

# Reduzierung des Bauraums bei einem aktiven dreipoligen Radialmagnetlager unter Verwendung von siebgedruckten Wicklungen

Dipl.-Ing. Patrick Bräuer, Dipl.-Ing. Matthias Bartscht, Prof. Dr.-Ing. Ralf Werner

Technische Universität Chemnitz

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe

09107 Chemnitz, Reichenhainer Straße 70

E-Mail: patrick.braeuer@etit.tu-chemnitz.de

E-Mail: matthias.bartscht@etit.tu-chemnitz.de

E-Mail: ralf.werner@hrz.tu-chemnitz.de

**Zusammenfassung**—Der nachhaltige Umgang mit der zur Verfügung stehenden Energie und Ressourcen wird in Zukunft einen immer höheren Stellenwert erlangen. Dabei werden Magnetlager eine zunehmende Rolle spielen. Sie arbeiten berührungsfrei und damit schmiermittelfrei, wodurch sie in Umgebungen, in denen es auf höchste Reinheit ankommt, eingesetzt werden können. Der Wartungsaufwand ist durch fehlenden mechanischen Abrieb reduziert und die Lebensdauer dadurch erhöht. Die Betriebskosten sind darüber hinaus geringer, da die auftretenden Verluste gerade im Bereich hoher Drehzahlen 1/5 bis 1/20 derer konventioneller Lager betragen.

Es haben sich drei verschiedene Bauformen für magnetische Lager herauskristallisiert, welche sich in ihrem Aufbau, Verlusten, Einsatzmöglichkeiten oder auch ihrer Regelbarkeit unterscheiden. Der vom Aufbau her einfachste Typ ist das Unipolarmagnetlager. In diesem Beitrag soll dafür die Raumreduzierung im Bereich der Wicklung durch den Einsatz siebgedruckter Leiter, wie sie bereits seit längerem für Kleinantriebe in der wissenschaftlichen Diskussion sind [1], [2], untersucht werden. Das Siebdruckverfahren erlaubt es, besonders dünne flächige Leiter herzustellen, die aufgrund des Verhältnisses zwischen Querschnittsfläche und Oberfläche ein besseres Wärmeeabgabevermögen aufweisen als Runddraht und daher Stromdichten von bis zu  $100 \text{ A/mm}^2$  zulassen. Ziel ist es, bei gleicher Lagerkraft und gleichem Rotordurchmesser das Bauvolumen und damit die Masse des Lagers signifikant zu reduzieren. Erste Berechnungen zeigen, dass eine Reduzierung des Volumens um bis zu 50 % denkbar ist. Technisch möglich ist darüber hinaus auch eine Integration von mittels Siebdruck hergestellten Sensoren zur Lagemesseung. Besonders günstig erscheinen in diesem Zusammenhang kapazitive Lagesensoren. Als Ergebnis sollen konstruktive Vorschläge für den Bau magnetischer Lager mit siebgedruckten Wicklungen gemacht werden.

## I. EINLEITUNG

Aktive magnetische Lager werden seit vielen Jahren erfolgreich in der Industrie eingesetzt. Sie verfügen im Vergleich mit herkömmlichen Gleit- oder Wälzlagern, über enorme Vorteile. Durch die berührungslose Lagerung der Welle tritt praktisch kein Verschleiß auf, wodurch sich ein geringer Wartungsaufwand und eine hohe Lebensdauer ergeben. Ebenso

entfällt der Einsatz von Schmiermitteln, die, trotz des stetigen Fortschritts in diesem Bereich, nach wie vor die Umwelt in einem erheblichen Maß belasten. So gelangen nach [16] zwischen 40 % und 50 % der in Europa eingesetzten Schmierstoffe in die Umgebung, was einer Menge von bis zu 2,5 Millionen Tonnen pro Jahr entspricht. Im Bereich hoher Drehzahlen treten die Vorteile noch deutlicher in Erscheinung. So zeigen Berechnungen in [17], dass durch den Einsatz magnetischer Lager, statt herkömmlicher Wälzlager, eine Verringerung der Lagerungsverluste um bis zu ca. 80 % zu erwarten ist. Das schlägt sich wiederum in einem besseren Gesamtwirkungsgrad nieder, was im Zuge sich verknappender Ressourcen und steigender gesetzlicher Anforderungen bezüglich der Energieeffizienz elektrischer Antriebe nicht nur ökologisch sondern auch ökonomisch einen wachsenden Stellenwert gewinnt.

Leider blieb, trotz der zahlreichen Vorteile, der Erfolg magnetischer Lager im breiten industriellen Umfeld aus, sodass sich ihre Anwendung bisher nur auf spezielle Gebiete beschränkt. Mögliche Gründe dafür könnten beispielsweise allgemeine Akzeptanzprobleme oder der relativ hohe Anschaffungspreis sein. Eine Abschätzung durch [18] ermittelte am Beispiel eines Radiallagers mit einer Nenntagkraft von 2500 N, dass 45% der Kosten auf Blechpakete und Wicklung, 30% auf das Messsystem in beiden Achsen, 20% auf die Pulssteller und 5% auf die Regelungselektronik entfallen. In diesem Beitrag soll durch den Einsatz siebgedruckter Wicklungen, wie sie bereits seit längerem für Kleinantriebe in der wissenschaftlichen Diskussion sind [1], eine Möglichkeit vorgestellt werden, die durch Blechpaket und Wicklung hervorgerufenen Kosten, gerade im Bereich der Serienanwendungen, zu verringern und zusätzlich Bauraum einzusparen.

