

Jörn Adermann

**Reichweitenprädiktion von
Elektrofahrzeugen unter
Berücksichtigung der
Batteriedegradation**

Technische Universität München

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

**Reichweitenprädiktion von Elektrofahrzeugen unter
Berücksichtigung der Batteriedegradation**

Jörn Adermann, M. Sc.

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

2. Prof. Dr. rer. nat. Martin Leucker

Die Dissertation wurde am 27.06.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 28.01.2020 angenommen.

Berichte aus der Fahrzeugtechnik

Jörn Adermann

**Reichweitenprädiktion von Elektrofahrzeugen
unter Berücksichtigung der Batteriedegradation**

Shaker Verlag
Düren 2020

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, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7312-6

ISSN 0945-0742

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 • E-Mail: info@shaker.de

*“Debugging is twice as hard as writing the code in the first place.
Therefore, if you write the code as cleverly as possible, you are, by
definition, not smart enough to debug it.”*

Brian Kernighan

Vorwort

Diese Dissertation fertigte ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität München zwischen 2014 und 2018 an.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Professor Markus Lienkamp für die Betreuung dieser Arbeit. Ebenfalls bedanke ich mich bei Professor Martin Leucker für die Zweitprüfung und bei Professor Johannes Fottner für den Prüfungsvorsitz. Zusätzlich bedanke ich mich bei meinem Vorgesetzten Alexander Kober der es ermöglicht hat, dass ich mein gelerntes Wissen nun in der Industrie einsetzen kann.

Bei meinen Kollegen des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der TUM bedanke ich mich für den fachlichen Input in den Kolloquien und Diskussionen. Für das Korrekturlesen bedanke ich mich bei Katharina Minnerup, Nikolaos Wassiliadis und Philip Wacker. Bei Ferdinand Schockenhoff bedanke ich mich für die formelle Überarbeitung des Dokuments. Des Weiteren bedanke ich mich bei Philip Wacker für die sehr gute Zusammenarbeit in den Forschungsprojekten.

Ich bedanke mich bei allen Studenten, die mit ihren Arbeiten einen wichtigen Teil zu meiner Dissertation beigetragen haben. Besonders hervorheben möchte ich die Arbeiten von Nikolaos Wassiliadis, Christian Hildenbrand und Benedikt Klenk.

Die Forschungsprojekte, in denen diese Dissertation zum großen Teil entstanden sind, wurden von der Bayerischen Forschungstiftung finanziert.

Ein Weiterer Dank gilt meinen Kollegen Manuel Huiber, Philipp Nau, Sebastian Korn und Oliver Bochtler. Mein besonderer Dank gilt meiner Familie und meiner Ehefrau Bilen für den Rückhalt und Unterstützung während meiner Arbeit.

München, im Mai 2019

Jörn Adermann

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
Formelzeichen	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	3
1.2 Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Wissenschaft.....	7
2.1 Physikalische Grundlagen und Nomenklatur von Lithium-Ionen-Zellen	9
2.1.1 Einsatz und Überwachung von Lithium-Ionen-Zellen im Automobil	9
2.1.2 Funktionsweise von Lithium-Ionen-Zellen.....	10
2.1.3 Nomenklatur.....	11
2.2 Degradation und Alterung von Lithium-Ionen-Zellen.....	19
2.2.1 Kalendarische Alterung	19
2.2.2 Zyklische Alterung.....	20
2.2.3 Degradationseffekte	21
2.2.4 Alterungsabhängigkeit der Ruhespannungskennlinie	23
2.3 Modellbildung und Simulation	24
2.3.1 Energiebetrachtung auf Basis der Peukert-Gleichung	25
2.3.2 Mehrdimensionale physikalisch-chemische Modelle	25
2.3.3 Mathematische Black-Box-Modelle	26
2.3.4 Elektrische Ersatzschaltkreismodelle	26
2.3.5 Zustandsraumdarstellung auf Basis des RC-Modells 2. Ordnung.....	27
2.3.6 Bewertung der Modellansätze	30
2.4 Methoden zur Ladezustandsbestimmung.....	31
2.4.1 Ladungsbilanzierung	31
2.4.2 Auswertung der inversen Ruhespannungskennlinie	32
2.4.3 Kalmanfilter mit Ausgangslinearisierung.....	33
2.4.4 Sigma-Punkt Kalman Filter.....	36
2.4.5 Datenbasierte Methoden	38
2.4.6 Bewertung der Methoden zur Ladezustandsbestimmung	39
2.5 Methoden zur Bestimmung des Degradationszustands	39

