

Przemyslaw Komarnicki  
Jens Haubrock  
Zbigniew A. Styczynski

# Elektromobilität und Sektorenkopplung

Infrastruktur- und Systemkomponenten

*2. Auflage*

**EBOOK INSIDE**



Springer Vieweg

---

# Elektromobilität und Sektorenkopplung

---

Przemyslaw Komarnicki · Jens Haubrock ·  
Zbigniew A. Styczynski

# Elektromobilität und Sektorenkopplung

Infrastruktur- und Systemkomponenten

2., erweiterte und überarbeitete Auflage

Przemyslaw Komarnicki  
Hochschule Magdeburg-Stendal und  
Fraunhofer IFF  
Magdeburg, Deutschland

Jens Haubrock  
FH Bielefeld  
Bielefeld, Deutschland

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

ISBN 978-3-662-62035-9      ISBN 978-3-662-62036-6 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-62036-6>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018, 2020

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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.

Planung/Lektorat: Dr. Daniel Fröhlich

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 CO<sub>2</sub>-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, der Hochschule Magdeburg-Stendal 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“ <sup>1</sup> vorzustellen.

---

<sup>1</sup>nach Einstein.

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

In Kap. 6, um welches die zweite Auflage des Buches ergänzt wurde, werden die Konzepte des automatisierten Fahrens vorgestellt. Das automatisierte Fahren, das sich in 5 Stufen unterteilen lässt, wird immer öfter in E-Fahrzeugen zum Einsatz kommen und

schließlich ab 2035 in die Stufe 5, das autonome Fahren übergehen. Damit wird es noch einfacher sein E-Fahrzeuge in die Funktionalitäten der Sektorenkopplung anzubinden.

In diesem Kapitel werden die Grundinformationen zum autonomen Fahren, wie notwendige sensorische Ausstattung, Kommunikationskonzepte in und um das Fahrzeug und die Grundlagen der Interaktion zwischen Verkehrsteilnehmern mittels sicherer Protokolle vermittelt.

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 (Förderprogramm 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.-Ing. 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, Dr.-Ing. Stephan Balischewski, Prof. Dr.-Ing Fabian Behrendt 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 M. 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 der beiden Auflagen des Buches.

Die Bedeutung der Sektorenkopplung und damit auch die Rahmenbedingungen für Elektromobilität haben sich in den letzten 3 Jahren wesentlich verändert. Neue Impulse sind nicht zuletzt durch die Pläne der Europäischen Union, dem s.g. Green Deal aus dem Jahre 2019 und auch durch direkte Auswirkungen die Corona-Krise (2020), entstanden.

Die zweite Buchauflage beinhaltet daher aktualisierte Hintergrundinformationen und wurde durch ein weiteres Kapitel zum Thema autonomes Fahren ergänzt.

Dem Springer Verlag danken wir für die Initiative, die von Herrn Dr. Daniel Fröhlich ausging. Mit neuen Informationen für die zweite Auflage hat uns diesmal Herr Dipl.-Ing. Michael Kranhold von der Fa. 50Hertz Transmission GmbH versorgt und grafisch wurde die Auflage in bewehrter Form von Frau M. Sc. Polina Sokolnikova unterstützt.

Magdeburg, Deutschland  
Bielefeld, Deutschland  
Magdeburg, Deutschland  
im Herbst 2020

Przemyslaw Komarnicki  
Jens Haubrock  
Zbigniew A. Styczynski

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung in die Elektromobilität – Kritische Infrastrukturen und Sektorenkopplung</b> .....	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 .....	6
1.1.4 Informations- und Kommunikationstechnologien .....	7
1.2 Energie zur Sicherung der kritischen Infrastrukturen .....	9
1.2.1 Elektrische Energie – Anführer des Fortschritts .....	9
1.2.2 Energieverbrauch im Verkehr- und Transportsektor .....	14
1.2.3 Energieverbrauch und New Economy .....	16
1.3 Geschichte des Verkehrs .....	18
1.3.1 Elektroauto .....	18
1.3.2 Fahrzeug als Verkehrsmittel .....	19
1.4 Neue Herausforderungen für Elektromobilität .....	22
1.4.1 Erneuerbare Energien und Smart Grid in der Zukunft .....	22
1.4.2 Flexibilitätsoptionen des Smart Grid .....	28
1.4.3 Verkehrssektor im Wandel .....	32
1.5 Sektorenkopplung .....	34
Literatur .....	39
<b>2 Physikalisch-technische Beschreibung des E-Kraftfahrzeugs</b> .....	43
2.1 Einführung .....	43
2.2 Aufbau von Elektrofahrzeugen .....	45
2.2.1 Antrieb und Antriebsstrang .....	45
2.2.2 Energiespeicher .....	47

