

Ein Beitrag zur thermischen Ausnutzung permanenterregter Synchronmotoren in automobilen Traktionsanwendungen

Der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und
Mathematik der Universität Paderborn

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation
von

M.Sc. Oliver Wallscheid

Erster Gutachter:
Zweiter Gutachter:

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

Tag der mündlichen Prüfung:

10.02.2017

Paderborn 2017

Diss. EIM-E/331

Berichte aus dem Fachgebiet Leistungselektronik und
Elektrische Antriebstechnik

Band 6

Oliver Wallscheid

**Ein Beitrag zur thermischen Ausnutzung
permanenterregter Synchronmotoren
in automobilen Traktionsanwendungen**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Paderborn, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5160-5

ISSN 1862-3492

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Clarke's first law

When a distinguished but elderly scientist states that something is possible, he is almost certainly right. When he states that something is impossible, he is very probably wrong.

Clarke's second law

The only way of discovering the limits of the possible is to venture a little way past them into the impossible.

Clarke's third law

Any sufficiently advanced technology is indistinguishable from magic.

Arthur C. Clarke (1917-2008)

Britischer Schriftsteller & Physiker

Danksagung

Obwohl definitionsgemäß stets die Einzelleistung des Doktoranden den Kern eines jeden Promotionsvorhabens bildet, ist es offensichtlich, dass das Gelingen dieses Unterfangens von zahlreichen Randbedingungen abhängt. Hier sind es vor allem unsere Mitmenschen, die uns prägen und unterstützen und somit einen wesentlichen Einfluss auf den Promotionsverlauf ausüben. Daher möchte ich am Ende meines persönlichen Promotionswegs die Gelegenheit nutzen und den Menschen einen besonderen Dank aussprechen, welche mich bis hierhin begleitet haben.

Danken möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker, der durch eine hervorragende Lehre mein Interesse an der elektrischen Antriebstechnik geweckt und somit einen wichtigen Grundstein für dieses Promotionsvorhaben gelegt hat. Das von ihm entgegengebrachte Vertrauen schätze ich sehr und freue mich auf die gemeinsame Zusammenarbeit über meine Doktorandentätigkeit hinaus. Ebenso möchte ich Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling für die Übernahme des Koreferats danken.

Auch dem Kollegium am Fachgebiet LEA, welchem ich mich sehr verbunden fühle, gebührt mein Dank. Die Kolleginnen und Kollegen haben massiv dazu beigetragen, dass ich mich stets wohl gefühlt habe und meiner Arbeit mit großer Freude nachgegangen bin. Das hervorragende und freundschaftliche Arbeitsklima basiert u.a. auf der großen Hilfsbereitschaft der Mitarbeiter untereinander sich fachlich und im privaten Umfeld zu unterstützen, was ich sehr wertschätze. Besonders erwähnen möchte ich Dr.-Ing. Wilhelm Peters, der mich bereits während meiner studentischen Abschlussarbeiten betreute und meinen universitären Werdegang geprägt und stets gefördert hat. Ebenfalls ein besonderer Dank gebührt Dr.-Ing. Andreas Specht, der mich vor allem während meiner Anfänge am Fachgebiet LEA unterstützte und maßgeblichen Anteil daran trägt, dass ich ohne Totzeit nach Studienabschluss in mein Projekt- bzw. Promotionsvorhaben kommutieren konnte. Für zahlreiche ergebnisreiche Stunden am Prüfstand, förderliche Diskussionen sowie einen erstklassigen Fahrrad- und Holzverarbeitungsservice bin ich ihm sehr dankbar. Des Weiteren gilt mein Dank meinen direkten Bürokollegen Oleg Buchholz, Marc Hagemeyer sowie (aus früheren Tagen) Dr.-Ing. Tobias Huber für eine tolle gemeinsame Zeit und viele gute Gespräche mit Fachbezug aber vor allem auch über Themen fernab des Arbeitsalltags.

