

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

David Bauer

Verlustanalyse bei elektrischen Maschinen für Elektro- und Hybridfahrzeuge zur Weiterverarbeitung in thermischen Netzwerkmodellen



 Springer Vieweg

The Springer Vieweg logo features a stylized chess knight icon to the left of the text 'Springer Vieweg'.

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Reihe herausgegeben von

M. Bargende, Stuttgart, Deutschland

H.-C. Reuss, Stuttgart, Deutschland

J. Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation. Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten. Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen. Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose. Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermo- windkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal. Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

Reihe herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann
Lehrstuhl Kraftfahrwesen
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13535>

David Bauer

Verlustanalyse bei
elektrischen Maschinen
für Elektro- und
Hybridfahrzeuge zur
Weiterverarbeitung
in thermischen
Netzwerkmodellen

 Springer Vieweg

David Bauer
Lehrstuhl für Kraftfahrzeugmechatronik
Universität Stuttgart/IVK
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2018

D93

ISSN 2567-0042 ISSN 2567-0352 (electronic)
Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-24271-8 ISBN 978-3-658-24272-5 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-24272-5>

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Teilnehmer des kooperativen Promotionskollegs Hybrid. Hierdurch war es mir möglich, sowohl als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Esslingen als auch als Doktorand innerhalb der Robert Bosch GmbH, wertvolle Erfahrungen zu sammeln. An dieser Stelle möchte ich verschiedenen Personen Dank sagen, die dazu beigetragen haben, dass die Arbeit in dieser Form möglich war.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Hans-Christian Reuss und Herrn Prof. Eugen Nolle, die mir als meine betreuenden Professoren immer zur Seite standen und mich in jeder Hinsicht gefördert haben. Herr Prof. Nolle hatte immer und überall ein offenes Ohr. Unsere sehr konstruktiven Gespräche werden mir immer in Erinnerung bleiben. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dieter Gerling gleichermaßen für die freundliche Übernahme des Mitberichts.

Auch danke ich allen Mitarbeitern der Hochschule Esslingen rund um das Labor Elektrische Antriebe und Anlagen, sowie Herrn Prof. Rainer Würslin für die Unterstützung.

Des Weiteren sind Herr Dr. Stephan Usbeck und Herr Dr. Marcus Alexander hervorzuheben. Sie ermöglichten mir bei Bosch eine hervorragende Arbeitsumgebung und standen mir immer und überall zur Seite.

Großer Dank gilt Herrn Daniel Kühbacher, der als guter Banknachbar, Freund und Bezugsperson in jeder Situation jederzeit zu überzeugen wusste. Lob auch dafür, dass er es geschafft hat, mich in die Welt der thermischen Simulation einzuführen. Des Weiteren möchte ich allen Mitarbeitern bei Bosch danken, die zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders sind hier Harald Bodendorfer, Oliver Eckert, Benjamin Gruler, Patrick Heuser, Christoph Kubala, Tino Merkel und Manuel Warwel zu nennen. Großer Dank gilt auch Marco Degner, Yavuz Gürlek, Matthias Häcker, Paul Mamuschkin, David Morisco, Sabin Sathyan und Shaohan Wang, welche mit ihren durchweg sehr guten studentischen Arbeiten zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Dank gebührt den Initiatoren des Promotionskollegs Hybrid und dem Ministerium für Wissenschaft und Kunst für dessen Förderung. Zudem danke ich den Firmen Powersys und JSOL für den Support rund um das Simulationstool JMAG. Daneben danke ich der Firma Voestalpine rund um Herrn Dr. Sonnleitner für die sehr gute Zusammenarbeit und die Bereitstellung hochwertiger Messreihen. Des Weiteren möchte ich Herrn Hubert Fußhoeller für die Unterstützung rund um die Erstellung der druckfähigen Version danken.

