

Antriebssysteme 2013

Elektrik, Mechanik und Hydraulik
in der Anwendung

138

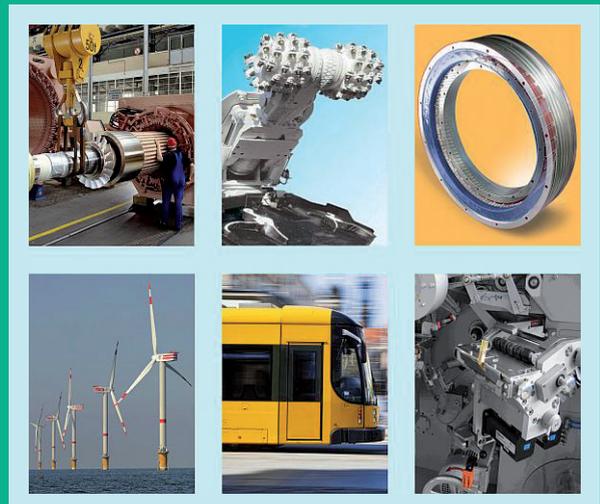
ETG-Fachbericht

*Vorträge der 4. VDE/VDI-Tagung
vom 17. bis 18. September 2013
in Nürtingen*

mit CD-ROM

VDI

VDE



Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG)
VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (GPP)

Kalibrierte Leistungssimulation von elektrischen Maschinen - eine Möglichkeit zur Bewertung von nicht vermessbaren Betriebsbereichen und des Einsatzes unterschiedlicher weichmagnetischer Materialien ohne weiteren Musterbau

Georg von Pfingsten, M.Sc. • Dipl.-Ing. Thomas Herold • Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer
Institut für Elektrische Maschinen der RWTH Aachen University
Schinkelstraße 4 • 52062 Aachen • post@iem.rwth-aachen.de

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird eine kalibrierte Leistungssimulation vorgestellt. Ziel ist es Aussagen über nicht vermessene Betriebspunkte und den Einsatz verschiedener weichmagnetischer Materialien bereits vor der Fertigung eines weiteren Prototyps einer elektrischen Maschine zu treffen.

Bei der untersuchten Maschine handelt es sich um eine permanentmagneterregte Synchronmaschine. Das bestehende Versuchsmuster wurde, aufgrund des beschränkten Drehzahlbereichs des Prüfstands, nicht bis zu seiner Maximaldrehzahl vermessen. Die kalibrierte Leistungssimulation ermöglicht es, das Verhalten des bestehenden Musters im nicht vermessenen Bereich zu bewerten.

Das elektromagnetische und mechanische Design des Musters soll für den Betrieb mit höheren Drehzahlen und Drehmomenten angepasst werden. Die Polpaarzahl wird dabei beibehalten. Durch diese Betriebsbereicherweiterung steigen zum einen die Beanspruchung der Materialien und zum anderen die Verluste. Die kalibrierte Leistungssimulation ermöglicht es, die Auswirkungen dieser Anpassungen bereits vor dem folgenden Musterbau zu bewerten.

Ausgehend von der Vermessung des bestehenden Prototyps und des eingesetzten Elektrolechs wird die Leistungssimulation kalibriert. Die Kalibrierung der Simulation ist erforderlich, um Unsicherheiten bei der FEM-Simulation zu reduzieren. Zu diesen Unsicherheiten gehört unter anderem der Einfluss der Verarbeitung des Elektrolechs. Aus diesem Grund werden mithilfe der Simulation die Verluste nach Entstehungsort und Entstehungsmechanismus separiert, um die Verlustmechanismen einzeln bewerten zu können und die Kalibrierung zu ermöglichen.

Da durch die Betriebsbereicherweiterung der Maschine höhere Verluste auftreten, wird weiterhin untersucht, welche Vorteile der Einsatz eines verlustärmeren Elektrolechs hinsichtlich des Verlustverhaltens ermöglicht. Zu diesem Zweck werden Materialproben des eingesetzten Elektrolechs und des verlustärmeren Elektrolechs in einem Epsteinrahmen charakterisiert. Aus den gemessenen Eisenverlusten werden die fünf Verlustparameter für die IEM-5-Parameterformel [1,2] zur Eisenverlustberechnung bestimmt. In FEM-Simulationen werden Strom und Vorsteuerwinkel für die untersuchte Maschine variiert und die Eisenverluste im Postprozessing mit den fünf Verlustparametern bestimmt. Somit können für jeden Betriebspunkt aus Drehmoment und Drehzahl die benötigten Ströme und die auftretenden Eisenverluste errechnet werden. Die Kupferverluste werden anhand des gemessenen Wicklungswiderstands berücksichtigt und als weitere Verlustarten werden Lager- und Luftreibung einbezogen.

Die Simulationsdaten werden mit den Messdaten für den verfügbaren Bereich abgeglichen und die Simulationsparameter angepasst. Simulation und Messung zeigen im relevanten Wirkungsgradbereich eine maximale Abweichung von 0,5 Prozentpunkten bzw. von 200 Watt hinsichtlich der Verlustleistungen. Damit kann für die untersuchte Maschine das Verhalten bei Betriebspunkten ermittelt werden, die nicht mit dem vorhandenen Prüfstand messbar waren.

