

Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität

STROMbegleitung

im Rahmen der Förderbekanntmachung

Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)

des BMBF

Abschlussbericht des Verbundvorhabens

an das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Förderkennzeichen: 13N11855 & 13N11856

März 2015

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Abschlussbericht

Dieser Bericht ist Ergebnis des Verbundprojekts „STROMbegleitung – Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität“ im Rahmen der Förderbekanntmachung im Themenfeld *Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)*.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 13N11855 & 13N11856 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

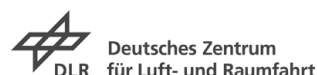
Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

DLR und Wuppertal Institut (2014): Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität (STROMbegleitung). Abschlussbericht im Rahmen der Förderung des Themenfeldes „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)“ an das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Stuttgart, Wuppertal, Berlin.

Projektlaufzeit: Oktober 2011 – September 2014

Projektkoordination: Matthias Klötzke, DLR

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Institut für Fahrzeugkonzepte
Pfaffenwaldring 38–40, 70569 Stuttgart
Tel.: 0711 6862-255, Fax: -258
Mail: matthias.kloetzke@dlr.de

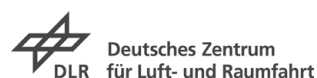


Projektpartner:

Dr. Claus Barthel
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (WI)
Forschungsgruppe 1 „Zukünftige Energie- und Mobilitätsstrukturen“
Döppersberg 19, 42103 Wuppertal
Tel.: 0202 2492-166, Fax: -198
Mail: claus.barthel@wupperinst.org



Danny Kreyenberg
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Institut für Verkehrsforschung
Rutherfordstraße 2
12489 Berlin
Tel.: 030 67055-0, Fax: -102
Mail: danny.kreyenberg@dlr.de



Autor(inn)en:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR):

Benjamin Frieske, Matthias Klötzke, Danny Kreyenberg

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (WI):

Katrin Bienge, Philipp Hillebrand, Hanna Hüging, Thorsten Koska, Julian Monscheidt, Michael Ritthoff, Ole Soukup, Julia Tenbergen

Weitere Mitarbeiter:

Arne Höttl (DLR), Markus Mehlin (DLR), Michael Schmitt (DLR), Stefan Trommer (DLR), Julian Veitengruber (DLR), Evgenia Alexopoulou (WI), Dr. Claus Barthel (WI), Lukas Korella (WI), Dr. Peter Viebahn (WI)

Das Verbundprojekt wurde vom DLR und WI gemeinsam im Auftrag des BMBF durchgeführt.



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	v
Tabellenverzeichnis	xi
Abbildungsverzeichnis	xv
1 Kurzfassung	25
2 Einleitung	31
3 Begleitung der Förderprojekte	33
4 Trendanalyse Fahrzeugtechnik und -konzepte	35
4.1 Internationale Trends bei Fahrzeugkonzepten	35
4.1.1 Aufbau der Datenbank	36
4.1.2 Komponenten für elektrifizierte Antriebskonzepte	37
4.1.3 Ergebnisse	39
4.2 Internationales Technologiemonitoring	54
4.2.1 Patent- und Publikationsanalyse „Leistungselektronik im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw“	56
4.2.2 Patent- und Publikationsanalyse „Elektrische Maschine im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw“	77
4.3 Untersuchung der Auswirkungen technologischer und konzeptioneller Verbesserungen auf den Fahrzeugenergieverbrauch	110
4.4 Auswirkungen geänderter Rahmenbedingungen auf den deutschen Neuwagenmarkt	125
5 Regionale Übersicht zum Monitoring der Elektromobilitätsarena	137
5.1 Vorgehen und Methodik	137
5.2 Zusammenfassung der Regionalstudien	139
5.2.1 Deutschland	139
5.2.2 Europa	157
5.2.3 USA	173

5.2.4	Japan	182
5.2.6	China	194
5.2.7	Indien	201
5.2.8	Entwicklungen außerhalb der Fokusbänder	212
5.3	Vergleichende Globalstudie	215
5.3.1	Regierung/Politik/Öffentliche Infrastruktur	215
5.3.2	Forschungsförderung und Institutionen	223
5.3.3	Wirtschaft und Industrie	232
5.3.4	Verbraucher und Marktentwicklung	240
5.3.5	Zentrale Erkenntnisse – Deutschland im internationalen Vergleich	249
6	Materialintensitätsanalysen	253
6.1	Hintergrund	253
6.2	Methodischer Aufbau	254
6.2.1	Ziel und Untersuchungsrahmen	254
6.2.2	Analyseschritte	255
6.2.3	Bewertungsansätze	256
6.2.4	Begriffsdefinitionen	257
6.3	Technologieauswahl	258
6.3.1	Vorgehensweise	258
6.3.2	Auswahl der Fahrzeugsegmente	258
6.3.3	Auswahl von Antriebskonzepten	259
6.3.4	Technische Eigenschaften und Komponenten der Typfahrzeuge	262
6.3.5	Prozessketten und Technologiepfade	265
6.3.6	Fazit der Technologieauswahl	267
6.4	Analyse bestehender Lebenszyklusstudien	269
6.4.1	Vorgehensweise und Zielsetzung	269
6.4.2	Berücksichtigte Studien	269
6.4.3	Ergebnis der Auswertung	273
6.5	Erstellung von Materialintensitätsanalysen	275
6.5.1	Beschreibung der Materialintensitätsanalyse nach der MIPS-Methodik	275
6.5.2	Herleitung der Materialinventare von Systemkomponenten	276
6.5.3	Ergebnisse der MAIA auf Fahrzeugebene	289
6.5.4	Treibhauspotential	297
6.5.5	Daten- und Forschungsbedarf	300
6.6	Definition langfristiger Verkehrsszenarien	301

6.6.1	Ziel und Vorgehensweise	301
6.6.2	Verkehrsleistung in Deutschland und der Welt	302
6.6.3	Pkw Bestandsentwicklung in Deutschland und der Welt	304
6.6.4	Pkw-Fahrleistung und Pkw-Lebensdauer in Deutschland und der Welt	308
6.6.5	Verkehrsszenarien dieser Arbeit (Deutschland)	311
6.6.6	Verkehrsszenarien dieser Arbeit (Welt)	312
6.6.7	Daten- und Forschungsbedarf	313
6.7	Kumulierter Materialbedarf und THG-Emissionen der Verkehrsszenarien	314
6.7.1	Vorgehensweise	314
6.7.2	Abiotischer Materialbedarf Deutschland	316
6.7.3	Abiotischer Materialbedarf Welt	319
6.7.4	Treibhausgasemissionen Deutschland	321
6.7.5	Treibhausgasemissionen Welt	324
6.8	Risiken und Knappheitsfragen	327
6.8.1	Untersuchungsrahmen	328
6.8.2	Seltene Erden	329
6.8.3	Lithium	338
6.8.4	Silber	343
6.8.5	Gold	345
6.8.6	Palladium und Platin	346
6.8.7	Gallium	349
6.8.8	Indium	349
6.8.9	Germanium	351
6.8.10	Tantal	351
6.8.11	Zusammenfassung des Optimierungsbedarfs	353
6.9	Alternativszenario zum optimierten Umgang mit kritischen Ressourcen	354
6.9.1	Beschleunigter Technologiewechsel von PSM zu ASM	354
6.9.2	Verstärkter Einsatz Erneuerbarer Energien für die Fahrzeugnutzung	355
6.9.3	Lithium-Recycling	359
6.9.4	Fahrzeuglebensdauer	360
6.9.5	Ersatz von Tantal-Kondensatoren	361
6.9.6	Bewertung des optimierten Szenarios	361
6.10	Fazit der Materialintensitätsanalyse	362
6.10.1	Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse auf Fahrzeugebene	363
6.10.2	Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse auf Szenarioebene	363
6.10.3	Fazit abiotischer Materialbedarf und Treibhauspotenzial	365
6.10.4	Ergebnisse zur Kritikalität/Verfügbarkeit von Rohstoffen für die Elektromobilität	365

7	Synthese und integrierte Bewertung	367
7.1	Forschungseffizienz	367
7.1.1	Wissensbasis und technologische Basis im Vergleich	367
7.1.2	Forschungsförderung im Vergleich	374
7.2	Fahrzeuge und Technologien	378
7.2.1	Fahrzeuge	378
7.2.2	Technologien	381
7.3	Marktentwicklung	384
7.3.1	Status quo der Marktentwicklung	384
7.3.2	Marktperspektiven in Deutschland	384
7.3.3	Marktperspektiven international	387
7.3.4	Einflussfaktoren auf die Marktentwicklung	388
7.4	Umweltwirkung und Rohstoffkritikalität	392
7.4.1	Politische Motive und Strategien	392
7.4.2	Einbindung der Elektromobilität ins Energiesystem	393
7.4.3	Materialbedarf und Treibhauspotenzial der Elektromobilität	394
8	Handlungsempfehlungen	399
9	Literaturverzeichnis	403
Anhang A	Auflistung der in der Fahrzeugkonzeptdatenbank erfassten Fahrzeuge	419
Anhang B	Erläuterung zu nicht berücksichtigten Studien der Materialintensitätsanalyse im Rahmen der Analyse bestehender Lebenszyklusanalysen	427
Anhang C	Herleitung der Materialinventare von Systemkomponenten (Skalierungsfaktoren, Materialinventare)	429

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
ACEA	European Automobile Manufacturers' Association
ADP	Abiotic Depletion Potential
AFDC	Alternative Fuels Data Center
AFST	Alternate Fuels for Surface Transportation
ARAI	Automotive Research Association of India
ARRA	American Recovery and Reinvestment Act of 2009
ASM	Asynchronmaschine
B	Benzin
B/BB	Berlin/Brandenburg
B7	Dieselmotortreibstoff, 7- Vol.-%- Biodiesel
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BEM	Bundesverband EMobilität
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (Battery Electric Vehicle)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMF	Bundesministerium der Finanzen
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (heute BMUB)
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
CADC	Common Artemis Driving Cycles
CATARC	China Automotive Technology and Research Center
CCFA	Comité des Constructeurs Français d'Automobiles
CDV	Clean Diesel Vehicle
CFK	Kohlefaserverbundwerkstoffe
CNG	Compressed Natural Gas (Erdgas)
COE	Centres of excellence'
CSP	Concentrated Solar Power
D	Diesel
DCTI	Deutsches Clean-Tech Institut
DDI	Deutsches Dialog Institut
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOE	Department of Energy (US-Energieministerium)

E10	Ottokraftstoff, 10- Vol.-%- Bio-Ethanol
E5	Ottokraftstoff, 5- Vol.-%- Bio-Ethanol
EEA	European Environment Agency
EEO	European Electro-Mobility Observatory
E-Fahrzeug	Elektrofahrzeug
EGVI	European Green Vehicle Initiative
EM	Elektrische Maschine, Elektromobilität
EMOTOR	Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität
EPC	European Patent Office
EREC	European Renewable Energy Council
ESMT	European School of Management and Technology
EVI	Electric Vehicles Initiative
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (Fuel Cell Electric Vehicle)
F-ISI	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
fka	Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen
FuE	Forschung und Entwicklung
FYP	Five-Year-Plan
G	Benzin (Gasoline)
GaAs	Galliumarsenid
GaN	Galliumnitrid
GBP	Britisches Pfund (Great Britain Pound)
GWP	Global Warming Potential
HDPE	High Density Polyethylene
HEV	Hybridelektrisches Fahrzeug (Hybrid Electric Vehicle)
HiStockHiEV	Szenariobezeichnung: hoher Fahrzeugbestand, hoher Anteil elektrischer Antriebe
HiStockLoEV	Szenariobezeichnung: hoher Fahrzeugbestand, niedriger Anteil elektrischer Antriebe
HOV	High occupancy vehicle
IA-HEV	Implementing Agreement for co-operation on Hybrid and Electric Vehicle Technologies and Programmes
ICCT	International Council on Clean Transportation
ICE(V)	Konventionelles verbrennungsmotorisches Fahrzeug (Internal Combustion Engine (Vehicle))
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IEKP	Integriertes Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung
IFA	Invest in France Agency
InfE	Ingenieurbüro für neue Energien
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IM	Induction Machine
INR	Indische Rupie
IP	Intellectual Property
IPC	International Patent Classification
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

ISO	International Organization for Standardization
IWES	Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
KBA	Kraftfahrtbundesamt
KEA	Kumulierter Energieaufwand
Kfz	Kraftfahrzeug
KiD	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland
KMU	Kleine und Mittelständische Unternehmen
KraftStG	Kraftfahrzeugsteuergesetz
KRESSE	Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems (Projekt des Wuppertal Instituts)
LCA	Life Cycle Assessment
LCVPP	Low Carbon Vehicle Public Procurement Programme
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LiS	Lithium-Schwefel
Lkw	Lastkraftwagen
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
LoStockHiEV	Szenariobezeichnung: niedriger Fahrzeugbestand, hoher Anteil elektrischer Antriebe
LoStockLoEV	Szenariobezeichnung: niedriger Fahrzeugbestand, niedriger Anteil elektrischer Antriebe
MAIA	Materialintensitätsanalyse
Max	Maximum
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell (Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle)
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry (Japanisches Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie)
MEXT	Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (Japanisches Ministerium für Bildung, Kultur, Sport, Wissenschaft und Technologie)
MI	Materialinput
MiD	Mobilität in Deutschland
Min	Minimum
MIPS	Material-Input pro Service-Einheit
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MLIT	Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (Japanisches Ministerium für Land, Infrastruktur, Transport und Tourismus)
MNRE	Ministry of New and Renewable Energy
MOEJ	Ministry of the Environment, Japan (Japanisches Ministerium für Umwelt)
MoHIPE	Ministry of Heavy Industries and Public Enterprises (Japanisches Ministerium für Schwerindustrie und staatliche Unternehmen)
MOP	Deutsches Mobilitätspanel
MOSFET	Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
NAB	National Automotive Board
NBEM	National Board for Electric Mobility
NCEM	National Council for Electric Mobility
NEDC	Neuer Europäischer Fahrzyklus (New European Driving Cycle)
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization (Japan)
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus

NEMMP	National Electric Mobility Mission Plan
NeV	Next Generation Vehicle Promotion Center
NEV	New Energy Vehicle
NI	Niedersachsen
NiMH	Nickel-Metallhydrid-Akkumulator
NOK	Norwegische Krone
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NO _x	Stickstoffoxid
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
NRW	Nordrhein-Westfalen
OEM	Original Equipment Manufacturer
OICA	Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles
OLEV	Office of Low Emission Vehicles
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OPTUM	Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen
ÖSPV	Öffentlicher Schienenpersonenverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PE, LE	Leistungselektronik (Power Electronics)
PEMFC	Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle
PEV	Plug-in Elektrisches Fahrzeug (Plug-In Electric Vehicle); PHEV, REEV, BEV & FCEV
PHEV	Plug-in Hybridelektrisches Fahrzeug (Plug-In Hybrid Electric Vehicle)
Pkw	Personenkraftwagen
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
PWB	Printed Wiring Board (Leiterplatte)
REEV	Reichweitenverlängertes Elektrofahrzeug (Range Extended Electric Vehicle)
REG	Erneuerbare Energien
RER	Europa
RISING	Research & Development Initiative for Scientific Innovation of New Generation Batteries
RMB	Chinesische Renminbi
SA	Sachsen
SEE	Seltenerdelemente
SEO	Seltenerdoxide
Si	Silizium
SiC	Siliziumkarbid
SMMT	Society of Motor Manufacturers & Traders
SOFC	Festoxid-Brennstoffzelle
SRM	Switched Reluctance Machine (Geschaltete Reluktanzmaschine)
SSM	Stromerregte Synchronmaschine
STROM	Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität
Tab.	Tabelle
TCO	Total Cost of Ownership
TFM	Transversalflussmaschine
THG	Treibhausgas

TMR	Total Material Requirement
TRL	Transport and Research Laboratory
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UCTE	Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity
UK	Großbritannien (United Kingdom)
UMBR _e LA	Umweltbilanzen Elektromobilität
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
USGS	United States Geological Survey
VDA	Verband der Automobilindustrie
VW	Volkswagen
WBG	Wide-Bandgap-Halbleitermaterialien
WI	Wuppertal Institut für Klima Umwelt, Energie GmbH
xEV	Elektrofahrzeug (Electric Vehicle)
ZEV	Zero Emission Vehicle

Einheiten und Symbole

\$	US-Dollar
%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius
a	annum
Ag	Silber
Al	Aluminium
Au	Gold
B	Bor
Ce	Cer
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Äq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
Dy	Dysprosium
Er	Erbium
Eu	Europium
g	Gramm
Gd	Gadolinium
Ge	Germanium
Gt	Gigatonne
h	Stunde
H	Wasserstoff
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
Ho	Holmium
In	Indium

KCl	Kaliumchlorid
kg	Kilogramm
km	Kilometer
kt	Kilotonne
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
La	Lanthan
Li	Lithium
Li ₂ CO ₃	Lithiumkarbonat
Lu	Lutetium
Mg	Magnesium
Mio.	Million
MJ	Mega-Joule
Mrd.	Milliarde
Mt	Megatonne
NaCl	Natriumchlorid
Nb	Niob
Nd	Neodym
Nm ³	Normkubikmeter
Pd	Palladium
pkm	Personenkilometer
Pm	Promethium
ppm	Parts per million
Pr	Praseodym
Pt	Platin
s	Sekunde
Sc	Scandium
Sm	Samarium
t	Tonne
Ta	Tantal
Tb	Terbium
Tm	Thulium
Vol.-%	Volumenprozent
Y	Yttrium

Tabellenverzeichnis

Tab. 4-1	Top-20-Patentanmelder im Bereich Leistungselektronik nach Anzahl der Erfindungen	60
Tab. 4-2	Top-20-Patentanmelder im Bereich Wechselrichter nach Anzahl der Erfindungen	64
Tab. 4-3	Top-20-Patentanmelder im Bereich Wechselrichter ohne Einschränkung auf elektrifizierte Pkw nach Anzahl der Erfindungen	65
Tab. 4-4	Top-20-Patentanmelder im Bereich Kondensator nach Anzahl der Erfindungen	67
Tab. 4-5	Top-20-Patentanmelder im Bereich Halbleiter nach Anzahl der Erfindungen	69
Tab. 4-6	Top-20-Patentanmelder im Bereich SiC nach Anzahl der Erfindungen	72
Tab. 4-7	Top-20-Patentanmelder im Bereich GaN nach Anzahl der Erfindungen	75
Tab. 4-8	Top-20-Patentanmelder im Bereich „Elektrische Maschine“ nach Anzahl der Erfindungen	80
Tab. 4-9	Top-20-Patentanmelder im Bereich „Synchronmaschine“ nach Anzahl der Erfindungen	87
Tab. 4-10	Top-20-Patentanmelder im Bereich „Synchronmaschine erweitert“ nach Anzahl der Erfindungen	89
Tab. 4-11	Top-20-Patentanmelder im Bereich „Asynchronmaschine erweitert“ nach Anzahl der Erfindungen	93
Tab. 4-12	Top-20-Patentanmelder im Bereich „Reluktanzmaschine erweitert“ nach Anzahl der Erfindungen	95
Tab. 4-13	Top-20-Patentanmelder im Bereich „Transversalflussmaschine erweitert“ nach Anzahl der Erfindungen	97
Tab. 4-14	Top-20-Patentanmelder im Bereich „Stator“ nach Anzahl der Erfindungen	100
Tab. 4-15	Top-20-Patentanmelder im Bereich „Rotor“ nach Anzahl der Erfindungen	102
Tab. 4-16	Top-20-Patentanmelder im Bereich „Wicklungen“ nach Anzahl der Erfindungen	104
Tab. 4-17	Top-20-Patentanmelder im Bereich „Thermomanagement“ nach Anzahl der Erfindungen	106
Tab. 4-18	Top-20-Patentanmelder im Bereich „Permanentmagnete“ nach Anzahl der Erfindungen	109
Tab. 4-19	Entwicklung der Preise für Energieträger	128
Tab. 5-1	Fokusregionen und beauftragte Institutionen	138
Tab. 5-2	Förderschwerpunkte der deutschen Ministerien	141
Tab. 5-3	Budget der verschiedenen Ministerien zur Weiterentwicklung der Elektromobilität im Jahr 2012	144
Tab. 5-4	Förderprojekte in den sechs Leuchttürmen der NPE in Deutschland mit Stand 2012	145

Tab. 5-5	Überblick über die vier Schaufensterregionen im Demonstrationsprogramm "Schaufenster Elektromobilität"	148
Tab. 5-6	HEV-, PHEV- und BEV-Modelle deutscher Automobilhersteller mit Angabe der Markteinführung	150
Tab. 5-7	Überblick über ausgewählte Studien zur Marktdurchdringung von BEV/PHEV	156
Tab. 5-8	Gesamtzahl produzierter Pkw und Anteil der Automobilindustrie am BIP in den fünf Fallstudienregionen	168
Tab. 5-9	Gesamtzahl, und Marktanteile von BEV und PHEVs im Pkw Bereich in den fünf Fallstudienregionen	170
Tab. 5-10	Überblick über projizierte Marktanteile von xEVs an den Pkw-Neuregistrierungen in ausgewählten Ländern	172
Tab. 5-11	Kaufanreize für ZEV-Fahrzeuge auf US-Bundesstaatenebene	176
Tab. 5-12	Verkaufszahlen Pkw in den USA 2007 - 2014	180
Tab. 5-13	Entwicklung des japanischen Subventionssystems 2008 - 2012	184
Tab. 5-14	Ausgewählte finanzielle Anreize zur Förderung emissionsarmer Fahrzeuge in Japan	185
Tab. 5-15	Produktion von PHEVs, BEVs und HEVs in Japan 2009-2012	189
Tab. 5-16	Eckdaten zum Bestand und Verkäufen von PHEV, BEV und HEV in Japan 2009- 2012	191
Tab. 5-17	Marktperspektiven von xEVs in Japan auf Basis von Schätzungen der Study Group on Next Generation Vehicle Strategy	192
Tab. 5-18	Geschätzter Investitionsbedarf im Bereich Elektromobilität in Indien	205
Tab. 5-19	Regierungsziele zur Verbreitung von xEVs im Vergleich	216
Tab. 5-20	Struktur der Subventionen in ausgewählten Ländern im Vergleich	218
Tab. 5-21	Ausbauziele für Ladeinfrastruktur im Vergleich	221
Tab. 5-22	Verteilung der nötigen Investitionssummen auf die verschiedenen Forschungsfelder	228
Tab. 5-23	Gesamtförderbudget zentraler Demonstrationsprojekte in der öffentlichen Förderung im Vergleich	231
Tab. 6-1	Begriffsdefinitionen der Materialintensitätsanalyse	257
Tab. 6-2	Antriebskonzepte und deren Zusammensetzung aus Systemkomponenten	268
Tab. 6-3	Übersicht der verwendeten Quellen zur Bestimmung der Materialinventare der jeweiligen Systemkomponenten und der Energiebereitstellung	274
Tab. 6-4	Gegenüberstellung der Komponentenmasse aus Literatur und der verwendeten Datenbasis für einen HEV für das Jahr 2010 und daraus resultierende Skalierungsfaktoren	277
Tab. 6-5	Übersicht der Verlustfaktoren ausgewählter Materialien	278

Tab. 6-6	Materialzusammensetzung und zugeordnete Ecoinventprozesse für den Verbrennungsmotor	279
Tab. 6-7	Materialzusammensetzung des Permanentmagneten	281
Tab. 6-8	Materialbedarf an kritischen Rohstoffen für die Leistungselektronik je Antriebskonzept	282
Tab. 6-9	Annahmen bezüglich der Kraftstoff- bzw. Energiebereitstellung für die Nutzungsphase	285
Tab. 6-10	Material- und Energiebedarf für die Produktion von 1 kg H ₂ durch alkalische Elektrolyse	286
Tab. 6-11	Materialbedarf kritischer Rohstoffe für die Strombereitstellung	289
Tab. 6-12	Übersicht der Materialien mit anteilig höchstem abiotischem Materialbedarf für den BEV und ICEV-B in 2010	293
Tab. 6-13	Anteile des abiotischen Materialbedarfs der Systemkomponenten an der Herstellung und der Lebenszyklusphasen an dem gesamten Materialbedarf für das Jahr 2010 [in %] (Nutzungsphase = 10 Jahre mit dem Deutschland-Szenario)	294
Tab. 6-14	Anteile des abiotischen Materialbedarfs der Systemkomponenten an der Herstellung sowie Anteile der Lebenszyklusphasen an dem gesamten Materialbedarf für das Jahr 2050 [in %] (Nutzungsphase = 10 Jahre mit dem Deutschland-Szenario)	296
Tab. 6-15	Entwicklung der Verkehrsleistung im Personenverkehr in Deutschland von 1975 - 2010	303
Tab. 6-16	Pkw-Bestand und Neuzulassungen in Deutschland nach Kraftstoffart (Statistisches Bundesamt 2013)	304
Tab. 6-17	Pkw-Bestand in Deutschland nach Segment in 2012 und 2008 (Statistisches Bundesamt 2013)	305
Tab. 6-18	Verschiedene Verkehrserhebungen im Vergleich	309
Tab. 6-19	Vergleich Pkw-Fahrleistung [in km pro Pkw und Jahr] nach Fahrzeugsegment und Kraftstoffart von MiD 2008 und Fahrleistungserhebung BASt 2002	310
Tab. 6-20	Pkw Bestand Deutschland in Szenarien 2010 – 2050	312
Tab. 6-21	Gehalte an Seltenerdoxidien bei wichtigen Seltenerdmineralen	331
Tab. 6-22	Größe und Gehalte verschiedener Seltenerdlagerstätten	336
Tab. 6-23	Kosten der Gewinnung von Lithium aus Salzlaugen	340
Tab. 6-24	Kosten der Gewinnung von Lithium aus Spodumen	340
Tab. 6-25	Kosten der Gewinnung von Lithium durch Auslaugung von Ton	340
Tab. 7-1	Überblick über die STROM V21 Szenarien	385
Tab. 10-1	Masse des Gliders nach Huss et al. (2013) und die resultierenden Skalierungsfaktoren der jeweiligen Antriebskonzepte für den Zeitraum 2010 bis 2030	429

Tab. 10-2	Masse des Verbrennungsmotors nach Huss et al. (2013) und die resultierenden Skalierungsfaktoren der jeweiligen Antriebskonzepte für den Zeitraum 2010 bis 2030	429
Tab. 10-3	Masse des Restantriebsstrangs nach Huss et al. (2013) und die resultierenden Skalierungsfaktoren der jeweiligen Antriebskonzepte für den Zeitraum 2010 bis 2030	430
Tab. 10-4	Tankmasse der jeweiligen Antriebskonzepte für den Zeitraum 2010 bis 2030	430
Tab. 10-5	Masse des Elektromotors nach Huss et al. (2013) und die resultierenden Skalierungsfaktoren der jeweiligen Antriebskonzepte für den Zeitraum 2010 bis 2030	430
Tab. 10-6	Materialinventar eines PSM und ASM, skaliert für HEV und den Zeitraum 2030	431
Tab. 10-7	Masse des Generators nach Huss et al. (2013) und die resultierenden Skalierungsfaktoren des Antriebskonzeptes für den Zeitraum 2010 bis 2030	431
Tab. 10-8	Masse des Leitungssatzes nach Huss et al. (2013) und die resultierenden Skalierungsfaktoren der jeweiligen Antriebskonzepte für den Zeitraum 2010 bis 2030	432
Tab. 10-9	Masse der Batterie der jeweiligen Antriebskonzepte für den Zeitraum 2010 bis 2030	432
Tab. 10-10	Masse der Brennstoffzelle nach Huss et al. (2013) und die resultierenden Skalierungsfaktoren des Antriebskonzeptes für den Zeitraum 2010 bis 2030	432
Tab. 10-11	Materialzusammensetzung für eine PEM-Brennstoffzelle	433
Tab. 10-12	Ecoinventprozesse zur Stromproduktion (electricity, production mix)	433

Abbildungsverzeichnis

Abb. 4-1	Anzahl der jährlich international vorgestellten elektrifizierten Fahrzeuge nach Antriebsstrangkonzzept	36
Abb. 4-2	Aufbau der Fahrzeugdatenbank	37
Abb. 4-3	Verteilung der identifizierten Fahrzeuge nach Heimatländern der Hersteller und Institutionen (alle Entwicklungsstufen 2001–2013)	39
Abb. 4-4	Gesamtzahl elektrifizierter Fahrzeuge nach Fahrzeugsegmenten von 2001 bis 2013	40
Abb. 4-5	Gesamtzahl der Fahrzeuge nach Elektrifizierungsgraden von 2001 bis 2013	40
Abb. 4-6	Anzahl der angekündigten und eingeführten Serienmodelle elektrifizierter Fahrzeuge nach Herstellern zwischen 2000 und 2013	41
Abb. 4-7	Elektrifizierte Fahrzeugkonzepte in den einzelnen Fahrzeugsegmenten von 2000 bis 2013	42
Abb. 4-8	Konzeptansatz elektrifizierter Fahrzeugkonzepte nach Fahrzeugherstellern	43
Abb. 4-9	Jährliche Anzahl der jeweiligen Antriebsstrangvarianten in neu vorgestellten Fahrzeugen	44
Abb. 4-10	Anzahl der jährlich neu vorgestellten Serienfahrzeuge sowie Prototypen und Konzepte mit elektrifiziertem Antriebsstrang	44
Abb. 4-11	Elektrifizierungsgrad der vorgestellten Fahrzeuge nach Fahrzeugherstellern	45
Abb. 4-12	Anteil der Elektrifizierungsvarianten pro Fahrzeuggewicht und Verteilung der elektrifizierten Fahrzeugkonzepte über Fahrzeuggewicht	46
Abb. 4-13	Anteil der Elektrifizierungsvarianten pro Systemleistungsklasse und Verteilung der elektrifizierten Fahrzeugkonzepte über Systemleistung	47
Abb. 4-14	Entwicklung der Anzahl der Fahrzeuge, welche mit den jeweiligen Energiespeichertechnologien ausgerüstet sind.	47
Abb. 4-15	Anteile der Energiespeichertechnologien bei den diversen Elektrifizierungsvarianten	48
Abb. 4-16	Entwicklung der Anzahl der Fahrzeuge mit Maschinen der jeweiligen Erregungsart	48
Abb. 4-17	Anteil der Erregungsarten an Elektrifizierungsgraden	49
Abb. 4-18	Installierte Antriebsleistung pro Fahrzeugmasse bei batterieelektrischen Fahrzeugen (ohne Slow-Speed-Vehicles)	50
Abb. 4-19	Installierte Batteriekapazität pro Fahrzeugmasse bei batterieelektrischen Fahrzeugen (ohne Slow-Speed-Vehicles)	51
Abb. 4-20	Installierte Antriebsleistung pro Fahrzeugmasse bei Plug-in-Hybriden	51
Abb. 4-21	Installierte Batteriekapazität pro Fahrzeugmasse bei Plug-in-Hybriden	52
Abb. 4-22	Installierte Antriebsleistung pro Fahrzeugmasse bei Voll-Hybriden	52

Abb. 4-23	Installierte Batteriekapazität pro Fahrzeugmasse bei Voll-Hybriden	53
Abb. 4-24:	Betrachtete Technologiefelder im Bereich Leistungselektronik	57
Abb. 4-25:	Anteil Patente für betrachtete Weltregionen	57
Abb. 4-26:	Anzahl Patente nach Weltregionen 2000–2012	59
Abb. 4-27	Anteil Patente im Bereich „Wandlertypen“	61
Abb. 4-28	Anteil Patente im Bereich „Wandler“ nach Weltregionen 2000–2012	62
Abb. 4-29	Anteil Patente nach „Wandlertypen“ über Weltregionen	62
Abb. 4-30	Anzahl Patente im Bereich Wechselrichter nach Weltregionen 2000–2012	63
Abb. 4-31	Anzahl Patente im Bereich Kondensator nach Weltregionen 2000–2012	66
Abb. 4-32	Anzahl Patente im Bereich Halbleiter nach Weltregionen 2000–2012	68
Abb. 4-33	Anzahl Patente im Bereich SiC nach Weltregionen 2000–2012	71
Abb. 4-34	Anzahl Institutionen mit Forschungsaktivitäten im Bereich SiC nach Weltregionen	72
Abb. 4-35	Innovationsnetzwerk im Bereich SiC – Denso (JP) und Nissan (JP)	73
Abb. 4-36	Innovationsnetzwerk im Bereich SiC – Siemens (DE) und Cree (US)	73
Abb. 4-37	Anzahl Patente im Bereich GaN nach Weltregionen 2000–2012	74
Abb. 4-38	Anzahl Institutionen mit Forschungsaktivitäten im Bereich GaN nach Weltregionen	76
Abb. 4-39	Innovationsnetzwerk im Bereich GaN – Sumitomo Electric Industries (JP) und Matsushita (JP)	76
Abb. 4-40	Innovationsnetzwerk im Bereich GaN – Toyota Motor (JP) und Cree (US)	77
Abb. 4-41	Betrachtete Technologiefelder im Bereich „Elektrische Maschine“	77
Abb. 4-42	Anzahl Patente im Bereich „Elektrische Maschine im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw“ 2000–2012	78
Abb. 4-43	Anteil Patente nach Weltregionen	78
Abb. 4-44	Anzahl Patente nach Weltregionen 2000–2012	79
Abb. 4-45	Anzahl Institutionen mit Forschungsaktivitäten im Bereich „Elektrische Maschinen im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw“	81
Abb. 4-46	Anteile der Erfindungen im Bereich „Bauformen“	83
Abb. 4-47	Anteil Patente im Bereich „Bauformen“ nach Weltregionen 2000–2012	84
Abb. 4-48:	Anteil Patente nach Bauformen über Weltregionen	84
Abb. 4-49	Anteil Publikationen nach Bauformen über Weltregionen	85
Abb. 4-50	Anzahl Patente im Bereich „Synchronmaschine“ nach Weltregionen 2000–2012	86
Abb. 4-51	Anzahl Institutionen mit Forschungsaktivitäten im Bereich „Synchronmaschine“	88
Abb. 4-52	Innovationsnetzwerke im Bereich „Synchronmaschine“ – Toyota Motor (JP) und Hitachi (JP)	90
Abb. 4-53	Anzahl Patente im Bereich „Asynchronmaschine“ nach Weltregionen 2000–2012	91

Abb. 4-54	Anzahl Institutionen mit Forschungsaktivitäten im Bereich „Asynchronmaschine“	91
Abb. 4-55	Anzahl Patente im Bereich „Asynchronmaschine erweitert“ nach Weltregionen 2000–2012	92
Abb. 4-56	Anzahl Patente im Bereich „Reluktanzmaschine“ nach Weltregionen 2000–2012	94
Abb. 4-57	Anzahl Patente im Bereich „Reluktanzmaschine erweitert“ nach Weltregionen 2000–2012	94
Abb. 4-58	Anzahl Patente im Bereich „Transversalflussmaschine erweitert“ nach Weltregionen 2000–2012	96
Abb. 4-59	Schwerpunkte der Publikationen nach Weltregionen und Komponenten/Bauteilen	98
Abb. 4-60	Anzahl Patente im Bereich „Stator“ für alle Bauformen nach Weltregionen 2000–2012	99
Abb. 4-61	Anzahl Patente im Bereich „Rotor“ für alle Bauformen nach Weltregionen 2000–2012	101
Abb. 4-62	Anteil Patente im Bereich „Wicklungen“ für Bauformen nach Weltregionen 2000–2012	103
Abb. 4-63	Anzahl Patente im Bereich „Thermomanagement“ für alle Bauformen nach Weltregionen 2000–2012	105
Abb. 4-64	Anteil Patente im Bereich „Thermomanagement“ für Bauformen nach Weltregionen 2000–2012	105
Abb. 4-65	Anzahl Patente im Bereich „Permanentmagnete“ für Synchron-, Reluktanz- und Transversalflussmaschine nach Weltregionen 2000–2012	108
Abb. 4-66	Für die Simulation verwendete Antriebsarchitekturen (links: ICE, mitte: PHEV, rechts: BEV)	111
Abb. 4-67	Effizienzkennfeld der verwendeten elektrischen Maschine	111
Abb. 4-68	Geschwindigkeitsprofil des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEDC)	112
Abb. 4-69	Geschwindigkeitsprofil des CADC-Urban-Fahrzyklus	112
Abb. 4-70	Geschwindigkeitsprofil des CADC-Road-Fahrzyklus	113
Abb. 4-71	Geschwindigkeitsprofil des CADC-Motorway-Fahrzyklus	113
Abb. 4-72	Endenergieverbrauch der Basisfahrzeuge in den unterschiedlichen Fahrzyklen	114
Abb. 4-73	Änderung des Endenergieverbrauchs des BEV durch Änderung der Fahrzeugmasse	115
Abb. 4-74	Änderung des Energieverbrauchs des PHEV durch die Änderung der Fahrzeugmasse	116
Abb. 4-75	Änderung des Endenergieverbrauchs des ICE durch Änderung der Fahrzeugmasse	117
Abb. 4-76	Einfluss der Änderung der festen Getriebeübersetzung (von 3:1 auf 5:1) auf den Energieverbrauch des BEV	118

Abb. 4-77	Betriebspunkte des BEV (Getriebeübersetzung $i=3$) bei simulierter Fahrt durch den CADC Autobahn Zyklus aufgetragen auf das Effizienzkennfeld der elektrischen Maschine	118
Abb. 4-78	Betriebspunkte des BEV (Getriebeübersetzung $i = 5$) bei simulierter Fahrt durch den CADC-Motorway-Zyklus aufgetragen auf das Effizienzkennfeld der elektrischen Maschine	119
Abb. 4-79	Betriebspunkte des BEV (Getriebeübersetzung $i = 3$) bei simulierter Fahrt durch den CADC-Urban-Zyklus aufgetragen auf das Effizienzkennfeld der elektrischen Maschine	119
Abb. 4-80	Betriebspunkte des BEV (Getriebeübersetzung $i = 5$) bei simulierter Fahrt durch den CADC-Urban-Zyklus aufgetragen auf das Effizienzkennfeld der elektrischen Maschine	120
Abb. 4-81	Betriebspunkte des BEV (Getriebeübersetzung $i = 5$) bei simulierter Fahrt durch den CADC-Motorway-Zyklus aufgetragen auf das modifizierte Effizienzkennfeld der elektrischen Maschine mit abgesenktem Spitzenwirkungsgrad	120
Abb. 4-82	Betriebspunkte des BEV (Getriebeübersetzung $i = 5$) bei simulierter Fahrt durch den CADC-Motorway-Zyklus aufgetragen auf das modifizierte Effizienzkennfeld der elektrischen Maschine mit angehobenem Spitzenwirkungsgrad	121
Abb. 4-83	Absolute und relative Änderung des spezifischen Energieverbrauchs beim BEV durch Eingriffe in die elektrische Maschine	122
Abb. 4-84	Absolute und relative Änderung des spezifischen Energieverbrauchs beim PHEV durch Eingriffe in die elektrische Maschine	122
Abb. 4-85	Betriebspunkte des PHEV bei simulierter Fahrt durch den CADC-Motorway-Zyklus aufgetragen auf das Effizienzkennfeld der elektrischen Maschine	123
Abb. 4-86	Betriebspunkte des PHEV bei simulierter Fahrt durch den CADC-Urban-Zyklus aufgetragen auf das Effizienzkennfeld der elektrischen Maschine	124
Abb. 4-87	Schematische Darstellung der Kundenmodellierung in <i>Vector21</i>	125
Abb. 4-88	Schematischer Aufbau des Kaufprozesses in <i>Vector21</i>	126
Abb. 4-89	Stufen der Kaufentscheidung des Kundenmodells von <i>Vector21</i>	127
Abb. 4-90	Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs (nach Regelung 101 UN/ECE)	128
Abb. 4-91	Neuwagenmarkt Basisszenario	129
Abb. 4-92	Von <i>Vector21</i> berechnete Entwicklung der Batterie-Zellkosten im Basisszenario	129
Abb. 4-93	Entwicklung des Fahrzeugbestands im Basisszenario	130
Abb. 4-94	Änderung der Anzahl der jeweiligen Antriebsstrangvarianten im Fahrzeugbestand für das 1. Alternativszenario gegenüber dem Basisszenario	131
Abb. 4-95	Differenz bei den Batteriekosten in den Alternativszenarien gegenüber dem Basisszenario	132
Abb. 4-96	Änderung der Anzahl der jeweiligen Antriebsstrangvarianten im Neuwagenmarkt für das 2. Alternativszenario gegenüber dem Basisszenario	133

Abb. 4-97	Änderung der Anzahl der jeweiligen Antriebsstrangvarianten im Fahrzeugbestand für das 2. Alternativszenario gegenüber dem Basisszenario	134
Abb. 4-98	Entwicklung des Energieverbrauchs von BEV und PHEV im 3. Alternativszenario	135
Abb. 4-99	Änderung der Anzahl der jeweiligen Antriebsstrangvarianten im Neuwagenmarkt für das 3. Alternativszenario gegenüber dem Basisszenario	135
Abb. 4-100	Änderung der Anzahl der jeweiligen Antriebsstrangvarianten im Fahrzeugbestand für das 3. Alternativszenario gegenüber dem Basisszenario	136
Abb. 5-1	Verteilung der Projektbudgets auf Forschungsbereiche in Deutschland mit Stand 2012	146
Abb. 5-2	Produktion von HEV / PHEV, BEV und konventionellen Fahrzeugen in Deutschland 2010 - 2013	150
Abb. 5-3	Pkw-Bestand in Deutschland im Januar 2014 nach Kraftstoffarten	152
Abb. 5-4	Neuzulassungen von BEV, PHEV / HEV und konventionellen Pkw in Deutschland	153
Abb. 5-5	Marktanteile: Meist verkaufte Modelle nach Herstellern im Jahr 2013	153
Abb. 5-6	Überblick über die Marktdurchdringung von PEV in Deutschland in verschiedenen Szenarienprojektionen (dargestellt auf Basis des Marktanteils in 2020 und 2030 in verschiedene Szenarioprojektionen) [**nur BEV]	155
Abb. 5-7	Förderung der Europäischen Kommission unter der "European Green Cars Initiative"	164
Abb. 5-8	Aufteilung des Förderbudgets auf EU und Mitgliedsstaaten am Gesamtinvestitionsvolumen von 1,4 Mrd Euro	166
Abb. 5-9	Investitionen in FuE Projekte nach Fahrzeugkomponenten im EU-Vergleich	167
Abb. 5-10	Anzahl von BEV und PHEV an Verkäufen/Registrierungen und Marktanteil im Jahr 2013	170
Abb. 5-11	Förderstrategie Elektromobilität USA	174
Abb. 5-12	Ladestationen in den USA inkl. Ladepunkte	176
Abb. 5-13	Anzahl abgesetzter PEV in den USA nach Verkaufsjahr und Herkunftsland	179
Abb. 5-14	Darstellung der Next Generation Vehicle Strategy 2010	183
Abb. 5-15	Entwicklung der Forschungsbudgets für die Elektromobilität in den Fünf-Jahres-Plänen der Zentralregierung	196
Abb. 5-16	Chinas Politik und Aktivitäten im Bereich Elektromobilität	197
Abb. 5-17	Jährliche Autoproduktion in China	198
Abb. 5-18	Projizierte Nachfrage nach xEV in Indien bis 2020 laut NEMMP 2020	202
Abb. 5-19	Gesamthöhe der Subventionen in verschiedenen Ländern für einen Renault Zoe (BEV, 65 kW) im Vergleich zu einem Renault Clio (Benzin, 66 kW)	219
Abb. 5-20	Gesamtkosten (TCO) über vier Jahre in ausgewählten Ländern für einen Renault Zoe (BEV, 65 kW) im Vergleich zu einem Renault Clio (Benzin, 66 kW)	220

Abb. 5-21	Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur in verschiedenen Regionen	221
Abb. 5-22	Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur in verschiedenen Regionen je 100 000 Einwohner	222
Abb. 5-23	Öffentliche Ausgaben zur Förderung von Forschung, Entwicklung und Demonstration von Elektromobilität (inkl. Brennstoffzellenfahrzeuge) (2008-2012)	224
Abb. 5-24	Öffentliche Ausgaben zur Förderung von Forschung, Entwicklung und Demonstration kumulativ über 2008 - 2012	224
Abb. 5-25	Laufende FuE Förderung zur Elektromobilität in 2014 (bis 2016)	225
Abb. 5-26	Verteilung der Forschungsfördermittel den USA (laut DOE)	226
Abb. 5-27	Verteilung der Forschungsfördermittel in Japan (laut METI,MLIT,NEDO. MEXT-Daten nicht beinhaltet)	227
Abb. 5-28	Verteilung der Forschungsbudgets in Deutschland in den Leuchttürmen der NPE	228
Abb. 5-29	Verteilung der Forschungsfördermittel der Europäischen Kommission im Rahmen der European Green Cars Initiative	229
Abb. 5-30	Gesamtförderbudget zentraler Demonstrationsprojekte in der öffentlichen Förderung im Vergleich	231
Abb. 5-31	Anzahl produzierter Pkw in 2012 in den Untersuchungsregionen	232
Abb. 5-32	PEV-Serienmodelle nach Herstellerländern die zwischen 2006 und 2013 vorgestellt wurden (kumulativ)	233
Abb. 5-33	Anzahl der Konzeptfahrzeuge, Prototypen und der angekündigten und eingeführten elektrischen Fahrzeuge nach Herstellern und Elektrifizierungsgrad, Stand April 2014	234
Abb. 5-34	Anzahl der Konzeptfahrzeuge, Prototypen und der angekündigten sowie eingeführten elektrischen Fahrzeuge nach Herstellern und Designansatz	235
Abb. 5-35	Jährliche Produktion von elektrischen Pkw in Japan und Deutschland	236
Abb. 5-36	Marktanteile der erfolgreichsten Modelle am PEV-Gesamtabsatz in Deutschland 2013	237
Abb. 5-37	Marktanteile der erfolgreichsten Modelle am PEV-Gesamtabsatz in Frankreich 2013	237
Abb. 5-38	Marktanteile der erfolgreichsten Modelle am PEV-Gesamtabsatz in Norwegen 2013	237
Abb. 5-39	Marktanteile der erfolgreichsten Modelle am PEV-Gesamtabsatz in den USA 2013	238
Abb. 5-40	Marktanteile der erfolgreichsten PEV-Modelle am PEV-Gesamtabsatz in Japan 2013	238
Abb. 5-41	Marktanteile der erfolgreichsten PEV-Modelle am PEV-Gesamtabsatz in China 2011	238
Abb. 5-42	Weltweite jährliche Verkäufe von PEV (Pkw) von 2009 bis 2013	240

Abb. 5-43	Jährliche Registrierungen/Verkäufe Marktanteile (Neuwagen) von PEV in den untersuchten Ländern (+ Niederlande, ohne Indien) im Jahr 2013 im internationalen Vergleich	241
Abb. 5-44	Zeitlicher Verlauf der Marktentwicklung von PEV in ausgewählten Ländern, unten: Verlauf im Detail ohne Norwegen	242
Abb. 5-45	Prognostizierter Marktanteil von BEV und PHEV (inkl. REEV) in 2020 in verschiedenen Studien in Prozent	247
Abb. 5-46	Prognostizierte Verkäufe von BEV und PHEV (inkl. REEV) in 2020 im IEA 2DS Szenario	248
Abb. 6-1	Überblick über die Arbeitsschritte der Materialintensitätsanalyse	255
Abb. 6-2	Anteile der Fahrzeugsegmente am Pkw-Bestand	259
Abb. 6-3	Im Rahmen dieser Studie berücksichtigte Antriebskonzepte des mittleren Pkw-Segments	260
Abb. 6-4	Angenommene Entwicklung der Anteile verschiedener Wasserstoffbereitstellungspfade an der Wasserstofferzeugung	266
Abb. 6-5	Kumulierte Materialzusammensetzung der Herstellungsphase inklusive Verluste je Antriebskonzept	283
Abb. 6-6	Herstellungsphase: Kumulierte Materialzusammensetzung der batterieelektrischen Antriebskonzepte inklusive Verluste je Systemkomponente in 2010	284
Abb. 6-7	Herstellungsphase: Kumulierte Materialzusammensetzung der batterieelektrischen Antriebskonzepte inklusive Verluste je Systemkomponente in 2050	284
Abb. 6-8	Anteile der Energieträger an der Bruttostromerzeugung für Deutschland von 2010 bis 2050 nach dem BMU Szenario 2011 A	287
Abb. 6-9	Anteile der Energieträger an der Bruttostromerzeugung für die Welt von 2010 bis 2050 nach dem EREC revolution-Szenario	288
Abb. 6-10	Abiotischer Materialbedarf der Herstellungsphase der batterieelektrischen Antriebskonzepte nach Systemkomponenten für das Jahr 2010	291
Abb. 6-11	Abiotischer Materialbedarf der Herstellungsphase der batterieelektrischen Antriebskonzepte nach Systemkomponenten für das Jahr 2050	292
Abb. 6-12	Vergleich des abiotischen Materialbedarfs für die Nutzungsphase mit den Szenarien BMU 2011 A, EREC und 100 % RE je Antriebskonzept (Elektromobilität) für das Jahr 2010	295
Abb. 6-13	Lebenszyklusübergreifender Vergleich (Herstellung, Nutzung, End of Life) des abiotischen Materialbedarfs aller Antriebskonzepte und für den gesamten Betrachtungszeitraum (Angaben bezogen auf ein Jahr); Deutschland-Szenario als Grundlage	297
Abb. 6-14	Lebenszyklusübergreifender Vergleich (Herstellung, Nutzung, End of Life) des Treibhauspotentials (GWP 100) aller Antriebskonzepte und für den gesamten Betrachtungszeitraum. (Angaben bezogen auf ein Jahr), Deutschland-Szenario als Grundlage	300

Abb. 6-15	Verkehrsleistung im motorisierten Personenverkehr 2009	303
Abb. 6-16	Übersicht Studien zur Verkehrsentwicklung in Deutschland	306
Abb. 6-17	Referenzentwicklung der Verkehrsleistungen im motorisierten Personenverkehr	306
Abb. 6-18	Entwicklung Bevölkerungsgröße und Pkw-Bestand	307
Abb. 6-19	IEA-Szenarien	312
Abb. 6-20	Erweiterte IEA Szenarien	313
Abb. 6-21	Abiotischer Materialbedarf des Pkw-Verkehrs in Deutschland nach Verkehrsszenarien	316
Abb. 6-22	Abiotischer Materialbedarf des Pkw-Verkehrs in Deutschland nach Verkehrsszenarien, Gegenüberstellung der Zeiträume 2011-2020 und 2041-2050)	318
Abb. 6-23	Abiotischer Materialbedarf des Pkw-Verkehrs weltweit nach Verkehrsszenarien	319
Abb. 6-24	Abiotischer Materialbedarf des Pkw-Verkehrs in Deutschland nach Verkehrsszenarien, Gegenüberstellung der Zeiträume 2011-2020 und 2041-2050)	320
Abb. 6-25	Treibhausgaspotenzial des Pkw-Verkehrs in Deutschland nach Verkehrsszenarien	322
Abb. 6-26	GWP des Pkw-Verkehrs in Deutschland nach Verkehrsszenarien, Gegenüberstellung der Zeiträume 2011-2020 und 2041-2050)	323
Abb. 6-27	Treibhausgaspotenzial des Pkw-Verkehrs weltweit nach Verkehrsszenarien	325
Abb. 6-28	GWP des Pkw-Verkehrs weltweit nach Verkehrsszenarien, Gegenüberstellung der Zeiträume 2011-2020 und 2041-2050)	326
Abb. 6-29	Kritikalität und Verwendung von Elementen	329
Abb. 6-30	Entwicklung der Produktion von Seltenen Erden nach Ländern	330
Abb. 6-31	Verteilung der Reserven an Seltenen Erden	331
Abb. 6-32	Verteilung der Reserven von Neodym und Praseodym	334
Abb. 6-33	Verteilung der Reserven von Dysprosium und Terbium	335
Abb. 6-34	Verfügbare Vorkommen an Seltenen Erden in Abhängigkeit vom TMR	337
Abb. 6-35	Entwicklung der Produktion von Lithium	338
Abb. 6-36	Verteilung der Reserven an Lithium	339
Abb. 6-37	TMR, THG und Kosten der Gewinnung und Aufbereitung von Lithiumrohstoffen	341
Abb. 6-38	Verfügbare Lithiumreserven und -ressourcen in Abhängigkeit von TMR, THG und Gewinnungskosten	342
Abb. 6-39	Entwicklung der Produktion von Silber nach Ländern	343
Abb. 6-40	Verteilung der Reserven von Silber	343
Abb. 6-41	Entwicklung der Produktion von Gold nach Ländern	345
Abb. 6-42	Verteilung der Reserven nach Ländern	346
Abb. 6-43	Entwicklung der Produktion von Palladium	347

Abb. 6-44	Verteilung der Reserven von Palladium	347
Abb. 6-45	Entwicklung der Produktion von Platin nach Ländern	348
Abb. 6-46	Verteilung der Reserven von Platin	348
Abb. 6-47	Entwicklung der Produktion von Indium	350
Abb. 6-48	Entwicklung der Produktion von Germanium nach Ländern	351
Abb. 6-49	Entwicklung der Produktionsmengen von Tantal nach Ländern	352
Abb. 6-50	Verteilung der Reserven von Tantal	353
Abb. 6-51	Vergleich der Antriebskonzepte und THG-Emissionen der Nutzungsphase im Jahr 2010; Vergleich Deutschland-Szenario und 100% EE-Strom	356
Abb. 6-52	Vergleich der Antriebskonzepte und des abiotischen Materialbedarfs der Nutzungsphase im Jahr 2010; Vergleich Deutschland-Szenario und 100% EE-Strom	357
Abb. 6-53	Abiotischer Materialbedarf Deutschland: Sensitivität mit ausschließlich erneuerbarer elektrischer Traktionsenergie und beschleunigtem Technologiewechsel von PSM auf ASM	358
Abb. 6-54	Treibhausgaspotenzial Deutschland: Sensitivität mit ausschließlich erneuerbarer elektrischer Traktionsenergie und beschleunigtem Technologiewechsel von PSM auf ASM	359
Abb. 6-55	Bedarf an Lithium im weltweiten Pkw-Bestand nach Szenarien und Jahren	360
Abb. 7-1	Wissensbasis „Elektrische Maschinen“ im Ländervergleich, 2002–2012 kumuliert	369
Abb. 7-2	Wissensbasis „Leistungselektronik“ im Ländervergleich, 2002–2012 kumuliert	370
Abb. 7-3	Technologische Basis „Elektrische Maschinen“ im Ländervergleich, 2002–2012 kumuliert	371
Abb. 7-4	Technologische Basis „Leistungselektronik“ im Ländervergleich, 2002–2012 kumuliert	373
Abb. 7-5	Anzahl registrierter PEV in Deutschland in 2020 nach verschiedenen Studien und Szenarien	386
Abb. 7-6	Prognostizierter Marktanteil von BEV und PHEV (inkl. REEV) in 2020 und 2030 verschiedener Studien in Prozent	388
Abb. 7-7	Kaufanreize (als Anteil des Fahrzeuggrundpreises) für BEV und PHEV im Vergleich zu Marktanteilen 2012 und 2013 für ausgewählte Länder	389
Abb. 7-8	Ladeinfrastruktur und Marktanteile	390
Abb. 7-9	BEV/PHEV-Serienmodelle (kumulativ über die Jahre) und weltweite Verkäufe	391
Abb. 7-10	CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung in g/kWh	393

1 Kurzfassung

M. Klötzke (DLR), B. Frieske (DLR), H. Hüging (WI), T. Koska (WI), O. Soukup (WI), M. Ritthoff (WI), K. Bienge (WI)

Die Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität (STROMbegleitung) untersucht verschiedene Aspekte in Bezug auf Stand und Entwicklung der Elektromobilität im internationalen Umfeld. Neben einer Untersuchung genereller Rahmenbedingungen konzentriert sie sich auf eine technische und ökobilanzielle Analyse elektrifizierter Fahrzeugkonzepte und relevanter Schlüsseltechnologien der Elektromobilität. Der jeweilige Untersuchungsrahmen wurde in enger Abstimmung mit den Forschungs- und Entwicklungsprojekten festgelegt, die im Rahmen der Förderbekanntmachung „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)“ vom 01.04.2010 durch das BMBF gefördert wurden. Die verschiedenen Aspekte waren:

- Trendanalyse zu Fahrzeugtechnik und -konzepten (Kapitel 4),
- regionale Übersicht zum Monitoring der Elektromobilitätsarena (Kapitel 5),
- Materialintensitätsanalysen (Kapitel 6).

Trendanalyse zu Fahrzeugtechnik und -konzepten

Bestandteil der Arbeiten zur Trendanalyse von Fahrzeugtechnik und -konzepten ist unter anderem die Analyse eingesetzter Technologien und vorgestellter Konzepte elektrifizierter Pkw. Zu diesem Zweck wird eine neu entwickelte Datenbank verwendet, in der elektrifizierte Pkw, die entweder als Serien- oder Kleinserienfahrzeuge auf dem Markt erhältlich sind oder als Konzept-, Prototyp- und Forschungsfahrzeuge auf Automobilmessen vorgestellt wurden, bis auf Bauteil- und Parameterebene analysiert werden. Insgesamt sind für den Zeitraum 2000 bis 2013 weltweit über 500 elektrifizierte Fahrzeugkonzepte identifiziert sowie Informationen zu ausgewählten Technologien sowie zu Aufbau und Anordnung der verbauten elektrischen Komponenten erfasst und analysiert. Der Fokus liegt dabei in Abstimmung mit den Forschungs- und Entwicklungsprojekten auf Themen des Antriebsstrangs, insbesondere auf elektrischen Maschinen, der Leistungselektronik und verschiedenen Technologien für Traktionsbatterien. Es kann gezeigt werden, dass die Aktivitäten internationaler Automobilhersteller im Bereich elektrifizierter Fahrzeugkonzepte (xEV) erstmals ab dem Jahr 2006 und insbesondere ab 2009 weltweit deutlich zunahmen.

Ab 2012 ist ein Rückgang der jährlich neu vorgestellten Fahrzeuge zu verzeichnen. Während sich hybridelektrische Fahrzeuge ohne externe Ladeinheit (HEV) mit einer recht konstanten Zahl in den Analysen zeigen, ist ab 2009 eine deutliche Zunahme vorgestellter und/oder in den Markt eingeführter batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV) festzustellen. Überdies nimmt die Bedeutung hybridelektrischer Fahrzeuge mit externer Ladeinheit (PHEV) seit 2007 insofern kontinuierlich zu, als PHEV im Jahr 2013 nach BEV den größten Anteil neu vorgestellter Fahrzeuge ausmachten. Auch ergeben die Analysen, dass mit zunehmender Fahrzeugmasse der Elektrifizierungsgrad innerhalb der elektrifizierten Fahrzeuge abnimmt. Während bei Fahrzeugen unter 1000 kg hauptsächlich BEV zu finden sind, steigt der Anteil an HEV bei schweren Fahrzeugen signifikant an. Den größten Anteil an PHEV findet man zwischen einem Fahrzeugleergewicht von 1500 kg und 2000 kg. Aus technologischer Sicht machen

permanent erregte Synchronmaschinen den eindeutig größten Anteil bei xEV aus (über 90 %). Hier gibt es auch bei den neueren Entwicklungen keine signifikanten Änderungen. Es kann lediglich festgehalten werden, dass bei BEV der Anteil alternativer elektrischer Maschinenkonzepte etwas höher ausfällt als bei hybridisierten Fahrzeugen. Auch bei Batterietechnologien kann eine deutliche Dominanz von Li-Ionen-Zellen beobachtet werden, insbesondere bei höher elektrifizierten Fahrzeugen, wenngleich der Anteil nur bei knapp 80 % liegt. Vor dem Jahr 2007 kamen mehrheitlich Nickel-Metall-Hydrid-Batterien zum Einsatz, die v. a. bei HEV verbaut wurden.

Neben der Untersuchung eingesetzter Technologien im Rahmen des Gesamtfahrzeugkonzepts werden weitere Trendanalysen auch über umfangreiche globale bibliometrische Analysen von Patent- und Publikationsdaten durchgeführt. Dies dient der Abbildung von Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten in frühen Stadien der Technologieentwicklung und dem Vergleich der internationalen Forschungslandschaft bei ausgewählten Schlüsseltechnologien im speziellen Umfeld der Elektromobilität. Knapp 52 000 Publikationen und 82 000 Patente im Bereich von Hybrid- und Elektrofahrzeugen wurden erfasst und über einen Zeitraum von ca. zehn Jahren analysiert. Die Untersuchung zeigt beispielsweise, dass insbesondere japanische Unternehmen in ausgewählten Feldern der Leistungselektronik, wie z. B. Halbleiter und Halbleitermaterialien, eine dominante Position einnehmen und Treiber der Technologieentwicklung sind.

Um die Auswirkungen technischer Entwicklungen auf den Energieverbrauch auf Fahrzeugebene zu beleuchten, werden als weiterer Bestandteil der Trendanalyse elektrifizierte Fahrzeuge simuliert, d. h. umfangreiche Parametervariation von Fahrwiderständen (durch Änderung der Fahrzeugmasse sowie des Luftwiderstandsbeiwerts) sowie der Effizienz von elektrischer Maschine und Leistungselektronik durchgeführt. Dabei kann z. B. gezeigt werden, dass unter Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrzyklen der Einfluss einzelner Parameter auf den Energieverbrauch des Fahrzeugs stark variieren kann, sodass Einzelmaßnahmen nur erschwert bewertet werden können.

Darüber hinaus werden diverse Szenarien berechnet und analysiert, um die Diffusion elektrifizierter Pkw in den deutschen Neuwagenmarkt unter Berücksichtigung wechselnder Rahmenbedingungen zu untersuchen. In diesem Zusammenhang kann festgehalten werden, dass eine weitere Steigerung der Effizienz elektrifizierter Fahrzeuge gegenüber den Entwicklungen in einem Basisszenario einen eher geringen Einfluss auf den Anteil elektrifizierter Fahrzeuge im Neuwagenmarkt mit sich bringt. Der Einfluss einer rascheren Minderung der Batteriekosten, z. B. durch verbesserte Produktionsprozesse oder einen höheren globalen Absatz, ist deutlich signifikanter.

Regionale Übersicht zum Monitoring der Elektromobilitätsarena

Zum regionalen und globalen Monitoring der Elektromobilitätsarena wurden fünf Fokusregionen (USA, Japan, Europa, China und Indien) ausgewählt. In Länderstudien wurden die aktuellen Rahmenbedingungen und Trends zur Elektromobilität auf Basis einer Analyse wissenschaftlicher und politischer Dokumente sowie leitfadengestützter Experteninterviews nach einem einheitlichen Analyseraster untersucht. Betrachtet wurden dabei die Bereiche Politik und öffentliche Infrastruktur, Forschung und Entwicklung, Wirtschaft und Industrie sowie Verbraucher und Markt.

Auf Basis der Ergebnisse lassen sich die Entwicklungen in Deutschland im internationalen Vergleich einordnen und die globalen Trends der Elektromobilität aufzeigen.

Die Verbreitung der Elektromobilität wird aktuell noch durch verschiedene Faktoren – wie hohe Anschaffungskosten, begrenzte Reichweite und begrenzte Infrastrukturverfügbarkeit sowie technologische Reife – gehemmt.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass der politische Rahmen einen Teil dieser Faktoren beeinflussen kann und daher einen entscheidenden Einfluss auf die Marktentwicklung hat. In vielen Ländern wurden Kaufanreize in Form von direkten Subventionen oder Steuerbegünstigungen geschaffen. Am stärksten unter den betrachteten Ländern fallen diese in Norwegen aus, wo BEV durch hohe Steuernachlässe und zusätzliche monetäre Anreize für den Nutzer bereits heute eine wirtschaftliche Alternative zu einem konventionellen Fahrzeug darstellen. Zusätzlich gestützt von nicht monetären Anreizen und einem intensiven Infrastrukturaufbau konnte Norwegen durch das starke Anreizsystem die höchste weltweite Pro-Kopf-Rate an BEV erreichen. Die Kaufanreize in Japan, Großbritannien, Frankreich oder den USA fallen zumeist geringer aus, sodass die Preisdifferenz zu konventionellen Fahrzeugen nicht ausgeglichen wird. Neben dem Anreizsystem für potenzielle Kunden profitieren Elektrofahrzeuge in einigen Ländern von Emissions- oder Effizienzstandards, wie den CO₂-Flottengrenzwerten der EU, den Fahrzeugeffizienzstandards in Japan oder der „Zero-Emission-Vehicle“-Gesetzgebung in den USA.

Länder, die eine bedeutende Automobilindustrie ausweisen oder entwickeln wollen (insbesondere Deutschland, Japan, USA, China), investieren vergleichsweise hohe Summen in die Forschung und Entwicklung (FuE) zu Elektrofahrzeugen. Neben dem Ziel, eine höhere Marktdurchdringung durch technische Verbesserungen und Herstellungskostenreduzierung zu erreichen, steht dabei auch die Positionierung der heimischen Automobilindustrie auf dem Zukunftsmarkt Elektromobilität im Vordergrund. Die Förderung von FuE-Aktivitäten adressiert in den betrachteten Ländern verschiedene Aspekte der Elektromobilität; Schwerpunkte sind meist Energiespeichertechnologien (Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Batterie und Entwicklung von Post-Lithium-Ionen-Batterien) und Verbesserungen der Leistungselektronik. China und Indien haben das Ziel, verstärkt Kompetenzen in der Entwicklung und Produktion von Elektrofahrzeugen aufzubauen. China setzt dabei insbesondere auf internationale Kooperationen, während sich Indien in erster Linie auf den heimischen Markt konzentriert und bestehende Technologien an die indischen Bedingungen und Ansprüche anzupassen versucht. Auf Basis derzeit laufender und angekündigter Förderprogramme steht Deutschland im internationalen Vergleich sehr gut da und weist unter anderem auch ein höheres FuE-Budget als Japan auf. Europaweite Analysen weisen für Deutschland unter den europäischen Staaten die höchsten FuE-Investitionen im Bereich Elektromobilität aus. Zudem ist die Beteiligung deutscher Institutionen an europäischen Forschungsprojekten, beispielsweise im Rahmen der Green Cars Initiative, sehr hoch.

Heute international verfügbare BEV- und PHEV-Serienmodelle stammen hauptsächlich von japanischen, amerikanischen, deutschen und französischen Herstellern. Die Automobilindustrie in Japan (und z. T. in den USA) hat bei der Entwicklung marktreifer Fahrzeugmodelle zunächst eine Vorreiterrolle übernommen und stellt aktuell die am Markt erfolgreichsten Modelle. Deutsche Produzenten haben in Bezug auf Fahrzeugtechnologien und -modelle im globalen Wettbewerb zum Teil aufgeholt, insgesamt findet aber noch ein Großteil der globalen Produktion von BEV und PHEV in Japan statt. Neben den Modellen japanischer OEM

werden dort auch im Rahmen der Kooperation mit Mitsubishi die Modelle von Citroën und Peugeot gefertigt. Mit ca. 20 000 produzierten elektrifizierten Fahrzeugen (BEV/PHEV/HEV) liegt Deutschland deutlich hinter den 1,3 Mio. in Japan produzierten elektrifizierten Fahrzeugen.

Tendenziell dominieren – soweit verfügbar – Modelle heimischer Hersteller von Elektrofahrzeugen den heimischen Markt, wie der Smart Fortwo Electric Drive in Deutschland, der Renault Zoe in Frankreich, der Chevrolet Volt in den USA oder der Nissan Leaf in Japan. Durch die spezifischen Rahmenbedingungen in China sind dort in erster Linie Modelle chinesischer Hersteller bzw. aus Joint Ventures mit ausländischen OEM verfügbar. In Indien sind derzeit kaum elektrifizierte Pkw verfügbar. Das vom indischen Hersteller Mahindra REVA produzierte Modell e2o ist derzeit das einzige BEV-Modell auf dem indischen Markt, und HEV-Modelle ausländischer OEM finden bislang kaum Absatz.

Der derzeitige Markt für Elektrofahrzeuge wird in einigen Ländern (insbesondere China, Japan und Deutschland) intensiv durch den Einsatz in Demonstrationsprojekten geprägt, die die Anwendung von Elektrofahrzeugen in der Praxis testen und Nutzer mit der Elektromobilität vertraut machen sollen. In China stehen die nationalen Subventionen für Elektrofahrzeuge nur in den Regionen zur Verfügung, die am Demonstrationsprojekt „10 Cities – 1000 Vehicles“ teilnehmen und in Japan werden durch die Demonstrationsprojekte zusätzliche, über die allgemeine Förderung hinausgehende Subventionen vergeben.

In Deutschland wird neben den in den Modell- und Schaufensterregionen eingesetzten Elektrofahrzeugen ein signifikanter Anteil der registrierten BEV in Carsharing-Flotten verwendet.

Technische Entwicklung, steigende Anzahl verfügbarer Serienmodelle sowie Anreize und Investitionen in Kaufanreize und Infrastrukturaufbau ließen die jährlichen weltweiten PEV-Verkäufe in den letzten Jahren deutlich zunehmen: 2013 wurden weltweit 210 000 PEV verkauft, ca. die Hälfte in den USA – dem derzeit größten Markt für PEV. In Europa waren die Niederlande der größte Abnehmer von PEV im Jahr 2013. Daneben ist Norwegen trotz seines relativ kleinen Gesamtmarkts einer der wichtigsten Märkte für BEV in Europa. Mit einem PEV-Anteil von 7,6 % unter den Neuwagen im Jahr 2013 hat Norwegen den weltweit höchsten Marktanteil von PEV. In den meisten Ländern liegt der Marktanteil noch deutlich unter einem Prozent. Deutschland hat zwar in Europa den größten Markt für Neuwagen, spielt jedoch bei den Verkäufen von PEV auch in absoluten Zahlen eine geringere Rolle als Frankreich, Norwegen oder die Niederlande. Mit einem PEV-Anteil unter den Neuregistrierungen von ca. 0,3 % liegt Deutschland hinter den USA, Japan und Frankreich, indes vor China und Großbritannien.

Materialintensitätsanalysen

Die Materialintensitätsanalyse hat den Bedarf an stofflichen und energetischen Ressourcen (abiotischer Materialbedarf) unterschiedlicher Elektromobilitätsstrategien im Bereich des Pkw-Verkehrs bis 2050 untersucht. Diese wurden basierend auf dem MIPS-Konzept „Material-Input pro Service-Einheit“ (MIPS) (Schmidt-Bleek et al. 1998, Liedtke et al. 2014) abgeschätzt und in Relation zu einer Referenzentwicklung betrachtet. Ergänzend zum Materialbedarf wurden auch die Emissionen von Treibhausgasen (THG) berücksichtigt. Es wurden vierrädrige Pkw des mittleren Fahrzeugsegments untersucht, wobei zwischen drei konventionellen sowie fünf elektrifizierten Antriebskonzepten unterschieden wurde.

Auf Fahrzeugebene weisen elektrifizierte Konzepte durch zusätzlich erforderliche Komponenten und deren Materialbedarf (z. B. Batterie, E-Motor) in der Herstellung in der Regel einen höheren abiotischen Materialbedarf als verbrennungsmotorische Konzepte (ICEV) auf. Über den betrachteten Zeitraum zeigt sich eine Annäherung des Materialbedarfs in der Herstellungsphase von ICEV und elektrifizierten Konzepten (xEV). Generell lässt sich über alle Antriebskonzepte dem Glider der größte Anteil am abiotischen Materialbedarf zuordnen. Daneben haben bei den xEV die Batterie und die Leistungselektronik einen höheren Einfluss. Über alle Lebenszyklusphasen ist eine deutliche Annäherung aller Antriebskonzepte über den Betrachtungszeitraum erkennbar, vor allem durch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien in der Nutzungsphase.

Beim Treibhauspotenzial zeigt sich für die Nutzungsphase die größte Klimawirkung – außer bei BEV ab 2020 und Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) ab 2010. Über die Zeit ist eine deutliche THG-Reduktion erkennbar, bedingt durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien. Die Herstellung aller Antriebskonzepte weist geringere Unterschiede bezüglich des Treibhauspotenzials auf als beim abiotischen Materialbedarf. Insgesamt entscheidet die Art der Bereitstellung elektrischer Energie über das Treibhauspotenzial.

Alle Elektromobilitätsszenarien für *Deutschland* weisen gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektromobilität über den gesamten Betrachtungszeitraum einen erhöhten *abiotischen Materialbedarf* auf. Mit steigender Elektrifizierung der Flotte erhöht sich auch der kumulierte abiotische Materialbedarf. Durch verbesserte Fahrzeugeigenschaften in allen Szenarien kann eine Reduktion des Materialbedarfs einzelner Dekaden innerhalb des Betrachtungszeitraums erreicht werden. Mit zunehmendem Anteil elektrifizierter Fahrzeuge fällt diese Reduktion des Materialbedarfs der letzten im Vergleich zur ersten Dekade jedoch schwächer aus. Die Elektrifizierung der Pkw-Flotten allein ist demnach nicht geeignet, den Materialbedarf des Pkw-Verkehrs in Deutschland gegenüber einer Flotte ohne elektrische Antriebe weiter zu senken. Um dieses Ziel zu erreichen, sind weitere Maßnahmen notwendig, wie z. B. Materialsubstitutionen in der Fahrzeugherstellung oder strukturelle Ansätze, die auf eine intelligentere Nutzung mit besserer Auslastung des Pkw-Verkehrs sowie auf verlängerte Nutzungsdauern der Fahrzeuge abzielen.

Die berechneten kumulierten *THG-Emissionen* für *Deutschland* liegen je nach Szenario zwischen 4 und 5 Gt CO₂-Äquivalenten. Im Gegensatz zum abiotischen Materialbedarf zeigt sich, dass alle Elektromobilitätsszenarien gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektromobilität über den gesamten Betrachtungszeitraum niedrigere THG-Emissionen aufweisen, wobei mit steigendem Anteil elektrifizierter Fahrzeuge jeweils auch ein weiterer Rückgang der Emissionen verbunden ist. Die ermittelten THG-Einsparungen der STROM-Szenarien sind auf die bessere THG-Bilanz der elektrifizierten Fahrzeuge durch die zunehmende CO₂-arme Bereitstellung elektrischer Antriebsenergie aus erneuerbaren Quellen zurückzuführen. Die Auswertung der Deutschland-Szenarien hinsichtlich der THG-Emissionen ergibt die Elektrifizierung der Pkw-Flotten als geeignete Maßnahme, um die THG-Emissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland zu reduzieren. Dabei kann sowohl eine absolute Senkung der Emissionen im Zeitverlauf als auch eine Reduktion gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektrofahrzeuge erreicht werden.

Bei der Elektromobilität bestehen folgende Abhängigkeiten von kritischen Rohstoffen: Die eingesetzten Elektromotoren nutzen häufig Permanentmagneten auf der Basis von Seltenerdmetallen, aufgrund deren hoher Feldstärke erhebliche Massevorteile erreicht werden

können. Seltenerdmetalle liegen in deutlich unterschiedlicher Verfügbarkeit vor: Für Neodym und Praesodym erscheint sie unkritisch, während für Dysprosium und Terbium, das zur Erhöhung der Curie-Temperatur eingesetzt werden muss, die Nachfrage aus der Elektromobilität bezogen auf die betrachteten Szenarien eine kritische Größe erreicht. Es besteht eine hohe Abhängigkeit von wenigen Lieferländern (insbesondere China, nachrangig USA, unter Umständen auch Grönland). Des Weiteren können Lieferbeschränkungen einzelner Länder erhebliche Auswirkungen auf die Versorgungslage haben. Recycling kann kurzfristig kaum zu einer Entspannung der Versorgungslage beitragen, da der Anfall an Sekundärmaterial noch zu gering ist und einem hochwertigen Recycling von Seltenerdmetall-Permanentmagneten noch verfahrenstechnische Hürden im Wege stehen.

Die meisten Batterien für Elektrofahrzeuge werden auch zukünftig auf Lithium basieren. Die Nachfrage nach Lithium aus der Elektromobilität erreicht in den betrachteten Szenarien eine kritische Größe, deren Abdeckung unklar ist, da bereits ein einmaliger Bestandsaufbau einen erheblichen Teil der Lithiumreserven (ca. 21 %) benötigt. Auch unter der Annahme einer Etablierung von Recyclingsystemen für Lithium verbleibt daher ein kritisch hoher Bedarf nach Lithium aus der Elektromobilität. Daneben wird bei steigender Nachfrage nach Lithium mit zunehmenden Umweltbelastungen bei der Gewinnung und anwachsenden Gewinnungskosten zu rechnen sein, da nach der absehbaren Erschöpfung der geologisch günstigsten Salzlagerstätten andere Lagerstätten genutzt werden müssen, die eine aufwendigere Aufbereitung erfordern. Die derzeitigen Preise für Lithium sind jedoch bereits so hoch, dass auch einige der relativ aufwendig zu gewinnenden und aufzubereitenden Rohstoffe (insbesondere australische Pegmatitgesteine) wirtschaftlich gewonnen und aufbereitet werden können.