Am Ende möchte ich meiner Frau Carina, meiner Tochter Hanna, meinen Eltern, meiner Schwester und auch meiner ganzen Familie für ihre Unterstützung danken. Ohne Euch und ohne Eure Rückendeckung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Asperg

David Bauer

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis.....	XVII
Abkürzungsverzeichnis.....	XIX
Symbolverzeichnis	XXI
Kurzfassung	XXVII
Abstract	XXIX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Ziele der Arbeit	1
1.2 Struktur der Arbeit	3
2 Einsatz von elektrischen Maschinen im Elektro- bzw. Hybridfahrzeug	7
2.1 Elektrischer Antriebsstrang	7
2.2 Anforderungen an die elektrische Maschine.....	8
2.3 Relevanz von Fahrzyklen	9
3 Verlustleistungen in elektrischen Maschinen und deren Bedeutung	13
3.1 Übersicht auftretender Verlustleistungen	13
3.2 Thermische Auswirkungen.....	13
3.3 Bedeutung für die Auslegung und Berechnung	15
4 Untersuchtes Maschinenmuster	17
5 Thermische Modelle	19
5.1 Thermisches Netzwerkmodell.....	20
5.1.1 Aufbau und Grundgleichungen	20
5.1.2 Stationäre und transiente Lösung	22
5.1.3 Verlusteinspeisung und Verlustskalierung - Stand der Technik	22

5.1.4	Verwendetes thermisches Modell	23
5.2	FEM-Modell für gezielte Analysen zur Verlustübergabe	28
6	Verlustanalyse und Schnittstelle zur thermischen Simulation	31
6.1	Kupferverluste.....	31
6.1.1	Verlustmechanismen	31
6.1.2	Stand der Technik - Kurzzusammenfassung.....	40
6.1.3	Berechnungsgrundlagen.....	41
6.1.4	Verlustanalyse.....	53
6.1.5	Analyse thermisch relevanter Kriterien	65
6.1.6	Fazit	81
6.2	Eisenverluste.....	85
6.2.1	Verlustmechanismen	86
6.2.2	Stand der Technik - Kurzzusammenfassung	87
6.2.3	Berechnungsgrundlagen.....	88
6.2.4	Verlustanalyse.....	92
6.2.5	Analyse thermisch relevanter Kriterien.....	124
6.2.6	Fazit	135
6.3	Magnetverluste.....	137
6.3.1	Verlustmechanismen	137
6.3.2	Stand der Technik - Kurzzusammenfassung.....	142
6.3.3	Berechnungsgrundlagen.....	143
6.3.4	Verlustanalyse.....	144
6.3.5	Analyse thermisch relevanter Kriterien.....	159
6.3.6	Fazit	165
6.4	Einfluss von Stromoberschwingungen durch den Umrichter	166
6.4.1	Verlustmechanismen	167
6.4.2	Stand der Technik - Kurzzusammenfassung.....	167
6.4.3	Berechnungsgrundlagen.....	168
6.4.4	Verlustanalyse und Abgleich mit der Messung	168
6.4.5	Fazit	182
7	Gesamtmaschinvalidierung: Verluste und Temperaturen.....	183
8	Zusammenfassung und Ausblick	193

Literaturverzeichnis	199
Anhang	215
A.1 Beispiel eines thermischen Netzwerks im Axialschnitt	215
A.2 Vereinfachtes FE-Stromverdrängungsmodell.....	216
A.3 Herstellung der spezifizierten Drahtlagen	217
A.4 Parameterstudie zur lokalen Verlustübergabe.....	219
A.5 Verwendete Magnetisierungskennlinie	220
A.6 Einfluss des Schneidspalts.....	221
A.7 Schnittbilder der verschiedenen Messergüten	222
A.8 Vorstellung PSM B.....	223
A.9 Vorstellung PSM C.....	223

