

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 105 (2014)
Heft: 7

Artikel: Einzelspulantrieb für Umpulanlagen
Autor: Huth, Gerhard / Löhlein, Bernd
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856263>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Einzelspulantrieb für Umspulanlagen

Schnelle PM-Synchronmotoren mit SMC-Materialien

Umspulanlagen für Natur- und Chemiefasern bestehen aus Hunderten von Spulstellen, die heute über umlaufende Riemen angetrieben werden. Mit Einzelspulantrieben erreicht man in solchen Anlagen höhere Fadengeschwindigkeiten und die Wartungsanfälligkeit wird reduziert, da der Riemen entfällt. Dazu werden geregelte Antriebe mit einem hohen Wirkungsgrad benötigt. Schnelle Permanentmagnet-Synchronmotoren mit SMC-Materialien eignen sich gut dafür, wie dieser Beitrag zeigt.

Gerhard Huth, Bernd Löhlein

Für Einzelspulantriebe in Umspulanlagen werden geregelte Antriebe im Drehzahlstellbereich 15 000 bis 25 000 min⁻¹ mit einem hohen Wirkungsgrad und einer Bemessungsleistung von etwa 50–100 W benötigt. Für diese Antriebsaufgabe bietet sich der feldorientiert betriebene Permanentmagnet-Synchronmotor (PM-Synchronmotor) an, bei dem die Eisenverluste mit der Drehzahl deutlich ansteigen. Die Verwendung verlustarmer Elektrobleche reduziert diesen Effekt zwar, ist aber mit entsprechenden Kosten verbunden. Auch wenn sich die Herstellkosten durch Nutzung der Zahnspulentechnik weiter senken lassen, so stellt sich die Frage nach alternativen Aktivteilkonzepten.

Statt Blechpaketen können im Ständer SMC-Materialien verwendet werden, deren positive Eigenschaften besonders bei hohen Drehzahlen zur Geltung kommen. Ziel dieses Beitrags ist es, das stationäre Betriebsverhalten hochtouriger PM-Synchronmotoren in SMC-Technologie am Beispiel einer Textilspindelapplikation aufzuzeigen.

SMC-Material

SMC-Materialien – SMC steht für Soft Magnetic Composites – bestehen aus oberflächlich elektrisch isolierend beschichtetem Pulver auf der Basis von Eisen oder Eisenlegierungen, das sich in komplexe Formen pressen lässt. In **Bild 1** sind einige Pulverteilchen im Schnitt skizziert. Die rot dargestellte Isolationsschicht soll verhindern, dass sich Wirbelströme im Verbund der SMC-Teilchen ausbilden können. Die Isolationsschichten wirken magnetisch wie Luft und senken so die Permeabilität des späteren Formteils. Abschliessend

wird dem SMC-Granulat ein Binde- und Gleitmittel zugesetzt, dessen Art und Volumeneinsatz von der späteren Weiterverarbeitung abhängig ist. [1]

Um die Ummagnetisierungsverluste zu limitieren, ist es sinnvoll, die Korngrösse des SMC-Granulats mit zunehmender Einsatzfrequenz zu reduzieren. Mit geringerer Korngrösse steigt aber die Anzahl der Isolationsschichten und die relative Permeabilität des Formteils sinkt. Im unteren Frequenzbereich von 200 bis etwa 600 Hz dominieren die mit der Frequenz linear ansteigenden Hystereseverluste, es werden hier daher Korngrössen im Bereich 500 µm bis 150 µm eingesetzt. Im mittleren Frequenzbereich von 600 bis 2000 Hz werden bevorzugt Korngrössen im Bereich 150 µm bis 40 µm verwendet, da hier die quadratisch mit der Frequenz ansteigenden Wirbelstromverluste dominieren.

Am Markt erhältliche SMC-Materialien [2] sind nur für die Formteilherstellung im Pressverfahren geeignet. Die

Formteile sollten nach dem Pressvorgang nicht mehr bearbeitet werden, da sich sonst die magnetischen Eigenschaften verschlechtern. Diesem Defizit wird mit dem SMC-Material SPM «Somaloy Prototyping Material» Rechnung getragen, das in Rondenform erhältlich ist, aus denen die Formteile für den Prototypbau herausgearbeitet werden können. Die Zusammensetzung von SPM ist so gewählt, dass nach der spanenden Bearbeitung technische Eigenschaften vorliegen, welche mit einem für das Pressverfahren bestimmten SMC-Material vergleichbar sind.

