Duplexstahl für Elektromotoren

Autor(en): **Huth, Gerhard / Löhlein, Bernd**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **109 (2018)**

Heft 6

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-856954

Nutzungsbedingungen

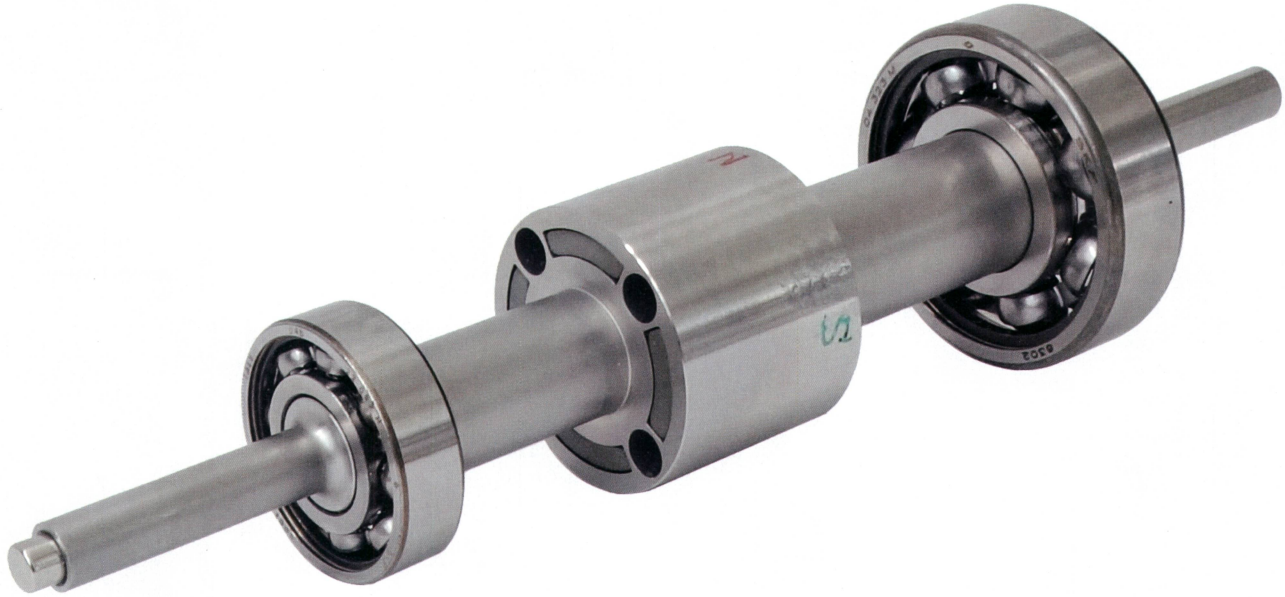
Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch



4-poliger PM-Läufer aus Duplexstahl mit innenliegenden Seltenerd-Magneten.

Duplexstahl für Elektromotoren

Neuartiger Motoraktivteil für PM-Synchronmotoren | Bei der Weiterentwicklung elektrischer Antriebe ist nebst der Steigerung der Leistungsdichte die Optimierung der Energieeffizienz eine zentrale Aufgabenstellung. Duplexstahl bietet sich bei höheren Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit als Konstruktionswerkstoff an, aufgrund der magnetischen Eigenschaften aber auch als Motoraktivteil.

TEXT GERHARD HUTH, BERND LÖHLEIN

Im Maschinenbau und bei Produktionsmaschinen kommen zunehmend PM-Synchronmotoren zum Einsatz, die feldorientiert an Umrichtern betrieben werden. Ein Grund hierfür ist die relativ hohe Drehmomentdichte bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz. Werden in der chemischen Industrie höhere Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit gestellt, so kommt bei elektrischen Maschinen als Wellenmaterial häufig sogenannter Duplexstahl zum Einsatz. Dieser nichtrostende Stahl besitzt neben Austenit eine zusätzliche Ferrit-Phase und verfügt so über geringe ferromagnetische Eigenschaften. Duplexstahl eignet sich damit grundsätzlich auch als Läuferaktivteil für PM-Synchronmotoren, wobei verschiedene Läuferkonzepte infrage kommen: Der massive Läuferkörper aus Duplexstahl kann an der Oberfläche mit Seltenerdmagneten (SE-Magneten) bestückt werden. Alternativ können die SE-Magnete auch in den Läuferkörper integriert sein. Auf diese Weise können sehr kompakte Läufer für hochtourige Applikationen konstruiert werden.