Ferner möchte ich mich bei unseren Partnern der Daimler AG herzlich bedanken, denn das gemeinsame Kooperationsprojekt legte den Grundstein für diese Arbeit. Bei Dr.-Ing. Marcus Menne bedanke ich mich für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und seinen langem Atem über den gesamten Projektverlauf. Danken möchte ich auch Dr. rer. nat. Andrea Neusiedl, Markus Ott sowie Prof. Dr.-Ing. Ulrich Ammann für viele gute Diskussionen und die partnerschaftliche Zusammenarbeit.

Für die großartige Unterstützung vor und während der Promotion bin ich meinen Eltern zutiefst dankbar. Zusammen mit meiner Schwester Nadine, sowie Patentante Elke und Onkel Jürgen und all meinen Freunden gaben sie mir einen unglaublich starken Rückhalt. Zuletzt möchte ich meiner Partnerin Anna meinen Dank aussprechen – zusammen haben wir uns in die ostwestfälische Provinz gewagt und gehen seit dem jeden Weg gemeinsam. Sie hat mich stets ermutigt auch schwierige Aufgaben optimistisch anzugehen und schenkte mir die Kraft und Ausdauer, die es benötigt, um ein langwieriges Vorhaben, wie diese Promotion, durchzustehen.

Zusammenfassung

Essentielle Anforderungen moderner Antriebssysteme für (teil-)elektrisch angetriebene Fahrzeuge sind eine hohe Leistungs- und Drehmomentdichte bezogen auf Volumen und Gewicht. Hierbei determinieren insbesondere die zulässigen Grenztemperaturen wichtiger Motorkomponenten das transient sowie dauerhaft erzielbare elektromechanische Leistungspotential. Für die in automobilen Anwendungen häufig eingesetzten *permanenterregten Synchronmotoren* (PMSM) ist die Temperaturverteilung innerhalb der Wicklung und der Permanentmagnete von besonderem Interesse. Um den thermischen Bauteilschutz zu gewährleisten, werden Motoren in der industriellen Praxis häufig überdimensioniert, was zusätzlichen Gewichts- und Bauraumbedarf sowie höhere Produktionskosten bedingt. Alternativ kann ein aktives *Derating* eingesetzt werden, welches die zulässige Motorleistung in Abhängigkeit des thermischen Zustands regelt. Dies erlaubt, sowohl die thermischen Kapazitäten des Motors gezielt auszunutzen als auch die Leistungsaufnahme im thermisch stationären Betrieb zu maximieren, d.h. den Grad der Motorüberdimensionierung in der Konstruktionsphase zu minimieren. Substantielle Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis wichtiger Motortemperaturen zur Laufzeit – eine messtechnische Erfassung dieser ist allerdings aus Kosten- und Ausfallsicherheitsgründen, insbesondere innerhalb des Rotors, nicht möglich. Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt daher auf der modellbasierten Temperaturschätzung.

Eine direkte thermische Modellierung erfolgt zunächst mittels konzentrierter Parameter (*lumped-parameter thermal network* - LPTN). Hierfür wird ein mehrstufiges Verfahren entwickelt, welches beginnend mit einer analytischen Modellierung basierend auf Konstruktions- und Materialdaten eine zusätzliche experimentelle Identifikation wichtiger Modellparameter vorsieht (*Grey-Box Ansatz*). Das zugrundeliegende LPTN stellt hierbei ein lineares, parametervariantes Modell hinsichtlich der thermischen Zustände dar, welches zudem ein nichtlineares Verlustleistungsmodell im Eingangspfad aufweist. Zur Identifikation dieses Gesamtmodells wird ein globales Identifikationsverfahren auf Basis einer Partikelschwarmoptimierung erarbeitet, welches gegenüber dem Stand der Technik eine robuste Identifikation mit besonderem Fokus auf dem kritischen Überlastbetrieb ermöglicht. Ein zweiter Ansatz zielt auf die *indirekte Temperaturbeobachtung* durch Schätzung temperaturabhängiger Parameter innerhalb des elektrischen Motormodells ab. Hier steht insbesondere die Remanenzflussdichte der Permanentmagnete im Fokus. Da die Temperatursensitivität der Magnete vergleichsweise gering ausfällt, ist eine exakte Modellierung des elektrischen Motors als auch des speisenden Umrichters erforderlich, da andernfalls signifikante Beobachtungsfehler resultieren. Da die direkte und indirekte Temperaturermittlung vollständig unabhängig voneinander sind, wird ferner die Fusionierung beider Ansätze mittels *Kalman-Filter* zur Erhöhung der Schätzperformanz untersucht. Hierbei ist die optimale Auslegung des Filters mit Bezug auf die praxisnahe Anwendung gegenüber den idealtypischen Annahmen in der Filtertheorie zu diskutieren.