In **Bild 2** sind die spezifischen Eisenverluste zweier SMC-Materialien bei einer Induktion von 1 T im Vergleich zu verschiedenen Elektroblechqualitäten in Abhängigkeit der Frequenz dargestellt. Bei kleinen Frequenzen sind die Hystereseverluste in den SMC-Materialien deutlich grösser als bei Elektroblech. Bei höheren Frequenzen dominieren die Wirbelstromverluste und die SMC-Materialien zeigen ihre Vorteile. Die ermittelten Kurvenverläufe führen zu Schnittpunkten, in denen die Eisenverluste identisch sind. Diese «Cross-Over-Punkte» dienen als Kriterium bei der Materialwahl.

Ständerkonzept in SMC-Technik

Bei klassischen PM-Synchronmotoren stellt, neben den Seltenerd magneten, das geblechte Ständeraktivteil die kostenintensivste Komponente dar. Ziel ist es daher, für das Ständeraktivteil ein alternatives Konzept mit Pulververbundwerkstoffen zu entwickeln, das eine möglichst

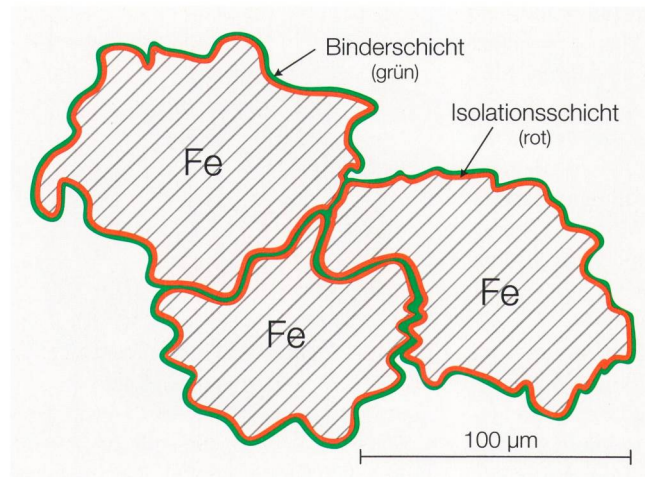


Bild 1 Gefüge von SMC-Material.

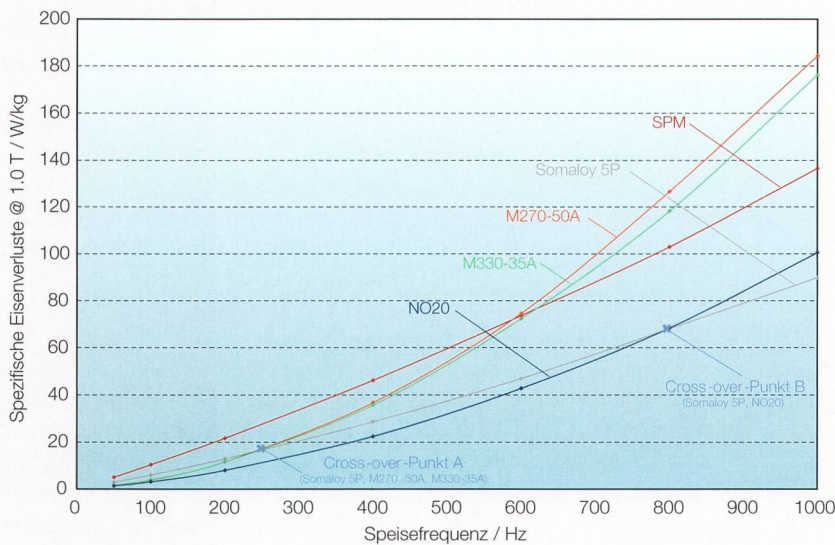


Bild 2 Spezifische Eisenverluste von SMC-Material im Vergleich zu Elektroblech.

einfache Fertigungstechnik ermöglicht und das Potenzial zur Automatisierung aufweist. [3] Der Läufer wird in der betrachteten Leistungsklasse konventionell mit Luftspaltnagneten ausgeführt. Werden keine hohen Luftspaltinduktionen benötigt und steht der Kostenaspekt im Vordergrund, so ist neben der Ausführung mit gesinterten Seltenerdmaterialien auch der Einsatz von kunststoffgebundenen Ferrit- oder Seltenerdmaterialien eine Option.