2.3	Leistungsbedarf des Fahrzeugs	49
2.3.1	Grundlagen	49
2.3.2	Energiewandlungskette im konventionellen Fahrzeug	51
2.3.3	Energiewandlungskette im Elektrofahrzeug	52
2.3.4	Energiewandlungskette im Brennstoffzellenauto	53
2.4	Leistungsberechnung	53
2.5	Fahrenergiebedarf	55
2.6	Nebenverbraucher	57
2.6.1	Einleitung	57
2.6.2	Niederspannungsverbraucher	58
2.6.3	Hochspannungsverbraucher	59
2.6.4	Fahrsituationen	62
2.6.5	Leistungsbedarf der Nebenaggregate	63
	Literatur	65
<b>3</b>	<b>Elektrische Komponenten des E-Kfz</b>	<b>67</b>
3.1	Einführung	67
3.2	Ladetechnik	69
3.3	Design	71
3.4	Leistungselektronik im E-Kraftfahrzeug	72
3.4.1	Halbleiter	72
3.4.2	Leistungsdioden	74
3.4.3	Thyristoren	74
3.4.4	Transistoren	76
3.5	Grundsaltungen	78
3.5.1	Anleitung	78
3.5.2	Wechsel- und Drehstromsteller	78
3.5.3	Gleichstromsteller (Chopper)	81
3.5.4	Gleichrichter	82
3.5.5	Wechselrichter	86
3.5.6	Umrichter	89
3.6	Antriebssysteme im E-Kraftfahrzeug	90
3.6.1	Anleitung	90
3.6.2	Gleichstrommaschinen	91
3.6.3	Asynchronmaschinen	92
3.6.4	Synchronmaschinen	95
3.6.5	Zusammenfassung	96
3.7	Antrieb im Elektrofahrzeug/BLDC-Motor	97
3.7.1	Wirkungsgrad und Aufbau	97
3.7.2	Drehzahl-Drehmoment-Verhalten	99

3.8	Batteriesysteme .....	100
3.8.1	Lithium-Ionen-Zellen .....	100
3.8.2	Ladung und Kapazität .....	104
3.8.3	Alterung von Lithium-Ionen-Batterien .....	105
3.9	Brennstoffzellensysteme .....	106
3.9.1	Grundlagen .....	106
3.9.2	Leerlaufspannung der PEM-Brennstoffzelle .....	108
3.9.3	Reversible Zellspannung .....	109
3.9.4	Temperaturabhängigkeit der Leerlaufspannung .....	109
3.9.5	Druckabhängigkeit der Leerlaufspannung .....	110
3.9.6	Nernst-Gleichung .....	111
3.10	Brennstoffzellensysteme im Elektrofahrzeug .....	112
3.11	Wasserstoffspeicher im Elektrofahrzeug .....	114
	Literatur .....	115
<b>4</b>	<b>Standards und Rahmenbedingungen .....</b>	<b>117</b>
4.1	Technische Richtlinien – Einführung und Hintergrund .....	117
4.2	Normungsrelevante Komponenten und technische Einrichtungen in der Elektromobilität .....	121
4.2.1	Übersicht und Normungsarbeit .....	121
4.2.2	Komponenten im Fahrzeug .....	122
4.2.3	Komponenten der Ladeinfrastruktur .....	127
4.2.4	Anforderung an die Netzanbindung .....	137
	Literatur .....	141
<b>5</b>	<b>Elektromobilität als technisches System .....</b>	<b>145</b>
5.1	Einführung .....	145
5.2	Elektromobilität als Teil des Elektroenergieversorgungssystems .....	147
5.2.1	Allgemeine Bemerkungen .....	147
5.2.2	Ladeinfrastruktur und Elektrofahrzeuge .....	155
5.2.3	Informations- und Kommunikationstechnik als notwendiges Bindeglied von Sektoren und Komponenten .....	158
5.3	Elektromobilität als Teilelement des Verkehrssystems .....	167
5.3.1	Grundlagen des Verkehrssystems .....	167
5.3.2	Verortung der Elektromobilität im Verkehrssystem .....	171
5.3.3	Verkehrsinfrastruktur .....	177
5.3.4	Verkehr in Deutschland .....	178
5.3.5	Nutzergruppen der Elektromobilität .....	182
5.3.6	Planungsinstrumente zur Förderung der Elektromobilität und Ladeinfrastruktur .....	185
5.3.7	Verkehrliche Wirkungen von E-Mobilität .....	188

