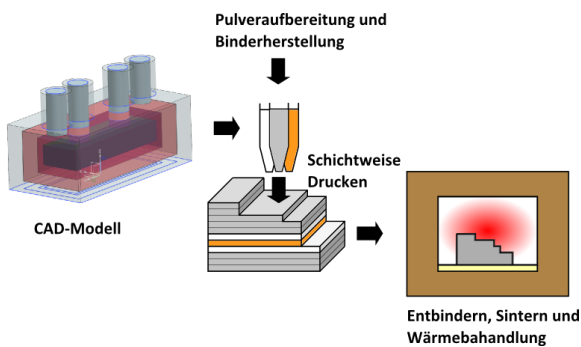
Für die Fertigung komplexer Komponenten, die mehr als eine hohe Strukturfeinheit oder eine gute mechanische Festigkeit aufweisen, ist die Integration von mehreren Materialien unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften notwendig. Um beispielsweise ganze Funktionsbaugruppen, wie die Wicklung von elektrischen Maschinen herstellen zu können, ist es zwingend erforderlich, neben einem elektrisch leitfähigen Material, ein zweites elektrisch isolierendes Material zu verarbeiten. Nach dem derzeitigen Stand der Technik ist keines der etablierten Verfahren in der Lage, umfassende Kombinationen von Materialien unterschiedlicher elektrischer, mechanischer oder magnetischer Eigenschaften zu verarbeiten.

Der 3D Multimaterialdruck – ein speziell für die Herstellung elektromagnetischer Strukturen an der Professur für elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe der TU Chemnitz entwickeltes Verfahren bietet hingegen die Möglichkeit, komplizierte Bauteile aus mehreren Materialien wie z.B. Kupfer, Eisen und Keramik herzustellen. Die anwendbaren Werkstoffe sowie die umsetzbaren Geometrien haben das Potenzial, die Gestaltungsfreiheiten

und darüber hinaus den Einsatzbereich elektrischer Maschinen deutlich zu erweitern.

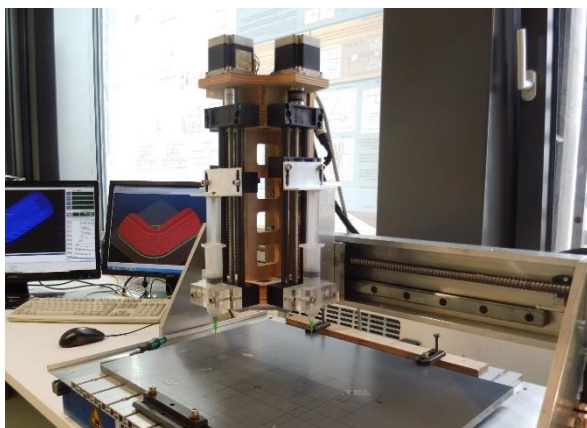
## 2 Verfahren

Beim 3D Multimaterialdruck handelt es sich um ein extrusionsbasiertes Verfahren. Ausgangsstoff sind Pulver des zu verwendenden Materials, die mittels spezieller Bindemittel zu hochviskosen Pasten verarbeitet werden. Die Pasten werden durch Düsen eines speziellen Druckkopfes extrudiert, der durch eine CNC-Maschine bewegt wird (siehe Abb.2). Es werden schichtweise komplexe Geometrien aufgebaut, die – je nach Anforderung – aus unterschiedlichen Materialien bestehen können. Das Ergebnis des Druckprozesses ist der sogenannte Grünkörper, der die Endgeometrie abbildet, jedoch noch nicht die gewünschten physikalischen Eigenschaften besitzt. In einer anschließenden Wärmebehandlung werden die Bindemittel aus dem Bauteil entfernt und die Werkstoffe gesintert.



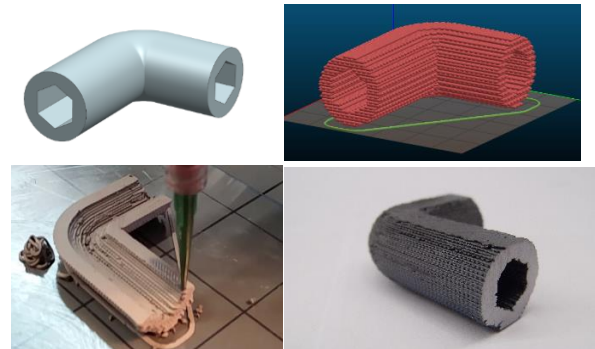
**Abbildung 1:** Arbeitsschritte 3D Multimaterialdruck

Der Sinterprozess hat eine Schrumpfung der Bauteile sowie einen deutlichen Anstieg deren Dichte zur Folge und ist bei exakter Kontrolle der Temperaturprofile mit hoher Genauigkeit wiederholbar, wobei Restporositäten der Materialien von unter 10% erreichbar sind.



