

Betrachtung permanentmagneterregter Synchronmaschinen unter Explosionsschutzaspekten

Matthias Weber¹, Cornelius Bode², Christian Lehrmann¹

¹ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich 3.7 „Zündquellensicherheit“, Braunschweig

² Technische Universität Braunschweig, Institut für elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen, Braunschweig

Für den sicheren Betrieb permanentmagneterregter Synchronmaschinen in explosionsgefährdeten Umgebungen sind neben der Beurteilung der Statorwicklungstemperatur detaillierte Kenntnisse über die Erwärmung der Rotormagnete notwendig. Eines der Ziele bei der Maschinenauslegung ist es dann, die Maschinenverluste insgesamt zu minimieren und den Wirkungsgrad zu maximieren.

Eine übliche Methode um die Wirbelstromverluste innerhalb der Magnete und somit deren Erwärmung zu reduzieren, ist die radiale und axiale Teilung der Magnete. Bei einer ungünstig gewählten Unterteilung steigen jedoch die Wirbelstromverluste anstatt zu sinken. Es existieren verschiedene Ansätze um die Wirbelstromverluste zu berechnen. Diese vernachlässigen aber oftmals die Teilung der Magnete oder die Rückwirkung der Wirbelströme auf die Feldverteilung. Der folgende Beitrag erläutert die Ergebnisse und Vorgehensweise der messtechnischen Überprüfung eines neuen analytischen Ansatzes. Dieser berücksichtigt sowohl die Unterteilung als auch die Rückwirkung.

Die besondere Herausforderung bestand darin, die geringen Verluste der Permanentmagneten von den Gesamtverlusten zu trennen. Zu diesem Zweck wurde anstatt einer gewöhnlichen permanentmagneterregten Synchronmaschine eine Ersatzanordnung gewählt, bei welcher die Wirbelstromverluste dominieren. Der bedeutendste Unterschied ist dabei die Substitution der Permanentmagnete durch Aluminiumringe. Der Vorteil von Aluminium ist die hohe Leitfähigkeit und die dadurch steigenden Wirbelstromverluste. Zur Trennung der Wirbelstromverluste wurden die Gesamtverluste mit und ohne Aluminiumringe gemessen. Die Differenz entspricht dabei gerade den Wirbelstromverlusten. Da diese bei der Ersatzanordnung verhältnismäßig hoch sind, ist die prozentuale Messabweichung gering. Die gemessenen Wirbelstromverluste wurden mit den Ergebnissen des analytischen Modells verglichen und korrelieren.

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der steigenden Energiepreise und der wachsenden Anforderungen an die Energieeffizienz elektrischer Maschinen findet die permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM) auch in explosionsgefährdeten Umgebungen eine immer breitere Anwendung. Für einen sicheren Betrieb dieser Maschinenart sind daher detaillierte Kenntnisse über die potentiellen Zündquellen notwendig. Viele Aspekte des Explosionsschutzes lassen sich dabei von den altbewährten Maschinentypen auf die PMSM übertragen. Durch die Permanentmagneten entstehen aber auch neue mögliche Zündquellen, die beim Einsatz in explosionsgefährdeten Umgebungen zu berücksichtigen sind.

Die mechanisch sichere und dauerhafte Befestigung der Magnete ist z.B. eine wichtige Anforderung, um die Zündquelle „mechanische Funken“ zu vermeiden.

Insbesondere mit zunehmender Betriebsdauer der Maschine muss sichergestellt sein, dass sich die Magneten nicht vom Rotor lösen. Ein weiterer wichtiger Aspekt hinsichtlich des Explosionsschutzes ist die auf Grund von Wirbelströmen resultierende Erwärmung in den Magneten. Einerseits kann eine zu hohe Temperatur das eventuell vorhandene umgebende Gasgemisch zünden, andererseits führt eine zu starke Erwärmung zu einer Teilentmagnetisierung der Permanentmagneten.

Um das gleiche Drehmoment zu erzeugen, muss der Umrichter die verminderte Erregung durch einen erhöhten Ständerstrom ausgleichen. Der angehobene Ständerstrom verursacht zusätzliche Stromwärmeverluste und die Temperatur der Wicklung steigt.

