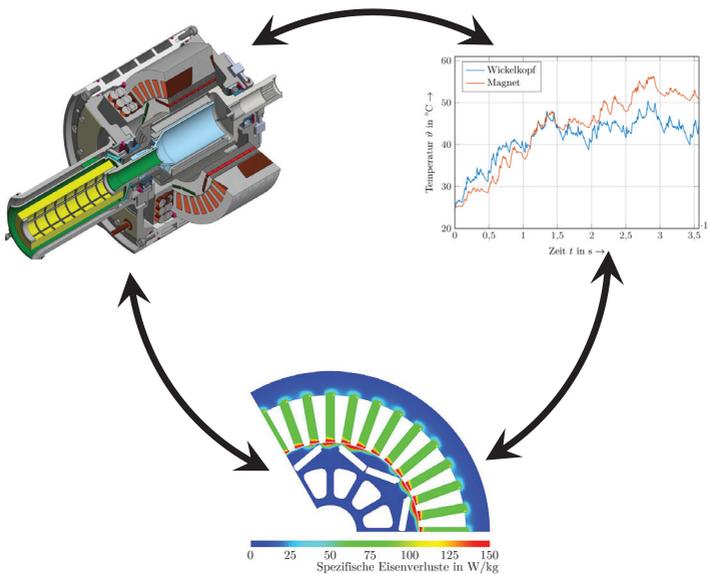


Thorben Grosse-von Tongeln

## Aktive Rotorkühlung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine für die elektrische Traktion



# **Aktive Rotorkühlung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine für die elektrische Traktion**

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der  
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

M. Sc.

Thorben Grosse-von Tongeln

aus Düsseldorf

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Achim Kampker

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Juli 2018



Aachener Schriftenreihe zur  
Elektromagnetischen Energiewandlung

Band 34

**Thorben Grosse-von Tongeln**

**Aktive Rotorkühlung einer permanentmagneterregten  
Synchronmaschine für die elektrische Traktion**

Shaker Verlag  
Aachen 2018

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

### **Aachener Schriftenreihe zur Elektromagnetischen Energiewandlung**

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Kay Hameyer  
Institut für Elektrische Maschinen  
RWTH Aachen  
52056 Aachen

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6264-9

ISSN 1861-3799

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*Meinem kleinen frechen Esel gewidmet.*



# Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter von 2012 bis 2017 am Insitut für Elektrische Maschinen (Lehrstuhl für Elektromagnetische Energiewandlung) der RWTH Aachen im Zuge des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes *e-mosys: Modulares Antriebs- und Fahrwerkssystem für E-Fahrzeuge* (Fördernummer 16N11637).

Meinem Doktorvater und Direktor des Institutes für Elektrische Maschinen, Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer, spreche ich für die exzellente Betreuung dieser Arbeit und die Möglichkeiten und Freiheiten, die mir im Zuge meiner wissenschaftlichen Tätigkeiten gewährt wurden, meinen herzlichen Dank aus. Durch die konstruktive Kritik und die wissenschaftliche Gelehrsamkeit hat er wesentlich zu dem Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Für die Übernahme des Koreferates und das lebhaftes Interesse, das Sie dieser Arbeit entgegengebracht haben, bedanke ich mich in aller Form bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Achim Kampker.

Ohne die langjährige enge Zusammenarbeit mit meinen Kollegen und die Unterstützung bei mannigfaltigen Fragestellungen durch die Gruppenleiter und Oberingenieure wäre die Umsetzung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Insbesondere gilt dies für meine geschätzten Kollegen Dipl.-Ing. Marco Hombitzer, Georg von Pfingsten, M. Sc. und Andreas Ruf, M. Sc., deren Austausch ich sehr schätze.

In diesen Dank schließe ich ausdrücklich alle Studenten ein, die mich im Rahmen von Hiwitätigkeiten, Projekten, Seminar- oder Abschlussarbeiten tatkräftig unterstützt haben und maßgeblich an der Erschließung offener Fragestellungen beteiligt waren. Hierbei möchte ich Herrn Jonas Lenz, B. Sc. und Herrn Nils Conzelmann, M. Sc. einen ganz besonderen Dank aussprechen.