Abbildungsverzeichnis

2.1	Ersatzschaltbild des elektrischen Antriebsstranges [102].....	7
2.2	Schematische Darstellung von Überlast- und Dauerbetriebsbereich einer elektrischen Maschine	10
2.3	Aus Fahrzyklen resultierende Betriebspunkte einer beispielhaften PSM mit $n_{max} = 16000 \frac{U}{\min}$	11
3.1	Verlustübersicht am Beispiel einer PSM.....	14
4.1	Untersuchtes Maschinenmuster (PSM A)	17
4.2	Maximalkennlinie der untersuchten Maschine PSM A bei $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	18
5.1	Einfaches thermisches Netzwerk eines Statorsegments: Li.: Räuml. Aufteilung der Knoten; Re.: Abstrahiertes Modell inkl. Randbedingungen	20
6.1	Vereinfachte Wirkprinzipdarstellung des Skin-Effekts.....	33
6.2	Konturplot der Stromdichte in einem Leiter bei $d = 3 \text{ mm}$, $\hat{I} = 100 \text{ A}$, $f = 10 \text{ kHz}$ und $t_1 = 68 \text{ } \mu\text{s}$. Zum Vergleich dazu: $\hat{J}_{DC} = 14,147 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$	34
6.3	Stromdichte in Abhängigkeit vom Zentrumsabstand zum Zeitpunkt $t_2 = 0$ mit $i(t_2) = 0$	34
6.4	Konturplot der Stromdichte in 16 von Luft umgebenen Drähten zum Zeitpunkt $t = 0,68 \text{ ms}$ ($d_{\text{Draht}} = 2 \text{ mm}$, $\hat{I}_{\text{Draht}} = 100 \text{ A}$ und $f = 1 \text{ kHz}$). Zum Vergleich: $\hat{J}_{DC} = 31,831 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$	35
6.5	Konturplot der Stromdichte zum Zeitpunkt $t = 0,68 \text{ ms}$ ($d_{\text{Draht}} = 1 \text{ mm}$, $\hat{I}_{\text{Draht}} = 22,2 \text{ A}$ und $f = 1 \text{ kHz}$). Zum Vergleich: $\hat{J}_{DC} = 28,27 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$	36
6.6	Vereinfachtes Beispiel zur Darlegung des Einflusses der Drahtlage bei Verwendung von drei parallelen Drähten. Grün (Drähte $A_g - C_g$) symbolisiert die gute und Rot (Drähte $A_s - C_s$) die schlechte Drahtlage	37
6.8	Elektrische und magnetische Felder im stromdurchflossenen Leiter [22]	42

6.9	Darstellung der eff. Stromdichte in einem Leiter mit dem Radius $r_0 = 1,5 \text{ mm}$, $\hat{I}_{\text{Draht}} = 100 \text{ A}$ und $f = 1 \text{ kHz}$	46
6.10	Beispielhafte Draht- und Leiteranordnungen zur Erklärung der Parameter; gute (li.) und schlechte (re.) Drahtlage	49
6.11	Verlustzunahme im Aktivteil der Maschine durch den Proximity-Effekt im gesamten Betriebsbereich bei $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	54
6.12	Zusatzverluste der Gesamtmaschine durch den Proximity-Effekt im Kennfeld bei $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	54
6.13	Schnittbild einer realen Nut (li.) und Konturplot der Verlustdichte bei $n = 12000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ und $I_{\text{Ph}} = 228,3 \text{ A}$ (re.)	55
6.14	Zwei vereinfachte Wickelkopfmodelle zur Bestimmung der Kupferzusatzverluste in Folge des Proximity-Effekts (links: Realer Wickelkopf, rechts: Modelle)	56
6.15	Gute (li.) und schlechte (re.) Drahtlage für die untersuchte Maschine	57
6.16	Resultierende Ströme für die gute (li.) und schlechte (re.) Drahtlage	58
6.17	Drahtlage von vier in Reihe verschalteten Spulen.....	59
6.18	Strommessboxen	60
6.19	Umgesetzte Drahtanordnungen im Musterbau: Gute (links) und schlechte (rechts) Drahtlage	61
6.20	Eingezogene Wicklung: Gute (links) und schlechte (rechts) Drahtlage	61
6.21	Kompletter Messaufbau.....	62
6.22	Gemessene Verluste bei Starttemperatur.....	62
6.24	Vergleich der ermittelten Verlustdifferenzen zwischen Analytik, FEM und Messung	64
6.25	Vergleich der gemessenen und mittels FEM berechneten Stromverläufe bei $11000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ und schlechter Drahtlage.....	65
6.26	Darstellung der mittels FEM berechneten inhomogenen Verlustdichte innerhalb der Nut	66
6.27	Einführung des radialen Schichtenmodells, schematische Darstellung.....	67
6.28	Messstellen zum Abgleich der Kupfertemperaturen	68
6.29	Vergleich der Temperaturfelder bei unterschiedlicher Verlusteinspeisung	69