Der Bedarf der anderen betrachteten potenziell kritischen Stoffe (z. B. Silber, Germanium oder Tantal) erscheint insgesamt unkritisch, da deren Verfügbarkeit entweder unkritisch ist oder geeignete unkritische Substitute verfügbar sind.

2 Einleitung

M. Klötzke (DLR), B. Frieske (DLR)

Im Energiekonzept der Bundesregierung hat sich Deutschland verpflichtet, die Treibhausgasemissionen bis 2020 um 40 % und bis 2050 um mindestens 80 % zu senken (Basis 1990).

Da der straßengebundene Verkehr derzeit hauptsächlich auf fossilen Energieträgern beruht, kommt der Elektromobilität eine wesentliche Rolle zur CO₂-Emissionsenkung zu. Damit verbundene Ziele sind die Reduzierung der Abhängigkeit von Erdöl und der Kompetenzaufbau in der deutschen Automobilindustrie.

Unter anderem um Deutschland zum Leitmarkt und insbesondere zum Leitanbieter für Elektromobilität zu machen, initiierte das BMBF mit der Förderbekanntmachung STROM Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den Bereichen Gesamtfahrzeugsysteme, Batterieentwicklung und -integration, Energiemanagement sowie in der entsprechenden Werkstoff- und Materialforschung. Nach den Fördervorhaben des Konjunkturpakets II ist STROM die erste Maßnahme zur Umsetzung des „Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität“. Die Themen orientieren sich an Empfehlungen externer Experten und sind konsistent mit den Inhalten und Zielen der Arbeitsgruppen „Antriebstechnologie und Fahrzeugintegration“ sowie „Batterietechnologie“ der im Jahr 2010 ins Leben gerufenen „Nationalen Plattform Elektromobilität“ (NPE).

Die „Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität“ (im Folgenden „STROMbegleitung“ genannt) wurde im Rahmen der 2009 veröffentlichten BMBF-Förderbekanntmachung „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität“ (STROM) durchgeführt und diente der wissenschaftlichen Begleitung und Beforschung der im Rahmen dieser Bekanntmachung gestarteten FuE-Projekte.

Im Rahmen der STROMbegleitung wurden unterschiedliche Ziele verfolgt, die zusammen ein umfassendes Bild über den Stand der Technik und die Potenziale vielversprechender technologischer Lösungen der Elektromobilität ermöglichen. Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Identifikation und Analyse aktueller und zukünftiger Trends der Fahrzeugkonzept- und Technologieentwicklung sowie in der Einordnung der deutschen Aktivitäten in den internationalen Kontext. Im Detail orientierte sich die Begleitforschung an den folgenden Forschungsfragen:

- Welche generellen technischen und marktlichen Trends zeichnen sich bei Schlüsseltechnologien der Elektromobilität sowie elektrifizierten Fahrzeugkonzepten ab?
- Was ist der State of the Art bei den Schlüsseltechnologien der Elektromobilität und welches zukünftige Entwicklungspotenzial besitzen diese?
- Welchen Stand hat die Technologieentwicklung im nationalen und internationalen Vergleich?
- Welche Förderschwerpunkte können in den verschiedenen Weltregionen identifiziert werden und welche Zielgruppen werden adressiert?
- Welche Forschungsaktivitäten und -schwerpunkte gibt es weltweit und wie stellt sich Deutschland im internationalen Vergleich dar?

- Wie sind die Materialintensitäten der Schlüsseltechnologien und Fahrzeugkonzepte beschaffen?
- Sind bei einem weltweiten Ausbau der Elektromobilität Engpässe, z. B. bei kritischen Ressourcen, zu erwarten?

Die wissenschaftlich fundierte Beantwortung der genannten Aspekte und Fragen erlaubt es u. a., das Förderprogramm STROM und die beforschten Schlüsseltechnologien in die internationalen Forschungsaktivitäten einzuordnen und Empfehlungen für die weitere Ausgestaltung staatlicher Förderprogramme und andere politische Entscheidungen abzuleiten.

Begleitung und Einbezug der Förderprojekte in die Ausrichtung und die Untersuchungen der STROMbegleitung werden in Kapitel 3 dargestellt. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen der internationalen Trends bei elektrifizierten Fahrzeugkonzepten sowie in der Forschungs- und Entwicklungslandschaft zu Komponenten und Technologien für Elektrofahrzeuge werden in Kapitel 4 vorgestellt. Kapitel 5 widmet sich Studienresultaten über die Elektromobilitätsarenen USA, Japan, China, Indien sowie die Europäische Union. Die Auswirkungen der Elektromobilität auf den Ressourcenbedarf und die Materialintensität des Verkehrssektors werden in Kapitel 6 dargelegt und diskutiert. Kapitel 7 synthetisiert schließlich die Ergebnisse der einzelnen Kapitel und leitet daraus Handlungsempfehlungen ab.

3 Begleitung der Förderprojekte

M. Klötzke (DLR), H. Hüging (WI)

Die STROM-Begleitforschung wurde an den im Rahmen der Bekanntmachung „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität“ (STROM) vom 01.04.2010 im Referat 523 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung geförderten Themen der Förderprojekte ausgerichtet. Für deren Erfassung wurden die vom BMBF veröffentlichten Steckbriefe analysiert und eine erste Interviewrunde genutzt, um detailliertere Zielsetzungen und Ausrichtungen der Förderprojekte zu erfragen. In zwei weiteren Interviewrunden mit Vertretern der Förderprojekte wurden neben dem Arbeitsfortschritt auch neue Probleme und Herausforderungen sowie Lösungskonzepte besprochen, die in der Planungsphase und zu Beginn des jeweiligen Förderprojekts noch nicht absehbar gewesen waren. Zudem wurden die Experten um Einschätzungen zum Potenzial und zum Marktanteil der in der STROM-Begleitforschung identifizierten Schlüsseltechnologien gebeten.

In drei Workshops – zu Beginn, etwa zur Hälfte sowie gegen Ende der Förderprojektlaufzeiten – wurden Ergebnisse aus der STROM-Begleitforschung vorgestellt und ausgewählte Fragestellungen mit den Vertretern der Förderprojekte diskutiert.

Darüber hinaus wurden die Förderprojekte mittels Arbeitspapieren und Zwischenberichten über Ergebnisse aus den verschiedenen Untersuchungsaspekten der STROM-Begleitforschung informiert.

Die Interessen der Förderprojekte wurden auch bei der Konzeption und Durchführung der internationalen Regionalstudien berücksichtigt. Dazu wurde im Rahmen des zweiten STROM-Workshops ein Schwerpunkt auf die Regionalstudien gelegt. Der Workshop fand im April 2013 gemeinsam mit den Förderprojekten und Vertretern der für die Regionalstudien beauftragten internationalen Partnerinstitutionen statt. Erste Ergebnisse der Regionalstudien wurden von den Regionalpartnern vorgestellt und gemeinsam mit den Vertretern der Förderprojekte diskutiert. Auf Basis der Anmerkungen der Förderprojekte wurden zusätzliche Aspekte in das einheitliche Rechercheraster der Regionalstudien aufgenommen, spezifische Schwerpunkte insbesondere für die geplanten Experteninterviews gesetzt und konzeptionelle Anpassungen vorgenommen. Unter anderem wurde die Recherchematrix um eine Sammlung einheitlicher Schlüsselindikatoren für die in den Regionalstudien untersuchten Themenkomplexe ergänzt.

4 Trendanalyse Fahrzeugtechnik und -konzepte

M. Klötzke (DLR), B. Frieske (DLR)

Um Entwicklungen im Bereich neuer Fahrzeugtechnologien einordnen zu können, sind diese aus verschiedenen Blickwinkeln zu betrachten. Gegenstand des vorliegenden Kapitels ist eine Analyse der Trends bei Technologien und Konzepten für elektrifizierte Fahrzeuge. Zu Beginn werden sowohl konzeptionelle Entwicklungen als auch zum Einsatz kommenden Technologien der vergangenen Jahre untersucht. Somit können Trends hin zu oder weg von einzelnen Technologien für elektrifizierte Komponenten sowie bei der Auslegung von Fahrzeugen abgeleitet und ein internationaler Herstellervergleich angestellt werden. Im Anschluss wird eine dezidierte Patent- und Publikationsanalyse durchgeführt, um neben einer internationalen Einordnung der deutschen Forschungsaktivitäten Aussagen zu zukünftigen Technologien für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte abzuleiten. Diese Erkenntnisse fließen dann in eine Untersuchung zu Auswirkungen technologischer Entwicklungen auf das Gesamtsystem Fahrzeug, insbesondere auf den Energieverbrauch, sowie daraus resultierenden Auswirkungen auf den deutschen Neuwagenmarkt ein.

4.1 Internationale Trends bei Fahrzeugkonzepten

M. Klötzke (DLR), Benjamin Frieske (DLR)

Auf dem derzeitigen Neuwagenmarkt lassen sich zahlreiche unterschiedliche Fahrzeugkonzepte mit elektrifizierten Antriebssträngen finden. Neben batterieelektrischen sind das insbesondere Fahrzeuge mit einem hybriden Antriebsstrang, die zudem zum Teil schon über die Möglichkeit verfügen, ihre Batterie mittels Ladevorrichtung am Stromnetz aufzuladen. In dem – zumindest wenn es um den großvolumigen Absatz elektrifizierter Fahrzeuge geht – noch recht jungen Markt herrscht derzeit noch eine intensive Dynamik. Immer wieder wird darüber diskutiert, welche Antriebsstrang- und Fahrzeugkonzepte in Zukunft erfolgreich sein können (DLR 2013, Fraunhofer ISI 2013). Darüber hinaus wird intensiv über geeignete Technologien für elektrifizierte Fahrzeuge debattiert. Neben der richtigen Traktionsbatterie sind auch Ladetechnologien, elektrische Maschinen sowie die Leistungselektronik Gegenstand dieser Auseinandersetzungen. Hersteller und Forschungseinrichtungen entwickeln immer wieder prototypische Fahrzeuge, die zwar nicht direkt als Serienfahrzeug angeboten werden, jedoch zahlreiche neuartige Technologien beinhalten und erproben. Einige dieser Fahrzeuge werden auch in der Fachliteratur oder auf den Automobilmessen dem Publikum vorgestellt (ATZextra 2013, ATZextra 2014) und gelten als Indikatoren für zukünftig in Serienfahrzeugen zum Einsatz kommende Technologien und Konzepte.

Untersuchungen zu Trends in der Fahrzeugtechnik widmen sich Entwicklungen aus dem Bereich der elektrifizierten Antriebskonzepte mit Schwerpunkt auf den fünf Technologieebenen *Elektrische Maschine, Leistungselektronik, Batterie, Leichtbau* und *Thermomanagement*. Diesbezüglich wurde eine umfassende Datenbank für elektrifizierte Fahrzeugkonzepte aufgebaut, die alle elektrifizierten Fahrzeugkonzepte der Jahre 2001 bis 2013 beinhaltet (Abb. 4-1) und mit deren Hilfe Entwicklungen und Trends beim Einsatz bestimmter Technologien oder der Konzeption von Fahrzeugen sowie Unternehmensstrategien identifiziert und analysiert werden können.

Neben als Serienfahrzeuge konzipierten finden auch solche Fahrzeuge Berücksichtigung, die zum Beispiel als Versuchs- oder Forschungsfahrzeug aufgebaut wurden, sodass Mehrfachnennungen insofern möglich sind, als Konzeptfahrzeuge in überarbeiteter Form als Serienfahrzeuge auf den Markt kommen. Entwicklungsschritte und Veränderungen vom Konzept- (z. B. BMW i8 Concept) zum Serienfahrzeug (z. B. BMW i8) können damit im Detail erfasst und abgebildet werden.

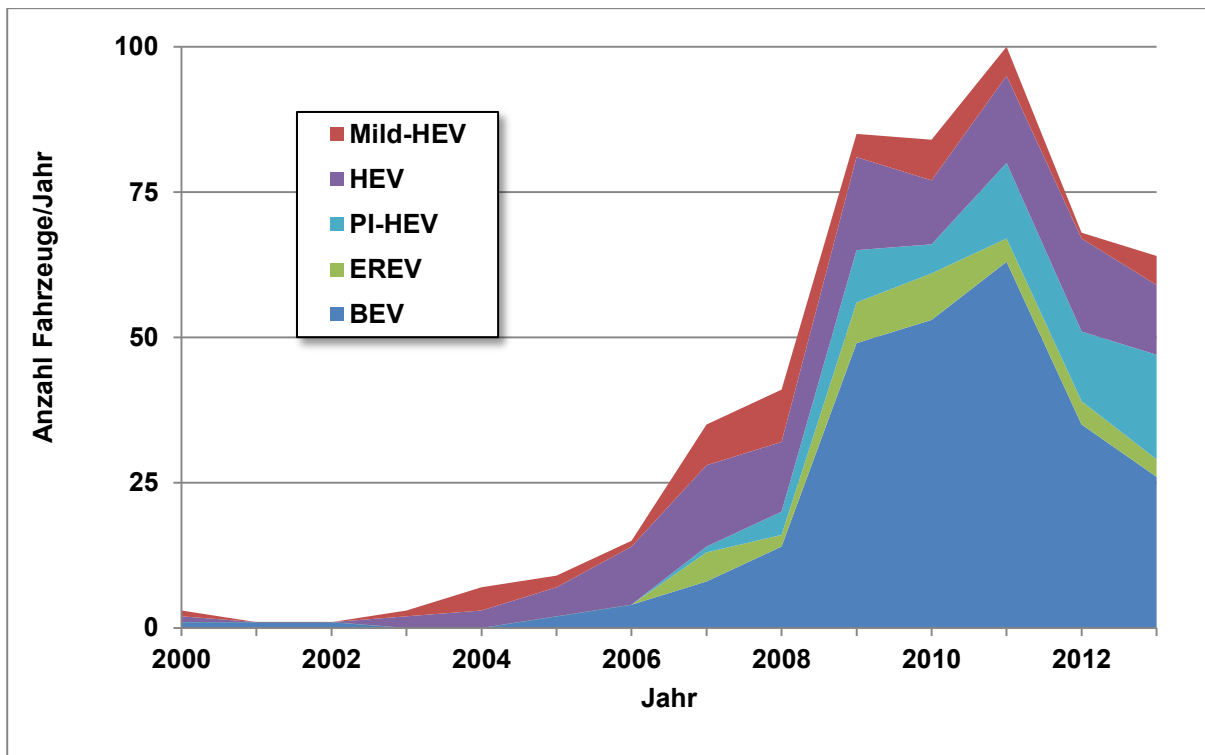


Abb. 4-1 Anzahl der jährlich international vorgestellten elektrifizierten Fahrzeuge nach Antriebsstrangkonzzept

4.1.1 Aufbau der Datenbank

In der Datenbank werden weltweit solche Fahrzeuge erfasst, die über einen elektrifizierten Antriebsstrang verfügen, d. h. sowohl batterieelektrische als auch hybridelektrische Fahrzeuge der EG-Fahrzeugklasse M1 (Kraftfahrzeuge zur Personenbeförderung). Neben als Serienfahrzeuge konzipierten finden auch solche Fahrzeuge Berücksichtigung, die z. B. als Prototyp, Konzept-, Versuchs- oder Forschungsfahrzeug aufgebaut wurden.

Die elektrifizierten Fahrzeuge werden hinsichtlich ihres Hybridisierungs- bzw. Elektrifizierungsgrads und der Antriebsstrangarchitektur unterschieden. Der Elektrifizierungsgrad ist in Mild-Hybride (Mild-HEV), Voll-Hybride (HEV), Plug-in-Hybride (PHEV) und batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) unterteilt, wobei Plug-in-Hybride auch reichweitenverlängerte Fahrzeuge (EREV, Electric Range Extended Vehicle) beinhalten, die in der Datenbank als eigene Gruppe erfasst sind (Abb. 4-2). Die Antriebsstrangarchitektur umfasst serielle Hybridantriebe, parallele Hybridantriebe sowie Sonder- oder Mischformen. Eine vollständige Auflistung der in der Datenbank erfassten Fahrzeuge (Stand Oktober 2014) liefert Anhang A.

Fahrzeugdatenbank Aktuelle ID 1

Hersteller: BMW
 Modell / Basis: X6 Active Hybrid X6 50i
 Erscheinungsjahr: 2009
 Entwicklungsstatus: Serie
 Fahrzeugsegment: J
 Elektrifizierung: Voll-Hybrid
 Plug-In-Funktion:
 Nutzungskonzept: All-Zweck
 Weitere Quellen Daten: Hybrid Architektur: Two-Mode
 Fahrzeugaufbau: SUV
 Fachmesse: IAA

Fahrzeugdaten allgemein

Marktrelevanz: 5
 Zielgruppe: Aufstiegsorientiertes Milieu
 Zielkosten [EUR]: 102900
 Weltregion / Land: Europa / Deutschland
 Serienstart / Zielmarkt: 2010 / Weltweit
 Kraftstoffart / Tankvol. [l]: Benzin / 85
 Türen / Sitzplätze: 5 / 4
 Kofferraum [l]: 470 / 1350
 L / B / H [mm]: 4877 / 1983 / 1690
 Leergewicht [kg]: 2500
 Vorgänger / Nachfolger: X6 Active Hybrid 2 / -

Fahrzeugdaten spezifisch

Systemleistung [kW]: 357
 Systemdrehmoment [Nm]: 780
 Vmax [km/h]: 236
 Vmax (elektrisch) [km/h]: 60
 Beschleunigung 0-100 [s]: 5,6
 Cw-Wert: 0,36
 Reichweite gesamt [km]:
 Reichweite elektrisch [km]: 2,5 bei konstant [km/h] 60
 Besonderheiten:

Verbrauch / Emission

Innerorts [l/100km]: 10,8
 Außerorts [l/100km]: 9,4
 Kombiniert [l/100km]: 9,9
 Elektrisch [kWh/100km]: 0
 CO2 Emission TTW [g/km]: 231
 Emissionsklasse: EUS

Verbrennungsmotor / Kraftübertragung

Bauart: V
 Einbaort: Front
 Hubraum [ccm]: 4395
 Zylinder / Ventile: 8 / 4
 Bohrung / Hub [mm]: 88,3 / 89
 Verdichtungsverhältnis :1 10
 Nennleistung [kW]: 300 bei 1/min 5500-6400
 Nenn Drehmoment [Nm]: 600 bei 1/min 1750-4500
 Aufladung: TwinTurbo
 Antriebsart / Getriebe: Allrad / 7-Gang Automat
 Übersetzung: Min. / Max. / Achs. 0,723 / 3,889 / 3,640
 Range Extender / RE Technologie:

Abb. 4-2 Aufbau der Fahrzeugdatenbank

4.1.2 Komponenten für elektrifizierte Antriebskonzepte

Abgesehen von den bei konventionellen Fahrzeugen für den Antriebsstrang notwendigen Komponenten, wie Verbrennungskraftmaschine, Kupplung oder Getriebe, spielen bei hybrid- und batterieelektrischen Fahrzeugen weitere Bauteile eine wichtige Rolle. Neben der Batterie sind das insbesondere die elektrische Maschine sowie die Leistungselektronik. Für die Identifikation von Trends im Bereich der Fahrzeugkonzepte sind in der Datenbank Informationen zur Spezifikation und Technologie einzelner Komponenten, zum Aufbau sowie zur Größenklasse der Fahrzeuge und zu konzeptionellen Besonderheiten wie der Art der Kühlung einzelner Komponenten erfasst. Bei der Festlegung der Datenbankindikatoren wurden Fachliteratur und Datenblätter elektrischer Komponenten ausgewertet und die Ergebnisse einer Expertenbefragung einbezogen.

Im Bereich der allgemeinen Angaben zu Fahrzeug und Markt wurden 73 mögliche Parameter und Informationspunkte definiert, z. B.:

- Hersteller (Bezeichnung),
- Fahrzeugmodell (Bezeichnung),
- Fahrzeugsegment¹ (A-S),
- Zielmarkt (Weltregion),
- Entwicklungsstatus des Fahrzeugs (z. B. Mock-up², Konzept, Prototyp, Vorserie, Serie),
- Zeitpunkt der Vorstellung Konzeptfahrzeug (Jahr),
- Zeitpunkt der geplanten Markteinführung als Serienfahrzeug (Jahr),
- Grad der Elektrifizierung (Mild-HEV, HEV, PHEV, EREV, BEV),
- Hybridarchitektur (z. B. parallel, seriell, kombiniert),
- Systemleistung/elektrische Leistung in kW,
- Höchstgeschwindigkeit (elektrisch) in km/h,
- Beschleunigungszeit 0–100 km/h in s,
- Fahrzeugmasse in kg,
- Energieverbrauch³ in l/100 km; kWh/100 km,
- TTW⁴-CO₂-Emissionen in g/km.

Für die elektrischen Maschinen können 183 Parameter erfasst werden, wobei bis zu 5 Motoren in einem Fahrzeug unterschieden werden können. Dies ist notwendig, da in einigen Fahrzeugen mehrere elektrische Maschinen mit zum Teil signifikant unterschiedlichen Eigenschaften verbaut sind. Die Parameter sind z. B.:

- Bauart (z. B. Synchronmaschine, Asynchronmaschine),
- Einbauort (z. B. Getriebe, Radnabe),
- Erregungsart (z. B. permanenterregt),
- Nennleistung in kW,
- Nenndrehmoment in Nm,
- Masse in kg,
- Thermomanagement (z. B. flüssigkeits-/luftgekühlt).

Die Eigenschaften der Leistungselektronik können mit insgesamt 37 Parametern erfasst werden, darunter:

- Spannungsregelbereich (minimale und maximale Spannung) in V,
- Integration (z. B. in elektrischer Maschine),
- Gesamtgewicht in kg,
- Thermomanagement (z. B. flüssigkeits-/luftgekühlt),
- Funktion (z. B. DC/DC-Wandler),
- Halbleiterbauelemente (z. B. MOSFET, IGBT).

¹ Nach EU-Kommission.

² Mock-up – Maßstäbliches Modell, jedoch nicht funktionsfähig.

³ Nach UN/ECE Regelung 101.

⁴ TTW – Tank-to-Wheel, CO₂-Emissionen nach UN/ECE Regelung 101.

Batteriesysteme, die im Detail nicht Gegenstand der Untersuchungen im Rahmen der STROM-Begleitung sind, können in der Datenbank mit zwei Batteriemodulen und bis zu 95 Parametern pro Modul hinterlegt werden. Mögliche Parameter sind z. B.:

- Technologie (z. B. Lithium-Ionen, Nickel-Metall-Hydrid),
- Einbauort (z. B. Unterboden, Kofferraum),
- gravimetrische Energiedichte in Wh/kg,
- gravimetrische Leistungsdichte in W/kg,
- volumetrische Energiedichte in Wh/l,
- Kapazität⁵ in Ah,
- Spannung in V,
- Thermomanagement (z. B. flüssigkeits-/luftgekühlt).

Die Datenverfügbarkeit unterscheidet sich je nach Bereich und Komponente sehr deutlich. Während allgemein zu Fahrzeugen und Energiespeichern sehr viele Informationen zur Verfügung stehen, ist dies bei der Leistungselektronik sowie bei einzelnen Angaben zu elektrischen Maschinen in vielen Fällen nicht gegeben. Aus diesem Grund können zur Leistungselektronik auch nur deutlich weniger Informationen ausgewertet werden.

4.1.3 Ergebnisse

Weltweit entwickeln etablierte Fahrzeughersteller, Forschungseinrichtungen sowie neu gegründete Start-ups elektrifizierte Antriebskonzepte für den Großserieneinsatz und visionäre Versuche und Überlegungen. Besonders in Europa, Asien und den USA konnten Hersteller und Einrichtungen sowie deren Modelle identifiziert werden. Es ist nicht gänzlich auszuschließen, dass im Zuge der Recherchen Fahrzeuge nicht gefunden wurden, insbesondere wenn diese nur in Quellen Erwähnung finden, die in Deutschland nicht oder nur schwer zugänglich sind. Die Analyse der Datenbank könnte eine solche Schlussfolgerung nahelegen, da der Großteil der aufgeführten Fahrzeuge von deutschen Firmen oder Institutionen stammt (Abb. 4-3).

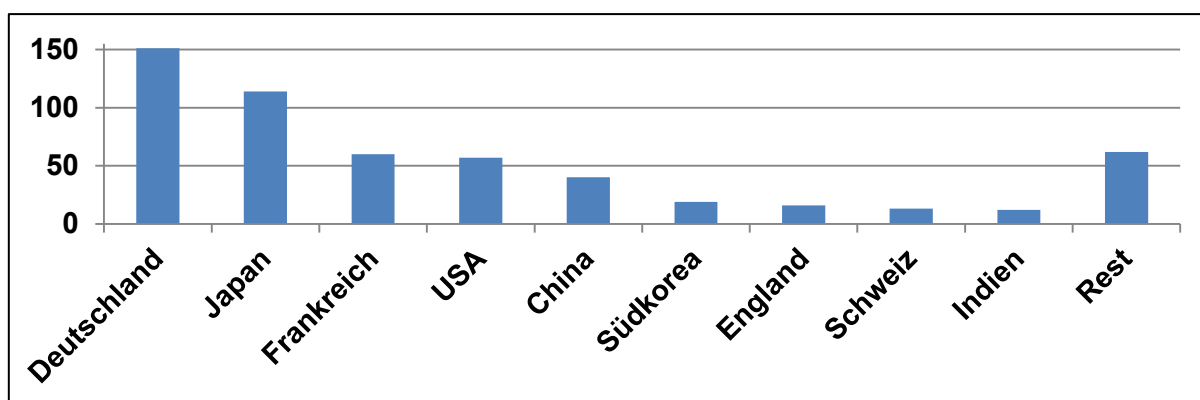


Abb. 4-3 Verteilung der identifizierten Fahrzeuge⁶ nach Heimatländern der Hersteller und Institutionen (alle Entwicklungsstufen 2001–2013)

⁵ Soweit verfügbar sind sowohl Nenn- als auch nutzbare Kapazität berücksichtigt.

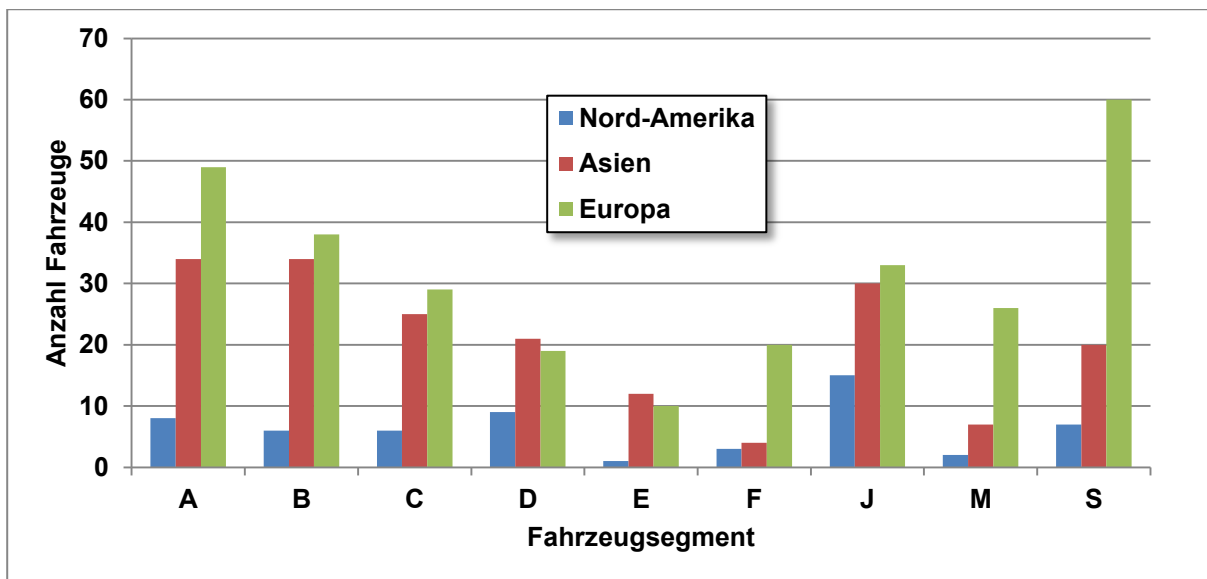


Abb. 4-4 Gesamtzahl elektrifizierter Fahrzeuge nach Fahrzeugsegmenten⁷ von 2001 bis 2013

Bei der Elektrifizierungsstrategie kann ein ähnliches Verhalten der Hersteller in Europa und in Asien identifiziert werden (Abb. 4-4). Insbesondere kleine Fahrzeuge (Segmente A & B) werden mit elektrifizierten Antriebssträngen ausgerüstet, wobei die Zahl mit zunehmender Größe erst einmal abnimmt. Allerdings kommt es bei den Fahrzeugen aus dem J-Segment (SUV, Geländewagen) sowohl in Asien als auch in Europa zu starken Aktivitäten.

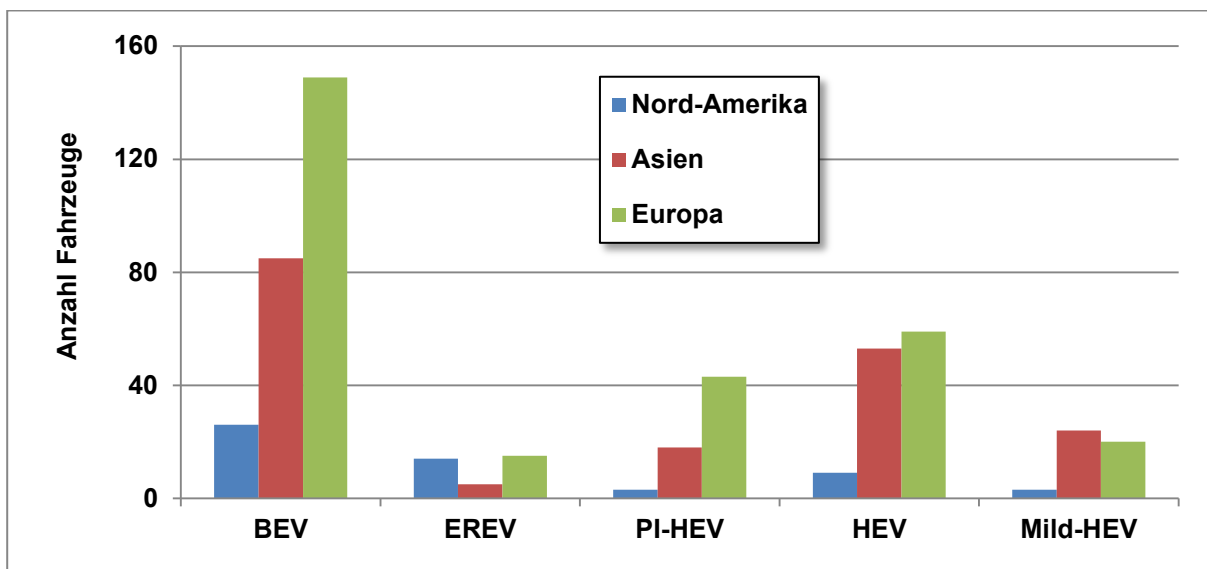


Abb. 4-5 Gesamtzahl der Fahrzeuge nach Elektrifizierungsgraden von 2001 bis 2013

Toyota, der Hersteller, der 1997 mit dem Prius 1 das erste elektrifizierte Großserienmodell auf den Markt brachte, ist bei der Anzahl der Serienmodelle weltweit führend (Abb. 4-6). Bis

⁶ Falls nicht explizit erwähnt sind bei „Fahrzeugen“ alle in der Datenbank erfassten Fahrzeuge gezählt, also sowohl Serienfahrzeuge als auch sämtliche Entwicklungs- und Evolutionsstufen.

⁷ Nach EU-Kommission (Europäische Kommission, 2002) – A: Kleinstwagen, B: Kleinwagen, C: Mittelklasse, D: Obere Mittelklasse, E: Oberklasse, F: Luxusklasse, S: Sportwagen, M: Mehrzweckfahrzeug, J: Geländewagen.

April 2014 wurden insgesamt 18 elektrifizierte Fahrzeuge des japanischen Unternehmens vorgestellt, die als Serienfahrzeuge im Markt verfügbar oder als solche für die Zukunft geplant sind. Fünf von ihnen verfügen über die Möglichkeit, die Batterie an der Steckdose aufzuladen. Auch der an zweiter Stelle folgt, gehört zur Toyota Motor Corporation. Lexus stellte der Öffentlichkeit im selben Zeitraum immerhin 11 Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebsstrang vor, wenngleich keines über eine externe Lademöglichkeit für die Batterie verfügt.

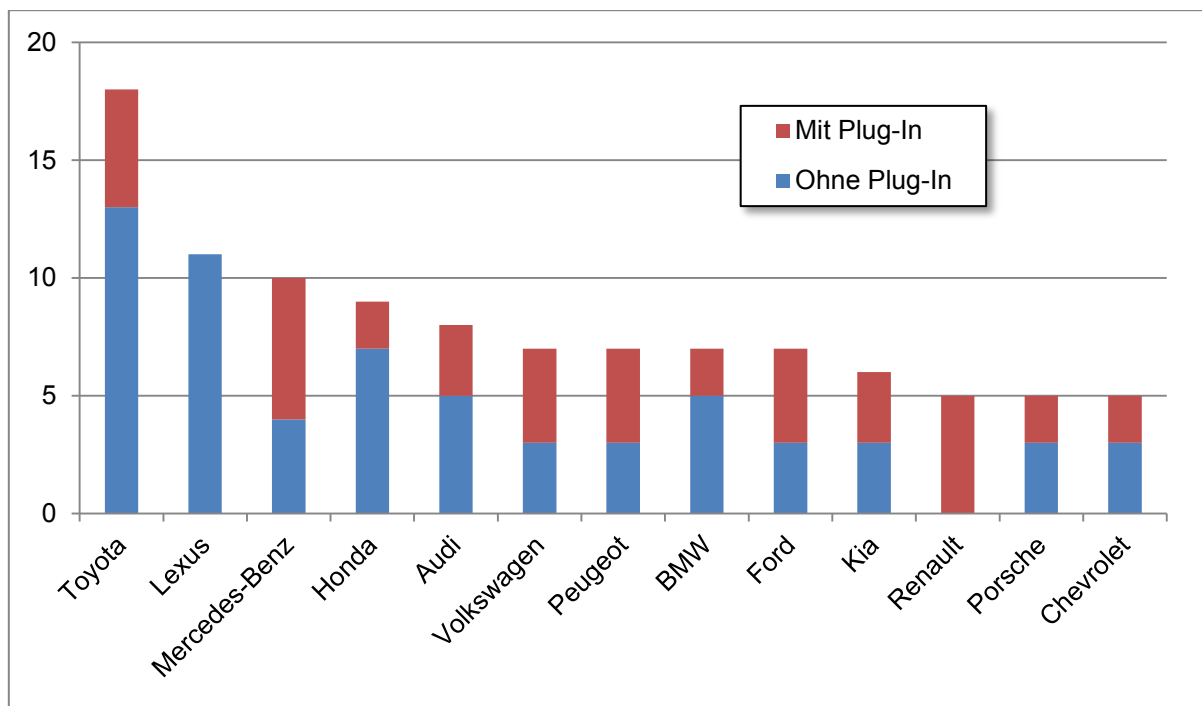


Abb. 4-6 Anzahl der angekündigten und eingeführten Serienmodelle elektrifizierter Fahrzeuge nach Herstellern⁸ zwischen 2000 und 2013

Mercedes-Benz war in Bezug auf die Vorstellung von Serienfahrzeugen der aktivste europäische und somit auch deutsche Hersteller. Von den zehn vorgestellten Modellen verfügt mit sechs Fahrzeugen die Mehrheit über eine externe Lademöglichkeit. Neben der Toyota Motor Corporation sind insbesondere deutsche Hersteller sehr aktiv bei der Vorstellung und Ankündigung von Serienfahrzeugen. Aus den USA ist Ford der Hersteller mit den meisten Fahrzeugen mit Aussicht auf Serienfertigung.

Unter den Kleinst- sowie Kleinwagen (Segmente A und B) dominieren batterieelektrische Fahrzeuge, während ihre absolute Zahl und ihr Anteil in der Mittelklasse deutlich abnehmen und in den Mittelklasse- und Oberklassensegmenten (C, D, E und F) der Anteil von Hybridfahrzeugen unverkennbar ansteigt (Abb. 4-7). Insbesondere sind im Segment der Gelände- und Geländesportwagen (J) ausgeprägte Aktivitäten (insbesondere für Hybridfahrzeuge) zu erkennen. Auch Sportwagen (S) erfreuen sich großer Beliebtheit bei der Entwicklung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte. In diesem Segment sind wie unter Kleinst- und Kleinwagen zudem viele batterieelektrische Fahrzeuge zu finden, die sich auch noch bei Mehrzweckfahrzeugen (M) finden, während in diesem Segment, ähnlich wie bei den Kleinstwagen, die Anzahl der Hybridfahrzeuge sehr gering ausfällt.

⁸ Nur Hersteller mit mindestens fünf in der Datenbank erfassten Fahrzeugen.

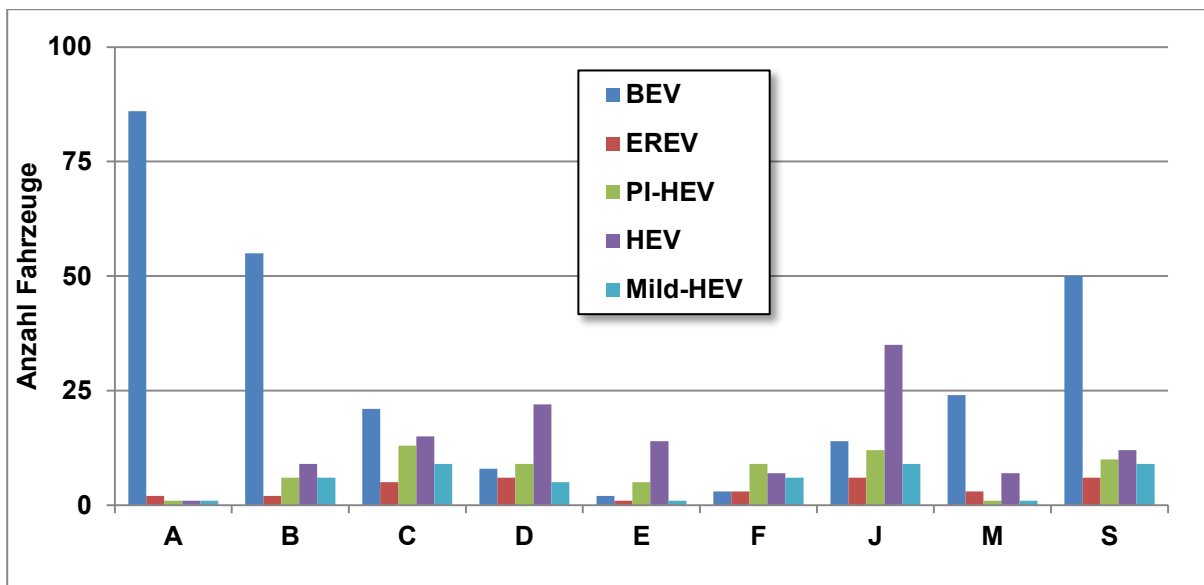


Abb. 4-7 Elektrifizierte Fahrzeugkonzepte in den einzelnen Fahrzeugsegmenten von 2000 bis 2013

Im Umfeld der Elektromobilität wird immer wieder der Ansatz für die Fahrzeugkonzepte diskutiert: Sollten bestehende Fahrzeugmodelle elektrifiziert („Conversion Design“), wie beim „Smart fortwo electric drive“, oder elektrifizierte Fahrzeuge gänzlich neu designt und entwickelt („Purpose Design“) und damit auf die Bedürfnisse eines Elektrofahrzeugs ausgelegt werden (Klötzke et al. 2013a, Klötzke et al. 2014a, Klötzke et al. 2013b, Frieske 2013). Den Weg des Purpose Designs geht z. B. BMW mit seinen Fahrzeugen, die unter der Marke „BMW i“ entwickelt werden. Im internationalen Umfeld sehen die Experten im Conversion Design einen entscheidenden Produktionsvorteil, da mit wenigen Ausnahmen bei einzelnen Komponenten auf bestehenden Fertigungsstraßen gebaut werden kann, wodurch die Auslastung der Produktionsstätten nicht so stark vom Absatz der elektrifizierten Fahrzeuge abhängt. Auch können der Elektromobilität gegenüber zurückhaltende Kunden elektrifizierte Fahrzeuge fahren und trotzdem das Gefühl haben, in einem bewährten Fahrzeug zu sitzen. Vertreter des Purpose Designs sehen Vorteile speziell entwickelter Fahrzeuge insbesondere in ihrem Innovationscharakter. Es ist sofort ersichtlich, dass es sich um ein neuartiges Fahrzeug handelt, wodurch die Sichtbarkeit verbessert wird (Klötzke et al. 2013). Ein klarer Trend zu einem der beiden Ansätze ist insgesamt nicht zu erkennen, dennoch lassen sich Rückschlüsse auf die Strategie einzelner Hersteller ziehen (Abb. 4-8). Bei Konzeptfahrzeugen und Prototypen besteht ein leichtes Übergewicht des Purpose Designs, bei Serienfahrzeugen überwiegt das Conversion Design. Ausnahmen bilden Opel, Renault, Citroën, Nissan, Honda und Toyota, wo auch bei den Serienfahrzeugen das Purpose Design dominiert. Bei den deutschen Herstellern überwiegt eindeutig das Conversion Design, sowohl bei Serienfahrzeugen als auch bei Konzeptfahrzeugen und Prototypen. Eine Ausnahme ist Opel, wobei mit dem Opel Ampera lediglich ein im Purpose Design entwickeltes Serienfahrzeug identifiziert werden konnte. Bei den Fahrzeugherstellern aus Frankreich kann insgesamt, insbesondere bei den Konzeptfahrzeugen und Prototypen, ein deutliches Übergewicht von Fahrzeugen im Purpose Design ermittelt werden, wobei bei den Serienfahrzeugen von Peugeot, Renault und Citroën das Conversion Design dominiert.

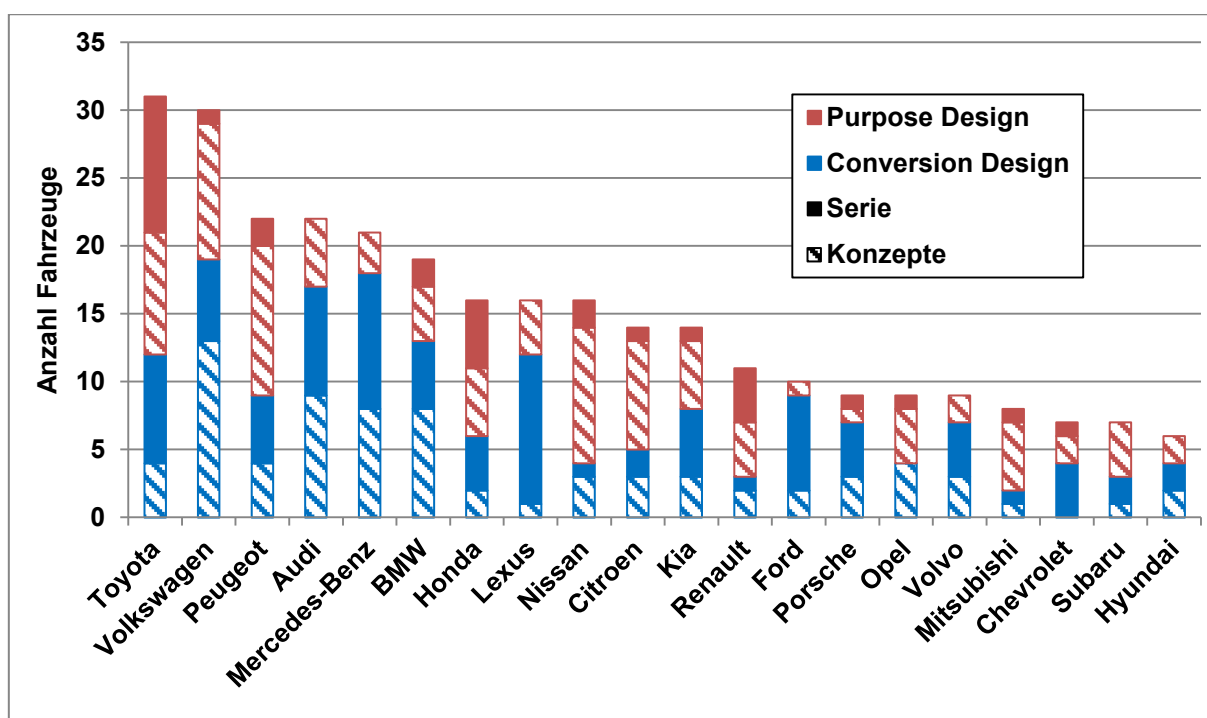


Abb. 4-8 Konzeptansatz⁹ elektrifizierter Fahrzeugkonzepte nach Fahrzeugherstellern

Über das gesamte 20. Jahrhundert hinweg wurden von Industrie oder Forschungseinrichtungen immer wieder elektrifizierte Fahrzeugkonzepte vorgestellt, wenngleich selten ein konkreter Serieneinsatz geplant und die Anzahl der Neuvorstellungen pro Jahr überschaubar war. Anfang des 21. Jahrhunderts hat die Elektrifizierung des Antriebsstrangs angefangen, Fahrt aufzunehmen (Abb. 4-9). Wurden 2000 gerade einmal drei Fahrzeuge mit einem elektrifizierten Antriebsstrang vorgestellt, waren es 2004 schon acht. Bis ins Jahr 2011 konnte dann ein deutlicher Zuwachs der Aktivitäten verzeichnet werden. Während zu Beginn der Entwicklung hybride Antriebsstränge, vor allem Voll- und Mild-Hybride zu finden waren, nahmen ab 2007 batterieelektrische Fahrzeugkonzepte zu. Hybridelektrische Fahrzeuge, die zwar rein elektrisch fahren können, aber keine Möglichkeit haben, ihre Batterie an der Steckdose zu laden blieben über die Jahre konstant. Eine steigende Zahl neuer Fahrzeuge ist bei hybrid-elektrischen Fahrzeugen zu beobachten, die ihre Batterie extern aufladen können.

Ein zwischenzeitliches Maximum bei der Vorstellung neuer elektrifizierter Fahrzeugkonzepte ist im Jahr 2011 auszumachen, als insgesamt 100 Fahrzeuge präsentiert wurden, wobei batterieelektrische Konzepte mit 63 den größten Anteil hatten. Seit 2011 ist jedoch ein deutlicher Rückgang festzustellen. Insbesondere batterieelektrische Fahrzeuge, die seit 2009 den größten Anteil elektrifizierter Neuvorstellungen ausmachen, gehen deutlich zurück.

Der Rückgang ist vor allem bei Neuvorstellungen von Serienfahrzeugen festzustellen (Abb. 4-10). Während 2009 36 Serienfahrzeuge vorgestellt wurden, waren es 2013 mit 18 gerade einmal halb so viele. Für Prototypen und Konzeptfahrzeuge trifft das nicht zu: Sie liegen, mit einer Ausnahme im Jahr 2011, seit 2009 bei ungefähr 45 bis 50 Fahrzeugen pro Jahr.

⁹ Unter dem Begriff ‚Konzepte‘ sind Forschungs- und Konzeptfahrzeuge sowie Prototypen zusammengefasst.

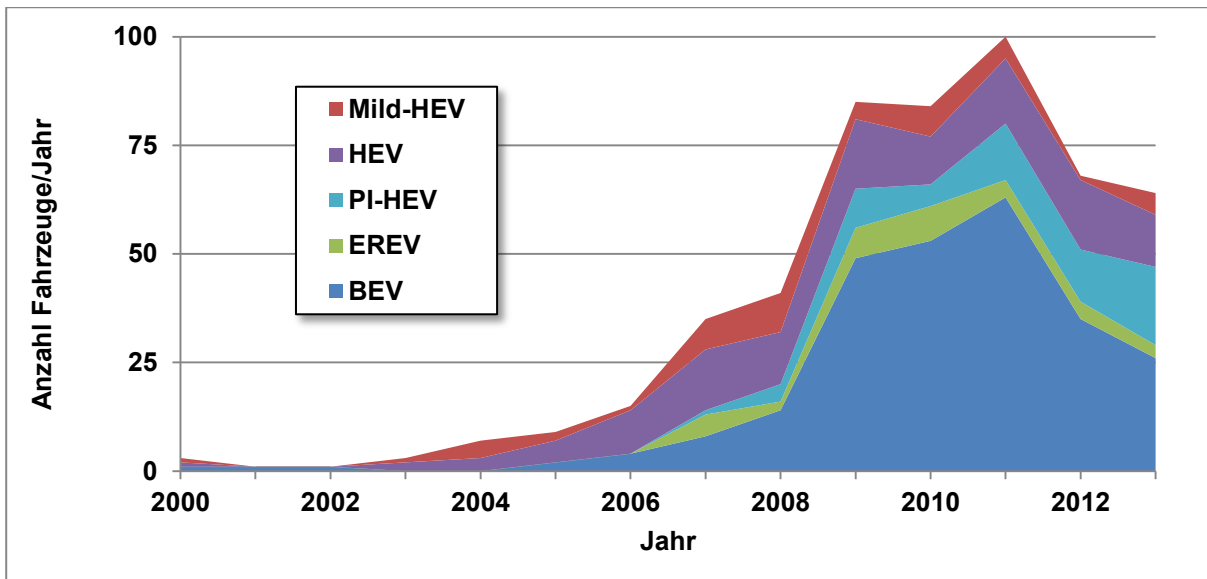


Abb. 4-9 Jährliche Anzahl der jeweiligen Antriebsstrangvarianten in neu vorgestellten Fahrzeugen

Neben divergierenden Strategien bei der Art des Fahrzeugkonzepts (Neuentwicklung vs. Integration) können Unterschiede bei der Elektrifizierung zwischen den Herstellern ausgemacht werden.

Bis auf EREV lassen sich alle Elektrifizierungsvarianten bei fast allen Herstellern in den Modellen wiederfinden (Abb. 4-11). Ausnahmen bilden Lexus (nur Voll-Hybride) und Renault (bis 2014 ausschließlich batterieelektrische Fahrzeuge). Erst im Oktober 2014 präsentierte Renault auf dem Pariser Autosalon ein Konzept für einen Plug-in-Hybriden (Baumann, 2014), der in den Analysen und Untersuchungen allerdings nicht mehr berücksichtigt werden konnte.

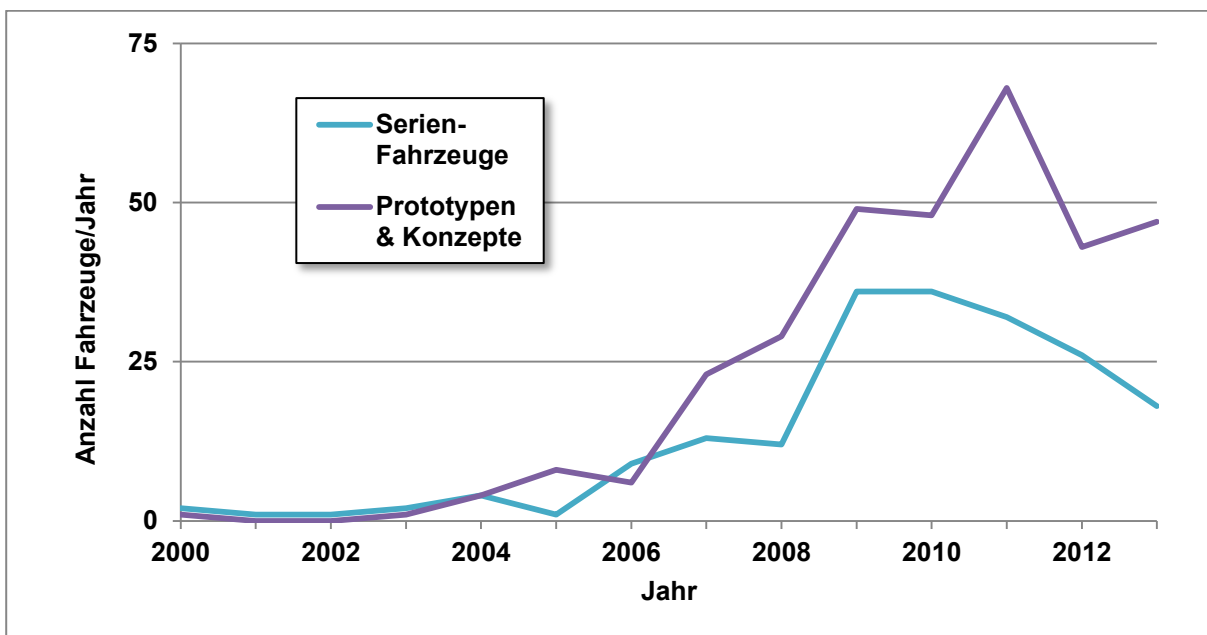


Abb. 4-10 Anzahl der jährlich neu vorgestellten Serienfahrzeuge sowie Prototypen und Konzepte mit elektrifiziertem Antriebsstrang

Einige Hersteller – wie Toyota, Peugeot oder Honda – setzen ihren Schwerpunkt auf hybride Konzepte, die sich nicht extern an der Steckdose aufladen lassen (Abb. 4-11). Andere Hersteller – wie Volkswagen, Audi und Volvo – statten ihre hybriden Fahrzeuge mit Komponenten zum Nachladen der Batterie aus. Mit Audi, Mercedes-Benz, Ford, Volvo, Chevrolet und insbesondere Opel gibt es auch einige Hersteller, die EREVs in ihren Fahrzeugkonzepten und Serienfahrzeugen platziert haben, wenngleich diese Fahrzeuge eine eher untergeordnete Rolle bei den aktivsten Herstellern elektrifizierter Fahrzeugkonzepte einnehmen.

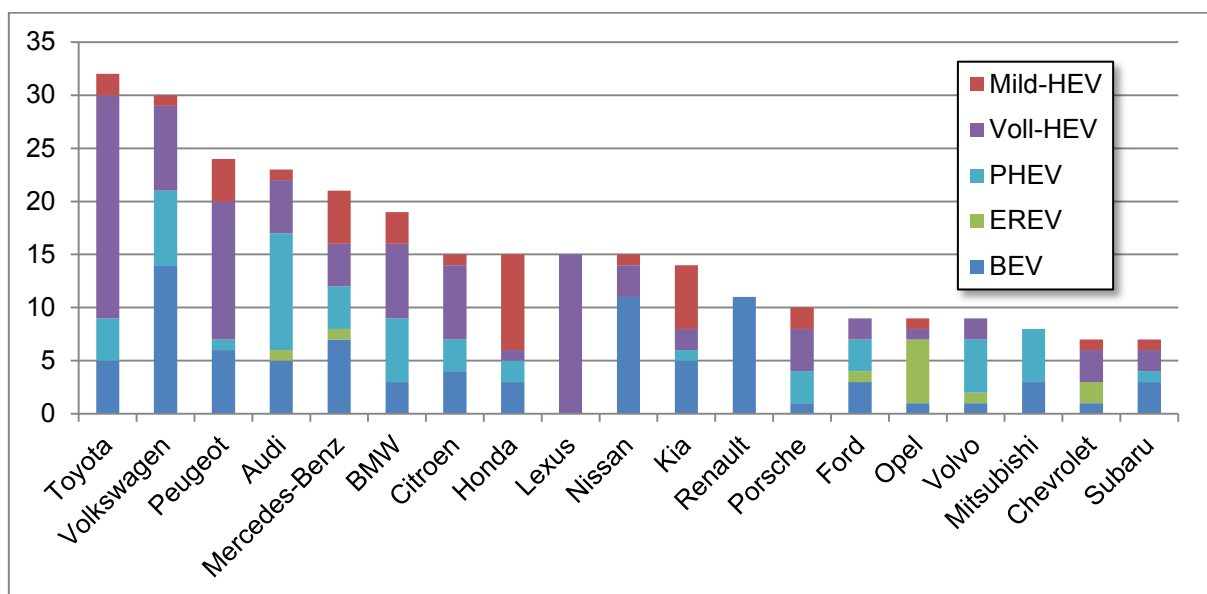


Abb. 4-11 Elektrifizierungsgrad der vorgestellten Fahrzeuge nach Fahrzeugherstellern

Fahrzeuge werden auch nach Massen- bzw. Leistungsklassen eingeteilt, wobei signifikante Unterschiede identifiziert werden können. Leichte Fahrzeuge mit einem Leergewicht von unter 500 kg werden hauptsächlich als batterieelektrische Fahrzeuge konzipiert (Abb. 4-12). Mit zunehmender Fahrzeugmasse gewinnen die Hybridvarianten an Bedeutung. Reichweitenverlängerte Fahrzeuge lassen sich nur ab 1000 kg ausfindig machen. Überdies zeigt sich, dass der größte Anteil elektrifizierter Fahrzeugkonzepte im Bereich zwischen 1000 kg und 2000 kg existiert. Fahrzeuge unter 500 kg und oberhalb von 2000 kg sind eher selten zu finden, zumindest bei der Betrachtung von Fahrzeugen der EG-Fahrzeugklasse M1 (Pkw).

Eine Untersuchung der Antriebskonzepte hinsichtlich der Leistungsklassen liefert ein ähnliches Ergebnis wie die Einteilung in Gewichtsklassen. Fahrzeuge mit niedriger Systemleistung sind deutlich häufiger batterieelektrische als Fahrzeuge mit viel Leistung. Mit zunehmender Leistung steigt der Anteil der hybridisierten Antriebsstränge, insbesondere auch der von Plug-in-Hybriden (Abb. 4-13). Bei der Verteilung der elektrifizierten Antriebsstränge über die Leistungsklassen tritt zutage, dass elektrifizierte Fahrzeuge mit hohen Leistungen deutlich häufiger vorkommen als Fahrzeuge mit einer geringen Systemleistung. Dies könnte als Indiz dafür gewertet werden, dass viele Hersteller ihre Kunden bei der Elektromobilität neben Umweltaspekten mit dem Fahrspaß überzeugen wollen. Trotz der möglicherweise etwas geringeren Leistung des Verbrennungsmotors können Hybridfahrzeuge dank ihrer elektrischen Antriebskomponenten die vom Fahrer geforderte Leistung kurzfristig zur Verfügung stellen. Darüber hinaus sind es besonders die großen und schweren Fahrzeuge, die den Herstellern Schwierigkeiten bei der Einhaltung der jeweils geltenden Emissions- oder Effi-

zientzvorschriften machen. In diesen Fahrzeugen, die häufig auch über mehr Leistung verfügen als kleine und kompakte Fahrzeuge, kann die Hybridisierung angesichts der derzeit geltenden Vorschriften, z. B. in der Europäischen Union, insbesondere auch in Verbindung mit der externen Nachlademöglichkeit für die Batterie helfen, die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch deutlich zu reduzieren. Bei kleinen Fahrzeugen können die Vorgaben häufig schon ohne Elektrifizierung eingehalten werden.

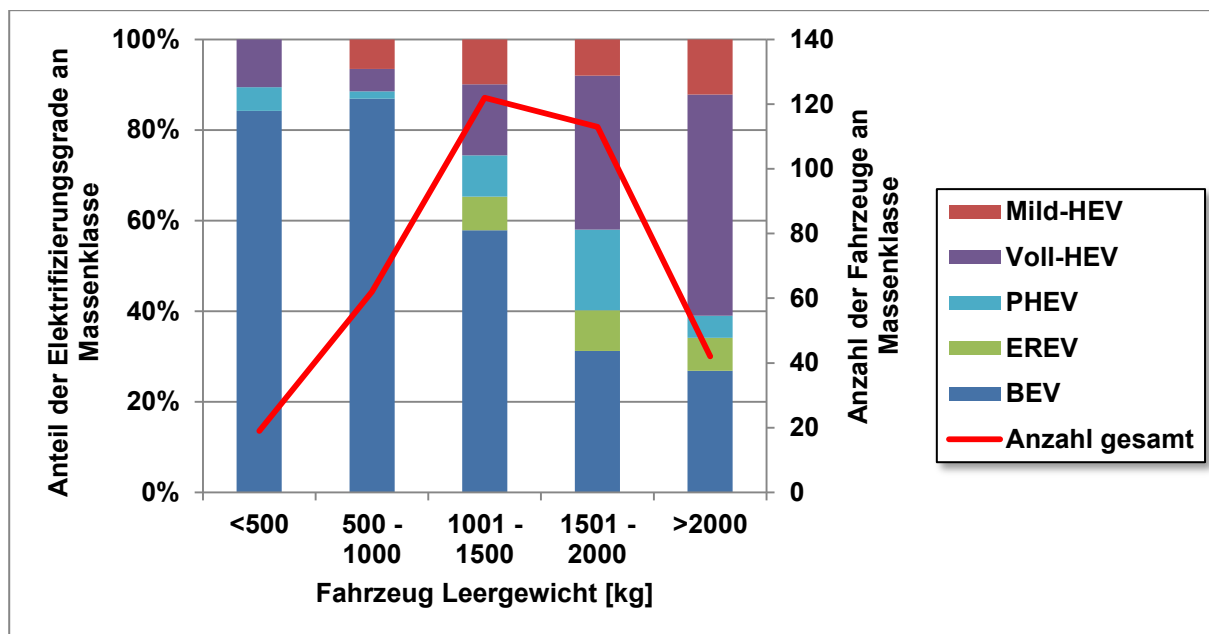


Abb. 4-12 Anteil der Elektrifizierungsvarianten pro Fahrzeuggewicht und Verteilung der elektrifizierten Fahrzeugkonzepte über Fahrzeuggewicht

Neben konzeptionellen sind auch technologische Varianten elektrifizierter Fahrzeuge von Interesse, vor allem Energiespeicher und elektrische Maschinen betreffend. Zu Beginn der Elektromobilitätsentwicklung zwischen 2005 und 2007 waren Fahrzeuge in der Regel mit Nickel-Metall-Hydrid-Batterien ausgestattet (Abb. 4-14), einige aber auch schon mit Li-Ionen-Batterien entwickelt. Ab 2007 überwiegt die Li-Ionen-Technologie und heute ist von einer Dominanz von Li-Ionen-Batterien bei elektrifizierten Fahrzeugkonzepten auszugehen. Dennoch werden regelmäßig Fahrzeuge mit anderem elektrischen Energiespeicher vorgestellt, z. B. mit Blei-Batterien, Kondensatoren (sogenannte Super-Caps), aber auch mit anderen chemischen Zusammensetzungen, mit Schwungradspeicher oder Redox-Flow-Batterien. Die in Abb. 4-14 unter „Sonstige“ aufgeführten Technologien spielen nicht nur hinsichtlich ihres Anteils oder ihrer absoluten Anzahl eine untergeordnete Rolle, sondern kommen in der Regel auch in Fahrzeugen in einem frühen Entwicklungsstadium vor. Oftmals sind sie, wie Forschungs- und Versuchsfahrzeuge, nicht für den Einsatz in der Großserie vorgesehen.

Der Anteil der Li-Ionen-Technologie bei Energiespeichern für elektrifizierte Fahrzeuge ist zwar derzeit der größte und auch weiterhin zunehmend, jedoch offenbart eine Betrachtung der verschiedenen Elektrifizierungsgrade einen vermehrten Einsatz von Li-Ionen-Batterien insbesondere mit steigender Elektrifizierung. Bei 90 % der batterieelektrischen Fahrzeuge, Range-Extender und sonstigen Plug-in-Hybride kommt diese Technologie zum Einsatz (siehe Abb. 4-15). Bei Fahrzeugen mit niedrigerem Elektrifizierungsgrad, wie Voll- oder Mild-Hybride, haben auch die anderen Technologien einen signifikanten Anteil. Über 50 % der

Voll-Hybride sind mit Nickel-Metall-Hydrid-Batterien ausgerüstet. Mild-Hybride verfügen mit einem Anteil von fast 10 % über Blei-Batterien als Energiespeicher und auch sonstige Technologien kommen in über 10 % der Mild-Hybride zum Einsatz. Insgesamt verfügt mit über 75 % der deutliche größte Anteil der Fahrzeuge über Li-Ionen-Technologie.

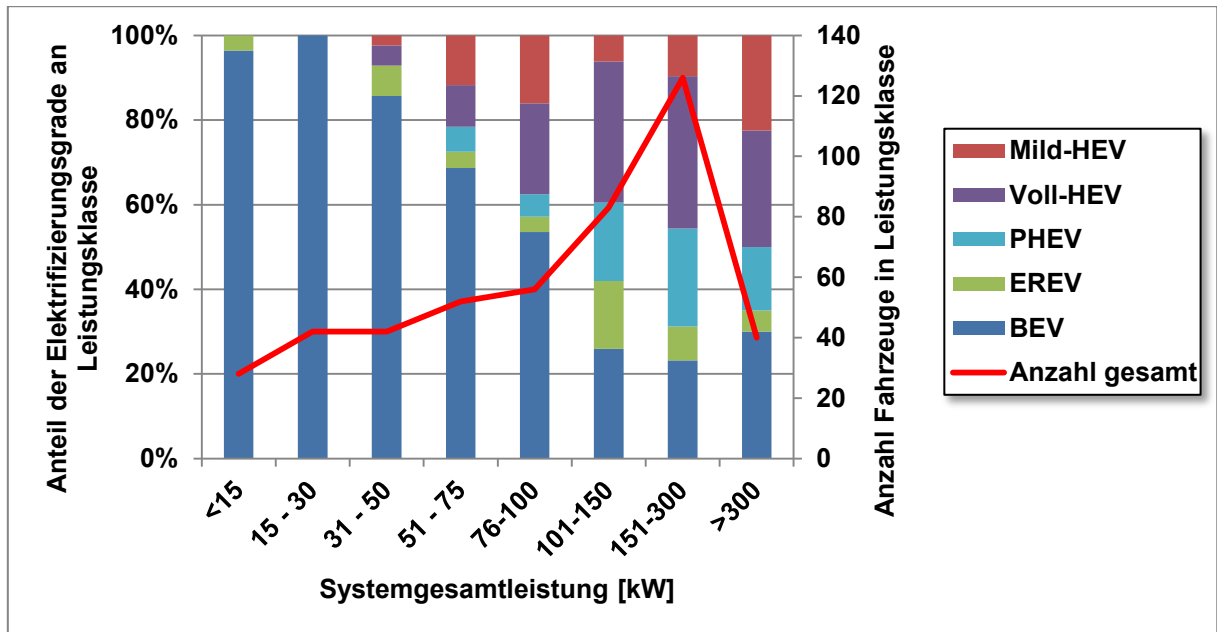


Abb. 4-13 Anteil der Elektrifizierungsvarianten pro Systemleistungsklasse und Verteilung der elektrifizierten Fahrzeugkonzepte über Systemleistung

Bereits am Markt verfügbare Serienfahrzeuge liefern ein ähnliches Bild: Von den zehn weltweit am meisten verkauften PEV verfügen neun über Li-Ionen-Batterien. Lediglich der ausschließlich in China angebotene Chery QQ3 konnte als Fahrzeug mit Blei-Batterie identifiziert werden.

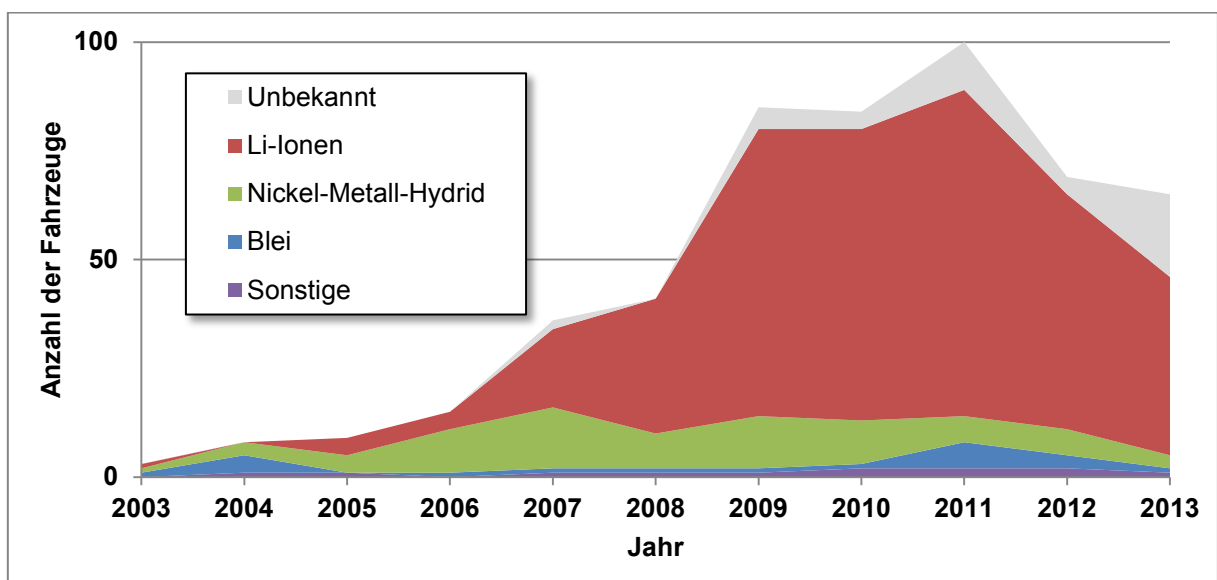


Abb. 4-14 Entwicklung der Anzahl der Fahrzeuge, welche mit den jeweiligen Energiespeichertechnologien ausgerüstet sind.

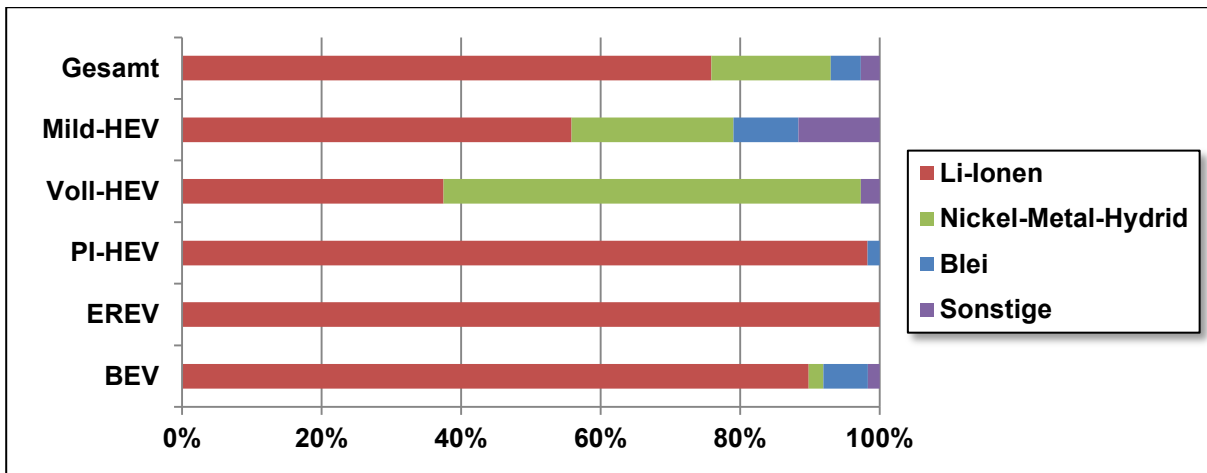


Abb. 4-15 Anteile der Energiespeichertechnologien bei den diversen Elektrifizierungsvarianten

Bei zum Einsatz kommenden elektrischen Maschinen fällt das Ergebnis noch deutlicher aus. Seit Beginn der Entwicklung ist ein ausgesprochener Schwerpunkt bei permanenten elektrischen Maschinen zu erkennen (Abb. 4-16). Diese Entwicklung setzt sich bis heute fort. Zwar gibt es immer wieder Konzepte mit anderen Maschinen, mengenmäßig allerdings auf niedrigem Niveau. Einschränkend ist zu bemerken, dass bei einer erheblichen Anzahl von Fahrzeugen der verwendete Maschinentyp nicht identifiziert werden konnte, da er bei Studien- oder Konzeptfahrzeugen in einer sehr frühen Entwicklungsphase teilweise noch nicht feststeht oder entsprechende Informationen nicht öffentlich zugänglich sind.

Der hohe Anteil permanenten elektrischer Maschinen ist insbesondere auch deshalb beachtlich, weil den Magneten dieser Maschinenart aufgrund der notwendigen Seltenerdelemente eine wichtige Rolle hinsichtlich der Rohstoff- und Versorgungssituation zukommt (siehe Kapitel 6). Die Ergebnisse legen nahe, dass die Vorteile bei der Effizienz sowie der Leistungsdichte gegenüber dieser Problematik jedoch überwiegen und mögliche Engpässe in der Zukunft derzeit noch keine sichtbaren Auswirkungen auf die Auswahl der Motorentechnologie durch den Hersteller haben.

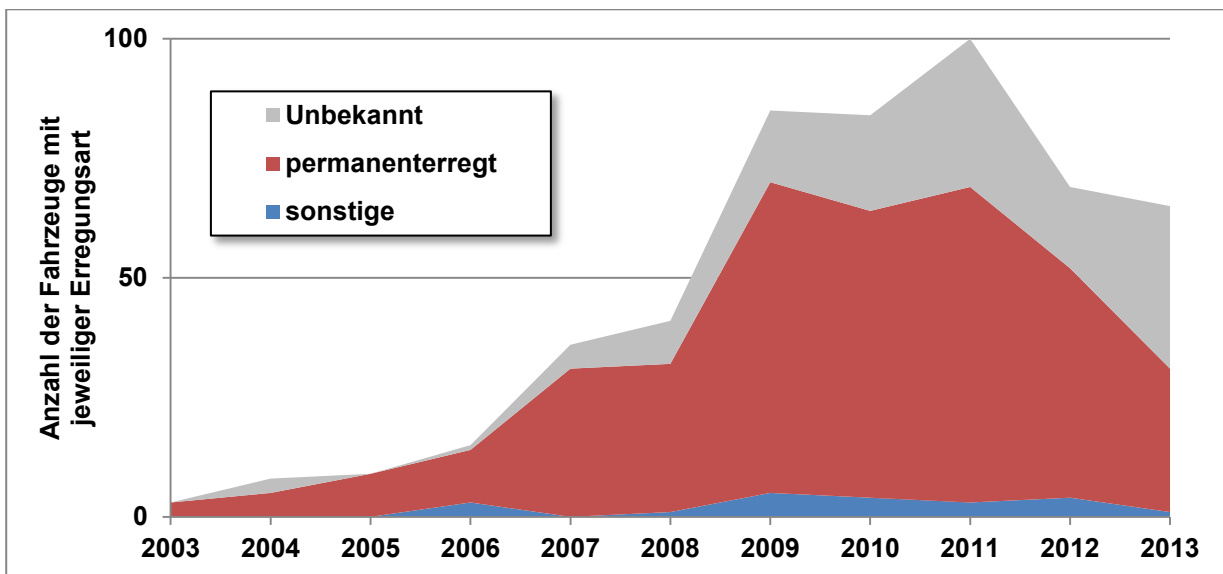


Abb. 4-16 Entwicklung der Anzahl der Fahrzeuge mit Maschinen der jeweiligen Erregungsart

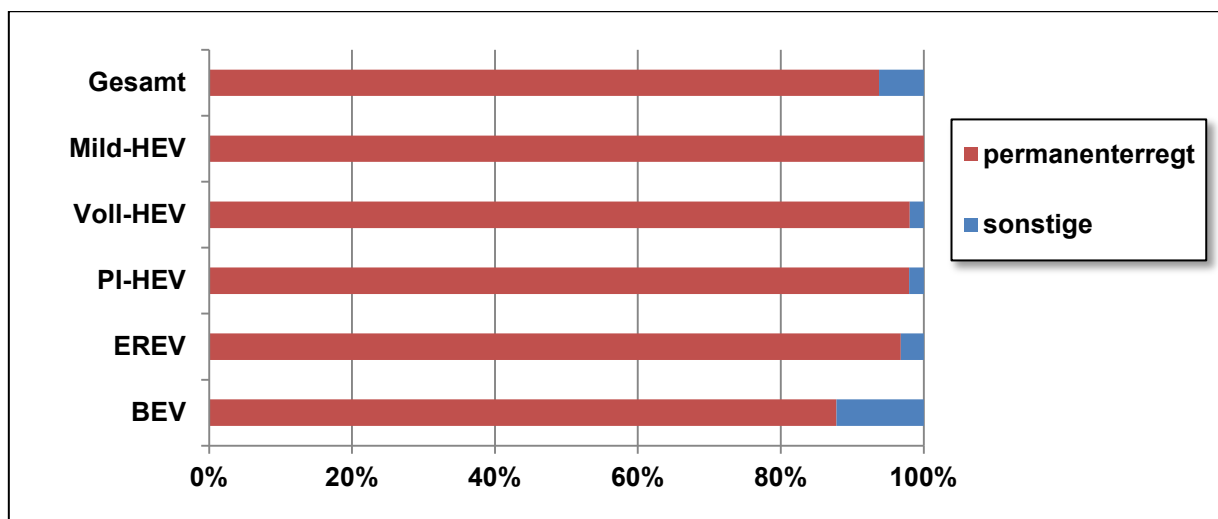


Abb. 4-17 Anteil der Erregungsarten an Elektrifizierungsgraden

Insgesamt haben permanent erregte Maschinen unter den Fahrzeugen mit identifiziertem Maschinentyp einen Anteil von über 90 % (Abb. 4-17). Bei batterieelektrischen Fahrzeugen ist der Anteil mit knapp unter 90 % am geringsten, wobei sich auch hier eine klare Tendenz abzeichnet. Unter den Mild-Hybriden konnte für keines der Fahrzeuge eine nicht permanent erregte Maschine ausgemacht werden.