Im Weiteren wird das Konzept des «Blisterständers» betrachtet. [4, 6] Der Blisterständer nutzt einen dünnwandigen, mit Taschen ausgeführten Isolierkörper, der in seiner Abwicklung an eine Blisterverpackung erinnert. Der Aufbau des Blisterständers soll am Beispiel eines 4-poligen Ständers betrachtet werden, der mit der Ständernutenzahl $N_1 = 6$ sowie einer Zahnspulenwicklung mit der Lochzahl $q = 1/2$ ausgeführt ist. In Bild 3 ist der entsprechende Blister-Isolierkörper dargestellt, der im ersten Arbeitsgang mit den vorgefertigten Zahnspulen bestückt wird. Der Blister-Isolierkörper ist so ausgeführt, dass die Zahnspulen formschlüssig gehalten werden.

Im nächsten Arbeitsgang werden die vorgefertigten SMC-Zahnelemente nach Bild 4 in die beidseitig offenen Zahntaschen des Blister-Isolierkörpers gesteckt. Der Zahnkopf übernimmt dabei automatisch die Fixierung der Zahnspule in Richtung Ständerbohrung.

Zur Unterdrückung der Nutrastung werden Ständer und Läufer mit einer gegenseitigen Schrägung oder Staffelung ausgeführt. Beim Blisterständer kann die gegenseitige Schrägung relativ ein-

fach durch Schrägstellung der Zahnköpfe realisiert werden.

Dann wird der fertig bestückte Blister-Isolierkörper in das SMC-Jochrohr eingebracht und mit den Zahnelementen verklebt (Bild 5). Alternativ ist auch eine formschlüssige Verbindung denkbar. Im letzten Arbeitsgang werden die Zahnspu-

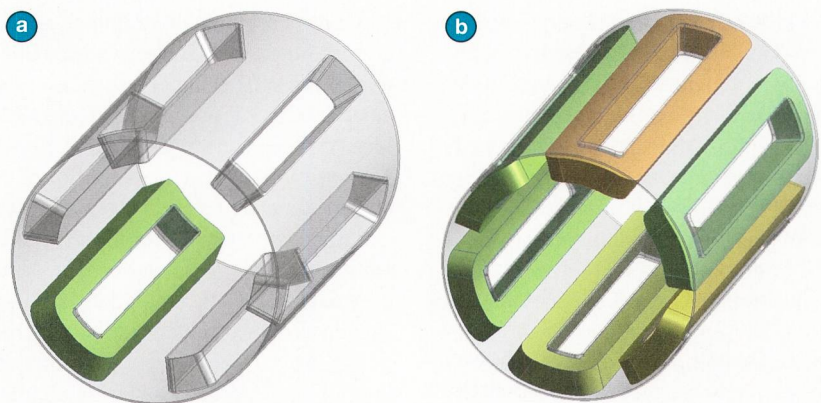


Bild 3 Blister-Isolierkörper mit Zahnspulen bestückt.

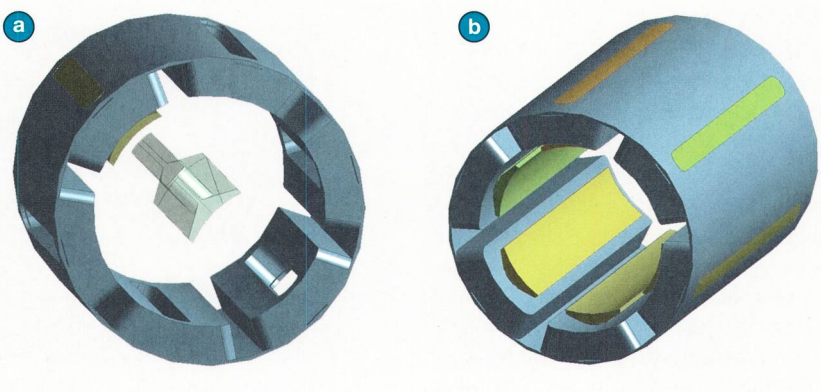


Bild 4 Blister-Isolierkörper mit Zahnspulen und SMC-Zahnelementen bestückt.

len zur 3-strängigen Drehfeldwicklung geschaltet und der komplette Ständer imprägniert oder vergossen.

