
Elektromobilität und Sektorenkopplung

Przemyslaw Komarnicki · Jens Haubrock ·
Zbigniew A. Styczynski

Elektromobilität und Sektorenkopplung

Infrastruktur- und Systemkomponenten

Przemyslaw Komarnicki
Hochschule Magdeburg-Stendal und
Fraunhofer IFF
Magdeburg
Deutschland

Zbigniew A. Styczynski
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Magdeburg
Deutschland

Jens Haubrock
FH Bielefeld
Bielefeld
Deutschland

Die Darstellung von manchen Formeln und Strukturelementen war in einigen elektronischen Ausgaben nicht korrekt, dies ist nun korrigiert. Wir bitten damit verbundene Unannehmlichkeiten zu entschuldigen und danken den Lesern für Hinweise.

ISBN 978-3-662-56248-2 ISBN 978-3-662-56249-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-56249-9>

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-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

*für Aneta, Ann Christin und Maria
die Autoren*

Vorwort

Der **Klimawandel** ist momentan einer der wichtigsten **Treiber** vieler **Innovationen**. Der **Transport** gehört seit Jahren zu den größten „Verschmutzern“ der Umwelt. Die Abwendung von Verbrennungsmotoren und die Entwicklung von alternativen Antrieben, besonders **Elektroantriebe** für Fahrzeuge, können diesen „schlechten Ruf“ wesentlich verbessern und die **Nachhaltigkeit des Transports sichern**. Zusammen mit elektrischen Energiesystemen, die auf regenerativer Erzeugung basieren, und einem breitem Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie für Verkehr und Logistik als kritische Infrastrukturen kann eine solche Lösung es ermöglichen, die europäischen und deutschen **Ziele einer 80 %igen CO₂-Emissionsminderung** bis 2050 zu erreichen.

Das Buch baut auf der vieljährigen Erfahrung der Autoren auf den Gebieten der Elektromobilität und regenerativen elektrischen Energiesysteme auf. In zahlreichen Forschungs- und Anwendungsprojekten haben sich die Autoren mit Technologien und Optimierungsansätzen beschäftigt. Diese Techniken wurden auch im Rahmen von zahlreichen Diplom- sowie Master- und Promotionsarbeiten untersucht. Die dazu konzipierten Vorlesungen sind an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und der Fachhochschule Bielefeld gelesen und kontinuierlich aktualisiert worden. Sie finden stets einen sehr guten Zuspruch bei den Studierenden.

Den **Kern** des Buches bildet die Darstellung einer systematischen, durchgehenden und logischen Kette, die zur breiten Einführung von **Elektromobilität** führen kann. Dies wird im **Kontext** der Bestrebungen zur nachhaltigen Gestaltung aller **kritischen Infrastrukturen** eingebettet. Die Relevanz der richtigen Zuordnung der Technologien zu Anwendungsfällen wird herausgearbeitet, und daraus abgeleitete notwendige Schritte werden technisch und organisatorisch (Normung) betrachtet. Besonderes Augenmerk wird auf die **didaktische Darlegung** des Stoffes gelegt, um diese neue, schwierige und komplexe Problematik „so einfach wie möglich, aber nicht einfacher“¹ vorzustellen.

Im Buch werden vertiefte und wissenschaftlich **fundierte Antworten** auf folgende Fragen gegeben werden: Welche Technologien für die Elektromobilität stehen

¹ nach Einstein

grundsätzlich zur Verfügung? Wie soll der Einsatz von Elektromobilität methodisch für unterschiedliche Funktionen und in unterschiedlichen Bereichen geplant werden? Wie ist die **Wechselwirkung** zwischen kritischen Infrastrukturen wie **Transport, Energie und Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)**? Welche Vorteile ergeben sich aus der Kopplung der o.g. Systeme?

Die Elektromobilität lässt sich nur in einem systemischen Gesamtansatz, gekoppelt an moderne elektrischen Netze, Kommunikations- und Verkehrsinfrastrukturen, wirtschaftlich gestalten. Dieser neuen **Chance für die Elektromobilität** ist [Kap. 1](#) des Buches gewidmet. Die Energiequelle (**Elektrotankstelle**) für die Elektromobilität bildet im Gesamtsystem das **Bindeglied** zum elektrischen Netz, gespeist überwiegend durch regenerative Energieerzeuger. Im Smart Grid stellt die Elektromobilität eine wichtige Flexibilitätsoption für den Netzbetrieb dar.