Bei internationalen Experten hat sich die Ansicht etabliert, dass die permanent erregte elektrische Maschine den wichtigsten Maschinentyp für Elektrofahrzeuge darstellt. Entscheidende Faktoren sind die positiv ausgeprägten Eigenschaften wie Effizienz und Leistungsdichte (Klötzke et al. 2014a). Allerdings sehen viele Experten eine Problematik aufgrund der Versorgungssituation mit Seltenerdmetallen aufkommen. In Nordamerika und Japan geht man davon aus, dass aus diesem Grund langfristig vermehrt alternative Konzepte wie Asynchronmaschinen oder fremderregte Synchronmaschinen in den Fahrzeugen verbaut werden. Zudem können Fortschritte in der Materialentwicklung dazu führen, dass Substitutionsmaterialien die Seltenerdmetalle in den Permanentmagneten ersetzen oder zumindest deren Anteil reduzieren. Diese Entwicklung wird jedoch nicht vor 2030 erwartet. Lediglich in Indien werden derzeit zu einem größeren Teil Asynchronmaschinen eingesetzt, nach Expertenmeinungen deshalb, weil diese vergleichsweise einfach und günstig in der Herstellung und robust gegenüber äußeren Einflüssen sind, was für den indischen Fahrzeugmarkt eine wichtige Eigenschaft darstellt. Zudem gibt es in Indien zahlreiche Firmen, die diesen Maschinentyp für industrielle Anwendungen herstellen. Jedoch wird auch hier erwartet, dass sich mittelfristig permanent erregte elektrische Maschinen aufgrund ihrer technischen Eigenschaften durchsetzen.

Auch in der Mehrzahl der verkauften PEV kommen permanent erregte elektrische Maschinen zum Einsatz. In den Top 10 der meistverkauften PEV weltweit ist lediglich im Tesla Modell S sowie im Renault Twizy eine Asynchronmaschine verbaut.

Batterieelektrische Fahrzeuge weisen mit steigender Fahrzeugmasse mehr Leistung pro Masseinheit auf (Abb. 4-18). Während Fahrzeuge aus dem A-Segment (Kleinstwagen) im Durchschnitt über 39 W/kg elektrischer Leistung verfügen, besitzen Fahrzeuge aus dem B-Segment durchschnittlich schon 59 W/kg, Fahrzeuge aus dem C- und D-Segment ca. 68 W/kg. Eine Ausnahme stellen mit im Durchschnitt lediglich 42 W/kg elektrischer Leistung

die Fahrzeuge aus dem M-Segment dar. Diese Tendenz zeigt sich auch beim Leistungsspektrum: Fahrzeuge aus dem A-Segment bringen 22–70 W/kg mit, Fahrzeuge aus dem B-Segment immerhin schon 27–102 W/kg. Fahrzeuge aus dem C- und D-Segment liegen auch beim Leistungsspektrum mit 44–120 W/kg elektrischer Leistung ähnlich, Fahrzeuge aus dem M-Segment wiederum verfügen lediglich über 27–57 W/kg. Bei Fahrzeugen aus dem S-Segment (Sportwagen) liegen sowohl die durchschnittliche Leistung mit 130 W/kg als auch das Leistungsspektrum mit 78–244 W/kg deutlich über den Werten der anderen Segmente. Das ist wenig verwunderlich, da das Beschleunigungsverhalten, das bei einem Sportwagen in besonderem Maße ausgeprägt ist, eng mit der spezifischen Leistung verknüpft ist.

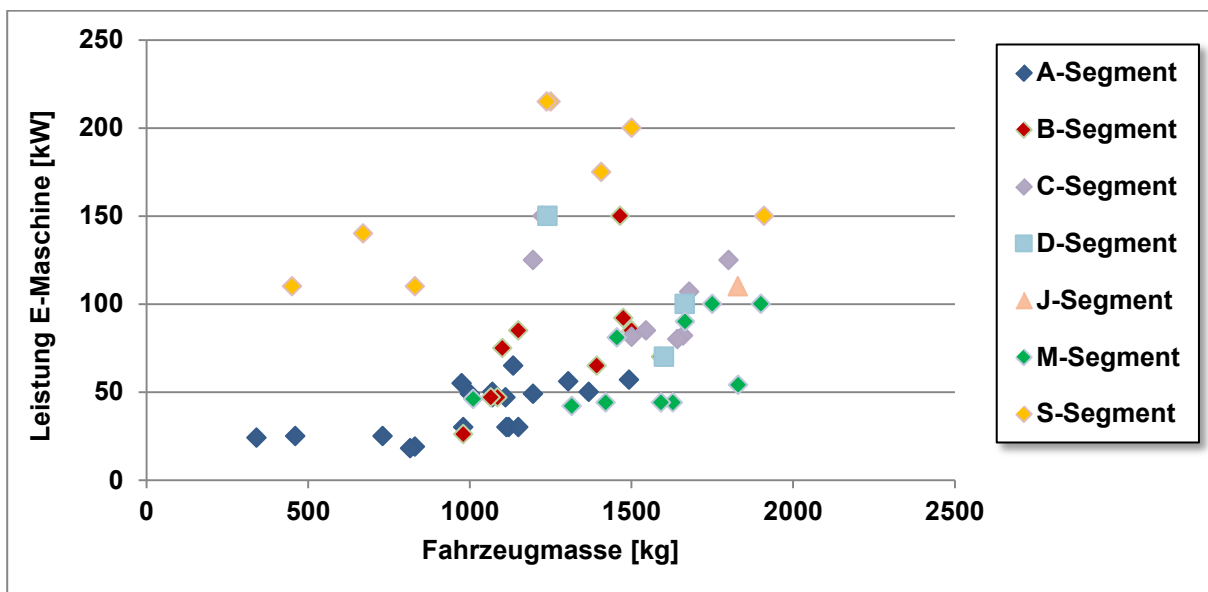


Abb. 4-18 Installierte Antriebsleistung pro Fahrzeugmasse bei batterieelektrischen Fahrzeugen (ohne Slow-Speed-Vehicles)

Auch hinsichtlich des Verhältnisses aus installierter Batteriekapazität und Fahrzeugleergewicht liegen die Vertreter des S-Segments vorn (Abb. 4-19). Diese Fahrzeuge verfügen im Mittel über 35 Wh/kg. Allerdings sind die Fahrzeuge der Segmente A, C, D und M, im Gegensatz zu den Ergebnissen für die installierte elektrische Leistung, bei der Batteriekapazität mit durchschnittlich 17 Wh/kg ungefähr gleich auf. Lediglich die untersuchten Fahrzeuge aus dem B-Segment verfügen mit einer Durchschnittskapazität von 21 Wh/kg über etwas mehr Energie im Verhältnis zu ihrer Fahrzeugmasse als bei den vorher genannten Segmenten. Allerdings ist bei allen Segmenten eine deutliche Spreizung festzustellen. Für die Fahrzeuge aus dem A-, C-, D- und M-Segment existieren Batteriekapazitäten von 9,4 Wh/kg bis 28 Wh/kg. Im B-Segment liegt der Minimalwert bei 14 Wh/kg, das Maximum bei 32 Wh/kg. Die Fahrzeuge aus dem S-Segment weisen eine Batteriekapazität zwischen 26 Wh/kg und 44 Wh/kg auf.

Bei Plug-in-Hybriden ist eine so klare Einordnung wie bei batterieelektrischen Fahrzeugen nicht möglich, denn die Fahrzeuge liegen schon innerhalb der einzelnen Segmente weiter auseinander. Bei der installierten elektrischen Leistung findet man für die Segmente C, D, E, F und J Ergebnisse zwischen 12 W/kg und 72 W/kg (Abb. 4-20). Kleinstfahrzeuge aus dem B-Segment liegen mit 25–84 W/kg etwas darüber.

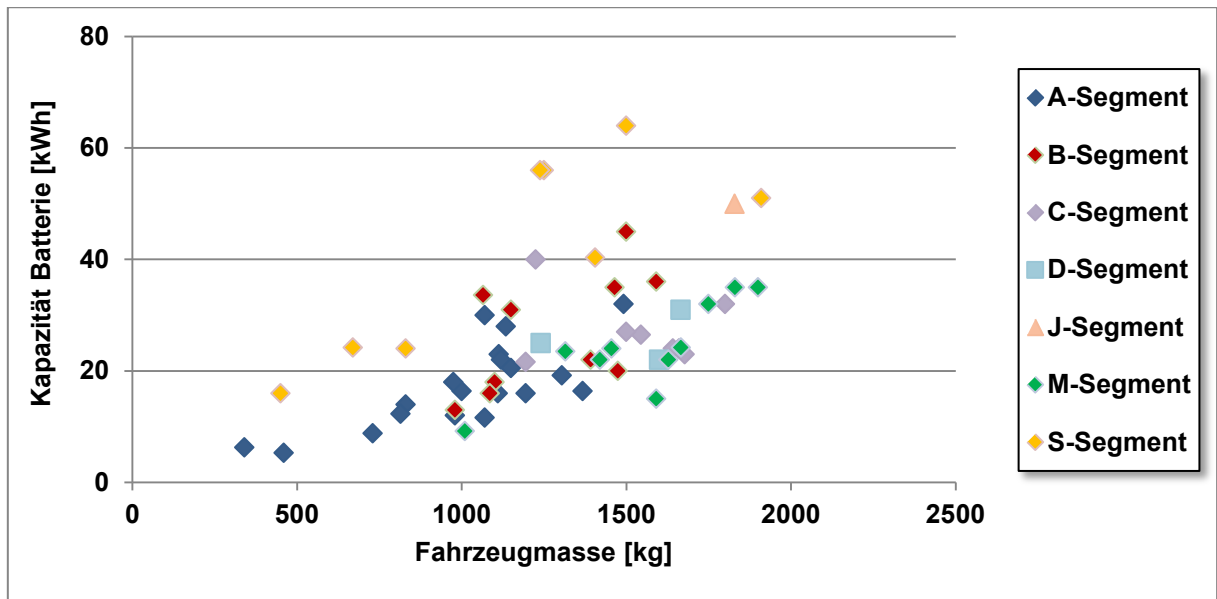


Abb. 4-19 Installierte Batteriekapazität pro Fahrzeugmasse bei batterieelektrischen Fahrzeugen (ohne Slow-Speed-Vehicles)

Bei Plug-in-Hybriden übersteigen die Sportwagen aus dem S-Segment die übrigen Fahrzeuge nicht in dem Maß wie bei batterieelektrischen Fahrzeugen und liegen mit 44–125 W/kg zwar über den Fahrzeugen der übrigen Segmente, allerdings ist der Unterschied nicht so deutlich. Gleichwohl lässt dies noch keine Aussage über die gesamte installierte Leistung zu, da der Verbrennungsmotor noch nicht berücksichtigt ist.

Bezüglich der installierten Batteriekapazität ist bei Plug-in-Hybriden kein Unterschied zwischen den Segmenten festzustellen. Zwar reicht die Spanne aus dem Verhältnis von Batteriekapazität und Fahrzeugleergewicht von ungefähr 3 Wh/kg bis etwas über 12 Wh/kg, allerdings ist keine signifikante Zuordnung zu einzelnen Segmenten möglich (Abb. 4-21).

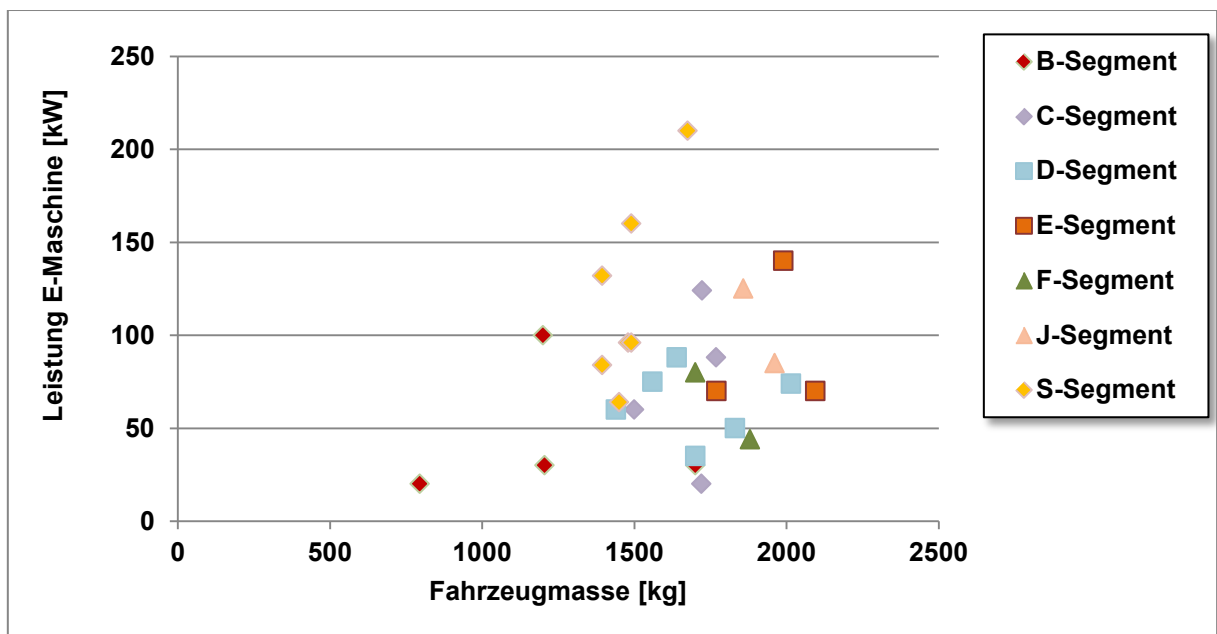


Abb. 4-20 Installierte Antriebsleistung pro Fahrzeugmasse bei Plug-in-Hybriden

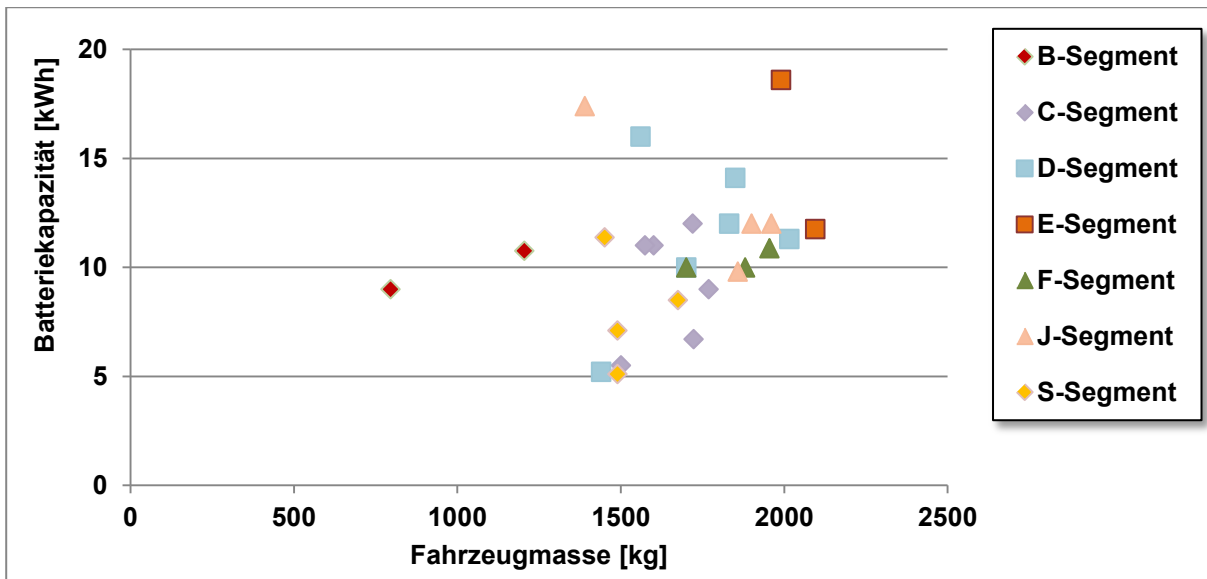


Abb. 4-21 Installierte Batteriekapazität pro Fahrzeugmasse bei Plug-in-Hybriden

Bei Voll-Hybriden lässt sich keinerlei Unterscheid zwischen den Fahrzeugsegmenten bezüglich des Verhältnisses aus elektrischer Leistung beziehungsweise Batteriekapazität und Fahrzeugmasse erkennen. Zwar liegt auch hier mit Werten zwischen 1,3 W/kg und 8,9 W/kg für die Leistung der elektrischen Maschine eine recht große Spreizung vor, diese verteilt sich jedoch gleichmäßig über die Segmente (Abb. 4-22).

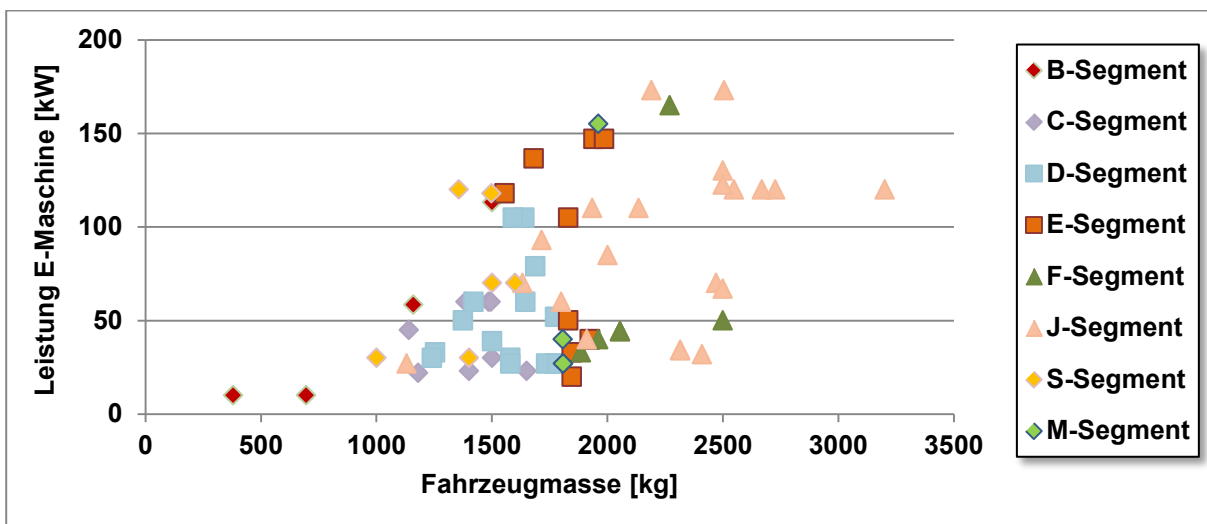


Abb. 4-22 Installierte Antriebsleistung pro Fahrzeugmasse bei Voll-Hybriden

Bei der Untersuchung der Batteriekapazität für Voll-Hybride kommt erschwerend hinzu, dass die Information zur installierten Kapazität nicht immer verfügbar ist. Aus diesem Grund enthält Abb. 4-23, in der die Batteriekapazität von Voll-Hybriden über das Fahrzeugleergewicht aufgetragen ist, deutlich weniger Fahrzeuge als Abb. 4-22 zum Verhältnis zwischen installierter elektrischer Antriebsleistung und Fahrzeugmasse. Die Batteriekapazität liegt über alle Fahrzeugsegmente zwischen 0,4 Wh/kg und 2,6 Wh/kg.

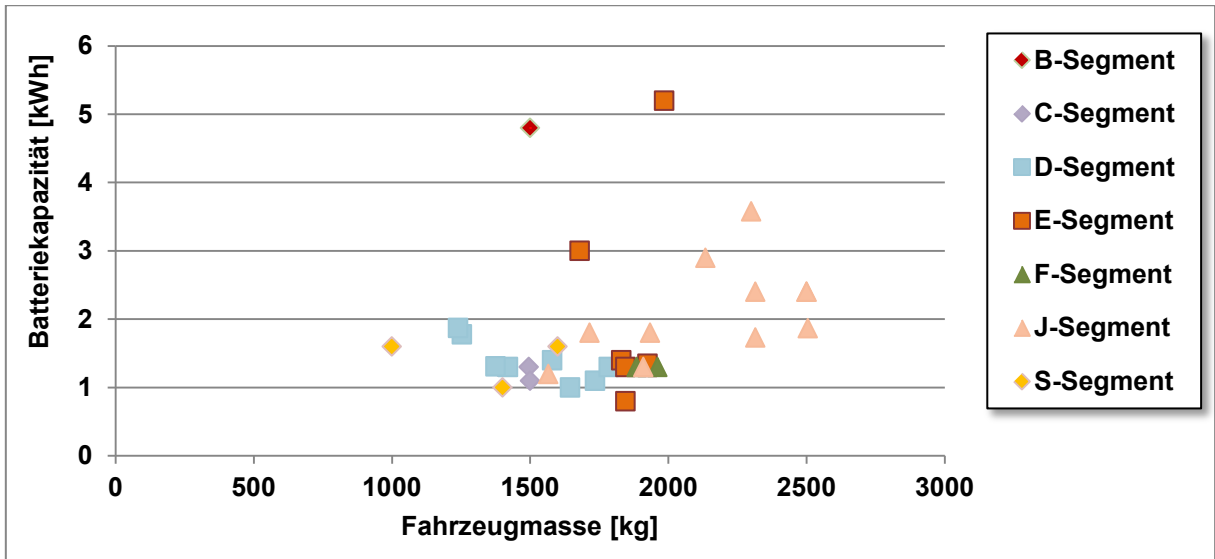


Abb. 4-23 Installierte Batteriekapazität pro Fahrzeugmasse bei Voll-Hybriden

4.2 Internationales Technologiemonitoring

B. Frieske (DLR), M. Klötzke (DLR)

Zur Abbildung der aktuellen Forschungslandschaft von Schlüsseltechnologien im speziellen Umfeld der Elektromobilität wurden bibliometrische Analysen globaler Patent- und Publikationsdaten von 2000 bis 2012 durchgeführt, d. h. die zugrunde liegenden (Meta-)Informationen referierter wissenschaftlicher Publikationen sowie veröffentlichter Patente in dezidierten Datenbanken per Indikatoren erfasst, strukturiert und harmonisiert, um damit sowohl quantitative Analysen (Anzahl Patente/Publikationen) per statistischer Auswertung als auch qualitative Analysen (Inhalte Patente/Publikationen) über Text- und Data-Mining-Funktionen durchführen zu können.

Insgesamt wurden im Rahmen dieser Untersuchung 54 687 Publikationen und 93 435 Patente im Bereich Hybrid- und Elektrofahrzeuge erfasst, die als für den Antriebsstrang elektrifizierter Pkw relevant bewertet und deshalb für die nachfolgende qualitative Inhaltsanalyse herangezogen wurden. Die jeweiligen Such- und Recherchestrategien in den Themenfeldern „E-Maschine“ und „Leistungselektronik“ wurden in den Datenbanken SCOPUS (Publikationsanalyse) und Espacenet des Europäischen Patentamts (EPO, Patentanalyse) in Kombination von IPC-Klassen (International Patent Classification) und Schlüsselworten ausgeführt.

Ziele der Analysen sind Identifikation und Vergleich internationaler Forschungsschwerpunkte und Entwicklungstrends in Bezug auf die Leistungselektronik und die elektrische Maschine als Schlüsseltechnologien der Elektromobilität sowie einzelner, ausgewählter Komponenten und Bauteile. Dabei wird insbesondere auf diejenigen Bauteile fokussiert, die von nationalen und internationalen Experten als besonders relevant für die technische Weiterentwicklung eingeschätzt wurden und an Inhalte des STROM-Programms anknüpfen. Im Rahmen dieser Untersuchung für die Leistungselektronik sind das z. B. passive Bauelemente wie Kondensatoren, v. a. aber aktive Elemente wie Halbleiter und hier im Speziellen neuartige Halbleitermaterialien wie Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN). Im Bereich der elektrischen Maschinen sind dies unterschiedliche Bauformen und auf Komponentenebene z. B. Stator und Rotor sowie Permanentmagnete. Zudem dient die Analyse dazu, führende Institutionen aus Industrie und Wissenschaft sowie Innovationsnetzwerke und -dynamiken zu identifizieren und letztlich einen internationalen Vergleich von Wettbewerbsfähigkeit und technologischer Position zu ermöglichen.

In den Datenbanken zur Leistungselektronik und zu E-Maschinen sind insgesamt 2 092 371 Datenpunkte über u. a. folgende Dimensionen auswertbar:

- Research field,
- Technology,
- Parameter,
- Title,
- Abstract,
- Keyword,
- Citation,
- Publication year,
- Applicant/Inventor/Institution/Author,
- Country/Worldregion,
- International Patent Classification (IPC).

Die Patentanalyse dient als originäres Instrument der strategischen Unternehmensführung der Untersuchung wettbewerbsrelevanter Aktivitäten in definierten Technologiefeldern und zielt als Planungs- und Entscheidungshilfe auf die Entwicklung von Handlungsempfehlungen für das Technologiemanagement ab (Chang 2012). Hierfür werden der enge Zusammenhang zwischen Investitionen im Bereich Forschung und Entwicklung (FuE) als Inputfaktor und Patentanmeldungen als Outputfaktor herangezogen. Patente beinhalten per Definition Erfindungen (Inventionen), die über den aktuellen Stand der Technik hinausgehen und in zukünftigen Produkten in konkreter Anwendung (Innovation) mit wirtschaftlichem Interesse Verwendung finden können (Pienkos 2005).

Neben der Nutzung als strategisches Planungstool ist die Patentanalyse ebenfalls zur Darstellung technologieorientierter Wettbewerbs- und Trendanalysen geeignet – wie im Rahmen dieses Arbeitspapiers realisiert. Patentinformationen werden damit als Indikatoren technologischer Trends und Entwicklungen sowie zur Bewertung der relativen Stärke von Technologieposition und Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich von Institutionen, Ländern und/oder Weltregionen genutzt.

Überdies kann die Analyse themenspezifisch rezensierter Publikationen als Indikator für FuE-Aktivität interpretiert werden (Ruegg & Jordan 2007). Beide Methoden werden in Kombination verwendet, um ein gesamtheitliches und objektives Bild internationaler Aktivitäten im Bereich Forschung und Entwicklung zu erhalten. Während Publikationen als Medium zur Dokumentation wissenschaftlicher Leistungen insbesondere dem Umfeld von Universitäten und Forschungsinstituten entstammen, werden Patente aufgrund des Aspekts der wirtschaftlichen Verwertung in konkreten Anwendungen eher der Industrie zugeordnet.

Die Patent- und Publikationsanalyse wurde in folgenden Schritten durchgeführt:

1. Identifikation und Definition von Technologiefeldern in den Bereichen „E-Maschine“ und „Leistungselektronik“ auf System-, Komponenten- und Bauteilebene,
2. Definition der Such- und Recherchestrategie über IPC-Klassen und Stichworte sofern nötig,
3. Datenerhebung in Zitations-, Abstract- und Patentdatenbanken (SCOPUS, Espacenet),
4. Strukturierung und Harmonisierung der Rohdaten und Definition relevanter bibliometrischer Indikatoren (z. B. Autor, Jahr, Institution, Titel, Abstract, Schutzrechtsanspruch, Forschungsthema),
5. Aufbau von Technologiedatenbanken,
6. Analyse der Patent(-meta-)informationen (quantitative Analyse),
7. Analyse der Patentinhalte mittels Text und Data Mining und Zuordnung zu Forschungs- und Technologiefeldern (qualitative Analyse),
8. Bestimmung der relativen Patentposition je Weltregion und Technologiefeld,
9. Bestimmung der Patentaktivität und Technologiedynamik je Weltregion und Technologiefeld, Darstellung von Innovationsnetzwerken sofern möglich,
10. Bestimmung der Forschungsschwerpunkte je Weltregion und Technologiefeld.

Zu den Treibern der Elektromobilität und innovativer Technologien für elektrifizierte Pkw zählen insbesondere Japan, die USA, Deutschland und Frankreich, die mit ihrer historisch gewachsenen starken Automobil- und Zuliefererindustrie große Anteile an den weltweiten FuE-Investitionen haben und damit auch im Bereich Patente und Publikationen signifikante Aktivitäten zeigen. Länder wie Indien oder China sind zwar aufgrund der schieren Größe des Markts und des Marktpotenzials von Bedeutung, jedoch (noch) keine Vorreiter in der techno-

logischen Entwicklung. Insbesondere für China wird vorliegende Analyse zeigen, dass die Innovationsdynamik auch im Bereich von Schlüsseltechnologien der Elektromobilität seit einigen Jahren stark zunimmt.

Im Folgenden werden die finalen Auswertungen zu Leistungselektronik und E-Maschine auf Systemebene sowie jeweils nachfolgend die Analysen auf Komponenten-, Bauteil- und Materialebene dargestellt. In einem ersten Schritt werden dabei jeweils die Gesamtanzahl der identifizierten und zum Schutzrecht angemeldeten Patente anteilig (in %) und/oder über die Zeit (Gesamtzahl p. a.) nach Weltregionen im Vergleich dargestellt und interpretiert. Die Analyse dieser Patentzahlen dient der Bewertung von Veränderungen in der Struktur und Bedeutung des jeweiligen *Patentmarkts* (im Folgenden nur „Markt“, „IP-Markt“). Im zweiten Schritt sollen dann Aussagen zur *Technologie* getätigt werden, indem nicht mehr betrachtet wird, auf welchem Markt die Patente, sondern von welcher Institution sie angemeldet wurden. Damit lassen sich die führenden und bei FuE-Aktivitäten aktivsten Unternehmen/Forschungseinrichtungen/Universitäten je Technologiefeld identifizieren, anhand ihres Hauptsitzes einer Weltregion zuordnen und letztlich über ein Ranking die Haupttreiber der Technologieentwicklung darstellen.

Zusätzlich werden in einzelnen Technologiefeldern ergänzende Analysen durchgeführt, um die Anzahl der in den Weltregionen aktiven Institutionen zu vergleichen und damit als Indikator für bestehende FuE-Strukturen und -Intensitäten heranzuziehen. Zudem sollen exemplarisch auch Vernetzungen und Dynamiken in der Zusammenarbeit von Institutionen bei Patentaktivitäten analysiert und vergleichend dargestellt werden. Diese Analyse dient der Interpretation bestehender Innovationsnetzwerke und -strukturen in verschiedenen Ländern.

4.2.1 Patent- und Publikationsanalyse „Leistungselektronik im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw“

Zur Analyse der Patentanmeldungen im Bereich „Leistungselektronik im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw“ wurde eine dezidierte Patentrecherche in der Patentdatenbank Espacenet des Europäischen Patentamts (EPO) durchgeführt. Für die in Abb. 4-24 angegebenen Technologiefelder sind insgesamt 52 IPC-(Unter-)Klassen herangezogen (z. B. B60L, B60W, B60K) und z. T. mit einer Stichwortsuche kombiniert worden. Die hervorgehobenen Felder werden im Detail analysiert.

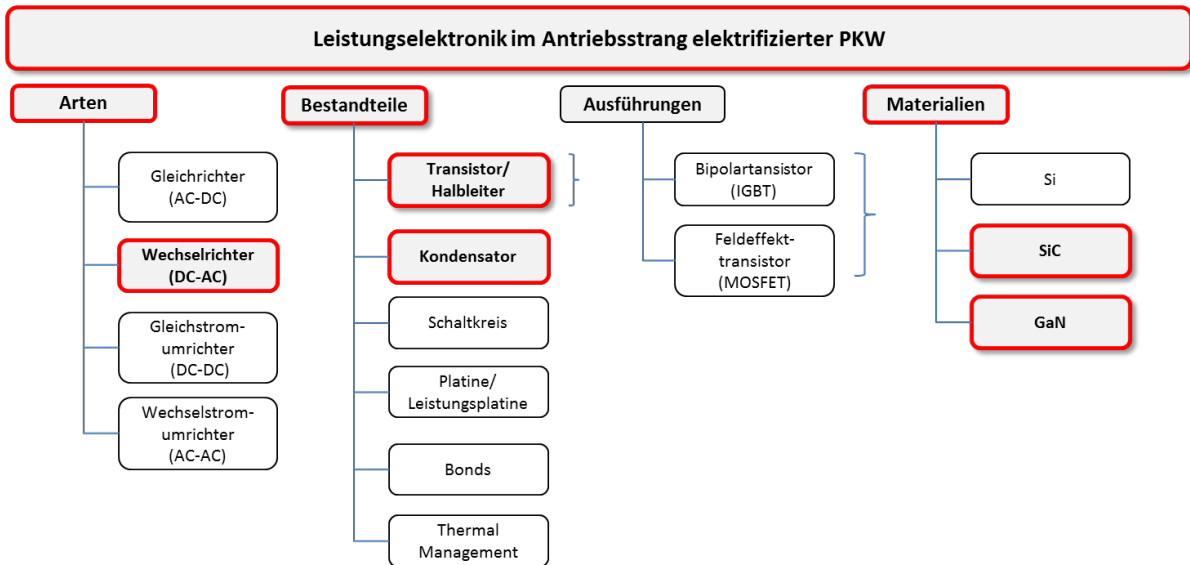


Abb. 4-24: Betrachtete Technologiefelder im Bereich Leistungselektronik

Insgesamt wurden in dem für diese Auswertung relevanten Feld „Leistungselektronik im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw“ über 47 000 Patente veröffentlicht, wobei die Patentmärkte Japan (JP), USA (US), China (CN), Europa (EP), Deutschland (DE) und Frankreich (FR) zusammen ca. 48 % aller Patentschriften verzeichnen konnten (ca. 23 000). Die überwiegende Mehrzahl der Patente in diesem Bereich von 2000 bis 2012 wurden in den USA angemeldet (ca. 6700; 29 %), gefolgt von Japan (5500; 24 %) sowie gleichverteilt Europa, China und Deutschland mit jeweils ca. 3400 Patenten und einem Anteil von 15 % (Abb. 4-25). Nur ca. 450 Patentschriften wurden auf dem französischen Markt für IP („Intellectual Property“) publiziert, um dort Schutzrechtsansprüche geltend zu machen.

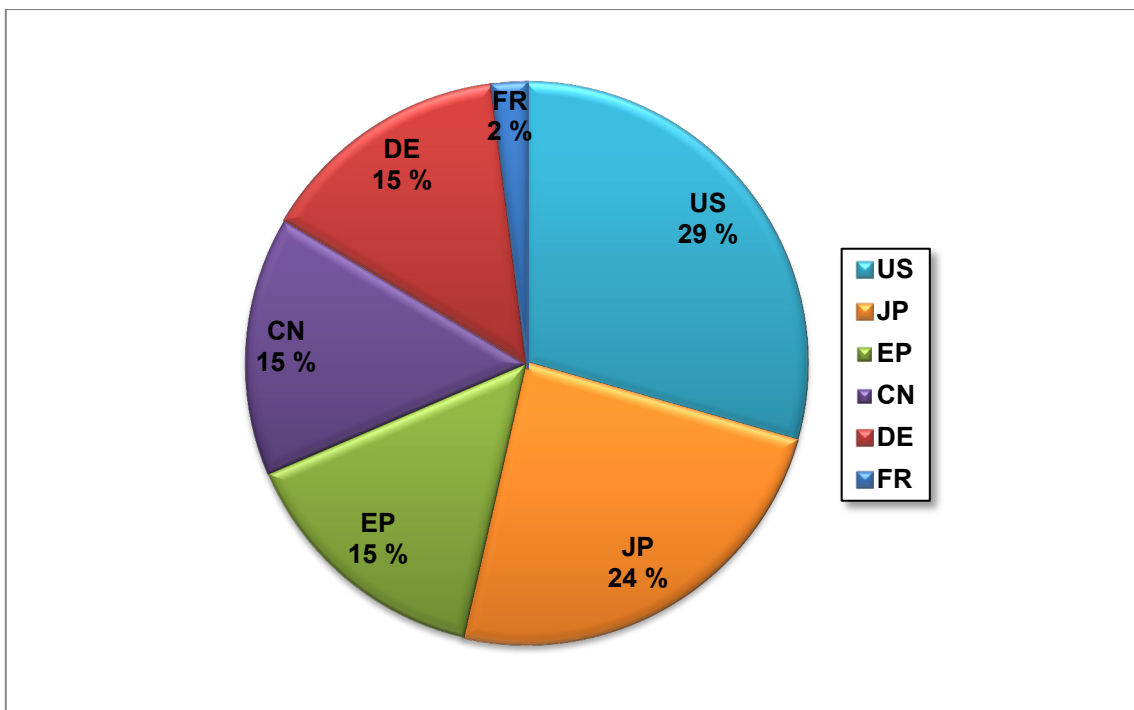


Abb. 4-25: Anteil Patente für betrachtete Weltregionen

Bei einem Vergleich der Offenlegung von Patentschriften im Bereich Leistungselektronik nach Zeit über die Jahre 2000 bis 2012 ist insgesamt ein Anstieg zu verzeichnen, wobei mit 4293 Patenten der Peak im Jahr 2012 erreicht wurde (Abb. 4-26).

Der japanische und der US-amerikanische IP-Markt hatten bis ins Jahr 2010 jeweils konstant steigende und relativ ähnliche Veröffentlichungszahlen. Während Japan dann aber auf einem relativ gleichbleibenden Niveau von ca. 700 Patenten pro Jahr stagnierte, konnten sich bis ins Jahr 2012 die USA einen klaren Vorsprung erarbeiten und den Patentoutput auf bis maximal 1400 pro Jahr steigern.

Die Bedeutung der chinesischen Patentanmeldungen stieg in den vergangenen Jahren kontinuierlich an; China verdrängte Deutschland bzw. Europa ab 2010 von Platz 3 und Japan 2011 erstmals knapp vom zweiten Platz.

Im direkten Vergleich der Patentsituation der Jahre 2000 und 2010 ist ein Anstieg der Veröffentlichungszahlen um knapp 900 % zu verzeichnen (430 auf 4293), wobei die USA ihre schon 2000 führende Position weiter ausbauen konnten und mit 779 die – in Bezug auf die Anzahl – meisten Anmeldungen vermeldeten. Dennoch verloren die USA aufgrund der höheren Gesamtzahl an Offenlegungen insgesamt an Marktanteil und pendelten sich im Jahr 2010 bei ca. 29 % ein, ein Verlust von knapp 5 % innerhalb einer Dekade.

Die Bedeutung des deutschen IP-Markts wurde geschwächt und sein Anteil von 20 % im Jahr 2000 auf 13 % verringert. Die Anzahl an Patentanmeldungen in Deutschland wuchs in diesem Zeitraum um nur ca. 400 %. Der deutsche Patentmarkt lag beim Wachstum dabei zwar vor Frankreich (ca. 300 %), aber hinter den USA (530 %), Japan (560 %), Europa (920 %) und insbesondere China (2870 %). Mit Abstand am meisten Dynamik ist damit in China zu beobachten. Hier konnte der Marktanteil innerhalb der letzten 10 Jahre von 3,7 % auf 16,8 % gesteigert werden. Die Anzahl offengelegter Patentschriften erreichte mit 459 den im Jahr 2010 drittbesten Wert.

Bemerkenswert ist die ab diesem Zeitpunkt sich noch einmal rasant verstärkende Dynamik: Innerhalb der folgenden zwei Jahre steigerte China den Anteil der auf dem eigenen IP-Markt veröffentlichten Patente von 16,8 % auf fast 27 %, während Japans Anteil von 24 % auf nur noch 17 % schrumpfte. Die USA konnten ihren Marktanteil nach Verlusten bis 2010 wiederum steigern und erreichten führende 32 % im Jahr 2012.

In Deutschland gingen bis 2012 die Patentanmeldungen konstant zurück, sodass nach einem Peak im Jahr 2009 nur noch 242 Patente in 2012 im Bereich Leistungselektronik veröffentlicht wurden und der Marktanteil um weitere 14 % auf nur noch 6 % fiel. In Frankreich ist eine nur leichte Steigerung der Gesamtzahl veröffentlichter Patente über die Jahre erkennbar. Der Marktanteil stagnierte dementsprechend auf einem relativ geringen Niveau zwischen 1,3 und 1,7 %.

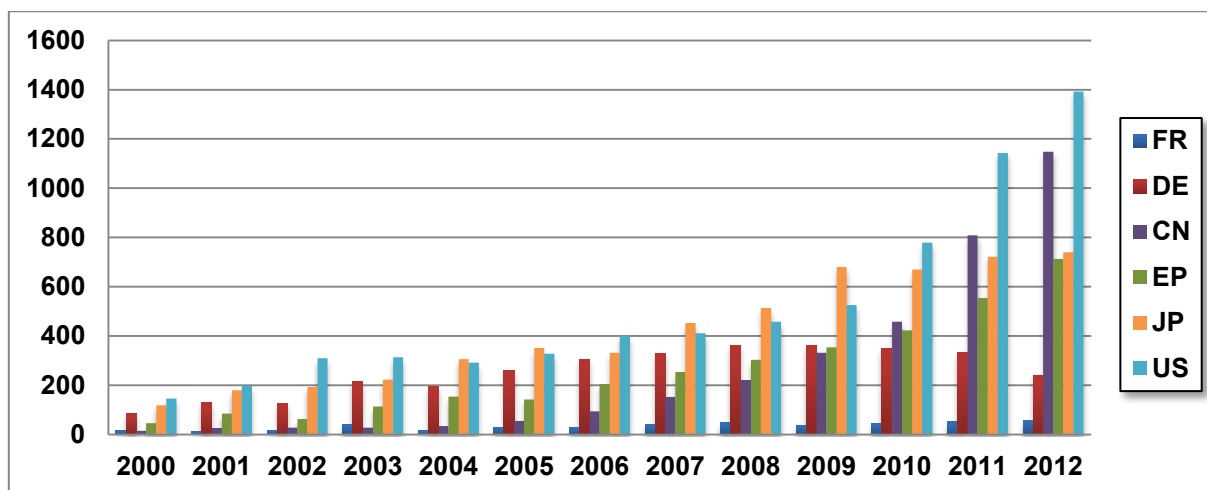


Abb. 4-26: Anzahl Patente nach Weltregionen 2000–2012

Die Analyse von Patentanmeldungen und -offenlegungszahlen dient der Identifikation von Aktivitäten und Dynamiken im internationalen Vergleich, um z. B. die Bedeutung der jeweiligen IP-Märkte über einen definierten Zeitraum zu gewichten. Zur Ableitung von Aussagen zur Technologieposition ist aber eine Untersuchung der jeweils führenden Institutionen innerhalb des Technologiefelds notwendig. Dies wird im folgenden Ranking für den Bereich Leistungselektronik im Antriebsstrang aufgezeigt.

Da die Aussagekraft der Patentanzahl beschränkt ist, sollen bei Erstellung des Rankings diejenigen Patentschriften ausgeklammert werden, die gleiche Inhalte in unterschiedlichen Weltregionen schützen bzw. derselben Patentfamilie zugeordnet werden können. So sollen Doppel- oder Mehrfachzählungen vermieden und das Ranking der Top-20-Institutionen anhand inhaltlich relevanter Erfindungen (oder Inventionen), die über den jeweiligen State-of-the-Art bestehender Lösungen hinausgehen, erstellt werden. Tab. 4-1 stellt das Ranking der Top-Patentanmelder nach Anzahl der Inventionen dar.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	TOYOTA MOTOR	6049	JP
2	NISSAN MOTOR	1977	JP
3	TOYOTA JIDOSHA	1470	JP
4	HONDA MOTOR	1208	JP
5	HYUNDAI MOTOR	696	SK
6	GM GLOBAL TECH OPERATIONS	575	US
7	DENSO	573	JP
8	HITACHI	571	JP
9	HONDA MOTOR	558	JP
10	AISIN AW	530	JP
11	ROBERT BOSCH	496	DE
12	FORD GLOBAL TECH	375	US

13	DAIMLER	345	DE
14	TOSHIBA	319	JP
15	MITSUBISHI JIDOSHA KOGYO	299	JP
16	MAZDA MOTOR	263	JP
17	ZF FRIEDRICHSHAFEN	248	DE
18	KIA MOTORS	247	SK
19	FUJI HEAVY IND	238	JP
20	BAYERISCHE MOTOREN WERKE	233	DE

Tab. 4-1 Top-20-Patentanmelder im Bereich Leistungselektronik nach Anzahl der Erfindungen

Im Ranking der weltweit führenden Patentanmelder belegen asiatische Unternehmen damit neun Positionen in den Top 10, wobei insbesondere japanische Institutionen weit überlegen und mit einer Gesamtzahl von 14 055 Erfindungen führend sind. Während Toyota (Motor + Jidosha) insgesamt auf 7591 Inventionen kommt, halten deutsche OEM 469 inhaltlich relevante Patente und finden sich mit Daimler (inkl. DaimlerChrysler) und BMW auf den Plätzen 13 und 20 wieder.

Bestplatziertes deutsches Unternehmen ist die Robert Bosch GmbH auf Rang 11 mit 496 Inventionen im Portfolio. Die USA sind mit GM (575) und Ford (375) auf Platz 6 bzw. 12 vertreten, Tesla Motors hält neun Patente im Bereich Leistungselektronik elektrifizierter Pkw. Bestplatzierte chinesische Unternehmen sind Chery Automobile und BYD mit 90 bzw. 50 Inventionen, gefolgt von der Tsinghua University in Peking mit 40 Erfindungen.

Patentlandschaft „Wandlertypen“

Unter den untersuchten Patenten im Bereich „Leistungselektronik im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw“ sind verschiedene Schwerpunktsetzungen erkennbar, die sich z. T. auf konkrete Anwendung im Komponenten- und Bauteilbereich beziehen und im Folgenden im Fokus der Analysen liegen werden.

Auf Komponentenebene befasst sich ein Großteil der Erfindungen (5225; 22 %) mit unterschiedlichen Wandlertypen. In einem Hybrid- oder Elektrofahrzeug werden aus diversen Gründen mehrere Arten von Stromrichtern benötigt, bei Nutzung einer Drehstrommaschine als Antriebseinheit bspw. ein bidirektionaler Gleich-/Wechselrichter, der im motorischen Betrieb die Gleichspannung von der Batterie in Wechselspannung für die elektrische Maschine wandelt und im generatorischen Betrieb umgekehrt die Wechselspannung in Gleichspannung.

Daneben ist in der Regel auch ein Gleichstromwandler erforderlich, der das Bordnetz in einen Hochspannungs- und einen Niederspannungsteil mit bedarfsgerechter Spannungsversorgung für Nebenaggregate aufteilt. Zusätzlich kann so eine stabile, vom Ladezustand der Batterie unabhängig Spannungsversorgung auf konstantem Niveau gesichert werden. Dies erleichtert die Auslegung aller elektrischen Komponenten und insbesondere der elektrischen Maschine. Nicht zuletzt besteht bei BEV und Plug-in-Hybriden eine weitere wichtige Aufgabe der Leistungselektronik darin, den Strom aus der Steckdose zum Speichern in der Batterie gleichzurichten (Ladegerätfunktionalität).

Wie Abb. 4-27 illustriert, bilden Erfindungen im Bereich Wechselrichter (Inverter) mit 2951 den insgesamt größten Anteil, gefolgt von Erfindungen im Bereich Gleichstromumrichter (1352; 26 %), Gleichrichter (607; 12 %) und Wechselstromumrichter (315; 6 %).

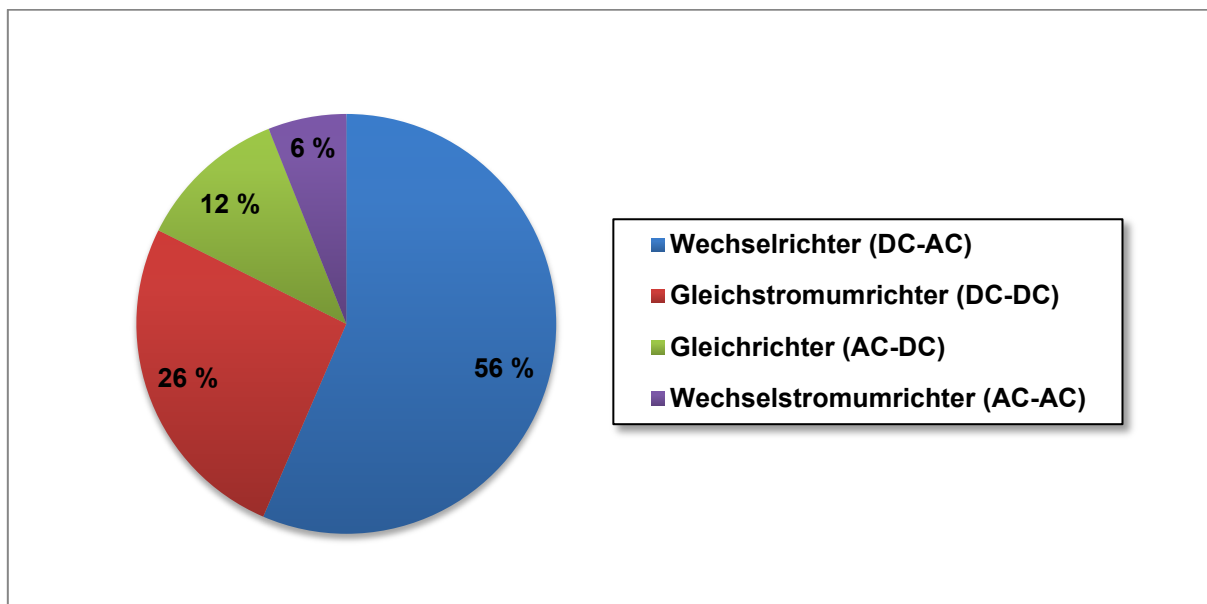


Abb. 4-27 Anteil Patente im Bereich „Wandlertypen“

Über alle Wandlertypen hinweg liegt auch hier eine Dominanz Japans vor, wobei der Anteil von über 65 % an allen Patentanmeldungen im Jahr 2000 auf ca. 51 % im Jahr 2010 und sogar unter 30 % im Jahr 2012 zurückging. Im selben Zeitraum verlor der deutsche IP-Markt trotz einer Verdopplung seines Patentoutputs in absoluten Zahlen knapp 6 % Marktanteil und entsprach nur noch 5 % des Gesamtmarkts, während auf EU- und US-Ebene der Anteil um jeweils ca. 5 % anstieg.

Den größten Zuwachs verzeichnete abermals der chinesische Patentmarkt, der die reine Anmeldungsmenge von vier im Jahr 2000 auf 141 in 2010 und 416 im Jahr 2012 steigern konnte. China nahm damit 2012 erstmals Platz 2 hinter Japan ein und verdrängte die USA auf Platz 3. Der Anteil des chinesischen Markts am Gesamtmarkt stieg von 2 % in 2000 auf 13 % im Jahr 2010 und 26 % in 2012.

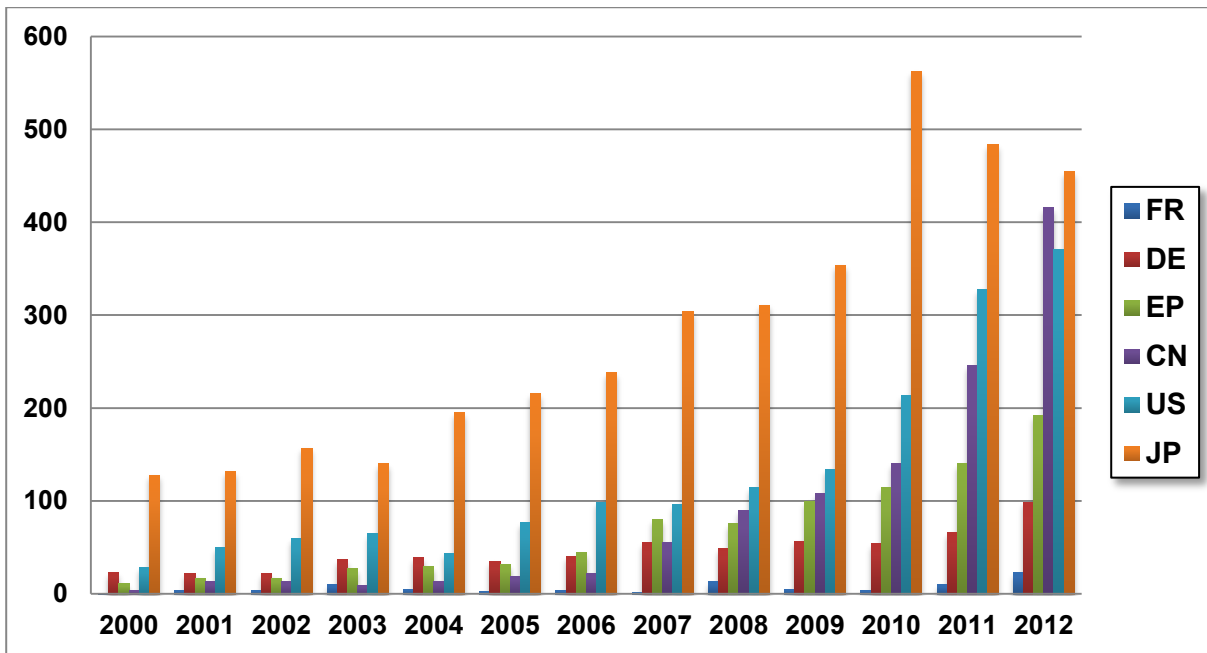


Abb. 4-28 Anteil Patente im Bereich „Wandler“ nach Weltregionen 2000–2012

Eine klare Fokussierung von Forschungsaktivitäten einzelner Weltregionen auf bestimmte Wandlertypen ist generell nicht erkennbar (Abb. 4-29). Die Aufteilung in Inverter (zwischen 40 % und 60 % Anteil), Gleichstromumrichter (17–25 %), Gleichrichter (7–14 %) und Wechselstromumrichter (6–10 %) variiert in relativ geringem Maße in den hier untersuchten Zeiträumen.

Eine leicht verstärkte Schwerpunktsetzung Deutschlands und Japans mit 57 % bzw. 59 % am Gesamtanteil aller Wandlertypen kann beim Wechselrichter (Inverter) identifiziert werden.

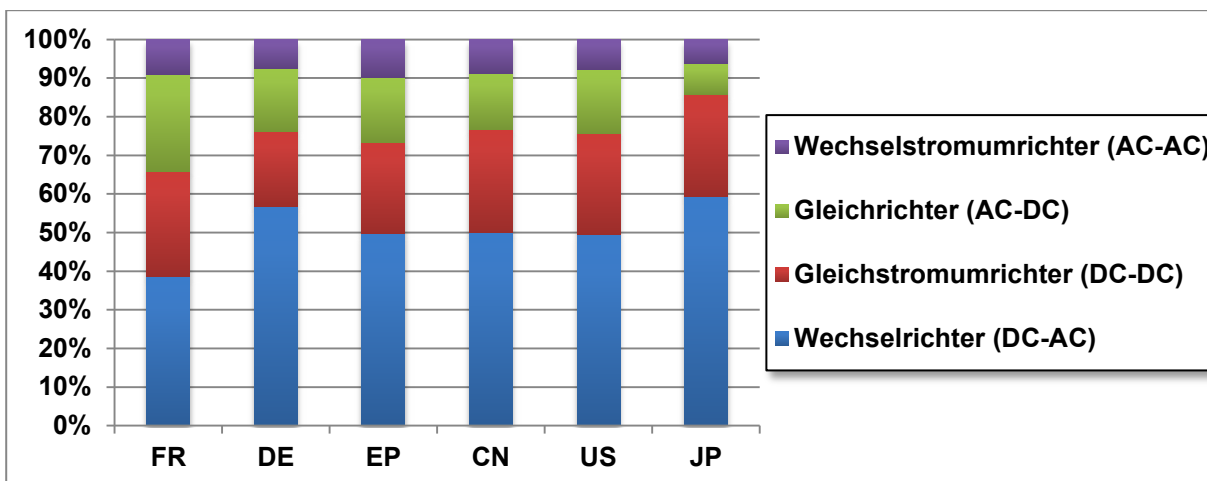


Abb. 4-29 Anteil Patente nach „Wandlertypen“ über Weltregionen

Patentlandschaft „Wechselrichter“

Im speziellen Feld der Patentveröffentlichungen, die im Zusammenhang mit Erfindungen im Bereich Wechselrichter stehen, ist Japan im untersuchten Zeitraum bei der Gesamtanzahl ebenfalls klar führend. Abb. 4-30 lässt jedoch eine bemerkenswerte Veränderung über die

Zeit erkennen: Während der japanische Patentmarkt im Jahr 2000 noch fast 70 % aller Anmeldungen verzeichnen konnte, schrumpfte dieser Anteil bis 2010 auf unter 55 % und innerhalb der nächsten zwei Jahre bis 2012 sogar auf unter 30 %.

Der Gesamtmarkt im Bereich Inverter ist innerhalb von zwölf Jahren um über 660 % gewachsen, die Anzahl der in Japan angemeldeten Patente gleichzeitig aber nur um ca. 280 %. Im Vergleich dazu konnte China den Anteil der Patentschriften ab 2006 kontinuierlich steigern und bezüglich der reinen Anzahl veröffentlichter Patente im Jahr 2012 erstmals die USA von Platz 2 verdrängen. Der Anteil am Gesamtmarkt wuchs so von ca. 2 % im Jahr 2000 auf über 11 % in 2010 und sogar 27 % in 2012.

Der Anteil Deutschlands rangierte über die letzten zwölf Jahre relativ konstant in einem Bereich von 6 % bis 7 %.

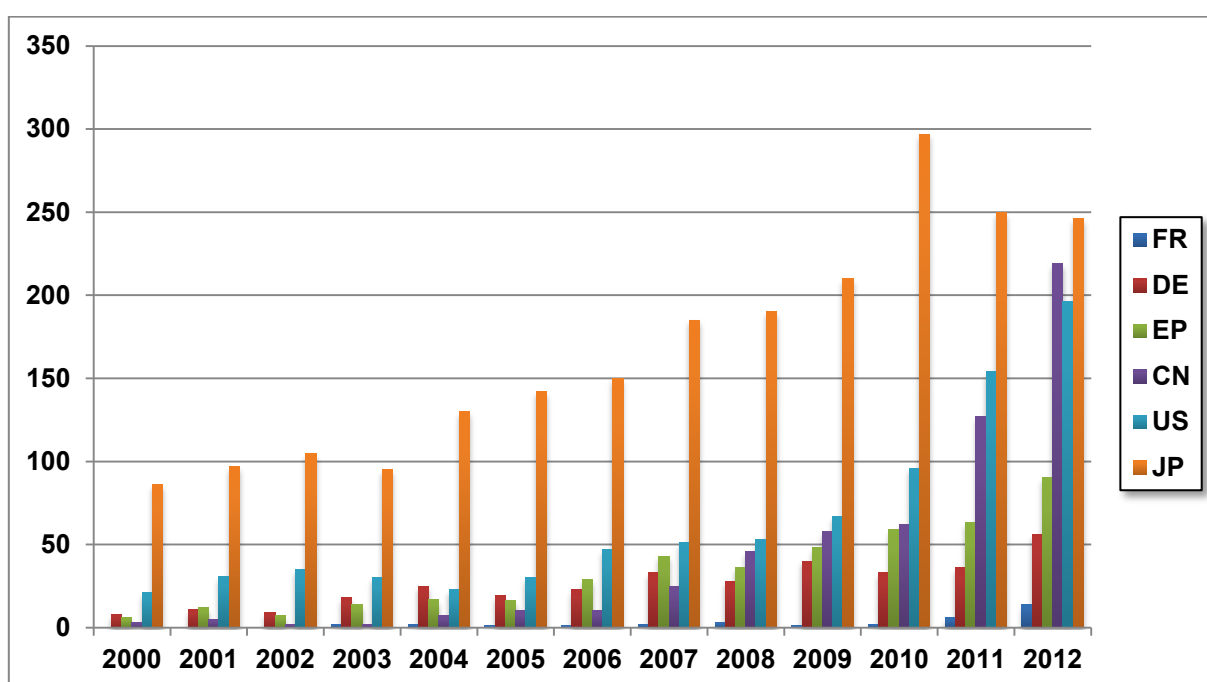


Abb. 4-30 Anzahl Patente im Bereich Wechselrichter nach Weltregionen 2000–2012

Im Ranking der weltweit führenden Patentanmelder im Bereich der Inverter belegen asiatische Institutionen die ersten zehn Ränge (Tab. 4-2), wobei japanische Unternehmen mit einer Gesamtzahl von 2047 Erfindungen führend sind.

Während allein der Toyota-Konzern mit Toyota Motor und Toyota Jidosha auf insgesamt 856 inhaltlich relevante Inventionen kommt, sind deutsche OEM in den Top 20 überhaupt nicht vertreten. Die stärksten Positionen aus deutscher Sicht in diesem Technologiefeld nehmen die Tier1-Zulieferer Siemens und Bosch ein, die gemeinsam 58 inhaltlich relevante Erfindungen (156 Patente) im Portfolio haben – das bedeutet die Plätze 13 (Siemens AG) und 14 (Robert Bosch GmbH).

Die bestplatzierten deutschen OEM sind Daimler (inkl. DaimlerChrysler) mit 13, Volkswagen und BMW mit jeweils sechs und Porsche mit zwei Inventionen. Die USA sind mit Ford (15) und Tesla (3) vertreten. Bestplatzierte chinesische Automobilhersteller sind Chery Automobile und BYD mit 14 bzw. 3 Inventionen.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	TOYOTA MOTOR	667	JP
2	HITACHI	198	JP
3	NISSAN MOTOR	197	JP
4	TOSHIBA	193	JP
5	TOYOTA JIDOSHA	189	JP
6	HONDA MOTOR	159	JP
7	DENSO	136	JP
8	mitsubishi denki	105	JP
9	HYUNDAI MOTOR	98	SK
10	AISIN AW	76	JP
11	GM GLOBAL TECH OPERATIONS	61	US
12	FUJI ELECTRIC	43	JP
13	SIEMENS	31	DE
14	ROBERT BOSCH	27	DE
15	KIA MOTORS	25	SK
16	FUJI HEAVY IND	23	JP
17	HINO MOTORS	23	JP
18	RAILWAY TECHNICAL RES INST	23	JP
19	MAZDA MOTOR	22	JP
20	MEIDENSHA	20	JP

Tab. 4-2 Top-20-Patentanmelder im Bereich Wechselrichter nach Anzahl der Erfindungen

Wird das Suchfeld im Bereich Wechselrichter auf Patentanmeldungen und Erfindungen, die sich nicht speziell auf elektrifizierte Pkw und die Leistungselektronik im Antriebsstrang beziehen, erweitert und damit auch Forschungsaktivitäten betrachtet, die z. B. im Bereich Luft- und Raumfahrt, Energie oder Schiene existieren, verstärkt sich das Bild der starken technologischen Position Asiens und speziell Japans noch.

In diesem Fall nehmen z. T. allerdings andere Institutionen die führenden 20 Positionen ein (Tab. 4-3): Mitsubishi Denki springt bei dieser weiter gefassten Analyse von Rang 8 auf Platz 1 der Liste, Toshiba von 4 auf 2 und Matsushita Electric Industries (bzw. die Panasonic Corporation) nimmt Rang 3 ein. Einziges nicht asiatisches Unternehmen in dieser Analyse ist Siemens, das mit 507 Inventionen Platz 16 belegt und sich damit in den Top 20 halten kann, während Bosch von Platz 14 auf 40 abrutscht.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	MITSUBISHI DENKI	2366	JP
2	TOSHIBA	1967	JP
3	MATSUSHITA ELECTRIC IND	1897	JP
4	HITACHI	1798	JP
5	TOYOTA MOTOR	1455	JP
6	DENSO	1024	JP
7	SAMSUNG ELECTRONICS	1006	SK
8	MATSUSHITA ELECTRIC WORKS	974	JP
9	FUJI ELECTRIC	834	JP
10	LG ELECTRONICS	812	SK
11	SANYO ELECTRIC	705	JP
12	PANASONIC	604	JP
13	NISSAN MOTOR	586	JP
14	SHARP	548	JP
15	DAIKIN IND	514	JP
16	SIEMENS	507	DE
17	MEIDENSHA	503	JP
18	HYNIX SEMICONDUCTOR	476	SK
19	YASKAWA ELECTRIC	474	JP
20	NEC	454	JP

Tab. 4-3 Top-20-Patentanmelder im Bereich Wechselrichter ohne Einschränkung auf elektrifizierte Pkw nach Anzahl der Erfindungen

Patentlandschaft „Kondensatoren“

Bei einer weiteren Analyse von Patentschriften – nun auf Bauteilebene – liegt der Fokus der Forschungen auf passiven Bauelementen wie Kondensatoren und aktiven Bauelementen wie Halbleitern. Das wichtigste Nicht-Halbleiter-Bauelement der Leistungselektronik ist der u. a. zur Spannungsglättung benötigte Kondensator. Da bei hohen Spannungen auch hohe Kapazitäten benötigt werden, nehmen Kondensatoren ein verhältnismäßig großes Bauvolumen in Anspruch und haben somit einen deutlichen Einfluss auf die erreichbare Leistungsdichte des Leistungselektroniksystems im Automobil. Als Bauweisen können dabei Folien- und Elektrolytkondensatoren zum Einsatz kommen.

Im Bereich Kondensatoren für die Leistungselektronik nach Weltregionen und über den Zeitraum 2000 bis 2012 ist insgesamt ein kontinuierlicher Anstieg der Patentzahlen zu verzeichnen, wobei mit 431 Patenten der Peak im Jahr 2012 erreicht wurde (Abb. 4-31).

Während der japanische IP-Markt insgesamt die meisten Patentanmeldungen zu verzeichnen hatte (1089), gefolgt von den USA mit 493 Patenten, wuchs die Bedeutung des chinesi-

schen Markts ab 2006 kontinuierlich, sodass er den US-amerikanischen erstmals 2010 vom zweiten Rang und Japan 2012 sogar an der Spitzenposition ablöste. Auch Deutschland und Europa konnten ihre Patentschriftmengen ab 2008 steigern, aber mit 7 % bzw. 10 % Anteil an den Gesamtveröffentlichungen über den kompletten Zeitraum nur einen Bruchteil der Gesamtanmeldungen verzeichnen.

Im direkten Vergleich der Patentsituationen der Jahre 2000 und 2010 ist ein Anstieg der Anmeldezahlen um knapp 400 % zu erkennen (54 zu 269), wobei insbesondere Europa und China ihre Positionen in 2010 stärken konnten und eine Steigerung ihres Marktanteils um 10 % bis 12 % realisierten. Japan und die USA verloren im gleichen Zeitraum trotz Zunahme der angemeldeten Patente um 330 % und 360 % Marktanteile in Höhe von 20 % (Japan) und 8 % (USA). 2012 besaß Japan nur noch 26 % Marktanteil und wies damit einen Gesamtverlust von 40 Prozentpunkten auf, war aber damit dennoch um einen Faktor 4 stärker als der deutsche IP-Markt.

Insgesamt konnte die Veröffentlichungszahl in Deutschland von nur zwei im Jahr 2000 auf 29 im Jahr 2012 gesteigert werden. Viel dynamischer stellte sich dagegen die Situation in China dar, wo von der gleichen Basis im Jahr 2000 ausgehend bereits 117 Patente in 2012 im Bereich der Kondensatoren offengelegt wurden – eine Steigerung von ca. 5800 %.

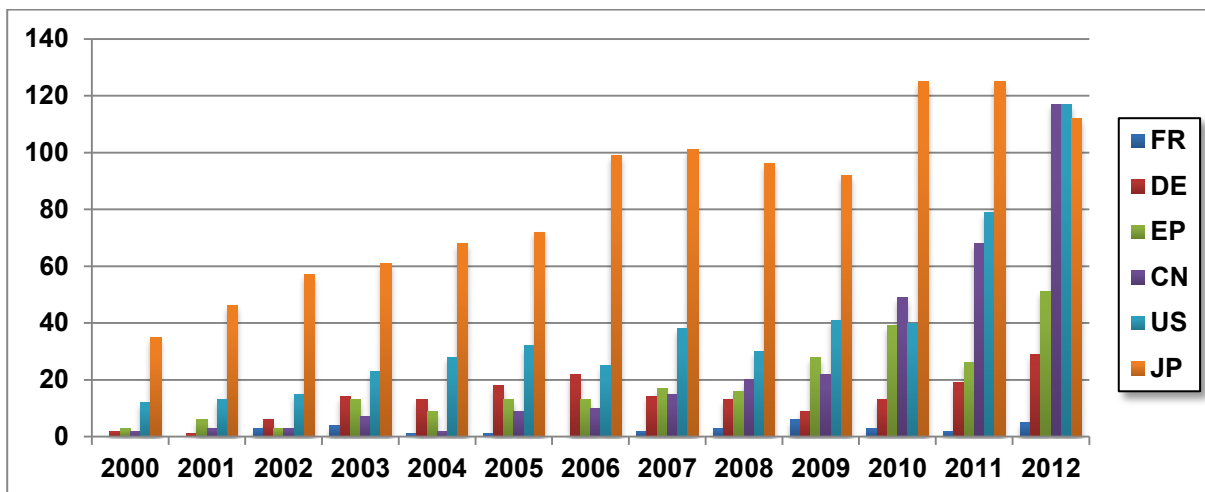


Abb. 4-31 Anzahl Patente im Bereich Kondensator nach Weltregionen 2000–2012

Im Ranking der weltweit führenden Patentanmelder belegen japanische Unternehmen 17 Positionen in den Top 20 und sind dabei mit einer Gesamtzahl von 973 Erfindungen führend (Tab. 4-4). Während Toyota Motor mit 277 Inventionen bestplatziertes japanischer OEM ist, folgen mit Honda, Nissan und Mazda drei weitere Automobilhersteller auf den Plätzen 2, 4 und 17. Deutsche OEM befinden sich mit Volkswagen (8), BMW (8), Daimler (6) sowie Audi und Porsche (jeweils 2) auf hinteren Plätzen.

Bestplatzierte deutsche Unternehmen in dieser Rangliste sind Siemens (22 Erfindungen, 53 Patente) auf Platz 11 und Bosch (11 Erfindungen, 20 Patente) auf Rang 23.

In den USA sind die Unternehmen GM (16 Inventionen), Ford (7) und Chrysler (3) in den Top 3 und im Bereich Patentanmeldungen für Kondensatoren am breitesten aufgestellt. In China führt die Tsinghua-Universität die Rangliste mit fünf Erfindungen an, gefolgt von Chery Automobile mit 2.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	TOYOTA MOTOR	277	JP
2	HONDA MOTOR	191	JP
3	TOYOTA JIDOSHA	75	JP
4	NISSAN MOTOR	69	JP
5	TOSHIBA	67	JP
6	HITACHI	66	JP
7	HYUNDAI MOTOR	54	SK
8	MITSUBISHI DENKI	38	JP
9	DENSO	32	JP
10	NISSAN DIESEL MOTOR	30	JP
11	SIEMENS	22	DE
12	AISIN AW	19	JP
13	MATSUSHITA ELECTRIC IND	18	JP
14	FUJI ELECTRIC	18	JP
15	MEIDENSHA	18	JP
16	SANYO ELECTRIC	17	JP
17	MAZDA MOTOR	15	JP
18	FUJI HEAVY IND	12	JP
19	GM GLOBAL TECH OPERATIONS	11	US
20	KOMATSU	11	JP

Tab. 4-4 Top-20-Patentanmelder im Bereich Kondensator nach Anzahl der Erfindungen

Wird auch hier eine vergleichende Analyse mit erweitertem Suchfeld durchgeführt, also keine Einschränkung im Bereich von Kondensatoren auf den Antriebsstrang elektrifizierter Pkw vorgenommen, lassen sich über 115 000 Erfindungen identifizieren. Führend bei dieser Untersuchung ist Matsushita (Japan) mit 4722 Inventionen, gefolgt von Hynix Semiconductor (Südkorea, 3379) und Murata Manufacturing (Japan, 3206). Siemens (899), Infineon (898) und Bosch (321) sind die bestplatzierten deutschen Unternehmen.

Patentlandschaft „Halbleiter“

Im Bereich der aktiven Bauelemente der Leistungselektronik stehen insbesondere Halbleiter im Fokus der Forschung. Für die Funktion der Leistungselektronik sind Schalterelemente nötig, die hohe Ströme mit hoher Frequenz schalten können. Hierzu kommen praktisch ausschließlich Halbleiter-Bauelemente zum Einsatz.

Im automobilen Bereich werden Transistoren als Halbleiterschalter eingesetzt und grundsätzlich drei Bauweisen unterschieden: Bipolartransistoren (BPT), Feldeffekttransistoren

(FET) und Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode (IGBT). Im automobilen Bereich sind vor allem IGBT und – bei niedrigerem elektrischen Leistungsbedarf – MOSFET (engl. metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) relevant.

Insgesamt sind von 2000 bis 2012 939 Patente im Bereich Halbleiter für die Leistungselektronik im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw angemeldet worden. Der japanische Markt nahm dabei ca. 40 % aller Veröffentlichungen ein, gefolgt von den USA mit knapp 25 %, China (14 %), Europa (11 %) und Deutschland (10 %) (Abb. 4-32).

Im Verlauf sind bedeutende Verschiebungen zu erkennen: Während Japan im Jahr 2000 noch 45 % aller Patentanmeldungen verzeichnen konnte und bis 2010 nur einen kleinen Anteil verlor (42 %), fiel der Markt in den dann folgenden beiden Jahren auf einen Anteil von nur noch 24 %. Die Zahl der in China angemeldeten Patente stieg ab 2007 kontinuierlich auf insgesamt 36 im Jahr 2012 an, sodass China mit 27 % dann die führende Position vor Japan und den USA (23 %) einnahm.

Der deutsche Markt stagnierte in diesem Zeitraum mit drei bis 11 Patentanmeldungen pro Jahr und verlor im Vergleich der Jahre 2000 und 2010 insgesamt 12 % Marktanteil.

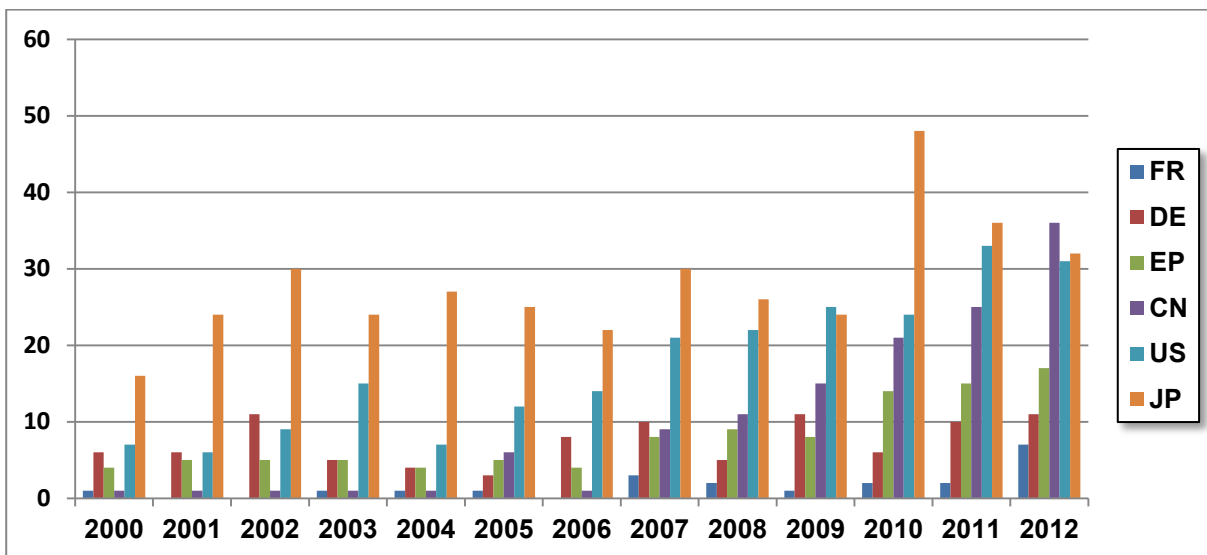


Abb. 4-32 Anzahl Patente im Bereich Halbleiter nach Weltregionen 2000–2012

Tab. 4-5 verdeutlicht, dass auch im Bereich der Halbleiter japanische Institutionen mit Abstand führend sind. Unter den bestplatzierten zehn Patentanmeldern finden sich mit Hyundai (Südkorea), GM (USA) und Daimler (Deutschland) auf den Plätzen 7, 8 und 10 nur drei nicht japanische Unternehmen. Toyota führt wiederum die Liste mit insgesamt 107 angemeldeten und veröffentlichten Patentschriften an.