Eine übliche Methode um die Wirbelstromverluste zu reduzieren stellt, wie in Abbildung 1 dargestellt, die radiale und axiale Teilung der Magnete dar. Infolge der unterteilten Magnete verkleinern sich die möglichen Wirbelstrombahnen und die Verluste sinken. Dieses ist vergleichbar mit der Blechung des Eisenkreises einer elektrischen Maschine. Nach [1] kann allerdings bei einer ungünstig gewählten Teilung der Magnete der angestrebte Effekt ins Gegenteil umschlagen und die Oberschwingungsverluste können steigen, anstatt zu sinken.

Es existieren verschiedene Ansätze um die Wirbelstromverluste zu berechnen. Diese vernachlässigen aber oftmals die Teilung der Magnete oder die Rückwirkung der Wirbelströme auf die Feldverteilung. In [2] wird ein Ansatz gewählt, der sowohl die Rückwirkung als auch die Teilung berücksichtigt. Validiert wurde dieser mit einer 2D- und 3D-FEM Berechnung. Der folgende Beitrag stellt die Ergebnisse einer messtechnischen Überprüfung des in [2] gewählten Ansatzes vor.

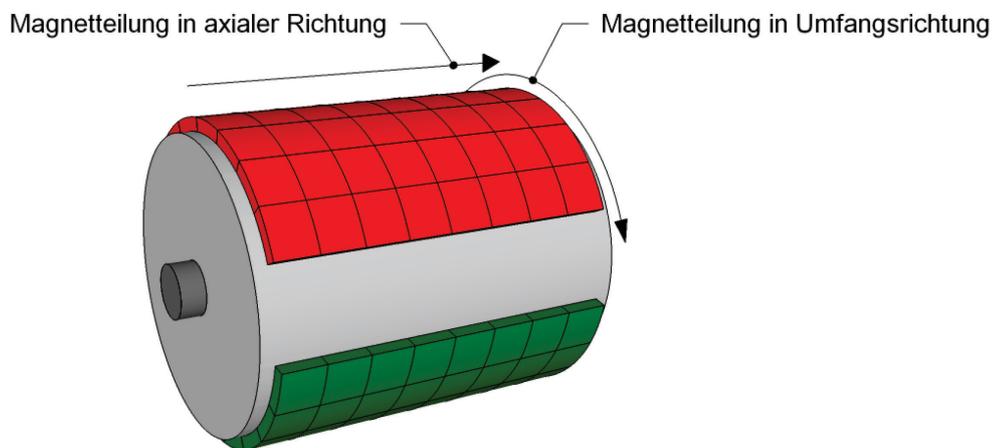


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Teilung der Permanentmagnete zur Reduzierung der Wirbelstromverluste

2 Ersatzanordnung der permanentmagneterregten Maschine

In permanentmagneterregten Maschinen treten neben den Wirbelstromverlusten der Magneten noch viele weitere Verlustkomponenten auf. Von diesen dominieren die Stromwärmeverluste der Wicklung, die Ummagnetisierungsverluste des Blechpaketes und die Reibungsverluste (Luft und Lager). Zusätzlich entstehen aber auch Verluste, deren Ursache und Einfluss schwer zu erfassen sind, wie z. B. durch Streuung verursachte Verluste in anderen metallischen Teilen. Das Ziel ist den analytischen Berechnungsansatz messtechnisch zu überprüfen. Hierfür müssen die verschiedenen Verlustkomponenten von den Wirbelstromverlusten getrennt werden. Daher ist es zweckdienlich, anstatt einer PMSM eine experimentelle Ersatzanordnung zu verwenden, die von vornherein möglichst viele Verlustkomponenten ausschließt. Diese Ersatzanordnung ist in der Abbildung 2 dargestellt und wird im Folgenden erläutert.