---

5.4	Geschäftsmodelle für Elektromobilitätsbranche . . . . .	190
5.5	Umsetzung des Gesamtsystems . . . . .	193
5.5.1	Gesamtarchitektur und Anforderungen . . . . .	196
5.5.2	Hardware- und Softwarekomponenten für die Systemumsetzung . . . . .	199
	Literatur . . . . .	219
<b>6</b>	<b>Autonomes Fahren . . . . .</b>	<b>223</b>
6.1	Einführung . . . . .	223
6.2	Fahren als Regelungsaufgabe . . . . .	224
6.3	Sensoren und Aktoren des autonomen Fahrzeugs . . . . .	228
6.4	Protokolle und Vernetzung der Fahrzeuge . . . . .	231
6.5	Akzeptanz versus rechtlicher Rahmen . . . . .	233
6.6	Autonomes Fahren und Sektorenkopplung . . . . .	233
	Literatur . . . . .	235
	<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>237</b>

---

## 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
CAM	Cooperative Awareness Messages
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
DC	Direct Current (Gleichstrom)
DEKRA	Deutscher Kraftfahrzeug-Überwachungs-Verein
DENM	Decentralised Environment Notification Message
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
FLOP Sekunde)	Floting Point Operations Per Second (Gleitkommaoperationen pro
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
LIDAR	Light Detection and Ranging
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 Personalmahverkehr
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
RADAR	Radio Detection and Ranging
Schuko	Schutzkontakt
SEA	Internationale Society of Automobile Engineers
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



# Einführung in die Elektromobilität – Kritische Infrastrukturen und Sektorenkopplung

# 1

## 1.1 Kritische Infrastrukturen im 21. Jahrhundert

### 1.1.1 Definition und Überblick

Mit der erheblichen weltweiten Steigerung der Lebensqualität in den letzten Jahren ist auch die Abhängigkeit des Menschen von technischen Infrastrukturen und deren Teilsystemen gestiegen. Während noch vor einigen Jahrzehnten in den Industrieländern die Stromversorgung häufig unterbrochen war, gehört Strom heute zu den zuverlässigsten Energiequellen. Er versorgt in Deutschland mehr als 80 Mio. Menschen kontinuierlich mit Energie, wobei eine mittlere Jahresunterbrechung von etwa 12 min [1] für das Gesamtsystem zu nennen ist. Heute ist es im täglichen Leben nicht mehr denkbar, dass wir ohne Strom auskommen. Deswegen zählt die elektrische Energieversorgung zu den sog. kritischen Infrastrukturen. Das Gleiche gilt auch für Transport und Verkehr, die in der heutigen globalisierten Welt unabdingbar sind.

Grundsätzlich sind kritische Infrastrukturen (KRITIS) Organisationen oder Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden (s. Abb. 1.1) [2].

Neben den Sektoren Energie und Transport/Verkehr zählen auch Informationstechnik und Telekommunikation sowie die Wasserversorgung zu den überlebensnotwendigen technischen Basisinfrastrukturen. Eine Übersicht über alle Sektoren und Branchen kritischer Infrastrukturen zeigt Tab. 1.1.

Gerade in 2020 wurde uns allen durch die Corona-Krise die Bedeutung von der kritischen Infrastruktur vor Augen geführt. Der Schutz der kritischen Infrastrukturen ist eine wichtige Aufgabe vorsorgender Sicherheitspolitik. Die nationale Strategie zum



**Abb. 1.1** Bedrohung für kritische Infrastrukturen (allgemeine Darstellung)

**Tab. 1.1** Systematik der kritischen Infrastrukturen gemäß Bundesministerium für Inneres [2]

Technische Basisinfrastrukturen	Sozioökonomische Dienstleistungsinfrastrukturen
Energieversorgung (EV)	Gesundheitswesen, Ernährung
Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)	Notfall- und Rettungswesen
Transport und Verkehr (TuV)	Parlament, Regierung, öffentliche Verwaltung, Justizeinrichtungen
(Trink-) Wasserversorgung und Abwasserentsorgung	Finanz- und Versicherungswesen
	Medien und Kulturgüter

Schutz kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie [2]) fasst die Zielvorstellungen und den politisch-strategischen Ansatz des Bundes auf diesem Politikfeld zusammen.