Als Zulieferer konnten Siemens und Bosch mit 73 und 33 Patenten im eigenen Portfolio bzw. 14 und 9 inhaltlich relevanten Erfindungen auf den Plätzen 12 und 17 eingeordnet werden. Daimler (inkl. DaimlerChrysler) hat 15 Erfindungen in diesem Bereich geleistet und ist bestplatziertes deutsches OEM. Audi, Volkswagen und BMW haben jeweils eine Erfindung im Portfolio.

Insgesamt nur 16 Erfindungen können chinesische Institutionen vorweisen, wobei die Tianjin Santroll Electric Automobile Technology Co. Ltd. mit drei Erfindungen führend ist. BYD und

Chery Automobile haben jeweils eine Invention zum Patent angemeldet. In den USA folgen nach GM mit 15 Erfindungen Ford (4) und Chrysler (3) auf den Plätzen 2 und 3.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	TOYOTA MOTOR	82	JP
2	HITACHI	48	JP
3	HONDA MOTOR	32	JP
4	TOSHIBA	30	JP
5	TOYOTA JIDOSHA	25	JP
6	NISSAN MOTOR	18	JP
7	HYUNDAI MOTOR	17	SK
8	GM GLOBAL TECH OPERATIONS	15	US
9	DENSO	15	JP
10	DAIMLER	15	DE
11	MITSUBISHI DENKI	14	JP
12	SIEMENS	14	DE
13	FUJI ELECTRIC	13	JP
14	TOYODA AUTOMATIC LOOM WORKS	11	JP
15	SUMITOMO ELECTRIC IND	10	JP
16	HITACHI AUTOMOTIVE SYSTEMS	8	JP
17	ROBERT BOSCH	9	DE
18	AISIN AW	6	JP
19	NIPPONDENSO	6	JP
20	TOSHIBA TRANSPORT ENG	6	JP

Tab. 4-5 Top-20-Patentanmelder im Bereich Halbleiter nach Anzahl der Erfindungen

Bei einer Erweiterung des Suchfelds auf alle Patente und Inventionen im Bereich Halbleiter – ohne Einschränkung auf den Bereich elektrifizierter Pkw – verschiebt sich das Bild führender Institutionen auf dem Technologiefeld in Richtung Südkorea: Hier ist Hynix Semiconductor (Südkorea) mit 9324 Erfindungen führend, gefolgt von Toshiba (8742, Japan) und Samsung Electronics (8226, Südkorea). IBM als bestplatziertes US-amerikanisches Unternehmen folgt auf Platz 9 mit 3732 Erfindungen im Portfolio. Infineon führt das Ranking der deutschen Patentanmelder mit 2738 an (im Gesamtranking auf Platz 14), gefolgt von Siemens (971) und Qimonda (433, mittlerweile insolvent).

Die beiden abschließenden Analysen befassen sich mit neuartigen Materialien für Halbleiter, und hier insbesondere mit Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN), die den sog. Wide-Bandgap-Materialien (WBG) zuzuordnen sind.

Patentlandschaft „Halbleitermaterial – Siliziumkarbid (SiC)“

Von besonderer Bedeutung für die Leistungselektronik sind die verwendeten Halbleitermaterialien. Bei der Verwendung monokristallinen Siliziums (Si), dem derzeit am häufigsten eingesetzten Werkstoff, besteht eine Beschränkung der Einsatztemperatur auf ca. 175 °C. Damit ergibt sich sowohl ein erheblicher Kühlungsbedarf, der die erzielbare Leistungsdichte reduziert, als auch eine Beschränkung der Haltbarkeit und Schaltfrequenz, da die letztlich Wärme abgebenden Schaltverluste frequenzabhängig sind. Ziel ist es daher, Halbleitermaterialien mit möglichst hohen Temperaturbeständigkeiten zu verwenden. Mögliche Alternativen stellen beispielsweise Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) dar, die deutlich höhere Temperaturen ermöglichen (bis zu 600 °C), günstigere Schalteigenschaften besitzen und höhere Schaltfrequenzen realisieren können. Problematisch sind dabei die im Vergleich zu Si höheren Kosten, die vor allem durch die aufwendigere Waferherstellung und Kristallzüchtung bedingt sind. Allerdings ist hier schon eine deutlich sinkende Tendenz festzustellen: Während im Falle von SiC die Kosten im Jahr 2007 noch etwa um einen Faktor 100 höher waren, betrug dieser 2013 nur noch 3 bis 6 im Vergleich zu Silizium (Si).¹⁰ Unter Berücksichtigung der positiven Einflüsse auf das Gesamtsystem (Kühlaufwand, verkleinerte Spulen wegen höherer Schaltfrequenz) könnten mit SiC-Halbleiterelementen unter günstigen Rahmenbedingungen sogar geringere Systemkosten als mit Si erzielt werden.

Im speziellen Feld der Patentveröffentlichungen, die im Zusammenhang mit Erfindungen im Bereich SiC als Halbleitermaterial für die Leistungselektronik stehen, ist Japan (1284 Patente) im untersuchten Zeitraum bei der Gesamtanzahl führend, dicht gefolgt von den USA (1096). Beide Länder lagen über den gesamten Zeitraum bei der Anzahl der Patentanmeldungen jeweils eng beieinander, wobei Japan insbesondere ab 2007 die führende Position übernahm und die Patentanmeldungen jedes Jahr kontinuierlich steigerte (Abb. 4-33).

Ein bemerkenswerter Sprung ist in China im Jahr 2012 insofern zu beobachten, als die Patentzahl im Vergleich zum Vorjahr mehr als verdoppelt wurde. China festigte damit die erstmals im Jahr 2009 und nachfolgend in 2011 von der EU eroberte dritte Position und baute den Vorsprung deutlich aus. Auch Deutschland konnte die Anzahl der Patentanmeldungen bis ins Jahr 2006 steigern, stagnierte dann jedoch in einem Bereich von 20 bis 25 Patenten pro Jahr. Nur 11 Patentansprüche wurden im gesamten Zeitraum in Frankreich publiziert.

Im direkten Vergleich der Jahre 2000 und 2010 konnte Japan den Anteil am Gesamtmarkt von 28 % auf ca. 40 % ausbauen, gleichzeitig verlor der US-amerikanische IP-Markt 15 Prozentpunkte. Während China seinen Anteil bis 2010 kaum verändern konnte (7 % im Jahr 2000; 9 % in 2010), erhöhte sich dann die Dynamik rasant, sodass der Anteil an Patentanmeldungen in China einen Wert von über 20 % erreicht hat.

¹⁰ Vgl. Zühlke, K. (<http://www.elektroniknet.de/distribution/design-in/artikel/99817>).

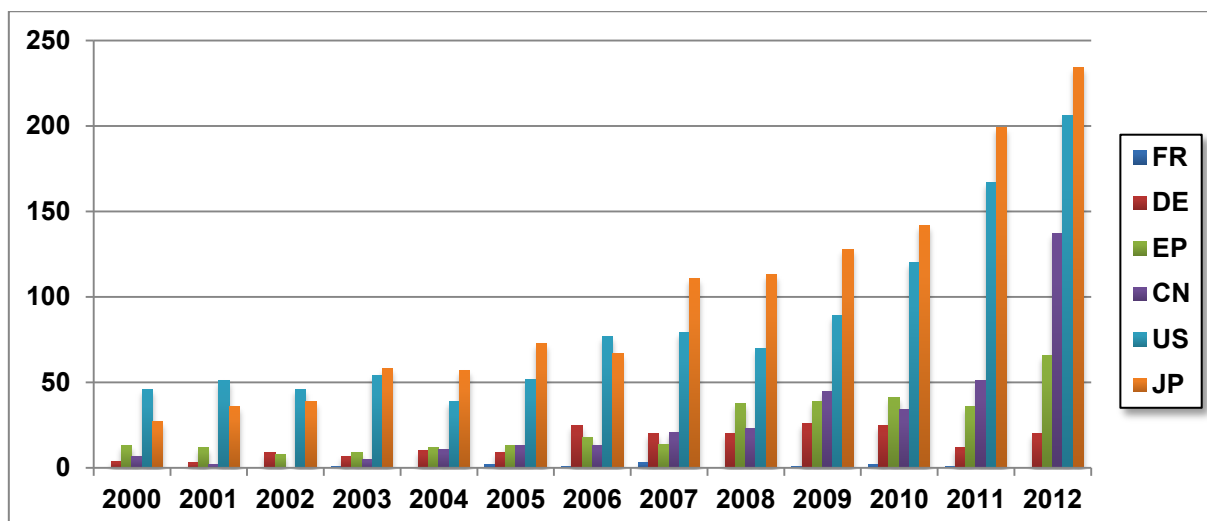


Abb. 4-33 Anzahl Patente im Bereich SiC nach Weltregionen 2000–2012

Wie im Bereich der Halbleiter sind japanische Institutionen auch im speziellen Feld der Halbleitermaterialien (SiC) führend und belegen neun Plätze in den Top 10 (Tab. 4-6). Denso (178 Erfindungen) steht dabei vor Sumitomo Electric (167), Mitsubishi (123), Nissan (95), Matsushita Electric (89) und Toshiba (70), bevor auf Platz 7 das erste nicht japanische Unternehmen mit Cree (66) folgt. Bemerkenswert ist, dass trotz des sehr speziellen Technologiefelds und Forschungen auf Halbleitermaterialebene sowohl Nissan als auch Toyota als automotiv OEM in der Rangliste zu finden sind. Insgesamt 126 Institutionen konnten identifiziert werden, die in Japan Forschung zum Thema SiC betreiben.

Deutsche OEM sind in der gesamten Rangliste nur durch Daimler mit zwei Inventionen im Portfolio vertreten. Weder in Frankreich und den USA noch in China gibt es auf diesem Gebiet Schutzrechte beanspruchende OEM. Als Zulieferer konnten Siemens und Infineon mit 101 bzw. 57 Patenten im eigenen Portfolio bzw. 30 und 21 inhaltlich relevanten Erfindungen auf den Plätzen 13 und 17 eingeordnet werden. Die Top 4 in Deutschland komplettieren nach Siemens und Infineon SiCED Electronics mit 73 Patenten (15 Inventionen) und Bosch mit sechs Patenten (5 Inventionen). Insgesamt forschen 19 verschiedene Institutionen in Deutschland an diesem Thema.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	DENSO	178	JP
2	SUMITOMO ELECTRIC IND	167	JP
3	MITSUBISHI DENKI	123	JP
4	NISSAN MOTOR	95	JP
5	MATSUSHITA ELECTRIC IND	89	JP
6	TOSHIBA	70	JP
7	CREE	66	US
8	FUJI ELECTRIC	74	JP
9	NATIONAL INST ADVANCED IND SCI & TECH	57	JP

10	PANASONIC	44	JP
11	HITACHI	41	JP
12	TOYOTA MOTOR	37	JP
13	SIEMENS	30	DE
14	FUJITSU	25	JP
15	KANSAI ELECTRIC POWER	25	JP
16	SANYO ELECTRIC	23	JP
17	INFINEON TECH	21	DE
18	INTL BUSINESS MACHINES	20	US
19	ROHM	18	JP
20	GEN ELECTRIC	17	US

Tab. 4-6 Top-20-Patentanmelder im Bereich SiC nach Anzahl der Erfindungen

In den USA sind neben Cree und IBM weitere 72 Unternehmen in der Forschung aktiv, z. B. General Electric (18 Erfindungen), Micron Technology (15), Semisouth Laboratories (15) und Texas Instruments (13). China stellt insgesamt 26 Institutionen, darunter Xidian University (14), Semiconductor Manufacturing International (14) und China Electronics Technology Group (7) die Top 3. Bemerkenswert ist, dass eine Universität das Ranking in China anführt.



Abb. 4-34 Anzahl Institutionen mit Forschungsaktivitäten im Bereich SiC nach Weltregionen

Neben einer Untersuchung der geografischen Verteilung können über eine Patentanalyse auch Kooperationstätigkeiten und gemeinsame Forschungs- bzw. Innovationsnetzwerke und -dynamiken identifiziert werden. Hierzu werden Verbindungen einzelner Institutionen oder Erfinder über Patente hinweg visualisiert.

Während Denso als führende Institution im Bereich SiC im Innovationsnetzwerk über verschiedene Patente sowohl mit Hitachi (Rang 11) als auch Toyota Motor, Toyota Jidosha und Toyota Central R&D Labs vernetzt ist, scheint Sumitomo Electric auf Rang 2 Forschung und

Technologieentwicklungen eher ohne Kooperationsaktivitäten zu forcieren, da eine Verbindung nur zu Kansai Electric Power zu identifizieren ist (Abb. 4-35).

Nissan hingegen scheint in der Forschungsarbeit relativ stark vernetzt zu sein, Verbindungen sind sowohl zu Rohm als auch zum Institute of Advanced International Science, zu Toshiba und zu Sanyo Electric erkennbar. Über letztere Verbindung ist wiederum Hitachi im Innovationsnetzwerk von Nissan vertreten.

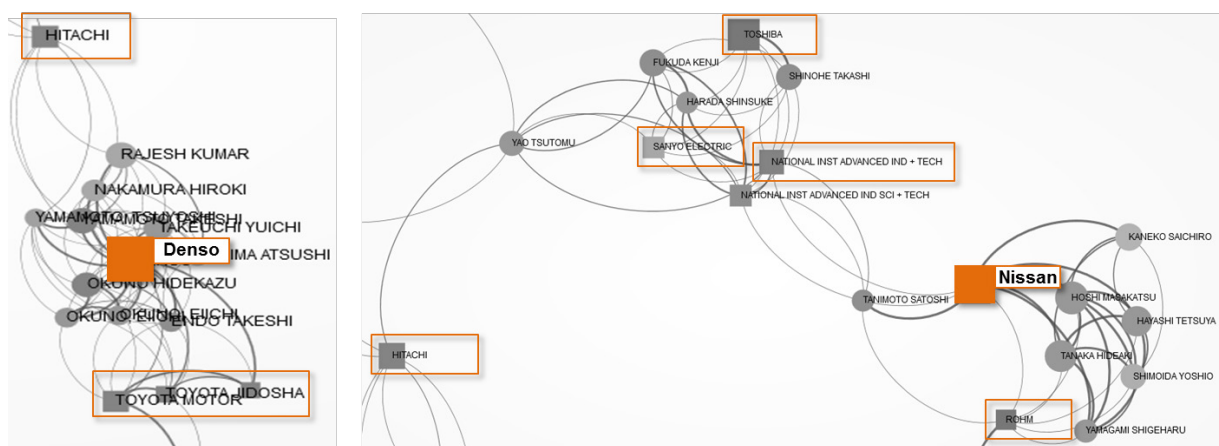


Abb. 4-35 Innovationsnetzwerk im Bereich SiC – Denso (JP) und Nissan (JP)

Die führenden Institutionen aus Deutschland und den USA im Bereich SiC sind über Patentschriften in der Zusammenarbeit weit weniger vernetzt, wie Abb. 4-36 illustriert.

Während Verbindungen bei Siemens insbesondere zu Infineon und SiCED Electronics bestehen und in zweiter Ebene auch IBM und Qimonda Teil des Netzwerks sind bzw. waren, kann beim US-amerikanischen Unternehmen Cree im Rahmen dieser Analyse nur die Zusammenarbeit mit ABB identifiziert werden. Die relativ hohe Anzahl von Patenten im Portfolio (ca. 500) weist auf eine defensiv ausgerichtete, das Know-how schützende Patentstrategie hin.

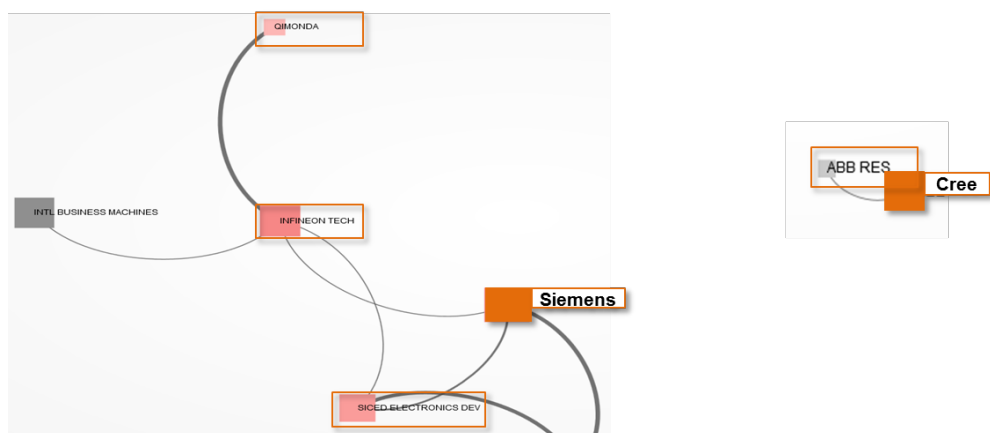


Abb. 4-36 Innovationsnetzwerk im Bereich SiC – Siemens (DE) und Cree (US)

Patentlandschaft „Halbleitermaterial – Galliumnitrid (GaN)“

Bei der Analyse der Offenlegung von Patentschriften im Zusammenhang mit Erfindungen im Bereich GaN als Halbleitermaterial für die Leistungselektronik ist Japan mit 900 Patenten über den gesamten Zeitraum 2000–2012 bei der reinen Patentanzahl führend, während die USA mit ca. 740 Patenten den zweiten Rang einnehmen. Beide Länder haben über den gesamten Zeitraum jeweils eine relativ ähnliche Anzahl an Patenten angemeldet, jedoch konnte sich Japan ab dem Jahr 2007 auf der Spitzenposition behaupten und insbesondere in den Jahren 2008 und 2010 einen signifikanten Vorsprung erarbeiten (Abb. 4-37).

Wie bei den Untersuchungen zu SiC als Halbleitermaterial konnten die Patentanmeldungen auf dem chinesischen Patentmarkt von 2007 bis 2008 signifikant gesteigert werden, sodass China den dritten Platz vor der EU erobert hat. Der deutsche IP-Markt hingegen wies im Rahmen dieser Analyse kaum nennenswerte Patentzahlen auf und bewegte sich mit einem Anteil von nur einem Prozent auf einem konstant niedrigen Niveau.

Im Vergleich der Jahre 2000 und 2010 konnte der Output an Patenten im Bereich GaN insgesamt um einen Faktor 6 gesteigert werden, im Vergleich zu 2012 sogar um einen Faktor 8. Japan verlor dabei bis 2012 einen Anteil am Gesamtmarkt von 10 % und besaß im Jahr 2012 insgesamt 34 % Anteil.

Die USA verloren im gleichen Zeitraum ca. 9 % Marktanteil und konnten in 2012 ca. 33 % aller Patentanmeldungen für sich beanspruchen. China, im Jahr 2000 noch ohne Patentanmeldung im GaN-Bereich, hat 2010 bereits 30 Anmeldungen zu verzeichnen und 2012 steigerte sich diese Menge auf über 80. Der chinesische IP-Markt verdoppelte damit seinen Anteil im Vergleich zu 2010 und erreichte 22 %.

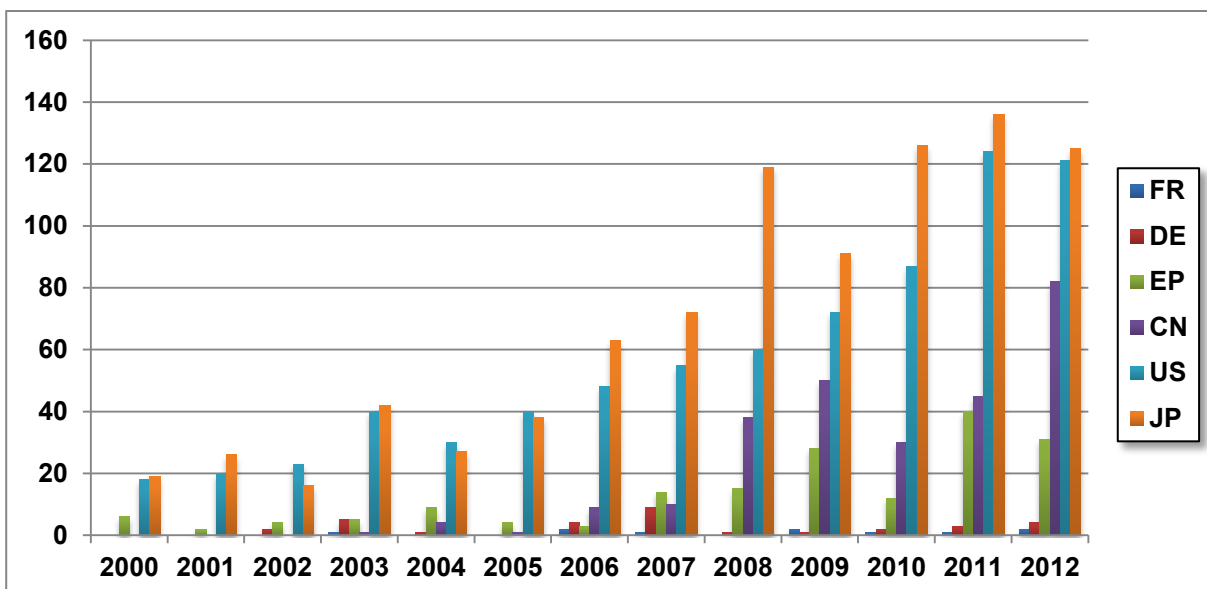


Abb. 4-37 Anzahl Patente im Bereich GaN nach Weltregionen 2000–2012

Im Bereich der Halbleitermaterialien und im speziellen GaN dominieren japanische Institutionen die Technologieentwicklung beinahe vollkommen. Die einzigen nicht japanischen Unternehmen in den Top 20 sind die Xidian University aus China auf Rang 16 mit 20 Erfindungen und Cree (USA) auf Rang 17 mit 19 Erfindungen.

Auch hier ist bemerkenswert, dass ein OEM auf der Ebene der Materialforschung aktiv und unter den führenden Institutionen bei Forschungsaktivitäten ist. Toyota Motor steht mit 38 Erfindungen auf Platz 9 der Rangliste, hinter den Toyota Central R&D Labs auf Rang 8 mit 39 Erfindungen. Insgesamt 84 Unternehmen entwickeln in Japan GaN-Technologien und melden Schutzrechte auf Erfindungen an (Tab. 4-7).

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	FURUKAWA ELECTRIC	77	JP
2	SUMITOMO ELECTRIC IND	68	JP
3	MATSUSHITA ELECTRIC IND	66	JP
4	TOSHIBA	64	JP
5	FUJITSU	49	JP
6	NIPPON TELEGRAPH	44	JP
7	SHARP	40	JP
8	TOYOTA CENTRAL R & D LABS	39	JP
9	TOYOTA MOTOR	38	JP
10	PANASONIC	35	JP
11	ROHM	35	JP
12	OKI ELECTRIC IND	32	JP
13	EUDYNA DEVICES	25	JP
14	HITACHI	25	JP
15	SONY	21	JP
16	XIDIAN UNIV	20	CN
17	CREE	19	US
18	SANKEN ELECTRIC	19	JP
19	TOYODA GOSEI	19	JP
20	NEC	18	JP

Tab. 4-7 Top-20-Patentanmelder im Bereich GaN nach Anzahl der Erfindungen

Die Verteilung der in den verschiedenen Weltregionen aktiven Institutionen zeigt ein ähnliches Bild wie bei Siliziumkarbid als Halbleitermaterial. In Deutschland sind insgesamt 11 Institutionen aktiv, darunter auch Daimler bzw. DaimlerChrysler mit einer Erfindung im Bereich GaN. Auf Platz 1 in Deutschland befindet sich der Forschungsverbund Berlin (3), gefolgt von Siemens (2) und EADS (2).

Die USA sind mit insgesamt 77 Institutionen bei Schutzrechten im Bereich des Halbleitermaterials in der Forschung aktiv, wobei Cree mit 19 Erfindungen die Rangliste anführt, gefolgt von International Rectifier (16) und der University of California (12). In China können insgesamt 23 Institutionen identifiziert werden, wiederum mit der Xidian University auf Rang

1 (20), gefolgt von der University of Electronic Science and Technology (17) und dem Institute of Microelectronics der Chinese Academy of Sciences (17).



Abb. 4-38 Anzahl Institutionen mit Forschungsaktivitäten im Bereich GaN nach Weltregionen

Im Rahmen dieser Untersuchung sind insgesamt mit Toyota und Daimler nur zwei OEM in diesem Forschungsbereich schutzrechtlich aktiv, die überwiegende Mehrzahl inhaltlich relevanter Inventionen entstammt der Entwicklung von Zulieferern, Forschungsinstituten und Universitäten.

Aufschlussreich ist zudem, dass ein länderübergreifendes Innovationsnetzwerk bei GaN-Technologien über gemeinsame Erfindungen überhaupt nicht erkennbar ist. Zudem sind die untersuchten Netzwerke auch innerhalb eines Landes eher geschlossen und konzentrieren sich auf die Zusammenarbeit einiger weniger nationaler Institutionen (Abb. 4-39 und Abb. 4-40).

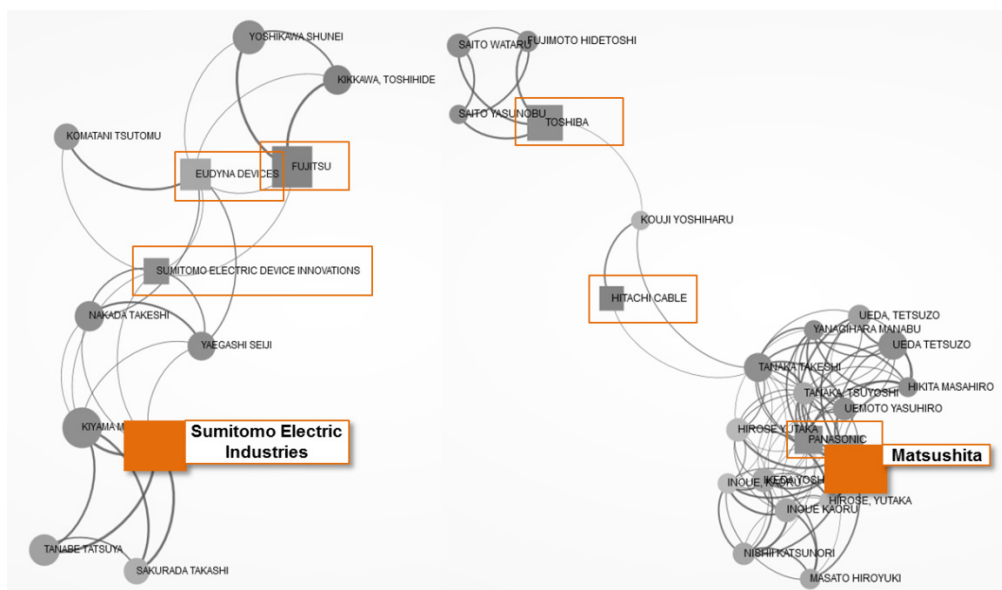


Abb. 4-39 Innovationsnetzwerk im Bereich GaN – Sumitomo Electric Industries (JP) und Matsushita (JP)

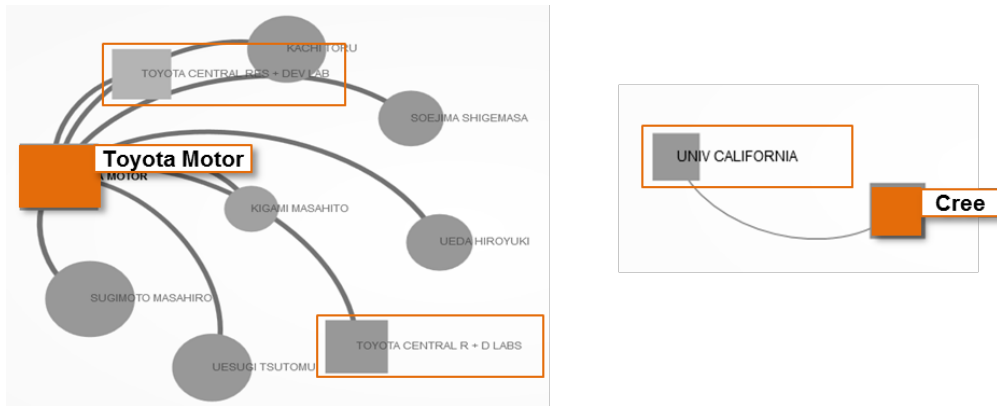


Abb. 4-40 Innovationsnetzwerk im Bereich GaN – Toyota Motor (JP) und Cree (US)

4.2.2 Patent- und Publikationsanalyse „Elektrische Maschine im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw“

Zur Abbildung der aktuellen Forschungslandschaft im Bereich „Elektrische Maschine“ im speziellen Umfeld der Elektromobilität wurden von 2000 bis 2012 analog zur vorgehenden Auswertung bibliometrische Analysen globaler Patent- und Publikationsdaten durchgeführt. Dafür sind erneut die Patentdatenbank Espacenet des Europäischen Patentamts (EPO) und relevante IPC-Klassen herangezogen (z.B. B60L, B60K, B60W, H02K, H02W, H01F) und z. T. mit einer Stichwortsuche kombiniert worden. Die untersuchten Technologiefelder im Bereich E-Maschine bildet Abb. 4-41 ab, hervorgehobene Themen werden im Detail erläutert.

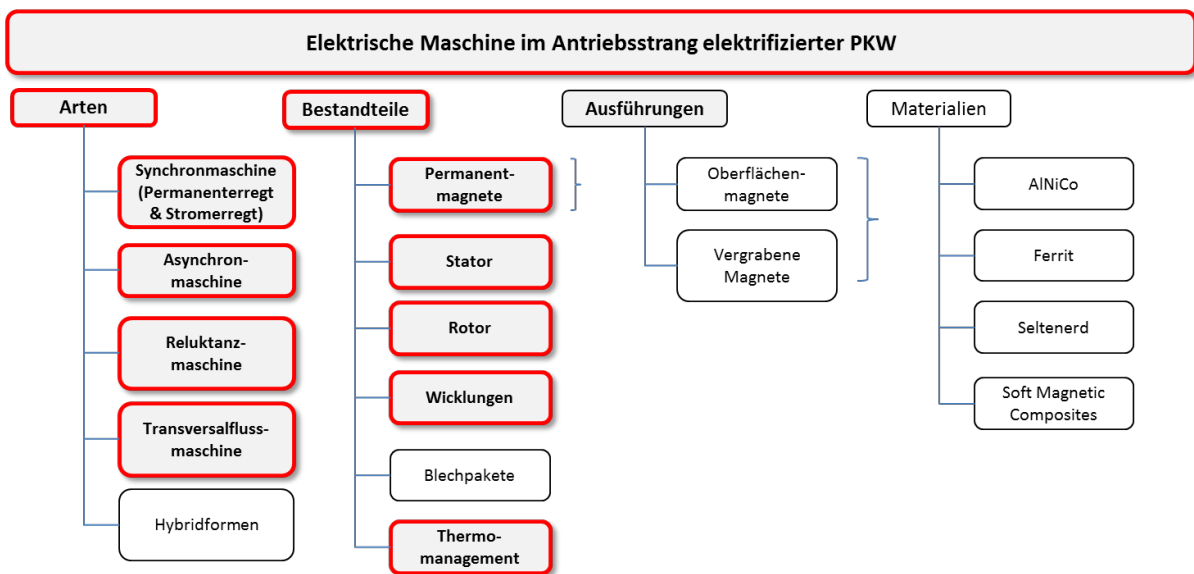


Abb. 4-41 Betrachtete Technologiefelder im Bereich „Elektrische Maschine“

Insgesamt wurden in den für diese Auswertung relevanten Weltregionen Japan (JP), USA (US), China (CN), Europa (EP), Deutschland (DE) und Frankreich (FR) ca. 3100 Publikationen und ca. 59 000 Patente veröffentlicht. Der Patentoutput konnte über die Jahre kontinuierlich gesteigert werden und erreichte das absolute Maximum 2012 mit einer Steigerung von insgesamt 1080 % im Vergleich zum Basisjahr 2000 (Abb. 4-42). Eine starke Dynamik ist

insofern ab 2010 zu erkennen, als sich der Patentschriftoutput in den folgenden beiden Jahre fast verdoppelt hat und von ca. 7000 Patenten auf über 13 000 angestiegen ist.

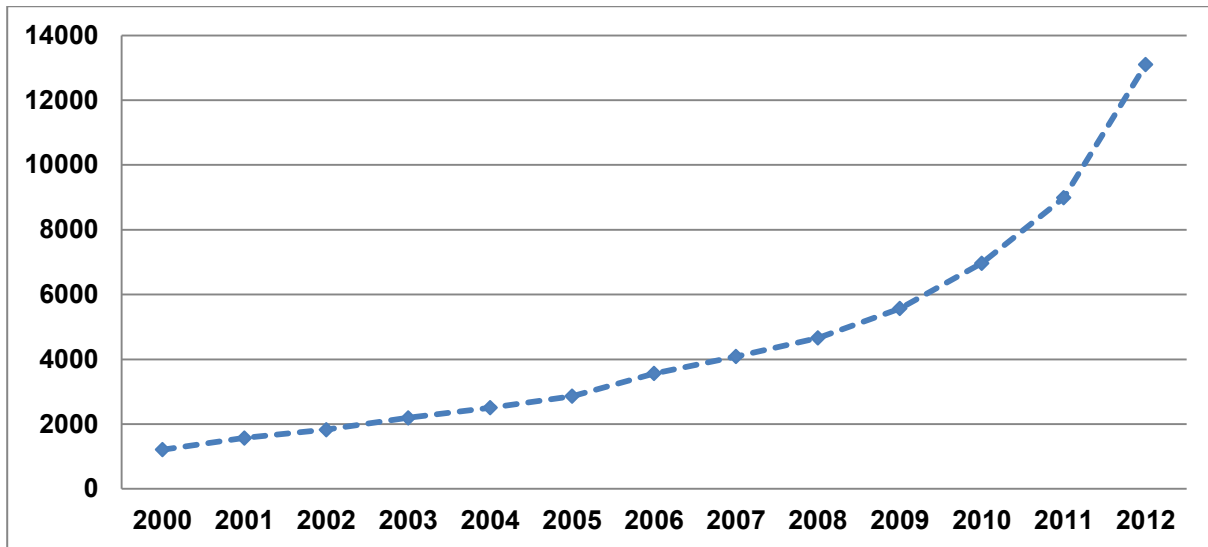


Abb. 4-42 Anzahl Patente im Bereich „Elektrische Maschine im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw“ 2000–2012

Die überwiegende Mehrzahl der Patente, die sich auf Erfindungen im Bereich „E-Maschine im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw“ im Zeitraum von 2000 bis 2012 beziehen und über den jeweils aktuellen Stand der Technik hinausgehen, wurde in Japan angemeldet (40 %), gefolgt von den USA (22 %) und China (14 %) (Abb. 4-43).

Patentanmeldungen in Europa und speziell in Deutschland haben mit 6065 bzw. 6642 einen Anteil von jeweils 11 %. Nur 1303 Patentschriften wurden auf dem französischen Markt für IP publiziert.

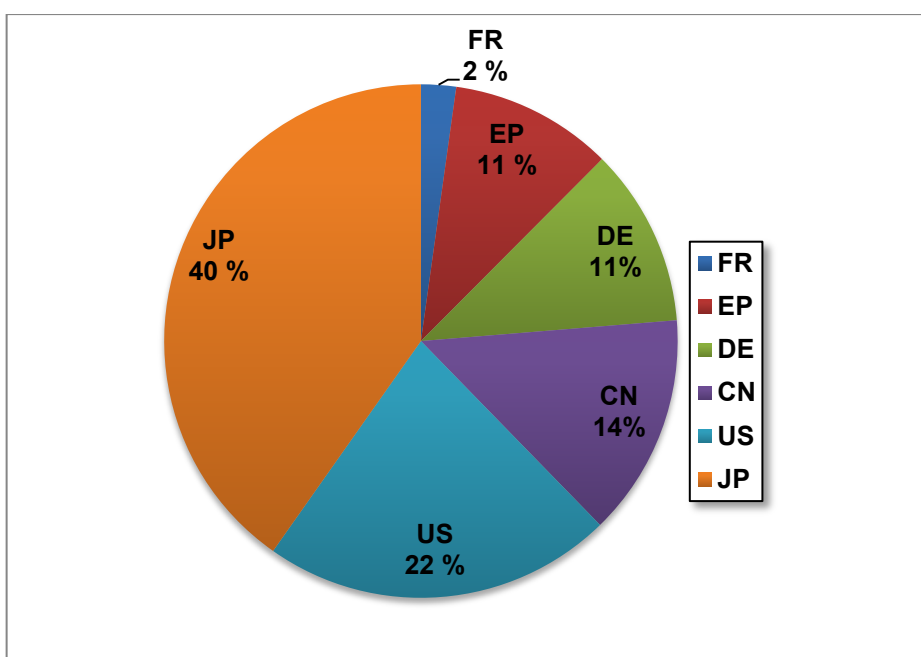


Abb. 4-43 Anteil Patente nach Weltregionen

Bei einem Vergleich der Offenlegung von Patentschriften im Bereich E-Maschine nach Zeit über die Jahre 2000 bis 2012 mit Fokus auf den untersuchten Weltregionen sind relativ klare Trends zu erkennen (Abb. 4-44): Während der japanische IP-Markt in jedem Jahr mit Abstand am meisten Patentanmeldungen zu verzeichnen hatte und die USA bis auf das Jahr 2012 durchgehend auf Platz 2 standen, wuchs die Bedeutung des chinesischen Markts kontinuierlich und er löste Deutschland bzw. Europa ab dem Jahr 2009 auf Platz 3 ab. Diese Entwicklung gipfelte darin, dass die USA im Jahr 2012 erstmals knapp vom zweiten Platz verdrängt wurden.

Im direkten Vergleich der Patentsituationen der Jahre 2000 und 2010 ist ein Anstieg der Veröffentlichungszahlen auf knapp 580 % zu verzeichnen (1211 zu 6965), wobei insbesondere Japan die schon im Jahr 2000 führende Position 2010 noch ausbauen konnte und mit 2908 die – in Bezug auf die reine Anzahl – mit Abstand meisten Anmeldungen innehatte. Dennoch verlor Japan aufgrund der höheren Gesamtzahl an Offenlegungen insgesamt an Marktanteil und pendelte sich 2010 mit einem Verlust von knapp 13 % innerhalb einer Dekade bei ca. 42 % ein.

Die Bedeutung des deutschen IP-Markts wurde dagegen leicht verstärkt und der Marktanteil von 6 % auf 10 % gesteigert. Die reine Anzahl an Patentanmeldungen in Deutschland wuchs in diesem Zeitraum um das zehnfache und damit mehr als doppelt so stark wie in Japan. Die mit Abstand intensivste Dynamik ist jedoch in China zu beobachten. Hier konnte der Marktanteil in den letzten zehn Jahren von 2,6 % auf 14,7 % gesteigert werden. Die reine Anzahl der offengelegten Patentschriften erreichte 2010 1024 – eine Steigerung um ca. 3200 %.

Bemerkenswert ist die ab diesem Zeitpunkt sich noch einmal rasant verstärkende Dynamik: Innerhalb der folgenden zwei Jahre steigerte China den Anteil der auf dem eigenen IP-Markt veröffentlichten Patente von 14,7 % auf über 23 %, während Japans Anteil von 42 % auf nur noch 31 % schrumpfte, trotzdem aber weiterhin die führende Position einnahm. Auch in Deutschland konnte bis 2012 eine nochmals gestiegene Anzahl an Patentanmeldungen identifiziert werden, sodass knapp 1100 Patente im Bereich E-Maschine veröffentlicht wurden und der Marktanteil auf über 11 % kletterte. In Frankreich dagegen ist eine nur leichte Steigerung der Gesamtzahl veröffentlichter Patente über die Jahre erkennbar. Der Marktanteil stagnierte dementsprechend auf einem relativ geringen Niveau bei ca. 2 %.

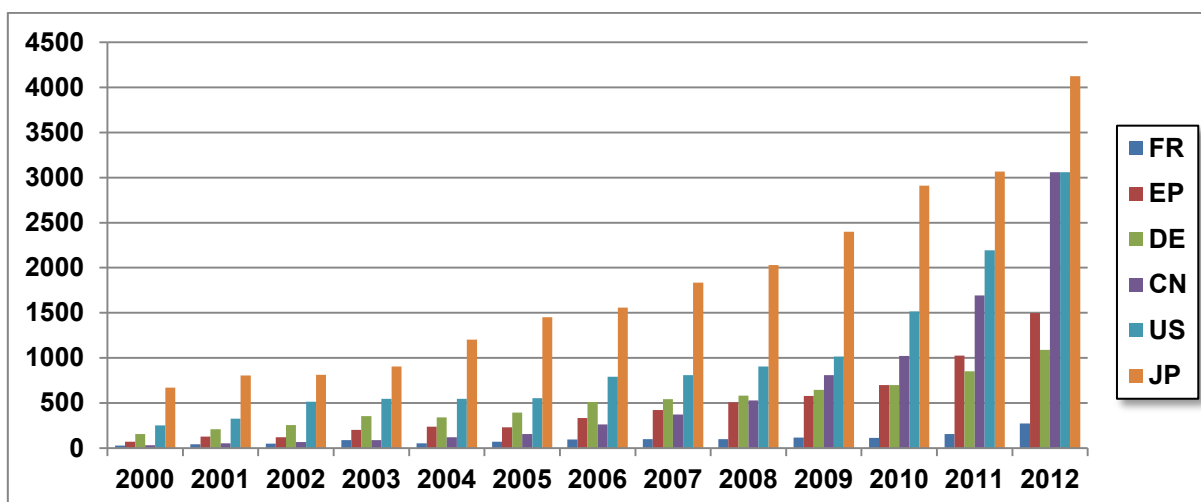


Abb. 4-44 Anzahl Patente nach Weltregionen 2000–2012

Im Ranking der weltweit führenden Patentanmelder belegen asiatische Unternehmen neun Positionen in den Top 10, wobei insbesondere japanische Institutionen weit überlegen und mit einer Gesamtzahl von 19 695 Erfindungen führend sind. Während alleine Toyota (Motor + Jidosha) insgesamt auf 9776 Inventionen kommt, halten deutsche OEM 984 inhaltlich relevante Patentschriften und belegen mit Daimler (inkl. DaimlerChrysler) und BMW die Plätze 13 und 20.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	TOYOTA MOTOR	7789	JP
2	HONDA MOTOR	3073	JP
3	NISSAN MOTOR	2835	JP
4	TOYOTA JIDOSHA	1987	JP
5	HYUNDAI MOTOR	1255	SK
6	MITSUBISHI JIDOSHA KOGYO	1055	JP
7	GM GLOBAL TECH OPERATIONS	833	US
8	DENSO	829	JP
9	AISIN AW	722	JP
10	HITACHI	685	JP
11	ROBERT BOSCH	679	DE
12	FORD GLOBAL TECH	655	US
13	DAIMLER	637	DE
14	KIA MOTORS	427	SK
15	PEUGEOT CITROEN AUTOMOB	411	FR
16	ZF FRIEDRICHSHAFEN	399	DE
17	MAZDA MOTOR	367	JP
18	RENAULT	357	FR
19	TOSHIBA	353	JP
20	BAYERISCHE MOTOREN WERKE	347	DE

Tab. 4-8 Top-20-Patentanmelder im Bereich „Elektrische Maschine“ nach Anzahl der Erfindungen

Bestplatziertes deutsches Unternehmen ist die Robert Bosch GmbH auf Rang 11 mit 679 Inventionen im Portfolio. Die USA sind mit GM (833) und Ford (655) auf Platz 7 bzw. 12 vertreten, Tesla Motors hält 122 Patente (22 Inventionen) im Bereich E-Maschinen für elektrifizierte Pkw. Bestplatzierte chinesische Unternehmen sind Chery Automobile und BYD mit 117 bzw 81 Inventionen, gefolgt von der Tsinghua University in Peking mit 55 Erfindungen.

Mit Abstand am meisten Institutionen mit Forschungsaktivitäten im Bereich „Elektrische Maschinen im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw“ sind in Europa aktiv (Abb. 4-45). Insgesamt können dort 1358 Unternehmen, Forschungsinstitute und Universitäten identifiziert werden,

gefolgt von den USA mit 938 und Japan mit 775. Allein Deutschland ist in Europa für über ein Drittel aller aktiven Institutionen verantwortlich.

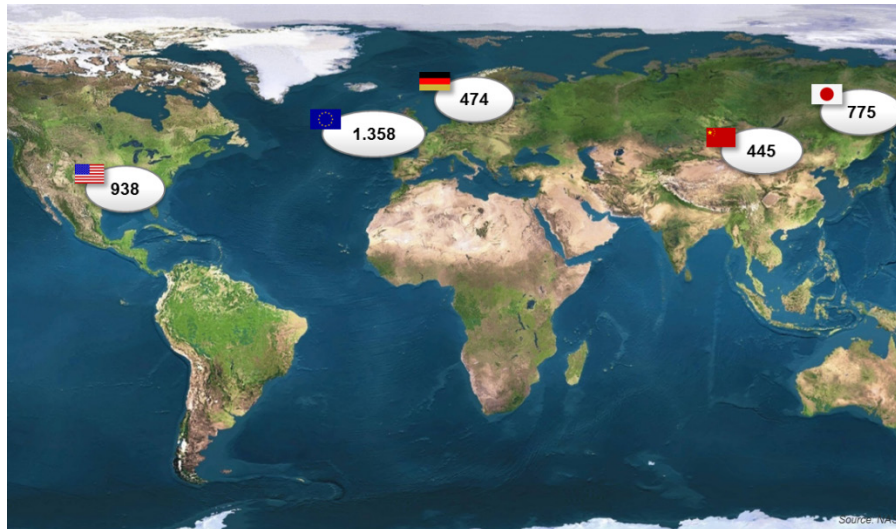


Abb. 4-45 Anzahl Institutionen mit Forschungsaktivitäten im Bereich „Elektrische Maschinen im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw“

Patentlandschaft „E-Maschine-Bauformen“

Bei den untersuchten Patenten im Bereich „Elektrische Maschine“ sind einige Schwerpunktsetzungen erkennbar, die sich z. B. auf unterschiedliche Bauformen elektrischer Maschinen oder konkrete Anwendungen im Komponenten- und Bauteilebereich beziehen und genauerer Betrachtung bedürfen.

Der mechanische Aufbau elektrischer Maschinen ist insbesondere im Vergleich mit konventionellen Verbrennungsmotoren recht einfach: Ein feststehender Teil (*Stator* oder *Ständer*), dem elektrische Leistung zu- bzw. abgeführt wird, ist durch einen Luftspalt von einem sich bewegenden Teil (*Rotor*, *Läufer* oder *Anker*) getrennt, dem mechanische Leistung zu- bzw. abgeführt wird. Dabei kann der Rotor sowohl innen (*Innenläufer*) als auch außen liegen (*Außenläufer*). Die Funktionsweise elektrischer Maschinen beruht auf Elektromagnetismus. Dabei wird entweder die Lorentz-Kraft, die auf bewegte Ladungen (elektrische Ströme) in einem magnetischen Feld wirkt, oder die Maxwell-Kraft, die beispielsweise auch Grundlage von Hubmagneten ist, genutzt, um eine kontinuierliche Drehbewegung zu erzeugen. Hinsichtlich des Aufbaus von Rotor und Stator – und damit untrennbar verbunden auch der Funktionsweise – existieren verschiedene Ausführungsformen mit spezifischen Vor- und Nachteilen, deren im Bereich elektrischer Antriebe für Kraftfahrzeuge bedeutendste im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen.

Bei der **permanentenerregten Synchronmaschine** (PSM) wird im Stator ein magnetisches Drehfeld erzeugt, indem die rotationssymmetrisch angeordneten Ständerwicklungen statt mit Gleichstrom mit dreiphasigem Wechselstrom gespeist werden. Durch das umlaufende Magnetfeld im Stator ist keine Kommutierung notwendig, sodass der Aufbau des Rotors wesentlich vereinfacht werden kann. Im Falle der permanentenerregten Synchronmaschine werden hierfür Permanentmagnete verwendet, die sich am Magnetfeld des Stators ausrichten und damit dessen Drehbewegung folgen. Konstruktiv kann dies entweder durch Oberflächen-

magnete oder im Rotor vergrabene Magnete (engl. *interior permanent magnets*) realisiert werden.

Die **stromerregte Synchronmaschine** (SSM) unterscheidet sich von ihrem permanenterregten Pendant lediglich durch den Aufbau des Rotors. Wie der Name impliziert, wird hier im Rotor ein Elektromagnet verwendet, der von einer Gleichspannungsquelle mit Strom versorgt wird. Da das Magnetfeld aus Sicht des Rotors zeitlich konstant ist bestehen kaum Probleme hinsichtlich entstehender Wirbelströme, sodass der Rotor aus massivem Stahl gefertigt werden kann und keine aufwendige Laminierung erforderlich ist. Allerdings sind zur Stromversorgung Bürsten oder Schleifringe erforderlich, woraus sich wiederum Nachteile bezüglich Wartungsaufwand und Maximaldrehzahl ergeben. Gegenüber der permanenterregten Synchronmaschine ergeben sich die Vorteile eines Verzichts auf Permanentmagnete und die entsprechende Kostenersparnis, wobei nur geringe Einbußen bezüglich des Wirkungsgrads hingenommen werden müssen. Den technischen Entwicklungsstand betreffend ist die stromerregte Synchronmaschine noch nicht so ausgereift wie die permanenterregte, stellt jedoch zunehmend eine interessante Alternative dar.

Die **Asynchronmaschine** (engl. *Induction Machine; IM*) weist einen zur Synchronmaschine identischen Aufbau des Stators mit den Drehstromwicklungen auf, unterscheidet sich aber im Rotoraufbau deutlich. Hierbei finden meist Käfigläufer mit Stabwicklungen Anwendung, die über Kurzschlussringe miteinander verbunden sind. Entscheidender Unterschied zu den Läufern von Gleichstrom- oder stromerregter Synchronmaschine ist damit, dass keine elektrischen Leitungen über Bürsten oder Schleifringe nach außen geführt werden müssen.

Eine weitere Alternative ist die **Reluktanzmaschine** (engl. *Switched Reluctance Machine; SRM*). Obwohl sie elektrisch über denselben Statoraufbau wie Synchron- und Asynchronmaschine verfügt, beruht ihre Funktionsweise auf anderen physikalischen Prinzipien, wobei die namensgebende Reluktanzkraft entscheidend ist. Sie bewirkt, dass sich magnetisierbares Material immer in Richtung des geringsten magnetischen Widerstands bewegt und somit das Bestreben hat, den Abstand zwischen sich und dem Magneten zu verringern. Darauf beruht auch die aus dem Alltag bekannte Anziehungskraft von Magneten. Um das Prinzip für eine elektrische Maschine nutzbar zu machen, müssen sowohl Rotor als auch Stator ein zahnförmiges Profil mit unterschiedlicher Zähnezahl aufweisen. Dabei ist jeder Statorzahn mit Spulen bestückt, während der Rotor einfach aus weichmagnetischem Material (im einfachsten Fall Eisen) besteht, also weder Wicklungen noch Permanentmagnete benötigt.

Während bei allen bisherigen Ausführungsformen der magnetische Fluss stets in der radialen Ebene liegt, es sich also um „Radialflussmaschinen“ handelt, ist das gemeinsame Merkmal von **Transversalflussmaschinen** (engl. *Transverse Flux Machine; TFM*) die Magnetisierung in Richtung der Rotationsachse. Der Aufbau des Stators ist dabei grundlegend verschieden und weist um die Wellenachse in einem Ring geführte Statorwicklungen auf. Auch auf diese Weise kann im Stator ein Drehfeld erzeugt werden, wenngleich der Aufbau des magnetischen Kreises wesentlich komplizierter und entsprechend kostspieliger ist. Rotorseitig können alle von den „Radialflussmaschinen“ bekannten Lösungen eingesetzt werden, es gibt also beispielsweise ebenso permanenterregte Transversalflussmaschinen wie Transversalfluss-Reluktanzmaschinen.

Bei der bauformenbezogenen Analyse der Patente ohne Beschränkung auf Erfindungen, die sich auf elektrifizierte Pkw beziehen, lässt sich ein klarer Schwerpunkt bei Inventionen im Bereich Synchronmaschine (35 141 Inventionen; 81 %) erkennen, gefolgt von der Asyn-

chronmaschine (4593; 11 %), der Reluktanzmaschine (3437; 8 %) und der Transversalflussmaschine (235; 0,5 %) (Abb. 4-46).

Ein nahezu identisches Bild zeigt sich bei den konkret auf eine Anwendung im Bereich elektrifizierter Pkw bezogenen Erfindungen, mit der Ausnahme, dass die Asynchronmaschine mit 8 % hier einen leicht geringeren und die Synchronmaschine mit 84 % einen etwas größeren Anteil an den FuE-Aktivitäten hat. Die Gesamtzahl aller Patentoffenlegungen beträgt hier 1518.

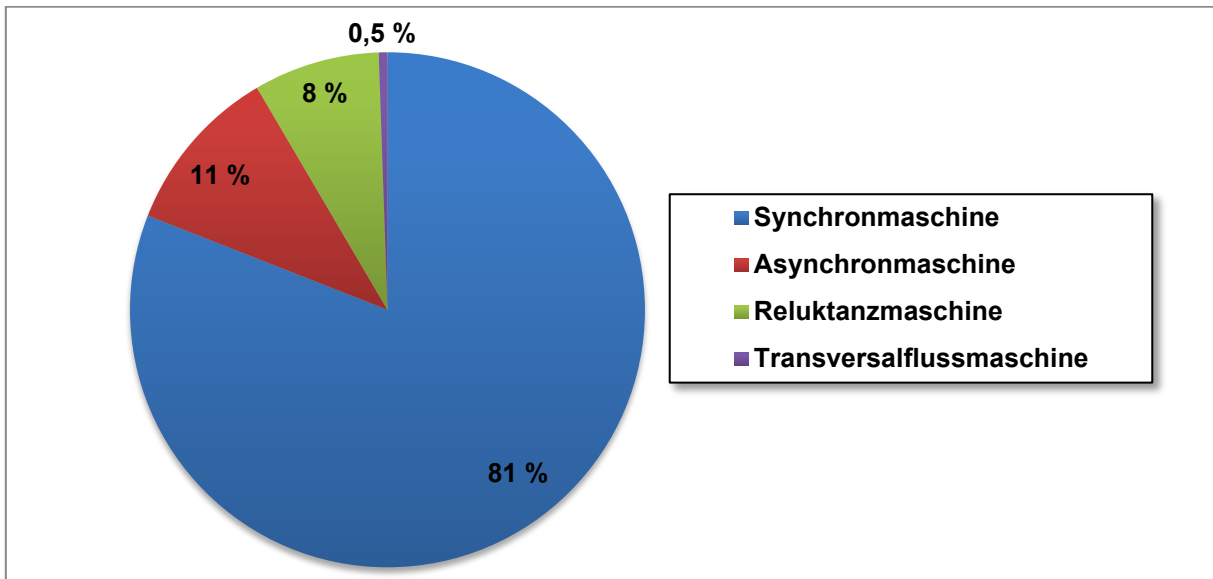


Abb. 4-46 Anteile der Erfindungen im Bereich „Bauformen“

Über alle Bauformen hinweg ist auch bei einer Analyse der Patentanmeldungen der Jahre 2000–2012 insgesamt eine Dominanz Japans festzustellen (Abb. 4-47), wobei sein Anteil an den weltweiten Patentanmeldungen aber von 44 % 2000 auf ca. 30 % 2012 zurückging.

Bis 2012 verlor auch der deutsche IP-Markt für die Patentanmelder an Bedeutung und schrumpfte um knapp 8 %, um nur noch 5 % des Gesamtmarkts zu entsprechen. Gleichzeitig konnten auf EU- und US-Ebene die jeweiligen Marktanteile um 2 % auf 12 % (Europa) bzw. 29 % (USA) ansteigen.

Den größten Zuwachs verzeichnete abermals der chinesische Patentmarkt, der sich von vier Anmeldungen im Jahr 2000 auf 38 in 2010 und 62 im Jahr 2012 steigern konnte. China nahm damit nach 2006 im Jahr 2009 wieder den dritten Platz hinter Japan und den USA ein und verdrängte Europa auf Platz 4. Der Anteil des chinesischen Markts am Gesamtmarkt stieg von 5 % in 2000 auf 20 % im Jahr 2010 und sogar 25 % in 2012.

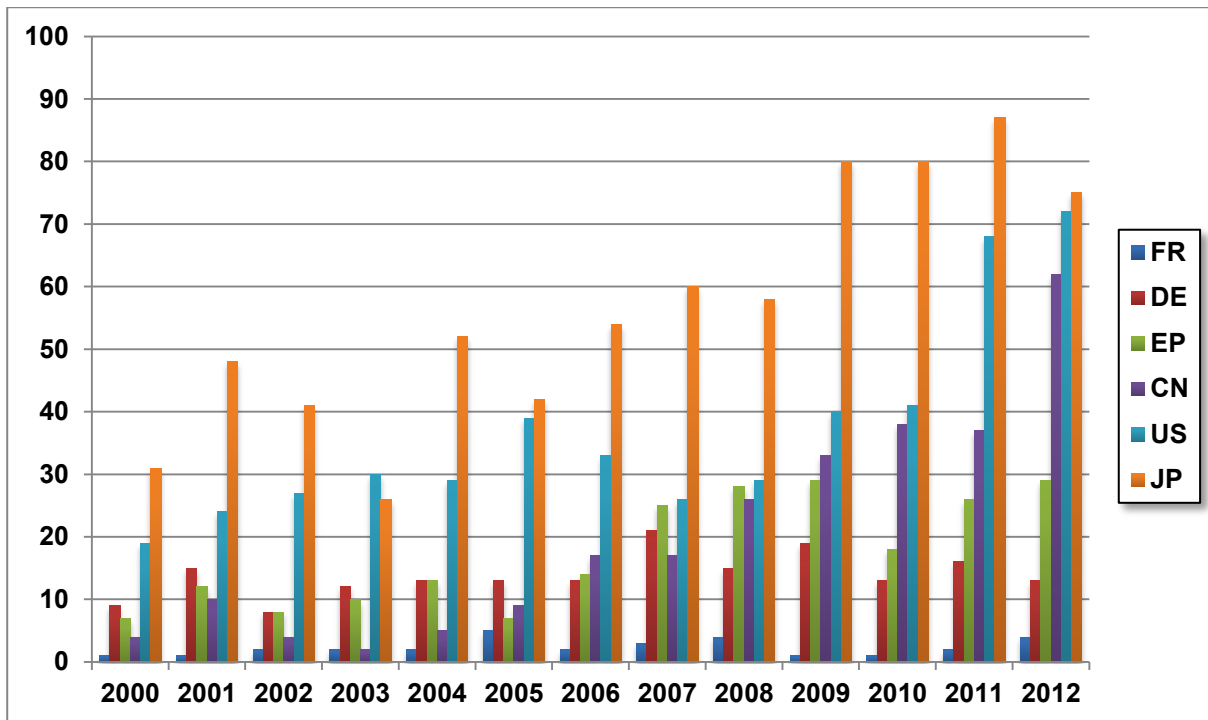


Abb. 4-47 Anteil Patente im Bereich „Bauformen“ nach Weltregionen 2000–2012

Eine regionsspezifische Fokussierung von Patentaktivitäten auf bestimmte E-Maschinentypen ist laut Analyse nicht erkennbar (Abb. 4-48). Die Schwerpunktsetzung von FuE-Aktivitäten liegt in allen untersuchten Weltregionen ausgeprägt auf der Synchronmaschine mit Anteilen von 58 % (FR) bis 84 % (JP), gefolgt von Forschungen zur Asynchronmaschine zwischen 8 % (JP) und 18 % (CN) sowie zur Reluktanzmaschine mit Anteilen von 7 % (DE) bis 24 % (FR).

Patente zur Transversalflussmaschine mit Bezug zu elektrifizierten Pkw wurden in nennenswertem Umfang bislang nur in Deutschland und Europa veröffentlicht. Eine Analyse mit erweitertem Suchfeld – also ohne Beschränkung auf elektrifizierte Pkw – identifiziert in diesem Technologiefeld eine Dominanz der USA und Deutschlands, die im untersuchten Zeitraum jeweils ca. 100 Patente zur Transversalflussmaschine aufweisen können.

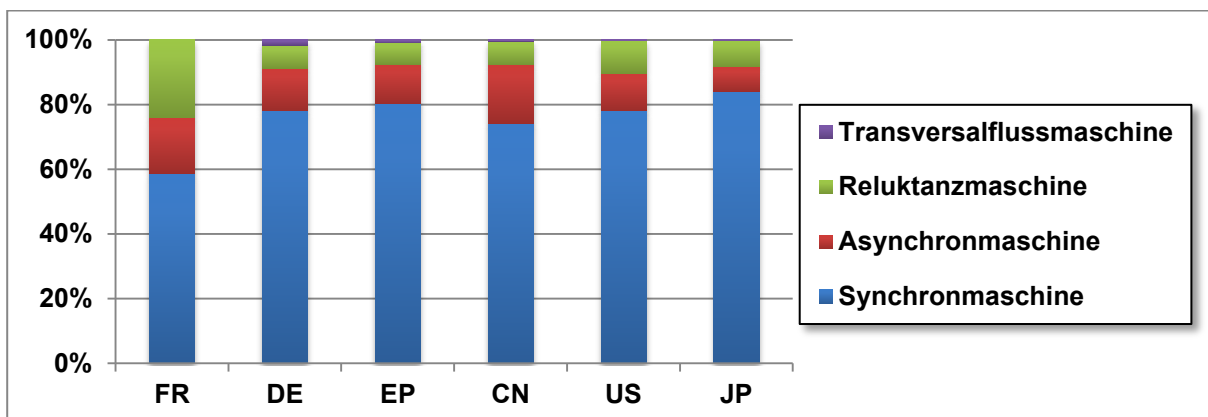


Abb. 4-48: Anteil Patente nach Bauformen über Weltregionen

Die Analyse wissenschaftlich rezensierter Publikationen ergibt ein abweichendes Bild. Zwar ist auch hier in allen untersuchten Weltregionen ein starker Forschungsfokus auf (permanenterregte) Synchronmaschinen zu erkennen, dennoch sind die Forschungsanteile bei alternativen E-Maschinentypen und -bauformen insgesamt höher.

Im Vergleich zu Patenten bilden Publikationen eher weniger anwendungsorientierte Forschungsleistungen ab und entstammen insbesondere dem Umfeld von Universitäten und Forschungsinstituten. Die hier thematisierten Inhalte sind stärker theoriegeleitet oder zielen eher auf die Lösung grundlegender Problemstellungen zur Realisierbarkeit neuartiger Technologien ab, sind von einer konkreten marktorientierten Anwendung also weiter entfernt als im Rahmen von Patentschriften thematisierte Inhalte.

Abb. 4-49 verdeutlicht, dass die Anteile verschiedener E-Maschinentypen beim Vergleich der Patent- und Publikationslandschaft in Deutschland relativ ähnlich ausgeprägt sind. Während der Publikationsanteil bei Synchronmaschinen aber um ca. zehn Prozentpunkte geringer ausfällt als bei der Patentsituation, sind die Anteile von Asynchron-, Reluktanz- und Transversalflussmaschine entsprechend höher und mit ca. 10–12 % relativ gleich verteilt. Insgesamt 932 Publikationen mit inhaltlichem Fokus auf „Bauformen“ konnten identifiziert werden.

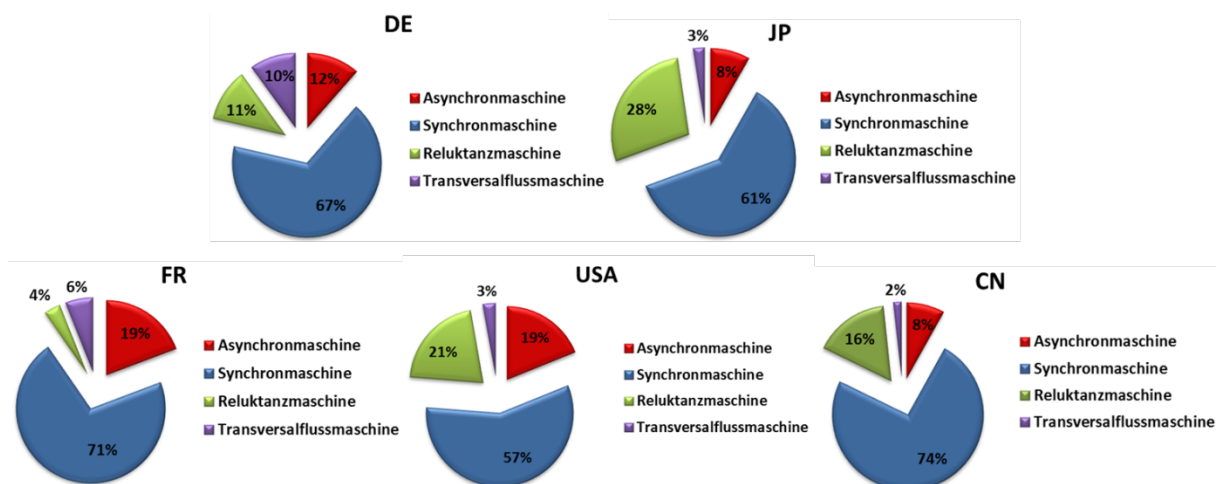


Abb. 4-49 Anteil Publikationen nach Bauformen über Weltregionen

Japan und die USA haben bei den Publikationsanteilen die größten Abweichungen im Vergleich zu den Patenten. In beiden Ländern weicht der starke Patentfokus auf Synchronmaschinen (78 % bzw. 84 %) einer auf längere Sicht „technologieoffeneren“ Forschung, sodass die Anteile auf 57 % (USA) und 61 % (Japan) zurückgehen. Insbesondere die Reluktanzmaschine wird in beiden Ländern stärker von wissenschaftlicher Forschung adressiert und nimmt Anteile zwischen 21 % (USA) und sogar 28 % (Japan) ein. Während die Asynchronmaschine in Japan sowohl bei den Patenten als auch den Publikationen kaum im Forschungsinteresse steht und eine vernachlässigbare Rolle einnimmt, entspricht sie in den USA einem Anteil von fast 20 % aller Publikationen zu E-Maschinentypen und ist dort – wie auch in Frankreich – mit Abstand am stärksten Gegenstand von Forschungsleistungen.

Patentlandschaft „Synchronmaschine“

Im speziellen Feld der Patentveröffentlichungen zu Erfindungen im Bereich Synchronmaschine ist Japan im untersuchten Zeitraum bei der Gesamtanzahl ebenfalls klar führend, wenngleich Abb. 4-50 signifikante Veränderungen über die Zeit erkennen lässt: Während der japanische Patentmarkt im Jahr 2000 knapp 40 % aller Anmeldungen zu verzeichnen hatte und diese bis auf 45 % im Jahr 2010 steigern konnte, schrumpfte dieser Anteil bis 2012 auf nur noch 30 % Anteil am Gesamtmarkt.

Insgesamt ist der Patentmarkt im Bereich Synchronmaschine für elektrifizierte Pkw in den untersuchten Weltregionen innerhalb von 12 Jahren um ca. 460 % gewachsen, die Anzahl der in Japan angemeldeten Patente aber nur um ca. 350 %. Im Vergleich dazu konnte China den Anteil der Patentschriften kontinuierlich ab dem Jahr 2007 steigern und bezüglich der Anzahl veröffentlichter Patente im Jahr 2010 erstmals Europa von Platz 3 verdrängen. Der Anteil des chinesischen Patentmarkts am Gesamtmarkt wuchs so von ca. 2 % im Jahr 2000 auf über 21 % in 2010 und sogar 25 % in 2012.

Der Anteil Deutschlands dagegen hat über die letzten zwölf Jahre stark abgenommen und rangiert 2012, ausgehend von ca. 17 % im Jahr 2000, nur noch bei 4 %.

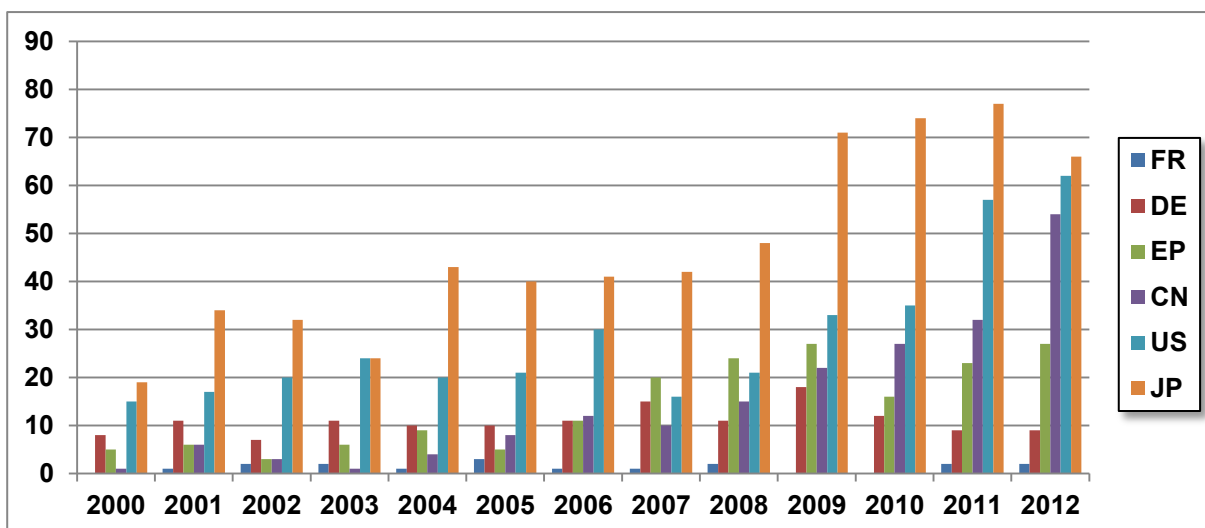


Abb. 4-50 Anzahl Patente im Bereich „Synchronmaschine“ nach Weltregionen 2000–2012

Im Ranking der weltweit führenden Patentanmelder im Bereich der Synchronmaschine belegen asiatische Institutionen 15 Plätze in den Top 20, wobei japanische Unternehmen mit einer Gesamtzahl von 606 Erfindungen vertreten sind und die asiatische Region dominieren (Tab. 4-9). Hyundai (Südkorea) ist auf Rang 19 mit sieben Erfindungen mit Bezug zu elektrifizierten Pkw einziges nicht japanisches asiatisches Unternehmen in den Top 20.

Während allein der Toyota-Konzern mit Toyota Motor und Toyota Jidosha auf insgesamt 163 inhaltlich relevante Inventionen kommt, sind deutsche OEM in den Top 20 überhaupt nicht vertreten. Die aus deutscher Sicht stärksten Positionen in diesem Technologiefeld nehmen die Tier1-Zulieferer Siemens und Bosch ein, die gemeinsam 15 inhaltlich relevante Erfindungen (54 Patente) im Portfolio haben. Sie belegen damit die Plätze 17 (Siemens AG) und 20 (Robert Bosch GmbH).

Die bestplatzierten deutschen OEM sind Volkswagen mit 4, BMW mit 3 und Daimler mit 2 Erfindungen. Porsche und Audi haben jeweils eine Invention im Portfolio. Die USA sind mit GM (27) und Ford (13) vertreten. Bestplatzierte chinesische Institutionen sind die Tongji University, United Electronci Automotive Systems und Chongqing Tsingshan Industries mit jeweils zwei Inventionen.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	HONDA MOTOR	114	JP
2	TOYOTA MOTOR	113	JP
3	HITACHI	80	JP
4	TOYOTA JIDOSHA	50	JP
5	DENSO	46	JP
6	NISSAN MOTOR	39	JP
7	AISIN AW	33	JP
8	TOSHIBA	30	JP
9	MITSUBISHI DENKI	27	JP
10	GM GLOBAL TECH OPS	27	US
11	YAMAHA MOTOR	18	JP
12	FUJI ELECTRIC	18	JP
13	MATSUSHITA ELECTRIC IND	14	JP
14	FORD GLOBAL TECH	13	US
15	TOYOTA CENTRAL R & D LABS	9	JP
16	MITSUBA	8	JP
17	SIEMENS	8	DE
18	MEIDENSHA	7	JP
19	HYUNDAI MOTOR	7	SK
20	BOSCH	7	DE

Tab. 4-9 Top-20-Patentanmelder im Bereich „Synchronmaschine“ nach Anzahl der Erfindungen

Insgesamt 235 Institutionen sind in den untersuchten Weltregionen aktiv in der Forschung zum Thema Synchronmaschine für elektrifizierte Pkw. Die Verteilung der aktiven Institutionen zeigt, dass Japan mit 101 Unternehmen führend ist, gefolgt von Europa (72), den USA (48) und China (14). Deutschland alleine stellt in Europa 50 % aller aktiven Unternehmen aus Industrie und Forschung (Abb. 4-51).

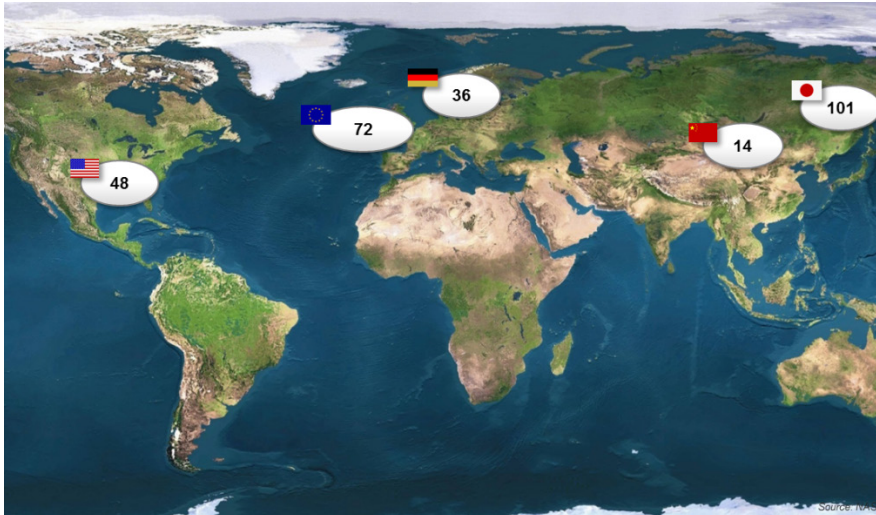


Abb. 4-51 Anzahl Institutionen mit Forschungsaktivitäten im Bereich „Synchronmaschine“

Erweitert man das Suchfeld im Bereich Synchronmaschine auf Patentanmeldungen und Erfindungen, die sich nicht speziell auf elektrifizierte Pkw und die Synchronmaschine im Antriebsstrang beziehen, und betrachtet auch Forschungsaktivitäten z. B. im Bereich Luft- und Raumfahrt, Energie oder Schiene, lassen sich mehr und z. T. andere Institutionen mit FuE-Aktivitäten identifizieren – allein in Japan 1141 Unternehmen. Die USA folgen mit 1035, China mit 881 und Deutschland mit 683 Unternehmen. In allen europäischen Märkten sind insgesamt 1774 Institutionen aktiv.

Matsushita Electric Industrial (bzw. Panasonic) springt bei Analyse der Top-Patentanmelder mit erweitertem Suchfeld von Rang 13 auf Position 1, gefolgt von dem japanischen OEM Mitsubishi, der sich von Platz 9 auf Rang 2 verbessern kann (Tab. 4-10). Auch Toyota und Honda – führend bei Patentanmeldungen mit konkretem Bezug zu elektrifizierten Pkw – sind als OEM weiterhin in den Top 10 aller Patentanmelder vertreten und belegen die Ränge 6 und 7.

