

Technische Universität Dresden

**Berechnung elektrischer Maschinen auf gekoppelten
elektromagnetischen und kühltechnischen Modellebenen
am Beispiel quergekühlter Motoren**

Marco Festa

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktoringenieurs
(Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann
Prof. Dr.-Ing. Ralf Werner

Tag der Einreichung: 1. Dezember 2014

Tag der Verteidigung: 22. Juli 2015

Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und
Antrieben

Band 7

Marco Festa

**Berechnung elektrischer Maschinen auf gekoppelten
elektromagnetischen und kühltechnischen Modell-
ebenen am Beispiel quergekühlter Motoren**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4034-0

ISSN 1869-8190

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

Vorwort

Von November 2008 bis Februar 2012 war ich Mitarbeiter am Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe an der Technischen Universität Dresden. In dieser Zeit entstand nahezu der komplette inhaltliche Teil der vorliegenden Arbeit. Recht viele Menschen haben mich während der Bearbeitung der damit verbundenen Projekte unterstützt und mich bis zum Schluss motiviert, die Erkenntnisse zu Papier zu bringen. Den folgenden Personen bin ich zu großem Dank verpflichtet:

- ▶ Herrn Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann für die fachliche und organisatorische Unterstützung bei der Durchführung der Forschungstätigkeiten, sowie für die jahrelange Betreuung während der Erstellung des schriftlichen Teils.
- ▶ Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinz-Dieter Eberhardt, der die Idee zur wissenschaftlichen Untersuchung der Querkühlung beige-steuert hat und mit dessen Hilfe ich meinen fachlichen Horizont bis ins Fachgebiet der Strömungstechnik erweitern konnte. Auch aus dem sozialen und privaten Bereich habe ich vieles von ihm gelernt, das mir heute bei meiner täglichen Arbeit hilft.
- ▶ den Studenten, die im Rahmen ihrer Studienarbeiten und Diplomarbeiten, sowie ihrer Praktika am Lehrstuhl mit großem Engagement neue Erkenntnisse beige-steuert haben. Insbesondere sei Herrn Dipl.-Ing. Yuanpeng Zhang für die Vorbereitung und Durchführung elektrischer Messungen gedankt. Großer Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Bastian Krug, der noch nach seiner Graduierung an einem Versuchsmotor Hand angelegt hat.
- ▶ allen Kollegen, die durch ihren fachlichen Rat einen wichtigen Beitrag zum Gelingen der Arbeit geleistet haben.
- ▶ Herrn Dipl.-Ing. Steffen Mann, der mir in seiner Funktion als Entwicklungsleiter bei der Wittur Electric Drives GmbH auch bei wissenschaftlichen Fragestellungen beratend zur Seite stand.
- ▶ Herrn M. Sc. Sören Miersch für die großartige Vorbereitung und Begleitung der strömungstechnischen Messungen an der Hochschule für Technik und

Wirtschaft (FH) Dresden, sodass wir gemeinsam in sehr kurzer Zeit viele Messwerte aufnehmen konnten.

- ▶ dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Bereitstellung der Fördermittel im Regionalen Wachstumskern „AutoTram® – Verkehrssystemtechnik für hochkapazitive, nachhaltige Transportsysteme zwischen Bus und Bahn“ (2009 – 2012).
- ▶ meiner Frau Xia, die es geschafft hat, mich zur Fertigstellung der schriftlichen Arbeit zu motivieren und dabei Verzögerungen auf der heimischen Baustelle akzeptieren konnte.

Falkensee, September 2015

Marco Festa

Kurzfassung

An moderne elektrische Maschinen werden hohe Anforderungen gestellt, die oft nur dann erfüllt werden können, wenn die Materialien für die konkrete Anwendung optimal ausgenutzt werden. Im Zuge einer möglichst genauen und somit optimal auf die Antriebsaufgabe abgestimmten Berechnung müssen mehrere physikalische Disziplinen betrachtet werden. Um die physikalischen Vorgänge zu systematisieren, werden Modellebenen eingeführt, auf denen jeweils eine Disziplin zur Anwendung kommt. Eine entscheidende Rolle spielen die Art und der Grad der Kopplung zwischen den Ebenen. Die Systematik der Modellebenen wird um eine Diskussion der anwendbaren Berechnungsmethoden bereichert. Im zweiten Teil der Arbeit wird gezeigt, wie die interdisziplinäre Berechnungsmethodik in der Praxis angewendet wird, indem am Beispiel quergekühlter Maschinen Auslegungsgleichungen entwickelt werden, welche die elektrischen, magnetischen, thermischen und strömungsmechanischen Vorgänge beschreiben. Die Anwendung dieser Gleichungen wird im dritten Teil der Arbeit demonstriert. Dort wird ein kompakter, quergekühlter Traktionsmotor ausgelegt und messtechnisch untersucht, wobei eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Berechnung und der Messung festgestellt wird. Am Ende der Arbeit wird kurz die Studie eines innovativen Asynchronmotors vorgestellt, um zu zeigen, dass die Querkühlung nicht nur zu besonders hohen Ausnutzungsgraden führen kann, sondern bei entsprechender Auslegung auch zu sehr hohen Wirkungsgraden. Bei allen Überlegungen wird großer Wert auf technologische Realisierbarkeit gelegt, sodass die Arbeit viel mehr ist als eine Reihe theoretischer Lösungsansätze, sondern als Leitfaden dienen kann, quergekühlte Maschinen für weitere Anwendungen zu entwickeln.