Darauf aufbauend wird die thermische Modellierung innerhalb einer konventionellen sowie prädiktiven Temperaturregelung genutzt. Hierbei werden die Vorteile eines modellprädiktiven Ansatzes (*model predictive control* - MPC) hinsichtlich der Erhöhung der maximalen elektromechanischen Leistungswandlung gegenüber einer konventionellen Regelung ohne Prädiktion herausgestellt. Als Fallbeispiel bzw. Vergleichsgrundlage wird ein vereinfachtes Fahrzeug-, Fahrer- sowie Streckenmodell im Sinne einer Rennsimulation erarbeitet.

Abstract

Highest power and torque densities regarding volume and weight are crucial requirements of modern drive systems for (hybrid) electric vehicles. Here, especially certain component temperature limits determine the transient as well as steady-state electromechanical drive potential. *Permanent magnet synchronous motors* (PMSM) are the most frequently used motor type in automotive applications and its temperature distribution becomes most critical inside the stator winding and inside the rotor magnets. To ensure the operation within a motor's thermal boundaries, PMSM are typically oversized in many industry fields leading to needless weight and volume as well as increasing production costs. Alternatively, an active *derating* has to be utilised to adjust the motor's power limits during runtime. By doing so, the motor's thermal capacities and the stationary energy conversion rate can be utilised to an maximum extent allowing to prevent oversizing within the drive design phase. Hence, an essential prerequisite is monitoring relevant component temperatures during runtime. Measurement-based approaches are not feasible with regards to costs and sensor robustness, especially when considering the harsh environment inside the rotating motor parts in terms of mechanical stress and EMI issues. Therefore, the focus of this work lies on model-based temperature determination techniques.

At first, a direct thermal modelling solution is realised using *lumped-parameter thermal networks* (LPTN). Starting with an analytical white-box approach solely based on material and construction data a multistage optimisation method incorporating experimental parameter identification techniques is derived (*grey-box modelling*). The resulting LPTN structure is linear but parameter-varying regarding the thermal states and non-linear in terms of the required motor loss model. To identify this complex system a global identification approach based on a particle swarm optimisation is acquired which focuses on the accurate modelling of overload phases as a major extension to the state of the art. Secondly, an *indirect approach* observing temperature-sensitive parameter variations regarding the electrical motor model is investigated. Here, the remanent flux density of highly utilised PMSM traction drives is of particular importance. However, as the temperature-sensitivity of current high-energy magnet materials is rather low the motor as well as the feeding voltage source inverter have to be modelled exactly to prevent serious observation errors from cropping up. Since both model-based temperature estimation techniques are independent of each other additional signal fusion methods trying to increase the estimation performance are investigated as well. For this task, the *Kalman filter* is a suitable solution if an optimised design approach is chosen instead of standard, analytical ones.

Finally, a conventional and a *model predictive* (MPC) derating controller are set up to limit important component temperatures during runtime. Simplified vehicle, driver and track models are derived in a lap time simulation fashion as a suitable comparison basis. The MPC approach shows significant advantages towards conventional methods in terms of thermal motor utilisation and consequently increases the converted electromechanical energy amount.