## II. SIEBGEDRUCKTE WICKLUNGEN

In diesem Beitrag wird eine neue Fertigungstechnologie für die Herstellung von Wicklungen elektrischer Energiewandler vorgeschlagen. Dazu wird das Siebdruckverfahren, als klassisches massenfertigungsverfahren der Elektronikindustrie, ver-

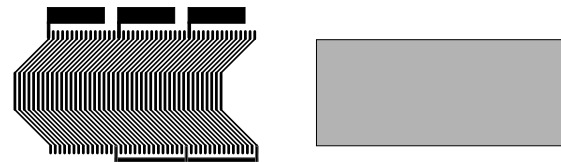
wendet. Im Vergleich zu konventionellen Lösungen ist es damit möglich, mit einer siebgedruckten Wicklung vergleichbare oder höhere Durchflutungen zu erreichen. Ein Effekt, der mit dieser Technologie einhergeht, ist die nachhaltige Reduzierung der Produktionskosten elektrischer Wicklungen. Grund dafür ist der ausgereifte und kostengünstige Produktionsprozess, der sich besonders bei großen Stückzahlen auszahlt. Bei ähnlichen technologischen Anforderungen findet das Siebdruckverfahren bereits jetzt beim Druck von Millionen von RFID Smart Labels [9] zu einem Stückpreis von wenigen Eurocent und Wicklungen für elektrische Maschinen [1], [2] Anwendung. Durch die überschaubaren Einmalkosten und die Möglichkeit, mehrere Exemplare gleichzeitig drucken zu können, sind die Kostenvorteile auch auf elektrische Wicklungen magnetischer Lager übertragbar. Darüber hinaus ergibt sich eine weitere attraktive technische Möglichkeit für die Anwendung von Siebdruck in der Antriebstechnik. Es können sowohl Sensoren als auch Leistungselektronik mittels dieses Verfahrens hergestellt und so in den elektrischen Energiewandler integriert werden. Erste Ansätze dazu finden sich in [11] und [12]. Die Leistungsbaulemente können jedoch im Moment noch nicht die für einen Motor oder Magnetlager benötigten Ströme treiben. Infolge der rapiden Weiterentwicklung der Technologie, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass es in Zukunft möglich ist, einen integrierten siebgedruckten Leistungssteller zu produzieren. Eine Herstellung von z.B. kapazitiven Lage-sensoren ist hingegen bereits möglich und im Rahmen eines Prototyps in naher Zukunft vorgesehen.

Der Siebdruckprozess hat seine Anfänge in der Druckindustrie des 18. und 19. Jahrhunderts. Bereits in den 1960er Jahren wurde er, wie in [8] beschrieben, in der Elektronikindustrie zum Druck von Leit-, Isolier- und Widerstandsschichten verwendet. Der technische Fortschritt bei der Entwicklung von Druckmaschinen, neuen Druckmaterialien und präziseren bzw. feineren Sieben führte in den letzten Jahren zu einer weit reichenden Verbesserung der Druckqualität und somit zum Erschließen neuer Einsatzgebiete für die Siebdrucktechnologie.

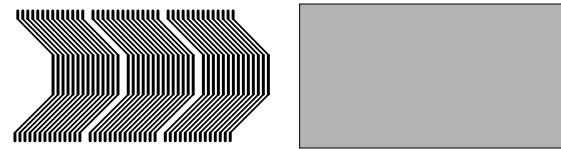
Durch die Nutzbarmachung dieser Technologie für die Herstellung der Wicklung elektrischer Energiewandler ist es möglich, deren Produktionskosten zu senken. Das erste Ausführungsbeispiel einer siebgedruckten Wicklung für elektrische Energiewandler wurde am Institut für Printmedien der TU Chemnitz pmTUC gedruckt und in unseren Laboren vermessen und getestet. Dazu wurde eine triviale Wicklung mit drei Strängen und jeweils einer Windung ausgeführt. Nach Feststellung der Funktionsfähigkeit der Wicklung wurde mit der Berechnung einer permanenterregten Synchronmaschine begonnen. Dazu wurden die grundlegenden Kenntnisse zu elektrischen Maschinen aus [3], [4], [6] und [5] mit den Ausführungen zum Siebdruck wie in [9] und [10] beschrieben, sowie aus anderen technischen Bereichen [7] verknüpft.

In Abbildung 1 ist das Layout dieser Wicklung dargestellt. Für eine leistungsfähige dreiphasige Wicklung sind mindestens zwei elektrisch leitfähige Schichten notwendig. Diese müssen untereinander kontaktierbar sein und elektrisch voneinander isoliert aufgebracht werden. Für die elektrische Isolation ist

es notwendig dielektrische Schichten zu drucken. Als sinnvoll hat sich dabei erwiesen, die gedruckte Wicklung mit einer zweiten Schicht Dielektrikum zu überziehen und diese damit vor Korrosion und mechanischen Einflüssen zu schützen. Die Wicklung ist in einer wabenförmigen Struktur ausgeführt und durch einen gedruckten Sternpunkt bereits fest verschaltet. Mit der vorgestellten Siebdrucktechnologie ist es problemlos möglich, weitere Lagen bestehend aus Silberpaste und Dielektrikum aufzubringen bzw. die Rückseite zu bedrucken und so die Windungszahl je Strang der Maschine zu erhöhen.