Funktionsmuster

Für den optimierten Entwurf wird ein Simulationsprogramm auf der Basis analytischer elektromagnetischer und thermischer Modelle eingesetzt. Der Simulationsalgorithmus unterstellt, dass der PM-Synchronmotor am U-ZK-Umrichter feldorientiert betrieben wird. Für eine maximale Drehmomentausbeute wird der sinusförmige Strangstrom stets in Phase zur Polradspannung eingepreßt. Da der Läufer mit am Luftspalt angeordneten Magneten ausgeführt wird, darf Vollpolverhalten angenommen werden. Es gilt damit das in Bild 6 dargestellte einphasige Ersatzschaltbild. Die Berechnung der Ersatzschaltbildelemente erfolgt in Anlehnung an [5]

Die Magnetkreisberechnung führt auf die Induktionswerte im Joch-Zahn-Bereich und ermöglicht die Berechnung der Eisenverluste. Zusammen mit den Stromwärmeverlusten und prinzipiell den Luft- und Lagerreibungsverlusten sind damit Aussagen über den Wir-

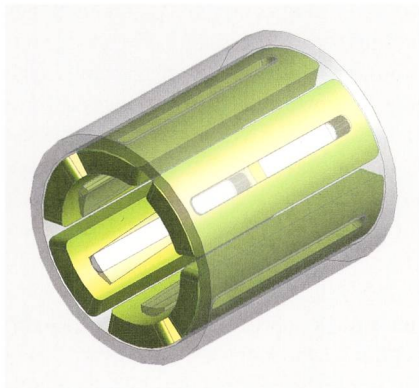


Bild 5 Finale Montage des Ständers. Das SMC-Zahnelement mit geschrägtem Zahnkopf ist weiss dargestellt.

kungsgrad möglich. Bei den betrachteten Textilspindeln sind die Aktivteile von Ständer und Läufer integraler Bestandteil des Prozesses. Die Reibungsverluste werden daher mit zum prozessbedingten Lastdrehmoment gerechnet und werden nicht bei der Wirkungsgradberechnung des Motors berücksichtigt. Die Verluste sind aber auch die direkten Eingabegrößen für das thermische Modell, das in den Simulationsalgorithmus, wie auch die Magnetkreisberechnung, iterativ eingebunden ist. Die thermischen Widerstände des stationären Wärmequellennetzwerks ergeben sich aus den geometrischen Abmessungen sowie den Werkstoffparametern. Die Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten SMC-Werkstoffe ($\lambda \approx 25 \text{ W/K}$) ist praktisch identisch mit jener des verlustarmen Elektroblechs M270-50A ($\lambda \approx 23 \text{ W/K}$).

Die Läufer der Funktionsmuster wurden mit am Luftspalt angeordneten Magneten in zwei Konstruktionsvarianten gemäss **Bild 7** ausgeführt. Die linke Läufervariante besteht aus einer massiven Stahlwelle, auf die NdFeB-Magnetschalen mit einer umgebenden Glasfaserbandage aufgebracht sind. Die rechte Läufervariante besitzt ebenfalls eine massive Stahlwelle, auf die ein Magnetring aus gespritztem Ferrit-Compound geklebt ist.

Parameterstudien

Da die Aktivteile des PM-Synchronmotors in die Textilspindel integriert werden, sind sowohl Aussen- und Bohrungsdurchmesser (64 mm / 37 mm) als auch die axiale Blechpaketlänge (25 mm) als feste Transfermasse vorgegeben. Ständerzahnbreite und Ständerjochhöhe sind jedoch in gewissen Grenzen frei wählbar. Eine weitere Randbedingung bei der Auslegung sind die thermischen Verhältnisse. Bei einer maximalen Umgebungstempe-

ratur von 50°C darf die mittlere Wicklungserwärmung maximal 40 K betragen. Das Ergebnis dieser Parameterstudie ist in **Bild 8** dargestellt.