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen/Indizes

AC	Wechselgröße (eigentlich Wechselstrom - <i>alternating current</i>)
AKS	Aktiver Kurzschluss
APS	Arbeitspunktsteuerung
ARW	Ansatz zur Unterdrückung eines unkontrollierten Aufintegrierens (<i>Anti-Reset-Windup</i>)
ASB	Ankerstellbereich
ASM	Asynchronmotor
BF	Best-Fit-Wert
CFD	Numerische Strömungsmechanik (<i>computational fluid dynamics</i>)
DAE	Differential-algebraische Gleichung (<i>differential-algebraic equation</i>)
DC	Gleichgröße (eigentlich Gleichstrom - <i>direct current</i>)
DGL	Differentialgleichung
DSP	Digitaler Signalprozessor
DSR	Direkte Selbstregelung (auch DTC - <i>direct torque control</i>)
Dy	Dysprosium
EV	Elektrofahrzeug (<i>electrical vehicle</i>)
FE	Finite Elemente
FOC	Feldorientierte Regelung (<i>field oriented control</i>)
FSB	Flussschwäcbereich
HEV	Hybridfahrzeug (<i>hybrid electrical vehicle</i>)
ICLOCS	Imperial College London Optimal Control Software
IGBT	Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode (<i>insulated-gate bipolar transistor</i>)
IPMSM	Permanent erregter Synchronmotor mit eingebetteten Magneten (<i>interior permanent magnet synchronous motor</i>)
IPOPT	Interior Point Optimizer
K	Kühlmittel
KF	Kalman-Filter
KL	Kugellager
KNN	Künstliches Neuronales Netz
LaS	Lagerschild
LPTN	Thermisches Netzwerk mit konzentrierten Parametern (<i>lumped-parameter thermal network</i>)
LPV	Linear parametervariant (<i>linear parameter-varying</i>)
LS	Luftspalt
LTi	Linear zeitinvariant (<i>linear time-invariant</i>)
LUT	Kennfeld (<i>look-up table</i>)
ME	Maximaler Wirkungsgrad (<i>maximum efficiency</i>)
MPC	Modellprädiktive Regelung (<i>model predictive control</i>)
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (<i>metal-oxide-semiconductor field-effect transistor</i>)

MTPC	Drehmoment mit minimaler Statorstromamplitude (<i>maximum torque per current</i>)
MTPF	Drehmoment mit minimaler verketteter Flussamplitude (<i>maximum torque per flux</i>)
MTPV	Drehmoment mit minimaler Statorspannungsamplitude (<i>maximum torque per voltage</i>)
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
NLP	Nichtlineares Programm
OBD	On-Board-Diagnose
PLL	Phasenregelschleife (<i>phase-locked loop</i>)
PM	Permanentmagnet
PMSM	Permanenterregter Synchronmotor
PMTB	Permanentmagnet-Temperaturbeobachter
PMTS	Permanentmagnet-Temperaturschätzer
PSO	Partikelschwarmoptimierung
PWM	Pulsweitenmodulation
RE	Rotoreisen
RKV	Runge-Kutta-Verfahren
RW	Rotorwelle
SPMSM	Permanenterregter Synchronmotor mit aufgebrachten Magneten (<i>surface-mounted permanent magnet synchronous motor</i>)
SQP	Sequentielle quadratische Programmierung
SR	Statorrücken
SRM	Geschalteter Reluktanzmotor (<i>switched-reluctance motor</i>)
SVM	Raumvektormodulation (<i>space vector modulation</i>)
SW	Statorwicklung
SynRM	Synchroner Reluktanzmotor (<i>synchronous reluctance motor</i>)
SZ	Statorzahn
U	Umgebung
VSI	Umrichter mit Spannungszwischenkreis (<i>voltage source inverter</i>)