Abstract

The ever growing demand for improved properties of electrical machines for particular applications can only be fulfilled under the condition that the materials are optimally utilized. In order to precisely calculate, i.e. optimally adapt to the application's requirements, calculation must be based on several disciplines of physics. In this thesis, an approach of systematization using modeling planes is introduced. Each of the planes incorporates discipline-specific variables, constants and equations for use inside the plane. Interfaces and the extent of coupling with other modeling planes play an important role. Systematization continues with a discussion about calculation methods. In the second part of the thesis, the interdisciplinary approach is applied to derive design equations for circumferentially cooled machines. The chapter focuses on electrical, magnetic, thermal and flow mechanical processes. The third part of this work demonstrates how the equations are used in practice to design circumferentially cooled motors: A compact traction motor is designed and experimentally tested. The test results prove good agreement with the calculated values. Finally an innovative induction motor design is presented with the aim to show that not only high factors of utilization, but also high efficiency can be achieved with circumferential cooling. Due to numerous links to technological aspects, this thesis does not only provide theoretical design approaches, but is also written as a guideline for the practical design of circumferentially cooled machines for other applications.

Inhalt

	Formelzeichen	ix
	Indizes	x
1.	Einleitung	1
2.	Systematik der Modellebenen und Berechnungsmethodik	5
2.1	Systematik der physikalischen Modellebenen	5
2.2	Methodik für die Berechnung elektrischer Maschinen	10
2.3	Analytische Feldbeschreibung	11
2.4	Finite Elemente Methode	12
2.5	Zerlegung der Geometrie in Teilabschnitte zur Berechnung von Feldgrößen	15
	Magnetkreisberechnung in Abschnitten	15
	Thermische Berechnung nach Unterteilung in Abschnitte	17
	Abschnittsweise Berechnung von Strömungsfeldern	21
2.6	Netzwerkmethode	24
	Netzwerke für Magnetfeldberechnungen	25
	Wärmequellennetze	27
	Strömungsnetzwerke	34
	Kopplung von Modellebenen auf Netzwerkebene	35
2.7	Kombinierte Anwendung verschiedener Berechnungsmethoden	37
	Einbindung von FEM-Software in analytische Berechnungsprogramme	37
	Einbindung von Netzwerksimulatoren in analytische Berechnungsprogramme	38
	Kombination von Netzwerksimulatoren und FEM-Software	38
3.	Berechnung quergekühlter Maschinen auf gekoppelten Modellebenen	41
3.1	Innovative Querkühlung elektrischer Maschinen	41
3.1.1	Entstehung eines quergekühlten Blechpaket	42
3.1.2	Wege der Kühlluft	46
3.2	Konstruktion quergekühlter Maschinen	47
3.2.1	Verbindung der Bleche zu einem Blechpaket	47
3.2.2	Maschinen mit und ohne Gehäuse	49
3.3	Entwurf und Berechnung quergekühlter Maschinen	50
3.3.1	Unterschiede beim Entwurf quergekühlter Maschinen zum klassischen Entwurf	50
3.3.2	Berechnungen auf der magnetischen Modellebene	51
	Magnetischer Fluss und Flussdichte im Rückengebiet des Stators	51
	Magnetischer Widerstand des Statorrückens	60

	Verluste durch Wirbelströme am Rippenübergang	62
3.3.3	Berechnungen auf der fluidmechanischen Modellebene	69
	Strömung in den Querkühlkanälen	70
	Strömungsverzweigung in die Querkühlkanäle	85
	Aktiver Zweig des Belüftungssystems	97
	Strömungsverluste	98
3.3.4	Berechnungen auf der thermischen Modellebene	98
	Wärmeübergangszahl im Kanalbereich	99
	Kühlfläche	105
	Rippenwirkungsgrad	106
	Kühlmittelerwärmung	107
	Zweidimensionale Temperaturfeldberechnung	108
3.3.5	Verbindungen zwischen den Modellebenen	109
4.	Auslegung quergekühlter Motoren an zwei Beispielen	113
4.1	Auslegung eines Traktionsmotors mit hoher Drehmomentdichte	113
4.1.1	Vorgaben	115
4.1.2	Festlegung der Motorausführung	116
4.1.3	Magnetische, elektrodynamische und kinematische Modellebene	121
4.1.4	Fluidmechanische Modellebene	132
	Mittlere Geschwindigkeit in den Abschnitten des passiven Zweiges	132
	Strömungswiderstandsbeiwerte der Abschnitte des passiven Zweiges	133
	Druckverlust über dem passiven Zweig des Strömungskreises	134
	Überprüfung des Strömungsquerschnitts längs der Einströmkammern	135
	Ermittlung des Arbeitspunktes	135
4.1.5	Thermische Modellebene	137
	Reale Wärmeübergangszahlen	137
	Reale Kühloberfläche	137
	Äquivalente Werte für Kühloberfläche und Wärmeübergangszahl bei 2D	
	Modellierung	138
	Zweidimensionales Temperaturfeld	140
4.1.6	Bewertung der Kühlintensität	142
4.1.7	Starke Kopplung der Modellebenen bei Verwendung der Netzwerkmethod	144
	Elektrodynamische Modellebene	144
	Magnetische Modellebene	146
	Fluidmechanische Modellebene	148
	Thermische Modellebene	149

4.1.8	Technologische Besonderheiten des AutoTram® Motors	150
4.1.9	Messungen im Labor und im Prüffeld	152
	Elektrische und mechanische Stückprüfung	153
	Messung thermischer Größen	155
	Messung strömungstechnischer Größen	156
4.2	Energiesparende Asynchronmaschine	161
5.	Zusammenfassung	167
6.	Ausblick	171