Wie den Darstellungen entnommen werden kann, können für das thermisch zulässige Drehmoment und für den Wirkungsgrad eindeutige Optima ausgewiesen werden. Da sich die Lage dieser Optima nicht wesentlich unterscheidet, wurde für die Auslegung der Funktionsmuster als Optimierungs-Zielfunktion das Produkt aus Drehmoment und Wirkungsgrad gewählt. Nach **Bild 8** ergibt sich eine optimale Ständerzahnbreite von 5,1 mm und eine optimale Ständerjochhöhe von 5,4 mm. Nach der Simulation kann ein Wirkungsgrad von über 87 % erreicht werden. Die fertigen Aktivteile von Ständer und Läufer sind für diese Ausführung in **Bild 9** dargestellt.

Versuchsaufbau

Wegen der hohen Drehzahlen muss beim Versuchsaufbau aus schwingungstechnischen Gründen auf einen möglichst kurzen Wellenstrang geachtet werden. Als Belastungsmaschine kommt daher eine Wirbelstrombremse zum Einsatz, deren Reaktionsdrehmoment gemessen wird.

Läufervariante	R1	R2
Messung	92 mNm 87 %	102 mNm 89 %
Simulation	90 mNm 87 %	96 mNm 88 %

Tabelle 1 Vergleich des thermisch zulässigen Drehmoments und des Wirkungsgrades bei 20000 min⁻¹ (Vergleich von Messung und Simulation).

Versuchsergebnisse

In **Tabelle 1** sind die experimentellen Ergebnisse von thermisch zulässigem Drehmoment und zugehörigem Wirkungsgrad bei Bemessungsdrehzahl 20000 min⁻¹ im direkten Vergleich zur Simulation für beide Läufervarianten zusammengestellt. Wie der Vergleich von Messung und Simulation zeigt, ist die gewählte Modellierung durchaus praxistauglich. Läufervariante R2 (Ferrit-Compound) hat wegen der leicht höheren Luftspaltinduktion im Vergleich zu Läufervariante R1 (NdFeB-Magnetschalen) leicht höhere Drehmomente und Wirkungsgrade.

Zusammenfassung

Hochtourige Antriebe im unteren Leistungsbereich gewinnen zunehmend an Bedeutung. Wegen der notwendigen

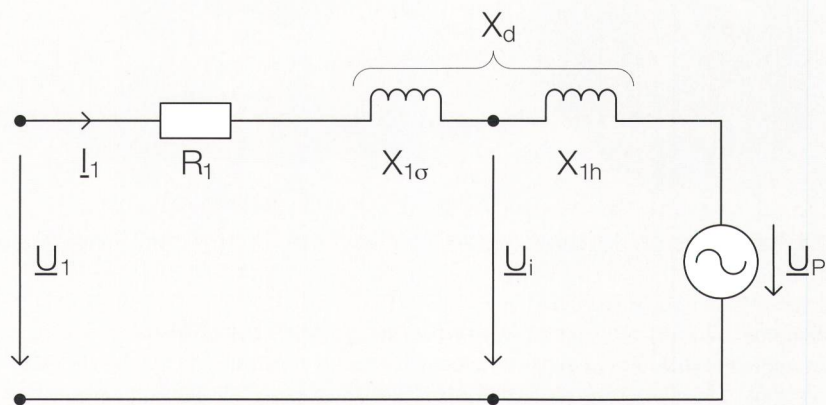


Bild 6 Einphasiges Ersatzschaltbild.