Auf Platz 8 als bestplatziertes deutsches Unternehmen ist die Robert Bosch GmbH mit 495 Inventionen anzutreffen, die Siemens AG komplettiert die Top 20 aus deutscher Sicht und belegt Platz 13 mit 418 Erfindungen.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	MATSUSHITA ELECTRIC IND	1437	JP
2	MITSUBISHI DENKI	1281	JP
3	DENSO	967	JP
4	HITACHI	832	JP
5	TOSHIBA	728	JP
6	TOYOTA MOTOR	619	JP
7	HONDA MOTOR	581	JP
8	ROBERT BOSCH	495	DE

9	NISSAN MOTOR	489	JP
10	NIPPON DENSAN	480	JP
11	LG ELECTRONICS	472	SK
12	SANYO ELECTRIC	431	JP
13	SIEMENS	418	DE
14	DAIKIN IND	375	JP
15	YASKAWA ELECTRIC	371	JP
16	PANASONIC	361	JP
17	JTEKT	330	JP
18	ASMO	293	JP
19	SAMSUNG ELECTRONICS	279	SK
20	MITSUBA	270	JP

Tab. 4-10 Top-20-Patentanmelder im Bereich „Synchronmaschine erweitert“ nach Anzahl der Erfindungen

Insgesamt besteht auch bei einer Erweiterung des Suchfelds eine Dominanz asiatischer Institutionen bei FuE zu Synchronmaschinen, wobei der Anteil japanischer Erfindungen in den Top 20 leicht zugunsten Südkoreas abnimmt und von 91 % auf ca. 83 % fällt.

Neben der geografischen Verteilung können über eine Patentanalyse auch Kooperationstätigkeiten und gemeinsame Forschungs- bzw. Innovationsnetzwerke und -dynamiken identifiziert werden. Hierzu werden Verbindungen einzelner Institutionen oder Erfinder über Patente hinweg visualisiert. Die folgende Analyse des Innovationsnetzwerks zur Synchronmaschine wird bei engem Suchfeld durchgeführt und bezieht sich dementsprechend nur auf Kooperationen im Zusammenhang mit Entwicklungen im Bereich „Synchronmaschine im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw“.

Während mit Honda das in der Rangliste führende Unternehmen keine kooperativen Forschungstätigkeiten in diesem Technologiefeld durchführt und auch die bestplatzierten deutschen Unternehmen Siemens und Bosch sich bei Patenten in geschlossenen Netzwerken bewegen, betreiben die auf Rang 2 und 3 liegenden Unternehmen Toyota und Hitachi ausgeprägte Innovationsnetzwerke (Abb. 4-52).

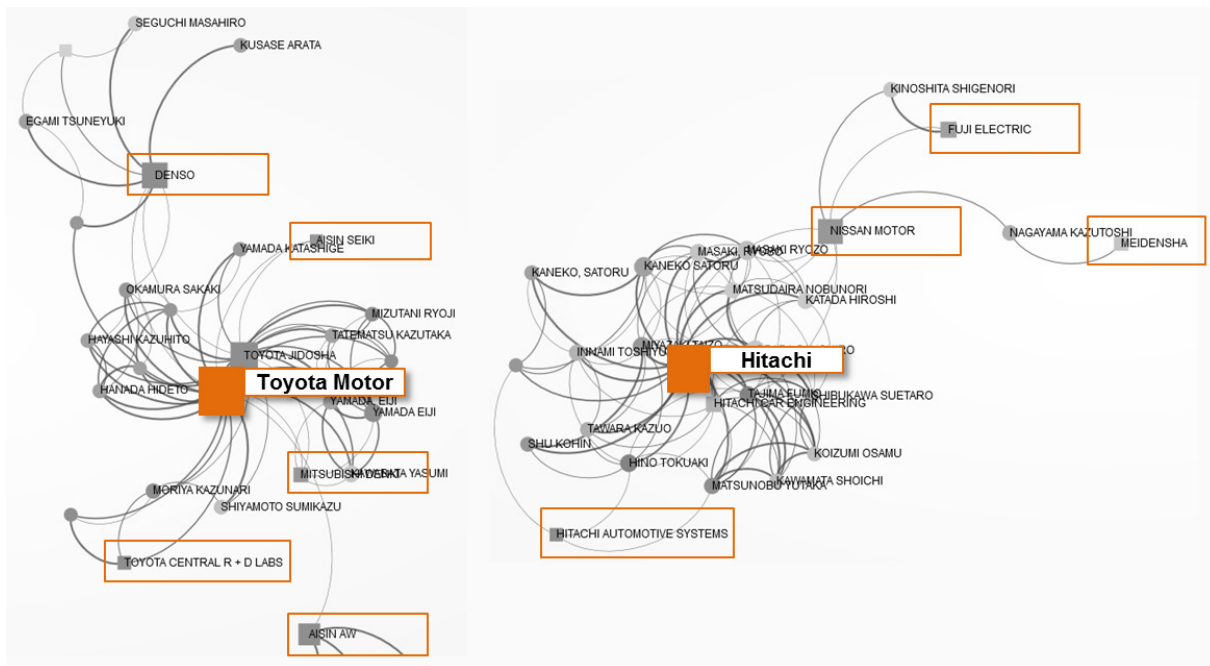


Abb. 4-52 Innovationsnetzwerke im Bereich „Synchronmaschine“ – Toyota Motor (JP) und Hitachi (JP)

In beiden Netzwerken finden weit verzweigte Kooperationstätigkeiten statt. Während Verbindungen von Toyota Motor insbesondere zur hauseigenen Forschungsinstitution Toyota Central R&D Labs sowie zu Zulieferern wie Denso und Aisin bestehen, ist mit Mitsubishi auch ein weiterer japanischer OEM Teil des Netzwerks, der selbst starke Forschungsaktivitäten im Bereich Synchronmaschine (Rang 9 im engen bzw. 2 im erweiterten Suchfeld) betreibt.

Im Innovationsnetzwerk von Hitachi können mit Nissan Motor ein weiterer japanischer OEM (auf Rang 6 im Technologieranking) sowie die Zulieferer Fuji Electric (Platz 12) und Meidensha (Platz 18) identifiziert werden.

Patentlandschaft „Asynchronmaschine“

Im Bereich Asynchronmaschine mit Bezug zu elektrifizierten Pkw nach Weltregionen und Zeit ist kein klarer Trend von 2000 bis 2012 zu erkennen. Insgesamt sind die internationalen FuE-Aktivitäten in diesem speziellen Feld relativ gering, wobei insbesondere Deutschland im Jahr 2005 und die USA im Jahr 2007 mit jeweils 15 Patentanmeldungen Peaks aufwiesen, sich danach aber wieder auf einem konstant niedrigen Level eingependelt haben (Abb. 4-53). Beide Länder führten so auch das Ranking mit jeweils 55 auf dem jeweiligen IP-Markt angemeldeten Patenten an, gefolgt von China auf Rang 3, das insbesondere ab dem Jahr 2008 vermehrt Patentanmeldungen auf dem eigenen Markt verzeichnete.

Bemerkenswert ist, dass in Japan über den gesamten Zeitraum nur 24 Patente angemeldet wurden und diese Region damit abgeschlagen vor Frankreich auf dem vorletzten Platz rangierte.

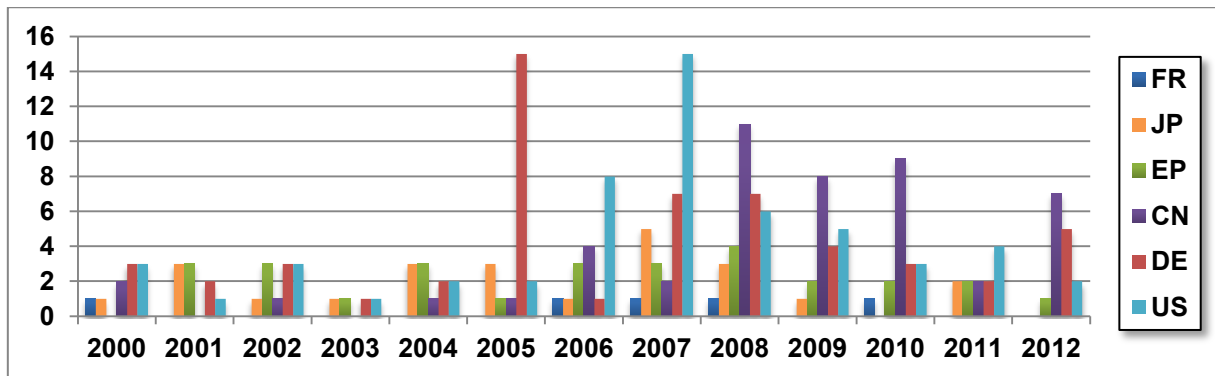


Abb. 4-53 Anzahl Patente im Bereich „Asynchronmaschine“ nach Weltregionen 2000–2012

Auch die Gesamtzahl der in der Forschung aktiven Institutionen ist bei eingeschränktem Suchfeld relativ gering (Abb. 4-54). Deutschland ist für knapp 60 % aller Unternehmen in Europa verantwortlich und nimmt im internationalen Vergleich sogar die Spitzenposition vor den USA (13), Japan (11) und China (1) ein.

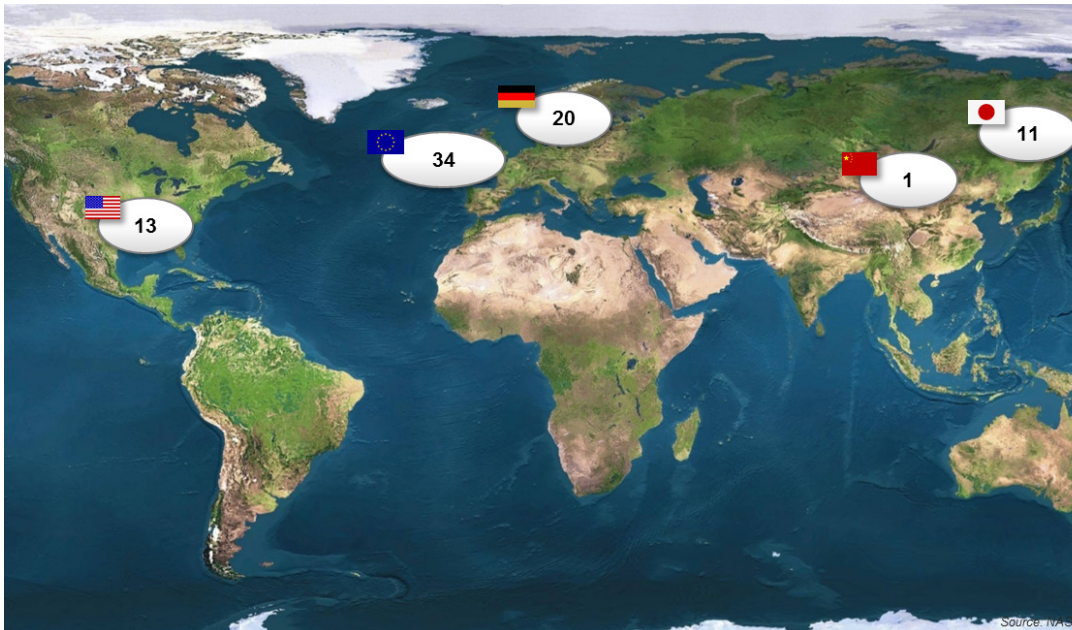


Abb. 4-54 Anzahl Institutionen mit Forschungsaktivitäten im Bereich „Asynchronmaschine“

Aufgrund der geringen Anzahl an Patentanmeldungen im Bereich Asynchronmaschine mit konkretem Bezug zur Elektromobilität soll im Folgenden das Suchfeld erweitert werden, um auch technologiespezifische, über elektrifizierte Pkw hinausgehende FuE-Aktivitäten zu erfassen. So erweitert sich die reine Anzahl der in den Weltregionen aktiven Unternehmen um ein Vielfaches: China stellt mit 329 Institutionen die führende Position, gefolgt von Deutschland (295), den USA (234) und Japan (200).

Bei der erweiterten Suche zur Asynchronmaschine wurden mehr als 5300 Patente im untersuchten Zeitraum angemeldet, bei engem Suchfeld nur ca. 220 (Abb. 4-55). Dies entspricht einem Anteil „elektromobilitätsgetriebener“ FuE an der Technologie von nur vier Prozent. Führend bei der reinen Anzahl der angemeldeten Patente ist der chinesische IP-Markt mit knapp 1600 Patenten vor den USA (ca. 1100) und Japan (ca. 1000). Insbesondere ab dem

Jahr 2008 konnte sich China im Rahmen dieser Analyse behaupten, die führende Position bis ins Jahr 2012 festigen und sogar noch weiter ausbauen, sodass der Marktanteil von 11 % in 2000 auf über 53 % in 2012 anstieg. Die USA und insbesondere Japan verloren im gleichen Zeitraum sieben bzw. 19 Prozentpunkte Marktanteil und erreichten 2012 damit nur noch 16 % bzw. 11 %.

Auf dem deutschen IP-Markt wurden im untersuchten Zeitraum knapp 730 Patente zur Asynchronmaschine eingereicht und veröffentlicht. Auch hier entwickelten sich die angemeldeten Patente in Relation zu China stark rückläufig. Während der Output in den untersuchten zwölf Jahren um über 160 % gesteigert werden konnte, verlor Deutschland insgesamt 14 % Marktanteil und fiel von 21 % auf nur noch ca. 7 % ab.

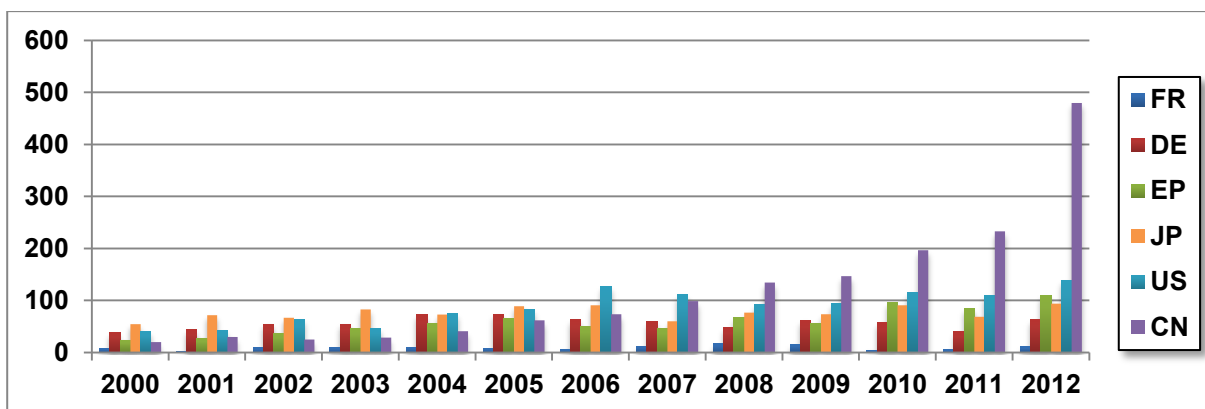


Abb. 4-55 Anzahl Patente im Bereich „Asynchronmaschine erweitert“ nach Weltregionen 2000–2012

Im Ranking der weltweit führenden Patentanmelder belegen japanische Unternehmen acht Positionen in den Top 20 und sind dabei mit einer Gesamtzahl von 405 Erfindungen führend (Tab. 4-11). Bemerkenswert ist, dass auch im Ranking mit erweitertem Suchfeld ein japanischer OEM – Mitsubishi (Rang 3, 112 Inventionen) – unter den Bestplatzierten vertreten ist. Toyota belegt in diesem Ranking mit 15 Erfindungen nur Platz 20, Honda mit 11 Erfindungen Rang 41.

Bestplatziertes deutsches Unternehmen und gleichzeitig im Gesamtranking führend ist Siemens mit 136 Inventionen (349 Patente), gefolgt von Bosch mit 37 Erfindungen (163 Patente) auf Rang 10 und SEW Eurodrive mit 26 Erfindungen (51 Patente) auf Platz 13. Deutsche OEM sind in diesem Technologiebereich weiterhin mit Daimler (16 Inventionen, inkl. Daimler Chrysler), Volkswagen und BMW (jeweils 3) sowie Porsche (eine Erfindung) vertreten.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	SIEMENS	136	DE
2	LG ELECTRONICS	113	SK
3	MITSUBISHI DENKI	112	JP
4	HITACHI	81	JP
5	FUJITSU GEN	57	JP

6	MATSUSHITA ELECTRIC IND	49	JP
7	CHONGQING MACHINERY	45	CN
8	GEN ELECTRIC	44	US
9	TOSHIBA	42	JP
10	ROBERT BOSCH	37	DE
11	ZHONGDA MOTORS	36	CN
12	GM GLOBAL TECH OPERATIONS	27	US
13	SEW-EURODRIVE	26	DE
14	YASKAWA ELECTRIC	24	JP
15	DENSO	22	JP
16	EMERSON ELECTRIC	22	US
17	FANUC	18	JP
18	YONGJI XINSHISU ELECTRIC	17	CN
19	JIANGSU UNIV	16	CN
20	TOYOTA	15	JP

Tab. 4-11 Top-20-Patentanmelder im Bereich „Asynchronmaschine erweitert“ nach Anzahl der Erfindungen

In den USA sind die Unternehmen GE (44 Inventionen), GM (27) und Emerson Electric (22) in den Top 3 und im Bereich Patentanmeldungen für Asynchronmaschinen am breitesten aufgestellt. In China führt Chongqing Machinery mit 45 Erfindungen die Rangliste an, gefolgt von Zhongda Motors (36).

Ferner sind Yongji Xinshisu Electric (17) und die Jiangso University (16) in den Top 10 vertreten und China dementsprechend insgesamt in diesem Technologiefeld im internationalen Vergleich nicht nur marktseitig, sondern tatsächlich auch bei der konkreten Technologieentwicklung aktiv und in einer treibenden Rolle.

Patentlandschaft „Reluktanzmaschine“

Im Bereich der Reluktanzmaschine in Verbindung mit elektrifizierten Pkw konnten insgesamt 162 Patente im untersuchten Zeitraum identifiziert werden, wobei auch hier aufgrund der geringen Datenpunkte kein klarer Trend über die Zeit erkennbar ist.

Der japanische Markt nimmt ca. 37 % aller Veröffentlichungen ein, gefolgt von den USA mit knapp 30 % sowie Europa (12 %), Deutschland (9 %) und China (8 %) (Abb. 4-56).

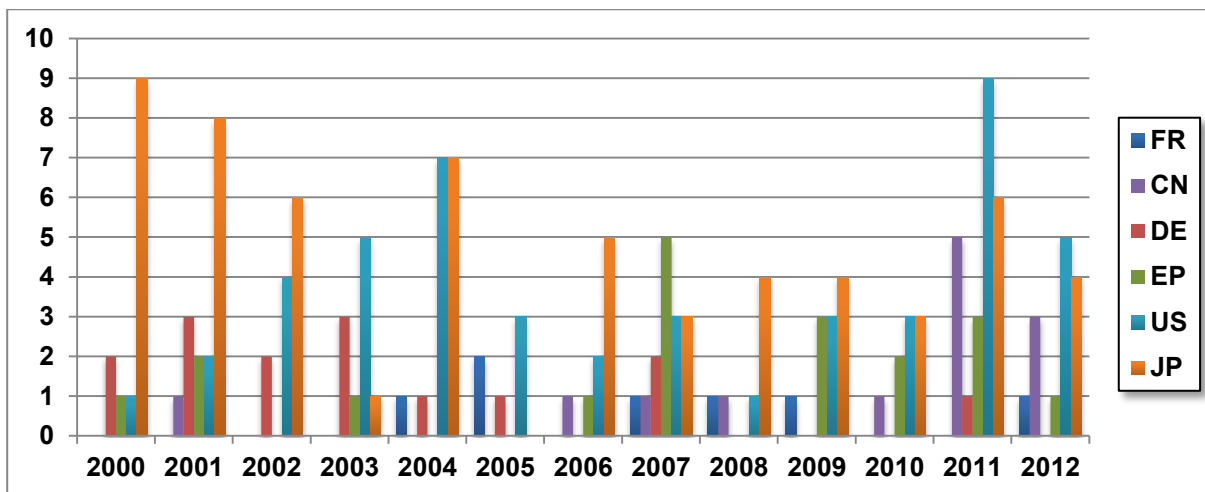


Abb. 4-56 Anzahl Patente im Bereich „Reluktanzmaschine“ nach Weltregionen 2000–2012

Bei einer Erweiterung des Suchfelds auf alle Patente und Erfindungen im Bereich Reluktanzmaschine – ohne Einschränkung auf den Bereich elektrifizierter Pkw – können ca. 4700 Patente identifiziert werden. Dabei verschiebt sich das Bild dahingehend, dass eine konstant hohe Aktivität sowohl in Japan als auch in den USA über den gesamten Zeitraum erkennbar ist. Insgesamt ist Japan dabei mit ca. 1600 angemeldeten Patenten führend, gefolgt von den USA mit ca. 1200 und China, das die Patentanmeldungen auf dem eigenen Markt ab 2004 kontinuierlich steigern konnte und ab 2012 mit ca. 800 Patenten die führende Position für Patentanmelder einnimmt (Abb. 4-57).

Der japanische Markt verlor über die Jahre insgesamt 24 % Marktanteil und erreichte 2012 nur noch 20 %, während China seinen Output um den Faktor 30 steigern konnte und ausgehend von zwei Prozent Marktanteil 2000 innerhalb einer Dekade 27 % und bis 2012 sogar 42 % erreicht hat. Die USA halten sich im untersuchten Zeitraum relativ konstant bei einem Marktanteil zwischen 22 % und 29 %, während in Deutschland ab 2006 ein konstanter Rückgang der Patentanmeldungen erkennbar wird. Konnte der deutsche IP-Markt im Jahr 2000 noch ca. 12 % Marktanteil vorweisen, sank dieser Wert bis 2012 auf nur noch 3,6 %.

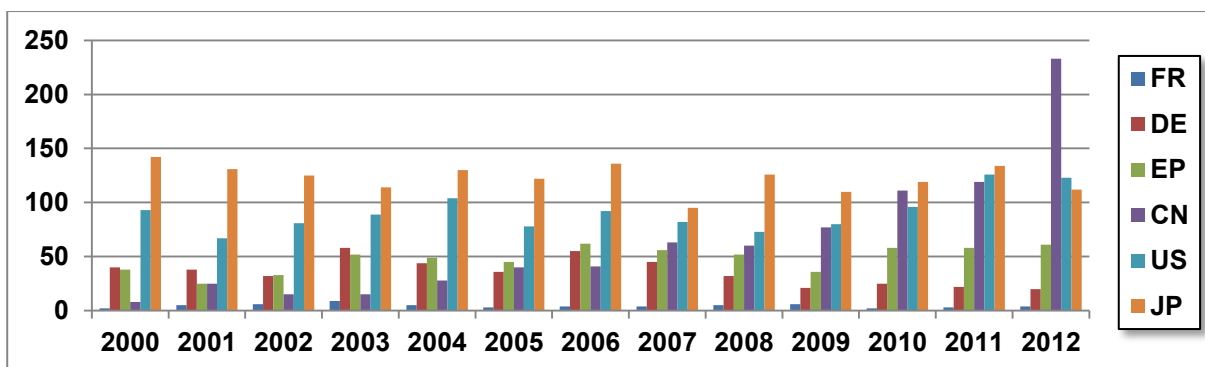


Abb. 4-57 Anzahl Patente im Bereich „Reluktanzmaschine erweitert“ nach Weltregionen 2000–2012

Die führende Institution in diesem Technologiefeld kommt mit LG Electronics und insgesamt 224 inhaltlich relevanten Erfindungen (394 Patente) aus Südkorea, gefolgt von Switched Reluctance Drives aus Großbritannien (106 Erfindungen) und Denso aus Japan.

Japanische Unternehmen sind zwar mit 60 % immer noch für die Mehrzahl der Erfindungen in den Top 20 verantwortlich und treibende Kraft, jedoch nicht mehr dominante Technologieführer, wie z. B. bei der Synchronmaschine. Auffallend ist dennoch, dass auch bei der Analyse mit erweitertem Suchfeld japanische OEM stark vertreten sind. Toyota (inkl. Toyota Central R&D Labs) befindet sich demnach mit 93 Erfindungen auf Rang 5, Mitsubishi (81) auf Rang 7 und Nissan (68) auf Platz 11 (Tab. 4-12).

Rang	Institution	Anzahl Erfindungen	Land
1	LG ELECTRONICS	224	SK
2	SWITCHED RELUCTANCE DR	106	UK
3	DENSO	110	JP
4	SAMSUNG ELECTRONICS	94	SK
5	TOYOTA MOTOR	93	JP
6	TOSHIBA	86	JP
7	MITSUBISHI DENKI	81	JP
8	MATSUSHITA ELECTRIC IND	74	JP
9	HITACHI	72	JP
10	AISIN SEIKI	69	JP
11	NISSAN MOTOR	68	JP
12	JAPAN SERVO	60	JP
13	EMERSON ELECTRIC	57	US
14	FUJITSU GEN	53	JP
15	MITSUBA	44	JP
16	DAIKIN IND	38	JP
17	ROBERT BOSCH	38	DE
18	NANJING UNIV	35	CN
19	DANA	30	US
20	OKUMA	28	JP

Tab. 4-12 Top-20-Patentanmelder im Bereich „Reluktanzmaschine erweitert“ nach Anzahl der Erfindungen

Emerson Electric ist bestplatziertes US-amerikanisches Unternehmen, die Robert Bosch GmbH auf Rang 17 führt die Technologieentwicklung aus deutscher Sicht an. China ist mit der Nanjing University Aeronautics & Astronautics und 35 Erfindungen in den Top 20 vertreten.

Patentlandschaft „Transversalf Flussmaschine“

Im speziellen Feld der Patentveröffentlichungen im Zusammenhang mit Erfindungen im Bereich Transversalf Flussmaschine für elektrifizierte Pkw können insgesamt nur 13 Patente identifiziert werden. Deutschland ist dabei mit sechs Patenten führend, wobei diese bereits in den Jahren 1996, 1998 und 2001 veröffentlicht wurden. Aktuelle Forschungen können nur auf dem japanischen, US-amerikanischen und europäischen Markt identifiziert werden (jeweils eine Patentveröffentlichung 2012). Die treibenden Unternehmen sind dabei die Voith AG, Toshiba sowie Daimler.

Auch hier wird im Folgenden die Patentlandschaft mit erweitertem Suchfeld im Bereich Transversalf Flussmaschine betrachtet (Abb. 4-58). Im untersuchten Zeitraum können so insgesamt ca. 390 Patente identifiziert und den verschiedenen Weltmärkten zugeordnet werden. Die USA und Deutschland sind diesbezüglich mit 104 bzw. 102 Patenten führend, gefolgt vom europäischen IP-Markt (85), China (51), Japan (41) sowie Frankreich (4).

Auch diese Analyse verdeutlicht für Deutschland vermehrt in den Jahren 2000–2004 FuE-Aktivitäten, während in den Folgejahren andere Weltregionen – insbesondere die USA und ab 2011 auch China – relevant wurden. Auch die Marktanteile verschieben sich über die Jahre entsprechend: Während der deutsche Markt im Jahr 2000 noch knapp 65 % aller Patentanmeldungen verbuchen konnte, sank der Anteil bis 2010 auf 24 % und erreichte 2012 nur noch ca. 4 %, während die USA ihren Marktanteil von 6 % auf 28 %, China sogar von 6 % auf ca. 33 % steigern konnte. China bildete demnach im Jahr 2012 erstmals den bedeutendsten Markt für Patentanmelder im erweiterten Bereich der Transversalf Flussmaschine.

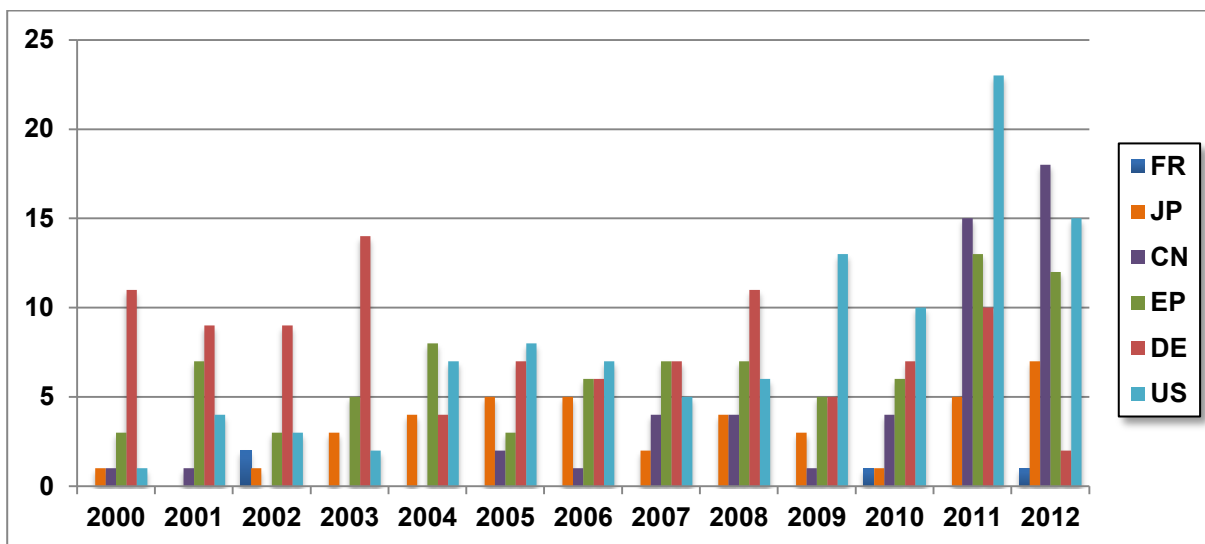


Abb. 4-58 Anzahl Patente im Bereich „Transversalf Flussmaschine erweitert“ nach Weltregionen 2000–2012

Deutsche Institutionen sind im erweiterten Feld zur Transversalf Flussmaschine führend und belegen 11 Plätze in den Top 20 (Tab. 4-13). Die Voith AG steht dabei mit 27 Erfindungen (86 Patente) auf Rang 1 vor der Robert Bosch GmbH mit 19 Erfindungen (69 Patente) und dem Harbin Institute of Technology aus China. Auf den Plätzen 5 und 7 rangieren zwei deutsche OEM, die neun bzw. sieben Erfindungen in ihrem Technologieportfolio vorweisen können. Insgesamt sind deutsche Unternehmen für ca. 52 % aller Patentaktivitäten in den Top

20 verantwortlich. 40 deutsche Institutionen – und damit im internationalen Vergleich mit Abstand am meisten – forschen an Themen zur Transversalfussmaschine.

Das einzige japanische Unternehmen in dieser Rangliste ist die Minebea K. K., die auf Rang 19 nur zwei Inventionen vorweisen kann. Nordamerikanische Unternehmen sind durch Motor Excellence, LLC auf Platz 6, Hamilton Sundstrand (bzw. United Technologies Corp.) auf Platz 8, Otis Corp. auf Rang 10 sowie Eocycle Technologies aus Kanada auf Platz 20 vertreten.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	VOITH	27	DE
2	ROBERT BOSCH	19	DE
3	HARBIN INST TECH	16	CN
4	KOREA ELECTROTECHNOLOGY INST	28	SK
5	DAIMLER-BENZ	9	DE
6	MOTOR EXCELLENCE	7	US
7	BAYERISCHE MOTOREN WERKE	7	DE
8	HAMILTON SUNDSTRAND	6	US
9	BOMBARDIER TRANSPORTATION	6	FR
10	OTIS	4	US
11	SEW-EURODRIVE	4	DE
12	SOUTHEAST UNIV	4	CN
13	SIEMENS	3	DE
14	BLUM	3	DE
15	SCHAEFFLER	3	DE
16	COMPACT DYNAMICS	2	DE
17	HARMONIC DRIVE SYSTEMS	2	DE
18	MTU AERO ENGINES	2	DE
19	MINEBEA	2	JP
20	EOCYCLE TECH	2	CAN

Tab. 4-13 Top-20-Patentanmelder im Bereich „Transversalfussmaschine erweitert“ nach Anzahl der Erfindungen

Patentlandschaft „Stator/Rotor“

Bei einer weiteren Analyse von Patent- und Publikationsschriften können Trends und Schwerpunkte auf Komponenten- und Bauteilebene elektrischer Maschinen identifiziert werden. Im Folgenden soll die Forschungslandschaft für diejenigen Komponenten dargestellt werden, die im Rahmen der internationalen Experteninterviews und von den STROM-Experten als besonders relevant für die Weiterentwicklung und/oder Optimierung von E-Maschinen im Antriebsstrang elektrifizierter Pkw genannt wurden: Stator, Rotor, Wicklungen, Thermomanagement sowie Permanentmagnete.

Die themenspezifische Untersuchung der identifizierten wissenschaftlichen Veröffentlichungen hat regionsspezifische Schwerpunkte in der Forschung auf Komponenten- und Bauteilebene ergeben (Abb. 4-59): Während chinesische Publikationen ihren Forschungsfokus auf die Bereiche Rotor sowie Wicklung und Bestromung legen, sind US-amerikanische und deutsche Veröffentlichungen weniger spezifisch, sodass sich hier weder klare Prioritäten noch „technologieoffenere“ Aktivitäten erkennen lassen.

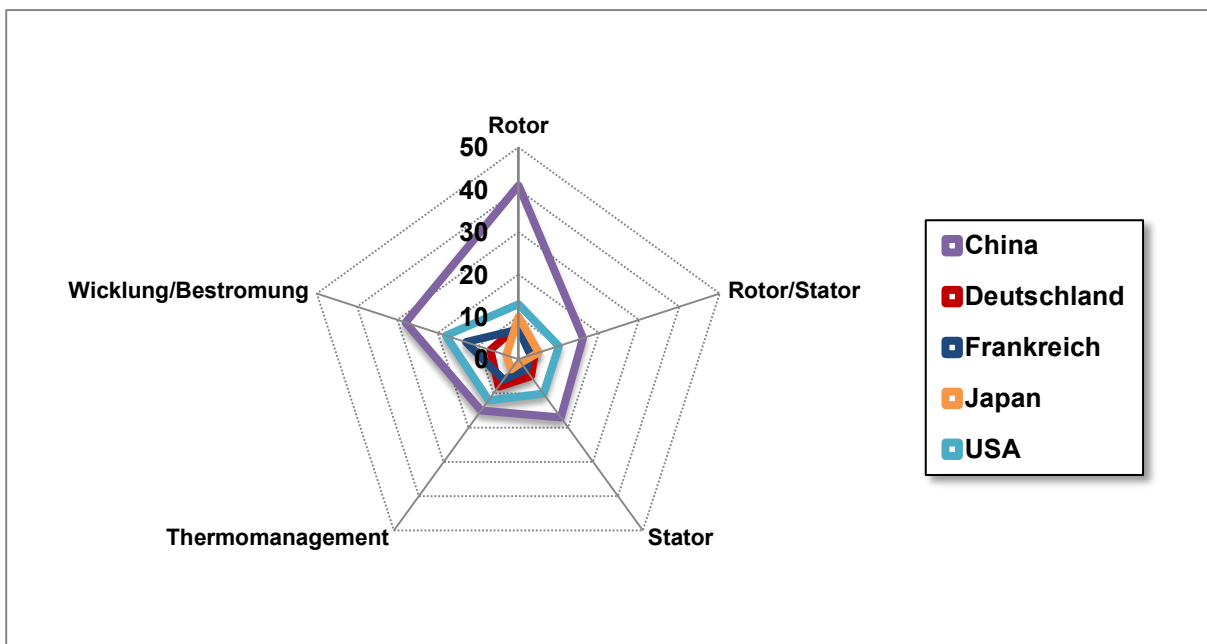


Abb. 4-59 Schwerpunkte der Publikationen nach Weltregionen und Komponenten/Bauteilen

Die Analyse von Patentschriften bezüglich Erfindungen im Bereich Stator über alle Bauformen hinweg belegt Japan mit 8238 Patenten zwischen 2000 und 2012 bei der reinen Patentanzahl als führend, während die USA mit ca. 5700 Patenten bis 2010 den zweiten Rang einnehmen und sich nur 2009 China knapp geschlagen geben müssen (Abb. 4-60).

Der Marktanteil der USA bewegte sich über die Jahre sehr konstant bei ca. 23 %, während der japanische Anteil von führenden 43 % in 2000 auf nur noch 19 % in 2012 abfiel. Dennoch rangiert Japan damit vor Europa (14 %) auf dem dritten Rang.

Die Patentanmeldungen auf dem chinesischen Markt nahmen ab 2003 konstant zu und zeigten insbesondere ab 2008 eine ausgeprägte Dynamik, sodass die USA von Platz 2 verdrängt wurden und 2012 China sogar mit Abstand die Spitzenposition einnahm. China konnte den Marktanteil von nur 5 % im Jahr 2000 auf 22 % in 2010 und auf über 37 % in 2012 steigern.

Deutschland hingegen war mit einer Patentzahl zwischen 140 und 240 pro Jahr über den untersuchten Zeitraum relativ konstant und konnte keine nennenswerten Steigerungen der Patentanmeldungen auf dem eigenen IP-Markt vorweisen. Der Peak wurde mit ca. 240 Patenten im Jahr 2008 erreicht, in den Folgejahren sind relativ sinkende Patentzahlen zu erkennen. Der Anteil Deutschlands am Gesamtmarkt ist dementsprechend von ca. 14 % auf 8 % in 2010 und nur noch 5 % in 2012 gefallen.

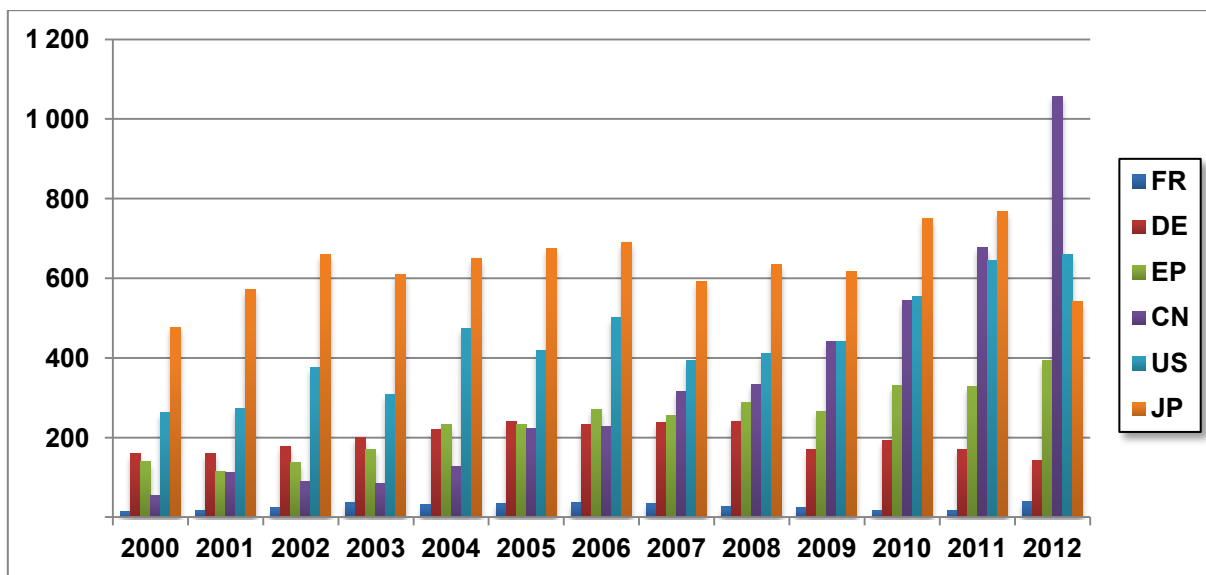


Abb. 4-60 Anzahl Patente im Bereich „Stator“ für alle Bauformen nach Weltregionen 2000–2012

Im Bereich Stator sind japanische Institutionen insgesamt stark vertreten und belegen sieben Plätze in den Top 10 (Tab. 4-14). Die einzigen nicht japanischen Unternehmen innerhalb der ersten zehn Plätze sind Siemens und Bosch auf den Plätzen 5 und 6 sowie LG aus Südkorea auf Rang 8. Bestplatziertes US-amerikanisches Unternehmen ist General Electric auf Platz 14 mit 672 inhaltlich relevanten Erfindungen.

Auch in diesem Zusammenhang ist bemerkenswert, dass mit Mitsubishi ein OEM auf Komponentenebene führend und auch Toyota (Rang 3) sowie Honda und Nissan in der Rangliste vertreten sind. Bestplatzierte deutsche OEM sind Daimler mit ca. 150 Erfindungen, gefolgt von Volkswagen und BMW mit 65 bzw. 55 Inventionen im Portfolio. In den USA können GM (78 Inventionen) und Ford (57) als führende OEM identifiziert werden.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	MITSUBISHI DENKI	2207	JP
2	MATSUSHITA ELECTRIC IND	1659	JP
3	TOYOTA MOTOR	1589	JP
4	DENSO	1466	JP
5	SIEMENS	1344	DE
6	ROBERT BOSCH	1319	DE

7	HITACHI	1226	JP
8	TOSHIBA	1212	JP
9	LG ELECTRONICS	1036	SK
10	HONDA MOTOR	1026	JP
11	NISSAN MOTOR	924	JP
12	ASMO	899	JP
13	YASKAWA ELECTRIC	694	JP
14	GEN ELECTRIC	672	US
15	NIPPON DENSAN	611	JP
16	SANYO ELECTRIC	543	JP
17	MINEBEA	522	JP
18	MITSUBA	502	JP
19	SAMSUNG	495	SK
20	FUJITSO GEN	367	JP

Tab. 4-14 Top-20-Patentanmelder im Bereich „Stator“ nach Anzahl der Erfindungen

Im Bereich des „Rotors“ über alle analysierten E-Maschinentypen hinweg ist ein sehr ähnliches Bild über die Zeit zu erkennen wie beim Stator, wobei die Gesamtanzahl der Patentschriften hier insgesamt mit ca. 32 000 höher liegt (Stator: ca. 24 000).

Auch hier ist Japan über den gesamten Zeitraum bei der absoluten Patentmenge führend (ca. 11 700), während die USA mit ca. 7100 Patenten den zweiten Rang einnehmen und sich bis ins Jahr 2011 auf diesem Platz behaupten konnten. Der Marktanteil der USA variierte über die Jahre nur leicht und entsprach im Mittel ca. 22 %, während Japan große Anteile verloren hat und von 47 % in 2000 auf 22 % in 2012 abfiel. Japan nahm damit im Jahr 2012 knapp hinter den USA und China den dritten Rang ein.

Patentanmeldungen auf dem chinesischen Markt konnten wie beim Stator auch beim Rotor ab dem Jahr 2003 konstant gesteigert werden und nahmen ab dem Jahr 2008 nochmals rasant zu, sodass die USA erstmals im Jahr 2011 von Platz 2 verdrängt werden konnten. Im Jahr 2012 war China dann der bedeutendste Markt für Patentschriften im Bereich Rotor (Abb. 4-61). Der Output auf dem chinesischen Markt wurde dabei von 54 Patenten im Jahr 2000 auf 544 im Jahr 2010 und sogar 1058 in 2012 gesteigert. Der Anteil am Gesamtmarkt stieg dementsprechend ebenfalls extrem an und konnte um 34 Prozentpunkte innerhalb von zwölf Jahren erhöht werden, um 2012 insgesamt 36 % zu erreichen.

Deutschland konnte die Zahl der Patentanmeldungen bis auf ein Maximum von 300 im Jahr 2007 steigern, bewegte sich aber bei der absoluten Patentzahl im Vergleich zu den anderen Weltregionen auf einem konstanten Niveau. Der Marktanteil sank von ca. 13 % im Jahr 2000 auf nur noch 5 % in 2012.

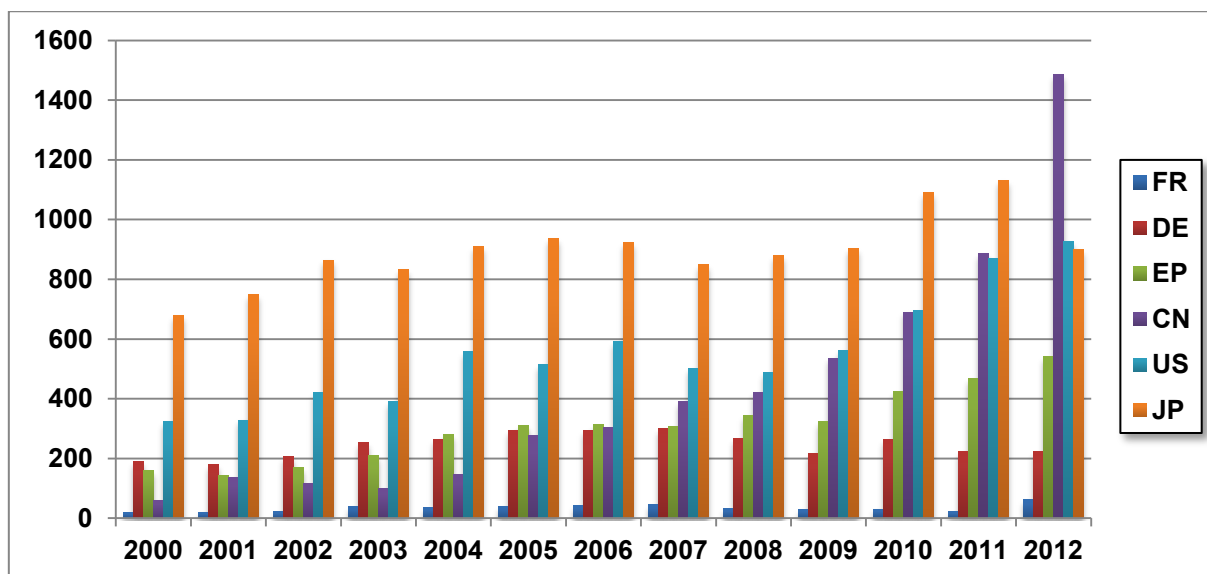


Abb. 4-61 Anzahl Patente im Bereich „Rotor“ für alle Bauformen nach Weltregionen 2000–2012

Die Top 20 der aktivsten Unternehmen im Bereich „Rotor“ ähneln denen im Feld „Stator“, wengleich einige interessante Verschiebungen identifiziert werden können (Tab. 4-15).

Japanische Unternehmen belegen sieben Plätze in den Top 10 und führen mit Mitsubishi bzw. Matsushita (Panasonic) die Rangliste an. Direkt dahinter kann Siemens mit 1074 Inventionen den dritten Rang erobern und verdrängt Toyota mit den Rotor betreffend weniger Forschungsaktivitäten als zum Stator. Auch Bosch kann sich um einen Platz verbessern und nimmt damit vor Denso den fünften Platz im Ranking ein.

Wiederum bestplatziertes US-amerikanisches Unternehmen ist General Electric auf Platz 13 mit 504 inhaltlich relevanten Erfindungen. Zudem kann erstmals ein taiwanesisches Unternehmen einen Platz in der Rangliste erobern: Sunonwealth Electric Machine Industry mit 287 Erfindungen auf dem 20. Platz.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	MITSUBISHI DENKI	1443	JP
2	MATSUSHITA ELECTRIC IND	1341	JP
3	SIEMENS	1074	DE
4	HITACHI	1014	JP
5	ROBERT BOSCH	1006	DE
6	DENSO	977	JP
7	TOSHIBA	953	JP
8	TOYOTA MOTOR	870	JP
9	LG ELECTRONICS	758	SK
10	HONDA MOTOR	740	JP
11	NISSAN MOTOR	699	JP

12	ASMO	637	JP
13	GEN ELECTRIC	504	US
14	NIPPON DENSAN	487	JP
15	YASKAWA ELECTRIC	414	JP
16	MINEBEA	397	JP
17	SANYO ELECTRIC	394	JP
18	SAMSUNG ELECTRO-MECHANICS	386	SK
19	MITSUBA	362	JP
20	SUNONWEALTH ELECTRIC MACHI	287	TW

Tab. 4-15 Top-20-Patentanmelder im Bereich „Rotor“ nach Anzahl der Erfindungen

Patentlandschaft „Wicklungen“

Im Bereich „Wicklungen“ zeigt sich über alle betrachteten E-Maschinenbauformen hinweg nach Weltregion von 2000 bis 2012 ein insgesamt kontinuierlicher Anstieg der Patentzahlen, wobei 2012 mit 2858 Patenten der Peak erreicht wurde.

Während der japanische IP-Markt insgesamt die meisten Patentanmeldungen zu verzeichnen hatte (7183) und die USA mit 5008 Patenten auf Platz 2 stehen, wuchs die Bedeutung des chinesischen Markts ab 2006 kontinuierlich, sodass China die USA erstmals 2009 vom zweiten Rang ablöste, um 2012 sogar die Spitzenposition vor Japan zu erreichen. Auch Europa konnte die Anzahl an Patentschriften ab 2008 steigern, aber mit 13 % Anteil über den kompletten Zeitraum nur einen Bruchteil der Gesamtanmeldungen verzeichnen.

Im direkten Vergleich der Patentsituationen der Jahre 2000 und 2010 ist ein Anstieg der Anmeldezahlen um knapp 120 % zu identifizieren (932 auf 2064), wobei insbesondere Europa und China ihre Positionen 2010 verbessern und eine Steigerung des Marktanteils um 3 % bzw. 18 % realisieren konnten. Japan und die USA verloren trotz jeweiliger Erhöhung der Anmeldezahlen um ca. 170 % und 180 % Marktanteile in Höhe von 9 % (Japan) und 5 % (USA). 2012 besaß Japan nur noch 20 % Marktanteil und wies einen Gesamtverlust von 19 Prozentpunkten auf, war damit aber immer noch um fast den Faktor vier stärker als der deutsche IP-Markt.

Insgesamt konnte die Veröffentlichungszahl in Deutschland von 136 im Jahr 2000 auf 145 im Jahr 2012 gesteigert werden. Viel dynamischer stellte sich die Situation in China dar, wo 2000 50 Patente, 2010 dann bereits 475 Patente und 2012 sogar 1104 Patente im Bereich der Wicklungen offengelegt wurden – eine Steigerung auf ca. 2200 %.

Der größte Anteil an Patentschriften im Bereich „Wicklungen“ ist mit Abstand der Synchronmaschine zuzuordnen, über 80 % aller untersuchten Patente beziehen sich auf Lösungen für diese spezielle Bauform. 23 000 Patente weniger sind im Bereich der Asynchronmaschine zu identifizieren (ca. 2800; 9 %), die hinter der Reluktanzmaschine (ca. 3100; 10 %) auf Platz 3 folgt. Wicklungen im Bereich Transversalfeldmaschine entsprechen insgesamt nur 0,8 %.

Die Anteile über die Weltregionen sind relativ gleich verteilt und fokussieren stark auf Erfindungen im Bereich Synchronmaschine (Abb. 4-62). Die größten Anteile an alternativen Bauformen haben China und Deutschland, die 25 % bzw. 22 % aller Patentschriften zu Wicklungen

gen auf die Bauformen Asynchron- und Reluktanzmaschine sowie im Falle Deutschlands auch auf die Transversalfeldmaschine beziehen. Wiederum ist ein Fokus chinesischer Patentschriften auf die Asynchronmaschine zu erkennen, die hier einen relativ hohen Anteil von 14 % erreichen.

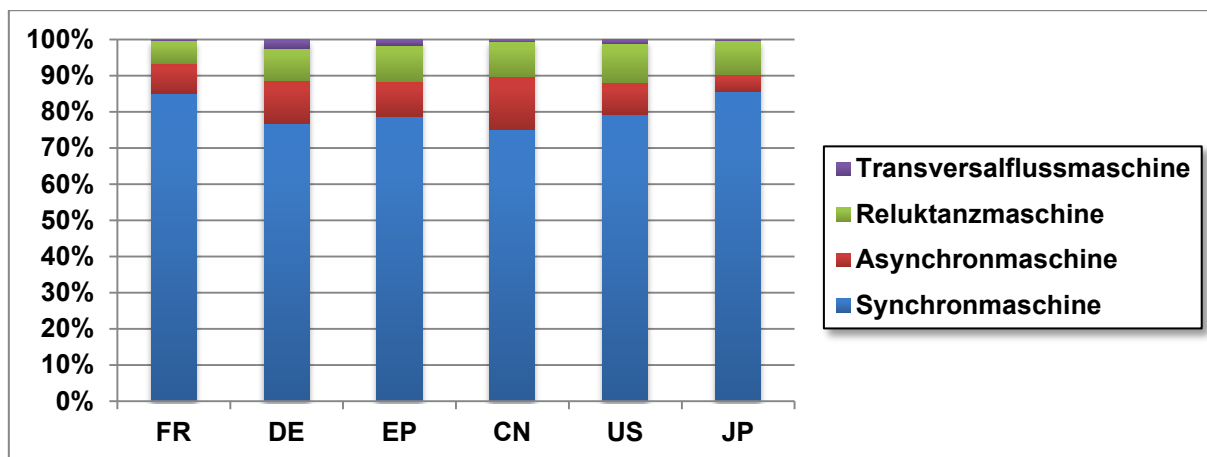


Abb. 4-62 Anteil Patente im Bereich „Wicklungen“ für Bauformen nach Weltregionen 2000–2012

Die führende Institution im Technologiefeld „Wicklungen“ ist der japanische OEM Mitsubishi mit insgesamt 611 inhaltlich relevanten Erfindungen, gefolgt von Matsushita (bzw. Panasonic, 513) und Denso (403). Die Top 5 werden von Hitachi (352) und Toshiba (280) komplettiert und bestehen damit in Gänze aus Institutionen mit Sitz in Japan. Auf den Plätzen 6 und 7 folgen Siemens (241) und Bosch (211), die damit die mit Abstand bestplatzierten Unternehmen aus Deutschland sind, bevor auf Rang 8 das erste US-amerikanische Unternehmen mit General Electric (165) zu finden ist (Tab. 4-16).

Insgesamt sind japanische Unternehmen in den Top 20 auch bei FuE-Aktivitäten im Technologiefeld „Wicklungen“ starke treibende Kräfte und stellen 82 % aller inhaltlich relevanten Erfindungen. Auffallend ist wiederum, dass mit Mitsubishi, Nissan, Honda und Toyota japanische OEM stark vertreten sind.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	MITSUBISHI DENKI	611	JP
2	MATSUSHITA ELECTRIC IND	513	JP
3	DENSO	403	JP
4	HITACHI	352	JP
5	TOSHIBA	280	JP
6	SIEMENS	241	DE
7	ROBERT BOSCH	211	DE
8	GEN ELECTRIC	165	US
9	NISSAN MOTOR	164	JP

10	HONDA MOTOR	161	JP
11	TOYOTA MOTOR	159	JP
12	LG ELECTRONICS	154	SK
13	YASKAWA ELECTRIC	145	JP
14	FUJITSU GEN	136	JP
15	ASMO	125	JP
16	SANYO ELECTRIC	107	JP
17	NIPPON DENSAN	106	JP
18	MINEBEA	104	JP
19	MITSUBA	102	JP
20	SWITCHED RELUCTANCE DR	55	GB

Tab. 4-16 Top-20-Patentanmelder im Bereich „Wicklungen“ nach Anzahl der Erfindungen

Patentlandschaft „Thermomanagement“

Bei einem Vergleich offengelegter Patentschriften im Bereich „Thermomanagement“ von 2000 bis 2012, die sich auf alle untersuchten E-Maschinenbauformen beziehen, können weltweit insgesamt ca. 4200 Patente identifiziert werden (Abb. 4-63). Der japanische und US-amerikanische IP-Markt führen bei der Gesamtanzahl relativ deutlich (ca. 1300 bzw. 1100 Patente) vor dem chinesischen Markt (ca. 660), Europa (ca. 600), Deutschland (ca. 470) und Frankreich (ca. 100).

Wiederum sind z. T. extreme Verschiebungen über die Jahre zu erkennen: Auch in diesem Technologiefeld wuchs die Bedeutung des chinesischen Markts insbesondere ab 2008 kontinuierlich, sodass die USA erstmals 2010 von Platz 2 verdrängt und 2012 dann die Spitzenposition vor Japan und den USA eingenommen werden konnte. China konnte den Output über die Jahre um insgesamt über 1600 % steigern und erreichte 2012 einen Marktanteil von 35 %, was einer Steigerung von 28 Prozentpunkten im untersuchten Zeitraum entspricht.

Die Bedeutung des deutschen IP-Markts variierte während der Jahre 2000–2008 bei relativ konstanten Anteilen von 10 % bis 15 %, brach aber 2009 dramatisch ein. Die Gesamtzahl der in Deutschland angemeldeten Patente fiel von ca. 50 auf nur noch 15 und der Anteil am Gesamtmarkt ging innerhalb eines Jahres von ca. 13 % auf 5 % zurück. Bis ins Jahr 2012 ergaben sich dann keine nennenswerten Veränderungen und der Marktanteil sank sogar noch leicht weiter bis auf 4,7 %. Bis 2012 verlor Deutschland damit über 10 % Marktanteil.

Auch der japanische Markt verlor zugunsten Chinas an Marktanteilen und fiel von 35 % im Jahr 2000 auf 29 % in 2010 und nur noch 23 % in 2012 – das Niveau des amerikanischen Markts. Dennoch ist Japan bei Betrachtung des gesamten Zeitraums führend. Im direkten Vergleich der Patentsituationen der Jahre 2000 und 2010 ist ein Anstieg der Veröffentlichungszahlen um knapp 160 % zu verzeichnen (145 zu 376).

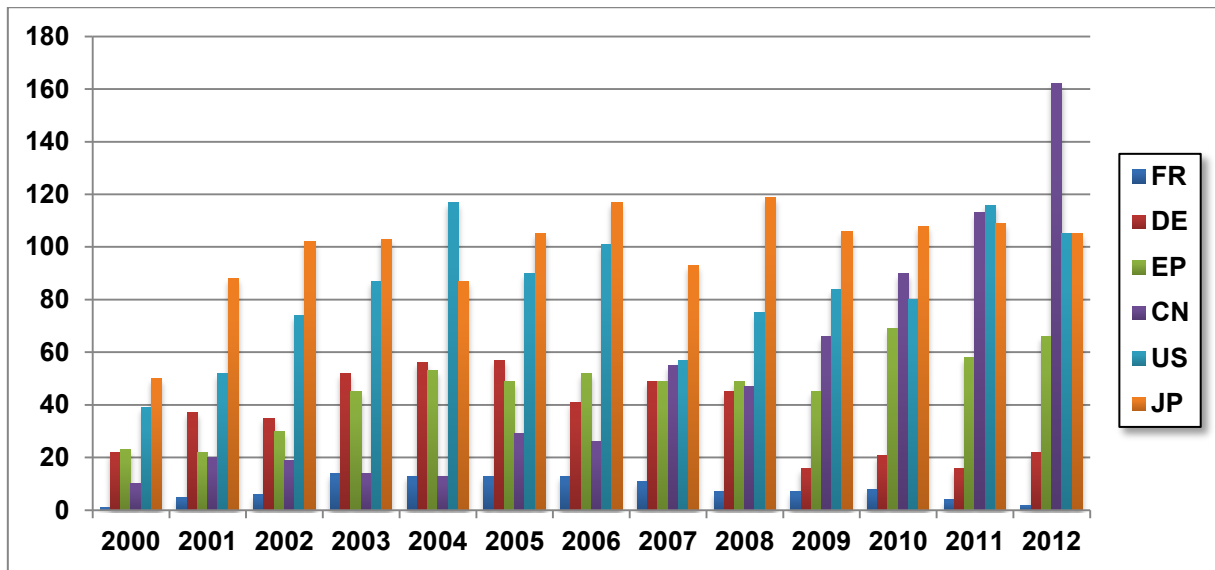


Abb. 4-63 Anzahl Patente im Bereich „Thermomanagement“ für alle Bauformen nach Weltregionen 2000–2012

Der größte Anteil an Patentschriften zum Thermomanagement ist mit ca. 3600 der Synchronmaschine zuzuordnen, gefolgt von der Asynchronmaschine mit ca. 400, der Reluktanzmaschine mit ca. 150 und der Transversalflussmaschine mit nur noch ca. 40.

Die Patentanteile der einzelnen Bauformen sind weltweit relativ ähnlich verteilt und fokussieren auf Erfindungen im Bereich Synchronmaschine (Abb. 4-64). Bemerkenswert ist, dass sich sowohl Frankreich als auch Japan zu über 90 % auf diese Technologie konzentrieren, während Deutschland und die USA, insbesondere aber China breiter aufgestellt sind und auch Lösungen zur Asynchron-, Reluktanz- sowie (in sehr geringen Anteilen) Transversalflussmaschine als schützenswert definieren. China weist über die untersuchten Länder hinweg die größten Anteile bei der Asynchronmaschine auf.

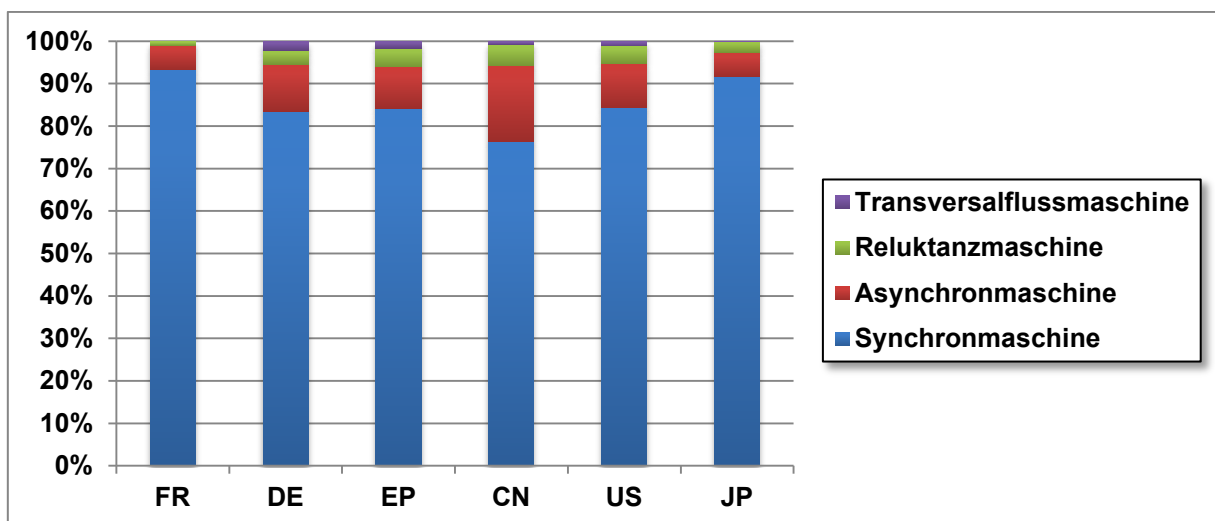


Abb. 4-64 Anteil Patente im Bereich „Thermomanagement“ für Bauformen nach Weltregionen 2000–2012

Die führenden Institutionen im Bereich „Thermomanagement“ über alle E-Maschinentypen hinweg stammen aus Japan, sodass die Top 5 von Mitsubishi, Denso, Hitachi, Matsushita (bzw. Panasonic) sowie Toshiba gestellt werden. Diese fünf Unternehmen haben insgesamt

553 inhaltlich relevante Erfindungen im Portfolio und besitzen damit fast 60 % aller in den Top 20 identifizierten Patentschriften. Mit Nissan auf Rang 7, Honda auf 8 und Toyota auf Platz 11 sind neben Mitsubishi auch hier weitere japanische OEM im Ranking vertreten.

Bestplatziertes deutsches Unternehmen ist die Siemens AG auf Rang 6 mit 49 Erfindungen, gefolgt von der Robert Bosch GmbH, die die Top 10 mit 34 Erfindungen komplettiert. Erstmals schafft es im Rahmen dieser Analysen ein Unternehmen aus Frankreich in die Rangliste der aktivsten Patentanmelder: Valeo auf Rang 13. Auch chinesische Institutionen sind mit Yongji Xinshisu auf Rang 19 (sechs Erfindungen) und Wuxi Thongda Motors auf Platz 18 (neun Erfindungen) in dieser Rangliste vertreten.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	MITSUBISHI DENKI	206	JP
2	DENSO	183	JP
3	HITACHI	59	JP
4	MATSUSHITA ELECTRIC IND	57	JP
5	TOSHIBA	53	JP
6	SIEMENS	49	DE
7	NISSAN MOTOR	47	JP
8	HONDA MOTOR	44	JP
9	GEN ELECTRIC	39	US
10	ROBERT BOSCH	34	DE
11	TOYOTA MOTOR	30	JP
12	LG ELECTRONICS	29	SK
13	VALEO ELECTRIQUES MOTEUR	24	FR
14	KOKUSAN DENKI	20	JP
15	ROHM	16	JP
16	AISIN SEIKI	16	JP
17	DAIKIN IND	11	JP
18	WUXI ZHONGDA MOTORS	9	CN
19	YONGJI XINSHISU ELECTRIC EQUIPMENT	6	CN
20	YASKAWA ELECTRIC	5	JP

Tab. 4-17 Top-20-Patentanmelder im Bereich „Thermomanagement“ nach Anzahl der Erfindungen

Patentlandschaft „Permanentmagnete“

Im Bereich „Permanentmagnete“ werden im Folgenden alle Patentschriften analysiert, die sich auf die Bauformen Synchronmaschine, Reluktanzmaschine sowie Transversalflussmaschine beziehen. Das Suchfeld ist erweitert und beinhaltet dementsprechend auch Erfindungen, die über die Anwendung im elektrifizierten Pkw hinausgehen.

Der mit Abstand größte Anteil der insgesamt 18 400 identifizierten Patentschriften befasst sich mit Permanentmagneten in Verbindung mit der Synchronmaschine (ca. 16 700, 91 %), gefolgt von der Reluktanzmaschine (ca. 1 400; 8 %) und der Transversalfflussmaschine (ca. 170; 1 %).

Führender Markt für Patentanmelder zu Permanentmagneten in Verbindung mit der Synchronmaschine ist Japan, auf dem über den untersuchten Zeitraum hinweg ca. 6300 Patente angemeldet wurden, mit einem Peak von 666 in 2011. Obwohl insgesamt führend verlor Japan über die Hälfte seines Marktanteils und stürzte von 52 % im Jahr 2000 auf nur noch 24 % in 2012 ab. Die USA folgen mit ca. 3500 angemeldeten Patenten und über die Jahre relativ konstanten Marktanteilen zwischen 22 % und 19 %. Auf dem dritten Platz rangiert China mit knapp 3200 Patenten und einer Steigerung des Patentoutputs von über 1800 % über die Jahre. Der Marktanteil Chinas stieg dementsprechend von 3 % in 2000 auf 39 % in 2012. Allein 2012 Jahr wurden fast 1000 Patente auf dem chinesischen Markt angemeldet und damit über ein Drittel mehr als in Japan.

Bei Permanentmagneten in Verbindung mit der Reluktanzmaschine sind die Anteile ähnlich verteilt. Auch hier ist Japan insgesamt führend (ca. 550 Patente), hat aber insgesamt 29 Prozentpunkte Anteil bis 2012 verloren, während China den Output auf dem eigenen Markt von null in 2000 auf über 70 in 2012 steigern konnte und damit in diesem Jahr fast doppelt so viele Patentschriften zu verzeichnen hatte wie Japan. Der Marktanteil in China wuchs innerhalb von 12 Jahren auf 43 %.

Erfindungen, die sich auf Permanentmagnete in Verbindung mit der Transversalfflussmaschine beziehen, sind über die Jahre relativ gering thematisiert, sodass insgesamt nur ca. 170 Patente in diesem speziellen Bereich existieren. Deutschland ist dabei mit über 52 Patenten führend, gefolgt von den USA (40), Europa (36), Japan (21), China (18) und Frankreich (2).

Für alle E-Maschinenbauformen zeigt sich 2000–2012 weltweit ein kontinuierlicher Anstieg der Patentzahlen, wobei mit knapp 2700 Patenten des Maximum im Jahr 2012 erreicht wurde (Abb. 4-65).

Während auf dem japanischen IP-Markt insgesamt die meisten Patente angemeldet und offengelegt wurden (6894) und die USA mit 3916 Patenten den zweiten Platz einnahmen, wuchs die Bedeutung des chinesischen Markts ab dem Jahr 2004 kontinuierlich an und entwickelte ab 2009 eine beachtliche Dynamik, sodass die USA erstmals 2009 vom zweiten Rang abgelöst werden konnten. Im Jahr 2012 war der chinesische Markt dann sogar mit Abstand Spitzenreiter. Auch der europäische Markt konnte einen kontinuierlichen Anstieg der Patentzahlen vorweisen, während Deutschland nach einem Anstieg bis 2008 wieder rückläufige absolute Zahlen und relative Marktanteile hatte.

Im direkten Vergleich der Patentsituationen der Jahre 2000 und 2010 ist ein Anstieg der Anmeldezahlen um mehr als 280 % zu verzeichnen (690 auf 2700), wobei insbesondere China und Europa Marktanteile gewannen und von 3 % auf 22 % (China) sowie 9 % auf 12 % (Europa) anstiegen.

Die USA und Deutschland verloren bis zum Jahr 2010 geringe Anteile (2 % bzw. 4 %) und besaßen dann noch 8 % bzw. 21 %. Der größte Verlierer in diesem Technologiefeld war Japan, das 15 % Marktanteil abgeben musste, mit knapp 35 % aber nach wie vor führend war. Bis ins Jahr 2012 verlor der japanische IP-Markt dann noch weitere Anteile und konnte nur noch 24 % der gesamten Patentanmeldungen für sich verzeichnen.

Auf dem chinesischen Markt wurden 2012 über 1050 Patentschriften angemeldet. Innerhalb von zwölf Jahren konnte China den Patentoutput um über 4800 % steigern und erreichte in 2012 einen Marktanteil von 39 %. Deutschland dagegen erreichte 2012 nur ein Zehntel der chinesischen Patentzahlen, verlor insgesamt 8 % Marktanteil und entsprach nur noch 4 % des Gesamtmarkts.

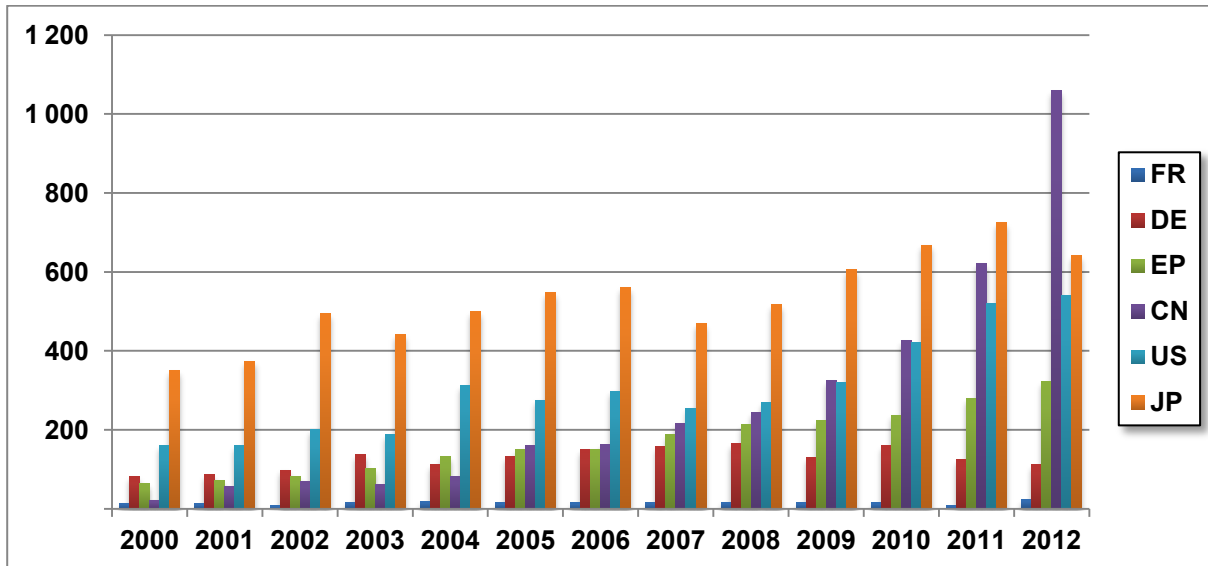


Abb. 4-65 Anzahl Patente im Bereich „Permanentmagnete“ für Synchron-, Reluktanz- und Transversalfeldmaschine nach Weltregionen 2000–2012

Die Top 20 der aktivsten Unternehmen im Bereich „Permanentmagnete“ listet folgende Tab. 4-18.

Insgesamt dominieren japanische Institutionen mit neun Unternehmen auf den ersten zehn Rängen, nur die Siemens AG schafft es mit 236 Erfindungen auf Rang 7. Mitsubishi und Toshiba führen das Ranking mit 475 bzw. 381 Inventionen an, gefolgt von Matsushita (374), Hitachi (347) und den OEM Honda Motor (242) sowie Nissan Motor (236). Auch Toyota ist in diesem Technologiefeld stark aufgestellt und belegt den neunten Platz mit 187 Erfindungen.

Die Robert Bosch GmbH komplettiert aus deutscher Sicht auf Rang 11 und 162 Inventionen die Rangliste. Während US-amerikanische Unternehmen die Top 20 nicht erreichen, wird eine chinesische Forschungsinstitution mit 11 Erfindungen auf Rang 16 unter den führenden Patentanmeldern gelistet.

Rang	Institution	Anzahl Inventionen	Land
1	MITSUBISHI DENKI	475	JP
2	TOSHIBA	381	JP
3	MATSUSHITA ELECTRIC IND	374	JP
4	HITACHI	347	JP
5	HONDA MOTOR	242	JP
6	NISSAN MOTOR	236	JP
7	SIEMENS	236	DE
8	YASKAWA ELECTRIC	194	JP
9	TOYOTA MOTOR	187	JP
10	DENSO	183	JP
11	ROBERT BOSCH	162	DE
12	DAIKIN IND	139	JP
13	FUJITSU GEN	136	JP
14	LG ELECTRONICS	132	SK
15	ASMO	128	JP
16	HARBIN INST TECH	111	CN
17	MINEBEA	103	JP
18	KOKUSAN DENKI	97	JP
19	MEIDENSHA	97	JP
20	SEIKO EPSON	87	JP

Tab. 4-18 Top-20-Patentanmelder im Bereich „Permanentmagnete“ nach Anzahl der Erfindungen

4.3 Untersuchung der Auswirkungen technologischer und konzeptioneller Verbesserungen auf den Fahrzeugenergieverbrauch

M. Klötzke (DLR)

Die Verbesserung, insbesondere die Effizienzsteigerung einzelner Komponenten hat Auswirkungen auf den Endenergieverbrauch des Fahrzeugs, die maßgeblich mit den Fahrzeugeigenschaften – insbesondere Architektur des Antriebsstrangs – und den Rahmenbedingungen der Energieverbrauchsermittlung zusammenhängen. Maßnahmen, die im Stadtverkehr einen positiven Einfluss haben (z. B. Start-Stopp-Systeme), müssen bei der Fahrt auf der Autobahn nicht zwangsläufig ähnliche Einspareffekte zeigen. Dies gilt, neben konzeptionellen Maßnahmen (z. B. Antriebsstrangarchitektur oder Hybridisierungsgrad), auch für technologische Maßnahmen, die an einzelnen Komponenten Anwendung finden.

Bei der Untersuchung von Potenzialen einzelner technologischer Maßnahmen können Längsdynamiksimulationen des Gesamtfahrzeugs wichtige Hinweise darauf liefern, welcher Nutzen aus einer Weiterentwicklung gewonnen werden kann. Da Pkw in der Regel recht dynamisch in unterschiedlichsten Anwendungsgebieten und unter verschiedensten Bedingungen zum Einsatz kommen, sind diverse Einsatzprofile zu berücksichtigen.

Die am Institut für Fahrzeugkonzepte des DLR entwickelte Simulationsbibliothek „*Alternative Vehicles*“ für die Simulationsumgebung Modelica/Dymola bietet die Möglichkeit, Fahrzeugkomponenten im Gesamtsystem „Fahrzeug“ integriert zu simulieren, wodurch eine Bewertung der Maßnahmen für einzelne Komponenten hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Energieverbrauch möglich wird (Hülsebusch et al. 2009). Um dies zu erreichen, sind einzelne Komponenten separat modelliert und werden zu einem Gesamtsystem verknüpft, wobei neben der Übertragung der mechanischen Kräfte und Momente auch Energieflüsse in verschiedenen Medien wie Kühlmittel, elektrischer Strom oder Kraftstofffluss simuliert werden. Zudem erlaubt eine Bus-gesteuerte Regelung, dass Komponenten abhängig vom Zustand anderer Komponenten oder des Gesamtsystems gesteuert und kontrolliert werden können.