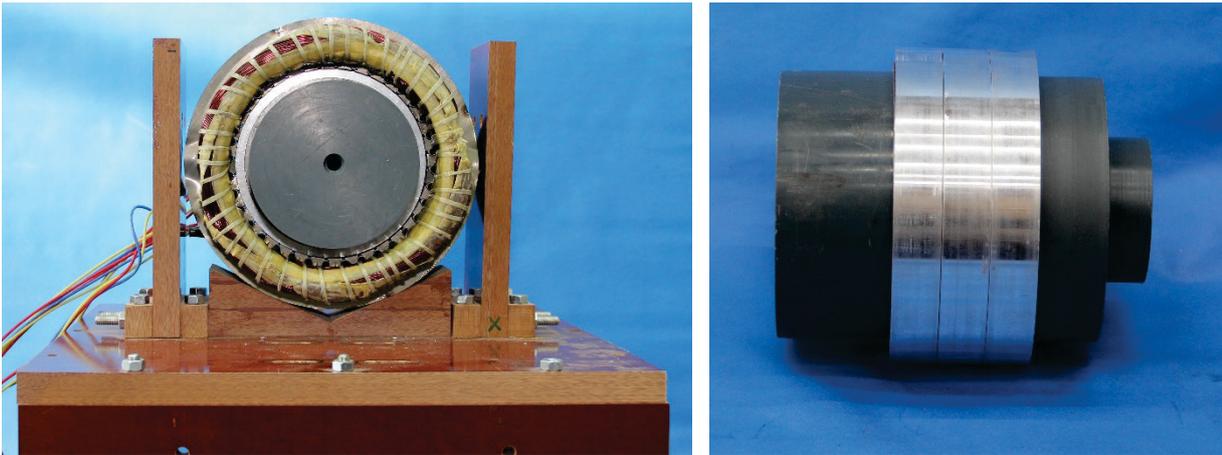


Abbildung 2: Ersatzanordnung der PMSM (links: Gesamte Ersatzanordnung; rechts: Rotor mit Aluminiumringen)

Grundsätzlich induzieren zeitlich sich ändernde Magnetfelder Wirbelströme in elektrisch leitfähige Werkstoffe. Eine Feldwelle, die synchron mit dem Rotor umläuft, bleibt aus der Sicht der Permanentmagneten konstant. Es führen also nur sich relativ zum Rotor drehende Feldwellen zu Wirbelströmen. Solche Feldwellen entstehen durch

- die Wicklungsverteilung (Nutharmonische),
- die Nutschlitze in der sonst glatten Oberfläche des Blechpakets (Nutungsharmonische),
- durch Oberschwingungen im Ständerstrom.

Damit während der Messungen keine Reibungsverluste entstehen, wurde die Messung bei einem stillstehenden Rotor durchgeführt. Dadurch verändern sich die relativ zum Rotor drehenden Feldwellen, aber der grundsätzliche Berechnungsansatz nach [2] bleibt bestehen. Zur Vermeidung der Verluste in den umgebenden metallischen Werkstoffen wurde das Gehäuse entfernt und die Maschine auf einem Holzgestell fixiert.

Wie noch in Abschnitt 3 genauer beschrieben, sind die Wirbelstromverluste nicht direkt messbar. Es können lediglich die Gesamtverluste der Ersatzanordnung mit und ohne Permanentmagnete gemessen werden. Die Wirbelstromverluste berechnen sich dann aus der Differenz dieser Verlustgrößen. Im Vergleich zu den dominanten Stromwärme- und Ummagnetisierungsverlusten sind die Wirbelstromverluste im Permanentmagneten sehr gering.

Bei einem steigenden Verhältnis der Gesamtverluste zu den Wirbelstromverlusten erhöht sich auch die Messabweichung auf Grund der notwendigen Differenzbildung. Wenn z. B. der Anteil der Wirbelstromverluste bei 2% liegt und die Messabweichung der Gesamtverluste 1% ist, dann beträgt die Messabweichung der Wirbelstromverluste ungefähr 50%. Daher ist eine experimentelle Anordnung zweckdienlich, bei der in den Modellen für die verschiedenen Magnetteilungen hohe Wirbelstromverluste entstehen.