(a) Struktur der Wicklung im ersten Layer mit Silberpaste (linke Abbildung) und im zweiten Layer mit Dielektrikum (rechte Abbildung).



(b) Struktur der Wicklung im dritten Layer mit Silberpaste (linke Abbildung) und im vierten Layer mit Dielektrikum (rechte Abbildung).

Abbildung 1. Layout der verschiedenen übereinander gedruckten Layer zum Herstellen einer dreiphasigen siebgedruckten Wicklung.

Durch die Verwandheit der mechanischen und elektrischen Konstruktion von Synchronmaschine und Unipolarlager ist eine Übertragung der Erkenntnisse, die bei der Entwicklung der Synchronmaschine gewonnen wurden problemlos möglich. Damit können alle bereits herausgearbeiteten Vorteile der Siebdrucktechnologie bei der Herstellung elektrischer Wicklungen auf ein Unipolarlager übertragen werden.

### III. WICKLUNGS AUSLEGUNG

Der Entwurf magnetischer Lager kann nach [15] in vier wesentlichen Schritten erfolgen:

- 1) Festlegung der minimal aufzubringenden Kraft
- 2) Bestimmung der benötigten Querschnittsfläche je Pol
- 3) Berechnung der Pollänge und -breite
- 4) Bestimmung noch fehlender Parameter (bspw. Durchflutungsbedarf, Querschnitte des Rückengebietes etc.)

Die Aufgabe der Wicklung ist in Punkt 4 enthalten. Sie muss die bei gewählter Kraft und verfügbarer Polfläche  $A_p$  notwendige Durchflutung  $\theta$  bereitstellen können. Die Kraft je Pol lässt sich über die Beziehung

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} A_p \quad (1)$$

ausdrücken. Mit der Polfläche sowie weiteren Vorgaben wie bspw. Begrenzungen in der axialen Baulänge, liegen die

Pollänge und -breite fest. Bei gleicher Größe, also quadratischer Fläche und Bewicklung um den Pol, ergibt sich der kleinste OHMSche Widerstand je Spule.

Elektromagnetisch betrachtet spielt es keine Rolle ob die Durchflutung

$$\theta = I N \quad (2)$$

durch einen großen Strom  $I$  und wenige Windungen aufgebaut wird oder mit einer kleinen Stromstärke und einer großen Windungszahl  $N$ . Typischerweise wird  $N$  an den Pulssteller angepasst, sodass sich bspw. bei Nennstrom die geforderte Tragkraft je Achse einstellt.

Mit festgelegter Windungszahl erfolgt die Berechnung des Leiterquerschnitts  $A_L$ , respektive des Leiterdurchmessers  $D_L$ . Dieser wird anhand thermischer Gesichtspunkte ausgewählt, da die maximal zulässige Betriebstemperatur eines aktiven magnetischen Lagers durch die gewählte Isolierstoffklasse (bspw. 155°C für Klasse F) festgelegt ist. Der Leiterquerschnitt kann so bemessen werden, dass das Lager bei Belastung mit Nenntagkraft diese Temperatur nicht erreicht, um Reserven für dynamische Belastungen zu haben. Es ist weiterhin möglich die Wicklung derart auszulegen, dass die maximale Betriebstemperatur im Nennpunkt erreicht wird, womit jedoch eine stetige Überwachung der Temperatur erforderlich wird.

Die Berechnung der benötigten Fläche des Wickelfensters  $A_N$  erfolgt durch die Einführung eines Nutfüllfaktors  $\varphi_{Cu}$  und ergibt sich zu:

$$A_N = N \frac{A_L}{\varphi_{Cu}} \quad (3)$$

Bei Bewicklung um den Pol, bestimmt dessen Höhe maßgeblich die für die Wicklung zur Verfügung stehende Fläche. Bei dreipoligen Unipolarlagern existieren unter dieser Voraussetzung zwei denkbare Spulenformen und zwei Möglichkeiten das Wickelfenster zu gestalten. Die erste Variante besteht darin, dass die Spulen wie bei heteropolaren Anordnungen ausgeführt werden und der Wickelkopf senkrecht zu den Polkanten verläuft. Damit erhält die Wicklung eine quaderförmige Gestalt.

Die zweite Möglichkeit ergibt sich durch die geringere Anzahl an Polen und der damit einhergehenden größeren verfügbaren Nutfläche als bei Heteropolarlagern. Der Wickelkopf verläuft in diesem Fall nicht senkrecht zu den Polkanten sondern wie der Innendurchmesser. Abbildung 2 skizziert den eben erläuterten Sachverhalt.

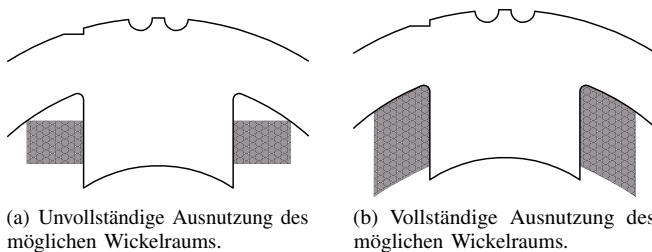


Abbildung 2. Mögliche Spulenformen bei einem klassischen Unipolarlager.