In diesem Buch werden wir uns mit den technischen Infrastrukturen beschäftigen, wobei die folgenden im besonderen Fokus dieses Buches stehen: Energieversorgung, Informations- und Kommunikationstechnik sowie Verkehr (s. auch Tab. 1.1). Dabei wird versucht, die Konvergenz zwischen diesen Strukturen abzubilden. Grundsätzlich wird erwartet, dass durch die Konvergenz eine Symbiose/Synergie der Infrastrukturen entstehen wird, die zu einem überaus zuverlässigen Gesamtsystem führt, da vorhandene bzw. neu entstehende Informationen genutzt werden können. Eine andere Erklärung für den Begriff der Konvergenz stellt die Möglichkeit dar, notwendige neue Dienstleistungen

für ein gewandeltes System durch ein anderes System zu erbringen, z. B. Strom für Elektrofahrzeuge bereitzustellen.

Da die Systematik des Bundesministeriums des Innern auch von Sektoren als Synonym für Infrastrukturen spricht, ist ebenso der Begriff Sektorenkopplung gebräuchlich, der noch besser die gewollten Effekte in den konvergenteren kritischen Infrastrukturen beschreibt. Er wird in diesem Buch daher als Erwartungszustand der Weiterentwicklung der kritischen Infrastrukturen verwendet.

Wie sieht die heutige Kopplung zwischen technischen Sektoren aus?

Bis jetzt ist sie generell ziemlich locker und von Fall zu Fall unterschiedlich stark, was bedeutet, dass die Sektoren weitgehend unabhängig voneinander sind. Der Ausfall des Informationsnetzes beispielsweise hat fast keinen Einfluss auf das Funktionieren von elektrischen Energiesystemen oder Verkehrssystemen, welche auf eigene Informationsinfrastrukturen zurückgreifen. Umgekehrt wird erst ein dauerhafter Ausfall von elektrischen Energiesystemen die Funktionen der anderen Infrastrukturen massiv, wenn auch nicht direkt beeinflussen. So wird die Bahn beispielsweise elektrisch betrieben und infolgedessen bei einem Stromausfall zum Stillstand kommen, obwohl sie über eigene Kraftwerke verfügt. Man kann sich hier weitere Szenarien überlegen, die zeigen, dass schon heute Ansätze für die Kopplung (gegenseitige Wechselwirkung) zwischen Sektoren im Falle einer Havarie bestehen.

Zukünftig wird sich dieser Zustand wesentlich verändern, weil aus verschiedenen Gründen die Infrastrukturen drastischen Wandlungen unterzogen werden. Zu nennen sind hier Gründe wie Umwelt- und Energieprobleme oder der IKT -Ausbau. Mögliche Szenarien hierzu werden in den weiteren Teilen dieses Buches (Kap. 5) präsentiert. Gleichzeitig wird auch untersucht, wie man die Sektorenkopplung intelligent gestalten kann, um schon bei der Planung die Infrastrukturen als konvergente Strukturen zu betrachten und somit gekoppelte Systeme sicher gestalten und betreiben zu können.

Um den Maßstab der Problematik zu skizzieren, sind im Folgenden einige Kennziffern zu drei, in dem Buch behandelten, technischen Infrastrukturen angegeben.

### 1.1.2 Transport und Verkehr

Transport und Verkehr spielen in allen Ländern der Erde eine wichtige Rolle, besonders natürlich aber in den Industrieländern. Ohne Personen- oder Warenmobilität kann man sich heute keine Wirtschaft vorstellen.

Dominierend ist hier die individuelle Mobilität, die in Deutschland etwa 70 % des gesamten Personenverkehrs ausmacht. Weltweit steht für den Autoverkehr ein Straßennetz von insgesamt 29.357.026 km Länge zur Verfügung [3]. Dies entspricht

**Tab. 1.2** Straßennetz weltweit, ausgewählte Daten [3]

Land	Position auf der Liste	Länge in 1000 km	Netzdichte m/km <sup>2</sup>
USA	1	6.586.610	662,10
Russische Föderation	5	1.283.387	57,40
Frankreich	8	1.028.446	1595,50
Deutschland	12	645.000	1805,00
Belgien	33	154.012	4987,42

einer 730-maligen Umrundung der Erde am Äquator<sup>1</sup> – eine bemerkenswerte Zahl. Mit unterschiedlicher Straßennetzdichte, gemessen in m/km<sup>2</sup>, erstreckt sich das Straßennetz fast ohne Ausnahme über alle Länder der Erde. In Tab. 1.2 sind die Angaben zum Straßennetz in unterschiedlichen ausgewählten Ländern vorgestellt.