Um die Leitfähigkeit und somit die Wirbelströme zu erhöhen, wurde anstatt der Permanentmagnete Aluminium verwendet. Beide Werkstoffe haben eine relative Permeabilität nahe 1 (paramagnetisch). Die fehlende Erregung der Permanentmagnete führt aber bei einer drehenden Maschine zu Nutungsharmonischen und somit zu zusätzlichen Verlusten. Da die Ersatzanordnung bei einem stehenden Rotor untersucht wird, sind die beiden Werkstoffe bezüglich der Wirbelstromverluste dennoch vergleichbar. Zusätzlich ist wegen des stehenden Rotors kein Luftspalt notwendig. Wenn sich das Volumen des Aluminiums vergrößert, steigen die Wirbelströme und somit auch die Verluste. Deshalb wurde das Aluminium über den bei realen Maschinen vorhandenen Luftspalt hinaus bis zum inneren Radius des Statorblechs erhöht.

Aus verfahrenstechnischen Gründen wurden komplette Aluminiumringe verwendet. Die natürliche Teilung der Magnete durch Nord- und Südpol fällt daher weg, der grundsätzliche

Berechnungsansatz nach [2] ist aber weiterhin gültig. Um eine elektrische Isolation zwischen den Aluminiumringen sicherzustellen, wurden diese mit einem Isolierlack beschichtet.

3 Messaufbau und Messergebnisse

Der Messaufbau besteht aus einem Funktionsgenerator, drei Linearverstärkern, einem Leistungsmessgerät und der im Abschnitt 2 vorgestellten Ersatzanordnung der PMSM. Schematisch ist der Messaufbau in der Abbildung 3 dargestellt. Der Funktionsgenerator erzeugt eine sinusförmige Spannung beliebiger Frequenz. Die Linearverstärker verstärken diese sinusförmige Referenzspannung und versorgen die Ersatzanordnung mit Strom und Spannung. Dabei ist von Vorteil, dass die Verstärker auch bei hohen Frequenzen kaum Oberschwingungen erzeugen und dadurch keine unerwünschten Verluste entstehen.

Die von den Linearverstärkern in den Versuchsaufbau eingespeiste elektrische Leistung wird mit einem Leistungsmessgerät aufgenommen. Hierfür tastet das Messgerät den Strom- und Spannungsverlauf aller drei Phasen ab. Aus den aufgenommenen Messpunkten werden anschließend die Effektivwerte von Strom und Spannung, sowie die Frequenz und elektrische Leistung berechnet. Die absolute Messabweichung ist dabei von dem gewählten Messbereich abhängig.

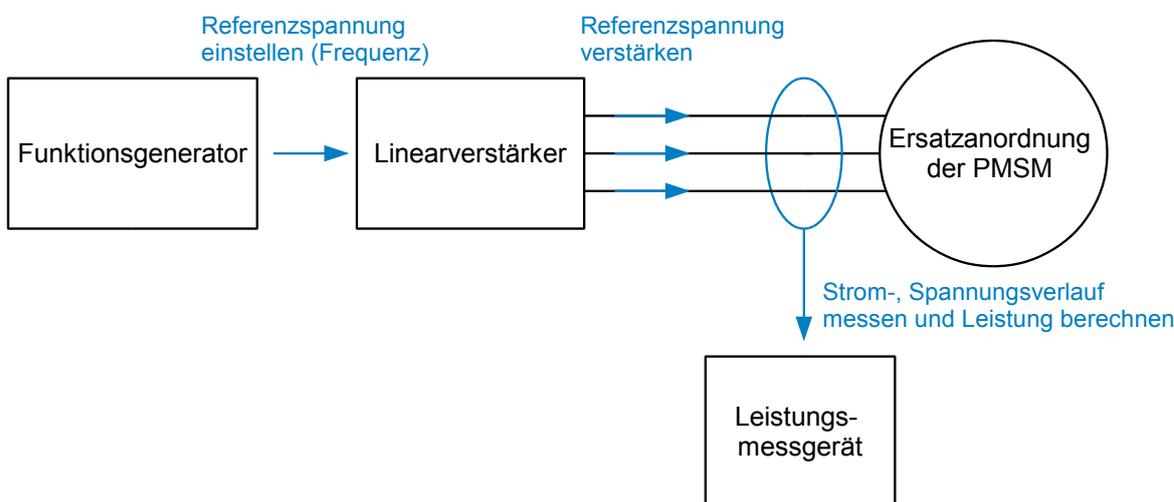


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

In Abschnitt 2 wurde bereits erwähnt, dass die Wirbelstromverluste nicht direkt messbar sind. Das Leistungsmessgerät kann lediglich die von den Linearverstärkern hinzugefügte elektrische Leistung bestimmen. Der Rotor der Ersatzanordnung steht während der Messungen still und erzeugt demnach keine mechanische Leistung. Daher entspricht die vom Messgerät aufgenommene elektrische Leistung den gesamten Verlusten der Ersatzanordnung. Diese setzen sich im Wesentlichen aus