2.5.1	Zyklenzähler zur Berechnung der nutzbaren Kapazität	40
2.5.2	Duales Erweitertes Kalman-Filter zur Parameterbeobachtung	41
2.5.3	Recursive Least Square – Methode zur Kapazitätsschätzung	43
2.5.4	Bewertung der Methoden zur Schätzung der Degradation	44
2.6	Energieprädiktion eines Elektrofahrzeugs.....	44
3	Voruntersuchungen und Kritik am Stand der Wissenschaft.....	47
3.1	Implementierung und Validierung eines Extended Kalman-Filters	47
3.1.1	Beobachtbarkeit	47
3.1.2	Testumgebung	49
3.1.3	Konvergenz.....	50
3.1.4	Rechenleistung und Bus-Auslastung.....	51
3.2	Implementierung eines dualen Kalman-Filters zur Parameterschätzung	52
3.2.1	Linearisierung im Arbeitspunkt und Initialisierung des Filters.....	53
3.2.2	Beobachtbarkeit der Systemparameter	54
3.2.3	Simulationsumgebung und Konvergenzanalyse des dualen Kalman-Filters	54
3.3	Kritik am Stand der Wissenschaft	57
3.4	Konzept „Commuters‘ cycle monitoring“	58
3.4.1	Degradationsindikatoren	59
3.4.2	Berechnung der nutzbaren Kapazität	61
3.4.3	Berechnung des Innenwiderstands	61
4	Vorgehen	63
4.1	Versuchsfahrzeug NEMO-Smart	64
4.2	Prüfstandsversuche zur Quantifizierung der Degradationseinflüsse	66
4.3	Serienfahrzeug VW eGolf	67
4.4	Längsdynamikmodell zur Simulation von einzelnen Fahrzyklen	70
4.4.1	Anforderungen	71
4.4.2	Modellierungsansatz	71
4.4.3	Komponenten des Längsdynamikmodells	72
4.4.4	Modellierung und Simulation der Traktionsbatterie.....	74
4.4.5	Modell und Simulation der Sensorik	74
4.5	Gesamtfahrzeugmodell zur Lebenszyklus-Simulation.....	75
4.5.1	Nutzerszenario	76
4.5.2	Degradation der Traktionsbatterie	78
5	Implementierung des Commuters‘ cycle monitoring.....	81
5.1	Schematischer Ablauf	81
5.2	Ähnlichkeitsanalyse der Referenzfahrten	82