Im vorliegenden Kapitel werden diverse Antriebsstrangarchitekturen in verschiedenen Fahrzyklen untersucht, auf Fahrzeugkomponenten und Untersysteme bezogene technologische Maßnahmen abgebildet und deren Wirkung im Gesamtsystem Fahrzeug beleuchtet. Neben batterieelektrischen werden auch Fahrzeuge mit hybridem Antriebsstrang untersucht und Maßnahmen, die auch in Fahrzeugen mit konventionellem Antriebsstrang angewandt werden können, einbezogen (Abb. 4-66).

Den Untersuchungsschwerpunkt bilden Maßnahmen, die den Wirkungsgrad der Leistungselektronik und der elektrischen Maschinen betreffen. Dabei werden keine tatsächlichen Einzelmaßnahmen, wie konkrete Verbesserungen einer Komponente durch bestimmte Technologien, abgebildet. Da verschiedene Einzelmaßnahmen ähnliche Auswirkungen haben können, werden übergeordnete resultierende Änderungen herangezogen, um eine Bewertung zu ermöglichen. So wird bei der Untersuchung des Einflusses von Leichtbaumaßnahmen die übergeordnete Änderung der Fahrzeugmasse in den Simulationen als Variationsparameter berücksichtigt, ohne auf einzelne Technologien zur Reduktion der Fahrzeugmasse einzugehen.

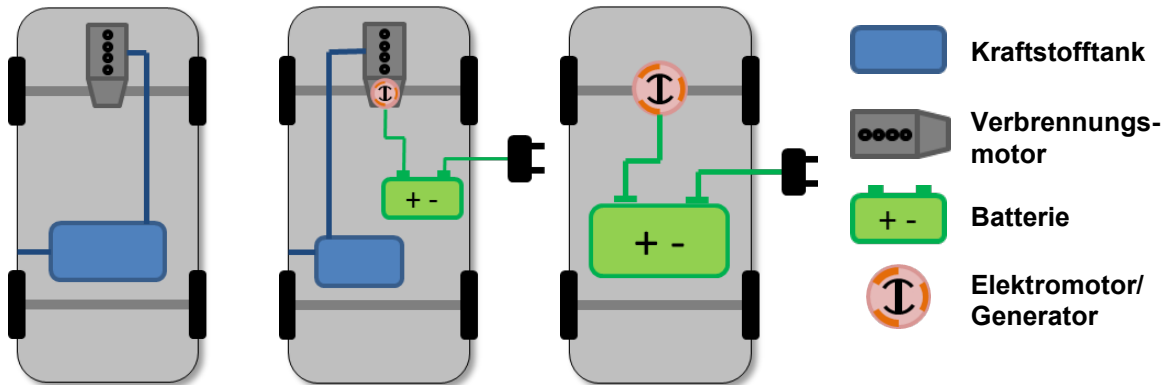


Abb. 4-66 Für die Simulation verwendete Antriebsarchitekturen (links: ICE, mitte: PHEV, rechts: BEV)

Ähnlich wird bei der Ermittlung der Wirkung der Variation des Luftwiderstands vorgegangen, wobei übergeordnete Änderungen des Produkts aus Querschnittsfläche und Luftwiderstandsbeiwert unterstellt werden. Für die Leistungselektronik und die elektrischen Maschinen wird ein kombiniertes Wirkungsgradkennfeld als Ausgangsbasis herangezogen (Abb. 4-67). Ohne auf einzelne Technologien oder Maßnahmen einzugehen, werden Änderungen am Effizienzkennfeld angenommen und deren Einfluss auf den Endenergieverbrauch untersucht. Somit kann für zukünftige Technologien eine schnelle Einschätzung gewonnen werden, wie sich, bei Kenntnis des Einflusses auf das Wirkungsgradkennfeld, der Endenergieverbrauch unter bestimmten Rahmenbedingungen verhält.

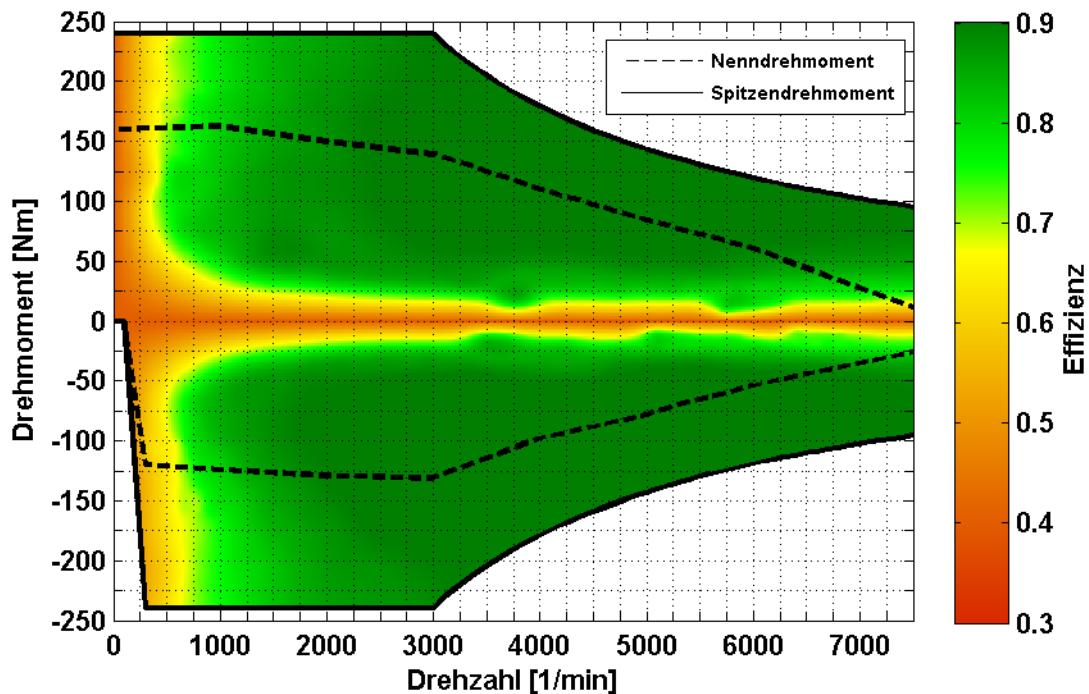


Abb. 4-67 Effizienzkennfeld der verwendeten elektrischen Maschine

Die Untersuchungen berücksichtigen unterschiedliche Fahrzyklen. Neben dem derzeit in Europa für die Ermittlung der Energieverbräuche und Abgasemissionen von Neuwagen eingesetzten Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEDC, Abb. 4-68) finden aus realen Fahrversuchen generierte Fahrzyklen Anwendung (UN/ECE, 2010). Die CADC-Fahrzyklen (Com-

mon Artemis Driving Cycle, (André 2004)) differenzieren sich in einen Autobahnzyklus (CADC Motorway, Abb. 4-71), einen Überlandzyklus (CADC Road, Abb. 4-70) und einen innerstädtischen Zyklus (CADC Urban, Abb. 4-69). Somit werden neben den Einflüssen der Maßnahmen auf den Normenergieverbrauch auch die zu erwartenden Auswirkungen in realen Fahrzyklen beleuchtet.

Der Neue Europäische Fahrzyklus besteht aus zwei Teilabschnitten: (1) Stadtfahrt und (2) Überlandfahrt, wobei auch ein Teilabschnitt auf einer Autobahn berücksichtigt ist. Der erste Teil der Stadtfahrt setzt sich aus drei Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen zusammen, die jeweils vier Mal durchfahren werden, und dauert 195 s bei durchschnittlich 19 km/h, wobei auf der Strecke von 1 km Länge mit einer Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h gefahren wird. Der außerstädtische Zyklusteil erstreckt sich über knapp 7 km, wobei eine Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h gefahren wird, und dauert 400 s, was einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 62 km/h entspricht. Der gesamte NEDC dauert demzufolge 1180 s und deckt eine Distanz von circa 11 km ab. Die Durchschnittsgeschwindigkeit liegt bei 33 km/h.

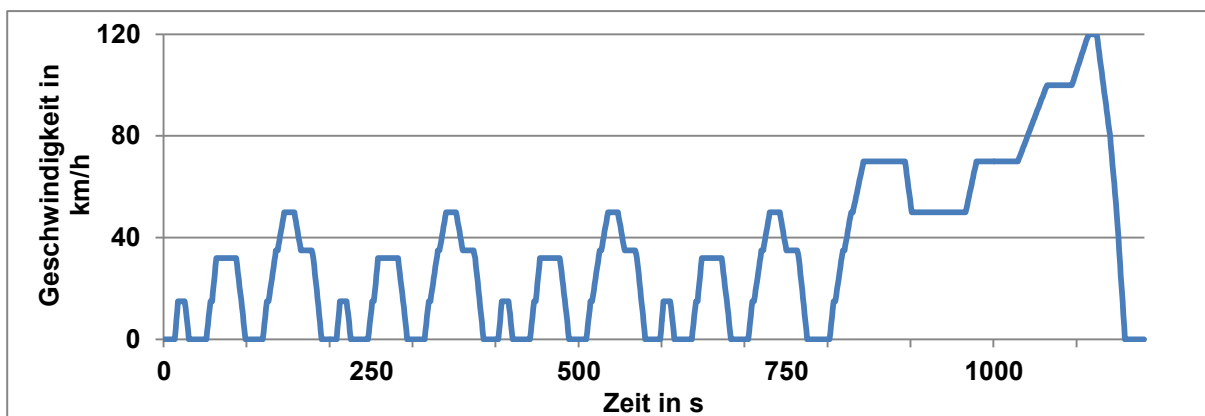


Abb. 4-68 Geschwindigkeitsprofil des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEDC)

Der CADC-Urban-Fahrzyklus (Abb. 4-69) repräsentiert eine Fahrt in der Stadt mit unterschiedlichen Verzögerungs- und Beschleunigungsphasen. Die Maximalgeschwindigkeit liegt bei knapp 58 km/h. Durchschnittlich wird mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 19 km/h gefahren, wobei in 920 s eine Distanz von knapp 5 km zurückgelegt wird.

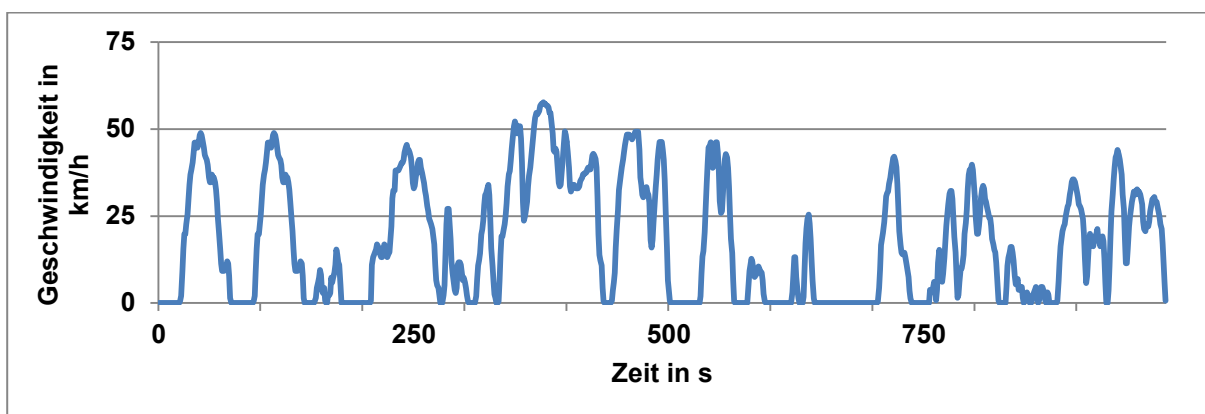


Abb. 4-69 Geschwindigkeitsprofil des CADC-Urban-Fahrzyklus

Eine außerstädtische Fahrt über z. B. Land- und Bundesstraßen wird durch den CADC-Road-Fahrzyklus dargestellt (Abb. 4-70). Neben verschiedenen Brems- und Beschleunigungsphasen wird drei Mal bis zum Stillstand abgebremst und im Anschluss wieder beschleunigt, wie es z. B. bei einer Durchfahrt durch einen kleinen Ort der Fall sein kann. Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt 54 km/h, sodass eine Distanz von 16 km in 1081 s zurückgelegt wird. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 112 km/h.

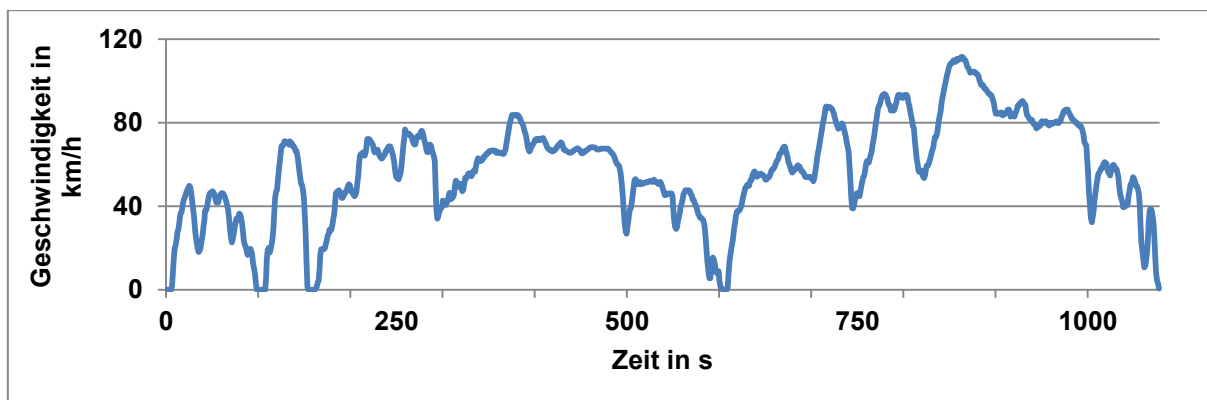


Abb. 4-70 Geschwindigkeitsprofil des CADC-Road-Fahrzyklus

Der CADC Motorway 150 repräsentiert eine Fahrt ähnlich wie auf einer Autobahn (Abb. 4-71). Im Gegensatz zum NEDC mit einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h werden in diesem Zyklus Geschwindigkeiten von bis zu 150 km/h erreicht. Auch liegt die durchschnittliche Geschwindigkeit mit 100 km/h deutlich über der des außerstädtischen Abschnitts im NEDC von knapp über 60 km/h. Der gesamte Zyklus erstreckt sich über 1067 s und deckt dabei eine Strecke von circa 30 km ab.

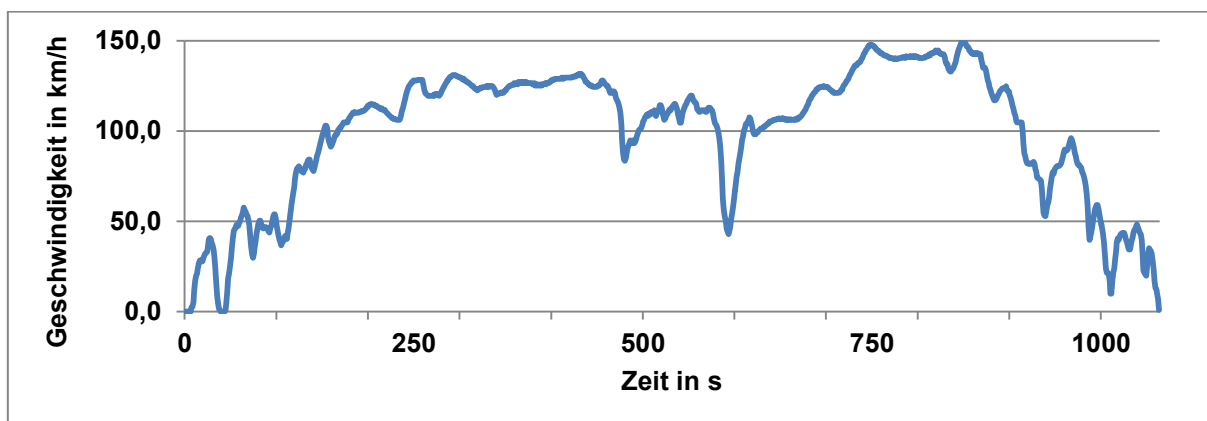


Abb. 4-71 Geschwindigkeitsprofil des CADC-Motorway-Fahrzyklus

Der Energieverbrauch der drei Fahrzeugvarianten unterscheidet sich deutlich (Abb. 4-72). Insbesondere für den PHEV zeigt sich, dass in Fahrzyklen mit langen rein elektrisch gefahrenen Teilstrecken der spezifische Energieverbrauch gegenüber solchen, die zu einem großen Teil auf verbrennungsmotorischen Antrieb basieren, massiv abgesenkt werden kann. Im realen Autobahnzyklus (CADC Motorway, Abb. 4-71) ist der Energieverbrauch quasi identisch mit dem des konventionellen Fahrzeugs. Während das konventionelle Fahrzeug im innerstädtischen Realzyklus (CADC Urban, Abb. 4-69) seinen höchsten spezifischen Ener-

gieverbrauch aufweist, hat der PHEV in diesem Zyklus seinen niedrigsten (Abb. 4-72), da der PHEV wie im Rahmen dieser Untersuchungen konfiguriert den innerstädtischen Realzyklus ohne Unterstützung des Verbrennungsmotors durchfahren kann. Hierbei sind die Verbräuche von PHEV und BEV auf dem gleichen Niveau. Der im NEDC (Abb. 4-68) ermittelte simulierte spezifische Verbrauch liegt beim PHEV und konventionellen Fahrzeug zwischen den maximalen und minimalen Verbräuchen, die in den Realzyklen ermittelt wurden. Für das BEV hingegen ist der Normverbrauch aus dem NEDC auf dem gleichen Niveau wie der niedrigste ermittelte spezifische Energieverbrauch aus den Realzyklen, unter anderem weil bei Verzögerungsphasen, d. h. Abbremsen des Fahrzeugs, die notwendige Verzögerungsleistung komplett von der elektrischen Maschine im Generatorbetrieb geleistet werden kann, wodurch ein hoher Rekuperationsgrad erreicht wird. Dies bedeutet, dass die gesamte Bremsenergie, die über die Verluste durch Fahrwiderstände hinausgeht, aus dem Fahrzeug abgeführt werden muss und unter Berücksichtigung der Rekuperations-Wirkungsgradkette der Batterie wieder zugeführt werden kann. In den realen CADC-Fahrzyklen wird über die Bremsleistung der elektrischen Maschine im Generatorbetrieb hinaus auch die Bremsleistung der mechanischen Bremsen benötigt, um das Fahrzeug wie gefordert zu verzögern. Die durch die mechanischen Bremsen abgeführte Energie wird in Wärme umgewandelt und an die Umgebung abgegeben, wodurch sie dem Antrieb des Fahrzeugs nicht mehr zur Verfügung steht.

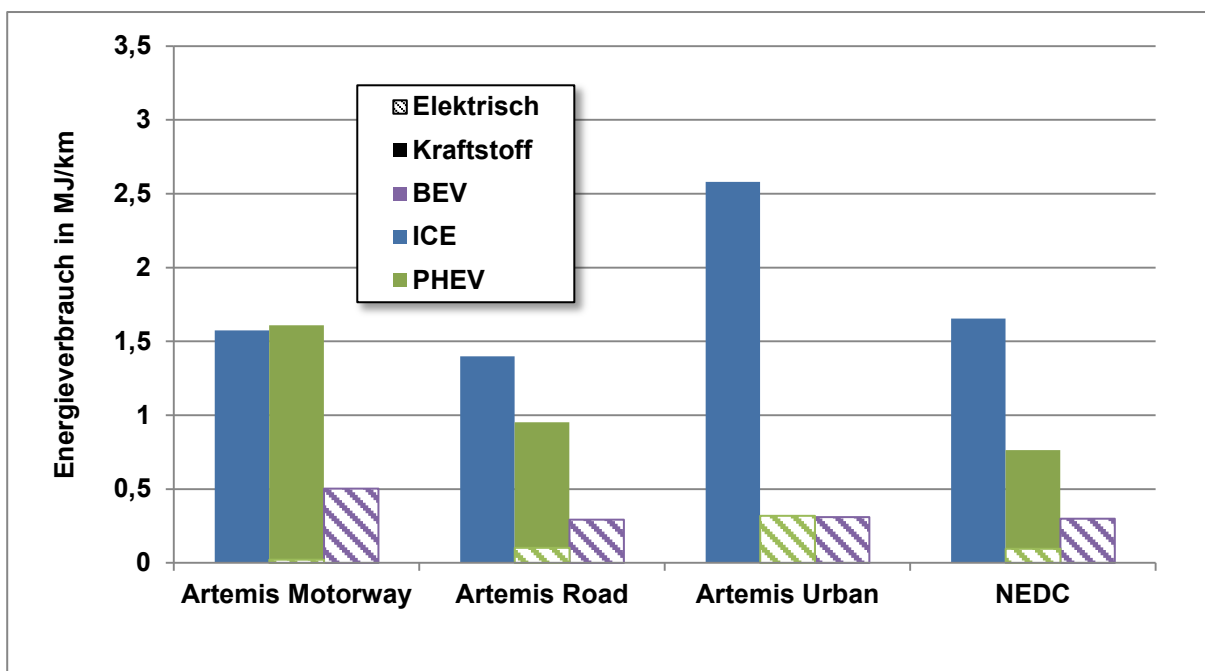


Abb. 4-72 Endenergieverbrauch der Basisfahrzeuge in den unterschiedlichen Fahrzyklen

Ebenso können deutliche Unterschiede in den Auswirkungen verschiedener technologischer und konzeptioneller Maßnahmen auf den Energieverbrauch zwischen den Fahrzyklen identifiziert werden. Bei einem batterieelektrischen Fahrzeug ändert sich bei einer Variation der Fahrzeugmasse um 21 % der spezifische Energieverbrauch zwischen 3 % und 16 %. Den geringsten Einfluss der Fahrzeugmasse auf den spezifischen Energieverbrauch findet man hier im Autobahnzyklus der CADC-Zyklen (CADC Motorway). Da dieser im Vergleich zu den anderen Zyklen ein gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil aufweist, ist der Bedarf an Energie für das Beschleunigen des Fahrzeugs auch nicht so hoch. Es wird aufgrund der hohen

durchschnittlichen und maximalen Geschwindigkeit mehr Energie benötigt, um die Fahrwiderstände, insbesondere die aerodynamischen Widerstände, zu überwinden. Großer Einfluss auf den Energieverbrauch, der eine Erhöhung oder Verringerung der Fahrzeugmasse zur Folge hat, kann im innerstädtischen CADC-Zyklus ermittelt werden. Durch das häufige Beschleunigen und Verzögern wird viel Beschleunigungsenergie benötigt. Zwar hat das batterieelektrische Fahrzeug die Möglichkeit, beim Verzögern einen Teil der Beschleunigungsenergie mittels Rekuperation wieder zurückzugewinnen, allerdings sind die Verzögerungen im CADC Urban derart hoch, dass die Bremsleistung der elektrischen Maschine im Generatorbetrieb nicht mehr ausreicht, um das Fahrzeug wie gewünscht abzubremsen und die mechanischen Bremsen zur Unterstützung hinzugezogen werden müssen. Der NEDC und der CADC Road haben in etwa den gleichen Einfluss bei einer Variation der Fahrzeugmasse auf den spezifischen Energieverbrauch.

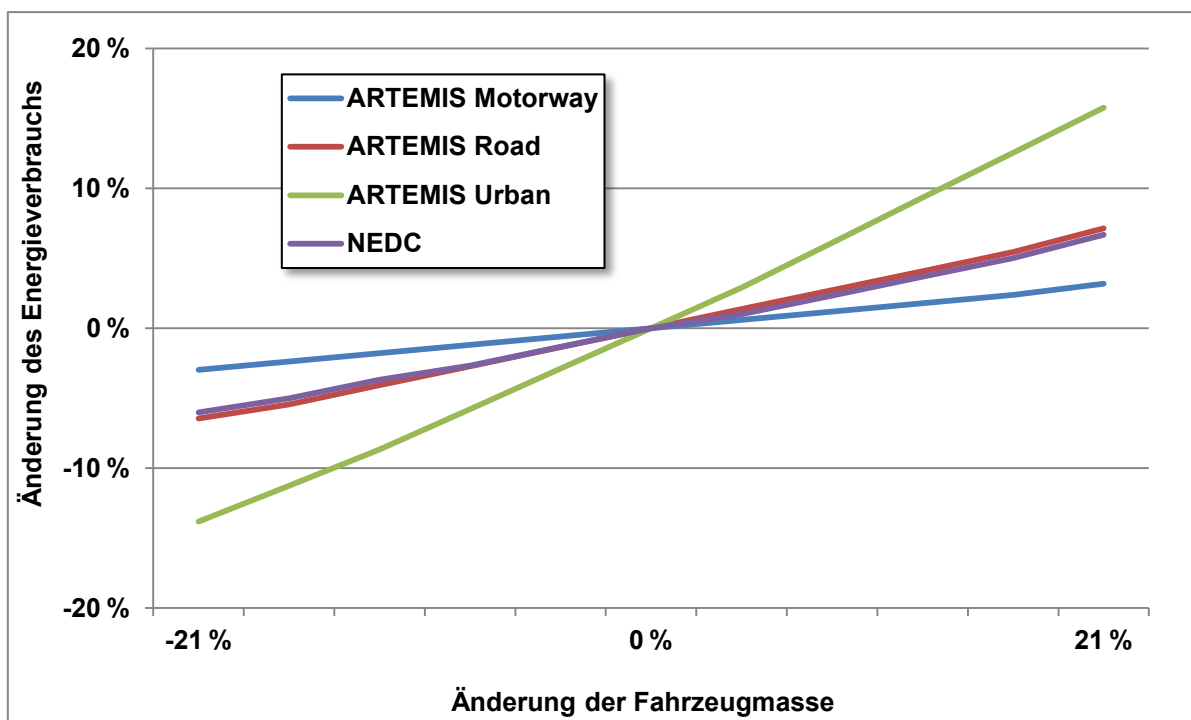


Abb. 4-73 Änderung des Endenergieverbrauchs des BEV durch Änderung der Fahrzeugmasse

Ein ähnliches Ergebnis bei der Untersuchung des relativen Einflusses der Fahrzeugmassenänderung auf den spezifischen Energieverbrauch wie beim BEV erhält man für den PHEV. Durch den Anteil des Verbrauchs an Ottokraftstoff beim PHEV – außer im innerstädtischen CADC – unterscheidet sich allerdings der Einfluss auf die absolute Änderung des Energieverbrauchs gegenüber dem BEV (Abb. 4-72).

Beim konventionellen Fahrzeug zeigen sich insofern abweichende Ergebnisse, als die unterschiedlichen Fahrzyklen keinen intensiven Einfluss haben (Abb. 4-75). Bei konventionellen Fahrzeugen im innerstädtischen Fahrzyklus fällt der Einfluss sowohl auf die relative als auch auf die absolute Änderung des Energieverbrauchs am größten aus. Dies ist insbesondere wieder auf die häufigen Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge zurückzuführen, wobei im Gegensatz zum BEV und zum PHEV das konventionelle Fahrzeug nicht die Möglichkeit hat, Energie beim Bremsen mittels Rekuperation zurückzugewinnen, wodurch der absolute Verbrauch deutlich höher ist.

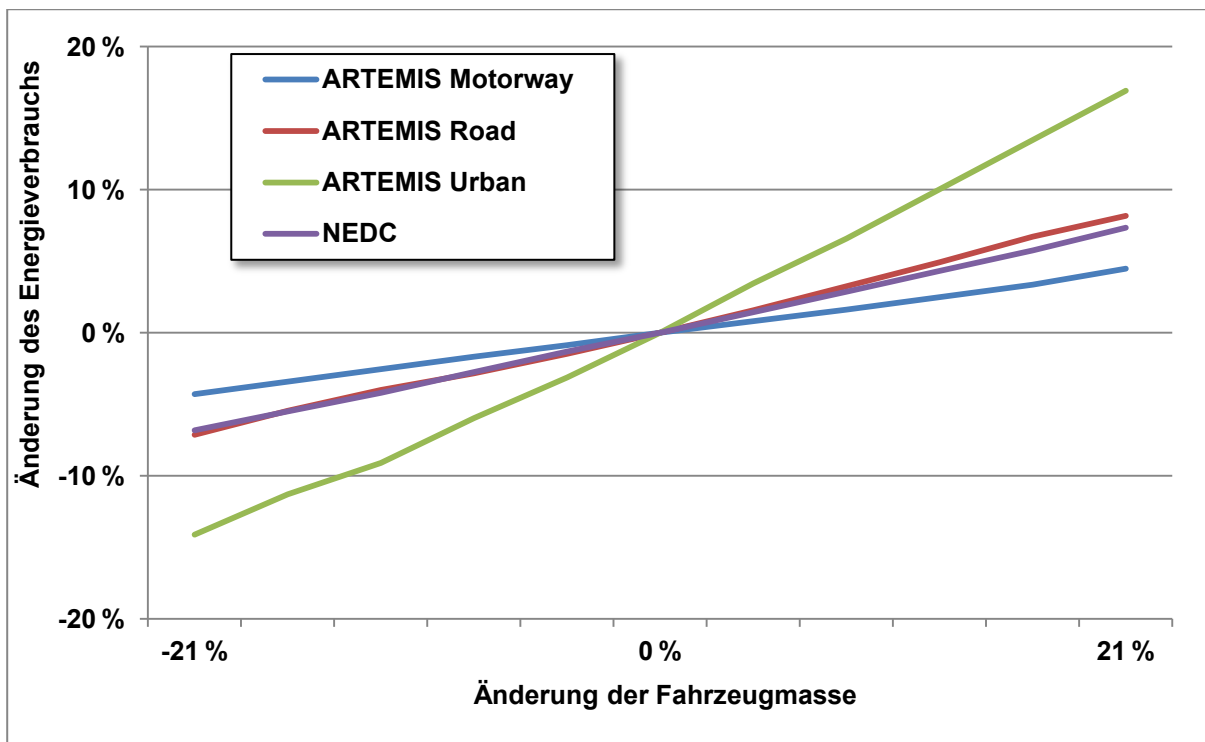


Abb. 4-74 Änderung des Energieverbrauchs des PHEV durch die Änderung der Fahrzeugmasse

Im Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, der über die verschiedenen Übersetzungsstufen eines Schaltgetriebes sowie die notwendigen Verteilerge triebe seine Leistung an eine der beiden Achsen liefert, gibt es bei batterieelektrischen Fahr zeugen verschiedene Möglichkeiten, die elektrische(n) Maschine(n) in den Antriebsstrang einzubinden. Die Maschinen können an verschiedenen Positionen im Fahrzeug unterge bracht und im Antriebsstrang integriert werden, z. B. in den Rädern integriert (Radnabenmo toren), in direkter Nähe des Rads über eine kurze Achse an eines der Räder angebunden (radnahe Motoren), direkt auf einer der Antriebsachsen sitzend (Achsmotoren) sowie ähnlich dem Verbrennungsmotor bei konventionellen Fahrzeugen an zentraler Stelle im Fahrzeug untergebrachte und über ein Getriebe mit den Rädern verbundene (Zentralmotor) (Hofmann 2010). Insbesondere bei Zentral- und Achsmotoren können diverse Übersetzungen und zum Teil sogar Schaltgetriebe zum Einsatz kommen (Trechow 2012). Die vorliegenden Untersu chungen setzen ein BEV mit einer festen Getriebeübersetzung in den Simulationen voraus. Das Modell des PHEV ist über das Getriebe des Verbrennungsmotors mit einem schaltbaren Getriebe ausgerüstet. Angesichts der variierenden Leistungsanforderungen der Fahrzyklen müssen die Getriebeübersetzungsänderungen jeweils spezifisch untersucht werden. In der Ausgangskonfiguration besitzt das Getriebe ein Übersetzungsverhältnis von 3:1. Für die Un tersuchung des Einflusses der Getriebeübersetzung wird für die Vergleichssimulationen ein Verhältnis von 5:1 verwendet. Durch die größere Übersetzung nimmt bei identischem Fahr zyklus die Drehzahl der elektrischen Maschine zu.

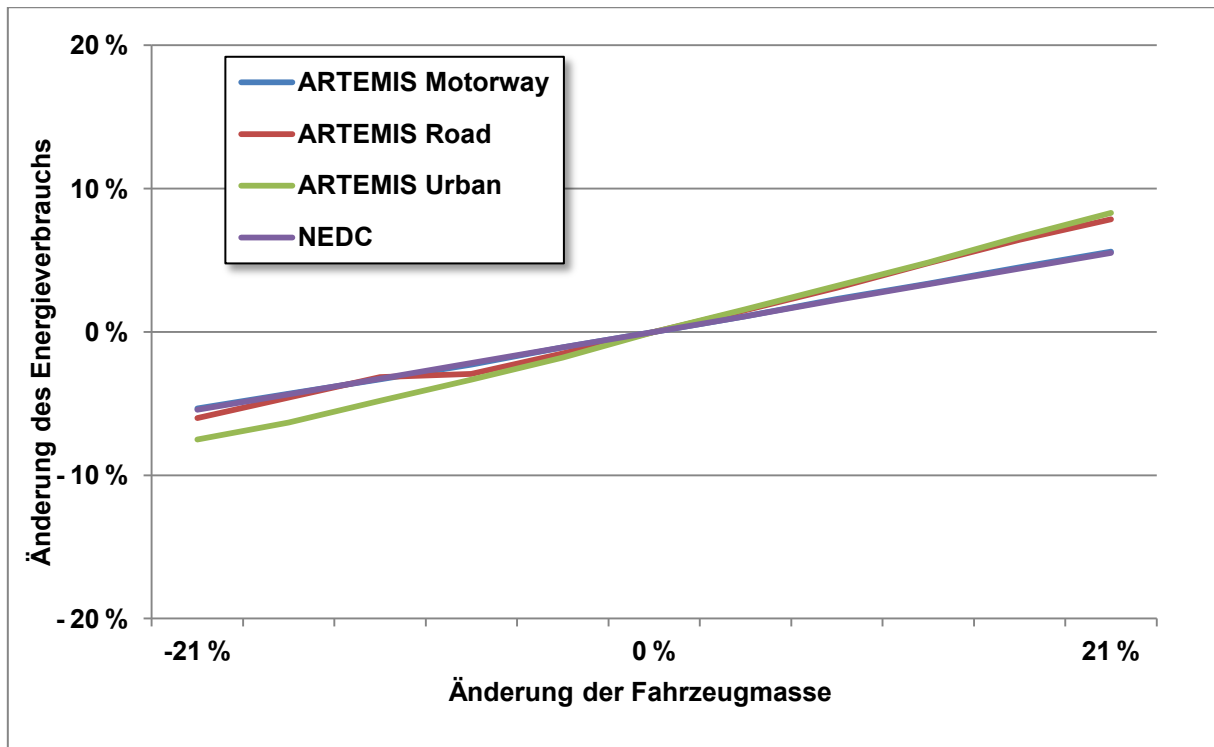


Abb. 4-75 Änderung des Endenergieverbrauchs des ICE durch Änderung der Fahrzeugmasse

Abb. 4-77 illustriert das Effizienzkennfeld der verwendeten elektrischen Maschine in der Basiskonfiguration – überlagert mit den Betriebspunkten für eine Fahrt durch den CADCMotorway-Zyklus. Gut zu erkennen ist, dass die Leistung der elektrischen Maschine in dieser Konfiguration in den Betriebspunkten (Drehzahl und Leistung) mit hoher Leistungsanforderung recht gut ausgenutzt und in einigen der Betriebspunkte die elektrische Maschine im Überlastbereich (oberhalb der gestrichelten Linie) betrieben werden muss. Dieser Bereich ist in der Regel nur für begrenzte Phasen nutzbar, da es sonst zu einem Überhitzen der Maschine kommen kann, wodurch die Leistungselektronik und, bei permanent-erregten elektrischen Maschinen, die Magneten beschädigt werden können. Abb. 4-77 verdeutlicht auch, dass das Fahrzeug in dieser Konfiguration eine höhere Maximalgeschwindigkeit erreichen kann, da an den Punkten mit maximaler Drehzahl, die den Betriebspunkten bei der höchsten gefahrenen Geschwindigkeit entsprechen, neben einer ausreichenden Drehzahlreserve (in positiver x-Richtung) auch noch Leistungsreserven (in positiver y-Richtung) vorhanden sind. Im Zusammenspiel mit dem Effizienzkennfeld der Maschine zeigt sich, dass die Fahrt durch den CADCMotorway-Zyklus in dieser Konfiguration den Bereich, in dem die elektrische Maschine eine hohe Effizienz aufweist (grün), gut ausnutzt. Nur wenige der Betriebspunkte liegen in den ineffizienten (gelben und roten) Bereichen.

Die Veränderung der Getriebeübersetzung bewirkt, dass die Betriebspunkte bei gleichem Fahrzyklus in Richtung der höheren Drehzahl (in Richtung höherer Werte auf der x-Achse) sowie zu niedrigeren Momenten (in Richtung niedrigerer Werte auf der y-Achse) wandern (Abb. 4-78) und fast der gesamte Fahrzyklus ohne Nutzung des Überlastbereichs im Motorbetrieb durchfahren werden kann. Lediglich bei der Verzögerung des Fahrzeugs kommt es noch zur Nutzung des Überlastbereichs im Generatorbetrieb. Überdies resultiert aus der Verschiebung eine Verschlechterung des durchschnittlichen Wirkungsgrads, da deutlich mehr Betriebspunkte in den Bereichen mit einer geringeren Effizienz liegen. Daraus resultiert

der höhere Energieverbrauch in Abb. 4-76. Durch die weitestgehend vollständige Nutzung des zur Verfügung stehenden Drehzahlbereichs erreicht dieses Fahrzeug im CADC-Motorway-Zyklus schon fast seine Höchstgeschwindigkeit.

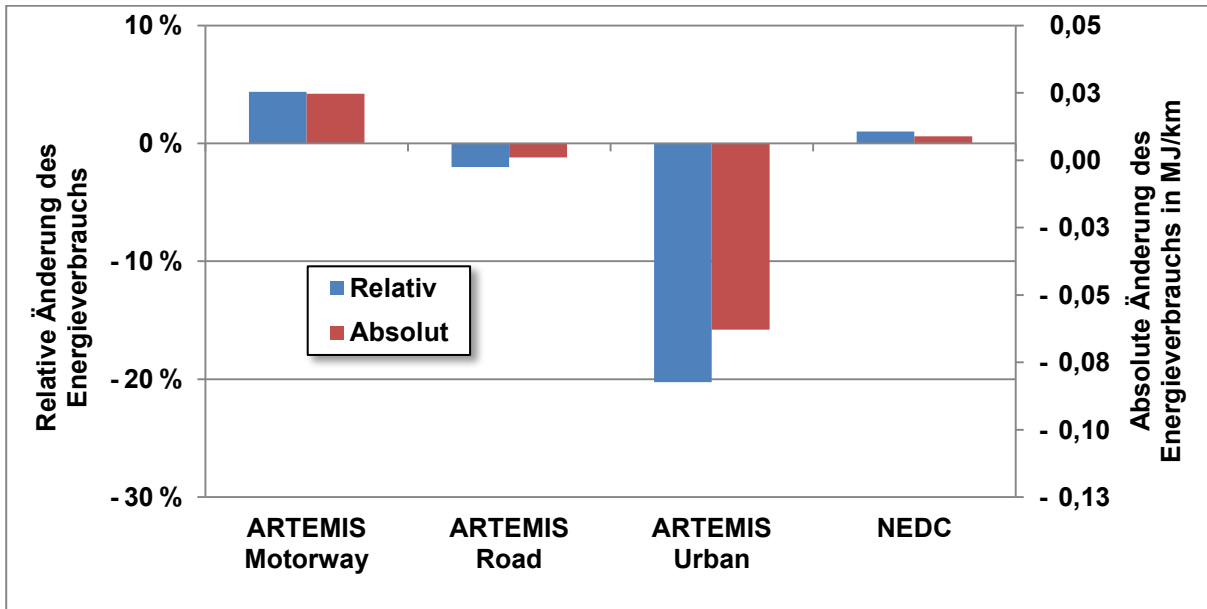


Abb. 4-76 Einfluss der Änderung der festen Getriebeübersetzung (von 3:1 auf 5:1) auf den Energieverbrauch des BEV

Zwar hat das Fahrzeug mit der größeren Getriebeübersetzung durch die Begrenzung der maximalen Drehzahl eine geringere Höchstgeschwindigkeit als das Fahrzeug mit der kurzen Übersetzung, allerdings stehen mehr Leistungsreserven über den gesamten Fahrzyklus zur Verfügung, wodurch ein besseres Beschleunigungsverhalten zu erwarten ist.

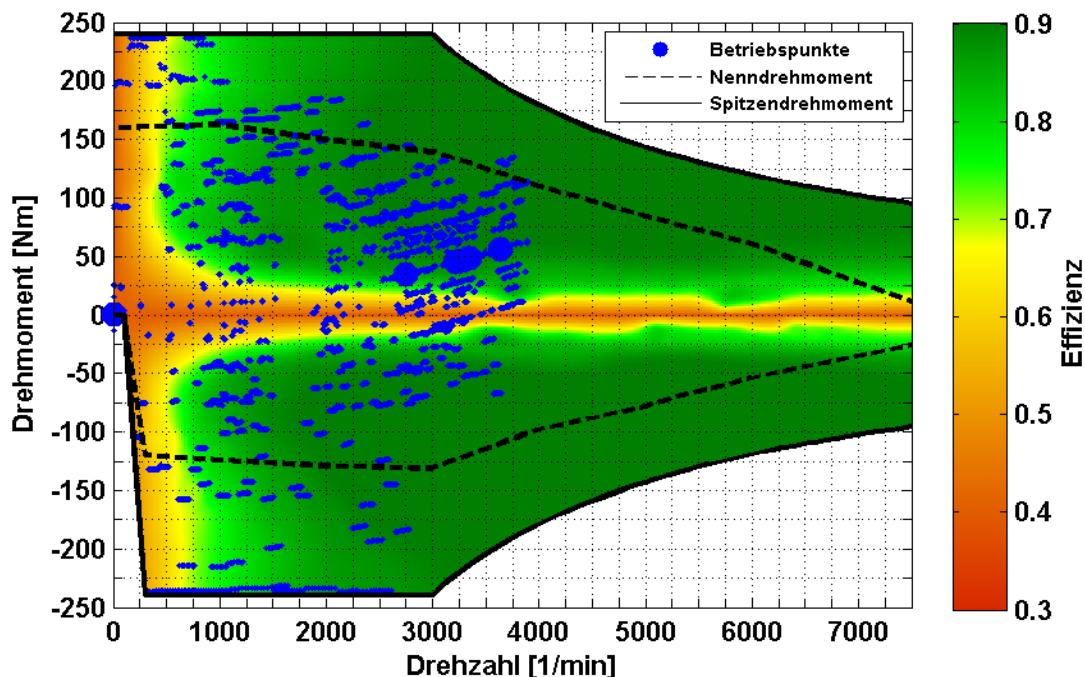


Abb. 4-77 Betriebspunkte des BEV (Getriebeübersetzung $i=3$) bei simulierter Fahrt durch den CADC Autobahn Zyklus aufgetragen auf das Effizienzkennfeld der elektrischen Maschine

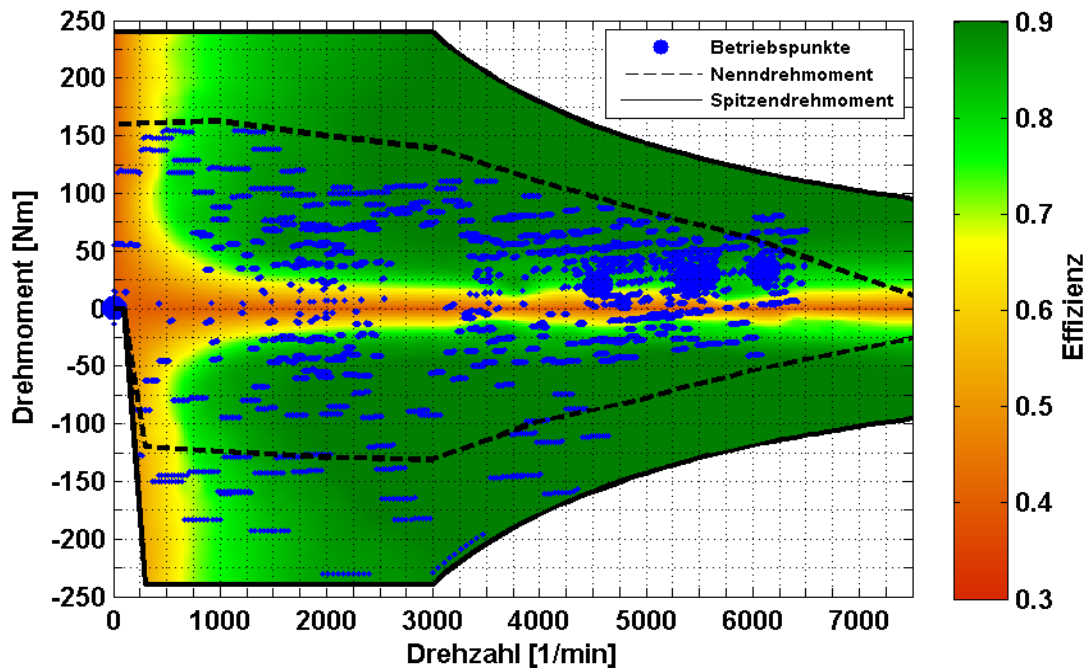


Abb. 4-78 Betriebspunkte des BEV (Getriebeübersetzung $i = 5$) bei simulierter Fahrt durch den CADC-Motorway-Zyklus aufgetragen auf das Effizienzfeld der elektrischen Maschine

Ein anderes Bild zeigt sich für den CADC-Urban-Zyklus (Abb. 4-79). Bei der Basiskonfiguration mit einem Übersetzungsverhältnis von 5:1 liegen die Betriebspunkte in einem niedrigen Drehzahlbereich (links), viele also in den ineffizienten Bereichen (gelb und rot), was eine niedrige durchschnittliche Effizienz der elektrischen Maschine nach sich zieht. Zudem wird die Maschine in dieser Konfiguration häufig im Überlastbereich betrieben, zum Teil sogar mit für die entsprechende Drehzahl maximaler Leistung im Motorbetrieb (obere, durchgezogene Linie).

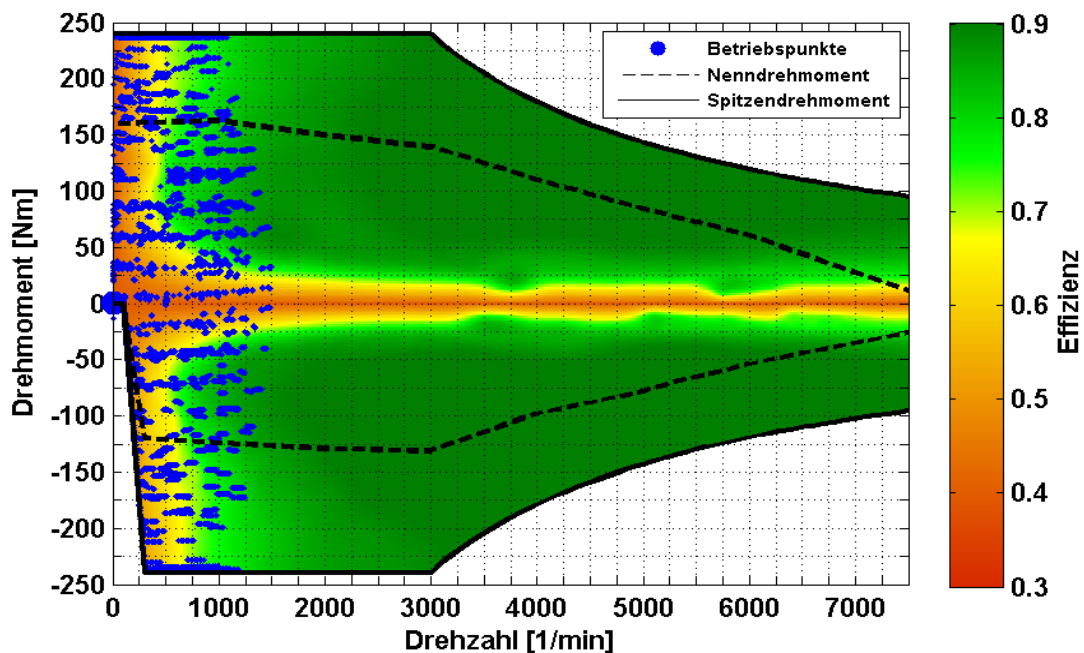


Abb. 4-79 Betriebspunkte des BEV (Getriebeübersetzung $i = 3$) bei simulierter Fahrt durch den CADC-Urban-Zyklus aufgetragen auf das Effizienzfeld der elektrischen Maschine

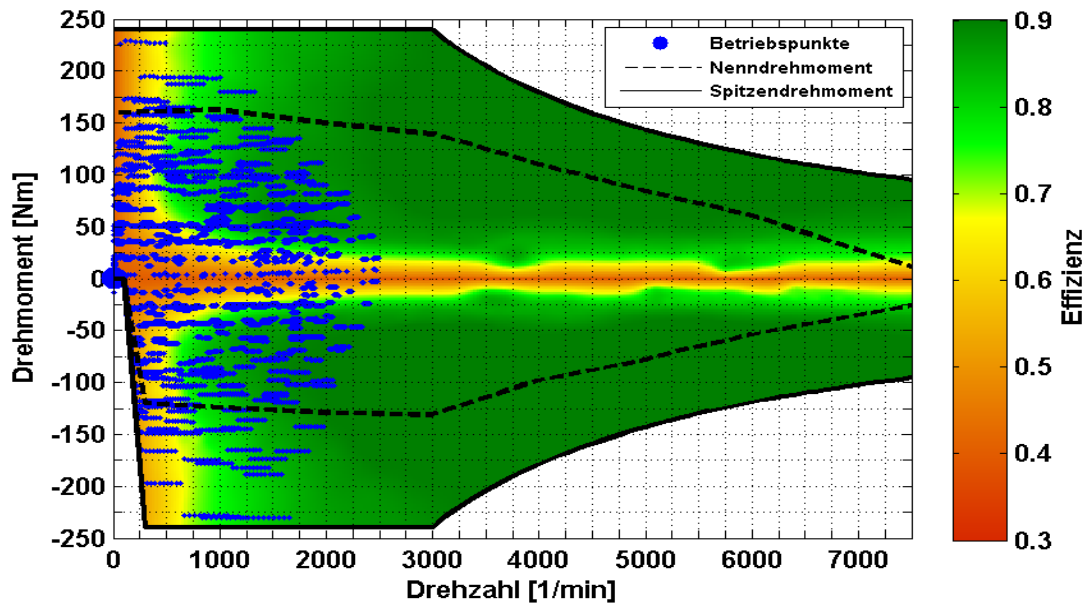


Abb. 4-80 Betriebspunkte des BEV (Getriebeübersetzung $i = 5$) bei simulierter Fahrt durch den CADC-Urban-Zyklus aufgetragen auf das Effizienzkennfeld der elektrischen Maschine

Durch die Veränderung der Getriebeübersetzung bewegen sich die Betriebspunkte der elektrischen Maschine wieder in Richtung höherer Drehzahl und niedrigeren Moments (Abb. 4-80). Auch im CADC-Urban-Zyklus wird die Maschine mit dieser Konfiguration weniger im Überlastbereich betrieben. Im Gegensatz zum CADC-Motorway-Zyklus bewirkt der Eingriff in das Getriebe jedoch eine Effizienzsteigerung. Durch die Verschiebung zu höheren Drehzahlen befinden sich deutlich mehr Betriebspunkte in den Bereichen mit höherer Effizienz (grüne Bereiche, Abb. 4-80). Daraus folgt auch eine Reduzierung des Energieverbrauchs (Abb. 4-76). Auch kann die Fahrdynamik durch das größere Drehmoment, das bei einer größeren Übersetzung am Rad zur Verfügung steht, verbessert werden. Jedoch ist wie beschrieben die Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs niedriger.

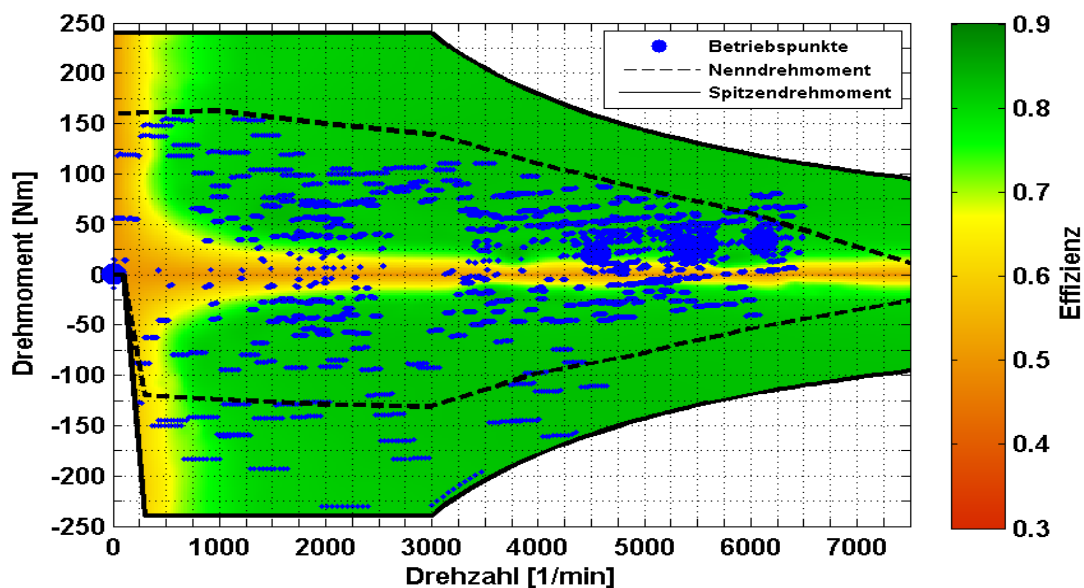


Abb. 4-81 Betriebspunkte des BEV (Getriebeübersetzung $i = 5$) bei simulierter Fahrt durch den CADC-Motorway-Zyklus aufgetragen auf das modifizierte Effizienzkennfeld der elektrischen Maschine mit abgesenktem Spitzenwirkungsgrad

Die Auswirkungen von Maßnahmen an den elektrischen Komponenten batterie- und hybrid-elektrischer Fahrzeuge sind im folgenden Abschnitt analysiert. Ein synthetisches Effizienzkennfeld, das aus Eingriffen resultieren kann, die die Effizienz in den Nebenlastbereichen verbessern, aber den Spitzenwirkungsgrad reduzieren, zeigt beispielhaft Abb. 4-81.

Im Gegensatz dazu zeigt Abb. 4-82 beispielhaft ein Effizienzkennfeld mit angehobenem Spitzenwirkungsgrad, allerdings zulasten der Effizienz in den Nebenlastbereichen. Wie gezeigt müssen bei der Bewertung einzelner Maßnahmen verschiedenen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. In diesem Fall ist es wichtig, die Maßnahmen unter Berücksichtigung des Fahrzyklus einzuordnen. Abb. 4-83 illustriert absolute und relative Änderung des spezifischen Energieverbrauchs für die betrachteten Fahrzyklen durch die Änderung des Effizienzverhaltens der elektrischen Maschine. Hierbei wird wieder jeweils von der Basiskonfiguration mit einer Getriebeübersetzung von 1:3 ausgegangen. Bei der Steigerung der Effizienz im Nebenlastbereich und einem gleichzeitigen Reduzieren des Spitzenwirkungsgrads folgt ein höherer Energieverbrauch im CADC-Motorway- und CADC-Urban-Zyklus. Auch im Neuen Europäischen Fahrzyklus kommt es zu einer Erhöhung des spezifischen Energieverbrauchs. Lediglich im CADC-Urban-Zyklus kann eine Verringerung identifiziert werden. Die Erhöhung des Spitzenwirkungsgrads, wie im Rahmen der Untersuchungen angenommen, hat zur Folge, dass sich im CADC-Urban- und CADC-Road-Zyklus sowie im NEDC der Energieverbrauch erhöht, da die Effizienz in den Nebenlastbereichen schlechter ausgeführt ist. Da im CADC-Motorway-Zyklus ein größerer Teil der Lastpunkte im Bereich der höheren Leistungen und höheren Motordrehzahlen zu finden ist, kommt es hier zu einer leichten Verbesserung.

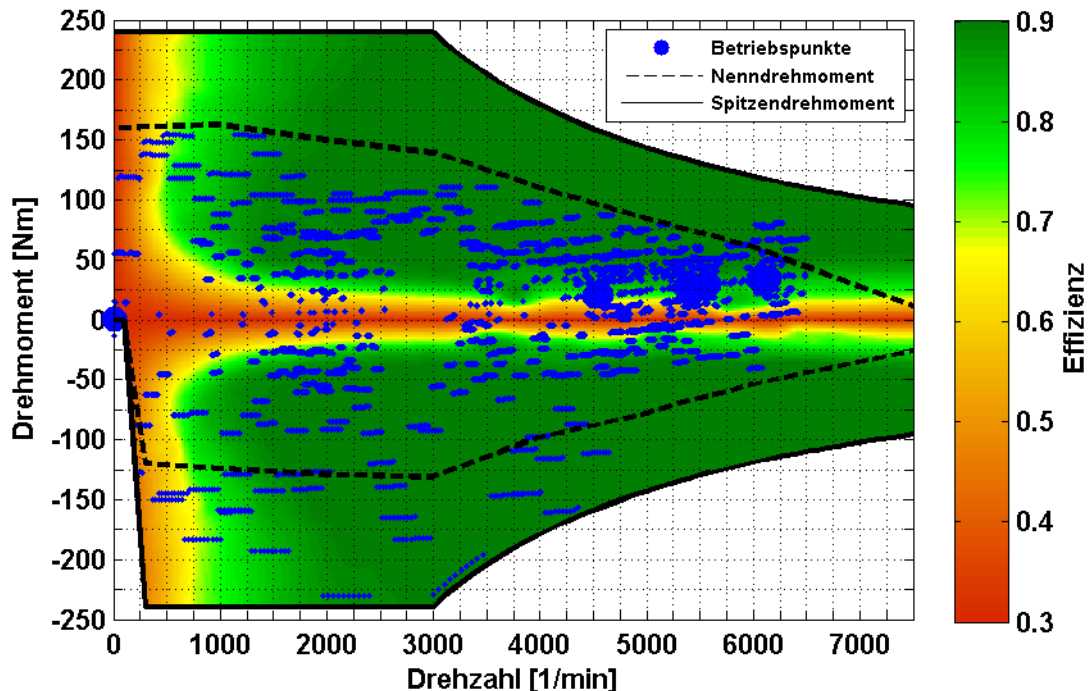


Abb. 4-82 Betriebspunkte des BEV (Getriebeübersetzung $i = 5$) bei simulierter Fahrt durch den CADC-Motorway-Zyklus aufgetragen auf das modifizierte Effizienzkennfeld der elektrischen Maschine mit angehobenem Spitzenwirkungsgrad

Abb. 4-83 veranschaulicht, dass die meisten hier vorgenommenen Maßnahmen zu einer Verschlechterung der durchschnittlichen Effizienz und damit zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs führen. Das legt die Annahme nahe, dass die Konfiguration der elektrischen An-

triebseinheit für diese Fahrzyklen schon gut ist. Insbesondere führt im NEDC sowie im CADC-Road-Zyklus ein Eingreifen zu einer Erhöhung des spezifischen Energieverbrauchs. Jedoch könnten Maßnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrads über den gesamten Drehzahl- und Leistungsbereich zu einer generellen Energieverbrauchssenkung führen.

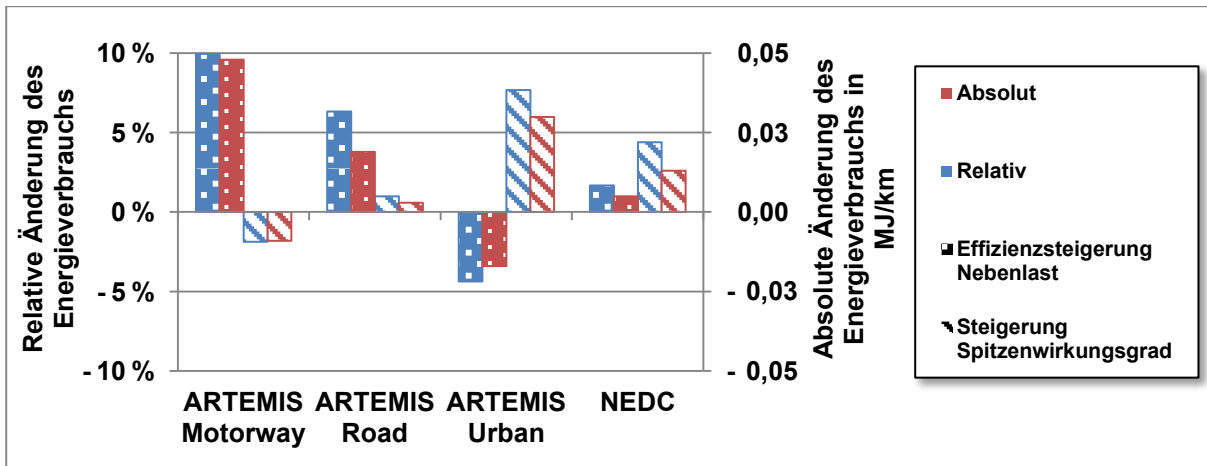


Abb. 4-83 Absolute und relative Änderung des spezifischen Energieverbrauchs beim BEV durch Eingriffe in die elektrische Maschine

Ein anderes Bild ergibt sich bei der Untersuchung des PHEV. Hier muss die elektrische Antriebseinheit nicht für die gesamte Traktion sorgen, da die Fahrzyklen, insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten, im Zusammenspiel von Verbrennungsmotor und elektrischer Maschine durchfahren werden. Zudem ist wie vorangegangen beschrieben die elektrische Maschine beim PHEV im Gegensatz zum untersuchten BEV über ein schaltbares Getriebe in den Antriebsstrang eingebunden.

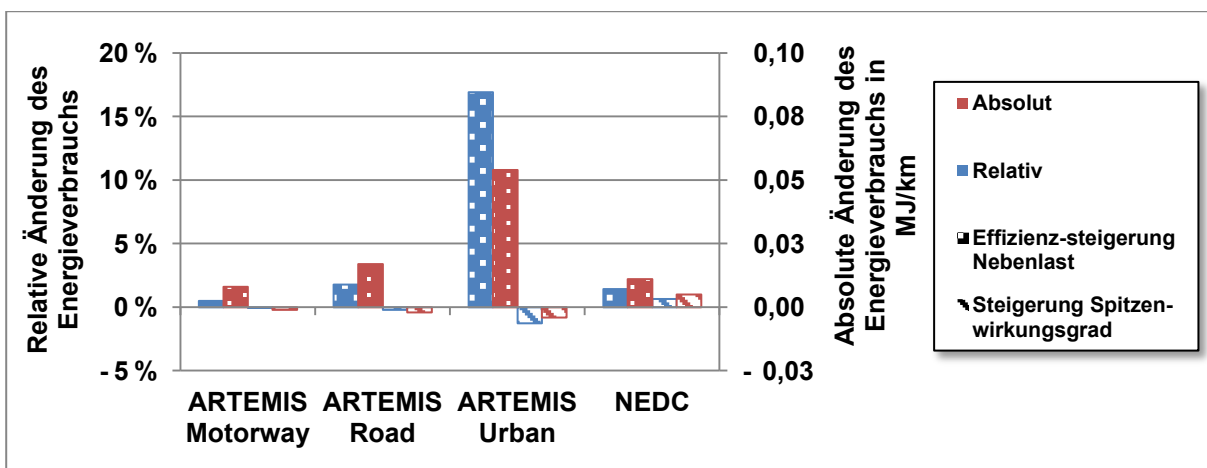


Abb. 4-84 Absolute und relative Änderung des spezifischen Energieverbrauchs beim PHEV durch Eingriffe in die elektrische Maschine

Die Auswirkungen der Eingriffe auf den spezifischen Energieverbrauch des PHEV in den Fahrzyklen betreffend zeigt sich, dass eine Steigerung der Nebenlasteffizienz zu einer Zunahme des Energieverbrauchs führt und bei Erhöhung des Spitzenwirkungsgrads der Energieverbrauch leicht gesenkt werden kann (Abb. 4-84). Zumindest trifft das für die realen Fahrzyklen zu. Bei zugrunde liegendem NEDC führen beide Maßnahmen zu einer leichten

Zunahme des spezifischen Energieverbrauchs. Besonders deutlich sind die Auswirkungen im CADC-Urban-Zyklus. Hier führt die mit einer Verschlechterung des Spitzenwirkungsgrads einhergehende Verbesserung der Nebenlasteffizienz zu einer Zunahme des spezifischen Energieverbrauchs um 17 % gegenüber der Ausgangskonfiguration. In den übrigen Zyklen ist die Änderung jeweils kleiner als 5 %.

Die Auswirkungen auf den Energieverbrauch lassen sich wiederum gut am Kennfeld und den darüber aufgetragenen Betriebspunkten erklären. Durch das schaltbare Getriebe kann die elektrische Maschine im CADC-Motorway-Zyklus in vielen Betriebspunkten in sehr effizienten Bereichen arbeiten (Abb. 4-85). Zwar gibt es auch eine Häufung der Betriebspunkte bei niedrigen Drehmomenten, jedoch ist hier auch die Leistung recht gering, wodurch diese Betriebspunkte für den Energieverbrauch nicht so schwer ins Gewicht fallen. Dadurch bewirkt eine Verbesserung des Spitzenwirkungsgrads eine Verbesserung der durchschnittlichen Effizienz, was in einem geringeren Energieverbrauch mündet. Auf der anderen Seite verursacht eine Absenkung des Spitzenwirkungsgrads trotz effizienterer Gestaltung der Nebenlastbereiche eine deutliche Verschlechterung.

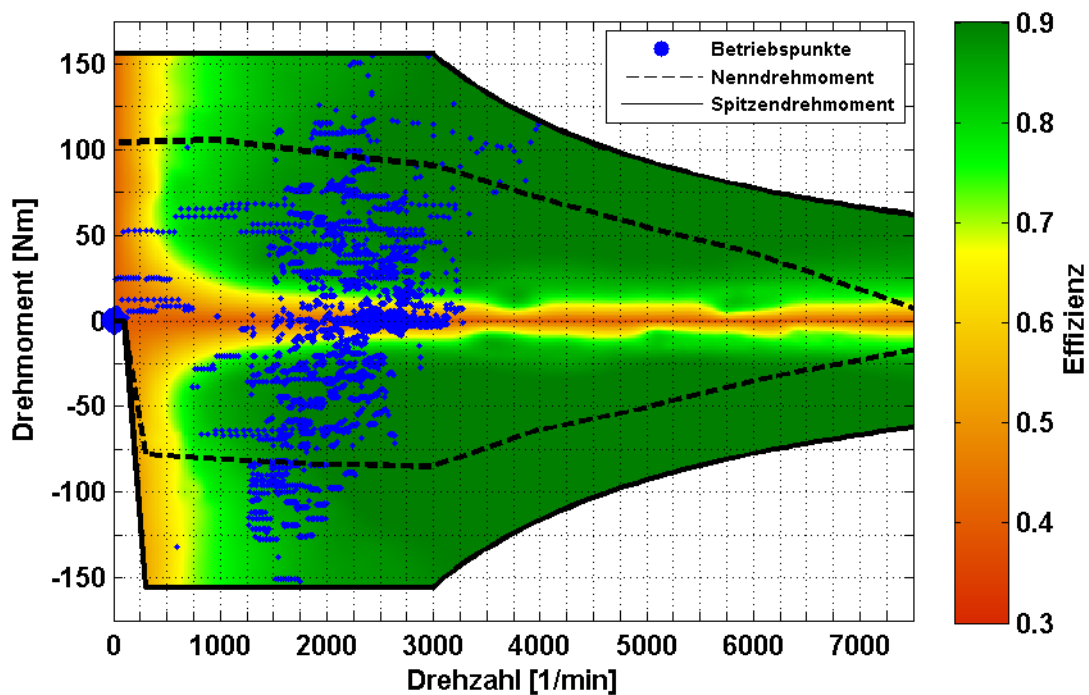


Abb. 4-85 Betriebspunkte des PHEV bei simulierter Fahrt durch den CADC-Motorway-Zyklus aufgetragen auf das Effizienzkennfeld der elektrischen Maschine

Ein anderes Bild zeigt sich bei der Auswertung der elektrischen Maschine des PHEV im CADC-Urban-Zyklus (Abb. 4-86). Da hier viel bei niedrigen Geschwindigkeiten gefahren wird, sind Betriebspunkten bei niedrigen Drehzahlen im Nebenlastbereich deutlich häufiger als im Autobahnzyklus. Der Effekt der Verbesserung der Nebenlastbereiche kann somit die Verschlechterung der Spitzenwirkungsgradeffizienz ein Stück weit ausgleichen. Jedoch gelingt das nicht vollständig. Auf der anderen Seite stellt sich in diesem speziellen Fall auch bei einer Verbesserung des Spitzenwirkungsgrads bei gleichzeitiger Verschlechterung der Nebenlastbereiche eine Zunahme des Energieverbrauchs ein, was jedoch nur für den NEDC zutrifft.

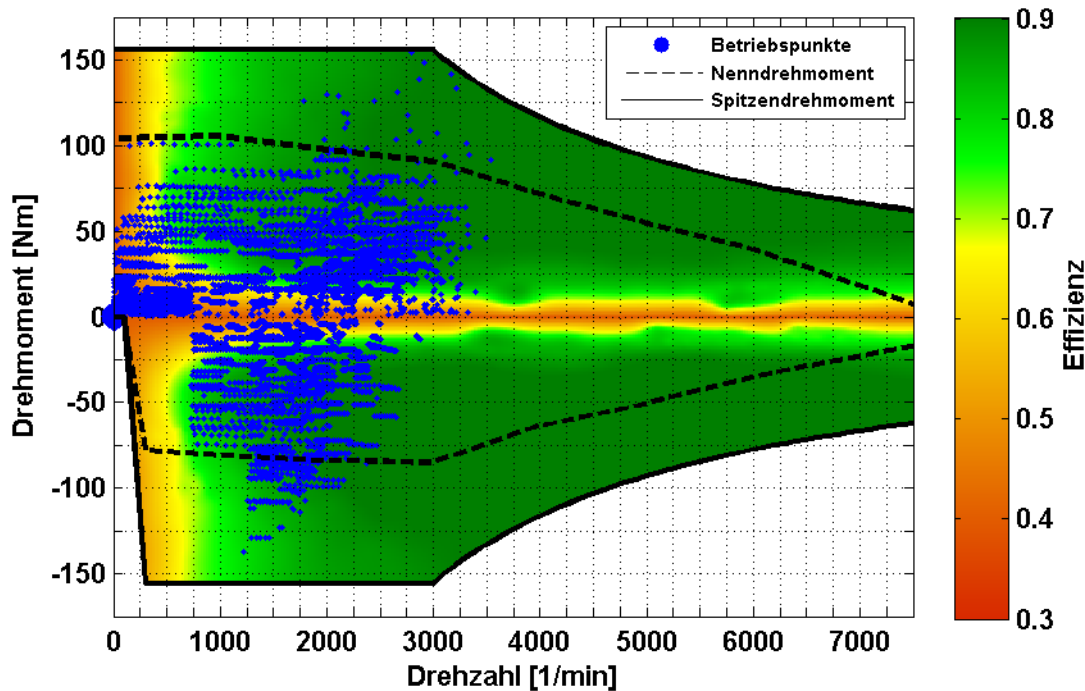


Abb. 4-86 Betriebspunkte des PHEV bei simulierter Fahrt durch den CADC-Urban-Zyklus aufgetragen auf das Effizienzfeld der elektrischen Maschine

Die Untersuchungen zeigen, dass bei Eingriffen in den Antriebsstrang eine ganzheitliche Betrachtung – sowohl des Gesamtsystems „Fahrzeug“ als auch unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen, in diesem Fall Fahrzyklen – notwendig ist, um belastbare Aussagen über die Wirkung der Technologien tätigen zu können. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn durch die Maßnahmen zwar bestimmte Bereiche des Kennfelds verbessert werden können, andere Bereiche aber in ihrer Effizienz Einbußen hinnehmen müssen.

Für die BEV legen die Ergebnisse die Schlussfolgerung nahe, dass der Einsatz schaltbarer Getriebe sinnvoll ist, da dann in unterschiedlichsten Fahrprofilen ein größerer Anteil der Betriebspunkte in den effizienten Bereichen der elektrischen Maschine gefahren werden kann, ohne die elektrische Antriebseinheit auf ein Einsatzgebiet auslegen zu müssen. Zwar sind mit dem Einsatz von Getrieben höhere Kosten und auch ein Mehrgewicht verbunden, jedoch sind die positiven Effekte nach Aussage von Experten intensiver, sodass in vielen Fällen der Einsatz von Schaltgetrieben in Betracht gezogen werden sollte (Treichow 2012).

4.4 Auswirkungen geänderter Rahmenbedingungen auf den deutschen Neuwagenmarkt

M. Klötzke (DLR), B. Frieske (DLR)

Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, Deutschland zum Leitmarkt und Leitanbieter für Elektromobilität zu entwickeln (BMVBS 2011). Leitmarkt bedeutet, dass Deutschland im internationalen Vergleich zu einem zentralen Markt für Elektrofahrzeuge und dazugehörige Infrastruktur werden soll. Derzeit nehmen diese Rollen insbesondere Kalifornien in den USA sowie Japan ein (siehe Abschnitt 5.3.4). Um das zu erreichen, müssen in Deutschland signifikante Stückzahlen von Elektrofahrzeugen abgesetzt werden können. Nur so wird Deutschland für die Hersteller so bedeutend, dass strategische Entscheidungen entsprechend beeinflusst werden. Zu diesem Zweck wurden steuerliche Anreize für Elektrofahrzeuge geschaffen und eine umfassende Forschungsförderung auf den Weg gebracht (BMVBS 2011). Darüber hinaus soll den Kommunen in Deutschland mit dem im September 2014 auf den Weg gebrachten Elektromobilitätsgesetz die Möglichkeit gegeben werden, Elektrofahrzeugen Privilegien im Straßenverkehr, wie Nutzung von Busspuren oder gebührenfreies Parken, einzuräumen (BMVI 2014a).

Seit 2008 können steigende Zulassungszahlen elektrifizierter Fahrzeuge in Deutschland beobachtet werden (vgl. Abschnitt 5.2.1). Einige Studien bemerken jedoch, dass das Niveau aktueller Verkaufszahlen und absoluter Zuwächse nicht ausreichen wird, um das Ziel, bis 2020 eine Millionen Elektrofahrzeuge im deutschen Fahrzeugbestand aufweisen zu können, zu erreichen (DLR 2013, Fraunhofer ISI 2013) und kommen zu dem Ergebnis, dass vielmehr monetäre Kaufanreize nötig wären. Bisher wurden alle Vorschläge, den Kauf von Elektrofahrzeugen im großen Stil finanziell zu bezuschussen, von der Bundesregierung abgelehnt (Bundesregierung 2014, BMVI 2014).

