



Technische
Universität
Braunschweig



Institut für Elektrische Maschinen,
Antriebe und Bahnen
TU Braunschweig

Auslegungsmethodik für Asynchronmaschinen unter Berücksichtigung der Reichweitenprädiktion im Elektrofahrzeug

Dipl.-Ing. Anna-Lena Menn



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Auslegungsmethodik für Asynchronmaschinen
unter Berücksichtigung der Reichweitenprädiktion im Elektrofahrzeug





**Auslegungsmethodik für Asynchronmaschinen
unter Berücksichtigung der Reichweitenprädiktion im
Elektrofahrzeug**

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades einer Doktorin
der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Anna-Lena Menn

aus: Engelskirchen

eingereicht am: 11.07.2018

mündliche Prüfung am: 06.12.2018

1.Referent: Prof. Dr.-Ing. Markus Henke

2.Referent: Prof. Dr. rer. nat. Ludwig Brabetz

Druckjahr: 2019



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2019

Zugl.: (TU) Braunschweig, Univ., Diss., 2018

Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik und Physik

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2019

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2019

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9967-1

eISBN 978-3-7369-8967-2



Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen an der Technischen Universität Braunschweig.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Henke danke ich für die Übernahme des Erstreferats und das damit verbundene Engagement sowie für die stete Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. rer. nat Ludwig Brabetz danke ich für die Übernahme des Zweitberichts.

Prof. Dr.-Ing Bernd Engel hat sich freundlicherweise bereit erklärt den Vorsitz der Prüfungskommission zu übernehmen.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolf-Rüdiger Canders für die stets wertvollen fachlichen Diskussionen über die Welt der elektrischen Maschinen, besonders über die der Asynchronmaschine und die stete Unterstützung bei meinem Promotionsvorhaben.

Auch Herrn Dr.-Ing Helmut Mosebach danke ich für eine Menge wertvoller Diskussionen.

Während der Erstellung dieser Arbeit entstanden zahlreiche studentische Arbeiten. Allen meinen Studenten, die mich im Laufe der Zeit bei diesem Vorhaben unterstützt haben, danke ich ebenfalls recht herzlich. Ihr habt einen wichtigen Beitrag zu der Fertigstellung der Arbeit geleistet.

Auch meinen ehemaligen Institutskollegen, besonders Tim-Hendrik Dietrich, Jan Hoffmann, Peter Hoffmann, Bodo Kramer, Florian Lippold, Christoph Löffler und Barbara Tiedge danke ich für die immerwährende Unterstützung!

Meinem Freundeskreis danke ich sehr für den tollen und konstanten moralischen Beistand.

Zuletzt gilt mein besonderer Dank meinen Eltern und Großeltern. Vielen herzlichen Dank für Eure tatkräftige Unterstützung und Motivation während Schule, Studium und Promotionszeit.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zur Bewertung des Einsatzes von Asynchronmaschinen in einem batteriebetriebenen Elektrofahrzeug, diese Bewertung bezieht sich auf eine mögliche Reichweitenerhöhung. Um den Einfluss einer elektrischen Maschine an der Reichweite eines solchen Fahrzeugs untersuchen zu können, wird eine spezielle Auslegungsmethodik angewendet. Ausgehend von den Anforderungen, die an die elektrische Antriebseinheit gestellt werden, wird im ersten Schritt der Methodik ein Maschinenentwurf erstellt. Dieser wird nach erfolgreicher Beendigung mittels einer zweistufigen Reichweitenprädiktion auf sein Potential zur Reichweitenerhöhung untersucht. Die erste Stufe der Reichweitenprädiktion basiert auf simulativen Berechnungen mittels Wirkungsgradkennfeldern und Gesamtfahrzeugsimulationen. Die zweite Stufe, die realitätsnahe Reichweitenprädiktion, enthält Untersuchungen, die mit einem real fahrenden Elektrofahrzeug durchgeführt werden und somit auf realen Streckendaten basieren. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen können dann zur Optimierung des Maschinenentwurfs hinsichtlich seines Beitrags zur Reichweitenerhöhung des Elektrofahrzeugs genutzt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden unterschiedliche Entwürfe mit der Methodik erstellt und untersucht. Zuerst wurde ein Grundentwurf generiert, der als Vergleichsgrundlage für folgende angepasste Entwürfe dient. Die angepassten Entwürfe generieren sich aus den Ergebnissen der Reichweitenprädiktion und weisen Änderungen in den Anforderungen an den Entwurf, beispielsweise eine Bauraumveränderung, auf oder es werden Änderungen während des Auslegungsprozesses durchgeführt. Ein Beispiel hierfür ist die Änderung der Wicklungskonfiguration. Die Ergebnisse zeigen, dass beide Änderungen die erwartbare Reichweite eines Elektrofahrzeugs positiv beeinflussen können. Im WLTP Zyklus kann die Reichweite um bis zu 16 % gesteigert werden.