Mit festgelegtem Wickelfenster und Polhöhe ist der Entwurf der Wicklung im wesentlichen abgeschlossen. In [20] wurde der vollständige Entwurf des Lagers durchgeführt. Darauf basierend werden als Ausgangspunkt für die Berechnungen der siebgedruckten Wicklung die Abmessungen aus Abbildung 3 zu Grunde gelegt.

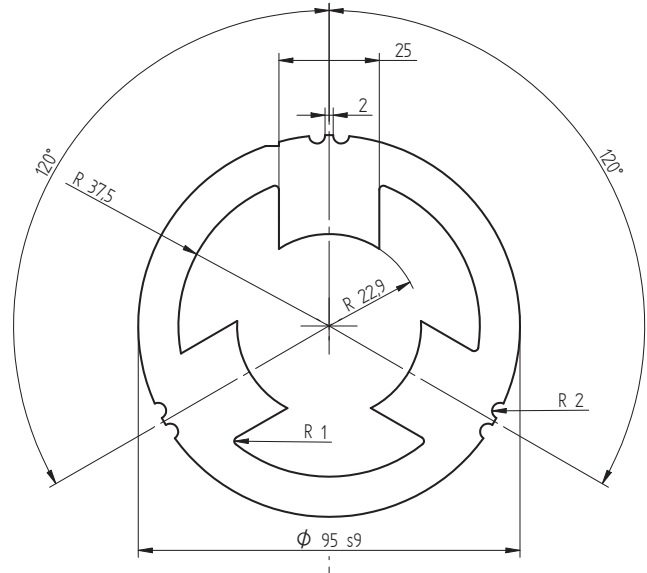


Abbildung 3. Abmessungen des als Grundlage herangezogenen Unipolarlagers

Alle weiteren relevanten Größen des klassischen Magnetlagers und des Lagers mit den siebgedruckten Wicklungen sind in Tabelle I zusammengefasst. Deren Berechnung wird im Nachgang erläutert.

Tabelle I  
HAUPTKENNGRÖSSEN DER BEIDEN UNTERSUCHTEN AUFBAUTEN EINER  
MAGNETISCHEN LAGERUNG

	klassische Wicklung	siebgedruckte Wicklung
Außendurchmesser	95 mm	72 mm
Rückenhöhe	10 mm	10 mm
Polhöhe	14,6 mm	3 mm
Wellendurchmesser	45 mm	45 mm
Lagerkraft	250 N	250 N
Nennstrom	4 A	4 A
Windungen je Pol	90	90

Unter der Voraussetzung, dass sowohl die Lagerkraft, als auch der Wellendurchmesser erhalten bleiben sollen, ist es sinnvoll als nächstes den benötigten Bauraum der siebgedruckten Wicklung zu bestimmen.

Unter Beachtung einer maximal zulässigen Stromdichte von 100 A/mm<sup>2</sup> für die siebgedruckten Strukturen und der Annahme einer idealen Rechteckform des gedruckten Leiters, ergibt sich bei einer druckbaren Höhe von 14 µm eine Leiterbreite von ≈2,8 mm. Das vorhandene Bogenmaß für den Wickelraum von 29 mm lässt unter Beachtung von 150 µm Abstand zwischen den Leitern für jede Druckebene neun Leiter zu. Da eine jede Keramik-Trägerfolie beidseitig bedruckt werden kann,

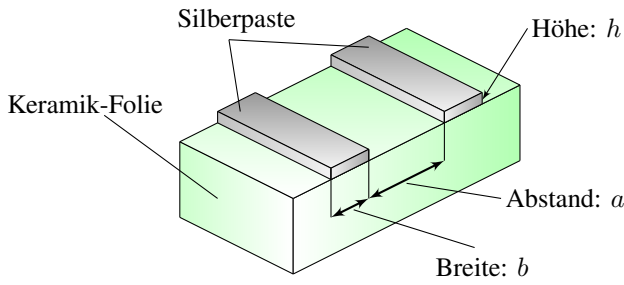


Abbildung 4. Schematische Darstellung der Maße für die Berechnung der Geometrie der Layouts bei Verwendung siebgedruckter Leiter

können 18 Leiter je Folie untergebracht werden. Damit ist die Verwendung von fünf Folien für die geforderten 90 Leiter der Wicklung nötig. Die Gesamtmaße der Wicklung ergeben sich unter Verwendung der in Tabelle II angegebenen Maße für die einzelnen Schichten.

Tabelle II  
ABMESSUNGEN DER EINZELSCHICHTEN EINER SIEBGEDRUCKTEN WICKLUNG

	Abmaß
Keramik-Trägerfolie	200 $\mu\text{m}$
Leiterhöhe	14 $\mu\text{m}$
Dicke Dielektrikum	30 $\mu\text{m}$

Um einen sicheren Druckprozess gewährleisten zu können und Fehlstellen in den gedruckten Schichten zu vermeiden, werden diese vergleichsweise dick ausgeführt. Dies führt bei Verwendung von einer Keramik-Trägerfolie, zwei Leiterschichten (Bedruck umseitig) und zwei Schichten Dielektrikum zu einer gesamten Dicke aller fünf Schichten von  $\approx 1,5$  mm. Um die Folien besser fixieren zu können und um unnötige Streuflüsse zu vermeiden, wird trotz der geringen Schichtdicke eine Polhöhe von 3 mm gewählt. Dies lässt für die Konstruktion auch die Möglichkeit offen weitere Lagen mit Wicklungen einzubringen und so die Lagerkraft oder die Anpassung an den nötigen Leistungssteller zu ändern.