Um eine systemtechnische Analyse durchführen zu können, wird das Elektrofahrzeug anhand geeigneter Modelle in dieses System eingebettet. Das wird in [Kap. 2](#) durch Beschreibung der **physikalischen Eigenschaften** und der **mathematischen Modellierung** des E-Fahrzeugs dargelegt. Hier werden auch ausgewählte Einzelelemente des E-Kfz detailliert vorgestellt.

In [Kap. 3](#) werden die **elektrischen Komponenten** des E-Kfz genauer beschrieben. Die Konzepte des Bordnetzes, das im E-Kfz neue Aufgaben zu bewältigen hat (u. a. die Verteilung von Antriebsenergie), werden vorgestellt. Die Leistungselektronik, die eine zentrale Rolle für die Steuerung des E-Kfz annimmt, wird präsentiert. Weiter werden die Antriebskonzepte dargestellt, welche die optimale Verteilung der Zugkräfte zum Ziel haben. Schließlich wird der elektrische Energiespeicher – der Tank des E-Kfz – beschrieben. Hierfür werden die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Speichertechnologien zusammen- und gegenübergestellt.

Das E-Kfz-System verlangt neue technische **Richtlinien und Standards**, weil es als erste Technologie infrastrukturübergreifend agiert (elektrisches Netz, Verkehr). An diese wird der Leser in [Kap. 4](#) herangeführt. Da die Normung noch nicht vollständig abgeschlossen ist, werden ausgehend vom aktuellen Stand der Richtlinien auch die sich abzeichnenden Tendenzen in diesem Bereich skizziert.

In [Kap. 5](#) wird zum Schluss die **Elektromobilität** als Teilsystem des Verkehrs und des Elektroenergiesystems gleichzeitig beschrieben. Diese systemtechnische, einheitliche Darstellung bildet die Grundlage für eine wirtschaftliche und sichere Nutzung der Elektromobilität, besonders in der Zukunft. So werden auch wichtige Geschäftsmodelle und Konzepte wie **Vehicle-to-Grid** vertieft untersucht und die Chance für eine Umsetzung der Elektromobilität in dieser Form aufgezeigt.

Diese **Basisinformationen** werden durch zahlreiche **Beispiele** und **Lösungsansätze** aus dem Bereich der Energieversorgung illustriert. Somit trägt das Buch wesentlich zum **praktischen Verständnis** der Anwendung von Elektromobilität bei.

Das Buch ist an alle Leser adressiert, die sich für Elektromobilität, im Besonderen für deren Anwendung in Zusammenspiel mit Smart Grid, interessieren. **Verkehrsplanungs- und Logistikingenieure, Wissenschaftler**, die auf dem Gebiet forschen, aber auch und

vor allem **Studierende der Elektrotechnik** werden in diesem Buch viele brauchbare Informationen und Tipps finden.

Die Autoren bedanken sich bei vielen **Projektpartnern**, besonders aus den Leuchtturmprojekten (RegModHarz (Förderprogram E-Energy) und **Harz.EE-Mobility (Förderprogramm IKT für Elektromobilität)**), bei Mitarbeitern, Studierenden sowie Doktorandinnen und Doktoranden, die durch ihre Arbeiten und Ergebnisse zu der endgültigen Form dieses Buches beigetragen haben. Zunächst gilt unser Dank Herren Prof. Dr. Gerhard Müller und Dipl.-Ing. Michael Kranhold für die zündende Inspiration und kräftige Unterstützung bei der Umsetzung von vielen Projekten aus dem Bereich Elektromobilität. Wir bedanken uns sehr bei Frau Livia Fuchs und Herrn Dr. Roland Bauer von 50Hertz Transmission GmbH, Herren Thomas Schäfer und Jens Oberländer von Stromnetz Berlin GmbH und Herrn Prof. Seddik Bacha von der Universität Grenoble für die Bereitstellung von passenden Beispielen. Besonderer Dank gilt Herr Dr.-Ing. Christoph Wenge, M. Sc. Stefan Balischewski, Prof. Dr.-Ing Fabian Behrendt, M. Sc. Tom Assmann, M. Eng. Michael Kelker, M. Eng. Felix Annen und für ihre zielführende inhaltlichen Beiträge und Expertise sowie Frau Tatjana Strasser und Frau Elise Diestelhorst für die sorgfältige redaktionelle Bearbeitung des Manuskripts, und Frau B. Sc. Polina Sokolnikova für die gelungene grafische Gestaltung des Buches.