Weiterhin werden modulare Entwürfe mit der Methode entworfen und untersucht. Die modularen Entwürfe charakterisieren sich durch einen einheitlichen Blechschnitt bei Änderung der Eisenlänge zur Darstellung unterschiedlicher Leistungen.

Abstract

Systems engineering for induction motors considering the range of a battery electrical vehicle

The present thesis contributes to the evaluation of the operation of induction motors powering battery electric vehicles referring to a potential increase of the driving range. In order to analyze the influence of the electrical machine on the vehicle's range a special engineering method is used. A machine design is created initially based on the machine requirements. The design is examined on its potential to increase the vehicle's driving range using a two-step prediction method.

The first step of the method, the simulative prediction, is based on simulation calculations by means of efficiency maps of the induction machine and a simulation of the energy consumption using an overall vehicle simulation considering the machine design. The second step is called realistic prediction containing studies which are carried out with a real electrical vehicle and are hence based on real driving data. Based on these results an optimization of the machine design is possible particularly considering the vehicle's range.

A couple of machine designs are created and analyzed. A basic design serves as a basis for following adapted designs. The adapted designs are generated based on the prediction results of the basic design and include changes in the requirements for example, a change in the available installation space. Other changes, such as a different winding configuration, are considered during the design process.

The results show that both procedures can positively influence the driving range of the vehicle. By driving the WLTP cycle the range can be increased up to 16 %.

Furthermore, modular designs for powering different classes of vehicles while having the same laminations are outlined and investigated.



Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Symbolverzeichnis	VII
1 Einleitung.....	1
2 Konzept der Auslegungsmethodik	5
3 Elektromagnetischer Auslegungsprozess für Asynchronmaschinen	13
3.1 Allgemeines Prozessvorgehen.....	13
3.1.1 Prozessvorgehen - modulare Auslegung	15
3.2 Anforderungen an die Maschinenentwürfe	16
3.3 Berechnung des Maschinenentwurfs.....	18
3.3.1 Prozesskriterien - wirkungsgradoptimale Auslegung.....	28
4 Simulative Reichweitenprädiktion	32
4.1 Verlustanalyse.....	32
4.2 Verbrauchsanalyse	40
4.2.1 Aufbau und Komponenten des Simulationsmodells	43
4.2.2 Fahrzyklusbasierte Verbrauchsanalyse.....	50
4.3 Regelkonzepte - Motorregelung.....	52
4.3.1 Wirkungsgradoptimale Regelung.....	54
5 Anwendung der Methodik – Grundentwurf und Modulentwürfe.....	61
5.1 Anforderungen an die Maschinenentwürfe	61
5.2 Auslegungsergebnisse – Grundentwurf und Modulentwürfe.....	62
5.2.1 Auslegungsergebnisse des Grundentwurfs.....	64
5.2.2 Auslegungsergebnisse der Modulentwürfe	65
5.3 Simulative Reichweitenprädiktion	67
5.3.1 Verlustanalyse.....	68
5.3.2 Verbrauchsanalyse	76