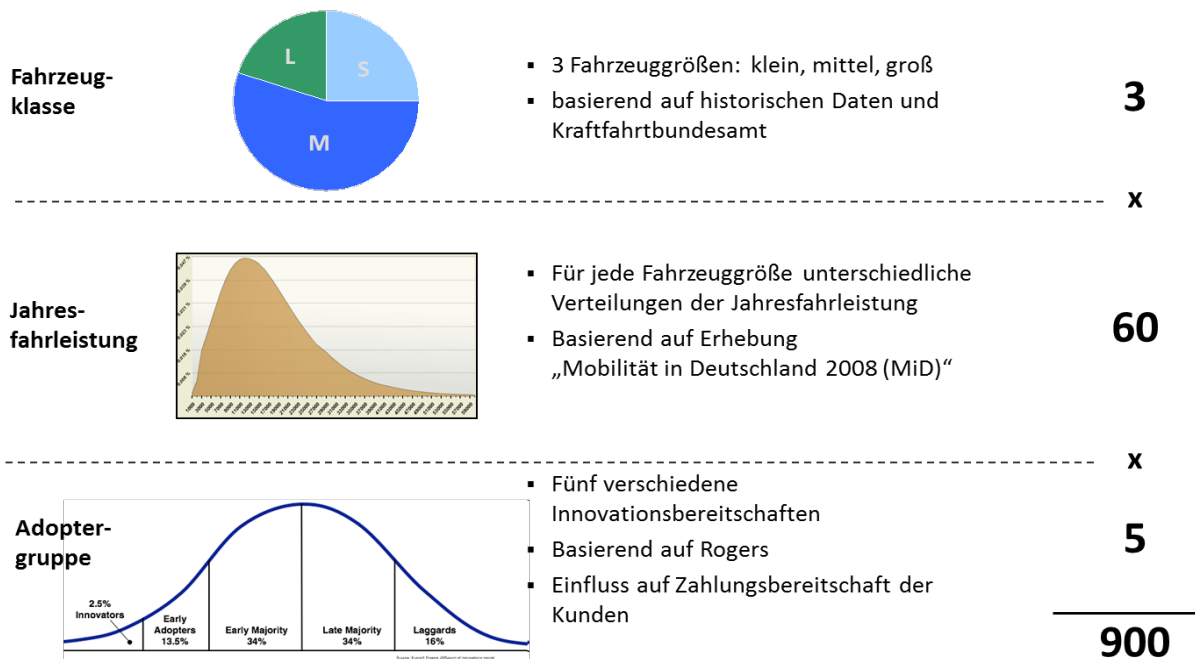


Abb. 4-87 Schematische Darstellung der Kundenmodellierung in Vector21

Vielmehr soll durch eine technologieorientierte Forschungsförderung erreicht werden, dass die Kosten für Elektrofahrzeuge, insbesondere für die Schlüsselkomponenten, sinken. Darüber hinaus sollen Elektrofahrzeuge für Kunden über eine Steigerung der Fahrzeugeffizienz attraktiver werden. Neben anderen sind dies die übergeordneten Ziele der Forschungsförderung hinsichtlich der Etablierung Deutschlands als Leitmarkt. Jedoch stellt sich die Frage, in welchem Umfang und Zeitraum die Kosten für Elektrofahrzeuge sinken können, insbesondere aber welche Auswirkungen das auf das Kaufverhalten der Kunden und damit die Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen haben wird. In den nachfolgenden Analysen sollen deshalb die Auswirkungen diverser Einflussfaktoren auf den deutschen Neuwagenmarkt eingeordnet werden.

Um entsprechende Einschätzungen zu liefern, werden mithilfe eines Fahrzeugszenariomodells verschiedene Szenarien untersucht. Dabei wird auf das etablierte, am DLR entwickelte und in zahlreichen Untersuchungen und Studien zum Einsatz gekommene Modell Vector21 zurückgegriffen (Mock 2010, Propfe et al. 2013, DLR 2013). Dieses Modell ermöglicht eine Simulation des Kaufverhaltens von Neuwagenkunden unter Berücksichtigung komplexer Rahmenbedingungen. Einerseits werden im Rahmen der Simulation Kundenprofile mit unterschiedlichen Eigenschaften, z. B. in der Jahresfahrleistung und Fahrzeuggröße (siehe Abb. 4-88) und besonderen Anforderungen an das Fahrzeug generiert. Sie unterscheiden sich in der Bereitschaft, für umweltfreundliche Fahrzeuge höhere Kosten in Kauf zu nehmen. Unter Kosten versteht man hierbei die Gesamtbesitzkosten, neben den Anschaffungskosten werden also auch Betriebskosten einbezogen (TCO, Total Costs of Ownership).

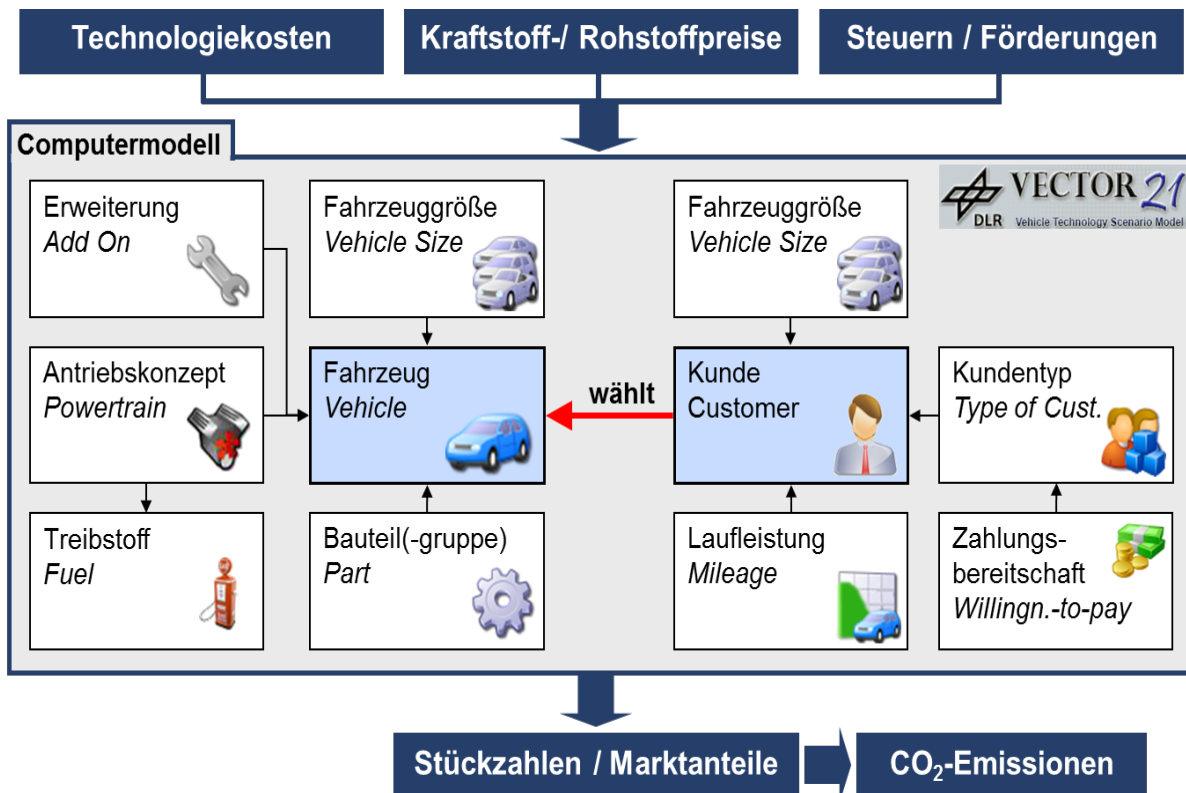


Abb. 4-88 Schematischer Aufbau des Kaufprozesses in Vector21

Quelle: DLR

Auf der anderen Seite werden in dem Modell Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebskonzepten und Treibstoffarten generiert und den Kunden angeboten (Abb. 4-88), wobei technologische und kostenseitige Entwicklungen der Fahrzeuge, genauer der Fahrzeugkomponenten, Berücksichtigung finden. Die Kaufentscheidung wird in einem modellierten Umfeld simuliert, wobei zu den Rahmenbedingungen zum Beispiel die Art der Kraftfahrzeugbesteuerung, die Entwicklung der Energiekosten oder der Ausbau der Lade- und Betankungsinfrastruktur zu zählen sind. Dem Kunden wird unterstellt, dass er das Fahrzeug kauft, das seine Anforderungen an ein Fahrzeug sowie die notwendige Infrastruktur erfüllt und die für ihn hinsichtlich der Gesamtkosten günstigste Variante darstellt. Wenn der Kunde bereit ist, einen Aufschlag bei den Gesamtkosten zu akzeptieren, wenn er ein umweltfreundliches Fahrzeug bekommen kann, entscheidet er sich für das umweltfreundlichste Fahrzeug, das im Rahmen seiner Zahlungsbereitschaft liegt (Abb. 4-89).

Die Fahrzeuge unterscheiden sich nach Größe bzw. Fahrzeugsegment sowie Antriebsstrangkzept, d. h., ihnen werden spezifische Energieverbräuche sowie Kosten der verbauten Komponenten zugewiesen. Bei der zukünftigen Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs (Abb. 4-90) findet das Potenzial zur Verbesserung und Weiterentwicklung von Fahrzeugtechnologien Anwendung, wie z. B. Leichtbautechnologien oder auch Downsizing. Für die Ermittlung der Fahrzeugkosten können Kostenverläufe herangezogen werden. Für die Szenarien werden darüber hinaus Annahmen zur Entwicklung der Energieträgerpreise und der politischen Rahmenbedingungen getroffen, die in allen Szenarien identisch sind. Auch für diese Angaben wird eine zeitliche Entwicklung unterstellt. Bezüglich der politischen Rahmenbedingungen wird davon ausgegangen, dass es, wie es aktuelle Gesetzgebung regelt, neben der Befreiung von E-Fahrzeugen von der Kraftfahrzeugsteuer in Deutschland keine monetären Kaufanreize geben wird.

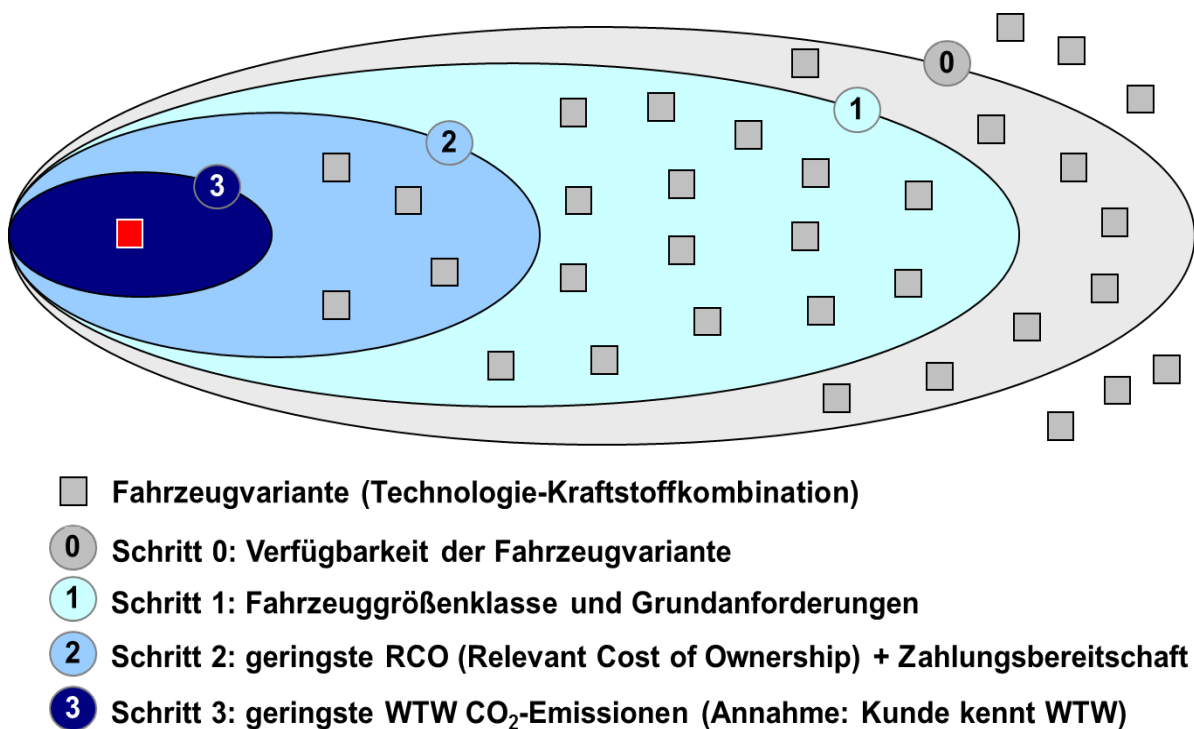


Abb. 4-89 Stufen der Kaufentscheidung des Kundenmodells von Vector21

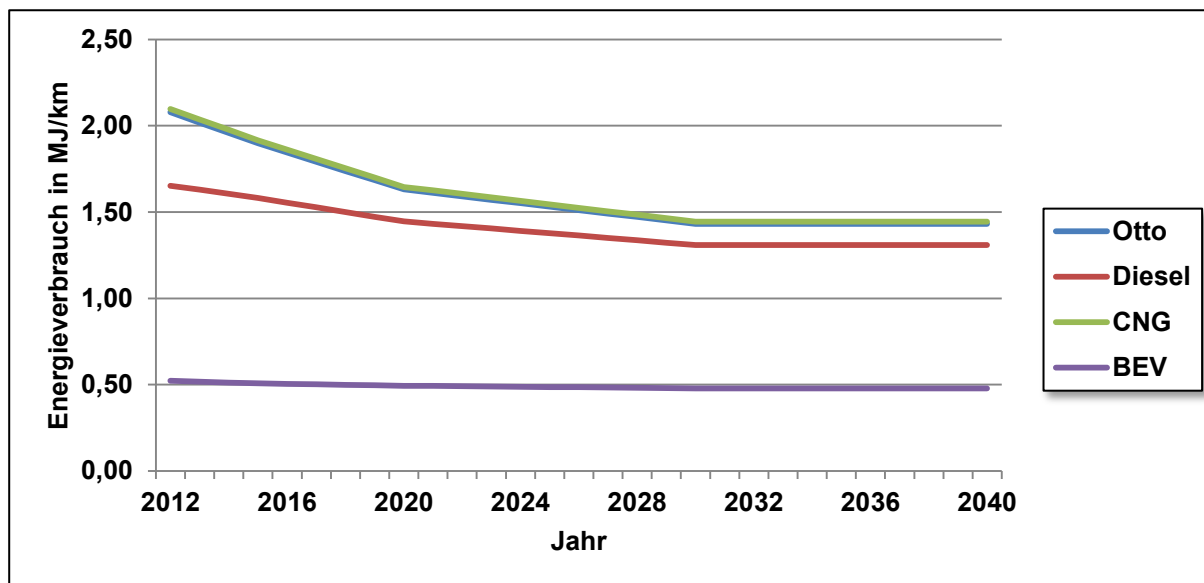


Abb. 4-90 Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs (nach Regelung 101 UN/ECE)

Der CO₂-Grenzwert liegt 2015 bei 130 g/km und 2020 bei 95 g/km. Diese Entwicklung wird fortgeschrieben, wodurch für 2030 Grenzwerte von 70 g/km und 2040 45 g/km erreicht werden. Die unterstellte Entwicklung der Energiepreise verdeutlicht Tab. 4-19. Bei der Entwicklung des Rohölpreises wird das „New Policies Scenario“ der Internationalen Energieagentur (IEA) aus dem World Energy Outlook 2012 (IEA 2012) zugrunde gelegt. Die Entwicklung des Erdgaspreises wird an den Rohölpreis gekoppelt.

Otto- und Diesel-Hybridfahrzeuge werden im Neuwagenmarkt bis 2020 deutlich zunehmen, Diesel-Hybridfahrzeuge, wie der Anteil an Dieselfahrzeugen generell ab 2024 aber wieder zurückgehen. Dieselhybridfahrzeuge mit Plug-in können sich in diesem Szenario am Markt nicht signifikant durchsetzen. Zwar bekommen sie, insbesondere ab dem Jahr 2020 einen sichtbaren Anteil bei den Neufahrzeugen, können diesen aber nicht über das Jahr 2025 hinaus halten. Fahrzeuge mit Erdgasantrieb machen zwar einen konstanten, aber kleinen Anteil aus, der erst ab 2027 merklich gesteigert werden kann, wenngleich insbesondere Hybridvarianten Zuwächse verzeichnen können. Erdgasfahrzeuge ersetzen dabei die immer weiter aus dem Markt verschwindenden Dieselfahrzeuge.

Energieträger	Einheit	2012	2020	2030	2040
Rohöl	USD ₂₀₁₁ /bbl	108	120	124	126
Erdgas	EUR ₂₀₁₀ /kg	1,01	1,20	1,22	1,25
Elektrizität (Hausstrom)	EUR ₂₀₁₀ /kWh	0,20	0,284	0,324	0,33
Wasserstoff	EUR ₂₀₁₀ /kg	16,60	6,60	5,00	5,00

Tab. 4-19 Entwicklung der Preise für Energieträger

Quelle: (DLR et al. 2012, IEA 2012, McKinsey 2010)

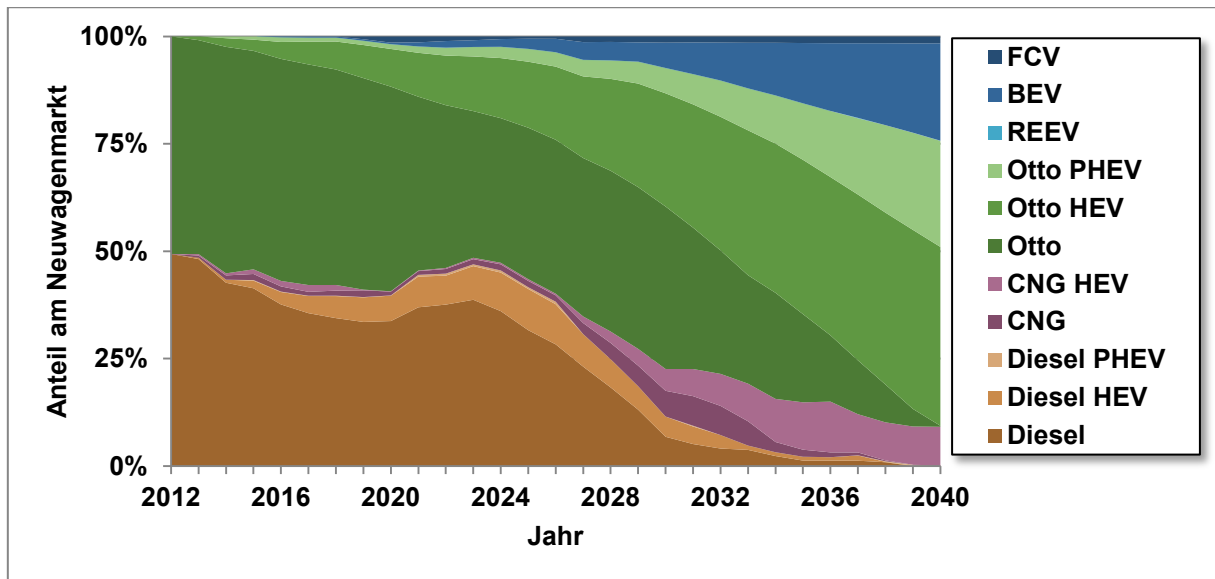


Abb. 4-91 Neuwagenmarkt Basisszenario

Durch die unterstellte Effizienzsteigerung von Ottofahrzeugen, demzufolge sich der Energieverbrauch von Otto- und Dieselfahrzeugen stetig angleicht, wird ein Großteil der Dieselfahrzeuge durch Ottofahrzeuge ersetzt. Insbesondere Otto-Hybridfahrzeuge sind hier gegenüber Dieselfahrzeugen bei der Betrachtung der relevanten Kosten über die Haltedauer (RCO, *relevant costs of ownership*) gut aufgestellt. Allerdings bekommen Ottofahrzeuge durch die anziehenden CO₂-Flottengrenzwerte Probleme, wodurch der Anteil von Dieselfahrzeugen ab 2020 noch einmal steigen kann.

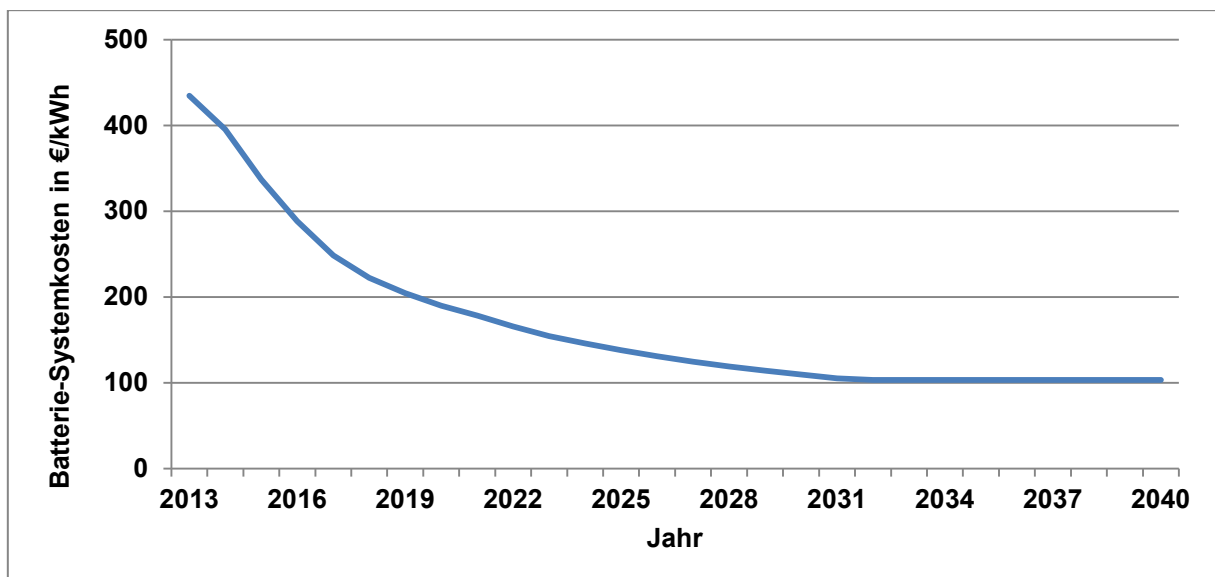


Abb. 4-92 Von Vector21 berechnete Entwicklung der Batterie-Zellkosten im Basisszenario

Ab 2023 können elektrifizierte Ottofahrzeuge diesen Nachteil aber wettmachen. Insbesondere werden dann die Fahrzeuge mit Plug-in signifikant zunehmen. Während sich der Anteil an Otto-PHEV bis 2020 auf einem niedrigen konstanten Niveau hält, können diese, auch beeinflusst durch die positive Entwicklung der Komponentenpreise, zunehmend mehr Kunden finden, die sich für diese Antriebsstrangvariante entscheiden. Gleiches gilt auch für batterie-

elektrische Fahrzeuge, deren Anteil am Neuwagenmarkt bis 2020 sehr gering ist. Dies ist insbesondere durch die hohen Zusatzkosten zu erklären. Ab dem Jahr 2020 beginnt ihr Anteil jedoch merklich zu wachsen und wird sich ab 2030 noch einmal deutlich steigern. Die Preisentwicklung der Batteriezellen für die automobilen Anwendung, wie sie modellintern auf Basis von Lernkurven berechnet wird, veranschaulicht Abb. 4-92 übereinstimmend mit der Literatur (Bernhardt 2014). Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb können ab 2020 einen konstanten Anteil von ungefähr 1–2 % am Neuwagenmarkt verzeichnen. Allerdings unterstellen die Szenarien einen Ausbau der Infrastruktur in dem Maße, dass eine flächendeckende Nutzung von Brennstoffzellenfahrzeugen gewährleistet werden kann.

Die Entwicklung am Neuwagenmarkt wirkt sich auf die Zusammensetzung des Fahrzeugbestands in Deutschland aus (Abb. 4-93). Die Entwicklung ist aufgrund der Überlebenskurven von Bestandfahrzeugen jedoch deutlich verzögert und im Fahrzeugbestand macht sich die Elektrifizierung erst später bemerkbar. Bis 2020 lassen sich in diesem Szenario zwar ungefähr zwei Millionen Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebsstrang finden, allerdings verfügen lediglich gut 200 000 Fahrzeuge über die Möglichkeit, die Batterie an einem externen Stromnetz aufzuladen. Ziel der Bundesregierung ist jedoch, die Anzahl solcher Fahrzeuge bis 2020 auf eine Million zu steigern. Durch den starken Zuwachs im Neuwagenmarkt nach 2020 wird dieses Ziel zwar erreicht, aber erst 2026. Zu diesem Zeitpunkt befinden sich dann schon knapp sieben Millionen elektrifizierte Fahrzeuge im deutschen Pkw-Bestand. Bis 2030 nimmt deren Bedeutung weiterhin zu, sodass dann schon über zehn Millionen dieser Fahrzeuge vorhanden sind, von denen fast zwei Millionen als Plug-in-Fahrzeug einzustufen sind.

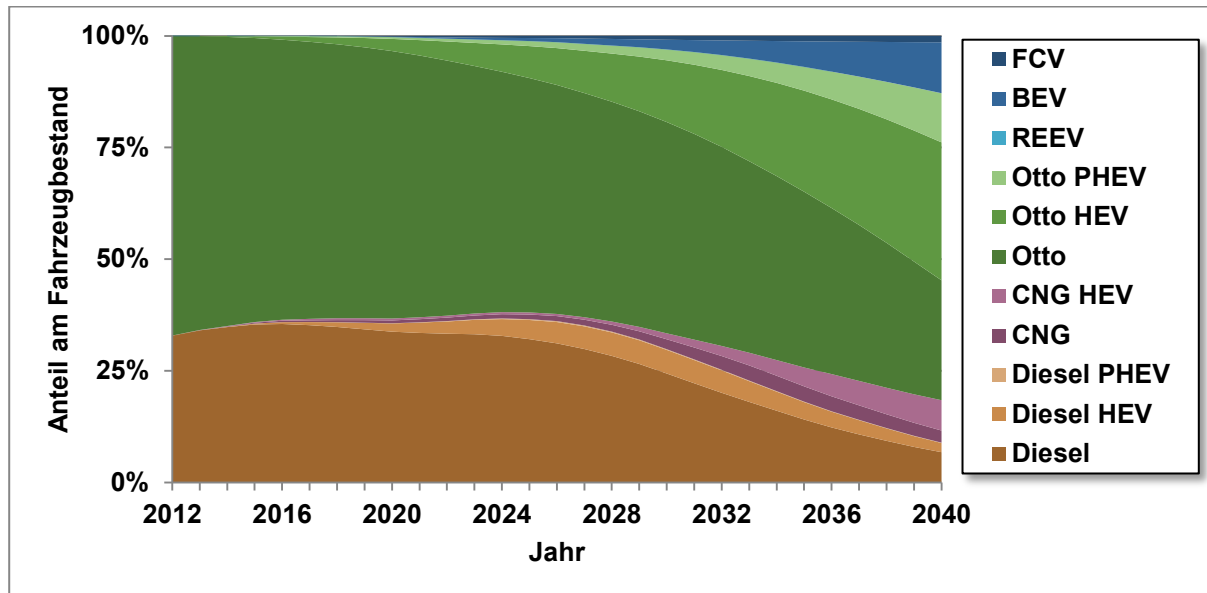


Abb. 4-93 Entwicklung des Fahrzeugbestands im Basisszenario

Um die Anzahl elektrifizierter Fahrzeuge, insbesondere von Plug-in-Fahrzeugen, zu steigern, werden in verschiedenen Weltregionen z. B. monetäre Kaufanreize gesetzt, wobei Kunden entweder direkte Zuschüsse beim Kauf von Elektrofahrzeugen bekommen oder ihnen über Steuernachlässe finanzielle Vorteile gewährt werden (Abschnitt 5.3.1). Dieses Instrument wird von der Bundesregierung derzeit jedoch nicht angewandt und es ist auch nicht geplant, derartige Subventionen in absehbarer Zeit auf den Weg zu bringen. Aus diesem Grund wer-

den solche Maßnahmen in den Szenarien nicht, sondern vielmehr Faktoren untersucht, die durch eine Unterstützung der Industrie beeinflusst werden könnten.

Im Folgenden werden drei alternative Szenarien betrachtet, die sich in einzelnen Annahmen vom Basisszenario unterscheiden:

1. Alternativszenario: Weltweit erfährt die Elektromobilität ein erhöhtes Wachstum, wodurch die Komponentenkosten schneller sinken und höhere Produktionskapazitäten für Elektrofahrzeuge zur Verfügung stehen.
2. Alternativszenario: Weltweit wächst die Elektromobilität langsamer, als im Basisszenario unterstellt, wodurch geringer Produktionskapazitäten zur Verfügung stehen und die Kosten für Komponenten langsamer sinken.
3. Alternativszenario: Gegenüber den Annahmen zur technologischen Entwicklung der Fahrzeuge im Basisszenario wird eine verdoppelte Effizienzsteigerung der elektrischen Komponenten des Antriebsstrangs unterstellt.

Durch ein weltweites Wachstum der Elektromobilität könnten sich jedoch positive Effekte mit Auswirkungen auch in Deutschland einstellen. So könnten sich die Preise für Batteriezellen schneller positiv entwickeln und auch die Zahl der zur Verfügung stehenden Elektrofahrzeuge aufgrund schneller wachsender Produktionskapazitäten steigen. Um diese Auswirkungen zu beleuchten, wurden zwei Alternativszenarien entwickelt, in denen die eben beschriebenen Entwicklungen unterstellt werden. So steigt die weltweite Anzahl von Elektrofahrzeugen um weitere 25 % gegenüber der Entwicklung im Basisszenario.

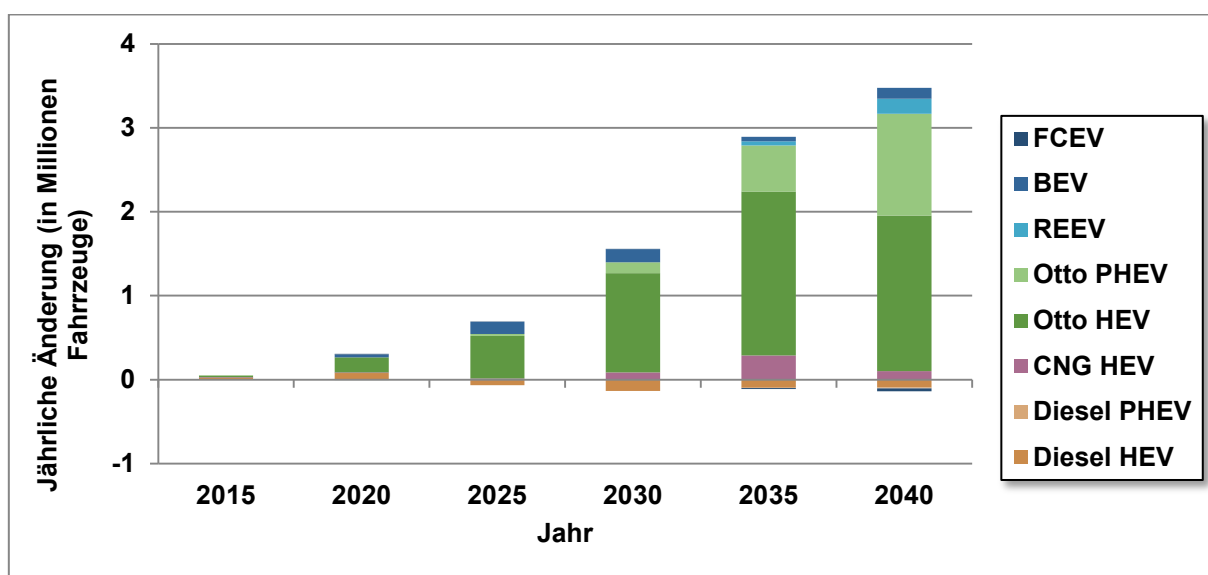


Abb. 4-94 Änderung der Anzahl der jeweiligen Antriebsstrangvarianten im Fahrzeugbestand für das 1. Alternativszenario gegenüber dem Basisszenario

Bis 2020 kann der Anteil elektrifizierter Fahrzeuge in der Flotte um ca. 13 % gegenüber dem Basisszenario gesteigert werden (Abb. 4-94). Der Anteil der Plug-in-Fahrzeuge steigt dabei ebenfalls um 13 %. Somit befinden sich in einem Szenario mit einem beschleunigten weltweiten Elektromobilitätswachstum im Jahr 2020 knapp 2,7 Millionen Elektrofahrzeuge in der Flotte. Jedoch steigt die Zahl der Fahrzeuge mit Plug-in-Option, die damit zum Ziel von einer Million Elektrofahrzeuge bis 2020 beitragen, auf gerade einmal rund 330 000. Diese positive Entwicklung setzt sich im Anschluss fort, sodass bis 2030 schon 2,5 Millionen Pkw mit Stecker im Fahrzeugbestand zu finden sind und über 12 Millionen Fahrzeuge einen elektrifizierten Antriebsstrang aufweisen, was in diesem Fall ungefähr einem Viertel des Gesamtbestands entsprechen würde. Bis 2040 kann man bei dieser Entwicklung bei drei Viertel der Fahrzeuge im Pkw-Bestand elektrifizierte Antriebstränge finden, von denen ungefähr ein Drittel einen Stecker zum Aufladen der Batterie besitzt.

Diese Entwicklung vollzieht sich gemeinsam mit einer Änderung der Batteriesystemkosten gegenüber dem Basisszenario. Diese reduzieren sich schneller als im Basisszenario, liegen für das Jahr 2015 schon bei rund 320 €/kWh und sinken bis 2020 weiter ab auf 170 €/kWh (Abb. 4-95). Im Folgenden nähern sich die Preise wie im 1. Alternativszenario berechneten denen des Basisszenarios sukzessive an, erreichen jedoch etwas früher als im Basisszenario schon 2030 ihre Minimalkosten.

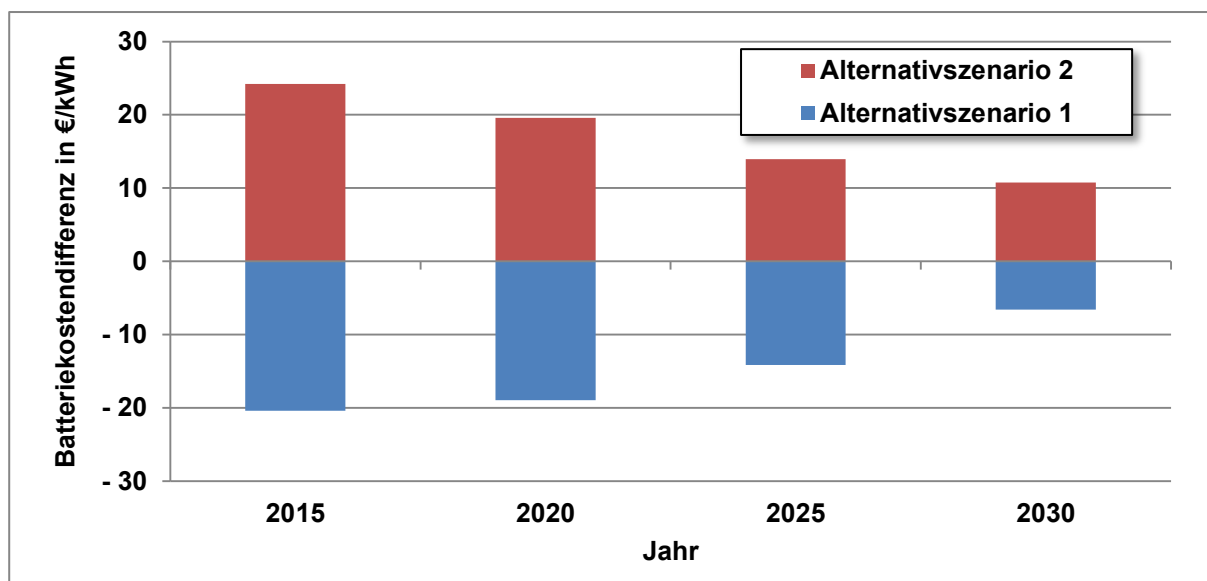


Abb. 4-95 Differenz bei den Batteriekosten in den Alternativszenarien gegenüber dem Basisszenario

Eine langsamere Entwicklung der weltweiten Elektromobilität kann insofern auch negative Konsequenzen für die Anzahl der Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen haben, als dies Auswirkungen auf die Entwicklung der Technologiekosten sowie die Produktionskapazitäten hätte. Dies wurde im zweiten Alternativszenario untersucht. Beispielhaft für die Technologiekosten ist in Abb. 4-95 die Differenz der Batteriekosten abgebildet, wie sie ein um 20 % langsames globales Elektromobilitätswachstum im Vergleich zur im Basisszenario unterstellten Entwicklung mit sich bringen würde. Durch die reduzierten Skaleneffekte müssen insbesondere in den ersten Jahren höhere Kosten für die Batteriesysteme getragen werden. So werden 2015 noch 360 €/kWh und 2020 noch 210 €/kWh fällig. Das hat zur Folge, dass die Verkaufszahlen von Elektrofahrzeugen merklich zurückgehen (Abb. 4-96). 2020 werden in die-

sem Szenario gegenüber dem Basisszenario 60 000 weniger Elektrofahrzeuge verkauft, 2030 schon fast 210 000 weniger. Zu diesem Zeitpunkt sind vordergründig Hybridfahrzeuge ohne Stecker von dem Rückgang betroffen. Plug-in-Fahrzeuge bekommen diese Entwicklung insbesondere in der Zeit nach 2035 zu spüren, wenn deren Verkauf im Basisszenario deutlich an Dynamik gewinnt, was sich in einem Szenario mit einem reduzierten globalen Wachstum deutlich geringer darstellt. Die Zunahme reichweitenverlängerter Elektrofahrzeuge ist auf fehlende Produktionskapazitäten bei batterieelektrischen Fahrzeugen zurückzuführen, wodurch sich vereinzelt Kunden für diese Fahrzeugvariante entscheiden.

Der Rückgang am Neuwagenmarkt macht sich auch im Fahrzeugbestand deutlich bemerkbar (Abb. 4-97). Insbesondere Hybridfahrzeuge ohne externe Lademöglichkeit durchdringen den Fahrzeugbestand merklich langsamer. Im Jahr 2020 finden sich somit über 360 000 Fahrzeuge weniger mit elektrifiziertem Antriebsstrang in der Fahrzeugflotte als im Basisszenario, was einer Differenz von 16 % entspricht. Bei den Plug-in-Fahrzeugen sind es knapp 35 000 Fahrzeuge oder 12 % weniger. Somit weist der Fahrzeugbestand zu diesem Zeitpunkt knapp unter 2 Millionen elektrifizierte Fahrzeuge auf, wobei es sich bei rund 260 000 Fahrzeugen um PEV handelt. Wie auch bei einem beschleunigten globalen Wachstum bekommen insbesondere die Hybridvarianten ohne Stecker in den ersten Jahren die Auswirkungen zu spüren. Doch auch Plug-in-Hybride erfahren einen nachhaltigen Rückgang bei der Marktdurchdringung.

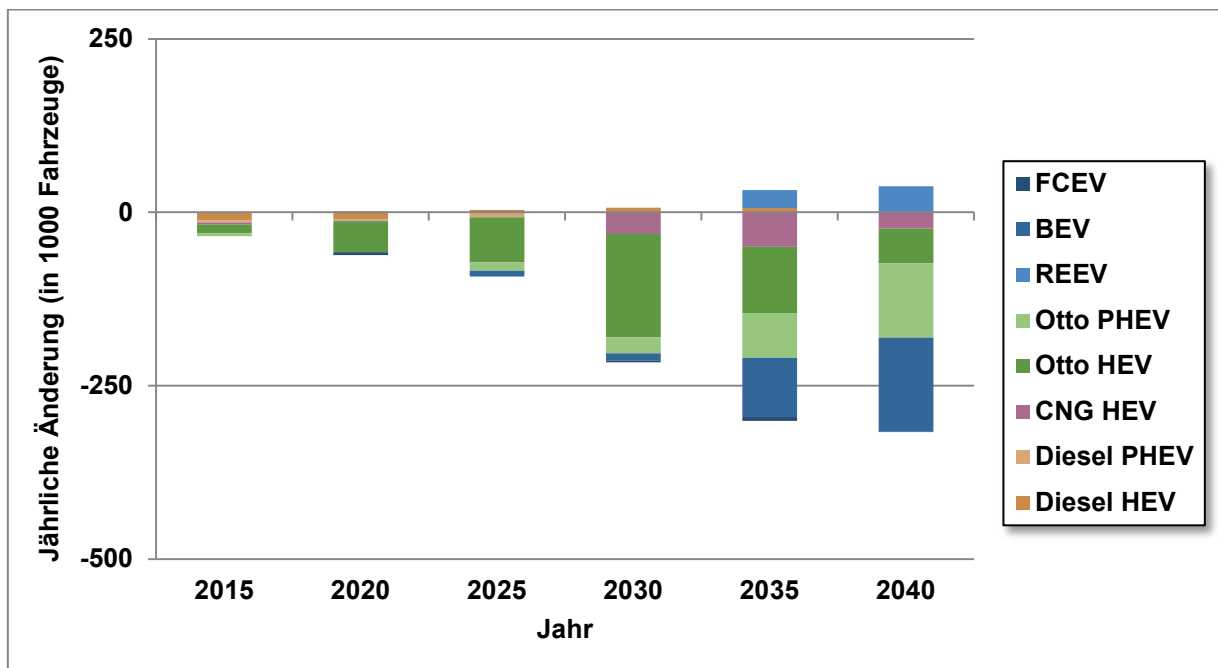


Abb. 4-96 Änderung der Anzahl der jeweiligen Antriebsstrangvarianten im Neuwagenmarkt für das 2. Alternativszenario gegenüber dem Basisszenario

Batterieelektrische Fahrzeuge haben zwar zu Beginn der Entwicklung bis 2030 merkliche Rückgänge zu verzeichnen, können diese aber, auch durch das Fernbleiben der Plug-in-Hybride und den damit verbundenen langsameren Aufbau von Produktionskapazitäten, nach 2030 wieder ausgleichen. Zudem können auch in diesem Fall die reichweitenverlängerten Fahrzeuge von der Entwicklung profitieren. Ihr Anteil sowohl am Neuwagenmarkt als auch im Fahrzeugbestand bleibt mit unter 1 % allerdings gering.

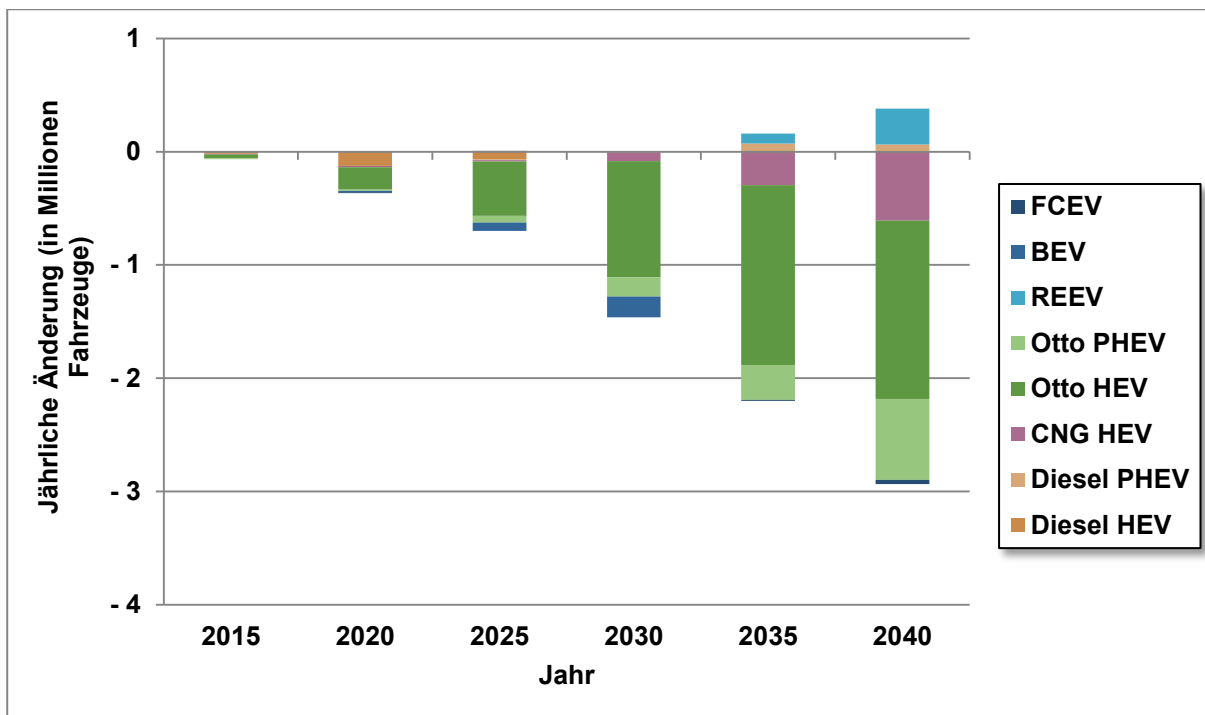


Abb. 4-97 Änderung der Anzahl der jeweiligen Antriebsstrangvarianten im Fahrzeugbestand für das 2. Alternativszenario gegenüber dem Basisszenario

Neben den Einflüssen des globalen Elektromobilitätswachstums können Forschung und Industrie versuchen, Einfluss auf die technologische Ausgestaltung der elektrifizierten Fahrzeuge zu nehmen – und zwar mittels Entwicklungen, die sich auf die Kosten für die Komponenten von Elektrofahrzeugen auswirken, oder einer effizienteren Gestaltung der Komponenten selbst, wodurch der Energieverbrauch der Fahrzeuge sinkt. Um den zweiten Punkt genauer zu untersuchen, wurde in einem dritten Alternativszenario angenommen, dass sich der elektrische Energieverbrauch elektrifizierter Fahrzeuge über die Jahre um weitere 10 % gegenüber der Entwicklung im Basisszenario reduziert. Abb. 4-98 veranschaulicht die Entwicklung des Energieverbrauchs von Otto- und Diesel-PHEV sowie des BEV im 3. Alternativszenario im Vergleich zum Basisszenario. Zu erkennen ist, dass der Energieverbrauch der BEV im Vergleich zum Basisszenario stärker abnimmt als bei den PHEV, was darauf zurückzuführen ist, dass die PHEV nur zum Teil den Antrieb über den elektrischen Antriebspfad realisieren und die restliche Antriebsenergie über den Verbrennungsmotor bereitgestellt wird. Jedoch fällt die absolute Effizienzsteigerung bei den PHEV mit rund 35 % weiterhin höher aus als bei dem schon sehr effizienten BEV mit ungefähr 20 %.

Trotz des signifikanten Eingriffs in den Energieverbrauch der elektrifizierten Fahrzeuge sind die Auswirkungen auf den Fahrzeugmarkt im Vergleich zu den vorangehend beschriebenen Szenarien gering (Abb. 4-99). In den ersten Jahren bis 2025 können zwar mehr Fahrzeuge in den Markt gebracht werden, insbesondere die hoch elektrifizierten PEV. Im Vergleich zum ersten und zweiten Alternativszenario sind diese Zunahmen jedoch eher gering. Zudem geht der Zuwachs an PEV ab 2030 zuungunsten der HEV, wodurch zwar mehr PEV in den Markt kommen, die Anzahl an xEV jedoch recht konstant bleibt.

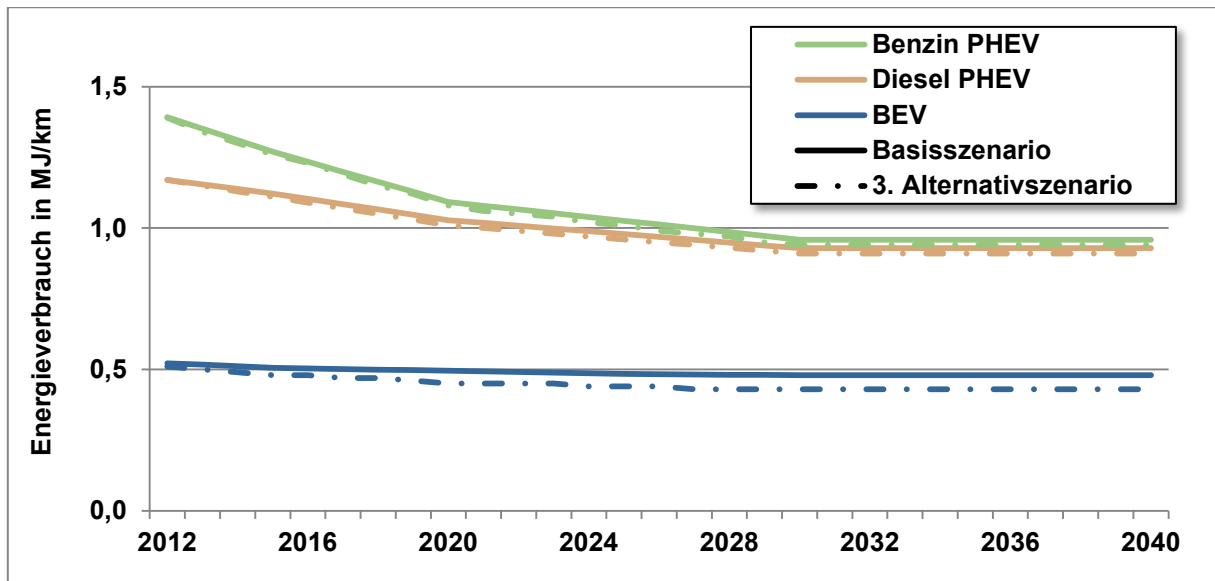


Abb. 4-98 Entwicklung des Energieverbrauchs von BEV und PHEV im 3. Alternativszenario

Das zeigt sich insofern auch bei der Veränderung im Fahrzeugbestand (Abb. 4-100), als die Anzahl von PEV, insbesondere von BEV, gesteigert werden kann. Dies verursacht jedoch ab 2035 auch ein signifikantes Verdrängen von HEV aus dem Fahrzeugbestand, was sich insbesondere bei den CNG HEV bemerkbar macht.

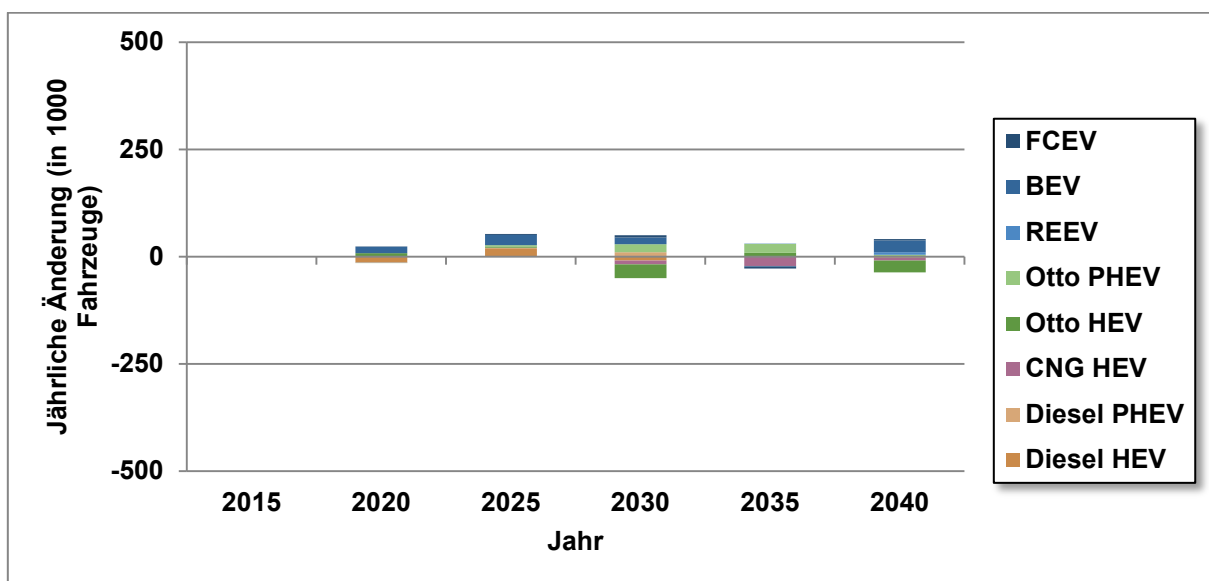


Abb. 4-99 Änderung der Anzahl der jeweiligen Antriebsstrangvarianten im Neuwagenmarkt für das 3. Alternativszenario gegenüber dem Basisszenario

In den vorgestellten Szenarien ist es durchaus möglich, die Anzahl elektrifizierter Fahrzeuge, insbesondere auch von PEV, im deutschen Neuwagenmarkt und damit auch im deutschen Fahrzeugbestand zu erhöhen. Jedoch treten die Auswirkungen des globalen Elektromobilitätswachstums nur deutlich verzögert ein. Um das Ziel, bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge, die über einen Stecker verfügen, im deutschen Pkw-Bestand zu haben, erreichen zu können, reichen die untersuchten Maßnahmen und Entwicklungen nicht aus. Eine technologische Verbesserung der Fahrzeuge kann zwar Energieeinsparungen bewirken, jedoch rea-

giert der Markt in dem zugrunde gelegten Szenario nicht besonders sensitiv auf diese Entwicklung. Anders sieht das bei einer Beschleunigung des weltweiten Elektromobilitätswachstums aus. Wenn auch spät können hier Zuwächse im zweistelligen Prozentbereich gegenüber der Entwicklung im Basisszenario beobachtet werden. Das verdeutlicht, dass der Markt vergleichsweise sensibel auf die Preisentwicklung reagiert. Gerade die Kosten für die Batterie, die derzeit einen großen Teil der Gesamtkosten, insbesondere bei PEV, ausmachen, können hier wesentliche Konsequenzen haben.

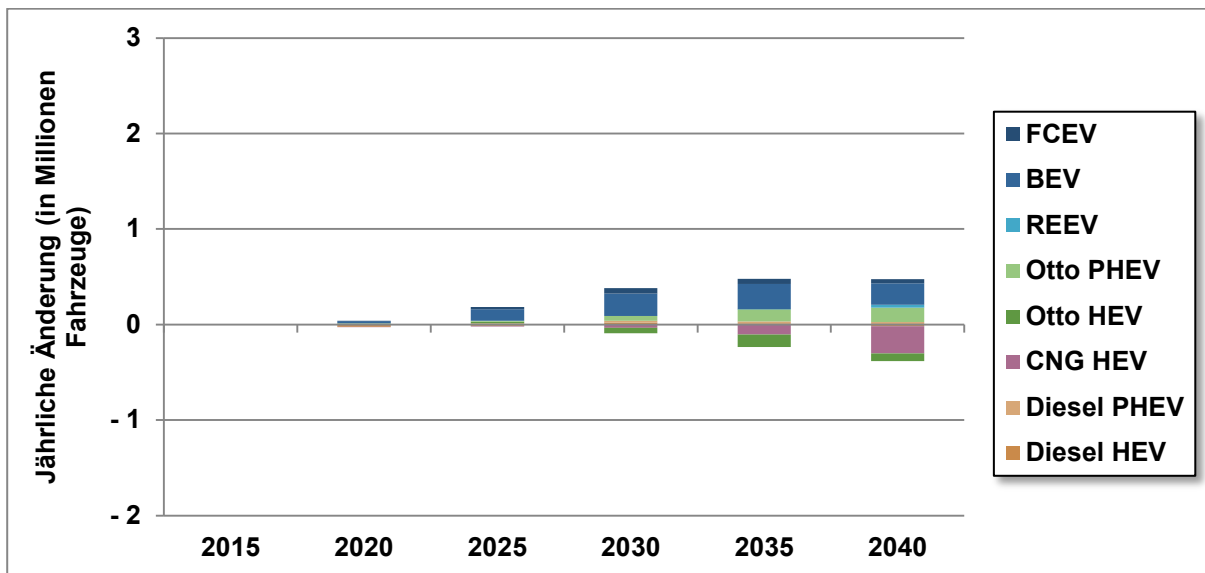


Abb. 4-100 Änderung der Anzahl der jeweiligen Antriebsstrangvarianten im Fahrzeugbestand für das 3. Alternativszenario gegenüber dem Basisszenario

5 Regionale Übersicht zum Monitoring der Elektromobilitätsarena

T. Koska (WI), H. Hüging (WI), D. Kreyenberg (DLR), P. Hillebrand (WI), J. Tenbergen (WI)

5.1 Vorgehen und Methodik

Die „Regionale Übersicht zum Monitoring der Elektromobilitätsarena“ dient der Darstellung und Bewertung von Förderansätzen und Rahmenbedingungen der Elektromobilität weltweit, der Analyse von Trends und Perspektiven in der Marktentwicklung, der Erhebung von Schwerpunkten der Forschungsförderung sowie der Übersicht von Aktivitäten und Strategien der Industrie. Die Kenntnisse der Rahmenbedingungen und Entwicklungen in den verschiedenen Ländern ist zentral, um die Technologieentwicklung im Bereich Elektromobilität einzuordnen und Trends potenziell konkurrierender Länder zu identifizieren. Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sind häufig eng an (nationale) Förderschwerpunkte und den Charakteristika nationaler Märkte geknüpft. Zudem ist eine Berücksichtigung landesspezifischer Rahmenbedingungen essentiell, um die Forschung und Industrie zu unterstützen, aussichtsreiche Entwicklungsvorhaben zu definieren und zu verfolgen, so dass international erfolgreiche Produkte entwickelt werden können. Aus den regionalen Übersichten können Erkenntnisse zu globalen Entwicklungen und Perspektive der Elektromobilität abgeleitet werden. Auf Basis der Darstellung des Status quo in verschiedenen Regionen lässt sich Deutschland hinsichtlich seiner Position im internationalen Vergleich einordnen.

Der zentrale Untersuchungsgegenstand „Elektromobilität“ wurde dabei im Hinblick auf die Gesamtausrichtung des STROM-Förderprogramms und der STROM-Begleitforschung auf den motorisierten Individualverkehr eingegrenzt. Der Fokus liegt dabei auf elektrifizierten Pkw. Andere Fahrzeugsegmente wie elektrifizierte Zweiräder oder Busse wurden nur bei besonderer Relevanz in bestimmten Fokusregionen in der Analyse berücksichtigt. Hinsichtlich des Elektrifizierungsgrades wurden insbesondere höher elektrifizierte Fahrzeuge betrachtet. Dies umfasst zum einen Fahrzeuge, die begrenzt rein elektrisch fahren können und Verbrennungs- sowie Elektromotor in Kombination nutzen (z.B. PHEV/REEV) und zum anderen auch rein elektrisch betriebene, batteriebasierte Fahrzeuge (BEV) (vgl. Kapitel 6.2.2). Der Fokus lag somit auf batteriebasierten Fahrzeugen, die über das Stromnetz geladen werden können (BEV und PHEV/REEV, zusammengefasst als PEV). Förderpolitisch und statistisch wird häufig nicht zwischen PHEV und REEV unterschieden, so dass alle Fahrzeuge, die einen Elektro- und einen Verbrennungsmotor besitzen und über das Stromnetz geladen werden können, unter PHEV zusammengefasst wurden. Brennstoffzellenbasierte Fahrzeuge sind nicht im Untersuchungsgegenstand enthalten und wurden lediglich als weitere Technologieoption behandelt.

Die Regionalstudien konzentrieren sich auf vier Untersuchungsfelder:

- a) Regierung/Politik/öffentliche Infrastruktur
- b) Forschung und Entwicklung
- c) Wirtschaft und Industrie
- d) Verbraucher und Markt

Das Untersuchungsfeld „Regierung / Politik / öffentliche Infrastruktur“ befasst sich mit den politischen Strategien, dem regulatorischen Rahmen und der Förderung für Elektrofahrzeuge durch regulatorische oder finanzielle Anreize. Im Bereich „Forschung und Entwicklung“ werden nationale Förderprogramme hinsichtlich ihrer thematischen Ausrichtung und ihres Umfangs ausgewertet. Das Themenfeld „Wirtschaft und Industrie“ befasst sich mit der Automobilindustrie in den jeweiligen Regionen. Die Bedeutung des Industriezweiges für die Region wird dargestellt und wichtige Strategien und Produkte der ansässigen Automobilhersteller dargelegt. Das Untersuchungsfeld „Verbraucher und Markt“ beleuchtet die bisherige Entwicklung, den Status quo sowie zukünftige Entwicklungen im Absatz von elektrifizierten Fahrzeugen. Außerdem wird die Nutzerakzeptanz gegenüber Elektrofahrzeugen thematisiert. Insgesamt geben die vier Untersuchungsfelder somit ein umfassendes Bild über den Status der Elektromobilität in der jeweiligen Region.

Das Monitoring der internationalen Elektromobilitätarena speist sich aus drei Erkenntnisquellen:

I. Regionale Recherchen in fünf Fokusregionen (Indien, Japan, USA, China Europa) von vor Ort ansässigen bzw. tätigen Fachinstituten

Es wurden fünf Fokusregionen ausgewählt, die eine besondere Bedeutung für die weltweiten Perspektiven der Elektromobilität haben. Die Fokusregionen China, USA, EU, Japan und Indien gehören zu den größten Absatzmärkten für Pkw und sind außerdem bedeutende Produktionsstandorte (VDA 2014). Ein stark steigender Motorisierungsgrad in China und Indien trägt zudem zu einer wachsenden Bedeutung dieser Regionen bei.

Um die Rahmenbedingungen und Entwicklungen der Elektromobilität in den fünf Fokusregionen zu erfassen, wurde jeweils ein vor Ort ansässiges oder tätiges Fachinstitut beauftragt. Dadurch wurde gewährleistet, dass ein Zugang zu maßgeblichen Dokumenten besteht, die zum Teil nur in der Landessprache verfügbar sind, und eine Einordnung unter Kenntnis der regionalen Gegebenheiten erfolgen kann. Zusätzlich wurde analog dazu die Situation in Deutschland als Vergleichsbasis durch das Wuppertal Institut erfasst. Die jeweiligen Regionalpartner sind in Tab. 5-1 dargestellt.

Region	Beauftragte Institution
Europa	Ernst Basler + Partner AG (Schweiz)
USA	UC Davis (USA - Kalifornien)
Indien	TERI – The Energy and Resources Institute (Indien)
Japan	IGES – Institute for Global Environmental Strategies (Japan)
China	EnergieAgentur NRW (Deutschland)

Tab. 5-1 Fokusregionen und beauftragte Institutionen

Um eine größtmögliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, wurde ein einheitliches Analyseraster entwickelt und mit den Regionalpartnern und den STROM-Projekten abgestimmt. Das Analyseraster thematisiert Themen und Schlüsselindikatoren in jedem der eingangs genannten Untersuchungsfelder.

II. Rechercheaufenthalte in den Fokusregionen zur Durchführung von leitfadengestützten Experten-Interviews

Die Ergebnisse der durch die Regionalpartner angefertigten Regionalstudien wurden durch leitfragengestützte Interviews mit lokalen Experten ergänzt und vom Wuppertal Institut bzw. vom DLR durchgeführt. Die Vorbereitung der Rechercheaufenthalte und die Identifizierung relevanter Interviewpartner wurde in enger Zusammenarbeit mit den jeweiligen Regionalpartnern vorgenommen. Interviewt wurden Experten aus Politik, Forschung und Industrie. Die leitfadengestützten Interviews wurden genutzt, um die vorab recherchierten Informationen aus den Regionalstudien zu verifizieren, aktuelle, noch nicht veröffentlichte Entwicklungen abzubilden und Experteneinschätzungen zum aktuellen Stand und der zukünftigen Entwicklung zu erfassen. Die Ergebnisse der leitfadengestützten Interviews wurden anonymisiert in die Regionalstudien integriert.

III. Ergänzende Desktoprecherche und Dokumentenanalyse zu weltweiten Studien und Schlüsselindikatoren

Für die Berücksichtigung der globalen Entwicklung über die Fokusregionen hinaus hat das Wuppertal Institut zusätzliche Recherchen durchgeführt. Außerdem wurden ergänzende Recherchen zu aktuellen Daten zu den Fokusregionen durchgeführt, um ein hohes Maß an Aktualität und Vergleichbarkeit gewährleisten zu können.

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse aus den Fokusregionen zusammenfassend dargestellt (Kapitel 5.2); die ausführlichen Berichte zu den einzelnen Regionen liegen dem BMBF als Anlage zu diesem Bericht vor. Danach erfolgt der Vergleich zwischen die Fokusregionen in den vier Untersuchungsfeldern (Kapitel 5.3). Die Einordnung Deutschlands hinsichtlich seiner Position im internationalen Vergleich erfolgt im zusammenfassenden Kapitel.

5.2 Zusammenfassung der Regionalstudien

5.2.1 Deutschland

T. Koska (WI), H. Hüging (WI), P. Hillebrand (WI), J. Tenbergen (WI)

Regierung/Politik/Öffentliche Infrastruktur

Ziele der Bundesregierung

Mit dem „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ hat die Bundesregierung im Jahr 2009 die Grundlagen ihrer Strategie zur Förderung der Elektromobilität in Deutschland festgelegt (Bundesregierung 2009). Der Plan benennt Potenziale und Herausforderungen der Elektromobilität, stellt Ziele auf und umfasst Handlungsempfehlungen. Konkretisiert wurde der Plan im Jahr 2011 durch das Regierungsprogramm Elektromobilität (Bundesregierung

2011), in dem konkrete FuE-Vorhaben („Leuchttürme“) und Demonstrationsprogramme („Schaufenster Elektromobilität“) angestoßen werden.

Eine zentrale Zielvorgabe der Bundesregierung ist es, dass bis 2020 in Deutschland eine Million Elektrofahrzeuge zugelassen sind (Bundesregierung 2009), wobei es sich dabei um extern aufladbare Fahrzeuge handeln soll (BEV und PHEV/REEV). Darin konkretisiert sich das industriepolitische Ziel, dass Deutschland Leitmarkt für Elektromobilität werden soll. Ebenso solle Deutschland die Position eines Leitanbieters für Elektromobilität erlangen. Damit soll die Position der deutschen Automobil- und Zulieferindustrie gesichert werden.

Technologieführerschaft wird als Schlüssel betrachtet, um die dafür notwendige Wettbewerbsposition zu erreichen. Gefördert werden soll diese durch eine Stärkung und Vernetzung der Forschungsaktivitäten von Wirtschaft und Wissenschaft sowie eine Ausbildungsinitiative. Ebenso strebt die Bundesregierung eine führende Rolle bei der Definition internationaler Normen und Standards im Bereich Elektromobilität an.

Weitere Ziele betreffen die Energie- und Klimapolitik: So möchte Deutschland durch Förderung der Elektromobilität dazu beitragen, seine THG-Emissionen zu reduzieren und unabhängiger vom Erdöl werden. Der Ausbau der Elektromobilität soll mit dem Ausbau der regenerativen Stromerzeugung einhergehen. Zudem sollen Mobilitätskonzepte gefördert werden, die Elektromobilität einbinden.

Bei der Förderung von Elektromobilität verfolgt die Bundesregierung einen systemischen, marktorientierten und technologieoffenen Ansatz (NPE 2012), der im Folgenden erläutert wird.

Umsetzung der Strategie

Dabei soll Elektromobilität als Gesamtsystem mit seinen wissenschaftlichen, technischen, marktbezogenen und verkehrssystemischen Aspekten und Akteuren gefördert werden. Bestimmte Typen von Elektrofahrzeugen werden dabei nicht präferiert.

Zur Erreichung dieser Ziele setzt die Bundesregierung primär auf die Förderung von FuE- sowie Demonstrationsprojekten. Es werden nur in sehr geringem Umfang durch Steuererleichterungen Anreize für Käufer von Elektrofahrzeugen gewährt. Während die Forschung dem Ziel dienen soll, Deutschland zu einem Leitanbieter der Elektromobilität zu machen, zielen die Demonstrationsprojekte darauf ab, Elektromobilität im alltäglichen Verkehrsgeschehen zu erproben und die Entwicklung zum Leitmarkt zu fördern (NPE 2012). Die Entwicklung des Leitmarktes soll in drei Phasen erreicht werden: Phase 1 der Marktvorbereitung (2009-2011) ist durch FuE, Prototypenentwicklung und erste Serienfahrzeuge geprägt, die fast ausschließlich in Versuchsflotten zur Anwendung kommen. Phase 2 des Markthochlaufs (2011-2016) sieht die Entwicklung von Komponenten und Fahrzeugen der zweiten Generation vor, erste Privatanutzer und selbsttragende Geschäftsmodelle werden erwartet. In Phase 3 des Volumenmarktes (2017-2020) soll schließlich eine Massenfertigung von Komponenten und Fahrzeugen der zweiten Generation stattfinden, eine flächendeckende Ladeinfrastruktur aufgebaut sein und der Marktdurchbruch gelingen.

Inwieweit die Marktentwicklungsziele bis 2020 erreichbar sind, hängt stark von den Rahmenbedingungen ab; so halten Plötz et al. (2013) in den Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge die Ziele nur unter günstigen Annahmen hinsichtlich Batteriekosten, Öl- und Strompreis für erreichbar, solange keine Kaufanreize eingeführt werden sollen. Dagegen wird die

Erreichung der Ziele hinsichtlich der Technologieführerschaft optimistischer eingeschätzt – in diesem Bereich sieht etwa der E-Mobility-Index von Roland Berger und fka Deutschland an zweiter Position (Roland Berger & fka 2014).

Vernetzung von Akteuren

Um eine Vernetzung der verschiedenen Akteure im Feld der Elektromobilität zu fördern, Herausforderungen zu identifizieren und die Arbeit in relevanten Forschungsfeldern zu koordinieren, hat die Bundesregierung 2010 die „Nationale Plattform Elektromobilität“ (NPE) ins Leben gerufen. Das Beratungsgremium mit Vertretern von Industrie, Wissenschaft, Politik, Gewerkschaften und Gesellschaft behandelt in sieben Arbeitsgruppen (Antriebstechnologie; Batterietechnologie; Ladeinfrastruktur und Netzintegration; Normung, Standardisierung und Zertifizierung; Materialien und Recycling; Nachwuchs und Qualifizierung; Rahmenbedingungen) die Schwerpunktthemen der Elektromobilität und formuliert Empfehlungen an die Bundesregierung (NPE 2012). Innerhalb der Bundesregierung werden die Aktivitäten zur Förderung der Elektromobilität durch einen Ressortkreis, bestehend aus BMWi, BMVI, BMUB und BMBF, koordiniert (Bundesregierung 2009). Dabei haben die Ministerien unterschiedliche Förderschwerpunkte (vgl. Tab. 5-2).

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)
IKT für Elektromobilität Fahrzeugtaugliche Batteriesysteme und Fertigungstechnologien Stromwirtschaftliche Elemente: Speicher, Netze, Integration Technologien für Antriebssysteme von Elektro- und Hybridfahrzeugen Ladeinfrastruktur (mit BMVI) Abrechnungssysteme Nutzerakzeptanz (mit BMVI)	Sicherheit von Batterien Demonstration und Erprobung innovativer Mobilitätssysteme Ladeinfrastruktur (mit BMWi) Sicherheit und Effizienz von Fahrzeugflotten Hybridisierung von Lkw, Effizienzsteigerung Nebenaggregate Verkehrssicherheit Nutzerakzeptanz (mit BMWi)	Zell- und Batterieentwicklung (Batteriekonzepte und-management) neuartige Materialien Produktionsforschung künftiger Batteriegenerationen ausfallsichere Komponenten und Systeme Systemforschung IKT für Energieeffizienz im Elektrofahrzeug Aus- und Weiterbildung	Demonstration und Erprobung zur Ermittlung der Umwelt- und Klimafaktoren Kopplung der Elektromobilität an erneuerbare Energien und deren Netzintegration Umwelt- und Klimakonzepte Markteinführung mit ökologischen Standards Recyclingverfahren, Öko- und Energiebilanzen der Komponenten

Tab. 5-2 Förderschwerpunkte der deutschen Ministerien

Quelle: Eigene Darstellung nach (Bundesregierung 2011)

Bevorrechtigung von Elektrofahrzeugen

Bislang gibt es in Deutschland keine Bevorrechtigung von Elektrofahrzeugen. Nichtmonetäre Anreize wie die privilegierte Verfügbarmachung von Parkplätzen oder die Nutzung von Busspuren sind im Referentenentwurf für ein Elektromobilitätsgesetz vorgesehen, das 2015 in Kraft treten könnte. Der Gesetzentwurf stellt eine Ermächtigungsgrundlage für Kommunen dar, gekennzeichneten Elektrofahrzeugen Privilegien beim Zugang zu Parkflächen oder zufahrtsbeschränkten Straßen zu gewähren. Adressiert werden BEV sowie PHEV mit

CO₂-Emissionen unter 50 g/km oder einer Mindestreichweite von 30 km (ab Zulassungsjahr 2017: 40 km) (Bundesregierung 2014). Kritiker befürchten, dass durch die sehr großzügige Reichweitenregelung ohne eine „und-Verknüpfung“ mit den CO₂-Emissionen vor allem hochmotorisierte PHEVs profitieren, deren Bevorrechtigung den öffentlichen Diskurs zu Elektromobilität negativ prägen könnte (BEM 2014).

Kaufanreize

Direkte finanzielle Anreize für den Kauf von Elektrofahrzeugen bestehen in Deutschland nicht. Als indirekter Kaufanreiz kann die Befreiung von Elektrofahrzeugen von der Kraftfahrzeugsteuer seit 2011 gelten. Diese gilt nur für rein batterieelektrische Fahrzeuge – Plug-In-Hybrid oder Range-Extender-Fahrzeuge sind von der Vergünstigung ausgenommen. Elektrofahrzeuge, die zwischen Mai 2011 und Ende 2015 zugelassen werden, sind für zehn Jahre befreit, für den Zulassungszeitraum 2016 bis 2020 gilt die Befreiung nur für fünf Jahre, ebenso wie für vor 2011 zugelassene Elektrofahrzeuge (§ 3d KraftStG). Der Subventionseffekt ist allerdings eher gering: Gegenüber der vorherigen Besteuerung von Elektrofahrzeugen nach Leergewicht (28 Euro pro 100 kg) bedeutet die Regelung nur eine vergleichsweise geringe Entlastung. Etwas stärker ist der Effekt der Änderung der Dienstwagenbesteuerung: Bei der monatlichen Besteuerung der Nutzer mit einem Prozent des Listenpreises können pro kW Batterieleistung 500 Euro abgezogen werden (bei Zulassung bis Ende 2013; für später zugelassene Fahrzeuge verringert sich der Betrag pro kW um 50 Euro jährlich), was bei einer Batterieleistung von 20 kW eine Verringerung des zu versteuernden Listenpreises um 10 000 Euro bedeutet.

Öffentliche Infrastruktur

Im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität ist das Ziel formuliert, bis 2020 eine flächendeckende Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland aufzubauen und Elektrofahrzeuge über ein „Smart Grid“, welches Rückspeisungen ermöglicht, ins Stromnetz einzubinden. Bislang erfolgte der Aufbau der Ladeinfrastruktur dezentral organisiert und wurde im Rahmen von regionalen Modellprojekten durch Initiativen von Energieanbietern oder einzelnen Fahrzeugherstellern umgesetzt. Die verfügbare Ladeinfrastruktur konzentriert sich dabei insbesondere auf die Regionen, in denen Modellprojekte umgesetzt wurden oder werden. Im Rahmen des BMWi-geförderten Projekts SLAM kooperieren seit 2014 mehrere große deutsche Automobilhersteller, weitere Unternehmen und Hochschulen beim Aufbau eines flächendeckenden Schnellladenetzes in Deutschland, das bis 2017 400 Ladestationen umfassen soll (BMW, 2014).

Zum Jahresende 2013 waren laut einer Mitgliederumfrage des Branchenverbandes der Energiewirtschaft BDEW 2 122 Ladestationen mit Lademöglichkeiten für 4 454 Elektrofahrzeuge verfügbar (BDEW 2014).

Forschungsförderung und Institutionen

Die Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität wird als essentiell angesehen, um durch überlegene Produkte die Technologieführerschaft zu erreichen und Deutschland als Leitanbieter für Elektrofahrzeuge zu etablieren. Gleichzeitig sollen die Fahrzeuge durch technische Fortschritte für den Nutzer attraktiver (etwa durch größere Reichweiten oder kürzere Ladezeiten) und kostengünstiger werden und so zur Leitmarktentwicklung beitragen (NPE 2012).

Nationale Förderung von Forschung, Entwicklung und Demonstration

Verschiedene umfangreiche Förderprogramme für Forschung, Entwicklung und Demonstration wurden bereits aufgelegt – teilweise in der Verantwortung einzelner Ministerien, teilweise durch einen gemeinsamen Ressortkreis (vgl. Tab. 5-3). Für den Zeitraum 2009 bis 2011 hat die Bundesregierung im Rahmen des Konjunkturpakets II 500 Mio. Euro zur Förderung der Elektromobilität zur Verfügung gestellt. Das vom BMVBS (heute BMVI) koordinierte Forschungs- und Demonstrationsprogramm „Modellregionen Elektromobilität in Deutschland“ wurde in der ersten Phase mit insgesamt 130 Mio. Euro gefördert (s.u.) (BMVI 2014). Als weiteres Demonstrationsvorhaben wurde 2011 das Förderprogramm „Schaufenster Elektromobilität“ mit einem Fördervolumen von 180 Mio. Euro aufgelegt (DDI 2014). Neben diesen eher auf Demonstration und Erprobung in der Praxis ausgerichteten Programmen fördert die Bundesregierung Forschung und Technologieentwicklung insbesondere durch das BMBF.