Eigenschaften von Duplexstahl

Duplexstähle sind bezüglich ihrer Eigenschaften zwischen den austenitischen und ferritischen, nichtrostenden Stählen einzuordnen. Namensgebend für den Duplexstahl ist die Zweiphasenstruktur, bei der Austenit und Ferrit gemeinsam vertreten sind. Der hier betrachtete Werkstoff mit der Werkstoffnummer 1.4462 besitzt einen Anteil an α-Ferrit von 40 – 50 %.

Duplexstahl wurde erstmals um 1930 in Schweden hergestellt und dann in den 1970er-Jahren weiterentwickelt. Es entstand ein Edelstahl, welcher eine gute Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion und Spannungsrisskorrosion mit einer relativ hohen mechanischen Festigkeit kombiniert.

Etwa 60 % des Marktvolumens an Duplexstahl entfällt auf die hier betrachtete Legierung 1.4462, die auch unter der Bezeichnung «Alloy 2205» bekannt ist.[1] Diese Legierung findet vorwiegend in der chemischen Industrie, in der Erdölindustrie und zunehmend auch im Offshore-Bereich

Bilder: TU Kaiserslautern

Verwendung. Einige wichtige Kenngrössen von Duplexstahl 1.4462 sind in der **Tabelle** zusammengestellt. Wenn im Weiteren vereinfacht von Duplexstahl gesprochen wird, so ist explizit diese Legierung gemeint.

Aufgrund des Ferrit-Anteils besitzt Duplexstahl schwach ausgeprägte ferromagnetische Eigenschaften. Anhand von standardisierten Ringproben **(Bild 1)** wurden die magnetischen Eigenschaften von Duplexstahl messtechnisch ermittelt.

In **Bild 2** ist als Ergebnis die B(H)-Neukurve von Duplexstahl dargestellt, die punktweise durch Gleichstrommagnetisierung bestimmt wurde. Aus der B(H)-Kurve lässt sich der Verlauf der relativen Permeabilität $\mu r(H)$ direkt punktweise ableiten. Im Vergleich zum Läuferaktivteil aus Elektroblech oder üblichem Wellenstahl weist Duplexstahl deutlich schlechtere magnetische Eigenschaften auf. Für näherungsweise Betrachtungen kann bei Duplexstahl von einer relativen Permeabilität von etwa 8–10 ausgegangen werden.

Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)	16
spez. Widerstand (20 °C)	Ω·m	$7{,}9 \cdot 10^{-7}$
spez. Wärmekapazität (20 °C)	J/(kg·K)	500
Massendichte	kg/m³	7800
Streckgrenze, typ.	MPa	550
Zugfestigkeit, typ.	MPa	850

Tabelle Kenngrössen von Duplexstahl 1.4462.

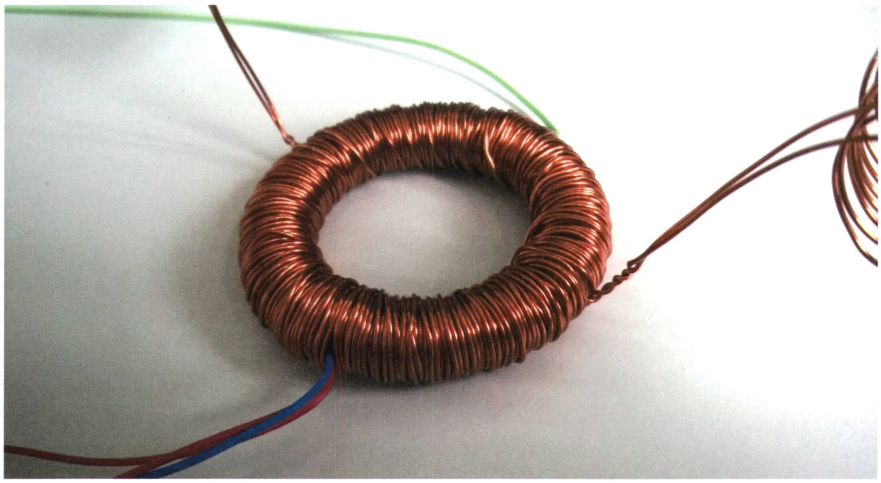


Bild 1 Ringprobe für die Bestimmung der magnetischen Eigenschaften.

