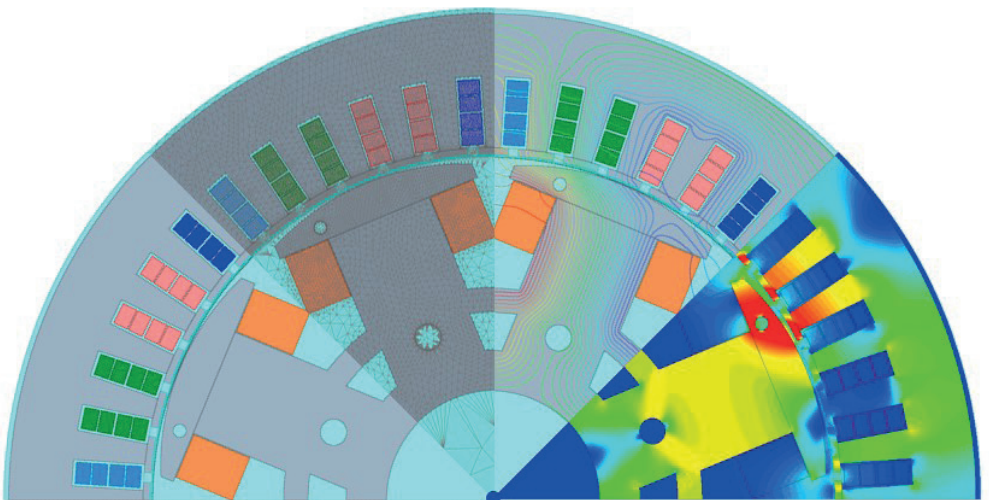


Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

Dominik Grauvogl

Multiphysikalische Auslegung einer fremderregten Synchronmaschine mit magnetischer Asymmetrie für einen Hochvolt-Achsantrieb



Multiphysikalische Auslegung einer fremderregten Synchronmaschine mit magnetischer Asymmetrie für einen Hochvolt-Achsantrieb

Dominik Grauvogl

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling
2. Prof. Dr. Bernhard Hopfensperger

Die Dissertation wurde am 30.11.2021 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik am 08.12.2021 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 07.03.2022 statt.

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 49

Dominik Grauvogl

**Multiphysikalische Auslegung einer fremderregten
Synchronmaschine mit magnetischer Asymmetrie
für einen Hochvolt-Achsantrieb**

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8553-2

ISSN 1863-0707

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand von Januar 2019 bis November 2021 während meiner Tätigkeit als Doktorand im „Kompetenzzentrum für elektrische Antriebe“ in der Abteilung „Technology and Innovations“ bei Continental bzw. später Vitesco Technologies in Regensburg.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling für die herausragende fachliche und persönliche Betreuung meiner Promotion sowie seinen steten Rückhalt bedanken. Ein besonderer Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Bernhard Hopfensperger für die intensive Durchsicht und Korrektur der Arbeit und die Erstellung des Zweitgutachtens. Weiterhin möchte ich mich auch bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Walter Hansch für den Vorsitz der Promotionskommission bedanken.

Allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Elektrische Antriebstechnik und Aktorik der Universität der Bundeswehr München danke ich für die konstruktive und kollegiale Zusammenarbeit bei meinen Besuchen am Lehrstuhl. Mein herzlichster Dank geht hierbei an Dr.-Ing. Johann Mayer für die unkomplizierte und warmherzige Unterstützung aller organisatorischen Themen.

Auf Unternehmensseite danke ich dem Abteilungsleiter Herrn Friedrich Graf und dem Gruppenleiter Herrn Siegmund Deinhard mir diese Arbeit ermöglicht zu haben, sowie Herrn Dr.-Ing. Anatoliy Lyubar und Herrn Dr.rer.nat. Martin Brüll für die abschließende Fortführung der Arbeit bei Vitesco Technologies.

Hervorzuheben ist Herr Dr.-Ing. Klaus Mühlbauer für sein außerordentliches Engagement der betriebsinternen Betreuung und bei der fachlichen Koordination der Arbeit, die es mir ermöglicht hat, stets fokussiert zu bleiben.

Für fachliche Fragen auf dem Gebiet der E-Maschinen standen mir als firmeninterne Ansprechpartner Herr Dr.-Ing. Wilhelm Hackmann, Herr Dr.-Ing. Reinhold Zwingel, Herr Dr.-Ing. Sachar Spas sowie Herr Ralf Rissmann mit großer Bereitschaft zur Verfügung.