Formelzeichen

α	Wärmeübergangskoeffizient
α_{B_r}	Koeffizient der temperaturabhängigen Remanenzflussdichte
α_{Cu}	Koeffizient der temperaturabhängigen Stromwärmeverluste
α_{Fe}	Koeffizient der temperaturabhängigen Eisenverluste
α_{H_c}	Koeffizient der temperaturabhängigen Koerzitivfeldstärke
β_{Cu}	Koeffizient der frequenzabhängigen Stromwärmeverluste
δ	Duty-Cycle
ϵ_{rs}	Elektrischer (Dreh-)Winkel
η	Dynamische Viskosität
ϑ	Celsius Temperatur
κ	Elektrische Leitfähigkeit
λ	Lagrange Multiplikator / Wärmeleitfähigkeit (kontextabhängig)
μ	Mittelwert / Bias
ν	Kinematische Viskosität
ξ	Normierte Drehmomentanforderung
ρ	Materialdichte / Scheduling-Variable (kontextabhängig)
σ	Standardabweichung

τ	Zeitkonstante
ϕ	ϕ -Achse in Zylinderkoordinaten
Φ	Transitionsmatrix im zeitdiskreten Zustandsraum
ψ	Verketteter magnetischer Fluss
ψ_{PM}	Verketteter Permanentmagnetfluss
ω_{rs}	Elektrische Kreisfrequenz
a	Aussteuergrad / Temperaturleitfähigkeit (kontextabhängig)
A	Fläche (einer gegebenen Anordnung)
\mathbf{A}	Systemmatrix im Zustandsraum
B	Magnetische Flussdichte
\mathbf{B}	Eingangsmatrix im Zustandsraum
B_r	Remanenzflussdichte
c	Spezifische Wärmekapazität
c_r	Rollreibungsbeiwert
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
C	Elektrische Kapazität / Wärmekapazität (kontextabhängig)
\mathbf{C}	Ausgangsmatrix im Zustandsraum
d	Charakteristische Länge eines Objekts (Ähnlichkeitstheorie)
e	Modell-/Schätzfehler
E	Elektrische Feldstärke
E_{mag}	Magnetische Energie
f_{dq}	Nichtlineare Fluss-Strom-Funktion
f_a	Abtastfrequenz
f_s	Schaltfrequenz
F	Kraft
g	Erdbeschleunigung
H	Magnetische Feldstärke
\mathbf{H}	Zeitdiskrete Eingangsmatrix im Zustandsraum
H_c	Koerzitivfeldstärke
i	Elektrischer Strom
\mathbf{I}	Einheitsmatrix
j	Getriebeübersetzung
J	Massenträgheitsmoment
k	Abtastindex / Verlustleistungsfaktor (kontextabhängig)
\mathbf{K}	Kalman-Matrix
L	Induktivität / Achslänge (kontextabhängig)
L_e	Induktivität unter Berücksichtigung des Rotorwinkels
L_Δ	Induktivität bei zeitdiskreter Modellierung
m	Masse
M	Systemrausch-Matrix
n	Drehzahl an der Motorwelle
N	Messrausch-Matrix
N_c	Regelungshorizont (modellprädiktive Regelung)
n_p	Pulszahl
N_p	Prädiktionshorizont (modellprädiktive Regelung)
Nu	Nusselt-Zahl
p	Polpaarzahl / Wärmequellendichte (kontextabhängig)
\mathbf{p}	Parametervektor
P	Leistung / Kovarianzmatrix (kontextabhängig)
P_{el}	Elektrische Leistung
P_{me}	Mechanische Leistung (Luftspaltleistung)

Pr	Prandtl-Zahl
p_v	Verlustleistungsdichte
P_v	Verlustleistung
$P_{v,Cu}$	Kupferverluste
$P_{v,Fe}$	Eisenverluste
Q	Rotationsmatrix der Park-Transformation
$Q_{b/s}$	Beobachtbarkeits-/Steuerbarkeitsmatrix
\dot{Q}	Wärmestrom
r	Radius bzw. r -Achse in Zylinderkoordinaten
R	Elektrischer / Thermischer Widerstand (kontextabhängig)
Ra	Rayleigh-Zahl
R_c	Ersatzwiderstand der Eisenverluste im Grundwellenmodell
Re	Reynolds-Zahl
R_s	Ohmscher Leitungswiderstand
s	Wegstrecke
\underline{s}	Komplexe Frequenz des Laplace-Bildbereichs
S	Elektrische Stromdichte
t	Zeit
T	Drehmoment / thermodynamische Temperatur (kontextabhängig)
T_{23}/T_{32}	Clarke-Transformation
T_a	Abtastperiode / Taylorzahl (kontextabhängig)
T_L	Lastdrehmoment
T_s	Schaltperiode
u	Elektrische Spannung / Steuerfolge (kontextabhängig)
v	Geschwindigkeit
V	Kostenfunktion / Ljapunov Funktion (kontextabhängig)
W	Gewichtungsmatrix
x	Zustandsvektor
y	Ausgangsvektor
z	z -Achse in Zylinderkoordinaten
\underline{z}	Komplexe Frequenz des z -Bildbereichs