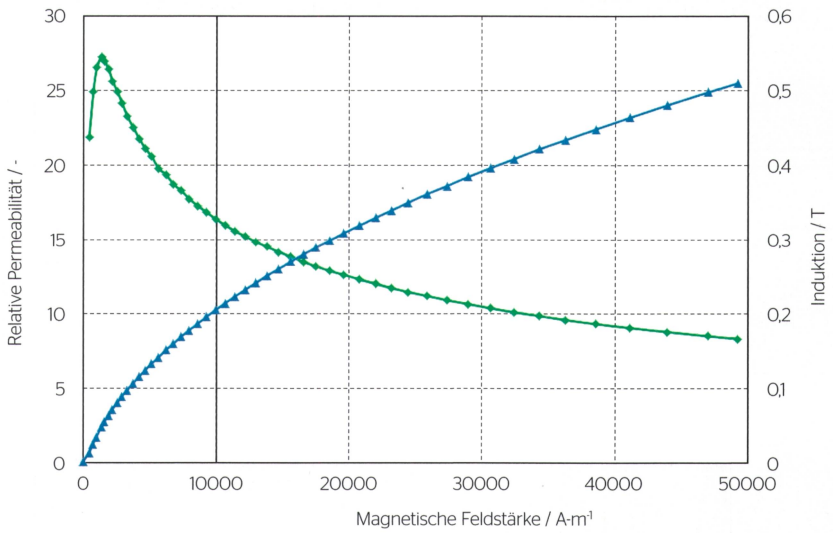


Bild 2 B(H)-Neukurve (blau), relative Permeabilität (grün) von Duplexstahl 1.4462.

PM-Läufer in Duplexstahl-Technik

Aufgrund der relativ geringen Permeabilität ist für den PM-Läufer ein Design anzustreben, das möglichst kurze Flusswege im mit Duplexstahl besetzten Läuferbereich aufweist. Dies führt nach Möglichkeit zu einem höherpoligen Entwurf, für den sich dann auch ein Ständer mit Zahnspulenwicklung ideal eignet. Im einfachsten Fall wird der PM-Läufer aus einem massiven Läuferkörper aus Duplexstahl gefertigt. Diese Ausführungsmöglichkeit wird durch den Umstand begünstigt, dass Duplexstahl gemäss der **Tabelle** zirka den 4-fachen elektrischen Widerstand von klassischem Wellenstahl aufweist. Permanentmagnete können, ähnlich wie bei AC-Servomotoren üblich, auf der Oberfläche des Läufers aufgeklebt werden. Diese werden mit einer Bandage oder einer Hülse gesichert.[2] Sollte der PM-Läufer betriebsmässig nass sein, zum Beispiel bei Verwendung in einer Spaltrohrmotorpumpe, so besteht die sichernde Hülse aus Edelstahl oder Hastelloy. Zum Schutz der SE-Magnete vor Korrosion werden die Läufer-Stirnseiten zusätzlich mit Endblechen verschweisst. Für ein 10-poliges Funktionsmuster der Baugrösse AH 63 mit den Bemessungsdaten 1,5 kW/3000 min^{-1} ist in **Bild 3** der PM-Läufer mit Oberflächenmagneten abgebildet. Die SE-Magnete werden mit einer 0,3 mm starken Edelstahlhülse gesichert. Da die Erprobung mit trockenem Läufer erfolgte, konnte auf die seitliche Abdichtung der Magnete verzichtet werden.