Bei der Konstruktion und Festigkeitsberechnung war Herr Jan-Andreas van de Berg und bei der Untersuchung des Geräuschverhaltens Herr Jeffrey Krabinski eine sehr große Unterstützung. Ein großes Dankeschön gilt Frau Magdalena Vieracker für die organisatorische Unterstützung beim Prototypenaufbau und Frau Patricia Schmusch für ihren unermüdlichen Einsatz bei den vielzähligen Auf- und Umbauten am Prüfstand sowie der Vermessung der Maschine. Ebenfalls sind Frau Sabine Irlbacher, Herr Josef Laumer und Herr Dr.-Ing. Thomas Baumann in Sachen Software und Inbetriebnahme des Prototyps zu nennen.

Als prägendste Figur während der Ausführung dieser Arbeit ist der herausragende Ingenieur Herr Peter Stauder zu nennen. Seine tatkräftigen technischen Diskussionen und Denkanreize waren für mich jedes mal auf das Neue ein Motivationsschub und haben in mir die Leidenschaft für die elektrische Antriebstechnik immer wieder neu entfacht. Bedanken möchte ich mich auch für die hervorragenden Ergebnisse der studentischen Abschlussarbeiten von Herrn Lukas Reinig, Frau Nicole Zöllner und Herrn Matthias Schwürzer sowie dem Werkstudenten Herrn Thomas Wenzl.

Meinen Eltern, meinen engsten Freunden und allen voran meiner Freundin Patricia danke ich von ganzem Herzen für ihren beharrlichen Glauben an mich und ihre unablässige Unterstützung während der emotionalen Achterbahnfahrt, die eine Promotion mit sich bringt.

Regensburg, im September 2021

Dominik Grauvogl

Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation beschreibt einen ganzheitlichen multiphysikalischen Entwicklungsprozess anhand des Beispiels einer fremderregten Synchronmaschine als Traktionsantrieb für ein batterieelektrisches Fahrzeug. Der firmeninterne Antriebsbaukasten auf Basis einer permanent erregten Synchronmaschine wird um ein modular austauschbares, magnetfreies Rotorkonzept erweitert. Die Motivation hierin liegt in den, mit Permanentmagneten einhergehenden, ökonomischen und ökologischen Nachteilen. Ein solch leistungsbezogenes gleichwertig austauschbares Motortypkonzept steigert die Flexibilität und damit die Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt der rasch voranschreitenden Elektromobilität.

Die Entwicklungsschwerpunkte gliedern sich in drei Bereiche. Zu Beginn der Arbeit werden mithilfe eines mathematischen Fahrzeugmodells die Anforderungen an den Traktionsmotor für ein elektrisches Mittelklassefahrzeug abgeleitet. Dabei werden Kurzzeit- und Langzeitgrenztests sowie genormte Fahrzyklen untersucht. Mit einer solchen Analyse ist die Entwicklung in der Lage, Kundenanforderungen zu plausibilisieren und einer Überdimensionierung der Antriebseinheit entgegenzuwirken.

Nachdem die Anforderungen an den Elektromotor feststehen, kann im zweiten Schritt mit der eigentlichen Komponentenentwicklung der E-Maschine unter Zuhilfenahme einer numerischen Feldeberechnung begonnen werden. Als Grundlage hierfür dient der vorhandene Stator des oben genannten Antriebsbaukastens auf Basis der permanent erregten Synchronmaschine. Dieser schränkt den erlaubten Freiheitsgrad bei der Neuentwicklung des magnetischen Kreises der fremderregten Synchronmaschine ein. Als Zielvorgabe soll die fremderregte Synchronmaschine mindestens die gleiche Performance wie die permanent erregte Synchronmaschine erreichen. Zusätzlich ist von Anfang an nach möglichen Vereinfachungen im Produktionsablauf sowie in der Fertigung zu suchen und entsprechend ins Design einfließen zu lassen. Als Lösung wird schließlich ein neuartiger asymmetrischer Rotorblechschnitt erarbeitet. Anhand einer beidseitig ungleichmäßigen Polschuhabflachung in Kombination mit einer Flussperre im Polschuh, lässt sich die geforderte Drehmomentwelligkeit erreichen, ohne dabei das Spitzenmoment zu reduzieren. Darüber hinaus ist aufgrund der asymmetrischen Gestaltung keine typische kontinuierliche Rotorschrägung notwendig, was neben einer effizienteren Produktion auch einen in dieser Arbeit nachgewiesenen höheren Wirkungsgrad zufolge hat.