6	Angepasste Entwürfe	79
6.1	Anforderungen an die angepassten Entwürfe.....	82
6.2	Auslegungsergebnisse der angepassten Entwürfe	83
6.3	Simulative Reichweitenprädiktion – angepasste Entwürfe	86
6.3.1	Verlustanalyse - angepasste Entwürfe	87
6.3.2	Verbrauchsanalyse – angepasste Entwürfe.....	97
7	Realitätsnahe Reichweitenprädiktion.....	101
7.1	Konzept eines fahrbaren Reichweitenprädiktors.....	102
7.2	Vorgehen zur Kennlinienübertragung.....	105
7.2.1	Vorstellung der Skalierungsmethoden.....	106
7.3	Laborversion des Reichweitenprädiktors	108
7.3.1	Anwendung der Skalierungsmethoden.....	110
7.3.2	Technischer Aufbau Laborversion des Reichweitenprädiktors	112
7.3.3	Aufbau der Systemsimulation	114
7.4	Validierung der Skalierungsmethoden.....	115
7.4.1	Validierung der Drehzahlskalierung.....	117
7.4.2	Validierung der Motormomentskalierung	119
8	Zusammenfassung und Ausblick	124
9	Literaturverzeichnis	i

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungen an die Maschinenentwürfe G.ASM und B.ASM.....	62
Tabelle 2: Gemeinsame Auslegungsergebnisse G.ASM und B.ASM.....	66
Tabelle 3: individuelle Auslegungsergebnisse G.ASM und B.ASM.....	67
Tabelle 4: verwendete Parameter der Fahrzeugklassen für die simulative Verbrauchsanalyse	76
Tabelle 5: Fahrzeugenergieverbrauch im WLTP -.....	77
Tabelle 6: Anforderungen an die Revisionsentwürfe	82
Tabelle 7: gemeinsame Auslegungsergebnisse aller Maschinenentwürfe.....	84
Tabelle 8: spezifische Auslegungsergebnisse der Revisionsentwürfe.....	85
Tabelle 9: Fahrzeugenergieverbrauch im WLTP mit den Entwürfen D.ASM, L.ASM und M.ASM.....	98
Tabelle 10: Fahrzeugenergieverbrauch im WLTP mit dem Entwurf W.ASM.....	99
Tabelle 11: Kennlinienskalierung - erforderliche Maschinenparameter -	110
Tabelle 12: Berechnung der Skalierungsvektoren zur Kennlinienübertragung.....	111
Tabelle 13: Übersicht über die Validierung der Kennlinienübertragung.....	116

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Eingliederung der Auslegungsmethodik in ein V-Modell in der Automobilentwicklung.....	4
Abbildung 2-1: Konzept der Auslegungsmethodik	6
Abbildung 3-1: Allgemeiner Ablauf des Bausteins „elektromagnetischer Auslegungsprozess“	15
Abbildung 3-2: Prozessanforderungen – geforderte Grenzkennlinien.....	17
Abbildung 3-3: Blechschnitt einer Asynchronmaschine	24
Abbildung 3-4: Ersatzschaltbild einer ASM	25
Abbildung 4-1: Übersicht über die Verluste in einer Asynchronmaschine	33
Abbildung 4-2: Ablauf Berechnung des Wirkungsgrades für die feldorientierte Regelung ..	34
Abbildung 4-3: Ersatzschaltbild einer ASM zur Bestimmung der elektrischen Größen	35
Abbildung 4-4: Einfluss der Sättigung auf die Hauptfeldinduktivität	36
Abbildung 4-5: exemplarisches Wirkungsgradkennfeld einer Asynchronmaschine.....	39
Abbildung 4-6: Schematischer Aufbau eines elektrischen Hochvolt- Antriebsstrangs.....	40
Abbildung 4-7: Simulationsaufbau des Gesamtfahrzeugmodells	44
Abbildung 4-8: Berechnung des Batteriestroms	45
Abbildung 4-9: Aufbau des Blocks Längsdynamik	50
Abbildung 4-10: Betriebspunktverteilung einer beispielhaften Antriebstopologie im WLTP Klasse 2	52
Abbildung 4-11: Struktur der feldorientierten Regelung einer Asynchronmaschine	53
Abbildung 4-12: Ablauf der Berechnung des Wirkungsgrades – FOR im Vergleich zur Wirkungsgradoptimierung.....	57
Abbildung 4-13: Einbindung der wirkungsgradoptimalen Regelung in die Struktur der feldorientierten Regelung	60
Abbildung 5-1: gemeinsame Auslegungsergebnisse G.ASM und B.ASM	64
Abbildung 5-2: Wirkungsgradkennfelder G.ASM	69
Abbildung 5-3: Vergleich des Rotor- und Magnetisierungsstroms G.ASM.....	70
Abbildung 5-4: Vergleich der Einzelverlustverläufe G.ASM	72