6.30	Vergleich der Temperaturentwicklung bei verschiedenen Messstellen.....	70
6.31	Einzelne Drahtverluste im gekoppelten Referenzmodell	73
6.32	Nach Verlusteffekt getrennte Darstellung der Skalierungsfunktion	74
6.33	Unterschiedliche Verlustanteile in Abhängigkeit von der Temperatur in einem Draht unter Berücksichtigung des Skin-Effekts.....	75
6.34	Vergleich der Temperaturfelder unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit	77
6.39	Beispielhafte Hystereseschleife eines Elektroblechs [114].....	86
6.40	Schematische Darstellung der Wirbelstrombahnen in einem geblechten Paket	87
6.41	Bearbeitungseinflüsse Elektroblech.....	90
6.44	Einfluss der Schrägung auf die Eisenverluste im Stator und Rotor, betrachteter Betriebspunkt bei n_{max} und M_{max} : Vergleich einer 3D-Rechnung inklusive kontinuierlicher Schrägung und einer 2D-Rechnung	94
6.45	Schematische Darstellung der Wirbelstrombahn bei senkrecht zur Blechebene eintretenden Magnetfeldern (vgl. Abb. 6.40).....	95
6.46	Vergleich zwischen FEM-Modell und realer Maschine	96
6.48	Vergleich der magnetischen Flussdichte in z-Richtung ohne / mit Wickelkopf.....	99
6.49	Aufweitung des Magnetfeldes im Bereich des Luftspalts	99
6.50	Vergleich verschiedener Trennverfahren [104].....	101
6.53	Darstellung verschiedener Stanzeinflüsse auf die spezifischen Verluste bei $f = 50$ Hz und $J = 1,5$ T.....	106
6.54	Einfluss der Stanzkantenanzahl auf die relative Permeabilität bei Verwendung einer schlechten Schere ($f = 50$ Hz und $J = 1,5$ T)	106
6.56	Einfluss der Scherengüte in Abhängigkeit von der Anzahl an Stanzkanten ($f = 50$ Hz)	108
6.59	Einfluss der Frequenz auf die Verlustzunahme durch das Stanzen (a) und auf die resultierende Stanzkantenbreite (b). Beides bei Verwendung der guten Schere.....	110
6.60	Mittelwert aller unter gleichen Bedingungen gemessenen Leerlaufkennlinien	114

6.63	Vergleichsauswertung der Schleppkennlinie einer ASM mit ähnlichen Rotorabmessungen und identischem Lagertyp	117
6.65	Simulationsmodell inkl. der separat berücksichtigten Stanzkante	119
6.69	Vergleich der simulierten und aus der Messung zurückgerechneten Eisenverluste im Kurzschluss	123
6.70	Stator-Verlustdichte im Kurzschluss bei maximaler Drehzahl ($n = 12000 \frac{U}{\text{min}}$) und die daraus abgeleiteten Schichten zur Verlustübergabe	125
6.71	Resultierende Temperaturen im Stator für verschiedene räumliche Verlusteinspeisungen	126
6.72	Rotor-Verlustdichte im Kurzschluss bei maximaler Drehzahl ($n = 12000 \frac{U}{\text{min}}$) und die daraus abgeleiteten Schichten zur Verlustübergabe	127
6.73	Resultierende Temperaturen im Rotor für verschiedene räumliche Verlusteinspeisungen	127
6.74	Rotor-Verlustdichte im gewählten Betriebspunkt und die daraus abgeleiteten Schichten zur Verlustübergabe	128
6.75	Resultierende Temperaturen im Rotor für verschiedene räumliche Verlusteinspeisungen im gewählten Betriebspunkt.....	128
6.76	Stator-Verlustdichte inkl. Schrägung im gewählten Betriebspunkt....	129
6.77	Rotor-Verlustdichte inkl. Schrägung im gewählten Betriebspunkt	130
6.78	Resultierende Temperaturen im Stator für verschiedene räumliche Verlusteinspeisungen im gewählten Betriebspunkt unter Berücksichtigung der Schrägung	130
6.79	Resultierende Temperaturen im Rotor für verschiedene räumliche Verlusteinspeisungen im gewählten Betriebspunkt unter Berücksichtigung der Schrägung	131
6.80	Gemessene Magnetisierungskennlinien bei unterschiedlichen Temperaturen [66].....	132
6.81	Hystereschleife bei unterschiedlichen Temperaturen [107]	133
6.83	Schematische Entstehung von Wirbelströmen im Magnet	138
6.84	3D-FEM Modell zur Berechnung der Magnetverluste (PSM A)	143
6.85	Magnetverluste (in Prozent) in Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit	144
6.86	Magnetverluste in Abhängigkeit des Vorsteuerwinkels α	146
6.87	Analyse der Magnetverluste	147