Zur Sicherstellung einer praxistauglichen Eignung wird im letzten Schritt das elektromagnetische Design iterativ mit den mechanischen, thermischen und akustischen Anforderungen innerhalb eines multiphysikalischen Entwicklungsprozesses abgestimmt. Hierin wird der Nachweis der mechanischen Dauerfestigkeit des Rotorblechschnitts erbracht, ohne dabei die Drehmomentanforderungen zu verletzen. Weiterhin ist der konstruktive

Rotoraufbau dahingehend verbessert, dass trotz der hohen Drehzahlen für die Stabilisierung der Rotorwicklung kein Verguss benötigt wird. Die Dauerleistung lässt sich mit einer hybriden Kühlung erreichen. Hierfür wird die fest vorgegebene Wassermantelkühlung im Stator durch eine zusätzliche Durchzugsbelüftung des Rotors ergänzt. Ein weiterer Effekt der asymmetrischen Polschuhgestaltung ist die Reduktion der Nutungsharmonischen. Dies führt wiederum zu einer signifikanten Verbesserung des magnetischen Geräuschverhaltens. Die Besonderheit liegt darin, dass nach dem heutigen Stand der Technik die Rotorschränkung die einzig bekannte Maßnahme zur Minimierung der Nutungsharmonischen ist.

Die Messungen des Protoyps am Prüfstand zeigen gute Übereinstimmung mit den Berechnungsergebnissen und bestätigen die Wirksamkeit des asymmetrischen Rotordesigns. Die E-Maschine erfüllt die Anforderungen, wodurch sie eine konkurrenzfähige Alternative zur permanenterrregten Synchronmaschine ist. Weiterhin bestätigt dies die Wirksamkeit und Praxistauglichkeit des vorgestellten multiphysikalischen Entwicklungsansatzes.

Abstract

This dissertation describes a holistic multiphysics development process using the example of a wound field synchronous machine as a traction drive for a battery electric vehicle. The company's internal modular drive system based on a permanently excited synchronous machine is extended by a modularly interchangeable, magnet-free rotor concept. The motivation is based on the economic and ecological disadvantages associated with permanent magnets. Such a performance-related, equally interchangeable motor type concept increases flexibility and thus competitiveness in the market for rapidly growing electromobility.

The development can be divided into three major steps. At the beginning of the thesis, the traction requirements for an electric mid-size vehicle are defined with the aid of a mathematical vehicle model. Short-term and long-term limit tests as well as standardized driving cycles are examined. With such an analysis, the developer is able to plausible customer requirements and counteract overdimensioning of the drive unit.

After the requirements have been determined, the actual component development of the e-machine can begin with the aid of a numerical field calculation. The stator of the permanent magnet synchronous machine serves as the given basis for this. This severely restricts the degree of freedom allowed in the new development of the magnetic circuit of the wound field synchronous machine, especially since the wound field synchronous machine should achieve at least the same performance as the permanent magnet synchronous machine. In addition, possible simplifications in the production process and in manufacturing must be identified from the very beginning and accordingly integrated into the design. Finally, a new type of asymmetrical rotor lamination is presented as a solution. By means of an uneven pole shoe flattening on both sides in combination with a flux barrier in the pole shoe, the required torque ripple can be achieved without reducing the peak torque. Furthermore a typical continuous rotor skewing is not necessary due to the asymmetric design, which results in more efficient production as well as higher efficiency as demonstrated in this work.

To ensure practical suitability, the final step is to iteratively match the electromagnetic design with the mechanical, thermal and acoustic requirements within a multiphysics development process. Here, the mechanical fatigue strength of the rotor could be confirmed without violating the torque requirements. Furthermore, the rotor design could be improved to the effect that, despite the high speeds, no potting is required to stabilize the rotor winding. Continuous power can be achieved with hybrid cooling. For this purpose, the given water jacket cooling in the stator yoke is supplemented by additional air cooled rotor. Another effect of the asymmetrical pole shoe design is the reduction of the slot harmonics. This in turn leads to a significant improvement in magnetic noise behavior.

The special feature is that, at the current state of the art, rotor skewing is the only known measure for minimizing the slot harmonics.

The measurements of the prototype on the test bench show good agreement with the calculation results and confirm the effectiveness of the asymmetrical rotor design. The electric machine meets the requirements, which makes it a competitive alternative to the permanent magnet synchronous machine. Furthermore, this confirms the effectiveness and practicality of the presented multiphysics development approach.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	XI
Symbolverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik elektrischer Traktionsmotoren	2
1.2 Auswahl des Maschinentyps	5
1.2.1 Performancevergleich	6
1.2.2 Motivation zum Verzicht auf Permanentmagnete	6
1.3 Bauraumbedarf	9
1.3.1 Antriebsstrangtopologie	9
1.3.2 Inverterintegration	11
1.4 Inhalt und Entwicklungsstruktur der Arbeit	14
2 Mathematische Fahrzeugsimulation	17
2.1 Simulationsstruktur	17
2.2 Fahrzeugbewegungen	18
2.3 Fahrzeugkomponenten	19
2.3.1 Chassis	20
2.3.2 Rad-Straße-Kontakt	23
2.3.3 Getriebe	25
2.4 Systemgrenzen für das Fahrzeugmodell	25
2.4.1 Umwelteinflüsse	26
2.4.2 Fahrzeugparameter	26
3 Traktionsanforderungen an einen Achsantrieb	27
3.1 Minimalanforderung genormter Fahrzyklus	27
3.2 Kurzzeit-Grenztets	28
3.2.1 Kraftschlussgrenze beim Anfahren	28
3.2.2 Elektrisches Bremsen	30
3.2.3 Bordsteinkantentest	31
3.2.4 Beschleunigung aus dem Stillstand	33
3.2.5 Anfahrstaugfähigkeit	34
3.2.6 Beschleunigung an Steigung mit hoher Geschwindigkeit	35
3.3 Dauersteigfähigkeit als Langzeit-Grenzttest	35
3.4 Drehmomentanforderungen	37
3.4.1 Spitzendrehmoment	39

