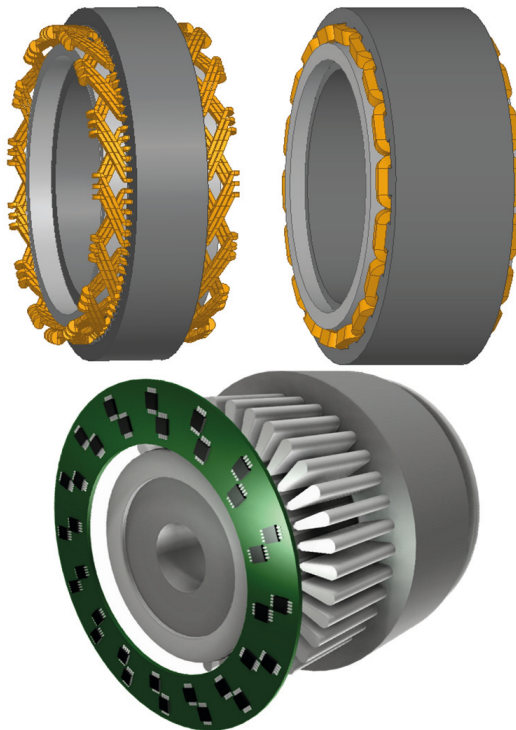


**Forschungsberichte**  
**Elektrische Antriebstechnik und Aktorik**

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

Oleg Moros

# Auslegung von Asynchronmaschinen mit konzentrierten Wicklungen



# **Auslegung von Asynchronmaschinen mit konzentrierten Wicklungen**

**Oleg Moros**

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

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling
2. Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Möckel

Die Dissertation wurde am 07.02.2018 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik am 07.06.2018 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 13.09.2018 statt.



Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 32

**Oleg Moros**

**Auslegung von Asynchronmaschinen  
mit konzentrierten Wicklungen**

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.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2018

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 978-3-8440-6194-9

ISSN 1863-0707

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)

## **Vorwort / Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Promotion am Lehrstuhl für Elektrische Antriebstechnik und Aktorik (EAA) der Bundeswehruniversität München in enger Kooperation mit dem Forschungszentrum für Elektrische Antriebstechnik und Aktorik München (FEAAM GmbH). Die Promotion begann im Frühjahr 2012 und endete nach 6 Jahren Bearbeitungszeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerling, der mir diesen Werdegang ermöglichte und mich als erster Gutachter über den gesamten Zeitraum der Entstehung dieser Arbeit betreute und unterstützte. Ich danke ebenfalls Herrn Dr.-Ing. Dajaku für die fruchtbare Zusammenarbeit, den Gedankenaustausch und seine kontinuierliche Unterstützung.

Ich danke sehr Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Möckel für die Bereitschaft, die Korreferenz der Arbeit zu übernehmen sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Hansch als dem Vorsitzenden des Promotionsausschusses.

Weiterhin danke ich den wissenschaftlichen Mitarbeitern des Instituts, die sich gemeinsam mit mir während meiner Promotionszeit die Durchführung der Lehrtätigkeiten geteilt haben und mir auch darüber hinaus mit Ratschlägen, herrührend aus verwandten Fachgebieten, weitergeholfen haben. Diese großartige Atmosphäre wird mir noch lange in Erinnerung bleiben.

Zu guter Letzt geht mein großer Dank an meine Familie und meine Frau Marina für ihren andauernden Beistand, ihre Unterstützung und ihr Vertrauen in mich während der gesamten Promotionszeit.

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Thematik der rotierenden elektrischen Maschinen, deren Wicklung konzentriert ausgeführt ist, und insbesondere mit den Herausforderungen, die die asynchrone Bauart des Rotors mit sich bringt. Zu solchen Herausforderungen zählen beispielsweise erhöhte Magnetisierungsströme bei Einsatz von herkömmlichen Zahnwicklungen mit hohen Polpaarzahlen und niedrigen Wicklungsfaktoren (Oberwellenausführungen), zusätzliche Rotorverluste, welche infolge der starken Luftspalharmonischen entstehen oder auch die Gefährdung der mechanischen Stabilität durch hohe Temperatur und Temperaturdifferenzen in bewegten Bauteilen. Das sind alles Gründe, aus denen asynchrone Maschinenausführungen mit konzentrierten Spulen in der Industrie bisher nicht stark verbreitet sind.

In dieser Arbeit werden Methoden aufgezeigt, welche einen effizienten und sicheren Einsatz von konzentrierten Wicklungen in Asynchronmaschinen ermöglichen. Hierzu werden die Vorschriften zum Berechnen von konventionellen Wicklungen im Hinblick auf die besonderen Eigenschaften der konzentrierten Wicklungen untersucht. Die neuen modifizierten Ausdrücke werden an konkreten Beispielen angewandt. Es werden neue Wicklungstopologien vorgestellt. Darüber hinaus soll gezeigt werden, dass die Wicklungsanordnung nicht zwangsweise symmetrisch sein muss. Außerdem wird eine besonders seltene konzentriert gewickelte Grundwellenmaschine untersucht.

