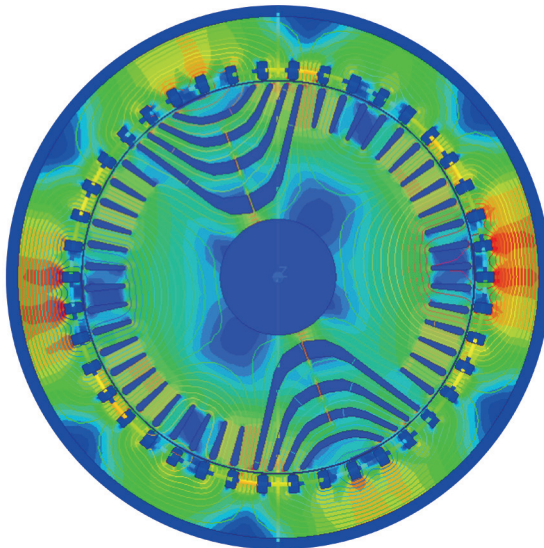


## Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

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

# Stephan Runde

## Optimierungen für das Rotordesign und die Ansteuerung von Multiphasensystemen auf der Basis des Intelligent Stator Cage Drive



# **Optimierungen für das Rotordesign und die Ansteuerung von Multiphasensystemen auf der Basis des Intelligent Stator Cage Drive**

**Stephan Runde**

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.)**

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling
2. Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker

Die Dissertation wurde am 09.03.2022 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik am 16.08.2022 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 04.10.2022 statt.



Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 51

**Stephan Runde**

**Optimierungen für das Rotordesign und  
die Ansteuerung von Multiphasensystemen  
auf der Basis des Intelligent Stator Cage Drive**

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 978-3-8440-8837-3

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand in enger Kooperation des Lehrstuhls für Elektrische Antriebstechnik und Aktorik der Universität der Bundeswehr München und der MOLABO GmbH.

Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling, ohne den ich diesen Weg nicht gegangen wäre, für die langjährige Unterstützung und das Vertrauen.

Des Weiteren möchte ich mich bei der MOLABO GmbH und dem gesamten Team bedanken. Im speziellen geht mein Dank für die persönliche und fachliche Unterstützung an Dr.-Ing. Florian Bachheibl. Außerdem gilt mein Dank Dr.-Ing. Oleg Moros für die fruchtbaren Diskussionen und die Hilfsbereitschaft auf dem gesamten Weg. Auch meinen ehemaligen Kollegen möchte ich herzlich danken: Veit Hartmann für die persönliche Unterstützung, vor allem in der Anfangsphase dieser Arbeit, und Moritz Morlok für sein Interesse, die Zusammenarbeit und den wissenschaftlichen Austausch.

Zu guter Letzt gilt mein herzlichster Dank meiner Familie, meinen Eltern Brigitte und Dieter, meinem Bruder Philipp, meinen beiden Schwestern Anna-Maria und Johanna und insbesondere meiner Partnerin Insa. Durch Ihre Unterstützung wurde diese Arbeit überhaupt erst möglich.



## **Kurzfassung**

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, Multiphasensysteme, speziell Traktionsantriebe, im Hinblick auf unterschiedliche Aspekte zu optimieren. Im Fokus steht dabei der Intelligent Stator Cage Drive, dessen neuartiger Stator durch die individuelle Ansteuerung der einzelnen Phasen zusätzliche Freiheitsgrade in der Maschinenregelung schafft.

Zunächst wird der Antrieb als Asynchronmaschine betrachtet und die herkömmlichen Rotortopologien werden überdacht und angepasst, um die zusätzlichen Freiheitsgrade des Stortyps bestmöglich zu nutzen. Der Hybridrotor mit unterschiedlichen Polbreiten rückt daraufhin in den Fokus der Untersuchungen und es wird eine Regelung für diesen speziellen Maschinenbetrieb entwickelt und simuliert. Es werden Nutzen und Herausforderungen dieser Variante herausgearbeitet. Anschließend werden die Modellierung und Simulation des Intelligent Stator Cage Drive Konzepts überarbeitet. Vermessungen, die auf einem dafür eigens aufgebauten Maschinenprüfstand an der ersten Referenzmaschine, einem Prototyp der dritten Generation, durchgeführt wurden, werden für den Abgleich der Erkenntnisse verwendet.

Im zweiten Teil der Ausarbeitung wird die Referenzmaschine ausgetauscht. Die neue Referenzmaschine ist ein Prototyp der fünften Generation, der aufgrund der Erkenntnisse aus dem vorherigen Prototyp bereits optimiert wurde. Bei der neuen Referenzmaschine handelt es sich um eine permanentmagneterregte Synchronmaschine. Dementsprechend verschiebt sich der Fokus der Optimierungen von verschiedenen Rotortopologien und unterschiedlichen Polbreiten zu generelleren Optimierungsmöglichkeiten in Multiphasensystemen. Die für die Maschine eigens entwickelte Multiphasenregelung wird vorgestellt. Anschließend wird eine entwickelte Erweiterung der feldorientierten Regelung um eine adaptive Schaltfrequenz beschrieben. Diese wird analytisch und simulativ untersucht. Anschließend werden die vollumfänglichen Tests auf einem weiteren Prüfstand, der speziell für diese Maschine entwickelt wurde, detailliert dargelegt und die Methode validiert. Im letzten Teil der Arbeit wird die Grundlegendste der Optimierungen beschrieben. Dazu rückt die Parameteridentifikation der elektrischen Maschine in den Fokus, um den Systemwirkungsgrad weiter zu steigern und auch den dynamischen Betrieb optimal abzubilden. Es werden unterschiedliche Methoden vorgestellt und die Vielversprechendste explizit herausgearbeitet.





