

Christian Köpf

Optimierung des NVH-Verhalten einer Synchronmaschine durch Strukturoptimierung

Band 62

**Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart**



Optimierung des NVH-Verhalten einer Synchronmaschine durch Strukturoptimierung

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte
Abhandlung

Vorgelegt von

Christian Köpf

aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Berkemer

Tag der mündlichen Prüfung: 08.03.2022

Institut für Systemdynamik (ISYS)
der Universität Stuttgart

2022

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 62

Christian Köpf

**Optimierung des NVH-Verhalten einer
Synchronmaschine durch Strukturoptimierung**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

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.: Stuttgart, Univ., 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 978-3-8440-8607-2

ISSN 1863-9046

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 und Danksagung

Im Rahmen des Promotionskollegs Hybrid 2.0 der Universität Stuttgart, der Hochschule Esslingen und der Robert Bosch GmbH in Schwieberdingen, ist die vorliegende Arbeit in den letzten vier Jahren entstanden. Während diesen vier Jahren hatte ich Gelegenheit viele interessante Einblicke und Erfahrungen im Bereich der Entwicklung von elektrischen Maschine zu sammeln und besondere Menschen kennen zu lernen. Neben der persönlich geleisteten Forschungsarbeit haben viele Weitere am Gesamterfolg dieser Arbeit beigetragen, bei denen ich mich herzlichst für die Unterstützung und das entgegen gebrachte Vertrauen bedanken möchte.

Ein ganz besonderer Dank geht dabei an Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Oliver Sawodny vom Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart für die Übernahme des Hauptberichts der Dissertation. Für die fachliche Betreuung und umfangreiche Unterstützung seitens der Hochschule Esslingen gilt ein großer Dank Prof. Dr.-Ing. Joachim Berkeimer aus der Fakultät Mobilität und Technik. Ebenso möchte ich Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende für die Übernahme des Mitberichts danken. Prof. Dr. sc. techn. habil. Oliver Zirn von der Hochschule Esslingen, sowie Dr. Philipp Kotter von der Daimler AG danke ich, da sie mich zu diesem Kooperationsprojekt ermutigt und begeistert haben.

Für die Finanzierung und das damit verbundene Vertrauen danke ich der Entwicklungsabteilung für elektrische Motoren und Antrieb der Robert Bosch GbmH. Für die hilfreichen Diskussionen im Bereich der Akustik möchte ich mich besonders bei Rogelio Villanueva Porras, Stefan Mittank und Dr. Florian Dräger bedanken. Für die ausführlichen Unterlagen und die Unterstützung bei allen elektromagnetischen Fragestellungen danke ich Peter Theisinger und Dr. Marcus Alexander. Außerdem danke ich Dr. Michael Fischer, Volker Scheef, Houda Benkour, Elena Tongkonog und Philipp Walter für die Bereitstellung sämtlicher Messdaten und Hilfe bei deren Auswertung.

Ebenfalls geht ein herzlicher Dank an meinen Kollegen Thomas Vogt aus dem Labor der Lasermesstechnik der Hochschule Esslingen für seine immer guten Anregungen und Ideen aller Art. Außerdem danke ich Sebastian Schatz für seinen Beitrag durch seine Masterarbeit und Werkstudententätigkeit.

Neben der fachlichen und organisatorischen Unterstützung möchte ich mich auch bei meinen Eltern Ursula und Klaus Köpf, sowie meiner Partnerin Dr. Andrea Gomerlinger von ganzen Herzen bedanken, die mir über all die Jahre stets den Rücken freigehalten und mich jeder Zeit unterstützt und motiviert haben.

Stuttgart, im März 2022

Christian Köpf

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	III
Abkürzungen und Formelzeichen	VII
Kurzfassung	XV
Extended Abstract	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Technik	5
2.1 Aufbau eines elektrischen Antriebsstrangs	5
2.2 Aufbau der permanentenerregten Synchronmaschine	7
2.3 NVH-Simulationsansätze	8
2.3.1 Numerischer Modellierungsansatz im Frequenzbereich	9
2.3.2 Modalreduzierter Systemsimulationsansatz im Zeitbereich	10
2.4 Optimierungsansätze	12
2.4.1 Maßnahmen in der Leistungselektronik zur Reduktion der Geräuschemissionen	13
2.4.2 Optimierung des elektromagnetischen Kreises	16
2.4.3 Herausforderungen für die Strukturoptimierung	20
3 Modellierung einer Synchronmaschine	21
3.1 Elektromagnetische Simulation einer PMSM	22
3.1.1 I_d/I_q -Transformation	23
3.1.2 Magnetische Feldgrößen	24
3.1.3 Drehmomentenwelligkeit	26
3.1.4 Kennfeldberechnung	27
3.1.5 Elektromagnetische Kraftdichte	32
3.1.6 Exzentrizität des Rotors	34
3.2 Strukturmechanische Simulation einer PMSM	37
3.2.1 Modale Transformation	38
3.2.2 Dämpfungsmodelle	41
3.2.3 Domänenkopplung	42
3.2.4 Maßnahmen zur Rechenzeitoptimierung	45
3.2.5 Ausgabegrößen zur Beurteilung des NVH-Verhaltens	47

4 Validierung des Simulationsmodells	51
4.1 Abgleich der Eigenfrequenzen und Strukturmoden	51
4.2 Ordnungsanalyse an einem Akustikprüfstand	55
5 Analyse geometrischer Einflussparameter auf das NVH-Verhalten	59
5.1 Bewertung eines Frequenzgangs	60
5.2 Variation der Anzahl an Kühlkanälen im Statorgehäuse	63
5.3 Variation der Stegbreite zwischen den Kühlkanälen	68
5.4 Übertragung mit konstantem Querschnitt	71
5.5 Einfluss symmetrisch angeordneter Fixpunkte am Lagerschild	73
6 Körperschalloptimierung mittels statistischer Versuchsplanung	79
6.1 Methode zur Körperschalloptimierung	79
6.2 Einflüsse des Gütekriteriums auf die Optimierung	81
6.2.1 Einfluss verschiedener Gütekriterien	82
6.2.2 Einfluss unterschiedlicher Gewichtung der Gütekriterien	83
6.3 Optimierung der Position der Montagepunkte	84
6.3.1 Optimierung der Position der Fixpunkte für unterschiedliche Zielordnungen	84
6.3.2 Optimierung der Position der Fixpunkte für eine unterschiedliche Anzahl an Fixpunkten	88
7 Luftschalloptimierung mittels Topologieoptimierung	93
7.1 Theoretischer Hintergrund zur Topologieoptimierung	93
7.2 Optimierung des Statorgehäuses	94
7.2.1 Topologieoptimierung des Statorgehäuses in 2D	95
7.2.2 Topologieoptimierung des Statorgehäuses in 3D	98
8 Analyse des optimalen Gesamtsystems	103
8.1 Validierung der gesamtoptimierten Maschinenvariante	103
8.2 Betrachtung der gesamtoptimierten Maschine im Gesamtsystem	107
9 Designempfehlungen für die Optimierung des NVH-Verhaltens	115
10 Zusammenfassung und Ausblick	121
Literatur	125
Anhang	135
10.1 Ergebnisse der Untersuchung mit konstantem Querschnitt	135
Publikationen	137
Lebenslauf	138