Allgemeine Notation

x, X	Skalere Größen
x, X	Vektor, Matrix
$\underline{x}, \underline{X}$	Komplexe Größe
x^T, X^T	Transponierte(r) Vektor/Matrix
$x_{\alpha\beta}, X_{\alpha\beta}$	Darstellung im $\alpha\beta$ -Bezugssystem (statorfest)
x_{dq}, X_{dq}	Darstellung im dq -Bezugssystem (rotorfest)
x^*, X^*	Sollgrößen
\hat{x}, \hat{X}	Geschätzte bzw. beobachtete Größen
\dot{x}, \dot{X}	Zeitliche Ableitung
$\ \mathbf{x}\ _2$	Euklidische Norm
$\ \mathbf{x}\ _\infty$	Maximumsnorm

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	v
Zusammenfassung	vii
Abstract	ix
Abkürzungen und Formelzeichen	xi
1 Einleitung	1
2 Elektrische Antriebssysteme in automobilen Traktionsanwendungen	3
2.1 Anforderungen	4
2.2 Stand der Technik und Trends	5
2.2.1 Elektrische Motoren	5
2.2.2 Leistungselektronik	7
2.2.3 Regelung des Antriebssystems	9
2.3 Bedarf der modellbasierten Temperaturermittlung zur Laufzeit	10
3 Elektromagnetische Modellierung	15
3.1 Koordinatensysteme	16
3.2 Zeitkontinuierliche Zustandsdifferentialgleichungen	18
3.2.1 Sättigungs- und Kreuzsättigungseffekte	20
3.2.2 Winkelabhängigkeit des verketteten Flusses	23
3.2.3 Drehzahlabhängigkeit des verketteten Flusses	25
3.3 Zeitliche Diskretisierung	28
3.3.1 Explizite Euler Diskretisierung in statorfesten Koordinaten	32
3.3.2 Berücksichtigung der Sättigungs- und Kreuzsättigungseffekte	34
3.4 Verlustleistungsmodellierung	38
3.4.1 Stromwärmeverluste	39
3.4.2 Eisenverluste	42
3.4.3 Mechanische Verluste	48
4 Feldorientierte Regelung und Arbeitspunktsteuerung	51
4.1 Stromregelung	52
4.2 Arbeitspunktsteuerung	55
4.3 Aussteuerungsregler	58
5 Thermische Modellierung	61
5.1 Stand der Technik und Methodenauswahl	62
5.2 Herleitung eines T-Ersatzschaltbilds mit konzentrierten Parametern	65
5.3 White-Box Modellierung eines Prototypenmotors unter Unsicherheiten	76
5.3.1 Wasserkühlmantel	77
5.3.2 Statorrücken	78
5.3.3 Statorwicklung	81
5.3.4 Statorzähne	84