Abbildung 5-5: Wirkungsgradkennfelder B.ASM 60	73
Abbildung 5-6: Wirkungsgradkennfelder B.ASM 100	74
Abbildung 5-7: Wirkungsgradkennfelder B.ASM 140	74
Abbildung 5-8: Wirkungsgradkennfelder B.ASM 180	75
Abbildung 6-1: Übersicht über die möglichen Revisionspfade	79
Abbildung 6-2: Übersicht über die angepassten Entwürfe.....	81
Abbildung 6-3: Wirkungsgradkennfelder G.ASM	86
Abbildung 6-4: Wirkungsgradkennfelder L.ASM	87
Abbildung 6-5: Vergleich der Einzelverlustverläufe G.ASM und L.ASM	89
Abbildung 6-6: Wirkungsgradkennfelder D.ASM.....	90
Abbildung 6-7: Vergleich der Einzelverlustverläufe G.ASM und D.ASM.....	91
Abbildung 6-8: Wirkungsgradkennfelder M.ASM	92
Abbildung 6-9: Vergleich der Einzelverlustverläufe G.ASM und M.ASM	94
Abbildung 6-10: Wirkungsgradkennfelder B.ASM 140	95
Abbildung 6-11: Wirkungsgradkennfelder W.ASM.....	95
Abbildung 6-12: Vergleich der Einzelverlustverläufe B.ASM 140 und W.ASM.....	97
Abbildung 7-1: Vorgehen zur Längsdynamiknachbildung im Forschungsprojekts „Indrive“	102
Abbildung 7-2: Konzept des fahrbaren Reichweitenprädiktors	103
Abbildung 7-3: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien zweier fiktiver Maschinen – Vorbereitung zur Kennlinienübertragung.....	106
Abbildung 7-4:schematischer Aufbau der Laborversion des Reichweitenprädiktors	109
Abbildung 7-5: Darstellung der Skalierungsmethode mit Berücksichtigung des gesamten Kennfeldbereichs.....	111
Abbildung 7-6: Darstellung der Skalierungsmethode mit Berücksichtigung des begrenzten Kennfeldbereichs.....	112
Abbildung 7-7: technischer Aufbau der Laborversion des Reichweitenprädiktors	113
Abbildung 7-8: Aufbau des Simulinkmodells in der Laborversion	114
Abbildung 7-9: Aufbau der Systemsimulation.....	115
Abbildung 7-10: Aufbau der Gesamtfahrzeugsimulation mit Berücksichtigung.....	117

Abbildung 7-11: Überprüfung der Drehzahlskalierung – GFM/SyS	118
Abbildung 7-12: Überprüfung der Drehzahlskalierung – SyS/HiL - gesamte Kennlinie	119
Abbildung 7-13: Überprüfung der Motormomentskalierung - GFM/SyS	120
Abbildung 7-14: Überprüfung der Motormomentskalierung - GFM/HiL	121
Abbildung 7-15: Motordrehmoment im Leerlauf, bei eingeschalteter Magnetisierung der Lastmaschine und bei 5 Nm Lastmoment	122

Symbolverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a		Anzahl der parallelen Zweige
A	m^2	Fläche
A_{Nut}	m^2	Querschnittsfläche einer Nut
A_w	m^2	Wicklungsquerschnitt
A_μ	A/m	Magnetisierungsstrombelag
b	m	Breite
B_μ	T	Luftspaltinduktion
B_r	T	Maximale Induktion im Joch
$c_{w,Ch}$		Bearbeitungszuschläge Ei- senverluste
f_{roll}		Rollwiderstandsbeiwert
D	m	Durchmesser
I_{Fe}	A	Eisenverluststrom
I_s	A	Statorstrom
I_μ	A	Magnetisierungsstrom
I_r	A	Rotorstrom
$k_c k_s$		Carterfaktoren
k_n		Skalierungsfaktor für Dreh- zahlen
k_M		Skalierungsfaktor für Dreh- momente
i_{Achse}		Achsübersetzung
l_i	m	Länge des Rotors
l_{Fe}	m	Länge des Eisenblechpakets ohne Isolierung