Straßennetze haben unterschiedliche Qualität, abhängig von Straßenart (z. B. Autobahn, Landstraße) und landesspezifischen Eigenschaften. Die höchste Straßennetzdichte ist charakteristisch für kleine Länder. Belgien beispielsweise hat eine der höchsten Straßennetzdichten weltweit mit etwa 5 km/km<sup>2</sup> [3]. In Europa beträgt die Straßennetzdichte im Schnitt etwa 1,5 km/km<sup>2</sup> [3]. Deutschland verfügt über 230.082 km Schnellstraßen im Jahr 2016. Die Unterteilung der Straßen in Deutschland ist in Abb. 1.2. dargestellt.

Ergänzend zum Straßennetz werden für den Transport und Verkehr auch das Schienennetz, Wasserwege und das Luftverkehrsnetz genutzt.

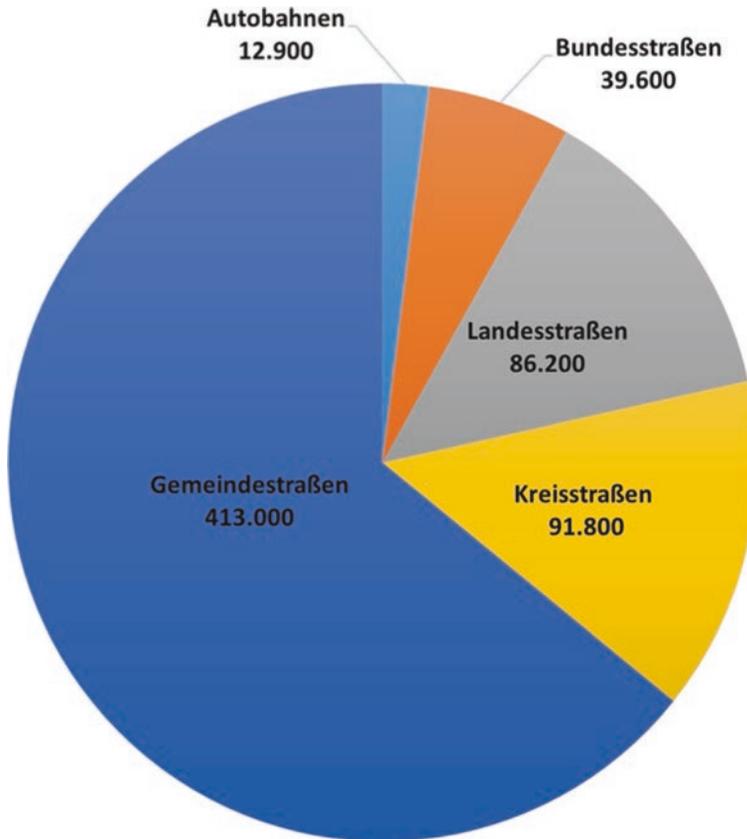
Das weltweite Schienennetz erstreckt sich über 1.370.782 km, was einer ca. 34-maligen Umrundung der Erde auf dem Äquator entspricht. In Deutschland spielt der Schienenverkehr mit einer etwa 15 %igen Beteiligung am Personentransport eine wichtige Rolle.

In Tab. 1.3 sind die Längen der Schienennetze für ausgewählte Länder angegeben.

Sowohl die Länge als auch die Netzdichte ist beim Schienennetz etwa 20-mal kleiner als die entsprechenden Kennzahlen für das Straßennetz.

Die Wasserstraßen und Flugverkehrsnetze spielen aufgrund ihrer Spezifika (Ortsgebundenheit) nur punktuell (z. B. für große Entfernungen) eine wichtige Rolle im Transport und werden in diesem Buch deshalb nicht betrachtet. Die exakten Daten zu diesen Sektoren sind bei Statista oder Wikipedia oder aber auch in anderen Quellen im Internet einfach nachzulesen.

<sup>1</sup>Der Umfang des Äquators beträgt 40.075,017 km. <https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%84aquator>. Zugriff 18. Sept. 2017.



**Abb. 1.2** Länge des Straßennetzes in Deutschland 2019 in km [4]

**Tab. 1.3** Schienennetz weltweit, ausgewählte Daten [5]

Land	Position	Länge in km	Netzdichte m/km <sup>2</sup>
USA	1	293.564	29,87
China	2	191.270	19,93
Russland	3	87.157	5,10
Deutschland	6	43.468	121,75
Frankreich	9	29.640	46,04
Tschechische Republik	24	9622	122,00
Schweiz	33	5652	136,93

### 1.1.3 Energieversorgung

Die Energieversorgung in den Industrieländern basiert grundsätzlich auf elektrischer Energie.