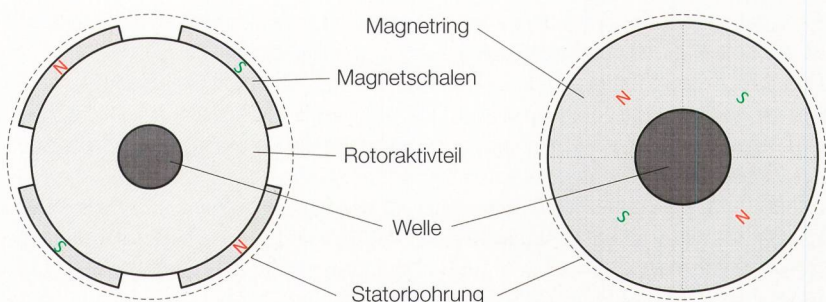


Bild 7 4-polige Läufervarianten, links mit NdFeB-Magnetschalen und rechts mit Ferrit-Compound.

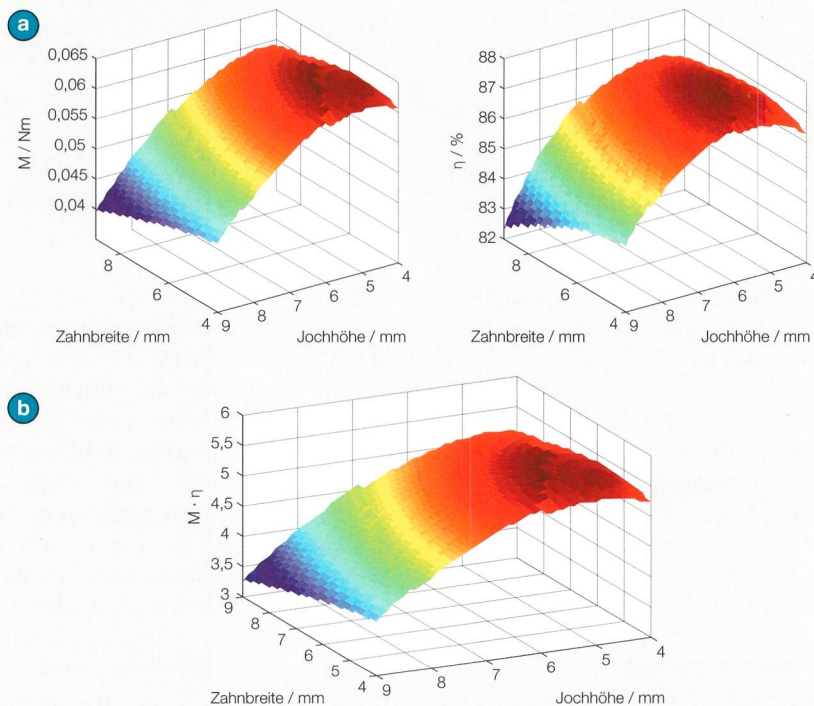


Bild 8 Parameterstudie für den PM-Synchronmotor bei Bemessungszahl $20\,000\text{ min}^{-1}$. Oben links: thermisch zulässiges Drehmoment, oben rechts: Wirkungsgrad, unten: Zielfunktion (Produkt aus Drehmoment und Wirkungsgrad).

Bilder: TU Kaiserslautern

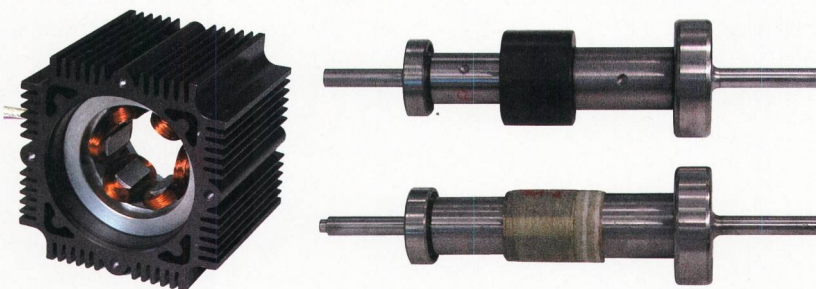


Bild 9 Komponenten des Funktionsmusters mit SMC-Blisterständer. Läufervariante R1 unten, R2 oben.