**Abbildung 2:** Prototyp Multimaterialdrucker

Die Erstellung der Druckdaten setzt die CAD-Modellierung der Zielgeometrie unter Beachtung des verfahrensspezifischen Abbildungsvermögens voraus. Die Geometrie wird in Schichten zerlegt, in denen die einzelnen Druckwege definiert werden (Slicing). Wichtige Steuerungsparameter dabei sind die Layerhöhe sowie der Durchmesser der Extrusionsdüse. Abbildung 2 zeigt die einzelnen Schritte vom CAD-Modell zum fertigen Bauteil anhand einer Rohrgeometrie, hergestellt aus reinem Eisen.



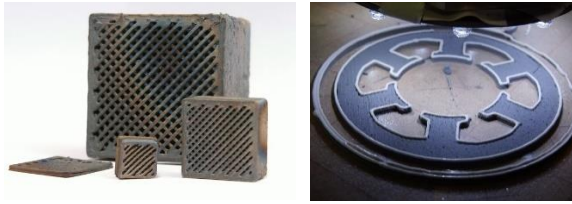
**Abbildung 3:** CAD-Modell, Slicing-Ergebnis, Druck, fertiges Teil nach Wärmebehandlung

Die erreichbare Genauigkeit hängt neben dem verwendeten Düsendurchmesser von der Höhe der einzelnen Drucklayer ab und kann in weiten Grenzen variiert werden. Kleine Werte für Düsendurchmesser und Layerhöhe ermöglichen hohe Strukturauflösungen, führen jedoch zu langen Druckzeiten. Entsprechend kann durch die Wahl größerer Werte die Baurate bei reduzierter Genauigkeit deutlich erhöht werden. Dies zeigt, dass feine Strukturen ebenso möglich sind wie der schnelle Aufbau großer Geometrien. Tabelle 1 stellt die Verfahrensparameter der aktuellen Forschungsanlage dar.

**Tabelle 1:** Aktuell realisierbare Druckparameter

Düsendurchmesser	0,41 – 1,6 mm
Layerhöhe	0,1 – 1,6 mm
Genauigkeit Positionierung	10 $\mu$ m
Baurate	bis 140 $\text{cm}^3/\text{h}$
Arbeitsraum	300x400x300mm
Anzahl Materialien	3 gleichzeitig

Neben den dargestellten Rohrgeometrien lassen sich massive Körper, Gitterstrukturen und geschlossenen, leere Hohlräume ohne Stützstrukturen herstellen.



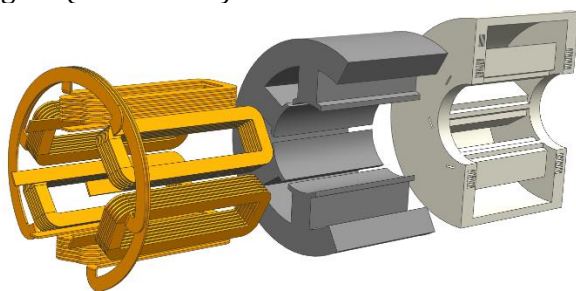
**Abbildung 4:** Gitterstruktur Eisen (links), Kombination Eisen-Keramik (rechts)

### 3 Einsatzmöglichkeiten

Die Anwendung des 3D Multimaterialdruckes zur Herstellung elektrischer Maschinen bietet ein umfangreiches Optimierungspotenzial, das sich in folgende Bereiche untergliedern lässt.