5.3	Kapazitätsbestimmung und Aktualisierung des Filtermodells.....	85
5.4	Prämisse und Einschränkung der Methodik.....	86
5.5	Einsatz in Serienanwendungen	87
6	Ergebnisse und Diskussion.....	91
6.1	Simulationsergebnisse zur Schätzung der Kapazität	91
6.2	Betrachtung der Ladezustands- und Degradationsschätzung.....	96
6.3	Prüfstandsversuche zur Validierung des Commuters' cycle monitoring	98
6.4	Fahrversuche zur Ähnlichkeitsanalyse von Referenzfahrten.....	100
7	Zusammenfassung und Ausblick	103
	Abbildungsverzeichnis	i
	Tabellenverzeichnis	v
	Literaturverzeichnis	vii
	Vorveröffentlichungsliste	xxiii
	Anhang.....	xxvii
	Anhang-A Vergleich BEV Serienmodelle	xxviii
	Anhang-B Fahrprofile	xxxii
	Anhang-C Einfluss Degradation auf SOC-Schätzung	xxxiii
	Anhang-D Einfluss der Degradation – hohe Stabilität.....	xxxiv
	Anhang-E Einfluss der Degradation – schnelle Konvergenz.....	xxxv
	Anhang-F Berechnung der Jacobi-Matrix.....	xxxvi
	Anhang-G Parametersatz des 2-RC Modells	xxxviii
	Anhang-H Einfluss der Degradation auf R_i -Schätzung	xxxix
	Anhang-I Einfluss der Degradation auf C_n -Schätzung.....	xl
	Anhang-J Optimierte Parametersätze zur Initialisierung des DEKF	xli
	Anhang-K Einfluss der Degradation auf SOC-Schätzung.....	xlii
	Anhang-L Einfluss der Degradation auf die Parameterschätzung.....	xliii
	Anhang-M Längsdynamikmodell.....	xliv
	Anhang-N Parameter des Forschungsfahrzeugs.....	xlv
	Anhang-O Fahrtstrecke der Pendlerfahrten	xlvi
	Anhang-P Parameter des Alterungsmodells.....	xlvii
	Anhang-Q Parametrierung der Fahrzyklen.....	xlviii
	Anhang-R Ergebnisse der Ladezustandsschätzung	xliv
	Anhang-S Kennwerte der Längsdynamik	li

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (engl. Alternating current)
BBB	Beagle Bone Black (Produktname)
BEV	Kfz mit Elektromotor und Batterie (engl. Battery electric vehicle)
BMS	Überwachungselektronik der Batterie (engl. Battery Management System)
BOL	Zustand einer Batteriezelle nach Produktion (engl. Begin of Life)
CAN	Controller Area Network
CC	Konstanter Ladestrom (engl. Constant Current)
CCM	Überwachung von Pendlerfahrten (engl. Commuters' cycle monitoring)
CDKF	Central Difference Kalman-Filter
CKF	Cubature Kalman-Filter
CV	Konstante Ladespannung (engl. Constant Voltage)
DC	Gleichstrom (engl. Direct current)
DEKF	Duales Erweitertes Kalman-Filter
DOD	Entladetiefe (engl. Depth of Discharge)
DP	Duale Polarisierung
ECM	Ersatzschaltkreis-Modell (engl. Equivalent Circuit Model)
ECU	Elektronisches Steuergerät (engl. Electronic Control Unit)
EEC	Ersatzschaltkreis-Modell (engl. Electrical Equivalent Circuit)
EIS	Elektrische Impedanzspektroskopie
EKF	Erweitertes Kalman-Filter
EOL	Lebensende einer Batteriezelle (engl. End of Life)
FTM	Fahrzeugtechnik München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
GPS	Globales Positionsbestimmungssystem (engl. Global Positioning System)
HEV	Kfz mit Elektromotor, Batterie und Verbrennungsmotor (engl. Hybrid electric vehicle)
HIL	Hardwaretest in geschlossenem Regelkreis (engl. Hardware in the Loop)
HV	Hochvolt
ICEV	Kfz mit Verbrennungsmotor (engl. Internal Combustion Engine Vehicle)
ISO	Internationale Organisation für Normung
KF	Kalman-Filter
Kfz	Kraftfahrzeug
LCO	Lithium-Kobalt-Oxid
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LGS	Lineares Gleichungssystem
LHM	Notfallzustand (engl. Limp Home Mode)
LIZ	Lithium-Ionen-Zelle
LMO	Lithium-Manganoxid
LUT	Umsetzungstabelle (engl. Look up Table)
MCU	Motorsteuergerät (engl. Motor control unit)
MMS	Module Management System
NCA	Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus

NEmo	Nutzerorientierte Elektromobilität
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid
OBD	Onboard Diagnose
OCV	Spannung im unbelasteten Zustand (engl. Open Circuit Voltage)
ÖPV	Öffentlicher Nahverkehr
PDC	Datencontainer für die Bestimmung der Parameter (engl. Parameter Determination Container)
PF	Partikel Filter
PNGV	Engl. Partnership for a New Generation of Vehicles
RMSE	Mittlerer quadratische Fehler (engl. root-mean-square error)
SEI	Passivierungsschicht (engl. Solid Electrolyte Interphase)
SOA	Sicheres Betriebsfenster (engl. Safe operating area)
SOC	Ladezustand (engl. State of Charge)
SOH	Gesundheitszustand (engl. State of Health)
SPI	Serial Peripheral Interface Bus
SPKF	Sigma-Punkt Kalman-Filter
UKF	Unscented Kalman-Filter
VCU	Steuergerät für die Fahrzeugeigenschaften (engl. Vehicle Control Unit)
WLTP	weltweit einheitliches Leichtfahrzeuge-Testverfahren (engl. Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure)
ZRD	Zustandsraumdarstellung

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
\hat{A}_k	-	Jacobi-Matrix der Systemmatrix
\hat{C}_k	-	Jacobi-Matrix der Messmatrix
\bar{E}_{Trip}		Für einen Fahrzyklus benötigte Energiemenge
C_0	Ah	Kapazität nach der Produktion einer Batteriezelle
C_N	Wh, Ah	Nennkapazität
C_p	Wh, Ah	Nutzbare Kapazität
E_{Aux}	Wh	Benötigte Energie der Nebenverbraucher
E_{Bat}	Ah	Gespeicherte Energiemenge einer Batterie
E_{Loss}	Wh	Verluste
E_N	Wh	Entnehmbare Energiemenge
E_{PT}	Wh	Benötigte Energie des Antriebsstrangs
K_+, K_-	-	Kapazität der Aktivmaterialien
P_k	-	Zustandskovarianz-Matrix
Q_e	Ah	Bereits entnommene Ladungsmenge
Q_{loss}	%	Kapazitätsverlust cal: aufgrund kalendarischer Degradation cyc: aufgrund zyklischer Degradation
R_{inc}	%	Erhöhung des Innenwiderstands
R_i	Ω	Innenwiderstand einer Batteriezelle bzw. eines Batteriesystems
U_{kl}	V	Klemmspannung
U_N	V	Nennspannung
U_{OCV}	V	Spannung im unbelasteten Fall einer Batteriezelle
U_{RC}	V	Spannungsabfall über einem RC-Glied
c^T	-	Messvektor
x_k	-	Zeitdiskreter Zustandsvektor
\mathbf{x}_k	-	Sigma-Punkt-Vektor
$[\beta_0, \beta_1]$	-	Unsicherheitsfaktoren
CM		Canberra-Metrik
A	-	System bzw. Zustandsübergangsmatrix
C	Ah, Wh	Kapazität einer Batteriezelle
E	Ah	Spezifische Energie
SOC	%	Ladezustand einer Batterie
SOH	%	Gesundheitszustand einer Batterie
b	-	Eingangsgewichtungsvektor
d	-	Durchgriffsvektor
$i(t)$	A	Wechselstrom
t	s	Zeit
u	-	Eingangsvektor einer ZRD
y	-	Ausgangsvektor einer ZRD
\mathcal{O}	-	Landausymbol zur Abschätzung des Rechenaufwands
δ	%	Relativer Fehler

σ	%	Mittlerer SOC während eines Zyklus
η	%	Wirkungsgrad
θ	-	Parametervektor
k	-	Zeitschritt in einem zeitdiskreten Zustandsraums
f	-	Zustandsübergangsfunktion
g	-	Ausgangsgleichung
K	-	Kalmanverstärkung
S_B	-	Beobachtbarkeitsmatrix
β	-	Unsicherheitsfaktor
e_u, e_y	-	Rauschfehler
ξ_u, ξ_y	-	Quantisierungsfehler