Die elektrische Energie, auch Elektrizität genannt [6], ist eine Sekundärenergie, die sich vielfältig verwenden lässt. Die Energiewirtschaft umfasst alle technischen und wirtschaftlichen Maßnahmen der Primärenergieerschließung und Gewinnung, deren Umwandlung, Transport und Verteilung bis hin zu Energieanwendungen beim Endverbraucher. Die Energiewirtschaft verbraucht etwa 35 % der Primärenergiequellen (s. auch Abschn. 1.2).

Die erzeugten Strommengen steigen ständig (s. Abb. 1.3) und betragen weltweit etwa 25.700 TWh pro Jahr. Deutschland gehört mit etwa 650 TWh pro Jahr zu einem der größten Energieproduzenten und gleichzeitig Verbraucher weltweit.

Der Stromverbrauch pro Kopf, der über die Industrialisierung des Landes und den dortigen Lebensstandard mit entscheidet, ist weltweit sehr unterschiedlich. Während bei den Industrieländern der durchschnittliche Verbrauch bei etwa 7000 kWh pro Kopf und Jahr liegt, ist er in Entwicklungsländern zweimal kleiner. Island hat mit Abstand den höchsten Stromverbrauch der Welt. Für drei Viertel davon ist dort die Aluminiumindustrie verantwortlich. Zugleich ist der Strom in Island so klimafreundlich wie in kaum einem anderen Land: Er wird komplett aus Wasserkraft und Erdwärme erzeugt.

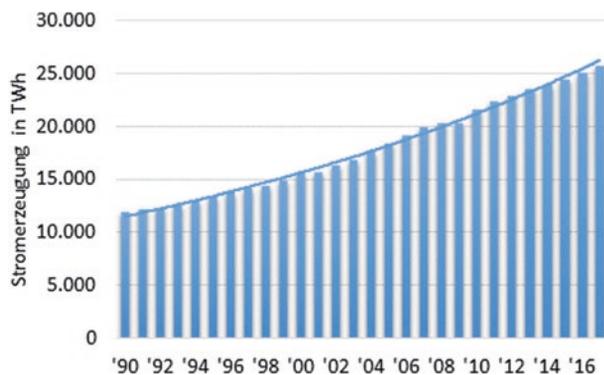
In den USA treiben die Klimaanlage den Stromverbrauch im Sommer auf die Spitze, sodass dort ein höherer Verbrauch vorliegt, welcher 12.950 kWh pro Kopf und Jahr beträgt.

Das führt zu unterschiedlichen Konsequenzen, die in Abschn. 1.2 näher beleuchtet werden.

Tab. 1.4 fasst den gegenwärtigen Verbrauch pro Kopf für ausgewählte Länder zusammen.

Die Länge der Stromnetze in Deutschland beträgt 1,8 Mio. km [11], was circa 45 Erdumrundungen am Äquator entspricht; sie sind etwa dreimal so lang wie alle Straßen in Deutschland zusammen. Die elektrischen Netze besitzen mehrere Spannungsebenen

**Abb. 1.3** Weltweit erzeugte Strommengen in den Jahren 1990 bis 2017 [7]



**Tab. 1.4** Stromverbrauch pro Kopf weltweit [8]

Land	Position auf der Liste	Verbrauch pro Kopf in kWh/Jahr	Stromverbrauch in TWh [9, 10]
Island	1	53.160	16 (2008)
USA	10	12.950	3913
Japan	22	7750	934
Deutschland	25	7140	533
Frankreich	26	7370	431
China	61	3480	5523
Haiti	137	50	0,39 (2008)

(von der Niederspannung, je nach Land 110 V bzw. 230 V, über Mittelspannung 10 kV bis 30 kV bis zur Hochspannung bzw. Höchstspannung 110 kV bis 750 kV), die den optimalen Energietransport- und Verteilungsaufgaben angepasst sind.