Eine Verschiebung der Betriebsgrenzen durch den Einsatz anderer Materialien, oder durch Änderung der Wicklung können auf diese Weise mit einer hohen Genauigkeit simuliert werden, ohne weitere Prototypen aufzubauen und zu vermessen.

1 Durchgeführte Messungen

Die Messungen werden auf einem Maschinenprüfstand mit folgenden Leistungsdaten durchgeführt:

- Asynchronlastmaschine mit Maximaldrehzahl 5000 min^{-1} und 63 kW Dauerleistung
- Drehmomentmesswelle bis 500 Nm der Genauigkeitsklasse 0,03
- Zwischenkreisspannung des Umrichters bis 700 V

Beim Prüfling handelt es sich um eine permanentmagneterregte Synchronmaschine mit V-förmig vergrabenen Permanentmagneten (VPMSM) mit einer Maximaldreh-

zahl von 6000 min^{-1} . Der Rotor des Prüflings ist mit einer neuartigen Hohlwellenkonstruktion [3] ausgestattet.

Der Pressverband zwischen Welle und Rotorblechpaket ist für ein maximal übertragbares Drehmoment von 220 Nm ausgelegt. Daher wurde der Prüfling bis zu diesem maximalen Drehmoment vermessen.

Für ein Folgevorhaben soll der Prototyp für eine höhere Maximaldrehzahl (8000 min^{-1}) und ein höheres maximales Drehmoment (300 Nm) angepasst werden. Hierbei wird die Statorstruktur und das Maschinenkonzept beibehalten, sodass sich nur Änderungen in der Auslegung der Rotormechnik ergeben werden. Da für das Folgeprojekt eine Zwischenkreisspannung von 600 V vorgesehen ist, wird der bestehende Prüfling bei einer Zwi-

schenkreisspannung von $U_{zk} = 400$ V und 600 V vermessen. Die Messung mit $U_{zk} = 400$ V gewährleistet dabei, dass bei der maximal vermessbaren Drehzahl von 5000 min^{-1} das Feldschwächverhalten der geplanten Maschine mit $U_{zk} = 600$ V bis zu einer Drehzahl von 7500 min^{-1} abgebildet wird. Damit ist gewährleistet, dass die Simulationen anhand der Messdaten über einen weiten Bereich des späteren Betriebs kalibriert werden können.

1.1 Ermittlung der Steuervorschrift durch FEM-Simulationen

Für die Vermessung und den Betrieb der Maschine ist es erforderlich die optimale Steuervorschrift zu kennen. Daher wird im ersten Schritt die Steuervorschrift der Maschine mithilfe von FEM-Simulationen bestimmt. Die Simulationen werden mit dem am IEM entwickelten Softwarepaket *pyMOOSE* [4] durchgeführt. In den Simulationen werden sinusförmige Ströme vorgegeben, welche nach Betrag und Vorsteuerwinkel variiert werden. Es ergibt sich ein zweidimensionaler Stromraum über jeweils 41 Längs- und 41 Querachsenströme (I_d und I_q). Insgesamt besteht der Stromraum daher aus 1681 FEM-Simulationen. In jeder dieser Simulationen werden Flussverkettung, Induktivitäten und Drehmomente in Abhängigkeit der angularen Position von Rotor zu Stator bestimmt. **Abbildungen 1** und **2** zeigen die, über die angular Position, gemittelten Werte der Flussverkettung und des Drehmoments.

Anhand des mittleren Drehmoments in Abhängigkeit von I_d und I_q wird für jedes geforderte Drehmoment der kleinste Strom bestimmt (Grunddrehzahlbereich). Für jede geforderte Drehzahl wird dann über die Flussverkettung überprüft, ob die maximale Spannung (Zwischenkreisspannung abzüglich Regelreserve) für die geforderte Drehzahl erreicht wird. Bei hohen Drehzahlen wird diese Spannung überschritten und es muss ein betragsmäßig größerer d-Strom vorgesehen werden (Feldschwächung). Die erforderlichen d- und q-Ströme bei einer Zwischenkreisspannung von $U_{zk} = 400$ V sind in **Abbildung 3** und **4** dargestellt. In **Abbildung 4** ist diese Steigerung des d-Stromes im Feldschwächbereich (ab einer Drehzahl von ca. 2200 min^{-1}) deutlich an den hin zu kleineren Drehmomen-