Aus den nun vorliegenden Kenngrößen kann der Bauraum der beiden Lager berechnet werden. Zum Einen wird so das Lagervolumen bestimmt, zum Anderen kann die Materialersparnis im Eisenkreis errechnet werden, die bei der Konstruktion ein maßgeblicher Faktor für das Gewicht und die Kosten ist.

Um auch mit den siebgedruckten Wicklungen einen sicheren Betrieb des Lagers gewährleisten zu können, muss eine thermische Betrachtung erfolgen, da mit den neuartigen Wicklungen sowohl weniger Oberfläche zur Wärmeabfuhr zur Verfügung steht als auch höherer Verluste im Betrieb auftreten. Eine erste Abschätzung des thermischen Verhaltens erfolgt in der Regel durch bestimmen des charakteristischen Produkts  $AS$ . Dazu ist es nötig die genaue Stromdichte zu kennen und den Strombelag zu bestimmen. Der Strombelag für die Anordnung

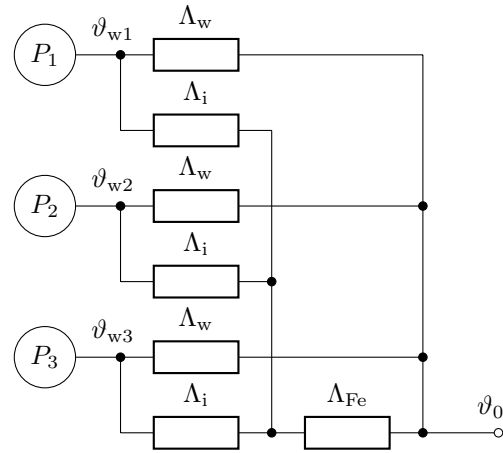


Abbildung 5. Einfaches thermisches Ersatzschaltbild eines Unipolarlagers

mit siebgedruckter Wicklung beträgt

$$A_s = \frac{2 \cdot N \cdot m_s \cdot I_{\text{phw},n}}{\pi \cdot d_i} = 26,5 \frac{\text{kA}}{\text{m}} \quad (4)$$

Damit errechnet sich ein charakteristisches Produkt von

$$AS = A_s \cdot S_L = 26,5 \frac{\text{A}}{\text{mm}} \cdot 100 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} = 2650 \frac{\text{A}^2}{\text{mm}^3} \quad (5)$$

Da das Ergebnis erwartungsgemäß vergleichsweise sehr hoch ist, muss eine detaillierte thermische Betrachtung erfolgen. Für diese wird im Weiteren von der thermischen Berechnung eines klassischen unipolaren Magnetlagers ausgegangen und das Formelwerk auf die siebgedruckte Wicklung übertragen.

#### IV. THERMISCHE ABSCHÄTZUNG

Abbildung 5 zeigt ein einfaches thermisches Ersatzschaltbild eines Unipolarlagers. Um das Wärmequellennetz so aufbauen zu können, wird angenommen, dass das Lager, genauer gesagt, die Wickelköpfe und das Blechpaket durch Luft mit der Temperatur  $\vartheta_0$  gekühlt werden. Weiterhin stellt jede Spule eine Verlustquelle dar und das Eisen habe an seiner Oberfläche überall die gleiche Temperatur.

Die thermischen Leitwerte mit den Indizes 'w' bzw. 'Fe' beschreiben den Wärmeübergang vom Wickelkopf bzw. vom Blechpaket zum Kühlmedium und wurden über den Zusammenhang

$$\Lambda = O\alpha \quad (6)$$

bestimmt. Die Wärmeübergangszahl wird mit  $\alpha = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$  für freie Konvektion angenommen. Bei der Berechnung der Blechpaketoberfläche wurde die Mantelfläche sowie die Stirnflächen, insofern diese nicht von den Wickelköpfen bedeckt waren, berücksichtigt.

Der thermische Leitwert mit dem Index 'i' bildet die Wärmeleitung durch die Nutwandisolierung zwischen der jeweiligen Wicklung und dem Eisen ab und lässt sich über den Ansatz

$$\Lambda_i = \frac{O_i}{d_i} \lambda_i \quad (7)$$

Tabelle III  
ERGEBNISSE DES THERMISCHEN MODELLS IM VERGLEICH

		Kupfer	Siebdruck
Nennstrom	$I_N$	4 A	
Widerstand einer Spule	$R_{sp}$	0,56 $\Omega$	5,60 $\Omega$
Verlustleistung Sp. 1	$P_1$	8,96 W	89,6 W
Verlustleistung Sp. 2, 3	$P_2, P_3$	2,24 W	22,4 W
th. Lw. Wickelkopf-Luft	$A_w$	0,029 W/K	0,134 W/K
th. Lw. Nutwand	$A_i$	0,166 W/K	3,382 W/K
th. Lw. Blechpaket-Luft	$A_{Fe}$	0,200 W/K	0,150 W/K
Endübertemp. Wicklung	$\theta_{e,w}$	80 K	250 K
Endübertemp. Eisen	$\theta_{e,Fe}$	42 K	238 K

berechnen. Für die Kupferwicklung wurde als Nutwandisolierung von einer lackgetränkten Papierschicht mit einer Dicke von  $d_i = 1,2$  mm ausgegangen, die einen spezifischen thermischen Leitwert von  $\lambda_i = 0,16$  W/mK besitzt. Auf Grund dessen kann der thermische Leitwert des Eisens vernachlässigt werden.