Die hilfreiche und entgegenkommende Unterstützung aus dem Sekretariat, der mechanischen und elektrischen Werkstatt ermöglichte mir stets bei tech-

nischen und organisatorischen Herausforderungen eine Lösung zu finden und meinen eigenen Horizont zu erweitern.

Der intensive Austausch und die engmaschige Zusammenarbeit mit den Firmen ThyssenKrupp Presta Chemnitz GmbH, TRIDELTA GmbH und ENGIRO GmbH verhalf dazu die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse zu erzielen.

Der größte Danke gilt meiner Familie, die fortwährend an meiner Seite ist und mich mit Rat und Tat über den gesamten Zeitraum der Promotion und darüber hinaus unterstützte. An dieser Stelle möchte ich ganz besonders meiner Ehefrau, Franziska von Tongeln, M.Sc., für die Ermutigung, den Rückhalt und ihr hohes Maß an Geduld und Toleranz danken.

Aachen, im September 2018

Thorben Grosse-von Tongeln

## Kurzfassung

Bei permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PMSM) mit vergrabenen Magneten wird im gesamten Betriebsbereich ein Strom gestellt, der unter Ausnutzung des Reluktanzmomentes das Drehmoment steigert, jedoch eine Schwächung der Erregerflussverkettung des Rotors bewirkt. Jener Feldschwächestrom generiert Stromwärmeverluste in dem Wicklungssystem, reduziert somit den Wirkungsgrad und erhöht die Temperaturen des Motors. Im Bereich hoher Drehzahlen steigt bei Synchronmaschinen mit permanenter Magneterregung der Anteil der Ummagnetisierungsverluste im Rotor auf bis zu 10% der Gesamtverluste. Wegen der unzureichenden Entwärmung über Welle, Lager und Stator kann sich der Rotor innerhalb weniger Minuten unzulässig erwärmen. In Abhängigkeit der Rotortemperatur und des feldschwächenden Stroms besteht die Gefahr einer irreversiblen Entmagnetisierung der Magnete des Rotors. Weiterhin geht mit steigender Temperatur ein Flußverlust einher, der diese Problematik verschärft.

Es existieren Ansätze, den Rotor mittels erzwungener Konvektion über Luftströmung oder Ölkühlung durch die Welle zu entwärmen [23, 38]. Diese Technologien sind bei hochdrehenden Motoren gar nicht oder nur mit großem Aufwand und hohen Kosten einsetzbar. Es muss eine Rotorkühlung bereit gestellt werden, die ohne Reduktion der Volumen-Leistungsdichte und der Massen-Leistungsdichte eine irreversible Entmagnetisierung verhindert und so den thermisch dauerhaft zulässigen Betriebsbereich der PMSM erweitert. Diese Erweiterung ist mittels aktiver Rotorkühlung, die eine Reduktion der Magnettemperaturen bewirkt, abzubilden. Die Kühlung entwärmt über die Rotation des Rotors das Rotorpaket, ohne auf extern angetriebene Lüfter oder Radiatoren angewiesen zu sein. Da der Motor als Innenläufer ausgeführt ist, ist eine direkte Anbindung des Rotors an eine radial nach aussen abführende Entwärmung nicht möglich. Der Motoraufbau und die Forderung Traktionsantriebe gekapselt auszuführen, verhindert die Integration eines axial über den Luftspalt entwärmenden Systems. In dieser Arbeit wird eine Rotorkühlung implementiert, bei der die Entwärmung des Rotors über ein koaxial geführtes Kühlsystem innerhalb des Rotors erfolgt. Die Führung des Volumenstroms von Vor- und Rücklauf erfolgt axialseitig.

Das Kühlsystem wird in ein validiertes Motordesign integriert, um die Randbedingungen für eine belastbare vergleichende Charakterisierung der neuen Technologie zu schaffen. Alle peripheren Komponenten und die Wicklungstopologie bleiben unverändert. Lediglich die magnetisch aktiven Elemente (Rotor, Stator, Wicklung) werden angepasst, um Bauraum für die Rotorkühlung zu schaffen. Die Bewertung des Einflusses der Rotorkühlung und die damit einhergehende Anpassung der Komponenten auf das Betriebsverhalten des Motors erfolgt auf Basis eines thermischen Modells. Zur Abbildung einer relevanten Anwendung wird der Motor in das Modell eines Elektrofahrzeugs implementiert. Jenes Fahrzeugmodell erlaubt die Abbildung des Antriebs und seiner Charakteristika in realen Fahrsituation. Im Fokus steht die Erweiterung des thermisch dauerhaft zulässigen Betriebsbereichs und die Bewertung des Betriebsverhaltens über diese Grenzen hinaus.