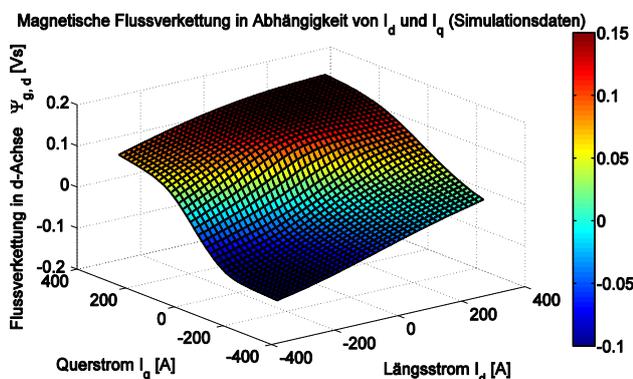


Bild 1 Magnetische Flussverkettung dargestellt über dem 2D-Stromraum

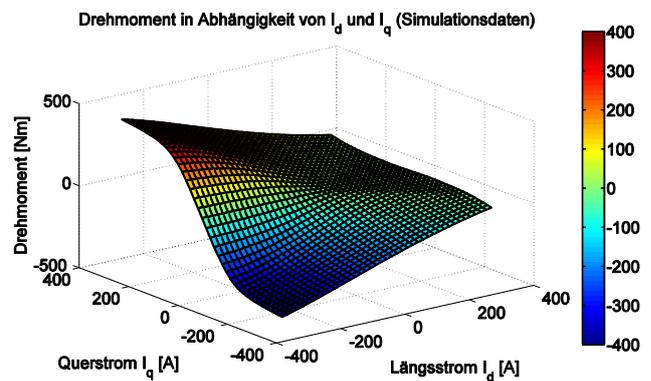


Bild 2 Drehmoment dargestellt über dem 2D-Stromraum

ten und höheren Drehzahlen abknickenden Höhenlinien des Stromes zu erkennen. Der q-Strom (**Abbildung 3**) zeigt genau entgegengesetztes Verhalten. Ursache hierfür ist, dass mit steigendem d-Strom der Reluktanzanteil am Gesamtdrehmoment steigt und somit bei gleichem Drehmoment geringere q-Ströme erforderlich sind.

Durch die Erhöhung der Zwischenkreisspannung auf $U_{zk} = 600$ V verlagert sich die Grenze zwischen Grunddrehzahlbereich und Feldschwächbereich hin zu höheren Drehzahlen. Die Erhöhung der Spannungsgrenze um 50 % ermöglicht es, bei gleichen Strömen und unveränderter elektromagnetischer Auslegung, die Drehzahlen bei konstanten Drehmomenten um 50 % zu steigern.

1.2 Vermessung der Maschine

Die Maschine wird bei Drehzahlen von 250 min^{-1} bis 5000 min^{-1} in 13 Schritten und Drehmomenten von 5 Nm bis 220 Nm in 15 Schritten vermessen. Bei der Vermessung der Maschine wird darauf geachtet, dass die Temperaturabweichungen während der Messung in Rotor und Stator auf ein Minimum reduziert werden. Daher wird die Maschine zunächst über zwei Stunden lang bei aktivem Kühlsystem und in einem konstanten Betriebspunkt vorgewärmt. Dann werden alle zu messenden Betriebspunkte nacheinander angefahren und für jeweils 10 s gehalten. In jedem Betriebspunkt werden jeweils das mittlere Drehmoment, die Verluste, die elektrischen Ströme sowie der Wirkungsgrad messtechnisch erfasst.

Während der gesamten Messung werden die Temperaturen im Stator an drei Positionen innerhalb der Statorwicklung aufgezeichnet. Die Statortemperaturen weichen während der Messungen um maximal 25 °C von der Starttemperatur (70 °C) ab.

Über die induzierte Spannung im Leerlauf wurde jeweils zu Beginn und Ende einer Kennfeldvermessung die Rotortemperatur ermittelt. Dabei hat sich gezeigt, dass die Rotortemperaturen um wenige $^{\circ}\text{C}$ voneinander abweichen. Über den Verlauf der Rotortemperaturen während der Messung war keine Aussage möglich. Aufgrund der hohen thermischen Masse des Rotors und den geringen Verlusten im Rotor kann davon ausgegangen werden, dass die Rotortemperatur nicht wesentlich von ihren Start- und Endwerten abweicht.

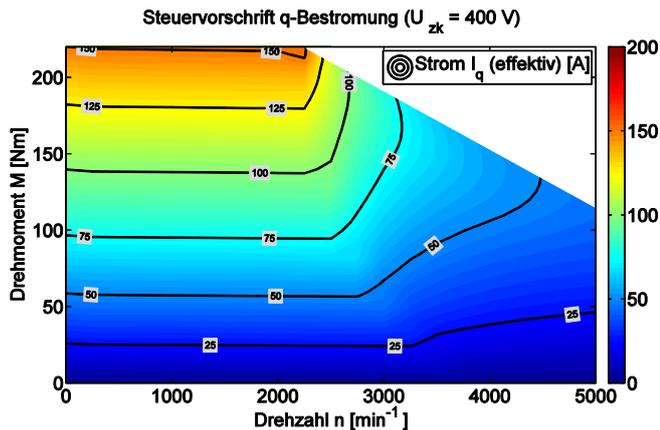


Bild 3 Strom in q-Achse bei einer Zwischenkreis-spannung von $U_{zk} = 400 \text{ V}$

Bei der Vermessung der Maschine zeigt sich, dass die erforderlichen Ströme über den gesamten Messbereich ca. 10 % höher sind als in Unterpunkt 1.1 ermittelt. Ursache hierfür ist zum Einen eine etwas geringere Flussverketung im Leerlauf als auch zum Anderen der negative Einfluss durch die Bearbeitung des Weicheisenmaterials auf die Magnetisierbarkeit sowie der nicht exakt bekannte Eisenfüllfaktor des Prototyps.