Dem Springer Verlag, und hier besonders Frau Eva Hestermann-Beyerle, Herrn Michael Kottusch und Frau Kollmar-Thoni, gilt der Dank der Autoren für die Initiative, Diskussion und die Übernahme dieses Buches ins Portfolio des Verlags.

Bei der Leitung des Fraunhofer-Instituts für Fabrikbetrieb und -automatisierung in Magdeburg und bei der Geschäftsführung der Firma 50Hertz Transmission GmbH aus Berlin bedanken sich die Autoren für das Interesse an der Arbeit und für die finanzielle Unterstützung bei der redaktionellen Bearbeitung des Buches.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Elektromobilität – Kritische Infrastrukturen und Sektorenkopplung	1
1.1	Kritische Infrastrukturen im 21. Jahrhundert	1
1.1.1	Definition und Überblick	1
1.1.2	Transport und Verkehr	3
1.1.3	Energieversorgung	5
1.1.4	Informations- und Kommunikationstechnologien	7
1.2	Energie zur Sicherung der kritischen Infrastrukturen	8
1.2.1	Elektrische Energie – Anführer des Fortschritts	8
1.2.2	Energieverbrauch im Verkehr- und Transportsektor	15
1.3	Geschichte des Verkehrs	15
1.3.1	Elektroauto	15
1.3.2	Fahrzeug als Verkehrsmittel	17
1.4	Neue Herausforderungen für Elektromobilität	19
1.4.1	Erneuerbare Energien und Smart Grid in der Zukunft	19
1.4.2	Flexibilitätsoptionen des Smart Grid	26
1.4.3	Verkehrssektor im Wandel	30
1.5	Sektorenkopplung	31
	Literatur	35
2	Physikalisch-technische Beschreibung des E-Kraftfahrzeugs	39
2.1	Einführung	39
2.2	Aufbau von Elektrofahrzeugen	40
2.2.1	Antrieb und Antriebsstrang	40
2.2.2	Energiespeicher	42
2.3	Leistungsbedarf des Fahrzeugs	45
2.3.1	Grundlagen	45
2.3.2	Energiewandlungskette im konventionellen Fahrzeug	46
2.3.3	Energiewandlungskette im Elektrofahrzeug	48
2.3.4	Energiewandlungskette im Brennstoffzellenauto	49
2.4	Leistungsberechnung	49

2.5	Fahrenergiebedarf	51
2.6	Nebenverbraucher	53
2.6.1	Einleitung	53
2.6.2	Niederspannungsverbraucher	53
2.6.3	Hochspannungsverbraucher	55
2.6.4	Fahrsituationen	57
2.6.5	Leistungsbedarf der Nebenaggregate	58
	Literatur	60
3	Elektrische Komponenten des E-Kfz	61
3.1	Einführung	61
3.2	Ladetechnik	63
3.3	Design	65
3.4	Leistungselektronik im E-Kraftfahrzeug	66
3.4.1	Halbleiter	66
3.4.2	Leistungsdioden	67
3.4.3	Thyristoren	68
3.4.4	Transistoren	70
3.5	Grundsaltungen	71
3.5.1	Anleitung	71
3.5.2	Wechsel- und Drehstromsteller	72
3.5.3	Gleichstromsteller (Chopper)	74
3.5.4	Gleichrichter	76
3.5.5	Wechselrichter	79
3.5.6	Umrichter	82
3.6	Antriebssysteme im E-Kraftfahrzeug	82
3.6.1	Anleitung	82
3.6.2	Gleichstrommaschinen	85
3.6.3	Asynchronmaschinen	86
3.6.4	Synchronmaschinen	89
3.6.5	Zusammenfassung	90
3.7	Antrieb im Elektrofahrzeug/BLDC-Motor	91
3.7.1	Wirkungsgrad und Aufbau	91
3.7.2	Drehzahl-Drehmoment-Verhalten	92
3.8	Batteriesysteme	94
3.8.1	Lithium-Ionen-Zellen	94
3.8.2	Ladung und Kapazität	97
3.8.3	Alterung von Lithium-Ionen-Batterien	98
3.9	Brennstoffzellensysteme	99
3.9.1	Grundlagen	99
3.9.2	Leerlaufspannung der PEM-Brennstoffzelle	102
3.9.3	Reversible Zellspannung	102