3.4.2	Bemessungsdrehmoment	40
4	Beschreibung des fremderregten Schenkelpol-Synchronmotors	41
4.1	Motoraufbau	41
4.2	Stator-Design für ein Baukastenkonzept	43
4.2.1	Grobauslegung und Hauptabmessungen	43
4.2.2	Wahl des Elektroblechs	47
4.2.3	Auslegung der Statorwicklung	49
4.3	Maschinenmodell und Betriebsbereiche	67
4.3.1	Flussmodell	67
4.3.2	Strom- und Spannungsgrenze	69
4.3.3	Wirkleistungsfaktor	72
4.4	Verlustmechanismen und Energieeffizienz	74
5	Neuartiges elektromagnetisches Rotordesign und Optimierung	83
5.1	Vollparametrischer Modellaufbau des Rotors	83
5.2	Initialdesignerstellung auf Basis von Optimierungsalgorithmen	85
5.3	Polschuhoptimierung durch magnetische Asymmetrie	89
5.3.1	Verbesserung der Luftspaltinduktion und der Drehmomentwelligkeit	93
5.3.2	Induzierte Spannung und Kurzschlussstrom	96
5.4	Reluktanzverhalten und Achsenversatz aufgrund der Asymmetrie	102
5.5	Optimierung der Kreisströme	108
6	Multiphysikalischer Entwicklungsansatz	111
6.1	Mechanische Blechpaketfestigkeit	111
6.1.1	Vorgehen und Rotoraufbau	111
6.1.2	Streckgrenze und Verformung	113
6.1.3	Dauerfestigkeit	118
6.2	Hybride Kühlung	122
6.2.1	Kühlmethoden und Widerstandsnetzwerk	122
6.2.2	Dauerleistung im stationären Zustand und Systembewertung	130
6.2.3	Transientes Verhalten bei Fahrzyklen	135
6.3	Magnetische Geräusche	136
6.3.1	Grundlagen und Arbeitsablauf	136
6.3.2	Magnetische Zahnkräfte und Kraftdichte	140
6.3.3	Geräuschverhalten zwischen symmetrischem und asymmetrischem Design	144
7	Gesamtauswirkung auf das multiphysikalische Betriebsverhalten	149
7.1	Erweiterte Betriebspunktoptimierung	149
7.1.1	Stromoptimales Verfahren	149
7.1.2	Erregerstromvariation	151
7.1.3	Verlustminimierung	153

7.2	Auswertung der Performance und Energieeffizienz	155
7.2.1	Betrachtung verschiedener Verlustoptimierungsfälle	155
7.2.2	Berücksichtigung der Wickelkopfstreuung des Stators	160
7.2.3	Betriebspunkt Betrachtung	163
7.2.4	Vergleich zwischen geschragt-symmetrischem und asymmetrischem Design	166
7.3	Vergleich mit permanenterregter Synchronmaschine	167
7.3.1	Mögliche Arten von permanenterregten Synchronmaschinen	167
7.3.2	Drehmoment, Leistung und Wirkungsgrad	169
7.3.3	Geräuschverhalten	171
7.4	Berücksichtigung der Stromwelligkeit durch asynchrone und synchrone Puls- weitenmodulation	175
8	Messtechnische Validierung des Prototyps	181
8.1	Aufbau und Beschreibung des Prototyps	181
8.2	Mechanische Validierung mit Schleudertests	183
8.3	Passive Messungen	184
8.3.1	Eigenschaften im Leerlauf	185
8.3.2	Kurzschlussverhalten	188
8.3.3	Schleppversuch	189
8.4	Betriebsverhalten unter Last	191
8.5	Rotorerwärmungsmessungen mit Luftkühlung	195
9	Zusammenfassung und Ausblick	199
A	Anhang	203
A.1	Fahrzeugmodell und Fahrzeuganforderungen	203
A.2	Beschreibung der Maschine und Statorwicklung	207
A.3	Maschinenberechnung	210
A.4	Mechanische Festigkeit und Hybridkühlung	212
A.5	Maschinenmodell für realen Stromverlauf	215
A.6	Prototyp und Vermessung	216