1.3 Simulation des Verlustverhaltens

Aufbauend auf den, zur Bestimmung der Steuervorschrift, durchgeführten Simulationen (Unterpunkt 1.1) wird im Folgenden das Verlustverhalten der Maschine simulativ dargestellt. Hierbei wird die messtechnisch ermittelte Abweichung der Ströme in Höhe von 10 % berücksichtigt und auf die Steuervorschrift beaufschlagt.

Der Widerstand der Wicklungen wird mithilfe eines Mikroohmmeters bei Raumtemperatur gemessen. Für die Berechnung der Kupferverluste wird eine Temperatur von $70 \text{ }^\circ\text{C}$ angenommen. Die Kupferverluste werden anhand des Zusammenhangs zwischen den Kupferverlusten (P_{Cu}), dem Wicklungswiderstand (R) und dem Strom (I) bestimmt ($P_{Cu} = 3 \cdot R \cdot I^2$). Für die Bestimmung der Kupferverluste in der Simulation werden die Ströme der Steuervorschrift angenommen. Hierdurch ergibt sich für die Kupferverluste ein ähnliches Verhalten wie für die Ströme (Abbildung 3 und 4). Im Grunddrehzahlbereich sind die Kupferverluste dadurch nahezu unabhängig von der Drehzahl wohingegen sie in Feldschwächung mit der Drehzahl steigen. So erhöhen sich die Kupferverluste bei jeweils 50 Nm von ca. 127 W bei einer Drehzahl von 4000 min^{-1} auf ca. 651 W bei 8000 min^{-1} .

Die Reibungsverluste im Luftspalt werden nach [5] modelliert. Gemäß [5] ist der Zusammenhang zwischen Luftreibungsverlusten und Drehzahl quadratisch. Bei einer Drehzahl von 8000 min^{-1} werden Luftreibungsverluste in Höhe von 233 W errechnet. Die Reibungsverluste in den Wälzlagern werden mithilfe von [6] und [7] abgeschätzt. Nach [6] ist der Zusammenhang zwischen den Lagerverlusten und der Drehzahl über den Exponenten $5/3$ gege-

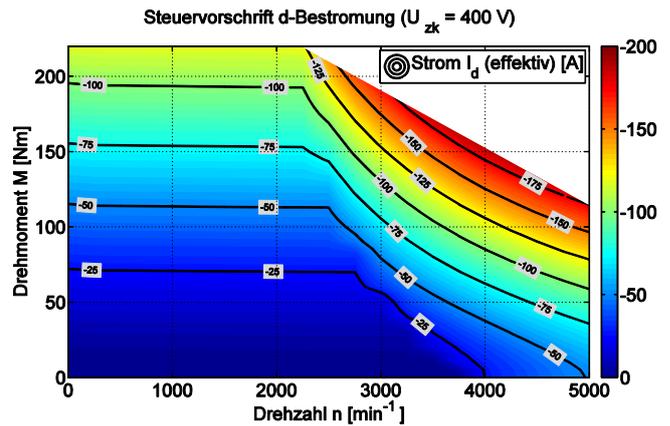


Bild 4 Strom in d-Achse bei einer Zwischenkreis-spannung von $U_{zk} = 400 \text{ V}$

ben. Mithilfe des Onlinetools des Wälzlagerherstellers [7] wurden für die verwendeten Lager die Reibungsverluste bei verschiedenen Drehzahlen bestimmt. Die maximalen Lagerverluste ergeben sich, ebenso wie die Luftreibungsverluste bei der Maximaldrehzahl 8000 min^{-1} und betragen 115 W . Die maximal auftretenden Reibungsverluste ergeben sich somit zu 348 W bei 8000 min^{-1} .

In den Permanentmagneten (PM) können, je nach Maschinendesign, signifikante Wirbelstromverluste auftreten. Bei der Simulation werden aufgrund des stark steigenden Rechenbedarfs zunächst keine Wirbelstromgebiete berücksichtigt. Im Postprocessing werden dann für verschiedene Drehmoment-Drehzahl Betriebspunkte die zeitlichen Verläufe der magnetischen Flussdichte in den PM analysiert. Die in den PM zu erwartenden Wirbelstromverluste werden ähnlich wie die Wirbelstromverluste in Elektroblech gemäß [8] abgeschätzt. Als Ergebnis stellt sich heraus, dass Wirbelstromverluste in den PM von maximal 5 W zu erwarten sind. Dieser geringe Wert ist durch das Maschinendesign mit V-förmig vergrabenen Magneten begründet. Aufgrund dessen werden die PM-Wirbelstromverluste für die folgenden Simulationen vernachlässigt.

Die Eisenverluste werden nach der IEM-5-Parameter Verlustformel [2] modelliert. Hierfür werden zunächst Proben des verwendeten Elektroblechs (M330-35A) auf einem Epsteinrahmen bei einem Frequenzbereich von 4 mHz bis 500 Hz und magnetischen Polarisierungen von $0,1 \text{ T}$ bis $1,9 \text{ T}$ vermessen. Die hierbei ermittelten spezifischen Eisenverluste werden dazu genutzt, die fünf Parameter (a_1 bis a_5) der IEM-5-Parameter Verlustformel zu ermitteln [1]. Da in den FEM-Simulationen nach Unterpunkt 1.1 die lokalen Verläufe der magnetischen Flussdichte bekannt sind, können die Eisenverluste mithilfe der Fourier Transformation und der Parameter a_1 bis a_5 lokal aufgelöst werden.