Résumé **Un entraînement à bobine unique pour les bobinoirs**

Des moteurs synchrones à aimant permanent rapides constitués de matériaux SMC
Les bobinoirs pour les fibres naturelles et chimiques se composent de plusieurs centaines de têtes de bobinage qui sont entraînées, à l'heure actuelle, par des courroies rotatives. Les entraînements à bobine unique permettent d'obtenir des vitesses de fil supérieures dans les bobinoirs et de réduire la nécessité de procéder à un entretien, étant donné que les courroies ne sont plus utilisées. Par contre, des entraînements régulés à haut rendement se révèlent nécessaires. Les moteurs synchrones à aimant permanent rapides constitués de matériaux SMC (Soft Magnetic Composites) se prêtent bien à ce type d'entraînement. Plusieurs expériences ont permis de fournir, dans le cadre d'un travail préliminaire, les connaissances les plus précises possible au sujet des propriétés des matériaux SMC disponibles. Le support « blister » doté d'un système de bobine dentée avantageux en termes de coûts est présenté en tant que concept de support innovant. La modélisation et la simulation du comportement en régime permanent ont permis d'établir les fondations nécessaires à l'élaboration d'un projet optimisé. Les résultats des essais ont été directement comparés avec ceux de la simulation et démontrent, d'une part, que la simulation est adaptée à la pratique et, d'autre part, que le support « blister » basé sur la technologie SMC respecte les spécifications.

No

hohen Energieeffizienz bietet sich der feldorientiert betriebene PM-Synchronmotor an, bei dem aber die Eisenverluste überproportional mit der Drehzahl ansteigen. Hochwertige Elektrobleche könnten diesem Effekt entgegenwirken, es stellt sich jedoch die Frage, inwieweit dies auch mit Pulververbundwerkstoffen erreicht werden kann.

Basis für die Entwicklung neuer Ständerkonzepte ist die möglichst genaue Kenntnis der Materialeigenschaften verfügbarer SMC-Werkstoffe, die als Vorarbeit experimentell ermittelt wurden. Als neuartiges Ständerkonzept wird der «Blisterständer» mit kostengünstiger Zahnspulentechnik vorgestellt.

Grundlage für einen optimierten Entwurf ist die Modellierung und Simulation des stationären Betriebsverhaltens. Für die experimentelle Erprobung wird ein Funktionsmuster für die Applikation einer hochtourigen integrierten Textilspindel ausgeführt. Anhand von Parameterstudien werden die Aktivteile ausgelegt. Als Optimierungs-Zielfunktion dient das Produkt aus thermisch zulässigem Drehmoment und Wirkungsgrad bei Bemessungsdrehzahl $20\,000\text{ min}^{-1}$.

Die Versuchsergebnisse werden im direkten Vergleich zur Simulation diskutiert. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Simulation praxistauglich ist und dass der «Blisterständer» in SMC-Technologie die Spezifikation erfüllt.

Referenzen

- [1] P. Jansson, Processing Aspects of Soft Magnetic Composites, Euro PM2000, München.
- [2] Höganäs AB, Somaloy Prototyping Material, data-sheet and machining guideline, 2010.
- [3] A. Lange, Weichmagnetische Werkstoffe – elektrotechnische Anwendungen, Pulvermetallurgie – Fortschritte in Prozessen und Funktionalität, Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Vol. 18, 2002, Hagen.
- [4] Patentschrift DE 102010041274.
- [5] G. Huth, Permanent-Magnet-Excited AC Servo Motors in Tooth-Coil Technology, IEEE Transactions on Energy, Vol. 2, 2005.
- [6] B. Löhlein, Entwurf und Optimierung von hochtourigen PM-Synchronmotoren in SMC-Technologie, Dissertation TU Kaiserslautern 2012.
- [7] B. Löhlein, G. Huth, Hochtourige PM-Synchronmotoren in SMC-Technik, Internationaler ETG-Kongress 2013, Berlin.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. **Gerhard Huth** hat seit November 2000 den Lehrstuhl für Mechatronik und Elektrische Antriebssysteme der Technischen Universität Kaiserslautern.

TU Kaiserslautern, DE-67663 Kaiserslautern
huth@eit.uni-kl.de

Dr.-Ing. **Bernd Löhlein** ist Oberingenieur am Lehrstuhl für Mechatronik und Elektrische Antriebssysteme der TU Kaiserslautern.

loehlein@eit.uni-kl.de