- den Ummagnetisierungsverlusten im Blechpaket (Stator und Rotor),
- den Stromwärmeverlusten in der Wicklung
- und den Wirbelstromverlusten der Aluminiumringe

zusammen.

Wenn keine Aluminiumringe das Rotorblechpaket umgeben, entfallen die Wirbelstromverluste. Dadurch lassen sich diese aus der Differenz der Gesamtverluste der beiden Rotoranordnungen (mit und ohne Aluminiumringe) bilden.

Bei dem gewählten Ansatz entsteht jedoch ein systematischer Fehler. Die Wirbelströme induzieren ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld, das die Feldverteilung und somit die Verluste beeinflusst. Um die Ummagnetisierungsverluste und Stromwärmeverluste zu bestimmen, werden die Gesamtverluste der Ersatzanordnung ohne Aluminiumringe gemessen. Dabei

bleibt die Rückwirkung der Wirbelströme auf das Blechpaket unberücksichtigt. Dieser systematische Fehler ist aber gering, da die Blechung des Eisenkreises den Einfluss der Rückwirkung unterdrückt.

Die Wirbelstromverluste wurden für einen sinusförmigen Ständerstrom von 1 A, 2 A und 3 A entsprechend der beschriebenen Weise bestimmt. Die Messungen erfolgten hierfür immer in einer definierten Reihenfolge. Zunächst wurde die Ersatzanordnung mit dem jeweiligen Ständerstrom bei einer Frequenz von 50 Hz belastet. Erst nach dem Erreichen des thermischen Gleichgewichts wurde die Frequenz in aufsteigender Reihenfolge von 5 Hz bis 400 Hz variiert und die Messpunkte aufgenommen. Mit zunehmender Frequenz erhöht sich der induktive Blindwiderstand der Ersatzanordnung. Um den Ständerstrom konstant zu halten, muss ebenfalls die Ständerspannung steigen. Der Ständerstrom wurde deswegen für jeden Messpunkt neu eingestellt. Daraus resultierte jeweils eine unterschiedliche Abweichung des Stroms zum Bezugswert. Der Einfluss auf die Messergebnisse ist dennoch gering, da die Abweichungen relativ klein sind. Die Standardabweichung beträgt z. B. für den Bezugswert von 3 A nur 0,0158 A. Bei der Annahme einer Normalverteilung weichen demnach 68% aller Messwerte maximal um 0,016 A (0,5%) von dem Mittelwert ab.

In der Abbildung 4 sind die nach dem analytischen Ansatz berechneten (durchgezogene Linien) und gemessenen (gepunktete Linien) Wirbelstromverluste gegenübergestellt. Die Ergebnisse beziehen sich dabei auf einen Ständerstrom von 3 A. Der nichtkontinuierliche Verlauf der Messdaten entsteht durch die für jeden Messpunkt unterschiedliche Abweichung des Stroms vom Bezugswert. Dennoch ist deutlich zu erkennen, dass die Messwerte mit den Ergebnissen des analytischen Ansatzes korrelieren.