Das thermische Modell der siebgedruckten Wicklung unterscheidet sich nicht wesentlich von dem bereits vorgestellten. Die Wicklung wird mittels Wärmeleitpaste in den Nutgrund eingeklebt. Damit ändert sich, neben den Oberflächen der jeweiligen Teile, nur der thermische Leitwert für die Übertragung der thermischen Energie. Die Wärmeleitpaste wird mit einer Schichtdicke von ca.  $d_i = 0,15$  mm aufgetragen und hat einen spezifischen thermischen Leitwert von  $\lambda_{i,Paste} = 10$  W/mK. Weiterhin muss nun das Eisen betrachtet werden. Hier wurde die Rückenhöhe  $d_{i,Fe} = 10$  mm für Dicke angenommen und ein konstanter spezifischer thermischer Leitwert  $\lambda_{i,Fe} = 30$  W/mK. In Tabelle III sind die aus dem thermischen Modell erhaltenen Werte zusammengefasst dargestellt. Es ist gut ersichtlich, dass sich die höhere Verlustleistung der siebgedruckten Wicklung in einer vergleichsweise hohen Endübertemperatur niederschlägt. Diese ist jedoch mit einer siebgedruckten Wicklung beherrschbar und wurde im Extremfall berechnet, in dem das Lager ohne Einhausung lediglich durch freie Konvektion thermische Energie abführen kann.

## V. SIMULATIONSERGEBNISSE UND PRAKTISCHE ERFAHRUNGEN

Um die in den vorangegangenen Abschnitten geführten Betrachtungen zu untermauern wurden zwei FEM Simulationen der Anordnung mit Hilfe der Software FEMM durchgeführt. Als Zielgrößen der Simulation wurde eine Lagerkraft von 250 N gewählt und als Referenzmodell das klassische Unipolarlager aus [20] modelliert. Vergleichend dazu wurde unter Annahme der gleichen Lagerkraft als Zielgröße ein Lager mit siebgedruckten Wicklungen simuliert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 und 7 dargestellt und zeigen deutlich, dass die Außenabmessungen des Lagers mit siebgedruckten Wicklungen bei gleicher Lagerkraft und gleichem Wellendurchmesser deutlich geringer sind.

Aus den so gewonnenen Ergebnissen und den vorangegangenen Berechnungen lässt sich unter Zuhilfenahme der Lagergeometrie der Ausnutzungsfaktor eines jeden Lagers

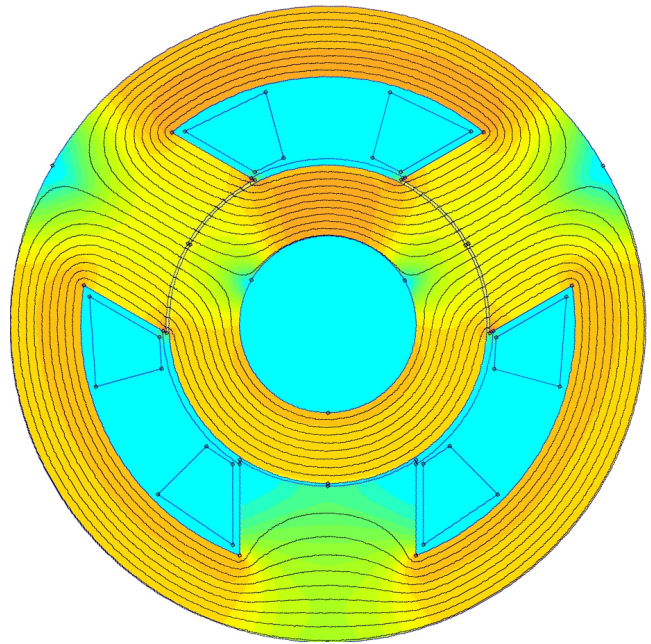


Abbildung 6. Unipolarlager in klassischer Bauart mit einem Rotordurchmesser von 45 mm und einem Außendurchmesser von 95 mm. Die maximale Lagerkraft beträgt ca. 250 N

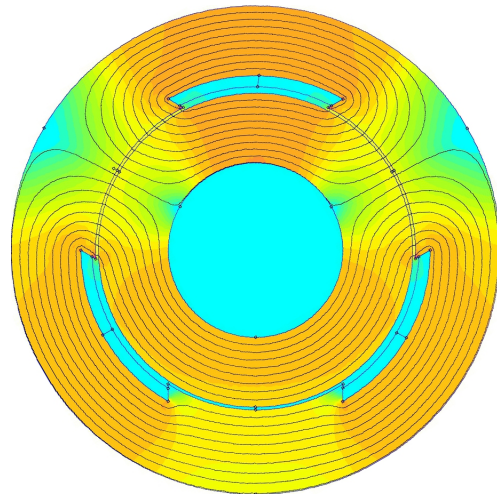


Abbildung 7. Unipolarlager mit siebgedruckter Wicklung, einem Rotordurchmesser von 45 mm, einem Außendurchmesser von 72 mm und einer maximalen Lagerkraft von ca. 250 N