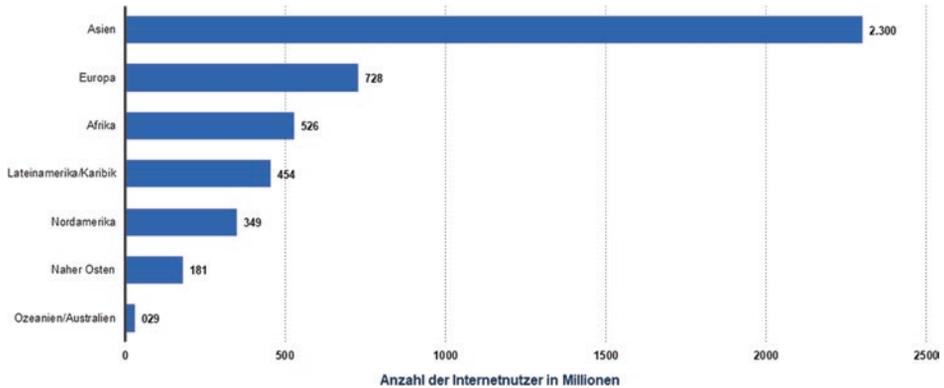
In Deutschland beträgt die Länge der Niederspannungsnetze 1,20 Mio. km, während sich die Mittelspannungsnetze über 0,5 Mio. km erstrecken und die Hochspannungsnetze über etwa 130.000 km. Bemerkenswert ist dabei, dass über 80 % der Netze in Deutschland durch Erdkabelnetze gebildet werden, was eine hohe Zuverlässigkeit der Energiebereitstellung garantiert und ein Alleinstellungsmerkmal des deutschen Energiesystems darstellt. Freileitungen hingegen sind stärker durch externe Einflüsse (wie Blitzschlag oder mechanische Zerstörung) beeinträchtigt.

### 1.1.4 Informations- und Kommunikationstechnologien

Das Internet hat die Informations- und Kommunikationstechnik revolutioniert. Heute sind 4,13 Mrd. Menschen als Internetnutzer registriert [12], was einer Quote von 57 % [13] entspricht (s. auch Abb. 1.4).

Die Länder, in denen der höchste Anteil an Haushalten mit dem Internet verbunden ist, liegen vorwiegend in Europa. Eine Ausnahme ist Südkorea als Spitze des Rankings mit 98,8 %. Es folgen Luxemburg mit 96,8 %, Norwegen mit 96,6 % und Island mit 96,6 %. Deutschland liegt mit 90,3 % auf Rang 13 [15]. Der durchschnittliche Nutzer in Deutschland setzt das Internet 277 min pro Tag [12] ein, was bedeutet, dass die meisten ständig „online“ bleiben. Damit sind auch Vorgänge des alltäglichen Lebens wie z. B. Planen, Buchen, Einkaufen, Verwalten wesentlich individueller geworden.

Auch die Idee des Smart Home (vernetztes, „intelligentes“ Heim) wird immer öfter angewendet. Durch diese IKT -Vernetzung lassen sich Haushaltsgeräte auch aus der Ferne steuern und untereinander vernetzen.



**Abb. 1.4** Schätzung der Anzahl der Internetnutzer weltweit nach Regionen in Mio. (2019) [14]

Als Meilensteine in der Entwicklung des modernen Internets sind zu nennen:

- 1983: Einführung von TCP/IP<sup>2</sup> als Grundlage für den Datenaustausch im Internet,
- 1984: Entwicklung des DNS<sup>3</sup> zur Übersetzung von normalen Adressnamen in IP-Adressen,
- 1991: Vorstellung des World Wide Web am CERN,
- 1993: Einführung des ersten Grafik-basierten Browsers,
- 1995: Entwicklung der objektorientierten Programmiersprache JAVA,
- 1996: Erstes Smartphone, das Nokia Communicator 9000,
- 1998: Gründung von Google,
- 2004: Gründung von Facebook,
- 2006: Versand des ersten Tweets durch Twitter-Gründer Jack Dorsey.

Die IT-Branche setzte im Jahr 2019 weltweit 3737,0 Mrd. US\$ [16] um, davon in Deutschland 93,0 Mrd. EUR [17].

<sup>2</sup>Transmission Control Protocol/Internet Protocol: Internetprotokollfamilie.

<sup>3</sup>Domain Name System (DNS): Dienste in IP-basierten Netzwerken. Seine Hauptaufgabe ist die Beantwortung von Anfragen zur Namensauflösung. Das DNS funktioniert ähnlich wie eine Telefonauskunft.

## 1.2 Energie zur Sicherung der kritischen Infrastrukturen

### 1.2.1 Elektrische Energie – Anführer des Fortschritts

Die elektrische Energie, als sekundäre, veredelte Form der Energie, hat sich in den letzten Jahren als einer der Haupttreiber des Fortschritts herausgestellt. Merkmale wie leichte Handhabung, Transport und Rückwandlung in unterschiedliche andere Formen der Energie, z. B. thermische oder mechanische Energie, macht Strom eindeutig zum Mittel der Wahl für diese Rolle. Die elektrische Energie wird weltweit hauptsächlich durch die Wandlung von vorwiegend fossilen primären Energieträgern gewonnen.