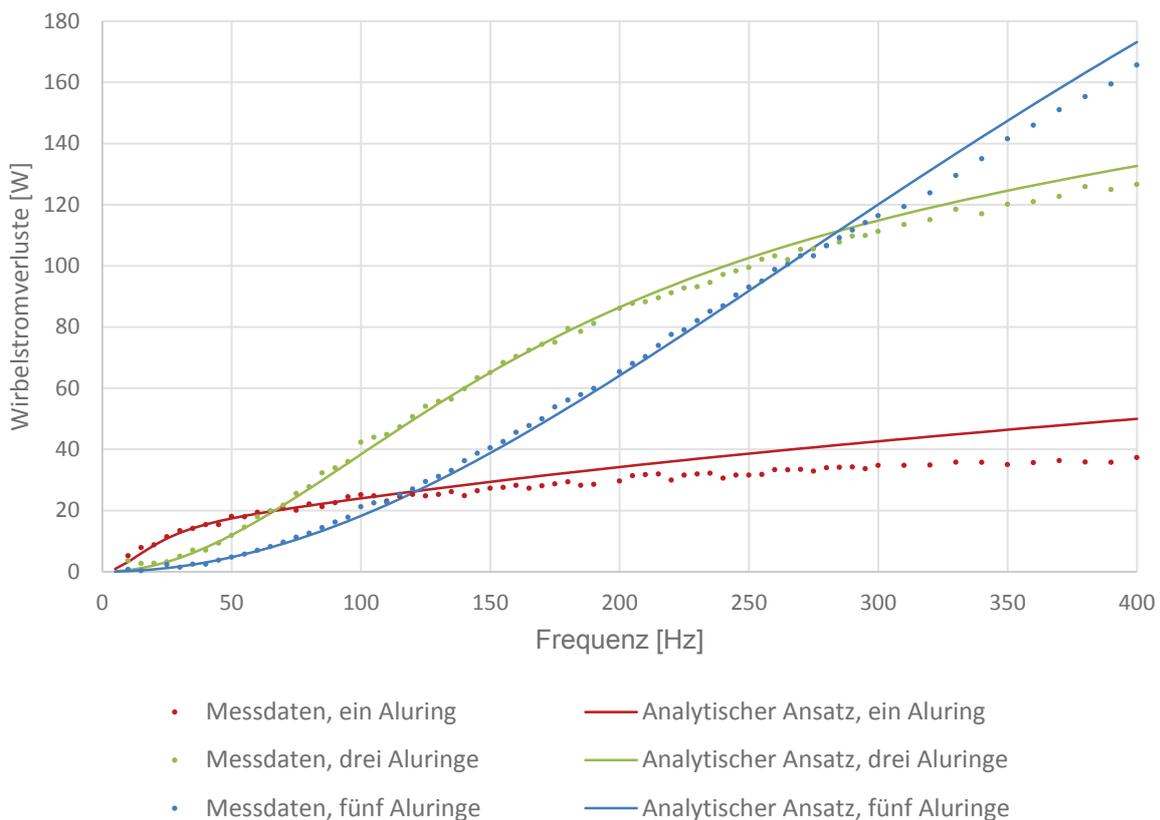


Abbildung 4: Gegenüberstellung der Wirbelstromverluste der Messergebnisse und des analytischen Ansatzes bei einem Ständerstrom von 3 A

Eine gemeinsame Abweichung besitzen jedoch alle Anordnungen (1, 3, 5 Aluminiumringe) im oberen Frequenzbereich. Hier liegen die gemessenen Verluste stets unterhalb der berechneten Verluste. Eine Ursache könnte der Einfluss der Maschinenränder in Richtung der

Drehachse sein. Der in [2] vorgestellte dreidimensionale analytische Ansatz berücksichtigt diesen Einfluss. Der Autor hatte zur Prüfung ein zweidimensionales Berechnungsmodell zur Verfügung gestellt. Bei diesem ist die Feldverteilung unabhängig von der axialen Koordinate. Daher kann das zweidimensionale Modell den Einfluss der Maschinenränder nicht beachten.

Dieses ist aber für die Prüfung des dreidimensionalen Ansatzes nicht entscheidend. Die Neuerung bei diesem ist, dass erstmals die Teilung der Magnete **und** die Rückwirkung der Wirbelströme in einem analytischen Ansatz Beachtung finden. Dadurch lässt sich der Effekt berechnen, dass bei hohen Frequenzen die Wirbelstromverluste bei einer ungünstig gewählten Magnetteilung höher sind als bei einem nicht geteilten Magneten. Der Vergleich mit den Messungen (Abbildung 4) bestätigt diesen Zusammenhang. Demnach übersteigen ab 70 Hz bzw. 125 Hz die Wirbelstromverluste in den geteilten Aluminiumringen die Verluste des einzelnen Aluminiumrings.