5.3.5	Luftspalt	85
5.3.6	Permanentmagnete	87
5.3.7	Rotoreisenpaket	90
5.3.8	Rotorwelle	91
5.3.9	Kugellager	94
5.3.10	Lagerschild	96
5.3.11	Netzwerksynthese	98
5.3.12	Empirisches Verlustleistungsmodell	100
5.3.13	Zeitliche Diskretisierung	105
5.3.14	Validierung	106
5.4	Light-Grey-Box Modellierung mittels Identifikation unsicherer Parameter	110
5.4.1	Diskussion möglicher Identifikationsansätze für LPV-LPTN-Modelle	110
5.4.2	Definition unsicherer Parameter	113
5.4.3	Identifikationsvorgehen	115
5.4.4	Kreuz-Validierung	116
5.4.5	Vernachlässigung des Lagerschildes und des Kugellagers	121
5.4.6	Berücksichtigung variierender Zwischenkreisspannungen	126
5.5	Dark-Grey-Box Modellierung durch Modelreduktion und neuer Identifikation	129
5.5.1	Globaler Identifikationsansatz	130
5.5.2	Identifikationsergebnis und Kreuz-Validierung	132
5.5.3	Weitergehende Analyse der erzielten Schätzperformanz	137
5.5.4	Berücksichtigung variierender Zwischenkreisspannungen	138
5.5.5	Exkurs: Lokale LPV-Identifizierung	142
6	Ermittlung der Magnettemperatur aus elektrischen Größen	145
6.1	Stand der Technik und Methodenauswahl	146
6.2	Konzept des exakten Flussbeobachters	148
6.3	Identifikationsprozess der Beobachter-Modellparameter	149
6.4	Umrichtermodellierung	151
6.4.1	Parameteridentifikation des Umrichtermodells	154
6.4.2	Aspekte der Implementierung	158
6.4.3	Validierung	160
6.5	Auslegung der Beobachterrückführung	163
6.6	Sensitivitätsanalyse	167
6.7	Untersuchung im aktiven Kurzschluss	172
6.8	Einfluss thermischer Ausdehnungseffekte	177
6.9	Erweiterung für geringe Drehzahlen und Parameteroptimierung	180
6.10	Validierung	182
6.11	Berücksichtigung variierender Zwischenkreisspannungen	184
7	Fusionierung unabhängiger Temperaturinformationen	185
7.1	Gewichteter Mittelwert	186
7.1.1	Statorwicklung	187
7.1.2	Permanentmagnete	188
7.2	Künstliche Neuronale Netzwerke	189
7.3	Kalman-Filter	193
7.3.1	Stand der Technik	197
7.3.2	Formelle Analyse des LPTN und des Beobachterentwurfs	198
	Beobachtbarkeit und Erreichbarkeit des LPTN	199
	Stabilität des LPTN	201
	Stabilität des Beobachterkreises	203

7.3.3	Umgang mit farbigen Rauschprozessen	205
	Farbiges Systemrauschen	205
	Farbiges Messrauschen	206
	Bewertung der Formfilter	206
7.3.4	Analytische Auslegung unter idealisierten Annahmen	207
7.3.5	Optimierte Auslegung des dynamischen KF	209
7.3.6	Optimierte Auslegung des stationären KF	214
7.3.7	Alternative: Robustes Kalman-Filter und H_∞ -Filter	219
8	Maximierung der thermischen Ausnutzung zur Laufzeit (Derating)	223
8.1	Stand der Technik	224
8.2	Fahrzeug- und Streckenmodell	225
8.3	Lösungsmethoden für Optimalsteuer- und modellprädiktive Regelungsprobleme	229
8.4	Modellprädiktives Derating	232
8.5	Konventioneller Derating-Ansatz	238
9	Fazit und Ausblick	243
9.1	Fazit	243
9.2	Ausblick	245
	Literaturverzeichnis	247
	Eigene Veröffentlichungen	267
A	Validierungsplattform	269
A.1	Prüfstands Aufbau	269
A.2	Prototypenmotor	272
B	Einige systemtheoretische Grundlagen	275
B.1	Identifizierbarkeit	275
	B.1.1 Strukturelle Identifizierbarkeit	275
	B.1.2 Identifizierbarkeit als Konvergenzkriterium	277
B.2	Kostenfunktionen für die Parameteridentifikation	277
B.3	Validierung	280
C	Grundlagen der Partikelschwarmoptimierung	285
C.1	Grundidee	287
C.2	Nachbarschaften	289
C.3	Exploration vs. Konvergenz	291
C.4	Lokale Optimierung	292
D	Trainingsdaten für globale Identifikationsprozesse	295