Wie wichtig ein möglichst hochpoliger Entwurf ist, erkennt man am Feldlinienbild des Funktionsmusters **(Bild 4)**, das für den Bemessungspunkt berechnet wurde. Durch die kurzen Feldwege im massiven Läuferkern ist der Einfluss der vergleichsweise geringen Permeabilität von Duplexstahl auf das Betriebsverhalten weniger ausgeprägt.

Bei einem alternativen Läuferdesign werden die SE-Magnete innerhalb von Magnettaschen im Läuferkörper positioniert. Hierzu muss der Läuferkörper

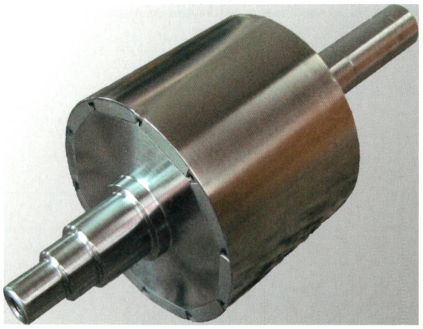


Bild 3 10-poliger PM-Läufer aus Duplexstahl mit Oberflächenmagneten und Edelstahlhülse.

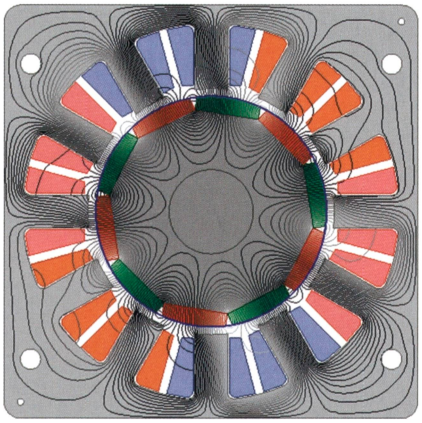


Bild 4 Feldliniendarstellung des 10-poligen Funktionsmusters im Bemessungspunkt.

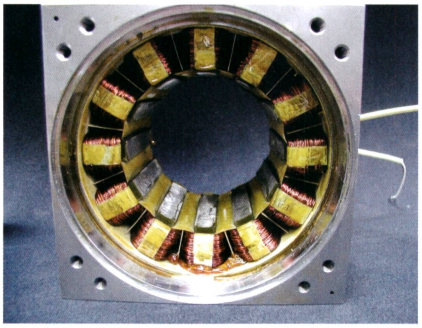


Bild 6 Drehfeldständer des 10-poligen Funktionsmusters.

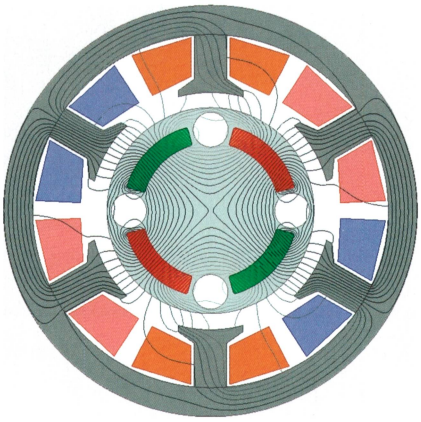


Bild 5 Feldliniendarstellung des 4-poligen Funktionsmusters im Bemessungspunkt.