3.9.4	Temperaturabhängigkeit der Leerlaufspannung	103
3.9.5	Druckabhängigkeit der Leerlaufspannung.....	104
3.9.6	Nernst-Gleichung.....	105
3.10	Brennstoffzellensysteme im Elektrofahrzeug	106
3.11	Wasserstoffspeicher im Elektrofahrzeug	107
	Literatur.....	108
4	Standards und Rahmenbedingungen	111
4.1	Technische Richtlinien – Einführung und Hintergrund.....	111
4.2	Normungsrelevante Komponenten und technische Einrichtungen in der Elektromobilität.....	115
4.2.1	Übersicht und Normungsarbeit	115
4.2.2	Komponenten im Fahrzeug	116
4.2.3	Komponenten der Ladeinfrastruktur	121
4.2.4	Anforderung an die Netzanbindung.....	131
	Literatur.....	134
5	Elektromobilität als technisches System.....	137
5.1	Einführung.....	137
5.2	Elektromobilität als Teil des Elektroenergieversorgungssystems	139
5.2.1	Allgemeine Bemerkungen.....	139
5.2.2	Ladeinfrastruktur und Elektrofahrzeuge	146
5.2.3	Informations- und Kommunikationstechnik als notwendiges Bindeglied von Sektoren und Komponenten	149
5.3	Elektromobilität als Teilelement des Verkehrssystems	160
5.3.1	Grundlagen des Verkehrssystems.....	160
5.3.2	Verortung der Elektromobilität im Verkehrssystem.....	162
5.3.3	Verkehrsinfrastruktur.....	168
5.3.4	Verkehr in Deutschland	169
5.3.5	Nutzergruppen der Elektromobilität	172
5.3.6	Planungsinstrumente zur Förderung der Elektromobilität und Ladeinfrastruktur	175
5.3.7	Verkehrliche Wirkungen von E-Mobilität	178
5.4	Geschäftsmodelle für Elektromobilitätsbranche	180
5.5	Umsetzung des Gesamtsystems.....	183
5.5.1	Gesamtarchitektur und Anforderungen	185
5.5.2	Hardware- und Softwarekomponenten für die Systemumsetzung	192
	Literatur.....	208
	Sachverzeichnis.....	213

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current (Wechselstrom)
ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
ACSI	Abstract Communication Services Interface
AK	Arbeitskreis
AR	Anwendungsrichtlinie
BEV	Battery Electric Vehivle
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIP	Bruttoinlandprodukt
BSC	Baseband Serial Communication
BSD	Battery Service Disconnect
CAN	Controller Area Network
CCS	Combined Charging System
CEE	Commission on the Rules for the Approval of the Electrical Equipment
CEN	Comité Européen de Normalisation
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CHAdEMO	CHArge de Move
CIM	Common Information Model
CP	Control Pilot
DEKRA	Deutscher Kraftfahrzeug-Überwachungs-Verein
DC	Direct Current (Gleichstrom)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
EIA	Energy Information Administration
E-Kfz	Elektrokraftfahrzeug
Elek.	Elektrisch
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EN	Europäische Norm
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU	European Union

EV	Electric Vehicle
EVCC	Electric Vehicle Charging Controller
FC	Fuel Cell
GAK	Gemeinschaftsarbeitskreis
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
GPS	Global Positioning System
GOOSE	Generic Object Oriented Substation Events
GTO	Gate Turn Off
HLC	High Level Communication
HV-	Hochvolt-
ICCB	In-Cable Control-Box
IC-CPD	In-Cable Control and Protection
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization
ITU	International Telecommunication Union
JTC	Joint Technical Committee
JWG	Joint Working Group
KEP	Kurier-Express-Pakete
KKW	Kernkraftwerke
LD	Logical Devices
LKW	Lastkraftwagen
MCLP	Maximal Coverage Location Problem
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
NAAutomobil	DIN-Normenausschuss Automobiltechnik
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
OSI	Open System Interconnection
ÖV	Öffentlicher Verkehr
ÖPNV	Öffentlicher Personalnahverkehr
PE	Protective Earth (Schutzleiter)
PEM	Proton Exchange Membrane
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PKW	Personenkraftwagen
PLC	Power Line Communication
PTC	Positive Temperature Coefficient
PP	Proximity Pin oder Plug Present
PV-Anlage	Photovoltaikanlage

PWM	Pulsweitenmodulation
Schuko	Schutzkontakt
SECC	Supply Equipment Charging Controller
TAB	Technische Anschlussbedingungen
TC	Technical Committee
TCP	Transmission Control Protocol
UCTE	Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity
UDP	User Datagram Protocol
UML	Unified Modeling Language
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
WLAN	Wireless Local Area Network
WSC	World Standard Co-operation