6.95	Fertiges PSM B Muster zur Magnetverlustmessung	155
6.96	Analyse der Magnetverluste	156
6.100	Resultierende Magnettemperaturen bei unterschiedlicher Verlusteinspeisung	160
6.101	Resultierende Rotortemperaturen bei unterschiedlicher Verlusteinspeisung	161
6.103	Magnetverluste in Abhängigkeit der Temperatur: Test der vorgestellten Skalierungsfunktion	164
6.104	Gemessene Phasenströme bei unterschiedlichen DC-Spannungen....	170
6.105	Messdaten bei 180 und 360 V Batteriespannung	170
6.106	Simulierte Verluste für die beiden Messpunkte und Angabe der relativen Verlustzunahme bei einer Spannungserhöhung von 180 auf 360 V	174
6.107	Vergleich der gemessenen (rot) und simulierten (blau) Stromverläufe und -spektren, Batteriespannung 180 V [102]	174
6.108	Vergleich der gemessenen (rot) und simulierten (blau) Stromverläufe und -spektren, Batteriespannung 360 V [102]	175
6.114	Abhängigkeit der Zusatzverluste von der Taktfrequenz	181
7.1	Vergleich der berechneten und gemessenen Verluste im Leerlauf und Kurzschluss	184
7.2	Vorhandene Temperaturmessstellen im Stator und Rotor der Maschine. Wickelkopf- und Kühlwassertemperatur nicht dargestellt.....	186
7.4	Vergleich der simulierten und gemessenen Temperaturen im Wickelkopf.....	189
7.5	Vergleich der simulierten und gemessenen Temperaturen innerhalb der Nut in der axialen Mitte der Maschine	190
7.6	Vergleich der simulierten und gemessenen Temperaturen innerhalb der Magnete	191
A2.1	Vergleich der Kupferverlustmodelle	216
A3.1	Fixierung der sieben parallelen Drähte mittels kleiner Klebestreifen unter Berücksichtigung der Lage der parallelen Drähte zueinander.	217
A3.2	Nummerierung der sieben parallelen Drähte mit den Buchstaben A-G	218
A3.3	Vorbereitung der einzelnen Spulen.....	218

A3.4 Teilausschnitt des fertiggestellten Stators mit der schlechten Drahtlage	218
A4.1 Parameterstudie zur benötigten Anzahl radialer Schichten. Oben 4, Mitte 10, unten 20 Schichten im Vergleich zu 40 Schichten und der FEM-Referenzlösung.....	219
A5.1 <i>B-H</i> -Kennlinie und relative Permeabilität des verwendeten Elektroblechs (ISOVAC330-35A HF)	220
A6.1 Darstellung des resultierenden Randbereichs bei verschiedenen Schneidspaltmaßen.....	221
A7.1 Vergleich der Schnittbilder nach dem Schneiden mit verschiedenen Messergüten	222
A8.1 Untersuchtes Maschinenmuster	223
A9.1 Blechschnitt der PSM C (Rotor aus Geheimhaltungsgründen nur vereinfacht dargestellt).....	224