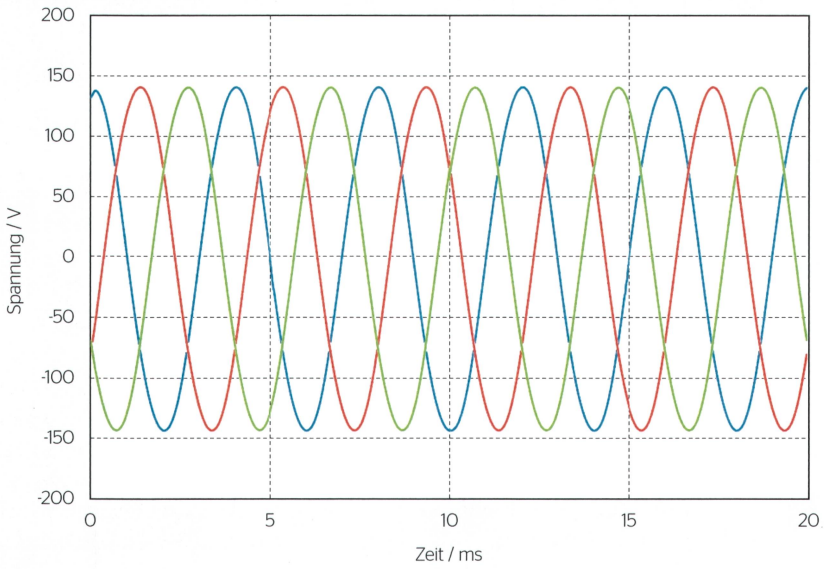


Bild 7 Gemessener zeitlicher Verlauf der induzierten Strangspannungen bei 3000 min^{-1}.

mit Magnettaschen versehen werden, was bei kürzeren Aktivteilen zum Beispiel durch Zirkularfräsen erfolgen kann.

Nach dem Einbringen der SE-Magnete in die Magnettaschen werden die Magnete durch Vergiessen gesichert. Dieses Läuferdesign eignet sich besonders für hochtourige Applikationen. [3,4]

Bei längeren Aktivteilen kann für den Läufer eine Modulbauweise gewählt werden. Diese Modulbauweise hat zusätzlich den Vorteil, dass die Läufermodule gestaffelt auf der Läuferwelle positioniert werden können, um die Drehmomentwelligkeit zu verbessern.[5] Ausserdem eignen sich Läufermodule für den Aufbau einer Baureihe, die durch die Anzahl der verwendeten Läufermodule definiert werden kann. Für ein 4-poliges Funktionsmuster der Baugrösse AH 36 mit den Bemessungsdaten 250 W/20 000 min^{-1} ist im Einstiegsbild der PM-Läufer mit innenliegenden SE-Magneten abgebildet.

Aufgrund der komplexen Geometrie und der nur schwach ausgeprägten ferromagnetischen Eigenschaften von Duplexstahl, verbunden mit der aufwendigen Berechnung der Eisenverluste im massiven Läuferkörper, erfolgt der Entwurf mittels FEM-Berechnungen. Für das 4-polige Funktionsmuster ist in **Bild 5** das simulierte Feldlinienbild im Bemessungspunkt dargestellt. Aufgrund der kleinen Läufer-Aktivteilabmessungen (Durchmesser = 32 mm, Länge = 25 mm) und der gewählten Magnethöhe (2,9 mm) ist der Feldweg im massiven Duplexstahl-Läuferkern unproblematisch.

Betriebsverhalten

Die vergleichsweise mässigen magnetischen Eigenschaften des Duplexstahls lassen zunächst auf ein unvorteilhaftes Betriebsverhalten des Motors schliessen. Dennoch lassen sich unter Verwendung von Duplexstahl hervorragende Betriebsdaten erreichen. Dies soll am Beispiel eines 10-poligen Funktionsmusters belegt werden, dessen Läufer in **Bild 3** dargestellt ist. Das Funktionsmuster der Baugrösse AH 63 mit den Bemessungsdaten 1,5 kW/ 3000 min^{-1} ist selbstgekühlt und für das Energieeffizienzniveau IE4 ausgelegt. Passend zum 10-poligen PM-Läufer ist der Drehfeld-

ständer **(Bild 6)** mit einer Zweischicht-Zahnspulenwicklung der Lochzahl q = 2/5 bewickelt.

Bei optimaler Abstimmung von Ständer- und Läuferaktivteil können PM-Synchronmotoren in Zahnspulentechnik fast sinusförmige Spannungen generieren.[6,7] Das trifft auch auf das betrachtete Funktionsmuster zu, für das in **Bild 7** die gemessenen induzierten Strangspannungen bei 3000 min^{-1} dargestellt sind.