Die Charakteristika der beiden Motoren (Initialdesign: Motor ohne Rotorkühlung, Neudesign: Motor mit Rotorkühlung) werden abschließend verglichen. Durch die Adaptierung der Geometrie und die Integration der Gaskühlung erfolgt eine Erweiterung des dauerfesten Betriebsbereichs oberhalb von etwa  $4000 \text{ min}^{-1}$ , obgleich bei Absinken der Entmagnetisierungsfestigkeit die Verluste ansteigen. Bei Drehzahlen bis zu  $4000 \text{ min}^{-1}$  liegt der Volumenstrom unterhalb von  $2 \text{ L/s}$ , was dazu führt, dass im Grunddrehzahlbereich eine verminderte Entwärmung durch die Rotorkühlung vorliegt. Oberhalb von  $4000 \text{ min}^{-1}$  steigt der Volumenstrom der Rotorkühlung bis er bei  $10\,000 \text{ min}^{-1}$  über  $5 \text{ L/s}$  beträgt. Das führt dazu, dass der S1-Bereich des Neudesigns im Vergleich zu dem des Initialdesigns aufgeweitet wird. Mit steigenden Drehzahlen führt dies zu einem stetigen Aufscheren der S1-Kennlinien der beiden Motoren, bis bei maximaler Drehzahl ( $10\,000 \text{ min}^{-1}$ ) eine Drehmomentdifferenz von  $6 \text{ N m}$  vorliegt. Die dauerhaft stellbare mechanische Leistung steigt durch die Adaptierung des Motors von  $25,1 \text{ kW}$  um  $25,2\%$  auf  $31,42 \text{ kW}$ . Bei hohen Drehzahlen ist der Betrieb durch die thermischen Grenzen der Magnete bei der Initialgeometrie nur eingeschränkt möglich. Ein dauerhafter Segelbetrieb ist auf eine Drehzahl von  $9670 \text{ min}^{-1}$  begrenzt. Bei dem Neudesign hingegen wird bei der Maximaldrehzahl von  $10\,000 \text{ min}^{-1}$  eine Drehmomentreserve von  $2,5 \text{ N m}$  bereitgestellt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Problemstellung . . . . .	1
1.2. Hypothesen . . . . .	2
1.3. Aufbau und Inhalt der Arbeit . . . . .	5
<b>2. Kühltechnologien</b>	<b>9</b>
2.1. Kühlung elektrischer Maschinen . . . . .	10
2.1.1. Oberflächenkühlung . . . . .	10
2.1.2. Kühlung mit offenem Kühlkreis . . . . .	11
2.1.3. Kühlung mit geschlossenem Kühlkreis . . . . .	12
2.1.4. Röhrenkühlung . . . . .	13
2.2. Statorkühlung . . . . .	14
2.3. Rotorkühlung . . . . .	15
2.3.1. Stand der Technik . . . . .	15
2.3.2. Ergebnisse . . . . .	20
<b>3. Entmagnetisierungsfestigkeit</b>	<b>23</b>
3.1. Hysteresekurve . . . . .	23
3.2. Hartmagnetische Werkstoffe . . . . .	24
3.3. Entmagnetisierungsrechnung . . . . .	27
3.4. Ergebnisse . . . . .	32
<b>4. Modellbildung</b>	<b>35</b>
4.1. Permanentmagneterregte Synchronmaschine . . . . .	35
4.1.1. 3-Phasen-System . . . . .	35
4.1.2. Drehmomentgleichung . . . . .	37
4.1.3. Steuervorschrift . . . . .	40
4.1.4. Verlustmechanismen . . . . .	47
4.1.5. Thermische Modellbildung . . . . .	54
4.2. Automotive Anwendung . . . . .	62
4.2.1. Bedarfskraft . . . . .	63
4.2.2. Fahrzeug . . . . .	67