#### 3.1 Gestaltungsfreiheit

Der 3D-Multimaterialdruck ermöglicht, ähnlich wie andere generative Fertigungstechnologien, eine nahezu vollständige Gestaltungsfreiheit in allen drei Raumdimensionen. Mit Hilfe von gedruckten magnetisch aktiven Materialien, die ein ähnliches Verhalten wie SMC (Soft Magnetic Compound) aufweisen, lassen sich Magnetkreise mit dreidimensionaler Flussführung realisieren. Eine Erhöhung der Leistungsdichte ist zum einen durch die Umsetzung alternativer Maschinenkonzepte wie z.B. Transversalflussmaschinen möglich, zum anderen können Wickelräume konventioneller Maschinentypen besser ausgenutzt werden, da der Fokus bei der Wicklungsauslegung nicht mehr auf deren Herstellbarkeit gelegt werden muss. Es können somit Wicklungen realisiert werden, die mit herkömmlichen Verfahren nicht umsetzbar sind. Darüber hinaus kann die Querschnittsform von Leiterzügen z.B. in Wickelköpfen variiert werden, um deren Ausladung zu verringern (siehe Abb.5).

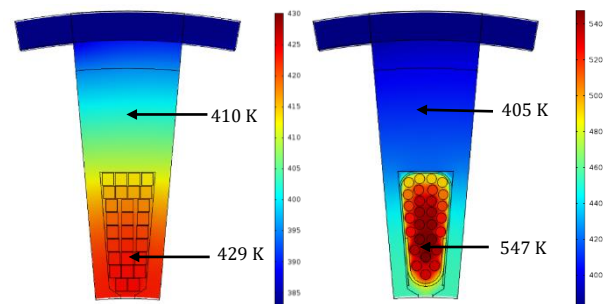


**Abbildung 5:** Geometriestudie einer einfachen, druckbaren Drehfeldwicklung mit wechselndem Leiterquerschnitt im Wickelkopf

#### 3.2 Wärmemanagement

Der 3D Multimaterialdruck ermöglicht die vollständig keramische Isolation von Kupfer-Lei-

terstrukturen, wodurch das Wärmemangement elektromagnetischer Anordnungen deutlich verbessert werden kann. Aufgrund der Wärmeleitfähigkeit der anwendbaren Keramiken, die  $5 - 20 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  beträgt und damit deutlich über der Wärmeleitfähigkeit von Isolationsharzen ( $< 0,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) liegt, lassen sich höhere Verlustwärmemengen ableiten und damit die Leistungsdichte weiter erhöhen. Abbildung 6 zeigt den Vergleich der Wärmeverteilung in einer gedruckten, keramisch isolierten Wicklung (links) und einer konventionellen, lackisolierten Wicklung (rechts) im Nutsegment einer Drehfeldmaschine bei gleichem Phasenstrom. Gut erkennbar sind die gleichmäßigere Wärmeverteilung und die geringere Wicklungstemperatur.

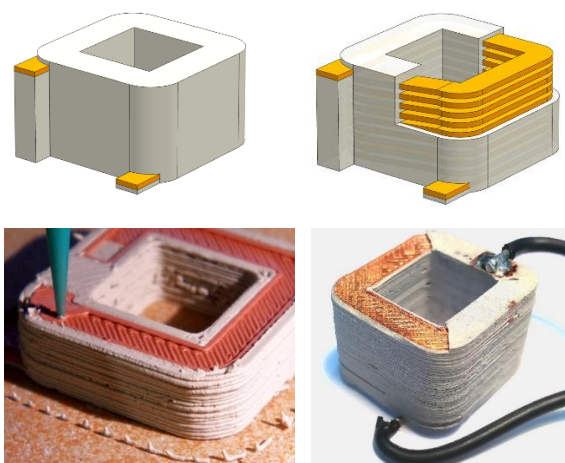


**Abbildung 6:** Wärmeverteilung im Nutsegment einer Drehfeldmaschine. links: gedruckte, keramisch isolierte Wicklung, rechts: konventionelle, lackisolierte Wicklung[2]

Hinzu kommt die gute thermische Anbindung der Leiter an das umgebende Material und die Möglichkeit, Kühlkanäle sehr nahe an die Wärmequellen zu bringen.

### 4 Ergebnisse

Die Umsetzbarkeit keramisch isolierter Spulengeometrien mittels 3D Multimaterialdruck konnte am Beispiel einer Zahnspule gezeigt werden. Abbildung 7 zeigt eine Spule, deren aktive Wicklung durch bandförmige Leiter realisiert ist, die in der Wickel Ebene verlaufen und nach jeder Windung eine diagonale Verbindung zur nächsten Windung aufweisen. Die keramische Isolation übernimmt gleichzeitig die Aufgabe einer mechanischen Stabilisierung, wodurch ein Spulenkörper entfällt. Abbildung 7 zeigt Aufbau, Druckprozess und Sinterergebnis der betrachteten Spule. Durch intensive Untersuchung insbesondere des Wärmebehandlungsprozesses konnte gezeigt werden, dass derartige Kombinationsbauteile erfolgreich gesintert werden können.