Die relative Messabweichung der Wirbelstromverluste (f_{WS} , siehe Gleichung 1) berechnet sich aus dem Verhältnis der absoluten Messabweichung (F_{WS}) zu den Wirbelstromverluste (P_{WS}). Die relative Messabweichung der Wirbelstromverluste ist stets größer als die der einzelnen Leistungsmessungen. Der Grund hierfür ist die zur Berechnung der Wirbelstromverluste notwendige Differenz aus den Gesamtverlusten der Anordnungen mit Aluminiumringe (P_G) und ohne Aluminiumringe ($P_{G,0}$). Die Messabweichung definiert ein mögliches Umgebungsintervall der Messgröße (z. B. $\pm 5V$). Daher addieren sich die absoluten Messabweichungen der beiden Leistungsmessungen ($F_G, F_{G,0}$) zu der absoluten Messabweichung der Wirbelstromverluste.

$$f_{WS} = \frac{F_{WS}}{P_{WS}} = \frac{F_G + F_{G,0}}{P_G - P_{G,0}} \quad (1)$$

Insbesondere bei niedrigen Frequenzen ist wegen der geringen Wirbelstromverluste die relative Messabweichung hoch. Im Frequenzbereich der Schnittpunkte der Verlustkennlinien (Abbildung 4) beträgt die relative Messabweichung aber nur 1 bis 3 Prozent. In der Tabelle 1 sind zum Vergleich einige Messwerte und die dazugehörigen Messabweichungen der Wirbelstromverluste dargestellt. Dabei wurden die Messabweichungen aus den im Datenblatt des Leistungsmessgerätes angegebenen Eigenschaften bestimmt. Diese sind abhängig von dem Messbereich und der Messgröße. Der Anstieg der absoluten Messabweichung bei 75 Hz wurde z. B. durch die Verwendung eines höheren Spannungsmessbereich verursacht.

Um den analytischen Ansatz zu überprüfen wurde eine Ersatzanordnung verwendet, die die Wirbelstromverluste verstärkt. Dadurch schneiden sich die Kennlinien der Wirbelstromverluste (Abbildung 4) bereits bei geringeren Frequenzen. Bei elektrischen Maschinen besteht der Permanentmagnet üblicherweise aus einer Neodym-Legierung. Die Leitfähigkeit des verwendeten Aluminiums ($\sigma_{Alu} \approx 25 \cdot 10^6 \text{ Sm}^{-1}$) ist ungefähr 40-mal größer als die eines typischen Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten ($\sigma_{PM} \approx 0,65 \cdot 10^6 \text{ Sm}^{-1}$). Dadurch verschieben sich die Schnittpunkte der Verlustkennlinien zu 40-mal höheren Frequenzen. Wenn zusätzlich ein Luftspalt von 1 mm und die Teilung der Magnete durch Nord- und Südpol berücksichtigt werden, tritt der Effekt erst bei dem 50-fachen der gemessenen Frequenz auf. Die Schnittpunkte der Verlustkennlinien wären dann bei circa 3,5 kHz bzw. 6.25 kHz. PMSM werden fast immer an Frequenzumrichtern betrieben. Diese arbeiten für gewöhnlich mit einer Taktfrequenz zwischen 3 und 8 kHz. Die durch die Stromüberschwingungen erzeugten Wirbelstromverluste würden daher in dem relevanten Frequenzbereich durch die Unterteilung der Magnete in axialer Richtung steigen.

Tabelle 1: Messwerte und Messabweichungen der Wirbelstromverluste der Anordnungen mit einem und drei Aluminiumringen in der Nähe des Schnittpunktes

Fre- quenz	Keine Unterteilung (1 Aluminiumring)			Zwei Unterteilungen (3 Aluminiumringe)		
	Wirbelstrom- verluste (Messwert)	Absolute Abwei- chung	Relative Abwei- chung	Wirbelstrom- verluste (Messwert)	Absolute Abwei- chung	Relative Abwei- chung
65 Hz	19,71 W	0,39 W	1,96 %	19,87 W	0,39 W	1,95 %
70 Hz	20,65 W	0,39 W	1,88 %	21,74 W	0,39 W	1,79 %
75 Hz	20,07 W	0,56 W	2,78 %	25,56 W	0,56 W	2,20 %
80 Hz	22,07 W	0,56 W	2,53 %	27,74 W	0,56 W	2,64 %
85 Hz	21,21 W	0,56 W	2,63 %	32,28 W	0,56 W	2,28 %