bestimmen. Dieser wird als Verhältnis aus Lagerkraft und Bauvolumen berechnet und ergibt sich zu

$$A_{\text{klassisch}} = 0,88 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad (8)$$

für das Lager mit klassischen Kupferdrahtwicklungen und zu

$$A_{\text{siebgedruckt}} = 2,05 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad (9)$$

für das neuartige Lager mit siebgedruckten Wicklungen. Es wird deutlich, dass eine siebgedruckte Wicklung enorme Vortei-



le im Bereich der Ausnutzung von vorhandenem Bauvolumen hat.

Im Weiteren sollen einige praktische Erfahrungen von der Anwendung der siebgedruckten Wicklungen für elektrische Kleinantriebe, wie sie in [1] beschrieben werden, dargestellt werden. Diese haben sich im Laborbetrieb bewährt. Neben den geringen Herstellungskosten und der technologisch unkomplizierten Montage hat sich vor allem eine sehr gute Reproduzierbarkeit des Siebdruckprozesses, als klassisches Massenfertigungsverfahren, bemerkbar gemacht. Eine Übertragung der Fertigungstechnologie auf magnetische Lagerungen ist auf Grund der Artverwandtheit der beiden Konstruktionen logische Konsequenz um die Vorteile der Siebdrucktechnologie auch für magnetische Lagerungen nutzen zu können. Als besonders vorteilhaft haben sich dabei die folgenden Punkte erwiesen.

- 1) bei Einbau formbare Wicklung durch Keramikfolie als Trägermaterial
- 2) geringes Bauvolumen der siebgedruckten Strukturen
- 3) reduzierter Platzbedarf im Bereich des Wickelkopfes
- 4) integrierte gedruckte Sensorik sowie perspektivisch auch gedruckte und integrierte Leistungselektronik

Neben den genannten Vorteilen ist als bisher einziges Defizit ein vergleichsweise hoher ohmscher Widerstand der siebgedruckten Strukturen zu nennen. Dieser führt unweigerlich zu ebenso erhöhten Verlusten, die zwar beherrschbar sind, sich aber negativ auf die Energiebilanz der Anordnung auswirken. Deshalb ist für die zukünftige Forschungsarbeit angedacht diesem Thema besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Als relevante Ansatzpunkte ergeben sich dabei die Erhöhung der Schichtdicke der Silberstrukturen, sowie die Reduzierung des spezifischen elektrischen Widerstandes der verwendeten Druckpaste. Beide Ansatzpunkte haben nach dem aktuellen Stand der Forschung großes Entwicklungspotential und müssen ausgehend von der bis vor kurzem noch unbekannt Anwendung für Wicklungen elektrischer Energiewandler dahingehend optimiert werden. Aufgrund dieser Maßnahme ist davon auszugehen, dass in Zukunft vergleichbare ohmsche Widerstände wie bei konventionellen Wicklungen aus Runddraht erreichbar sind.

## VI. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurden der Bauraumbedarf eines magnetischen unipolaren Lagers und eine Möglichkeit zu dessen Reduzierung untersucht. Als wichtigste Neuerung ist die Verwendung von siebgedruckten Wicklungen zu nennen. Diese sind technisch sowohl in der Lage, trotz ihrer geringen Abmessungen, vergleichbare Magnetisierungsströme aufzubringen. Dies ist vor allem deshalb möglich, weil die Leiterstrukturen ein sehr günstiges Verhältnis von Querschnittfläche zu Oberfläche ausweisen und so ein besserer Wärmeabtransport gewährleistet wird. Detaillierte, vor allem praktische Untersuchungen zum thermischen Verhalten der siebgedruckten Wicklung bei Verwendung in magnetischen Lagerungen stehen zwar noch aus, es kann aber auf Grund der Erfahrungen bei Kleinantrieben davon ausgegangen werden, dass eine thermische Stabilität auch bei extremen Stromdichten bis  $100 \text{ A/mm}^2$  gewährleistet werden kann.

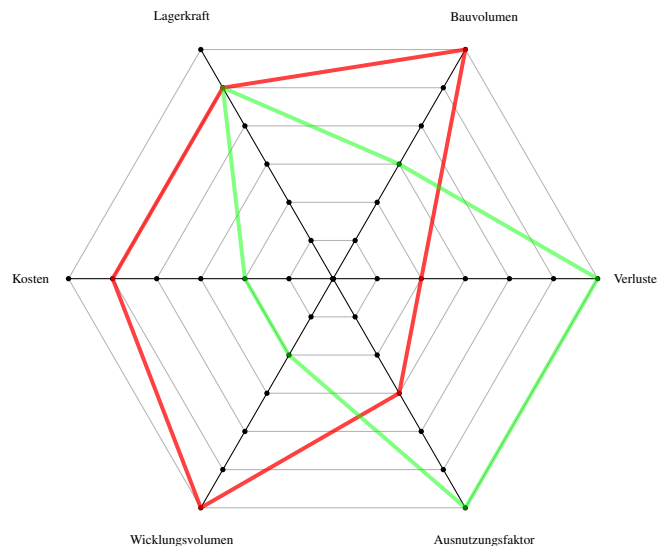


Abbildung 8. Vergleichende Bewertung der untersuchten Ausführungsformen von elektrischen Wicklungen für Unipolarlager aus diesem Beitrag. **Rot** dargestellt das klassische Unipolarlager und in **grün** ein vergleichbares Lager mit siebgedruckter Wicklung