---

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	3
Kurzfassung.....	5
Inhaltsverzeichnis .....	7
1    Hintergrund .....	11
1.1  Elektromobilität heute (2022) .....	12
1.2  Motivation .....	13
2    Grundlagen zum Intelligent Stator Cage Drive.....	14
2.1  Leistungselektronik .....	18
2.1.1  Konstruktion und Design .....	19
2.2  Maschine .....	21
2.3  Steuerung.....	22
3    Auslegung von Rotoren unterschiedlicher Polteilung.....	24
3.1  ASM-Reluktanz-Rotor mit asynchronen und synchronen Anteilen .....	25
3.2  Käfigläufer mit unterschiedlichen Polbreiten .....	25
3.3  Synchroner Reluktanzrotor mit unterschiedlichen Polbreiten und zwei Symmetrieachsen .....	27
3.4  Synchroner Reluktanzrotor mit unterschiedlichen Polbreiten und einer Symmetrieachse .....	29
4    Hybridrotor aus ASM- und Reluktanzrotor .....	31
4.1  Das Referenzmodell .....	31
4.2  Optimierung des synchronen Anteils .....	33
4.3  Simulative Betrachtung des Hybridrotors .....	35
4.4  Überlagerung von synchronem und asynchronem Statorfeld .....	38
4.5  Das Einschwingverhalten der Asynchronmaschine .....	40
4.6  Fazit zum Hybridrotor .....	44
5    Käfigläufer mit unterschiedlichen Polbreiten .....	46

---

5.1	Referenzkennfeld- und Drehmomentrippelsimulation .....	48
5.2	Regelungsstrategie für eine Maschine mit zwei Polbreiten.....	54
5.2.1	Grundlagen zur Regelung der ISCAD-WTP .....	54
5.2.2	Regelung auf Basis einer FOC .....	57
5.3	Herausforderungen und Einschränkungen der ISCAD-WTP.....	60
5.4	Fazit zur ISCAD-WTP .....	61
6	Optimierungen der Modellierung .....	62
6.1	Ausarbeitung der verschiedenen Arten von Verlusten in der elektrischen Maschine.....	64
6.1.1	Reibungsverluste .....	65
6.1.2	Ohmsche Verluste in Stator und Rotor .....	67
6.1.3	Eisenverluste.....	68
6.1.4	Zusatzverluste .....	69
6.2	Ausarbeitung der verschiedenen Arten von Verlusten in der Leistungselektronik .....	70
6.2.1	MOSFET-Verlustleistung.....	71
6.2.1.1	Durchlassverluste.....	71
6.2.1.2	Schaltverluste.....	72
6.2.2	Kondensatorverluste .....	73
6.2.2.1	Interleaving zur Entlastung des Zwischenkreiskondensators .....	74
6.2.3	Kontaktstellenverluste .....	76
6.3	Überprüfung der getroffenen Verlustannahmen für die Simulationen der dritten Generation des ISCADs .....	77
7	Optimierung der Ansteuerung und Regelung.....	82
7.1	Prüfstands Aufbau .....	82
7.2	Feldorientierte Regelung für Multiphasensysteme.....	84
7.3	Adaptive Schaltfrequenz.....	89

---

7.3.1	Analytischer Ansatz zur Bestimmung der schaltfrequenzabhängigen Verlustkomponenten .....	89
7.3.1.1	Analytische Betrachtung der Eisenverluste in der elektrischen Maschine .....	90
7.3.1.2	Analytische Betrachtung der Leiterverluste .....	92
7.3.2	FEM-Simulationen zur Abhängigkeit der Maschinenverluste von der Schaltfrequenz .....	93
7.3.2.1	Vergleich bei konstanter Geschwindigkeit und variierender Last .....	94
7.3.2.2	Vergleich bei variierender Geschwindigkeit und konstanter Last .....	95
7.3.3	Vergleich von Messungen und analytischem Modell .....	97
7.3.4	Verhalten von Regelung und elektrischer Maschine im Umschaltzeitpunkt ...	101
7.3.5	Fazit zur adaptiven Schaltfrequenz .....	104
7.4	Parameteridentifikation .....	105
7.4.1	Experimentelle Bestimmung der Maschinenparameter .....	106
7.4.1.1	Induktivitäten .....	107
7.4.1.2	Permanentmagnetfluss .....	111
7.4.1.3	Messungen und Ergebnisse .....	112
7.4.2	Simulative Bestimmung der Parameter .....	121
7.4.2.1	Messungen und Ergebnisse .....	121
7.4.2.2	Vergleich von Parametern aus Simulation und Identifikation .....	123
7.4.2.3	Fazit zur Parameteridentifikation .....	129
8	Zusammenfassung .....	130
9	Ausblick .....	132
	Abbildungsverzeichnis .....	134
	Tabellenverzeichnis .....	140
	Abkürzungsverzeichnis .....	141
	Symbolverzeichnis .....	142
	Literaturverzeichnis .....	150

---

Anhang..... 155