Per Definition ist Primärenergie [18] diejenige Energie, die aus der Sonnenenergie stammt und in den Brennstoffen als chemische Energie gespeichert wird. Durch Oxidation der brennbaren Bestandteile wie Kohle, Wasserstoff und anderer Elemente wird sie wieder in Wärme umgesetzt. Als Oxidationsmittel dient meist Luft, manchmal auch mit Sauerstoff angereichert, aber selten reiner Sauerstoff. Die Primärenergien sind durch folgende Merkmale [18] charakterisiert:

- Heiz- und Brennwert (s. DIN 5499),
- maximaler CO<sub>2</sub>-Gehalt,
- Zündtemperatur.

In Tab. 1.5 sind die primären Energiequellen systematisch zusammengestellt.

Die Vorkommen der natürlichen primären Energiequellen sind endlich und reichen, den heutigen Grad der Nutzung zugrunde legend, nur für die nächsten 60 Jahre (Gas) bzw. 200 Jahre (Kohle) aus. Man soll aber nicht vergessen, dass der Energieverbrauch weltweit jährlich steigt, was grundsätzlich durch das Streben der Entwicklungsländer bedingt ist, die Lücke in der Lebensqualität zu den Industrieländern zu schließen. Mit der Steigerung des Energieverbrauches ist, als negative Auswirkung, der Anstieg des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verbunden, was zur globalen Erwärmung der Erde führt. Es müssen also in naher Zeit Gegenmaßnahmen ergriffen werden, um den globalen Erwärmungsprozess zu stoppen bzw. zu stabilisieren. Die Erderwärmung wurde schon von mehr als 20 Jahren als weltweites Problem erkannt, erste Gegenmaßnahmen wurden im sog. Kyoto-Protokoll im Jahr 1995 vorgeschlagen und später im Pariser Klimaabkommen im Jahr 2015 konkretisiert [19]. Das Abkommen wurde dann im Oktober 2016 durch die EU [20], China, USA, Japan und andere Länder ratifiziert und beinhaltet eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission um 40 % im Vergleich zum Jahr 1990. Erste Ergebnisse der Vereinbarungen aus dem Jahr 1995 sind schon heute zu beobachten. Der Anstieg des Energieverbrauches in den Industrieländern [21] und in Konsequenz dazu der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen hat sich vom Bruttoinlandsprodukt (BIP) entkoppelt. In den Entwicklungsländern jedoch steigt weiter der Energieverbrauch proportional zum BIP.

**Tab. 1.5** Systematische Darstellung von primären Energiequellen

Art	Herkunft	Beispiele
Feste Brennstoffe	Natürliche feste Brennstoffe	Torf, Braunkohle, Steinkohle
	Künstliche feste Brennstoffe	Kohlebriketts, Holzkohle, Koks
	Abfallbrennstoffe	Müll, Pflanzenabfälle
Flüssige Brennstoffe	Natürliche flüssige Brennstoffe	Erdöl
	Künstliche flüssige Brennstoffe	Steinkohle-Teeröl, Schalöl, Schieferöl
	Abfallbrennstoffe	Altöl, Zellstoffablage
Gasförmige Brennstoffe oder Brenngase	Natürliche Brenngase	Erdgas
	Künstliche Brenngase	Verkokungsgas, Stadtgas, Generatorgas, Gichtgas, Wassergas, Druckvergasungsgas, künstliches Erdgas
	Abfallbrenngase	Raffineriegas, Klärgas
Kernbrennstoffe		
	Oxidische	
	Metallische	
	Flüssige	
	Andere feste Brennstoffe	
Regenerative Energien	Windenergie	
	Solarenergie	
	Geothermische Energie	
	Biogas	
	Biomasse	

Wie aus Abb. 1.5 ersichtlich, ist der Anstieg des Energieverbrauchs in den OECD<sup>4</sup>-Ländern seit vielen Jahren nahezu null (Abb. 1.5a grüne Fläche und Abb. 1.5b grüne Balken). Diese Entwicklung ist das Ergebnis aus der Umstellung auf effiziente Produktionsverfahren und den Einsatz energieeffizienter Haushaltsgeräte in diesen Ländern. In anderen Ländern beträgt der Anstieg des Energieverbrauchs immer noch zwischen 2 % und 5 % jährlich, was auf einen über viele Jahre akkumulierten Nachholbedarf im Lebensstandard zurückzuführen ist. Gegenwärtig ist der Energieverbrauch pro Kopf, wie bereits in Abschn. 1.1 erwähnt, in einigen Entwicklungsländern mit sehr

<sup>4</sup>OECD: Organization for Economic Co-operation and Development.