Die so ermittelten Verluste werden addiert und mit den gemessenen Verlusten der Maschine verglichen. Dabei zeigt sich, dass die Eisenverlustkomponenten (Hysterese-, Wirbelstrom-, Excess- und Sättigungsverluste) mit unterschiedlichen Kalibrierungsfaktoren beaufschlagt werden müssen um eine gute Übereinstimmung von Simulation

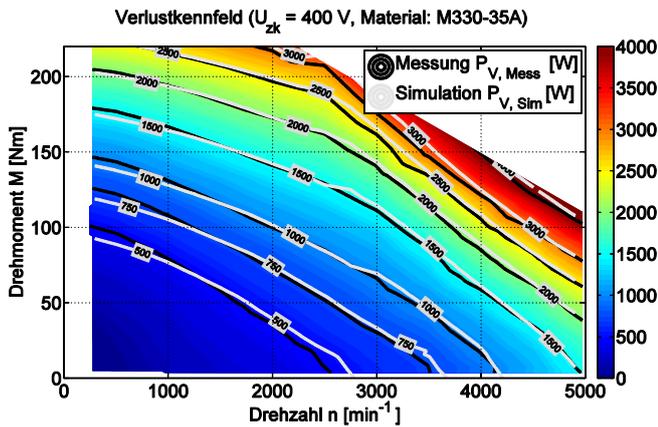


Bild 5 Simuliertes und gemessenes Verlustkennfeld für eine Zwischenkreisspannung von $U_{zk} = 400$ V

und Messungen zu erhalten. Ursache für die erhöhten Eisenverluste sind Bearbeitungseffekte durch das Schneiden der Blechlamellen [9] sowie weitere undefinierte Verlustmechanismen [5]. Die sich ergebenden gemessenen und simulierten Verlustkennfelder (kalibriert) sind für eine Zwischenkreisspannung von $U_{zk} = 400$ V und $U_{zk} = 600$ V in **Abbildungen 5** und **6** dargestellt.

Es zeigt sich deutlich, dass nur geringe Abweichungen zwischen Simulation und Messung vorhanden sind. So weichen die simulierten Verluste von den gemessenen bei $U_{zk} = 400$ V um maximal 150 W und bei $U_{zk} = 600$ V um maximal 200 W ab.

Hinsichtlich der Wirkungsgrade ergeben sich maximale Abweichungen von 0,5 Prozentpunkten für Drehmomente über 20 Nm und Drehzahlen über 1000 min^{-1} . Für einen Großteil der Betriebspunkte liegt die Abweichung unterhalb von 0,2 %. Diese geringen Abweichungen lassen sich auf die Temperaturabweichungen während der Vermessung der Kennfelder begründen (Unterpunkt 1.2).

Die Simulationskette zur Bestimmung der Maschinenverluste wird daher im Folgenden für die Extrapolation der nicht vermessenen und nicht vermessbaren Betriebsbereiche eingesetzt.

2 Extrapolation mithilfe der kalibrierten Simulation

Basierend auf den in Unterpunkt 1.1 ermittelten Simulationsdaten (magnetische Flussverkettung und Drehmoment gegenüber I_d und I_q) wird die Steuervorschrift für Drehmomente bis 300 Nm und Drehzahlen bis 8000 min^{-1} bei einer Zwischenkreisspannung $U_{zk} = 600$ V bestimmt. Dabei wird die Anpassung des Stroms um 10 % vorgenommen und die Verluste werden wie in Unterpunkt 1.3 beschrieben ermittelt. Es wird der Einsatz verschiedener Elektroblechsorten (M330-35A und M235-35A) und der Einfluss auf das Verlustverhalten der Maschine untersucht. Für beide betrachteten Elektrobleche werden Messungen an Eppeinstreifen durchgeführt und die Materialien hinsichtlich ihrer Eisenverluste charakterisiert. Die für die Eisenverlustberechnung in der Simulation verwendeten Verlustparameter werden auf Basis dieser Messun-

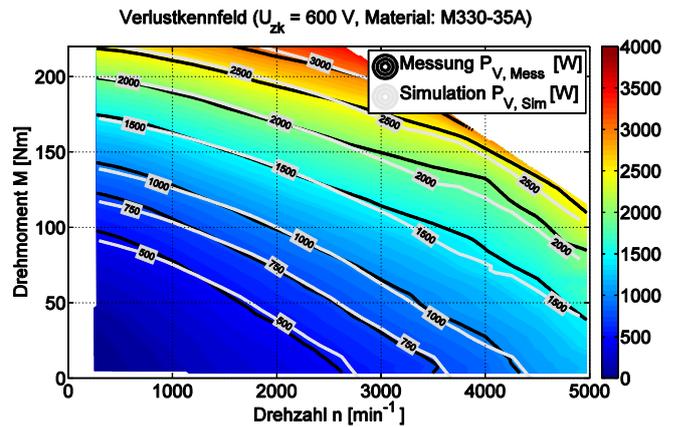


Bild 6 Simuliertes und gemessenes Verlustkennfeld für eine Zwischenkreisspannung von $U_{zk} = 600$ V

gen bestimmt. Die Eisenverlustberechnungen in der Maschinensimulation werden mit diesen Parametern durchgeführt und die Eisenverlustkomponenten mit Kalibrierungsfaktoren beaufschlagt (Unterpunkt 1.3). **Abbildung 7** zeigt die so ermittelten Eisenverluste für das im ausgeführten Prüfmuster eingesetzte Elektroblech (M330-35A) mit angepassten Kalibrierungsfaktoren.