Tabellenverzeichnis

4.1	Maschinendaten der untersuchten PSM A	18
6.1	Verlustzunahme und Verlustwerte durch ungünstige Drahtlage.....	57
6.2	Verlustfaktoren für die einzelnen Nuten und der resultierende Verlustfaktor bei Verschaltung; keine Berücksichtigung der auftretenden Wickelkopfinduktivitäten und -widerstände	59
6.3	Darstellung der berechneten und gemessenen Verlustwerte auf Basis der guten und schlechten Drahtlage. Vergleich der sich ergebenden Differenzen Δ zwischen guter und schlechter Drahtlage für die Analytik, FEM und Messung.....	66
6.4	Vergleich der berechneten Eisenverluste auf Basis einer 2D- und 3D-Rechnung. Berücksichtigung der Schrägung im 3D-Modell	93
6.5	Ausgewählte Betriebspunkte zur Abschätzung des Einflusses durch Stirnraumfelder	97
6.6	Ergebnisse der ausgewählten Betriebspunkte zur Abschätzung des Einflusses durch Stirnraumfelder	97
6.7	Resultierende mittlere relative Stanzkantenbreite in Abhängigkeit der Scherenqualität bei $f = 50$ Hz. Zusätzliche Darstellung der Änderung zwischen den einzelnen Scherengüten.....	109
6.8	Resultierende Eisenverluste innerhalb der Leerlaufmessung	119
6.9	Resultierende Eisenverluste bei der Kurzschlussmessung.....	123
6.10	Magnetmasse je Pol.....	154
6.11	Vergleich der aus der Messung rekonstruierten Magnetverluste gegenüber transients 3D-FEM. Jeweilige Hochrechnung auf die Maschinengesamtverluste.	157
6.12	Messdaten bei 180 und 360 V Batteriespannung	171
6.13	Simulierte Verluste für die beiden Messpunkte	173
6.14	Berechnungsergebnisse unter Berücksichtigung von Stromüberschwingungen ($f_{Takt} = 10$ kHz, $U_{DC} = 360$ V)	176
6.15	Berechnungsergebnisse unter Berücksichtigung verschiedener Batteriespannungen; $f_{Takt} = 10$ kHz	178

6.16	Berechnungsergebnisse unter Berücksichtigung verschiedener Taktfrequenzen.....	180
7.1	Zusammenfassung der berechneten und gemessenen Verluste für ausgewählte Betriebspunkte	183
7.2	Übersicht über die umgesetzten Methoden zur Verlusteinspeisung und Verlustskalierung im thermischen Modell	185
A2.1	Vergleich vollständiges Maschinenmodell - Einfach-Nutmodell hinsichtlich der Kupferverlustberechnung.....	217
A6.1	Einfluss des Schneidspalts e der Schlagschere auf die Verluste.....	221
A8.1	Maschinendaten der untersuchten PSM B	224
A9.1	Maschinendaten der PSM C	224

Abkürzungsverzeichnis

2D	2-Dimensional
3D	3-Dimensional
AC	Alternating Current (dt.: Wechselstrom)
ASM	Asynchronmaschine
BP	Betriebspunkt
CFD	Computational Fluid Dynamics (dt.: Numerische Strömungsmechanik)
DC	Direct Current (dt.: Gleichstrom)
E-Blech	Elektroblech
EL	Einzelne Lamelle
EM	Elektrische Maschine
FE	Finite-Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVM	Finite-Volumen-Methode
KS	Kurzschluss
KW	Kühlwasser
LE	Leistungselektronik
LL	Leerlauf
MS	Messstelle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus

PM	Permanentmagnet
PSM	Permanentmagneterregte Synchronmaschine
RB	Randbedingung
Sim	Simulation
SK	Stanzkante
SVPWM	Space Vector Pulse Width Modulation (dt.: Raumzeigermodulation)
WF	Wicklungsfelder
WK	Wickelkopf
WLTC	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle (dt.: Weltweit vereinheitlichter Prüfzyklus von Fahrzeugen für den Leichtverkehr)
WLTP	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (dt.: Weltweit vereinheitlichtes Testverfahren von Fahrzeugen für den Leichtverkehr)
WR	Wechselrichter

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

<i>A</i>	Fläche	m^2
<i>a</i>	Koeffizient	-
<i>a</i>	Anzahl	-
<i>B</i>	Magnetische Flussdichte	T
<i>b</i>	Koeffizient	-
<i>b</i>	Breite	m
C	Wärmekapazitätsmatrix	J/K
<i>c</i>	Parameter für Formfunktion	-
<i>c</i>	Spez. Wärmekapazität	J/kgK
<i>c</i>	Korrekturfaktor	-
<i>D</i>	Verschiebungsdichte	$\frac{\text{As}}{\text{m}^2}$
<i>d</i>	Durchmesser	m
<i>d</i>	Blechdicke	m
<i>E</i>	Elektrische Feldstärke	V/m
<i>e</i>	Schneidspalt	m
<i>f</i>	Frequenz	Hz
G	Wärmeleitmatrix	W/K
<i>g</i>	Laufvariable	-
<i>H</i>	Magnetische Feldstärke	A/m
<i>h</i>	Höhe	m
I_0	Modifizierte Bessel-Funktion 1. Art 0. Ordnung	-
I_1	Modifizierte Bessel-Funktion 1. Art 1. Ordnung	-
<i>I</i>	Strom (Effektivwert)	A
<i>i</i>	Strom- Zeitaugenblickswert	A
<i>J</i>	Stromdichte	$\frac{\text{A}}{\text{m}^2}$
<i>J</i>	Polarisation	T
<i>j</i>	Imaginäre Zahl	-