**Abbildung 7:** CAD-Modell, Druckprozess und funktionsfähige Spule (geöffnete erste Kupferwindung)

Die Kennwerte der Spule sowie die erreichten Eigenschaften der Werkstoffe sind in Tabelle 2 ersichtlich. Die erkennbar geringeren Werte der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit (71%) bzw. der Dichte (87%) des gedruckten Kupfers gegenüber konventionellem Elektrokupfer sind in der verbleibenden Restporosität im Material begründet.

**Tabelle 2:** Kennwerte Zahnspule

Windungszahl	$N = 10$
Leiterquerschnitt	$5 \text{ mm}^2$
Abmessungen	$34 \times 34 \times 22 \text{ mm}$
Spezifische elektrische Leitfähigkeit Kupfer	$4,19 \cdot 10^7 \text{ S/m}$
Dichte Kupfer	$7,78 \text{ g/cm}^3$
Spannungsfestigkeit Keramik	$2,9 \text{ kV/mm}$
Dichte Keramik	$1,93 \text{ g/cm}^3$

Die Kombination von Kupfer und Keramik auf makroskopischer Skala stellt dabei aufgrund des hohen spezifischen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kupfer ( $16,5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ ) eine besondere Herausforderung dar. Durch gezielte Anpassung der Keramikmischung konnte deren Wärmeausdehnungsvermögen ausreichend gesteigert werden, um die Wärmebehandlung und anschließende Temperaturwechselzyklen schadenfrei zu durchlaufen. Im Belastungstest konnten Stromdichten von  $16 \text{ A/mm}^2$  erreicht werden, wobei die Spule im Dauerbetrieb bis auf  $300^\circ\text{C}$  erhitzt wurde (siehe Tabelle 3 und Abbildung 8). Die erreichten Einsatztemperaturen zeigen, dass durch die Anwendung des 3D Multimaterialdrucks Betriebsbereiche erschlossen werden können,

die mit konventionellen Herstellungsverfahren nicht erreichbar sind. Das Verfahren eignet sich somit besonders für Strukturen in Hochtemperaturanwendungen sowie die Steigerung der Überlastfähigkeit von elektrischen Maschinen, Übertragern und magnetischen Lagerungen.

**Tabelle 3:** Testparameter Zahnspule

Strom	80 A
Spannung	0,38V
Widerstand	0,00475Ω
Stromdichte	$16 \text{ A/mm}^2$
Betriebstemperatur	$300^\circ\text{C}$
Kühlung	freie Konvektion



**Abbildung 8:** gedruckte Spule auf ebenfalls gedrucktem Magnetkreis (links), Wärmebild der Anordnung im Test bei Dauerstrom  $i = 80 \text{ ADC}$

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der 3D-Multimaterialdruck stellt ein völlig neues Fertigungsverfahren für elektromagnetische Strukturen dar, mit dessen Hilfe sich die wesentlichen Bestandteile von elektrischen Maschinen in einem Arbeitsgang herstellen lassen. Durch die Substitution von kunststoffbasierten Isolationswerkstoffen durch Keramik können deren thermischen Eigenschaften signifikant verbessert werden. Darüber hinaus ermöglicht die umfangreiche Gestaltungsfreiheit die Umsetzung alternativer Maschinenkonzepte und komplexer Wicklungsstrukturen. Im Fokus der Weiterentwicklung des Verfahrens steht die Reduzierung der Restporosität der Werkstoffe sowie die Integration von ferromagnetischen Materialien in den Druck- und Sinterprozess, um neben Wicklungsgeometrien komplette elektrische Maschinen herstellen zu können.

## Literatur

- [1] Heidenreich A. M., Dr. Kuckartz M.: 3D-Druck-Potenziale und Herausforderungen für die Hamburger Wirtschaft: Hamburg, Deutschland: Handelskammer Hamburg, Januar 2017
- [2] Diplomarbeit Fabian Lorenz „Thermische Modellierung moderner Wicklungsstrukturen und deren Kühlung“ (2012)