Die örtliche Auflösung der simulierten Eisenverluste innerhalb der Maschine ermöglicht es, die Eisenverluste nach Rotor und Stator separiert zu ermitteln. **Abbildung 8** zeigt die simulierten Eisenverluste im Rotor für das Elektroblech M330-35A. Die Rotoreisenverluste erreichen ihren maximalen Wert von 795 W bei einer Drehzahl von 8000 min^{-1} und 150 Nm. Damit betragen die Rotoreisenverluste maximal ca. 12,4 % der Eisenverluste in der gesamten Maschine. Die Rotoreisenverluste machen somit nur einen relativ geringen Anteil an den Gesamtverlusten von maximal 7,5 % aus. Für den Betrieb der Maschine stellen die Rotorverluste aufgrund der geringen Wärmeabfuhr neben den elektrischen Größen und der Statorerwärmung eine entscheidende Betriebsgrenze dar. Zusammen mit einem thermischen Modell der Maschine und maximal zulässigen Temperaturen besteht somit die Möglichkeit mithilfe der Verlustseparation die Betriebsgrenzen bereits vor dem Betrieb eines Prototyps zu bestimmen und einen Prototypen während der Inbetriebnahme vor zu starker Erwärmung durch dauerhaft unzulässige Betriebspunkte zu schützen.

2.1 Einfluss des Materialeinsatzes auf Verluste

Durch die Summe der Verlustleistungen ergeben sich die zu erwartenden Gesamtverluste. Diese sind in **Abbildung 9** für den Fall des Einsatzes von M330-35A als Weichmagnetwerkstoff dargestellt.

Die weichmagnetischen Materialien verhalten sich hinsichtlich ihrer Magnetisierbarkeit ähnlich. Es wurde in ausgewählten Betriebspunkten simulativ ermittelt, welchen Einfluss die Materialauswahl auf die magnetische Flussverkettung sowie das Drehmoment nimmt. Dabei haben sich Abweichungen von unter 1 % ergeben, sodass

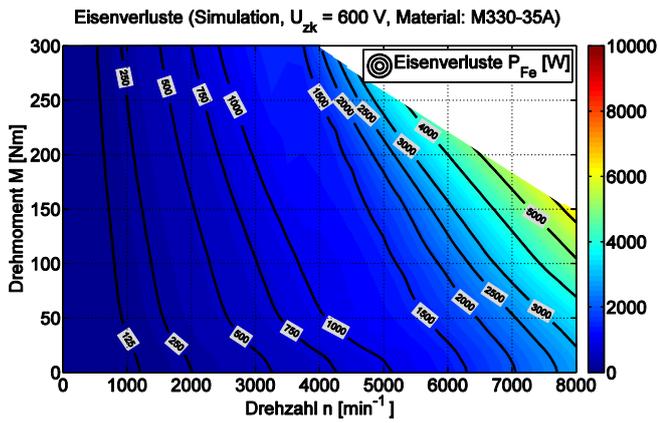


Bild 7 Simulierte Eisenverluste bei einer Zwischenkreisspannung von $U_{zk} = 600 \text{ V}$ und unter Einsatz von M330-35A

für die untersuchten Materialien die identische Magnetisierungskennlinie angenommen wird. Dies führt zu dem Vorteil, dass sich die Flussverkettungen und Drehmomente aus Unterpunkt 1.1 nur marginal ändern und somit keine erneuten FE-Simulationen erforderlich sind. Die Steuervorschrift kann dadurch unverändert bleiben. Um den Einfluss der Materialauswahl auf das Betriebsverhalten zu bestimmen, ist es daher ausreichend, nur die Eisenverluste im Postprocessing über geänderte Verlustparameter anzupassen. Die Gesamtverluste inklusive der Kalibrierungsfaktoren sind in **Abbildung 10** für den Werkstoff M235-35A dargestellt. Für drei Betriebspunkte sind die ermittelten Gesamtverluste in **Tabelle 1** aufgeführt. Bei einer Drehzahl von 1000 min^{-1} und 250 Nm (Betrieb mit hohem Drehmoment) lassen sich die Gesamtverluste durch die Wahl des Blechs um $1,4 \%$ reduzieren. Im Bereich des Wirkungsgradmaximums (4500 min^{-1} und 125 Nm) können die Gesamtverluste um etwa $9,7 \%$ reduziert werden. Dies entspricht einer Steigerung des Maximalwirkungsgrads um $0,35 \%$. Bei hohen Drehzahlen (8000 min^{-1} und 50 Nm) lassen sich die Gesamtverluste um 696 W bzw. um $15,4 \%$ reduzieren.