4.2.3. Bedarfsmoment . . . . .	70
4.3. Ergebnisse . . . . .	71
<b>5. Dauer- und Überlast-Betrieb eines Traktionsmotors</b>	<b>73</b>
5.1. Nennbetriebsarten nach IEC 60034-2-1 . . . . .	73
5.2. Motorcharakterisierung nach der ECE Regelung Nr. 85 . . . . .	74
5.2.1. Bestimmung der Nutzleistung . . . . .	74
5.2.2. Bestimmung der höchsten 30-Minuten-Leistung . . . . .	75
5.3. Fahrzyklen . . . . .	76
5.3.1. Neuer Eropäischer Fahrzyklus . . . . .	77
5.3.2. World Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure . . . . .	78
5.4. Eigener Ansatz . . . . .	81
5.4.1. Dauerfester Betriebsbereich . . . . .	81
5.4.2. Überlast-Betriebsbereich . . . . .	83
5.5. Ergebnisse . . . . .	89
<b>6. Permanentmagneterregte Synchronmaschine - Initialdesign</b>	<b>91</b>
6.1. Gesamtaufbau des Initialdesigns . . . . .	91
6.1.1. Geometrische Architektur . . . . .	91
6.1.2. Thermische Architektur . . . . .	93
6.2. Drehmoment: Synchron-, Reluktanz und Koppelanteile . . . . .	97
6.3. Entmagnetisierfestigkeit . . . . .	99
6.4. Steuervorschrift . . . . .	102
6.5. Verlust-/Betriebsverhalten im Kennfeld . . . . .	104
6.5.1. Verlustfreie Kennfelder . . . . .	104
6.5.2. Verlustbehaftete Kennfelder . . . . .	105
<b>7. Permanentmagneterregte Synchronmaschine - Neudesign</b>	<b>113</b>
7.1. Geometrische Anpassungen . . . . .	114
7.1.1. Anpassung der Aktivteile . . . . .	116
7.1.2. Rotorkühlung . . . . .	121
7.2. Gesamtaufbau Neudesign . . . . .	124
7.2.1. Geometrische Architektur . . . . .	124
7.2.2. Thermische Architektur . . . . .	126
7.2.3. Simulationen . . . . .	133
7.2.4. Messungen . . . . .	135
7.3. Drehmoment: Synchron, Reluktanz und Koppelanteile . . . . .	137
7.4. Entmagnetisierfestigkeit . . . . .	139
7.5. Steuervorschrift . . . . .	143

7.6. Verlust-/Betriebsverhalten im Kennfeld . . . . .	145
7.6.1. Verlustfreie Kennfelder . . . . .	145
7.6.2. Verlustbehaftete Kennfelder . . . . .	146
7.6.3. Ergebnisse . . . . .	152
<b>8. Vergleich Neudesign vs. Initialdesign</b>	<b>155</b>
8.1. Geometriegegenüberstellung . . . . .	156
8.2. Drehmomentseparation: Synchron, Reluktanz und Koppelanteile	156
8.3. Entmagnetisierungsfestigkeit . . . . .	158
8.4. Steuervorschrift . . . . .	160
8.5. Verlust-/Betriebsverhalten im Kennfeld . . . . .	161
8.5.1. Verlustfreie Kennfelder . . . . .	161
8.5.2. Verlustbehaftete Kennfelder . . . . .	162
8.5.3. Ergebnisse . . . . .	170
<b>9. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>175</b>
9.1. Zusammenfassung . . . . .	175
9.2. Diskussion . . . . .	179
9.3. Ausblick . . . . .	183
<b>ANHANG</b>	<b>186</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>221</b>
Lateinische Buchstaben . . . . .	221
Griechische Buchstaben . . . . .	223
Tiefgestellte Indizes . . . . .	225
Hochgestellte Indizes . . . . .	227
Schreibweisen . . . . .	227
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>229</b>
<b>Patentanmeldungen</b>	<b>237</b>
<b>Eigene Veröffentlichungen</b>	<b>239</b>
<b>Betreute Abschlussarbeiten</b>	<b>241</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>247</b>