Neben den heute in der Elektromobilität flächendeckend eingesetzten Hochvoltantrieben mit Batteriespannungen von 300 V und höher, wurde im Jahr 2014 eine weitere neuartige Käfigwicklung namens ISCAD (Intelligent Stator Cage Drive) vorgestellt. ISCAD ist ein innovativer und weltweit einzigartiger Hochleistungsantrieb auf 48 V Ebene und stellt zweifelsohne die kompakteste Wicklungsausführung dar, weshalb diese Technologie den zweiten Kernpunkt dieser Arbeit darstellt. Diese Ausführung ermöglicht erstmalig einen Hochleistungsantrieb, der mit Kleinstspannungen unterhalb der Berührungsgrenze gespeist werden kann.

Um die thermische Stabilität einer konzentriert gewickelten Asynchronmaschine zu gewährleisten, wird diesem Thema besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Die Eigenerwärmung im Rotor beeinflusst nicht nur die Materialeigenschaften. Unter Umständen kann sie sich auch auf andere Systemkomponenten kritisch auswirken. Es werden Methoden zum Verbessern des Wärmetransports in einem geschlossenen System vorgestellt und ausgewertet.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	3
1.1. Hintergrund.....	3
1.2. Definition einer Bruchlochwicklung.....	4
1.3. Definition einer konzentrierten Wicklung.....	4
1.4. Drehstromasynchronmaschinen mit konzentrierten Wicklungen.....	5
1.5. Übersicht.....	7
2. Vorschriften zur Berechnung von Wicklungen.....	9
2.1. Hintergrund.....	9
2.2. Theorie der konventionellen verteilten Grundwellenwicklungen.....	10
2.3. Theorie der konzentrierten Wicklungen.....	17
2.3.1. Wicklungsfaktor einer symmetrischen Wicklungsanordnung.....	25
2.3.2. Wicklungsfaktor einer asymmetrischen Wicklungsanordnung.....	28
2.4. Kurzfassung.....	31
3. Berechnung von Maschinen mit konzentrierten Wicklungen.....	33
3.1. Hintergrund.....	33
3.2. Konzentrierte Spulen in einer symmetrischen Grundwellenausführung.....	34
3.2.1. Motivation.....	34
3.2.2. Anforderungen und Annahmen.....	35
3.2.3. Zweipolige konzentrierte Wicklungsausführung.....	37
3.2.4. Rotordesign.....	42
3.2.5. Berechnungsergebnisse.....	45
3.3. Konzentrierte Spulen in symmetrischen Oberwellenausführungen.....	49
3.3.1. Kombinierte symmetrische Oberwellenwicklungen.....	50
3.3.2. Lokal asymmetrische Wicklungen.....	56
3.3.3. Berechnungsergebnisse.....	59
3.4. Kurzfassung.....	65
4. ISCAD: Intelligent Stator Cage Drive.....	66
4.1. Hintergrund.....	66
4.2. Auslegung einer elektrischen Maschine nach ISCAD-Prinzip.....	68
4.2.1. Vorgaben und Anforderungen.....	68
4.2.2. Berechnung des mechanischen Maschinendesigns.....	68
4.2.3. Berechnung des elektromagnetischen Maschinendesigns.....	75



4.3.	Ergebnisse der Auslegung.....	85
4.4.	Anmerkungen zu bewährten Schätzfaktoren für die Wirkungsgradberechnung ...	90
4.4.1.	Zusatzverluste im Eisen .....	91
4.4.2.	Zusatzverluste durch Reibung.....	92
4.5.	Betrachtung kritischer Parameter und Verbesserungsvorschläge .....	94
4.5.1.	Materialwahl .....	94
4.5.2.	Statorkäfig .....	95
4.6.	Kurzfassung und Ausblick .....	97
5.	Thermische Betrachtungen.....	99
5.1.	Hintergrund .....	99
5.2.	Analytische Berechnung .....	100
5.2.1.	Statortemperatur .....	100
5.2.2.	Rotortemperatur .....	101
5.2.3.	Konvektion .....	104
5.3.	Ergebnisse der thermischen Analyse .....	105
5.4.	Optimierung .....	111
5.5.	Kurzfassung.....	119
6.	Zusammenfassung und Ausblick.....	122
6.1.	Zusammenfassung .....	122
6.2.	Ausblick .....	124
7.	Anhang .....	126
7.1.	Anhang A: Zeichnung ISCAD Rotorschnitt .....	126
7.2.	Anhang B: Zeichnung ISCAD Statorschnitt .....	127
7.3.	Anhang C: Zeichnung des Statorkäfigs .....	128
7.4.	Anhang D: Numerische Darstellung des Wirkungsgradkennfelds.....	129
7.5.	Anhang E: Parameterberechnung für den Wärmetransport mittels Konvektion..	130
8.	Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen .....	132
9.	Literaturverzeichnis.....	135
10.	Genehmigte Vorveröffentlichungen.....	142