Für den optimierten Materialeinsatz in elektrischen Ma-

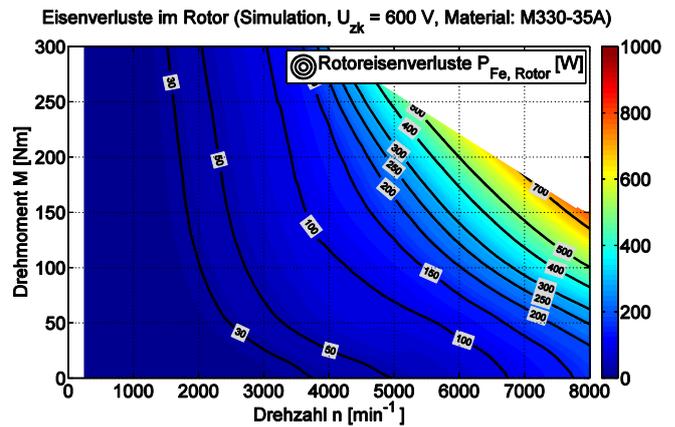


Bild 8 Simulierte Rotoreisenverluste bei einer Zwischenkreisspannung von $U_{zk} = 600 \text{ V}$ und unter Einsatz von M330-35A

schinen ist es daher erforderlich die Belastungsprofile zu kennen. Sind diese bekannt, so kann auf Basis der kalibrierten Leistungssimulation ein kostengünstiges und hinsichtlich der Verluste angepasstes Elektroblech ausgewählt werden.

Das für größere Betriebsbereiche angepasste Maschinendesign wird für Dauerbetrieb bei Maximaldrehzahl und auf einen möglichst hohen Wirkungsgrad ausgelegt. Daher ist es für das in Zukunft aufgebaute Muster von entscheidendem Vorteil ein verlustärmeres Elektroblech zu verwenden.

Material \ Betriebspunkt	M330-35A	M235-35A
8000 min^{-1} 50 Nm	4516 W	3820 W
4500 min^{-1} 125 Nm	2286 W	2065 W
1000 min^{-1} 250 Nm	3271 W	3224 W

Tabelle 1 Simulierte Verluste bei Einsatz verschiedener Materialien in drei unterschiedlichen Betriebspunkten

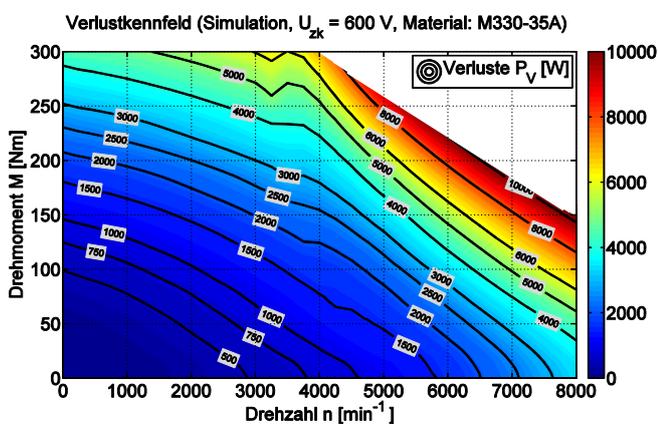


Bild 9 Simuliertes Gesamtverlustkennfeld bei einer Zwischenkreisspannung von $U_{zk} = 600 \text{ V}$ und unter Einsatz von M330-35A

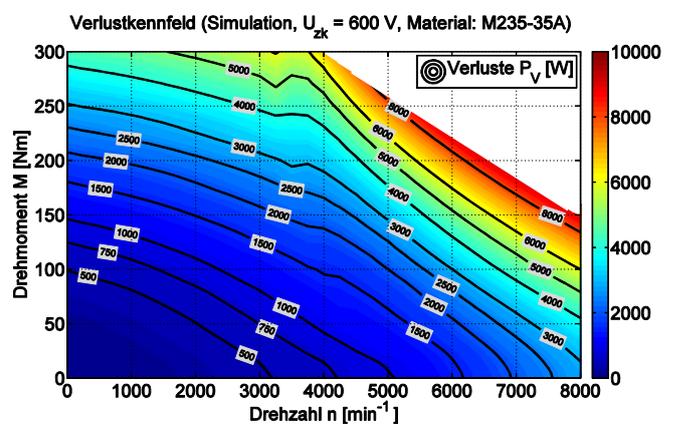


Bild 10 Simuliertes Gesamtverlustkennfeld bei einer Zwischenkreisspannung von $U_{zk} = 600 \text{ V}$ und unter Einsatz von M235-35A

3 Zusammenfassung

Anhand der vermessenen Maschine konnte gezeigt werden, dass mithilfe von kalibrierten FEM-Leistungssimulationen die Auswirkungen von Designanpassungen einer permanentmagnet erregten Synchronmaschine bereits vor Fertigung weiterer Prototypen bewertet werden können. Ziel der Designanpassung war die Steigerung der Maximaldrehzahl der Maschine von 6000 min^{-1} auf 8000 min^{-1} sowie die Erhöhung des maximalen Drehmoments von 220 Nm auf 300 Nm. Um diese Ziele zu erreichen, musste sowohl das mechanische, als auch das elektromagnetische Design adaptiert werden. Insbesondere konnte gezeigt werden welchen Einfluss die Wahl eines anderen Elektrolechmaterials auf das Verlustverhalten der Maschine hat.