K_0	Modifizierte Bessel-Funktion 2. Art 0. Ordnung	-
k	Korrekturfaktor	-
k	Parameter für Substitution	-
k	Verlustfaktor für Stromverdrängung	-
k	Füllfaktor	-
L	Induktivität	H
l	Länge	m
M	Drehmoment	Nm
m	Parameter für Kreisstromberechnung	-
m	Phasenzahl	-
m	Steigung	-
m	Masse	kg
Nu	Nusselt-Zahl	-
N	Nutzahl	-
n	Anzahl	-
n	Drehzahl	U/min
P	Leistung	W
p	Polpaarzahl	-
p	Leistungsdichte	kW/kg
Q	Wärmestrom	W
q	Lochzahl	-
R	Widerstand	Ω m
Ta	Taylor-Zahl	-
r	Radius	m
s	Strecke/Weg	m
T	Periodendauer	s
T	Temperatur	$^{\circ}$ C
t	Zeit	s
U	Spannung	V
V	Volumen	m^3
x	Koordinate	-
x	Radiale Position	m
z	Parameter für Substitution	-
z	Anzahl Drähte	-

Griechische Buchstaben

α	Vorsteuerwinkel	$^{\circ}\text{el}$
α	Exponent zur Lagerverlustbestimmung	-
α	Verlustexponent	-
α	Temperaturkoeffizient	1/K
β	Reduzierte Leiterhöhe	m
β	Skalierungsfaktor für Skin- und Proximityverluste	-
β	Verlustexponent	-
Δ	Differenz	-
δ	Luftspalt	m
δ	Eindringtiefe	m
ε	Permittivität	F/m
η	Faktor für Excessverluste	-
η	Parameter zur Wicklungsbeschreibung	-
η	Wirkungsgrad	-
γ	Schrägungswinkel	$^{\circ}$
γ	Phasenwinkel	$^{\circ}$
κ	elektr. Leitfähigkeit	S/m
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
μ	Permeabilität	H/m
ν	Viskosität	Pa · s
ν	Ordnungszahl	-
ω	Kreisfrequenz	1/s
φ	Hilfsfunktion	-
φ	Phasenwinkel	$^{\circ}$
π	Kreiszahl	-
ψ	Magnetischer Fluss	Wb
ψ	Hilfsfunktion	-
ρ	Spez. elektr. Widerstand	Ωm
σ	Eisenverlustfaktor	-
σ	Elektr. Leitfähigkeit	S/m
τ	Harzfuellfaktor	-
ξ	Strukturparameter für die Nut	-

Indizes

AC	Alternating Current (dt.: Wechselstrom)
akt	Aktivteil
analyt	Analytisch
b	Breite
Batt	Batterie
Cu	Kupfer
D	Draht
DC	Direct Current (dt.: Gleichstrom)
dyn	Dynamisch
eff	Effektiv
EL	Einzelne Lamelle
el	Elektrisch
Exc	Excess-Verluste
Fe	Eisen
g	Gut
ges	Gesamt
global	Global
h	Höhe
Hys	Hysterese
i	Index
ind	Induziert
Iso	Isolation
k	Laufindex
kn	Index zur Beschreibung des Korrekturfaktors für Stromverdrängung
Kreis	Kreisströme
L	Leiter
Lsp	Luftspalt
Luft	Luftreibung
m	Mittel
Mag	Magnet
max	Maximal
mech	Mechanisch
mech	Mechanisch

Mess	Messung
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
norm	Normiert
par	Parallel
Ph	Phase
Prox	Proximity
R	Rotor
r	Relativ
rad	Radial
Red	Reduziert
res	Resultierend
S	Stator
S	Sättigung
s	Schlecht
Sim	Simulation
sin	Sinus
SK	Stanzkante
Stirn	Stirnraum
t	Index für Leiterlage innerhalb der Nut
tang	Tangential
th	Thermisch
u	Unterhalb
V	Verluste
Wirbel	Wirbelstrom
WK	Wickelkopf
WR	Wechselrichter
ZK	Zwischenkreis