Bei PM-Synchronmotoren sind die M(n)-Kennlinie für den S1-Betrieb bei Ausnutzung der Wärmeklasse und der korrespondierende Wirkungsgrad von Interesse. Ganz im Gegensatz zu Asynchronmotoren, bei denen für Energieeffizienzklasse IE4 nur noch eine geringe thermische Ausnutzung möglich ist, kann bei PM-Synchronmotoren trotz hoher Wirkungsgradforderung noch Wärmeklasse F ausgenutzt werden. Der Vergleich der FEM-Simulation mit den Erprobungsergebnissen **(Bild 8)** zeigt eine gute Übereinstimmung, wobei der gemessene Wirkungsgrad sogar leicht über dem Simulationsergebnis liegt. Wird im Bemessungspunkt 1,5 kW/3000 min^{-1} der Wirkungsgrad mit rund 91 % betrachtet, so liegt dieser deutlich über dem IE4-Grenzwert [8] von 86,5 %.

Bei Verwendung von Duplexstahl für den PM-Läufer stellt sich unweigerlich die Frage nach dem Unterschied, wenn statt Duplexstahl üblicher Wellenstahl zum Einsatz gekommen wäre. Um diese Frage auch experimentell beantworten zu können, wurde ein zeichnungsgleicher Läufer auch mit üblichem Wellenstahl der Legierung 1.0060 angefertigt.

Bei Verwendung von Wellenstahl ist die induzierte Spannung im Vergleich zu **Bild 7** um rund 10 % höher. Erwartungsgemäss ist auch das Stillstandsdrehmoment M0(100 K) um diesen Prozentsatz höher. Der Vergleich der M(n)-Kennlinien nach **Bild 9** zeigt, dass dieser 10%-Vorteil mit steigender Drehzahl stetig abnimmt, so dass sich beide M(n)-Kennlinien bei 4500 min^{-1} schneiden. Ursächlich hierfür ist das höhere permanentmagneterregte Feld im Luftspalt, das mit steigender Drehzahl zu grösseren Eisenverlusten im Ständer führt. Bezogen auf die Bemessungsdrehzahl 3000 min^{-1} beträgt der Ausnutzungsunterschied so tatsächlich nur rund 5 %.