Für die Kalibrierung der Leistungssimulation wurde eine Separation der Verluste durchgeführt. Es wurden neben den Kupferverlusten die Eisenverluste sowie die Reibungsverluste berücksichtigt. Die Bestimmung der Eisenverluste erfolgte, wie in [2] dargelegt auf Basis von FEM-Simulationen und Epsteinmessungen wie in [1]. Durch den Vergleich der simulierten Verluste mit Maschinenmessungen konnten die Bearbeitungseffekte bei der Bestimmung der Eisenverluste berücksichtigt und die Simulationen validiert werden. Des Weiteren wurden die Eisenverluste nach Rotor und Stator separiert.

Bei der Vermessung der Maschine hat sich gezeigt, dass es für die Kalibrierung der Leistungssimulation entscheidend ist, die Temperaturen während der Messung möglichst auf einem konstanten Temperaturniveau zu halten. Da die Vermessung der Rotortemperatur vor und nach den Messungen nur geringe Abweichungen zeigte, wurde die Rotortemperatur als konstant angenommen.

Durch die Bestimmung der Eisenverlustverteilung hinsichtlich Rotor und Stator ist es zusammen mit thermischen Modellen möglich, Aussagen über die Dauerbetriebsgrenzen zu treffen. Insbesondere wird dadurch auch die simulative Bestimmung der Rotortemperaturen sowie der sich aus den maximal zulässigen Magnettemperaturen ergebende Betriebsgrenzen ermöglicht.

Es sind Aussagen über das Maschinenverhalten in nicht vermessenen Bereichen (Drehmoment und Drehzahl) getroffen worden. Ferner wurde in diesem Beitrag dargelegt, dass mithilfe von kalibrierten FEM-Leistungssimulationen der Einsatz von anderen Elektrolechsorten bereits vor einem erneuten Musterbau evaluiert werden kann.

Die kalibrierte Leistungssimulation beinhaltet daher das Potential mehrere Designanpassungen in einem Iterationsschritt zu betrachten und somit die Auslegungszyklen von elektrischen Maschinen zu verkürzen.

4 Danksagung

Diese Arbeiten entstanden im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts, welches gemeinsam mit ThyssenKrupp Presta Camshafts durchgeführt wurde. In diesem Projekt war die Auslegung, Fertigung und Vermessung einer permanentmagnet erregten Synchronmaschine Untersuchungsgegenstand. ThyssenKrupp Presta Camshafts stellt dabei Know-how im Bereich großserienfähiger Leichtbaurotorlösungen für Fahrzeugantriebe bereit, auf der die Rotorwellenkonstruktion der untersuchten Maschine basiert [3]. Für ein Folgevorhaben zusammen mit ThyssenKrupp Presta Camshafts wird die untersuchte Maschine für höhere Drehzahlen und Drehmomente angepasst.

Die konstruktive Ausführung der Rotorwelle als Hohlwelle ermöglicht die Integration von zusätzlichen Funktionen in die Welle. So kann z.B. eine rotorintegrierte Kühlung kostengünstig in die Rotorwelle eingefügt werden.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts *e-mosys* [10] wird eine solche rotorintegrierte Luftkühlung untersucht. Die hier vorgestellten Ergebnisse und Methoden zur Verlustseparation (nach Art und Entstehungsort) finden daher Eingang in *e-mosys* und ermöglichen die gezielte Auslegung der Rotorkühlung. Die rotorintegrierte Kühlung ermöglicht geringere Rotortemperaturen und damit höhere Remanenzflussdichten sowie eine bessere Ausnutzung der eingesetzten Neodym-Eisen-Bor Permanentmagnete.

5 Literatur

- [1] S. Steentjes, M. Leßmann, K. Hameyer: "Semi-physical parameter identification for an iron-loss formula allowing loss-separation," *J. Appl. Phys.*, vol. 113, iss. 17, 2013.
- [2] S. Steentjes, G. von Pffingsten, M. Hombitzer, and K. Hameyer, „Iron-loss model with consideration of minor loops applied to FE-simulations of electrical machines,“ to appear in *IEEE Trans. Magn.*, (49), no. 7, 2013.
- [3] <http://www.thyssenkrupp-presta-camshafts.com/language-de/produkte/rotorwellen.htm> (24. Juni 2013).
- [4] <http://www.iem.rwth-aachen.de> (16. Juni 2013)
- [5] G. Müller: Berechnung elektrischer Maschinen, VCH: 1996.
- [6] W. Beitz, K.-H. Küttner: Dubbel 17. Aufl., Berlin: Springer, 1990.
- [7] <http://medias.schaeffler.de> (16. Juni 2013).
- [8] J. Lammeraner, M. Stafl, *Eddy Currents*, London (U.K.), Iliffe Books: 1966.
- [9] A. Schoppa, J. Schneider, C.-D. Wuppermann, Influence of the manufacturing process on the magnetic properties of non-oriented electrical steels, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volumes 215–216, 2 June 2000, Pages 74-78.
- [10] <http://www.gse.rwth-aachen.de/projekte/elektrischer-antriebsstrang/emosys> (24. Juni 2013).