4 Zusammenfassung

Es existieren verschiedene analytische Ansätze um die Wirbelstromverluste in den Permanentmagneten elektrischer Maschinen zu berechnen. In [2] wird eine Methode vorgestellt, die im Vergleich zu den bisherigen Ansätzen sowohl die Teilung der Magnete als auch die Rückwirkung der Wirbelströme auf die Feldverteilung berücksichtigt. Da dieser Ansatz bislang nur durch eine FEM-Berechnung bestätigt wurde, erfolgte nun eine messtechnische Überprüfung. In dem Beitrag sind die Vorgehensweise und Ergebnisse erläutert.

Die besondere Herausforderung bestand darin, die geringen Verluste der Permanentmagneten von den Gesamtverlusten zu trennen. Die Gesamtverluste setzen sich im Wesentlichen aus den Ummagnetisierungsverlusten im Blechpaket, den Stromwärmeverlusten im Rotor und den Reibungsverlusten im Lager zusammen. Um die Reibungsverluste von vornherein auszuschließen, wurden die Messungen bei einem stillstehenden Rotor durchgeführt.

Zusätzlich wurde anstatt einer PMSM eine Ersatzanordnung verwendet, bei welcher die Wirbelstromverluste dominieren. Der bedeutendste Unterschied ist dabei die Substitution der Magnete durch Aluminiumringe. Bei einem stillstehenden Rotor entstehen keine Nutungs-harmonischen. Aus diesem Grund sind die Wirbelstromverluste im Stillstand unabhängig von der Erregung der Magnete und es können anstatt dieser auch andere Werkstoffe verwendet werden. Der Vorteil von Aluminium ist die hohe Leitfähigkeit und die dadurch steigenden Wirbelstromverluste.

Zur Trennung der Verluste wurden zunächst die Gesamtverluste ohne Aluminiumringe und anschließend mit Aluminiumringen gemessen. Die Differenz entspricht dabei gerade den Wirbelstromverlusten. Da diese bei der Ersatzanordnung verhältnismäßig hoch sind, ist die prozentuale Messabweichung gering und die Ergebnisse sind vertrauenswürdig. Die gemessenen Wirbelstromverluste wurden mit den Ergebnissen des in [2] vorgestellten Modells verglichen. Dabei korrelierten die Messdaten mit den berechneten Verlusten.

Literaturverzeichnis

- [1] W.-Y. Huang, A. Bettayeb, R. Kactmarek, J.-C. Vannier: Optimization of Magnet Segmentation for Reduction of Eddy-Current Losses in Permanent Magnet Synchronous Machine, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 35, No 3, June 2010
- [2] C. Bode, H. May, W.-R. Canders: Optimized reduction of parasitic eddy current losses in high speed permanent magnet motors on 2D and 3D field calculations, XV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Funchal, September 2011
- [3] ZES Zimmer GmbH (Hrsg.): Mehrkanal Leistungsmessgerät LMG 500 Benutzerhandbuch, Februar 2009

Terms of Use

Any party may pass on this Work by electronic means and make it available for download under the terms and conditions of the Digital Peer Publishing License (DPPL) Version 3.0. The text of the license may be accessed and retrieved via Internet at <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-dppl-v3-en8>.

Beyond the conditions of the DPPL, the data which is contained in this catalog May only be used by any party for signal processing if the data is inserted into the source code of the program together with a reference to the catalog and if the program documentation (if available) also contains a reference to this catalog.

Exclusion of Liability

Deviating from paragraphs 12 and 13 of the DPPL Version 3.0, a comprehensive exclusion of liability applies. This states: This catalog is made available without any special or implied guarantee, which – among others – includes the implicit guarantee of the use of the catalog for a certain purpose. Under no circumstances is PTB responsible for any direct or indirect damage, independent of how it arose, through the use of the catalog. This also applies to damage due to errors of the catalog, which were already known at the occurrence of the damage.