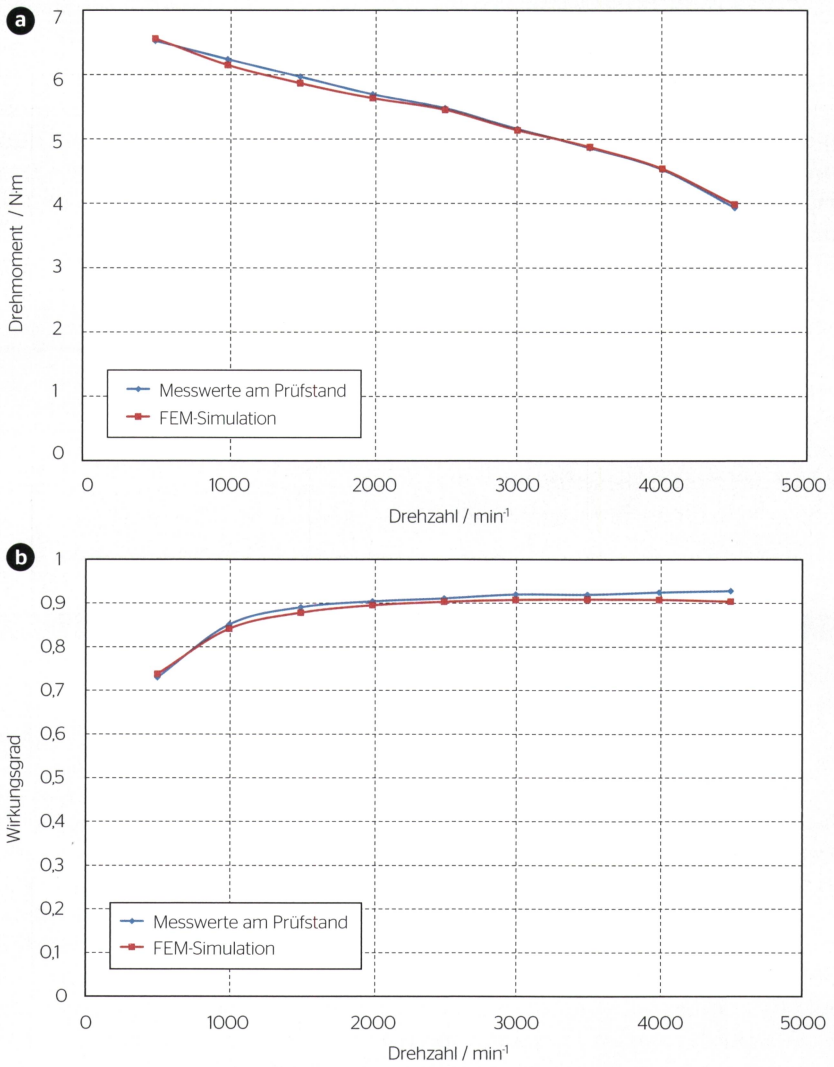


Bild 8 **a)** M(n)-Kennlinie für den S1-Betrieb (100 K) und **b)** korrespondierender Wirkungsgradverlauf für das Funktionsmuster im direkten Vergleich von Messung und FEM-Simulation.

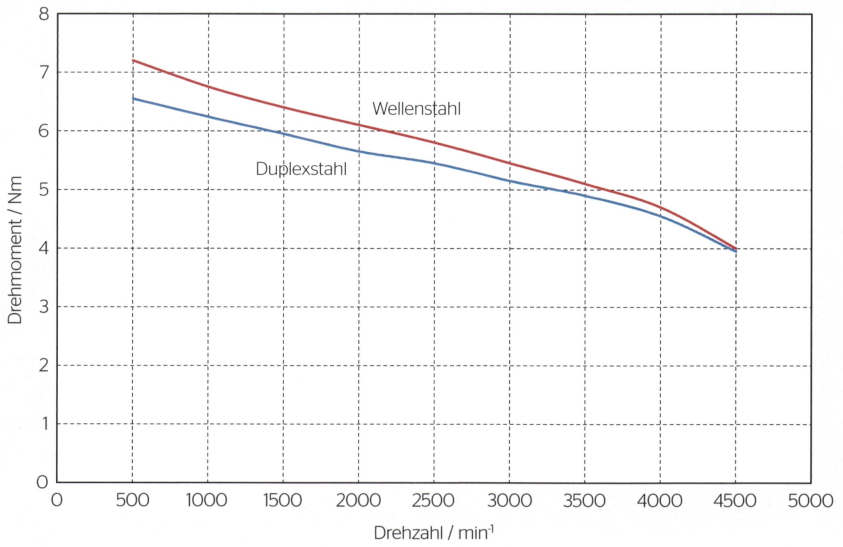


Bild 9 M(n)-Kennlinien für den S1-Betrieb (100 K) bei Ausführung des Läufers mit Duplexstahl bzw. mit üblichem Wellenstahl.

Zusammenfassung

Duplexstahl kommt im Maschinenbau zum Einsatz, wenn höhere Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit gestellt werden. Dieser nichtrostende Stahl beinhaltet eine zusätzliche Ferrit-Phase und ist daher leicht ferromagnetisch. Duplexstahl eignet sich damit auch als Läuferaktivteil für PM-Synchronmotoren, wobei Läuferkonzepte mit aussenliegenden und innenliegenden SE-Magneten möglich sind. Der PM-Läufer kann so korrosionsfest für den betriebsmässig nassen Einsatz, zum Beispiel in Spaltrohrmotorpumpen, konstruiert werden. Andererseits besteht auch die Möglichkeit, für hochtourige Antriebe eine steife Läuferkonstruktion in Massivbauweise zu erzielen. Beide Läuferkonzepte werden anhand von Funktionsmustern vorgestellt. Am Beispiel eines 10-poligen Funktionsmusters wird die experimentelle Erprobung im direkten Vergleich zur Simulation diskutiert und damit die Brauchbarkeit von Duplexstahl bei der Entwicklung von PM-Synchronmotoren bestätigt.

Referenzen

[1] «Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels», International Molybdenum Association, Third Edition, 2014.

[2] B. Löhlein, G. Huth, «Permanentmagnet-Synchronmotoren in Duplexstahl-Technik», e&i, Heft 2.2016 , S. 82–87, Springer Verlag.