In Abbildung 8 sind die wichtigsten Bewertungskriterien der verschiedenen Fertigungstechnologien vergleichend dargestellt. Als wichtigstes Ergebnis der angestellten Untersuchungen kann konstatiert werden, dass im Vergleich zu konventionell ausgeführten Wicklungen unter Verwendung siebgedruckter Strukturen eine erhebliche Bauumreduzierung von bis zu 50 Volumenprozent erzielt werden kann und wichtige Eigenschaften der magnetischen Lagerung, wie Tragkraft, Dynamik und Kosten unbeeinflusst bleiben oder verbessert werden können. Abschließend muss aber festgestellt werden, dass für einen industriellen Einsatz der siebgedruckten Wicklungen bei magnetischen Lagerungen noch weitere praktische Untersuchungen notwendig sind, die eine verlässliche Aussage zur mechanischen und thermischen Stabilität der Wicklungen im Dauereinsatz liefern. Außerdem sind Bestrebungen zu unternehmen um die ohmschen Verluste der Wicklungen weiter reduzieren zu können, da hier im Vergleich zu den konventionellen Wicklungen noch nicht von einer Äquivalenz gesprochen werden kann.

## LITERATUR

- [1] P. Bräuer, T. Schuhmann and R. Werner, *Screen Printed Windings for Small-Power Electrical Machines*, The 8th France-Japan and 6th Europe-Asia Congress on Mechatronics, Yokohama 2010,
- [2] Deutsches Patent- und Markenamt, *Deutsche Patentveröffentlichung: Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschine und deren Verwendung*, DE 3447979 A1
- [3] D. Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, 2. Edition Cranston, Rhode Island, United States of America: The Writers' Collective, 2003.
- [4] G. Müller, K. Vogt and B. Ponick, "(in German)" *Berechnung elektrischer Maschinen*, 6. Auflage Weinheim, Deutschland: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2008.
- [5] H. Jordan, F. Lax, "(in German)" *Untersuchungen des Einflusses einer nicht in den Nutmittellinien konzentriert vorausgesetzten Durchflutung auf die doppelverketete Streuung*, Deutschland: E u. M, 1940.

- [6] E. Bolte, A. Hammers and K. Stips, *Elektromotor*, Patent EP0764357B1. München, Deutschland: Deutsches Patent und Markenamt, 1998.
- [7] O. Kazuyuki, *laminated coil and manufacture thereof*, Patent JP 7297032 (A). Japan: 1995.
- [8] H.-J. Hanke (Hrsg.), “(in German)” *Baugruppentechologie der Elektronik*, Berlin, Deutschland: Verlag Technik, 1994.
- [9] M. Fairley (Hrsg.), *RFID Smart Labels - A “How to” guide to manufacturing and performance for the label converter*, Düsseldorf, Deutschland: Tarsus Publishing Ltd., 2005.
- [10] A. Mette, G. Emanuel, D. Erath, R. Preu, G. Willeke, *High Efficiencies On Large Area Screen Printed Silicon Solar Cells and Contacting High Sheet Resistance Emitters Using Hotmelt Ink*, Dresden, Deutschland: 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference., 2006.
- [11] M. Härting, J. Zhang, D. R. Gamota, D. T. Britton, *Fully printed silicon field effect transistors*, electronic magazine: APPLIED PHYSICS LETTERS 94., 2009.
- [12] A. Knobloch, A. Bernds, W. Clemens, *Printed Polymer Transistors*, First International IEEE Conference on: Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics., 2001.
- [13] S.-L. Chen, C.-T. Hsu: *Optimal Design of a Three-Pole Active Magnetic Bearing*. In: IEEE Transactions on Magnetics 38 (2002), S. 3458-3466
- [14] A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa, M. Oshima, M. Takemoto, D. G. Dorrell: *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*. 1. Auflage. Oxford: Newnes, 2008.
- [15] W. Hofmann: *Analyse eines unipolaren dreipoligen Radialmagnetlagers*, In: Tagungsband 5. Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Kassel (2001), S. 69-76
- [16] T. Mang, W. Dresel (Hrsg.): *Lubricants and Lubrications*. 2. Auflage Weinheim: Wiley-VCH, 2001.
- [17] T. Schuhmann, W. Hofmann, E. Engelhardt: *Erhöhung der Energieeffizienz schnelldrehender elektrischer Antriebe durch den Einsatz aktiver magnetischer Lagerungen*, In: Tagungsband Internationaler ETG-Kongress (2007), S. 227 ? 236.
- [18] T. Schuhmann: *Optimale Zustandsschätzung und -regelung an Magnetlagern mit integrierten kapazitiven Lagesensoren*, Dissertation, TU Dresden, 2011.
- [19] G. Schweitzer, E. H. Maslen: *Magnetic bearings : theory, design, and application to rotating machinery*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [20] M. Bartscht: *Auslegung eines Unipolar-Radialmagnetlagers*, Studienarbeit: Technische Universität Chemnitz, 2009.