[3] G. Huth, B. Löhlein, «Alternative materials for PM synchronous motors», IKMT 2017 in Saarbrücken, GMM-Fachbericht 89, S. 148–153.

[4] Patentschriften DE102007028356 / EP2156534.

[5] F. Magnussen, H. Lendenmann, «Parasitic Effects in PM Machines With Concentrated Windings», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, No.5, S. 1223–1232, 2007.

[6] D. Ishak, Z. Zhu, D. Howe, «Comparison of PM Brushless Motors Having Either All Teeth or Alternate Teeth Wound», IEEE Transactions on Energy Conversion, March 2006, Vol. 21, No. 1, S. 95–103.

[7] G. Huth, «Permanent-magnet excited ac servo-motors in tooth-coil technology», IEEE Transactions on Energy Conversion, June 2005, Vol. 20, No. 2, S. 300–307.

[8] IEC 60034-30-1.

Autoren

Prof. Dr. **Gerhard Huth** leitet den Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme.
→ TU Kaiserslautern, DE-67663 Kaiserslautern
→ huth@eit.uni-kl.de

Dr.-Ing. **Bernd Löhlein** ist Oberingenieur am Lehrstuhl für Mechatronik und Elektrische Antriebssysteme.
→ loehlein@eit.uni-kl.de

RÉSUMÉ

Acier duplex pour moteurs électriques

Partie active innovante pour moteurs synchrones à aimants permanents

L'acier duplex est utilisé dans la construction mécanique lorsque la résistance à la corrosion est soumise à de hautes exigences. Cet acier inoxydable comprend une phase ferrite supplémentaire et il est, par conséquent, légèrement ferromagnétique. L'acier duplex est de ce fait également adapté pour la réalisation de la partie active (rotor) des moteurs synchrones à aimants permanents, et ce, qu'il s'agisse de concepts de rotor avec aimants extérieurs ou intérieurs. Le rotor à aimants permanents peut être construit pour résister à la corrosion en cas d'utilisation en environnement humide, par exemple dans les pompes à moteur à gaine. Par ailleurs, il est aussi possible de réaliser un rotor rigide de construction massive pour les entraînements à haut régime. Les deux concepts de rotor sont présentés sur la base de modèles fonctionnels. En outre, les résultats de la mise à l'épreuve expérimentale d'un modèle fonctionnel à 10 pôles sont comparés directement à ceux obtenus par simulation en vue de confirmer l'utilité de l'acier duplex pour la conception de moteurs synchrones à aimants permanents. NO

Leserbrief

Klarstellung zur Norm SN EN 61439-5

Im wieder sehr interessanten Bulletin-Heft wurde auch ein Artikel von Hager in der Rubrik Publitext veröffentlicht. Dieser Text enthält Angaben, denen ich meine eigenen Aussagen entgegenstellen möchte. Es gibt keine gesetzliche Grundlage, welche die Norm SN EN 61439-5 für Schaltgerätekombinationen in öffentlichen Verteilnetzen verbindlich vorschreibt. Tatsächlich erlaubt das Schweizer Regelwerk ausdrücklich die Möglichkeit, vollständig ohne Anwendung von Normen auszukommen. Vergleiche dazu Artikel 10 in der Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse 734.26 (NEV).

In der Norm für Trafostationen (EN 62271-202) wird die Erfüllung von SN EN 61439-2 gefordert und nicht von SN EN 61439-5. Wäre letztere gesetzlich gefordert, würde man Anbieter von Trafostationen nach EN 62271-202 vom Markt ausschliessen. Dies wäre eine unzulässige Verzerrung des Wettbewerbs und Einschränkung des Markts.

Es gibt in der Schweiz mehr als 200 etablierte Schaltanlagenbauer. Diese müssten ihre Schaltgerätekombinationen aufwendig umrüsten und neu prüfen lassen, wenn die Norm SN EN 61439-5 gefordert wäre – ein technisch nicht notwendiges und kommerziell nicht bezahlbares Szenario.

Die Norm SN EN 61439-2 ist etabliert und von allen Branchenmitgliedern akzeptiert. Es ist daher richtig, diese weiterhin zu verwenden.

JOCHEN HORN, 8953 DIETIKON