Insgesamt trägt das BMBF mit mehr als 50% der Fördergelder den größten Anteil der Fördermaßnahmen der Bundesregierung zur Weiterentwicklung der Elektromobilität und fördert insbesondere die Weiterentwicklung der Komponenten. Die vom BMBF bis 2014 bereitgestellte Gesamtförderung von 627 Millionen Euro floss vor allem in die Weiterentwicklung der Antriebstechnologie (41 %) und der Batterietechnologie (31 %). (Fernholz 2014). Im Jahr 2013 laufende Projekte zur Batterieforschung förderte das BMBF mit insgesamt über 130 Mio. Euro (BMF 2013). Die Batterie, als ein in vielerlei Hinsicht begrenzender Faktor der E-Fahrzeuge, sowie Energieeffizienz und Sicherheit sind derzeit Hauptforschungsthemen. Im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien werden insbesondere die Entwicklung von Produktionstechnologien und die Erhöhung der Eigensicherheit der Batterien gefördert. Daneben wird die Forschung an Post-Lithium-Batterien unterstützt. Weitere Forschung im Bereich der Batterie, wie die Erforschung neuer Kathoden- und Anodenmaterialien, wird unter anderem vom BMWi gefördert. Auch der Aufbau von Forschungsk Kooperationen, wie beispielsweise durch die „Innovationsallianz Lithium-Ionen-Batterie 2015“ oder dem „Kompetenzzentrum Batterie“, wird vom BMBF und BMWi gefördert.

Ministerium	Zugewiesene Mittel 2012	Programme/Schwerpunkte (Auswahl)
BMBF	114,7 Mio. Euro	<ul style="list-style-type: none"> • Schaufenster Elektromobilität • Batterieforschung • Energieeffizienztechnologien (STROM und STROM 2) • Aus- und Weiterbildung
BMWi	54,8 Mio. Euro	<ul style="list-style-type: none"> • Schaufenster Elektromobilität • IKT für Elektromobilität • ELEKTRO POWER • ERA-NET Plus on Electromobility • CROME • ATEM
BMVBS	37,8 Mio. Euro	<ul style="list-style-type: none"> • Schaufenster Elektromobilität • Modellregionen Elektromobilität • ERA-NET Plus on Electromobility • CROME
BMU	12,7 Mio. Euro	<ul style="list-style-type: none"> • Schaufenster Elektromobilität • Erneuerbar Mobil
Gesamt	220 Mio. Euro	

Tab. 5-3 Budget der verschiedenen Ministerien zur Weiterentwicklung der Elektromobilität im Jahr 2012

Quelle: (BMF 2013)

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt sind Effizienztechnologien wie verbesserte Leistungselektronik, E-Maschinen, Thermomanagement oder Leichtbau. Zentrales Förderprogramm ist hier das BMBF Programm „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität – STROM“. Die Netzintegration von Elektrofahrzeugen wird insbesondere vom BMWi im Förderschwerpunkt IKT für Elektromobilität gefördert (BMF 2013).

Neben den Fördermitteln, die in die Forschung und Entwicklung zur Elektromobilität fließen, hat die deutsche Automobilindustrie zugesagt, ca. 8 bis 10 Milliarden Euro in die Entwicklung der Elektromobilität zu investieren. Insgesamt sollen die Investitionen der deutschen Wirtschaft in die Entwicklung der Elektromobilität 17 Milliarden Euro umfassen (NPE 2012).

Akteure

Wesentliche Akteure in der Forschung und Entwicklung zur Elektromobilität sind Universitäten und Forschungsinstitute sowie Entwicklungsabteilungen der Automobilkonzerne. Die vom BMBF bereitgestellten Fördermittel zur Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität flossen annähernd zu gleichen Teilen in die Industrie und Forschungsinstitutionen. OEMs erhielten 16 %, Zulieferer 30 % der Fördermittel. 41 % floss in die institutionelle Forschung (Fernholz 2014).

Wichtige Akteure der Forschung sind die Institute der Fraunhofer-Gesellschaft und die Helmholtzinstitute, da sie eine wichtige Vernetzungsfunktion übernehmen. Die Fraunhofer-Gesellschaft ist die größte Forschungsorganisation für anwendungsorientierte Forschung in Europa. Verschiedene Fraunhofer Institute arbeiten zur Zeit zu unterschiedlichen Forschungsthemen zur Elektromobilität (Fraunhofer-Gesellschaft 2014). Neben technologischer

Forschung und Entwicklung sind in Deutschland verschiedene Institutionen im Bereich der wirtschafts-, sozial- oder umweltwissenschaftlichen Forschung zur Elektromobilität tätig.

Forschungsschwerpunkte - Leuchttürme der NPE

Im Regierungsprogramm Elektromobilität hat die Bundesregierung auf Empfehlung der NPE sechs Themenfelder benannt, in denen Forschung und Entwicklung in „Leuchtturmprojekten“ mit bis zu 1 Mrd. Euro gefördert werden soll (Bundesregierung 2011). Es werden herausragende FuE-Projekte in den Themenfeldern IKT, Mobilitätskonzepte, Ladeinfrastruktur und Netzintegration, Recycling und Ressourceneffizienz, Energiesysteme und Energiespeicherung sowie Antriebstechnik und Leichtbau gefördert. In Tab. 5-4 werden die Gesamtprojektbudgets in den sechs Themenfeldern dargestellt. Die Zahlen basieren auf dem dritten Fortschrittsbericht der NPE und umfassen abgeschlossenen, laufende und neu-initiierte Projekte mit Stand 2012. Eine Förderquote von 40 % wurde angenommen (NPE 2012). In den anwendungsorientierten Projekten arbeiten wissenschaftliche Einrichtungen, KMU sowie Großunternehmen zusammen.

Batterie	21 Projekte	601 Mio. Euro Projektbudget
Antriebstechnologie	74 Projekte	505 Mio. Euro Projektbudget
Fahrzeugintegration	36 Projekte	368 Mio. Euro Projektbudget
Leichtbau	43 Projekte	300 Mio. Euro Projektbudget
Recycling	nicht verfügbar	90 Mio. Euro Projektbudget
IKT & Infrastruktur	32 Projekte	300 Mio. Euro Projektbudget
Gesamt		2 164 Mio. Euro Projektbudget

Tab. 5-4 Förderprojekte in den sechs Leuchttürmen der NPE in Deutschland mit Stand 2012

Quelle: (NPE 2012)

Der Leuchtturm Batterie hat insgesamt das höchste Projektvolumen und macht ca. 28 % der Investitionen aus (Abb. 5-1). Innerhalb des Leuchtturms Batterie entfällt das größte Projektbudget auf die Entwicklung von Prozesstechnologie für Massenfertigung (NPE 2012). Auf den Bereich Antriebstechnologie entfallen ca. 23 % der Investitionen, wobei über die Hälfte der Vorhaben in diesem Themenbereich bereits 2012 abgeschlossen waren. Thematisch wird im Leuchtturm Antriebstechnologie zu E-Maschinen, Leistungselektronik, Antriebssysteme und Produktionstechnologie geforscht. Beim Leuchtturm Fahrzeugintegration zum systemischen Ansatz aus Fahrzeugsicht, der ca. 17 % der Investitionen ausmacht, wurden ebenfalls viele Projekte bereits vor 2012 abgeschlossen. Weitere Forschungsschwerpunkt sind Leichtbau sowie IKT und Infrastruktur mit jeweils ca. 14 % der Investitionen. Recycling wurde zwar ebenfalls als Leuchtturm definiert, jedoch entfallen nur ca. 4 % der Investitionen auf dieses Forschungsfeld.

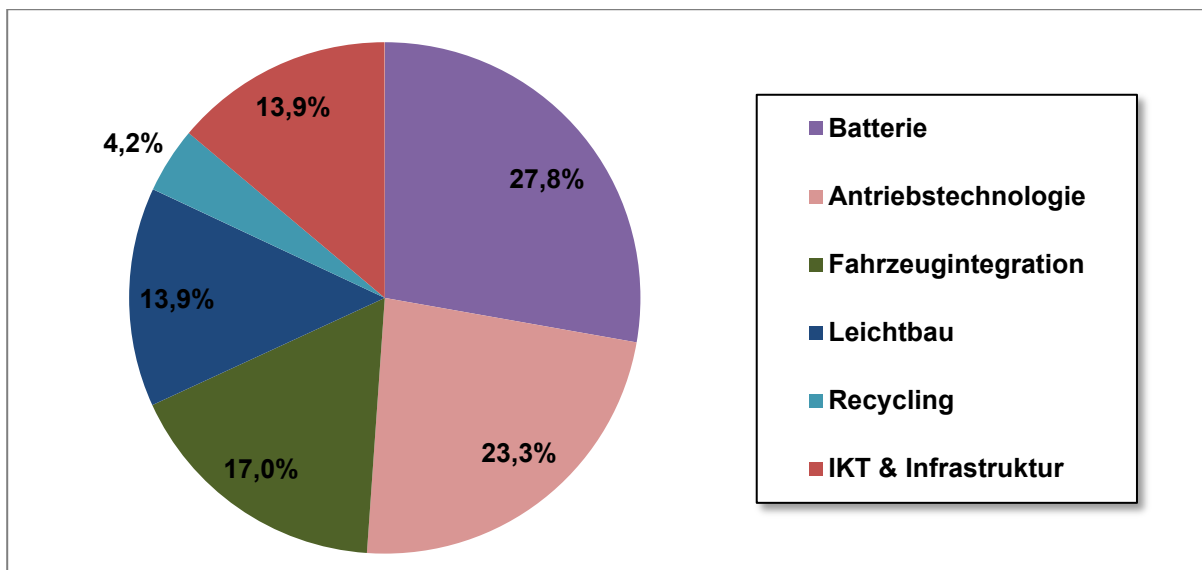


Abb. 5-1 Verteilung der Projektbudgets auf Forschungsbereiche in Deutschland mit Stand 2012

Quelle: Eigene Darstellung nach (NPE 2012)

Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)

Mit dem Ziel, Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich Gesamtfahrzeugsysteme, Batterieentwicklung und -integration, Energiemanagement sowie Werkstoff- und Materialforschung zu unterstützen, wurden Mittel mit einem Gesamtvolumen von 120 Mio. Euro im Forschungsprogramm „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität“ vom BMBF bereitgestellt. Die Förderprojekte sind im Herbst 2011 angelaufen mit überwiegend einer dreijährigen Laufzeit und umfassen 110 Verbünde (BMBF 2010, BMBF 2012, Fernholz, 2014). In 2012 wurde mit STROM 2 eine Fortsetzung des Programms gestartet, mit 8 Verbänden und einer Laufzeit von 2012 bis 2016 (Fernholz 2014). Das STROM-Programm soll neue Innovationspartnerschaften zwischen Wirtschaft und Wissenschaft fördern und adressiert Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft, Hochschulen und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen.

Innovationsallianz Lithium-Ionen-Batterie 2015

Batterieforschung wird insbesondere auch im Rahmen der Innovationsallianz Lithium-Ionen-Batterie (LIB2015) vorangetrieben mit dem Ziel, Lithium-Ionen-Akkus hinsichtlich Speicherpotential, Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Sicherheit zu optimieren. Die LIB2015 wurde Ende 2007 gegründet und vom BMBF mit 60 Mio. Euro gefördert (AK et al. 2011). Die Allianz setzt sich zusammen aus Vertretern von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft. Rund 60 Unternehmen oder Universitäten sind Mitglieder der Allianz. Verschiedene Industrieunternehmen haben sich verpflichtet, insgesamt 360 Mio. Euro für FuE im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien zu investieren. Die Innovationsallianz wird durch einen Roadmapping-Prozess durch das Fraunhofer ISI begleitet. Im Rahmen der STROM-Förderbekanntmachung baut das „Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität“ (EMOTOR) auf das LIB2015-Roadmapping des Fraunhofer ISI auf. Es umfasst ein internationales Monitoring und die Untersuchung wissenschaftlich-technologischer Trends, industrieller-wirtschaftlicher Entwicklungen, ökologischer Bewertungen sowie politischer Rahmenbedingungen zur Ableitung von Handlungsempfehlungen für deutsche Akteure in Wissenschaft, Wirtschaft und Politik (Modellregionen).

Demonstrationsprojekte Modellregionen Elektromobilität und Schaufenster Elektromobilität

Seit Veröffentlichung des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität hat die Bunderegierung verschiedene große Förderprogramme zur Demonstration der Elektromobilität aufgelegt. Im Rahmen des vom BMVBS (heute BMVI) koordinierten Forschungs- und Demonstrationsprogramms „Modellregionen Elektromobilität in Deutschland“ wurden in der ersten Phase der Modellregionen über 190 Projekte in acht Modellregionen durchgeführt. In der zweiten Phase der Modellregionen - seit 2012 - werden vier große Modellregionen und vier Regionen mit Modellprojekten gefördert. Der thematische Schwerpunkt der zweiten Phase liegt auf der Förderung des elektrifizierten ÖPNV, von Sharing-Systemen, Nutzfahrzeugen und der Ladeinfrastruktur. Die Modellregionen sollen Knowhow der Akteure in den Regionen bündeln und Elektromobilität für die Öffentlichkeit erlebbar machen (BMVI 2014). Koordiniert werden die Modellregionen von der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW).

In der ersten Phase der Modellregionen wurden ca. 2 000 Fahrzeuge eingesetzt und 1 700 Ladepunkte aufgebaut. In der zweiten Phase wurden bis Ende 2013 zusätzlich ca. 1 800 Fahrzeuge eingesetzt und 1 000 Ladepunkte installiert (Sévin 2014).

Als weiteres Demonstrationsvorhaben wurde 2011 das ressortübergreifende Förderprogramm „Schaufenster Elektromobilität“ durch BMW, BMVI, BMBF und BMUB mit einem Fördervolumen von 180 Mio. Euro aufgelegt. In vier Schaufensterregionen (Baden-Württemberg, Bayern-Sachsen, Berlin-Brandenburg und Niedersachsen) werden im Zeitraum von 2012 bis 2016 insgesamt 90 Verbundprojekte gefördert, die Elektromobilität für die Öffentlichkeit erfahrbar machen sollen (Tab. 5-4). Die Schaufensterprojekte werden von den teilnehmenden Unternehmen mitfinanziert (DDI 2014).

	Anzahl bundes-geförderter Projekte	Anzahl landes-geförderter Projekte	Förderbudget in Mio. Euro Bund (und Länder)	Inhaltliche Schwerpunkte	Sonstiges
Living Lab BW E-Mobil (BW)	24 + 7 assoziiert	13	45	Intermodalität Flotten & gewerbliche Verkehre Infrastruktur und IKT Wohnen und Elektromobilität Aus- & Weiterbildungsangebote	Neben Bundesförderung fördern auch Land und Region Stuttgart. Projekt-mittel beteiligter Unternehmen ergänzen das Projektvolumen. Bis 2015 sollen 2 000 Elektrofahrzeuge auf die Straße gebracht und 1 000 Ladepunkte installiert werden.
Internationales Schaufenster der Elektromobilität (B/BB)	20 + 2 assoziiert	9	36 (B/BB: 20)	Abstimmung der Verkehrsangebote wie ÖPNV oder Carsharing sowie Verbindung mit einem intelligenten Stromnetz	Beteiligte Unternehmen bringen 34 Millionen Euro ein.

Unsere Pferde- stärken werden elektrisch (NI)	20 + 5 assoziiert	9	38	Intermodale Mobilitäts- und Ladekonzepte Zusätzliche Produktion erneuerbarer Energie Entwicklung/Produktion von E-Fzg. und Komponenten Internationale Messen und Kooperationen	Land und beteiligte Pro- jektpartner stellen weitere Mittel bereit.
Elektro- mobilität verbindet (BY/SA)	26 + 1 assoziiert	11	39 (BY:15/SA: 15)	Langstreckenmobilität & internationale Verbindungen Urbane und ländliche Mobilität Aus- & Weiterbildungs- angebote	Projektmittel beteiligter Unternehmen ergänzen Projektvolumen

Tab. 5-5 Überblick über die vier Schaufensterregionen im Demonstrationsprogramm "Schaufenster Elektromobilität"

Quelle: (DDI 2014)

FuE Förderung auf Landesebene am Beispiel Kompetenzzentren Elektromobilität in NRW

Zusätzlich zur Förderung auf Bundesebene gibt es in verschiedenen Bundesländern Initiativen zur Förderung der Elektromobilität. So wurden etwa in Nordrhein-Westfalen drei technisch orientierte Kompetenzzentren gegründet. Die Kompetenzzentren sollen landesweiten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten für Elektromobilität zusammenzuführen und eine zentrale Anlaufstellen für die Forschungs- und Industriepartner sein. Das Kompetenzzentrum Infrastruktur und Netze ist an der TU Dortmund angesiedelt. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten befassen sich mit der Bereitstellung von Regelenergie für Verteilnetze sowie der Versorgung mit Lademöglichkeiten, der Abrechnung zum Laden benötigter Energie und der Entwicklung von Schnittstellen zwischen Fahrzeug und Ladeinfrastruktur. Das Kompetenzzentrum Fahrzeugtechnik ist an der RWTH Aachen angesiedelt und bündelt Kompetenzen in den Bereichen Antriebstechnologie, Leichtbau und Fahrzeugintegration. Das Kompetenzzentrum Batterie am MEET Batterieforschungszentrum der Westfälischen Wilhelms-Universität arbeitet zur Weiterentwicklung der Lithium-Ionen Technologie und der Entwicklung neuartiger Batteriesystems (ETN 2015).

Wirtschaft und Industrie

Mit einem Umsatz von 361,6 Milliarden Euro (Statistisches Bundesamt 2014a) und 755 983 Beschäftigten (Statistisches Bundesamt 2014b) im Jahr 2013 ist die Automobilindustrie für die deutsche Wirtschaft eine der bedeutendsten Branchen. Sie leistet einen erheblichen Beitrag zur industriellen Bruttowertschöpfung und erwirtschaftet einen großen Teil der Exportüberschüsse Deutschlands (Meissner 2014).

Für die Entwicklung der Elektromobilität investiert die deutsche Automobilindustrie in der Marktvorbereitungsphase bis 2014 bis zu 17 Mrd. Euro. Davon fließen ca. 10 bis 12 Mrd. Euro in die Entwicklung alternativer Antriebe, wovon ca. 80 % in die weitere Entwicklung der Elektromobilität investiert werden. Diese Entwicklung wird durch die Investitionen weiterer Branchen, wie beispielsweise des Maschinen- und Anlagenbaus, der Elektrotechnik und

Elektronik, den Metallen beziehungsweise der Metallverarbeitung sowie durch Investitionen aus dem Energie- und Verkehrssektor ergänzt (NPE 2012).

Die 2012 umsatzstärksten deutschen Automobilhersteller waren die Volkswagen AG (192,7 Mrd. Euro) inklusive der Porsche AG (13,8 Mrd. Euro) und der Audi AG (48,7 Mrd. Euro), die Ford-Werke GmbH (93,1 Mrd. Euro), die BMW AG (76,8 Mrd. Euro), Mercedes Benz (19,7 Mrd. Euro), und die Opel AG (9,9 Mrd. Euro) (siehe Websites der jeweiligen Automobilhersteller 2013). Traditionell sind die OEMs für die Forschung und Entwicklung, die Markenführung und die Gesamtmontage von Fahrzeugen verantwortlich. Die umsatzstärksten Automobilzulieferer waren 2013 Continental (33,3 Mrd. Euro), Bosch (30,7 Mrd. Euro), ZF Friedrichshafen (17,2 Mrd. Euro) und Mahle (9,9 Mrd. Euro) (Berylls Strategy Advisors 2014). Diese sind vor allem im Bereich der FuE und Produktion von (elektronischen) Komponenten und leichten Materialien tätig.

Die HEV-, PHEV- und BEV-Modelle deutscher Automobilhersteller sind mit Angabe des Zeitpunkts der Markteinführung in Tab. 5-6 aufgeführt.

Hersteller	Modellbezeichnung	Markteinführung
HEV-Modelle		
Audi (VW Group)	Q5 Hybrid	2011
	A8 Hybrid	2012
	A6 Hybrid	2012
BMW	ActiveHybrid 7/7L	2010
	ActiveHybrid 5	2012
	ActiveHybrid 3	2012
	Active Hybrid X6	2010
Daimler / Mercedes-Benz	S400 HYBRID/S300 BlueTec HYBRID	2013
	E300 BlueTec HYBRID/ E400 HYBRID	2012
	ML450 Hybrid	2009-2011
Porsche	Cayenne S Hybrid	2010
	Panamera S Hybrid	2011
PHEV-Modelle		
BMW	i8	Herbst 2014
Opel / Vauxhall (GM Group)	Ampera	2012
Porsche (VW Group)	Panamera S E-Hybrid	2013
	918 Spider	2013
	Cayenne S E-Hybrid	Sommer 2014
VW	XL 1	Frühjahr 2014
BEV-Modelle		
BMW	Mini E	2009
	Active E	2011
	i3	2013
BMW Brilliance	Zinoro 1E	02/2014

	A-class E-CELL	2010
Daimler/ Mercedes-Benz	SLS AMG Electric Drive	2013
	B class Electric Drive	06/2014
Smart (Daimler Group)	fortwo electric drive	2012
	e-up!	2013
VW	e-Golf	Herbst 2014

Tab. 5-6 HEV-, PHEV- und BEV-Modelle deutscher Automobilhersteller mit Angabe der Markteinführung

Quelle: Eigene Darstellung nach (MarkLines 2014)

Wie aus der Tabelle hervorgeht, konnten bis zum Herbst 2014 über 15 elektrische Fahrzeugmodelle deutscher Automobilhersteller auf den Markt gebracht werden (siehe Tab. 5-6). Jedoch werden nicht alle diese Modelle in Deutschland produziert. Beispielsweise wird der smart fortwo electric drive in Frankreich gefertigt, der Opel Ampera wird zusammen mit dem baugleichen Chevrolet Volt in den USA hergestellt.

Im Jahr 2013 konnte die inländische Produktion von BEV und HEV mit insgesamt 32 775 Fahrzeugen gegenüber den Vorjahren deutlich gesteigert werden (siehe Abb. 5-2) – auch wenn sie noch weit hinter der Produktion konventioneller Fahrzeuge (5 439 904) liegt (VDA, 2014). Der Anteil der HEV-, PHEV- und BEV-Fahrzeuge an den gesamten produzierten Fahrzeugen entspricht im Jahr 2013 einem Anteil von 0,6 % (siehe Abb. 5-2).

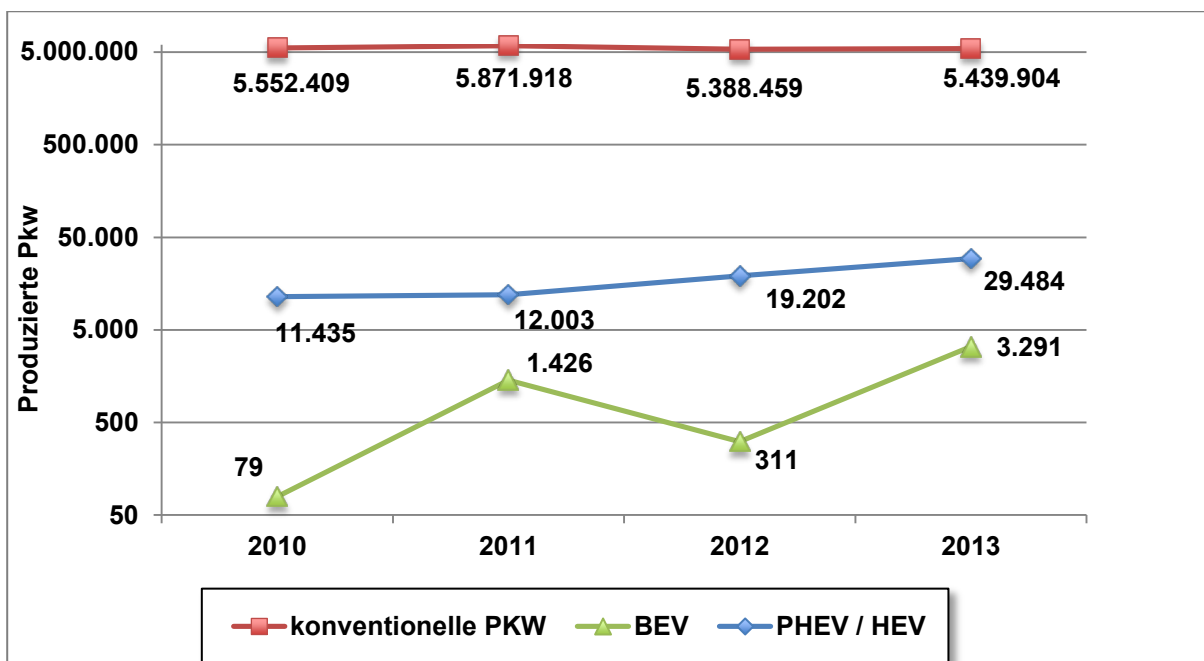


Abb. 5-2 Produktion von HEV / PHEV, BEV und konventionellen Fahrzeugen in Deutschland 2010 - 2013

Quelle: Eigene Darstellung nach (VDA 2014)

Durch die Abdeckung der klassischen metallbearbeitenden Prozesstechnologien, langjährige Erfahrungen in den verschiedenen Produktionstechnologie und der hohen Automatisierungskompetenz bei Kernprozessen ist der Maschinen- und Anlagenbau in Deutschland auch im Bereich der Elektromobilität gut aufgestellt (Schlick et al. 2011).

Trotz verschiedener Kooperationen zwischen Automobilherstellern und Zulieferbetrieben und hohem Standardisationspotential werden die Elektromotoren modellspezifisch entwickelt und gefertigt. Zwischen 1991 und 2008 stammten 26 % der Patente im Bereich Elektromotoren aus Deutschland, wodurch Deutschland neben Japan eine Spitzenposition einnahm und neben China zu den wichtigsten Exporteuren von Elektromotoren zählt (Pötz & Eichhammer 2011). In der im Rahmen der STROM Begleitforschung durchgeführten Patentanalyse verschiedener Technologiefelder im Bereich der Elektrischen Maschine, lag Deutschland mit 11 % der angemeldeten Patente hinter Japan, den USA und China (vgl. Abschnitt 4.2.2). Zu den wichtigsten Herstellern von Elektromotoren in Deutschland zählen Continental, Siemens, Bosch und Volkswagen (Proff & Kilian 2012).

Im Bereich der Leistungselektronik zählen Bosch, Continental, Siemens und Infineon zu den wichtigsten Produzenten in Deutschland und haben auch hohe internationale Relevanz. Daneben zählen noch EPCOS und VW zu wichtigen Herstellern, und verschiedene kleine und mittlere Unternehmen sind im Bereich der Leistungselektronik aktiv (Proff & Kilian 2012).

Unternehmen wie BMW, VW und Daimler investieren zudem in die Zusammenarbeit im Bereich der Leichtbaumaterialien wie Carbon (Beispielsweise kooperiert BMW mit SGL Carbon) (Proff & Kilian 2012).

Die Mehrheit der Automobilhersteller betrachtet Batterietechnik als wichtigste Systemkomponente der Elektromobilität, die es in die eigenen Forschungsanstrengungen bzw. Produktionsprozesse zu integrieren gilt. Beispielsweise haben der deutsche Automobilhersteller Volkswagen und die amerikanische General Motors-Gruppe beschlossen, Batteriesysteme selbst zu produzieren. Auch viele Zulieferer wie beispielsweise Continental konzentrieren sich auf die Produktion kompletter Batteriesysteme und Module, um sich eine starke Marktposition zu sichern und Skaleneffekte zu generieren (Proff & Kilian 2012).

Bei der Produktion von Lithium-Ionen-Batterien nehmen deutsche Hersteller jedoch keine relevante Marktposition ein. In Deutschland sind z.Z. die vier Unternehmen Li-Tec, Gaia, Varta Microbatteries und Lechlanche mit einer Zellproduktion vertreten (Fraunhofer ISI 2013).

Verschiedene deutsche Unternehmen sind Kooperationen und Joint Ventures mit anderen Unternehmen eingegangen. Beispielhaft genannt sei hier Evonik, welches in der Herstellung von Lithium-Ionen Batteriepaketen in dem Joint Venture Deutsche Accumotive mit Daimler zusammenarbeitet. Auch im Bereich der Batterieforschung wurden frühzeitig Kooperationen und Joint Ventures geschlossen. So arbeitet z.B. seit 2009 Varta Microbatteries mit VW im Joint Venture Volkswagen Varta Microbattery zusammen, sowie seit 2013 Continental und SK Innovation im Joint Venture SK Continental Emotion (Fraunhofer ISI 2013).

Durch den internationalen Wettbewerb werden in vielen Feldern strategische Kooperationen zwischen Automobilherstellern und Zulieferbetrieben mit entsprechenden Kompetenzen in relevanten Gebieten der Technik verfolgt. Beispielhaft genannt werden können hier strategische Kooperationen zwischen Daimler und Bosch, Volvo und Siemens und zwischen General Motors und LG (Koch & Meisinger 2011).

Verbraucher und Marktentwicklung

Deutschland hatte im Januar 2014 eine Flotte von 53 Millionen registrierten Kraftfahrzeugen; den Großteil hiervon machen 43,9 Millionen registrierte Pkw aus (KBA 2014a). Im Jahr 2013

wurden 2,95 Million Pkw neu zugelassen. Trotz leicht rückläufiger Zulassungszahlen gegenüber 2012 stellt Deutschland innerhalb der EU den größten Pkw-Markt dar (ACEA 2014).

Benzin- und Dieselfahrzeuge machen zusammen über 98 % der deutschen Pkw-Flotte aus (siehe Abb. 5-3). Nur 0,22 % der Flotte sind elektrifizierte Fahrzeuge, von denen Hybride (HEV und PHEV¹¹) mit 85 375 den Großteil ausmachen. Bis Januar 2014 waren in Deutschland insgesamt 12 156 BEV registriert (KBA 2014a).

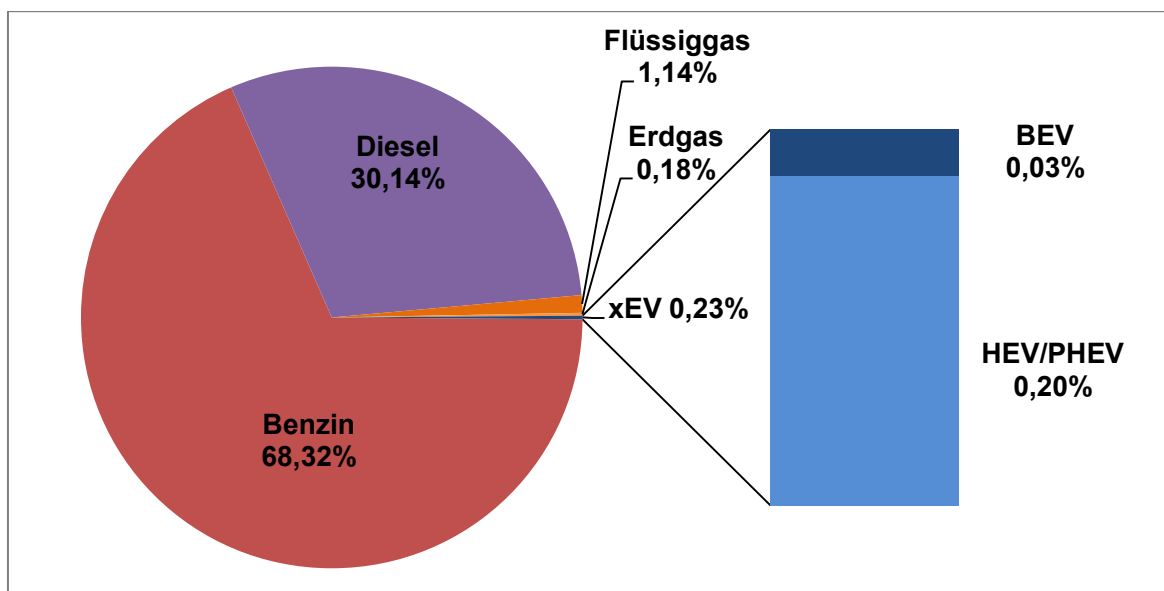


Abb. 5-3 Pkw-Bestand in Deutschland im Januar 2014 nach Kraftstoffarten

Quelle: eigene Darstellung nach KBA 2014a

Bei der Entwicklung der Neuregistrierungen lässt sich jedoch ein positiver Trend bei den elektrifizierten Fahrzeugen feststellen. Im Jahr 2008 wurden nur 6 500 hybridelektrische Fahrzeuge neu zugelassen. Seitdem stiegen die jährlichen Zulassungen kontinuierlich an (siehe Abb. 5-4). 2013 wurden 26 348 hybridelektrische Fahrzeuge zugelassen, davon 1 385 PHEV. Dies wurde 2014 mit 27 435 HEV/PHEV Neuzulassungen noch übertroffen. Damit erreichten HEV einen Anteil von 0,9 % unter den Neuzulassungen. Rein batterieelektrische Fahrzeuge weisen ebenfalls starke Wachstumsraten bei den Neuzulassungen auf. Zwischen 2008 und 2011 vervierfachten sich die Zulassungszahlen jährlich - bei geringen absoluten Neuzulassungen - und erreichten 2 154 Zulassungen in 2011. Auch in den Folgejahren fand ein kontinuierliches Wachstum der Neuzulassungen statt. 2014 wurden 8 522 BEV zugelassen, was einem Marktanteil von 0,3 % entspricht.

¹¹ Das Kraftfahrtbundesamt erfasst HEV seit 2005. In den Daten enthalten sind auch PHEV (inkl. REEV). PHEV-Zulassungen werden erst seit 2013 separat erfasst.

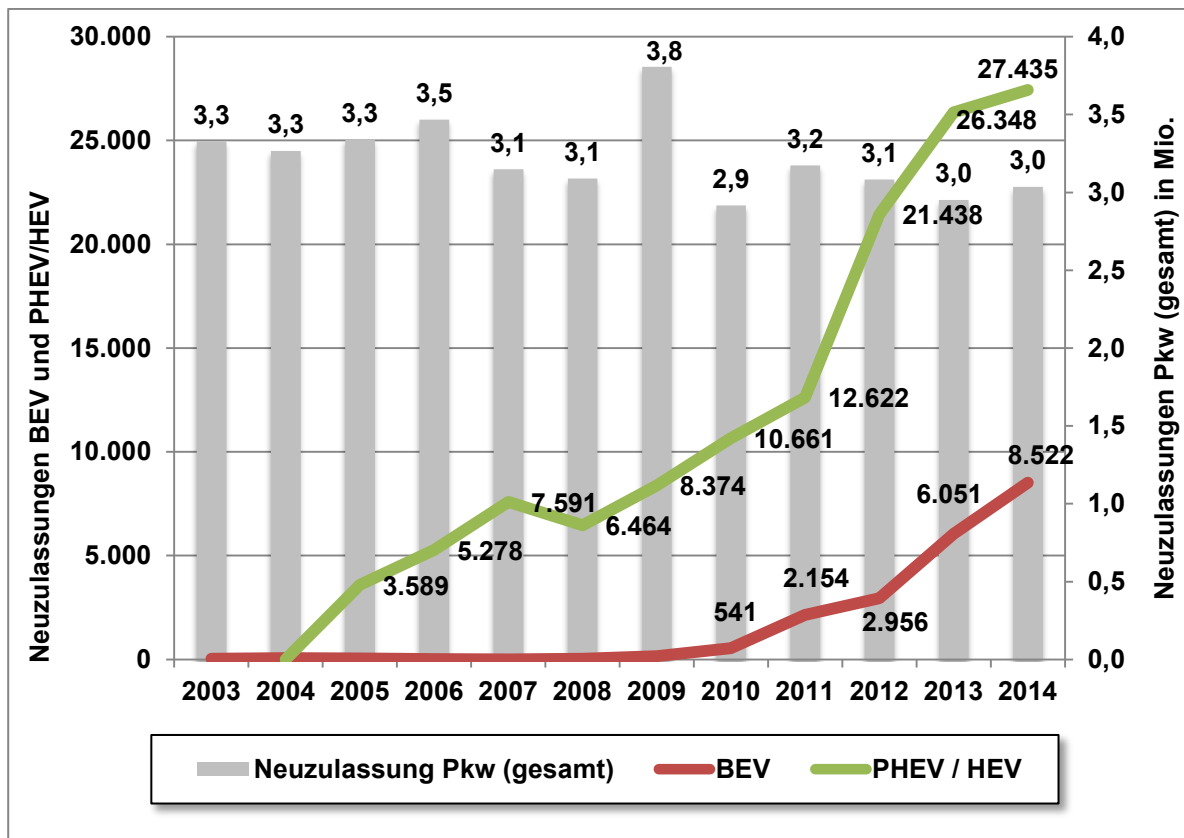


Abb. 5-4 Neuzulassungen von BEV, PHEV / HEV und konventionellen Pkw in Deutschland

Quelle: eigene Darstellung nach (KBA 2014b)

Die 2013 in Deutschland meist verkauften batterieelektrischen Fahrzeugmodelle sind der „Smart Fortwo Electric Drive“ mit einem Marktanteil von 22%, der „Renault Zoe“ mit einem Marktanteil von 17% und der „Nissan Leaf“ mit einem Anteil von 14 % (siehe Abb. 5-5).

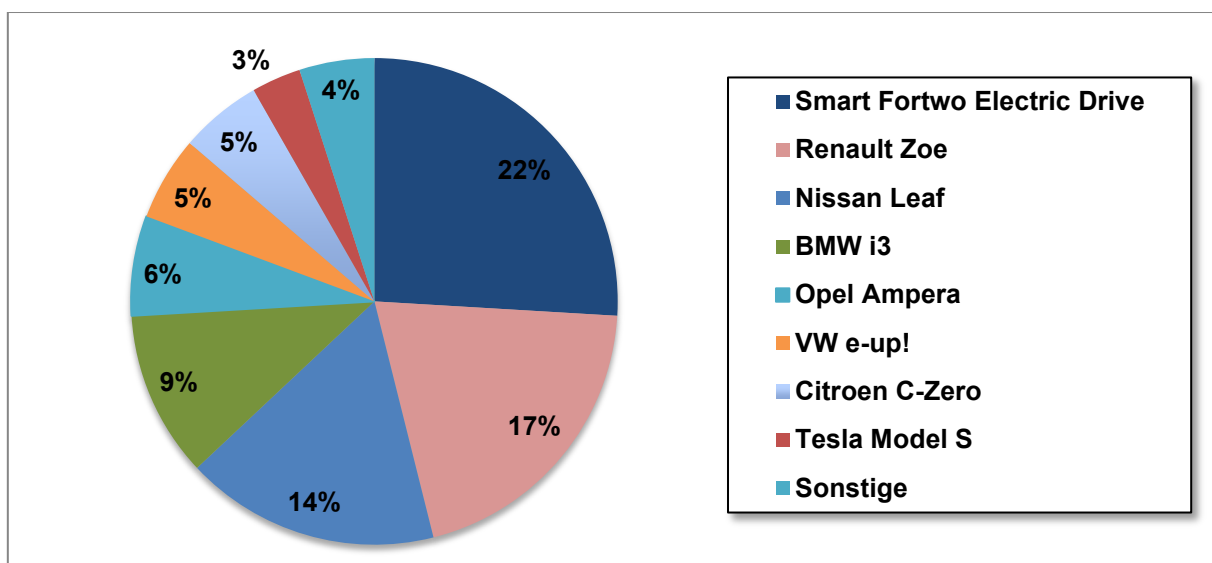


Abb. 5-5 Marktanteile: Meist verkaufte Modelle nach Herstellern im Jahr 2013

Quelle: eigene Darstellung nach (KBA 2014b)

Bei den meisten BEV-Modellen betrug der Anteil an gewerblichen Zulassungen über 90 % (KBA 2014b). Eine Ausnahme bildet hier der „Renault Zoe“ mit nur 70 % gewerblichen Zulassungen. Es kann angenommen werden, dass viele Fahrzeuge für Test- und Demonstrationszwecke zugelassen werden. Außerdem nutzen verschiedene Car-Sharing-Anbieter Elektrofahrzeuge in ihren Flotten. Vollständige Daten zum Einsatz von BEV in Car-Sharing-Flotten liegen nicht vor. Auf Basis verfügbarer Kennzahlen (Müller et al. 2013) ist davon auszugehen, dass ca. acht bis zehn Prozent der registrierten BEVs in Deutschland in Car-Sharing-Flotten eingesetzt werden. Ein wesentlicher Anteil der bestehenden Flotte von Elektrofahrzeugen in Deutschland wurde außerdem im Rahmen von Demonstrationsprojekten angeschafft. In den Projekten Modellregion Elektromobilität I und II wurden 3 000 Fahrzeuge eingesetzt (Sévin 2014).

Verschiedene Studien haben die Nutzerakzeptanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland untersucht (vgl. Bozem et al. 2013, Paternoga et al. 2013, Peters & Hoffmann 2011, Dudenhöffer, 2013, Aral, 2011). Insgesamt zeigt sich, dass die Mehrheit der Nutzer ähnliche Ansprüche an ein Elektrofahrzeug stellt wie an ein konventionelles Fahrzeug (z.B. hinsichtlich Kosten und Reichweite). Die Mehrkostenbereitschaft ist sehr begrenzt (siehe Paternoga et al. 2013, Bozem et al. 2013). Jedoch würden trotz der Mehrkosten mehr potentielle Käufer ein BEV in Betracht ziehen, wenn die Reichweite weit über 150 km liegen würde. Freies Parken oder Zufahrtsbeschränkungen für konventionelle Fahrzeuge würden einige potentielle Nutzer dazu bewegen, Elektrofahrzeuge in Betracht zu ziehen (Bozem et al. 2013). Basierend auf die heutigen Charakteristika hinsichtlich Reichweite, Treibstoffkosten und Anschaffungskosten präferieren Nutzer konventionelle Antriebe. Bei den elektrifizierten Fahrzeugen präferieren die Nutzer in Umfragen PHEV vor HEV und BEV. Die Mehrheit der Nutzer (90 % der Befragten in Bozem et al. 2013) halten Heimlademöglichkeiten für wichtig bis sehr wichtig. Heimladung wird gegenüber Lademöglichkeiten am Arbeitsplatz oder im öffentlichen Raum von deutlich mehr Nutzern als wichtig eingeschätzt.

Die Marktperspektiven für Elektrofahrzeuge in Deutschland wurden in zahlreichen Studien untersucht. Ein Überblick über zentrale Studien wird in Tab. 5-7 gegeben. Die Studien variieren in Methodik, Ausrichtung und Annahmen sowie in den betrachteten Einflussfaktoren, wodurch die Ergebnisse nur begrenzt vergleichbar sind. Je nach Studie und Szenario variiert die Marktdurchdringung von PEV stark (siehe Abb. 5-6). Die meisten Szenarien resultieren in einer relativ geringen Marktdurchdringung von unter 5 % Marktanteil von PEVs im Jahr 2020. Auch in optimistischen Szenarien liegt der Marktanteil nicht über 10 %. Eine stärkere Marktdurchdringung sehen die meisten Studien bis 2030.

Hinsichtlich des Bestands an PEV kommen die meisten Studien zum Ergebnis, dass das Regierungsziel von einer Millionen PEV bis 2020 nicht erreicht wird oder nur durch Implementierung starker Anreize zu erreichen ist. Die NPE nimmt an, dass die PEV Flotte ohne zusätzliche Anreize bis 2020 auf 450 000 Fahrzeuge wachsen wird (NPE 2011). Im Fraunhofer ISI pro-EV-Szenario (Plötz et al. 2013) wird das Ziel ohne zusätzliche Anreize, aber unter der Annahme deutlicher Mehrpreisbereitschaft, Reduktion in den Infrastrukturkosten und einer vorteilhaften Preisentwicklung für Batterien, Kraftstoffe und Strom erreicht.

Insgesamt zeigt sich auch in den Studien die starke Abhängigkeit der Marktentwicklung von Rahmenbedingungen wie Kraftstoffpreisen, Strompreisen und technologischen Entwicklungen sowie dem regulatorischen Rahmen und monetären sowie nicht-monetären Anreizsystemen.

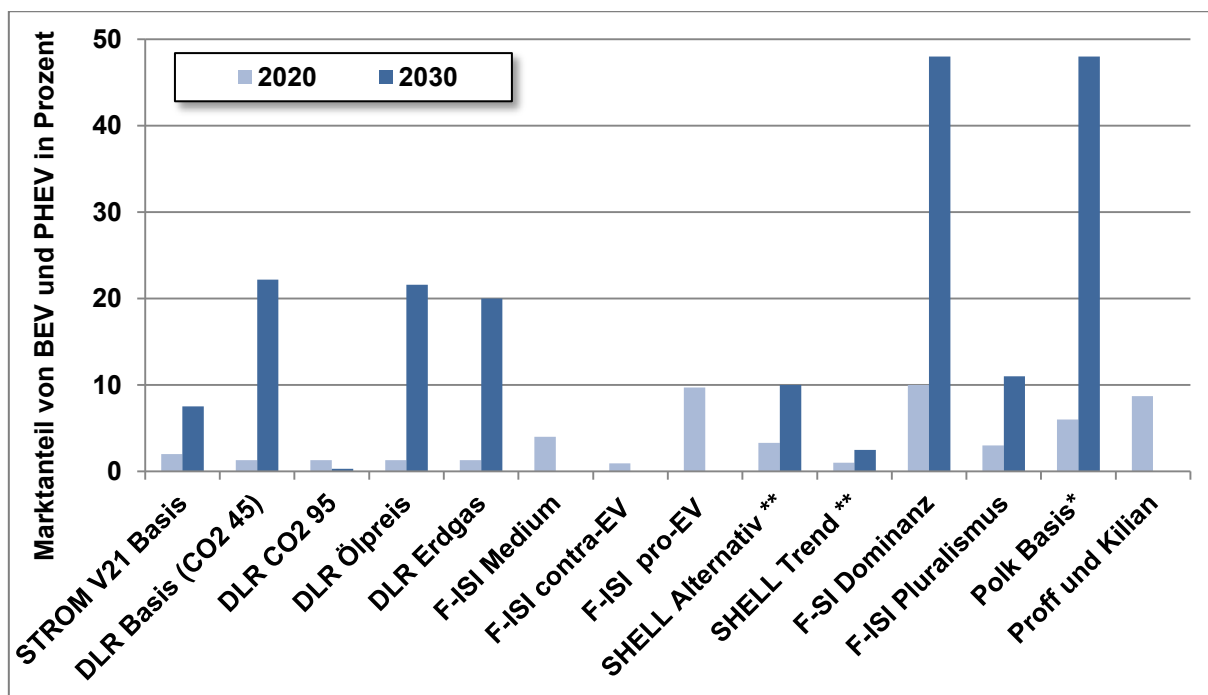


Abb. 5-6 Überblick über die Marktdurchdringung von PEV in Deutschland in verschiedenen Szenarienprojektionen (dargestellt auf Basis des Marktanteils in 2020 und 2030 in verschiedene Szenarioprojektionen) [**nur BEV]

Quelle: Eigene Darstellung nach (Brokate et al. 2013, ESMT 2011, NPE 2011, Shell 2009, Wietschel & Dallinger, 2008, Plötz et al. 2013, Polk 2011, Proff & Kilian, 2012)

Autoren	Studie [in Abb. 5-6 dargestellte Szenarien]	Modell/Leitfragen
STROM Vector 21	STROM - Technologiemonitoring (vgl. Unterkapitel 4.4) [STROM V21 Basis]	Das Vector 21 Modell ermöglicht es, das Kaufverhalten von Neuwagenkunden zu simulieren. Dabei werden verschiedene Kundenprofile sowie unterschiedliche Fahrzeugmodelle berücksichtigt.
Brokate et al. (2013)	Der Pkw Markt bis 2040: Was das Auto von morgen antreibt. (DLR) [DLR Basis, DLR CO ₂ 95, DLR Ölpreis, DLR Erdgas]	Untersuchung der Flottenzusammensetzung bis 2040 vor dem Hintergrund von strengen CO ₂ -Flotten-Limits. Simulation mit dem DLR VECTOR21 Modell.
Plötz et al. (2013)	Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge (Fraunhofer ISI) [F-ISI Medium, F-ISI contra-EV, F-ISI pro-EV]	Untersuchung der Entwicklung des Marktes für Elektrofahrzeuge bis 2020 basierend auf derzeitigem Fahrverhalten, ökonomischen und technischen Daten, sowie Simulationen mit dem erweiterten TCO-Modell ALADIN.
Shell (2009)	Pkw Szenarien bis 2030 [SHELL Alternativ]	Vergleich der Flottenentwicklung und -zusammensetzung in einem Trend-Szenario (Technischer Fortschritt führt zu niedrigeren „Turnover“ Raten) und einem Alternativ-Szenario (starker politischer Rahmen für alternative Antriebe).
Wietschel und Dallinger (2008)	Fraunhofer ISI 2008: Quo vadis Elektromobilität [F-ISI Dominanz, F-ISI- Pluralismus]	Vergleich eines sehr optimistischen Szenarios (Dominanz-Szenario) mit technischem Fortschritt und politischer Unterstützung für Elektrofahrzeuge mit einem Szenario, in dem verschiedene Technologien gleichermaßen entwickelt und gefördert werden (Pluralismus-Szenario).
Polk (2011)	Polk 2011: Electric Vehicle Demand Global forecast through 2030 [Polk Basis]	Untersuchung der Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen (BEV und REEV). Das Basis-Szenario geht von starker Reduktion der Batteriekosten und starkem Ausbau der Infrastruktur aus.
Proff und Kilian (2012)	Competitiveness of the EU Automotive Industry in Electric Vehicles [Proff und Kilian]	Untersuchung der Entwicklung des PEV-Marktes mithilfe eines Marktmodells welches neben ökonomischen und fahrzeugspezifischen Faktoren auch nutzerspezifische Faktoren und politische Rahmensezung berücksichtigt und mit Experteneinschätzungen verifiziert wurde.
ESMT (2011)	MMEM 2011: Marktmodell Elektromobilität	Marktmodell, das verschiedenen Politikmaßnahmen für Elektrofahrzeuge und deren Auswirkungen die Kaufbereitschaft untersucht.
NPE (2011b)	Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität	Verwendung eines TCO-Modells, Ziel ist es zu untersuchen, unter welchen Rahmenbedingungen das Regierungsziel von 1 Mio. Elektrofahrzeugen erreicht wird.
Hacker et al. (2011)	Öko-Institut 2011: Umweltlastungspotential durch Elektromobilität – Projekt E-Mobility	Die Studie untersucht die Marktdurchdringung basierend auf Annahmen zu technischem Fortschritt, Nutzerakzeptanz und Wirtschaftlichkeit. Lediglich BEV in den Segmenten Mini, Klein und Kompakt werden untersucht.

Tab. 5-7 Überblick über ausgewählte Studien zur Marktdurchdringung von BEV/PHEV

Quelle: eigene Darstellung nach genannten Studien

Fazit

Die Bundesregierung hat sich ambitionierte Ziele im Bereich der Elektromobilität gesetzt und will Deutschland sowohl zum Leitmarkt als auch zum Leitanbieter entwickeln. Mit ihrer Strategie zur Elektromobilität verfolgt die Regierung verschiedene energie-, umwelt- und industriepolitische Ziele. Zentrale Elemente der Strategie sind zum einen die Forschungsförderung zur Weiterentwicklung der Fahrzeugtechnologie und Senkung der Kosten, zum anderen Demonstrationsprojekte, in denen Nutzer an die Elektromobilität herangeführt werden und die Technologien und Geschäftsmodelle getestet und weiterentwickelt werden. Dabei konnten in den letzten Jahren wesentliche Fortschritte erreicht werden und zahlreiche BEV- oder PHEV-Modelle wurden von deutschen Herstellern auf den Markt gebracht. Auch die Anzahl der in Deutschland produzierten Elektrofahrzeuge ist deutlich gestiegen – wenn auch auf geringem Niveau. Jedoch handelt es sich bei der Mehrzahl der neu registrierten Fahrzeuge um importierte Modelle. Insgesamt ist der Marktanteil von Elektrofahrzeugen unter den neu registrierten Pkw noch sehr gering, konnte aber in den letzten Jahren deutlich gesteigert werden. Anfang 2014 waren ca. 12 000 BEV in Deutschland registriert. Für Nutzer gibt es bislang kaum Anreize zum Kauf oder zur Nutzung eines Elektrofahrzeuges, wobei Mehrkosten und begrenzte Reichweite die größten Hemmnisse darstellen. Die Nutzung in Fahrzeugflotten inklusive Car-Sharing-Flotten dominiert derzeit. Auch die Demonstrationsprojekte haben bei der Marktentwicklung eine unmittelbare Wirkung – mit 3 000 allein in den Modellprojekten I und II eingesetzten Fahrzeugen und dem Aufbau von 2 800 Ladepunkten.

Insgesamt arbeiten Politik, Industrie und Wissenschaft in Deutschland im Bereich Elektromobilität eng zusammen, was sich aus dem Design der Förderprogramme und den entstandenen Allianzen und Plattformen zur Elektromobilität ableiten lässt. Auch wenn Deutschland noch weit vom Millionenziel der Bundesregierung entfernt ist, lässt sich ein positiver Trend hinsichtlich der Anbieterschaft und Marktentwicklung ableiten.

5.2.2 Europa

H. Hüging (WI)

Im Rahmen der Regionalstudie Europa wurden die wichtigsten Trends auf dem Feld der Elektromobilität exemplarisch in fünf Fallstudien die Situation in Frankreich, Großbritannien, Norwegen, Italien und Polen betrachtet. Die fünf ausgewählten Länder reflektieren die regionalen Unterschiede im Hinblick auf sozio-ökonomische Faktoren als auch auf politische Rahmenbedingungen und Maßnahmen innerhalb Europas. Zudem werden die Rolle der EU und die Entwicklung auf gesamteuropäischer Ebene betrachtet. Neben Deutschland sind Großbritannien, Frankreich und Italien die größten Automobilmärkte in Europa (auf Basis der Neuzulassungen in 2012) und spielen damit auch für Elektrofahrzeuge eine wichtige Rolle. Norwegen spielt eine Sonderrolle und ist als vergleichsweise kleiner Automobilmarkt weltweit führend hinsichtlich des Marktanteils von Elektrofahrzeugen. Polen repräsentiert die osteuropäischen Staaten und steht exemplarisch für eine weniger auf Elektromobilität ausgerichtete Politik.

Regierung / Politik / Öffentliche Infrastruktur

Auf gesamteuropäischer Ebene betreibt die Europäische Union Politik zur Förderung und Regulierung von xEVs auf der Grundlage ihrer Energie- und Verkehrspolitik, die in nationale Energiestrategien und Maßnahmen übersetzt und dadurch in die einzelnen Mitgliedsländer übertragen wird. Ein wichtiges Instrument, das Einfluss auf die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen hat, ist die EU-Verordnung über CO₂-Flottenemissionslimits für Neuwagen. Der Grenzwert für die durchschnittlichen Fahrzeugemissionen eines Herstellers wurde für 2015 auf 130 g CO₂ pro gefahrenem Kilometer für Neuwagen (Pkw) festgesetzt. Bis zum Jahr 2020 werden die Grenzwerte weiter auf 95 g CO₂ pro Kilometer gesenkt. Elektrofahrzeuge profitieren bei diesem Flottenlimit insbesondere durch die sogenannten „Supercredits“: Jedes Fahrzeug mit Emissionen unter 50 g/km) wurde als 3,5 Fahrzeuge in 2012 und 2013 gewertet und wird jeweils als 2,5 Fahrzeuge im Jahr 2014 und als 1,5 Fahrzeuge im Jahr 2015 angerechnet. Erst ab 2016 wird es als ein Fahrzeug gezählt werden. Die Regulierungsverordnungen geben den Herstellern hierdurch zusätzliche Anreize für die Produktion von Fahrzeugen mit sehr niedrigen Emissionen. „Supercredits“ werden auch in der zweiten Stufe von Emissionsreduktionen von 2020 bis 2023 gelten (European Commission 2014).

Im Folgenden werden die fünf Fallstudienländer Frankreich, Großbritannien, Norwegen, Italien und Polen detaillierter betrachtet. Hierbei werden die drei Dimensionen „Regierungsstrategie“, „Anreizsysteme“ und „Infrastruktur“, die für die zukünftige Entwicklung der Elektromobilität essentiell sind, für jedes der fünf Länder dargestellt.

Frankreich

Regierungsstrategie

Frankreichs Regierungsstrategie für xEVs basiert auf dem sogenannten „Electric Vehicle Plan“, der im Jahr 2009 verabschiedet wurde. Der französische Umwelt- und Verkehrsminister Jean-Louis Borloo stellte einen 14-Punkte-Plan vor, um die Entwicklung von xEVs zu fördern. Die französische Regierung machte die Einführung des Elektroantriebs daraufhin zu einer der obersten Prioritäten in den folgenden Jahren. Das übergeordnete Ziel der Regierung, bis zum Jahr 2020 zwei Millionen Elektroautos auf der Straße zu haben, wird derzeit als zu ambitioniert eingeschätzt. Bis 2025 sollen laut dem „Electric Vehicle Plan“ sogar 4,5 Millionen Fahrzeuge auf den Straßen sein.

Anreizsysteme

Steuerbefreiungen werden auch für Firmenwagen gewährt: Fahrzeuge, die weniger als 50 g CO₂/km ausstoßen, wie BEVs und PHEVs, sind von der Steuer ausgenommen. Eine teilweise Steuerbefreiung gilt für Hybridfahrzeuge: HEVs, die weniger als 110 g CO₂/km emittieren, sind für die ersten beiden Jahre nach dem Kauf befreit (IA-HEV 2013). Außerdem bestehen auch für Gebrauchtwagen auf den CO₂-Emissionen basierende Steuervergünstigungen.

Steuerbefreiungen werden auch für Firmenwagen gewährt: Fahrzeuge, die weniger als 50 g CO₂/km ausstoßen, wie BEVs und PHEVs, sind von der Steuer ausgenommen. Eine teilweise Steuerbefreiung gilt für Hybridfahrzeuge: HEVs, die weniger als 110 g CO₂/km emittieren, sind für die ersten beiden Jahre nach dem Kauf befreit (IA-HEV 2013). Außerdem bestehen auch für Gebrauchtwagen auf den CO₂-Emissionen basierende Steuervergünstigungen.

Als weiteres Instrument zur Verbreitung von Elektrofahrzeugen stellt in Frankreich die Beschaffung von xEVs durch große, oft staatliche Unternehmen dar. Einer Initiative der La Poste folgend, hat eine Gruppe von 20 Großunternehmen und staatlichen Vereinigungen eine gemeinsame öffentliche Ausschreibung für den Aufbau einer Flotte von 100 000 Fahrzeugen bis zum Jahr 2015 auf den Weg gebracht. Im Oktober 2011 wurden die ersten Aufträge an PSA und Renault vergeben. Im Jahr 2012 hat die nationale Regierung außerdem festgelegt, dass 25 % der öffentlich beschafften Fahrzeuge ein Hybrid- oder Elektrofahrzeug sein sollen, was 1 500 Fahrzeugen pro Jahr entspricht (IA-HEV 2013).

Infrastruktur

Ein 50 Mio. Euro umfassendes Investitionsprogramm zur Förderung von Elektrofahrzeugen und Ladeinfrastruktur wurde im Herbst 2012 unter der Bezeichnung „Hirtzmann Mission“ ins Leben gerufen. Das Investitionsprogramm fördert in erster Linie die Bereitstellung von Ladestationen. Bis 2025 soll eine Ladeinfrastruktur bestehend aus 9,9 Mio. Ladepunkten in Frankreich eingerichtet werden. Davon sollen 9 Mio. private Ladepunkte sein, 750 000 öffentliche Standardladepunkte und 150 000 öffentliche Schnellladepunkte (City, Mobility & Transport Laboratory 2013). Um die Versorgung mit Ladeinfrastruktur zu gewährleisten, wurden außerdem Gesetze erlassen, gemäß denen bei jedem neue Gebäude seit 2012 eine Stromversorgung bei den Parkplätzen angelegt werden muss. Außerdem müssen bis 2015 Parkplätze an Arbeitsplätzen verpflichtend an die Stromversorgung angeschlossen werden.

Ende 2012 gab es 749 Ladestationen in Frankreich; diese enthielten 2 561 Ladepunkte, von denen 5,6 % (42 Stationen / 143 Ladepunkte) Schnellladestationen waren (IA-HEV 2013).

Großbritannien

Regierungsstrategie

Die Aktivitäten der britischen Regierung im Bereich der xEVs werden von dem „Four-Year Business Plan 2011-2015: Decarbonization of Road Transport“ bestimmt. Anders als andere Länder in Europa hat Großbritannien eine Regierungsbehörde gegründet, die für die Förderung der xEVs verantwortlich ist: Das „Office of Low Emission Vehicles“ (OLEV). OLEV implementiert die landesweite Strategie zur Förderung von xEV-Infrastruktur, unterstützt Pilotprogramme, treibt die Standardisierung, koordiniert und konsolidiert Forschung und Entwicklung und fördert den Kauf von xEVs.

Anreizsysteme

Die britische Regierung hat etwa 400 Mio. GBP (ca. 500 Mio. Euro) zur Förderung des Kaufs, der Nutzung und der Produktion von Niedrigemissionsfahrzeugen („ultra-low emission vehicles“) bereitgestellt. Darunter fällt auch ein Anreizprogramm, genannt Plug-In Car Grant, für den Kauf von emissionsarmen Fahrzeugen. Seit Januar 2011 können Verbraucher im Rahmen des Plug-In-Car Grant-Programms einen Zuschuss von 25 % zu den Kosten des Fahrzeugs bis zu einem Maximum von 5 000 GBP (ca. 5 800 Euro) erhalten. Neben BEVs und PHEVs sind auch FCEVs und andere Technologien förderberechtigt. Im Jahr 2012 wurde der Zuschuss außerdem als sogenannte „Plug-in Van Grant“ auf Transporter erweitert. Beide Zuschüsse gelten für Unternehmen und als auch private Nutzer und können bei Fahrzeugkauf oder Leasing angewendet werden. Zuschüsse für Transporter

sind dabei auf 20 % des Preises bis zu einer Obergrenze von 8 000 GBP (ca. 9 250 Euro) beschränkt (IA-HEV 2013). Bis Ende 2012 wurden Zuschüsse für über 3 000 Fahrzeuge über die Plug-in Car Grant beantragt und weitere 215 über die Plug-in Van Grant.

Sonstige finanzielle Anreize auf nationaler Ebene sind unter anderem:

- Befreiung von Fahrzeugsteuer (bei Auspuffemissionen <100 g CO₂/km);
- Befreiungen bei der Firmenwagensteuer;
- verbesserte Abschreibungsregelungen bis zu 100 % (Unternehmen können die gesamten Anschaffungskosten eines Elektroautos oder Transporters im Jahr der Anschaffung abschreiben).

Weitere lokale Maßnahmen sind eine Befreiung von den Mautgebühren in London („London congestion charge“) sowie Befreiungen oder Reduzierung der Parkgebühren in einigen Kommunen (IA-HEV 2013).

Zur Förderung von xEVs wurde im Juli 2011 außerdem das sogenannte „Low Carbon Vehicle Public Procurement Programme“ (LCVPP) von verschiedenen lokalen Behörden beschlossen und teilweise durch das Ministerium für Wirtschaft finanziert. Das Ziel des LCVPP ist die Förderung der öffentlichen Beschaffung von umweltfreundlichen Fahrzeugen (insbesondere xEVs). Öffentliche Verwaltungen, die solche Fahrzeuge erwerben, erhalten eine Kofinanzierung. Das Gesamtbudget der Initiative liegt bei etwa 20 Millionen GBP (CleanVehicleEurope 2012).

Infrastruktur

Der Ausbau der Infrastruktur wird maßgeblich durch das „Plugged-in Places Programme“ bestimmt. Das Programm ist eine öffentlich finanzierte Initiative der Regierung, angeführt vom OLEV. Im Rahmen des Programms werden von der britischen Regierung Zuschüsse für die Installation von öffentlichen Ladestationen für xEVs an Regionalregierungen vergeben. Bis Dezember 2012 wurden über 2 800 Ladepunkte im Rahmen von acht „Plugged-in Places“-Projekten eingerichtet. Etwa 70 % dieser Ladepunkte sind öffentlich zugänglich. Daten der Hersteller von Ladestationen zeigen, dass auch andere Organisationen vermutlich über 5 000 Ladepunkte landesweit installiert haben (IA-HEV 2013).

Im Februar 2013 kündigte das Verkehrsministerium ein weiteres 37 Mio. GBP (43 Mio. Euro) schweres Maßnahmenpaket an, welches weitere Unterstützung für die Installation und Nutzung von Ladeinfrastruktur bereitstellt. Hierzu zählen Zuschüsse für die Installation von Ladeinfrastruktur für Hausbesitzer, Budgets für lokale Verwaltungen, um Ladeinfrastruktur auf den Straßen zu installieren, sowie Ladeanlagen an Bahnhöfen und auf Regierungsgeländen (IA-HEV 2013).

Norwegen

Regierungsstrategie

Norwegens Strategie hinsichtlich xEVs basiert auf dem „Commitment to a Change in Vehicle Technology“ der norwegischen Regierung. Die parteienübergreifende Vereinbarung zum Klimaschutz („agreement on climate“) von 2012 setzt einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg zu einem klimaneutralen Verkehrssektor: Bis 2020 sollen die durchschnittlichen CO₂-Emissionen neuer Pkw in Norwegen 85 Gramm pro Kilometer betragen und damit 10 g unter den geplanten Grenzwerten in der EU liegen (EV Norway 2014).

Herausragend innerhalb Europas ist die Initiative „Grønn Bil“ von norwegischer Regierung und Industrie. Das Projekt „Grønn Bil“ wurde von der Vereinigung der norwegischen Energieunternehmen gestartet, um die Einführung von 200 000 xEVs auf norwegischen Straßen bis zum Jahr 2020 zu erreichen. Zusätzlich sind Transnova, eine Unterabteilung des norwegischen Ministeriums für Verkehr, sowie der Verband der norwegischen Kommunen im Lenkungsausschuss der Initiative.

Anreizsysteme

Essentiell für das Verständnis des norwegischen Anreizmodells für xEVs ist die Tatsache, dass herkömmliche Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor in Norwegen sehr stark besteuert werden. Beim Import werden die Fahrzeuge unter anderem nach Gewicht, CO₂-Emissionen sowie NO_x-Emissionen besteuert. Hinzu kommen 25 % Mehrwertsteuer (Hannisdahl et al. 2013). Für Elektrofahrzeuge hat die Regierung in Norwegen dagegen ein umfassendes steuerliches Anreizsystem für Kauf und Nutzung eingeführt, von dem insbesondere BEV profitieren. Dies führt zu einer erheblichen Verringerung der Gesamtkosten der Fahrzeuge vor allem dank folgender Regelungen:

- keine Mehrwertsteuer für BEV und FCEV,
- kein Einfuhrzoll für BEV und FCEV,
- Reduktion der jährlichen Kfz-Steuer,
- kostenloses Parken auf öffentlichen Parkplätzen;
- gebührenfreie Nutzung von Mautstraßen und Fähren,
- Erlaubnis zur Nutzung von Busspuren (CleanVehicleEurope 2012).

Seit dem Programm zur Förderung der Elektromobilität von 2011 gilt eine Bevorzugung von BEVs in der Beschaffung bei öffentlichen Stellen wie der Zentralregierung und lokalen Verwaltungen. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass alle Fahrzeuge der öffentlichen Verwaltung bis 2020 CO₂-frei oder CO₂-neutral angetrieben werden (CleanVehicleEurope 2012).

Nach Auskunft der interviewten Experten kosten die Steuerermäßigungen die öffentliche Hand durchschnittlich 15 000 bis 20 000 Euro pro Fahrzeug. Das Anreizsystem soll bis 2018 bestehen bleiben - oder bis 50 000 Fahrzeuge auf den Straßen sind, was voraussichtlich bereits im Jahr 2015 oder Anfang 2016 erreicht wird (EV Norway 2014). Die Anreize werden hauptsächlich von privaten Fahrzeugbesitzern in Anspruch genommen. Um eine höhere Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen in Unternehmensflotten zu erreichen, wurden die finanziellen Anreize auf das Leasing von xEVs erweitert (Transnova 2013). Seit 2011 genießen xEVs bereits eine ermäßigte MwSt-Einstufung beim Leasing im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen und es gibt auch eine vollständige Befreiung von der Mehrwertsteuer für den Kauf von Traktionsbatterien (d.h. für einen möglichen Austausch der Batterie) (CleanVehicleEurope 2012).

Zusätzlich zu den Anreizen sind die Betriebskosten der BEVs deutlich niedriger als bei einem ähnlichen Verbrennungsfahrzeug. Das Ergebnis ist, dass in Norwegen die Gesamtkosten (TCO) für BEVs im Vergleich zu Verbrennungsfahrzeugen deutlich geringer ausfallen (Hannisdahl et al. 2013).

Infrastruktur

Vor 2008 war die xEV-Ladeinfrastruktur nur dürftig ausgebaut. Ab 2009, mit der gleichzeitigen Einführung eines nationalen xEV-Infrastrukturprogramms von Transnova und einem lokalen Programm in Oslo, wurden massiv Ladestationen in ganz Norwegen aufgebaut. Die große Mehrzahl der Ladestationen in Norwegen verfügen über reguläre Schuko-Steckdosen. Wie der Rest Europas wird auch Norwegen zukünftig sukzessive den Typ-2-Standard für neue Ladepunkte übernehmen (EV Norway et al. 2014). Zusätzlich hat Norwegen ein Förderbudget für xEV-Ladestationen von etwa 100 Mio. NOK (ca. 11,9 Mio. Euro) beschlossen. Neue Ladestationen sind insbesondere auf öffentlichen Parkplätzen geplant (CleanVehicleEurope 2012).

Italien

Regierungsstrategie

Italiens Strategie für Elektrofahrzeuge basiert auf dem „Commitment to Support Electric Mobility“ der italienischen Regierung. Im Jahr 2012 wurde eine nationale Politik für die Einführung sauberer Fahrzeuge, darunter Kaufanreize und die Etablierung von Ladeinfrastruktur, offiziell als Teil eines Gesetzes zur Förderung der wirtschaftlichen Entwicklung des Landes beschlossen. Die Strategie umfasst drei wesentliche Tätigkeitsfelder:

- Aufbau einer nationalen Ladeinfrastruktur für jede Art von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen
- Demonstration und Verbreitung von emissionsarmen Fahrzeugen in öffentlichen und privaten Fuhrparks, vor allem für den Einsatz in städtischen Gebieten
- Finanzielle Kaufanreize für Elektrofahrzeuge jeglicher Art.

Die genehmigten Gesetze beinhalten außerdem Regelungen, gemäß denen die lokalen Behörden die öffentliche und private Installation von xEV-Ladestationen fördern können. Insgesamt werden öffentliche Mittel von 120 Millionen Euro von 2013 bis 2015 zur Verfügung stehen (IA-HEV 2013).

Anreizsysteme

Italien bietet Kaufanreize für Fahrzeuge mit alternativem Antrieb (Strom, Erdgas, Flüssiggas, Biokraftstoffe oder Wasserstoff): Der Verkaufspreis für Neufahrzeuge mit CO₂-Emissionen von weniger als 50 g/km wird mit bis zu 20 % (maximal 5 000 Euro) subventioniert. Der Subventionsbetrag sinkt mit steigenden Fahrzeugemissionen bis maximal 120 CO₂ g/km. Der Kaufanreiz wird zum Großteil an Flotten des öffentlichen Dienstes vergeben (70 % des Gesamtfonds). Als weitere Voraussetzungen muss ein altes Fahrzeug der gleichen Kategorie wie das gekaufte Fahrzeug verschrottet werden. Die berechtigten Fahrzeugklassen sind zwei- und dreirädrige Motorräder und Mopeds, sowie Transporter und Pkw (IA-HEV 2013). Für den Erwerb von BEV wird außerdem eine fünf Jahre lange Befreiung von der Kfz-Steuer und ein anschließende Steuerermäßigung von 75 % gewährt. Hinzu kommen verschiedene finanzielle Anreize auf regionaler Ebene. So offerieren beispielsweise die Regionen Lombardei und Piemont eine Reduzierung der Kfz-Versicherung von etwa 50 %.

Infrastruktur

In Italien gab es 2013 etwa 1 350 Level 2 / Standard-AC-Ladestationen (640 in öffentlichen Bereichen und etwa 710 in privaten Bereichen). Nur wenige DC-Schnellladestationen sind vorhanden, und noch bis 2012 waren diese ausschließlich private Ladepunkte für Demonstrationszwecke (IA-HEV 2013). Der nationale Plan für die Ladeinfrastruktur, soll die Installation von Ladeinfrastruktur weiter voranbringen und auch die Zusammenarbeit mit lokalen Behörden regeln.

Polen

Regierungsstrategie

Elektromobilität hat für die polnische Regierung keine hohe Priorität. Aufgrund der heimischen Vorkommen von Kohle und Erdgas hat der polnische Strommix eine hohe Emissionsintensität. Polen legt seinen Fokus in Bezug auf erneuerbare Energien im Verkehr eher auf den Bereich der Biokraftstoffe.

Anreizsysteme

Obwohl die polnische Regierung sich verpflichtet hat, xEVs zu unterstützen, wurden bisher keine speziellen Regelungen eingeführt.

Infrastruktur

Bislang wurden nur sehr kleine Projekte realisiert, oft mithilfe von EU-Mitteln, wie z.B. die EU-finanzierten Pilotprojekte für Elektromobilität „Fuel for Warsaw“ und „Cars for Warsaw“. Warschaus erste Ladestation für Elektrofahrzeuge wurde im November 2009 eröffnet. Im Rahmen des Pilotprogramms erhielt das Rathaus von Warschau außerdem fünf Elektroautos (Eurocities 2010).

Forschungsförderung und Institutionen

EU-Ebene

Auf EU-Ebene findet die Förderung von Forschung und Entwicklung insbesondere im Rahmen der „European Green Cars Initiative“ bzw. „European Green Vehicle Initiative“, dem siebten Forschungsrahmenprogramm sowie im Forschungsprogramm „Horizon 2020“ statt.

Als Teil des EU-Konjunkturprogramms wurde die European Green Car Initiative als „Public-Private Partnership“ ins Leben gerufen. Zwischen 2009 und 2013 wurden 80 Forschungsprojekte gefördert (z.T. noch Projektlaufzeiten bis 2015/2016). Auf EU-Ebene wurden dazu 500 Millionen Euro an öffentlichen Mitteln zur Verfügung gestellt, der gleiche Betrag wird von der Industrie aufgebracht (siehe (European Commission 2013, European Green Cars Initiative, 2014). Das Forschungsbudget wird den beteiligten Industriepartnern mit einer Förderquote von 50 % zur Verfügung gestellt. Die EU-Kommission fördert hierbei vorwettbewerbliche Forschung, die noch nicht marktreif und damit noch nicht wettbewerbsrelevant ist (siehe STROM Regionalstudie Europa). Die Förderung konzentriert sich auf Forschung im Bereich der Elektrifizierung von Fahrzeugen. Daneben wurden auch Projekte zum Langstreckengüterverkehr und zur Logistik gefördert (European Green Cars Initiative 2014). Die Fördermittel wurden durch das siebte Forschungsrahmenprogramm vergeben. Neben direkter Forschungsförderung stehen auch zinsgünstige, zweckgebundene (an die Entwicklung sauberer/effizienter Fahrzeuge gekoppelte) Darlehen zur Verfügung. Ende 2013 waren 109 Pro-

jekte unter der European Green Cars Initiative gelistet (laufend und in Verhandlung) (Abb. 5-7). Davon hatten ca. 65 Projekte einen Fokus auf Elektromobilität. Insgesamt umfassen die Projekte ca. 421 Mio. Euro Fördermittel der EU-Kommission. Fortschritt im Bereich der Fahrzeugintegration (inkl. Fahrzeugklimatisierung, Leichtbau, Recycling, Elektronik und weiterer Optimierung von existierenden Komponenten) und Demonstration wird mit ca. einem Drittel der Fördermittel am stärksten gefördert, gefolgt von Forschung zu Energiespeichern und Antriebssystemen. Mit 25 Projekten, die von deutschen Institutionen koordiniert werden, ist Deutschland am stärksten in der Green Cars Initiative vertreten, gefolgt von Spanien und Italien. Großbritannien und Frankreich haben jeweils nur 9 Projekte (Kommunikation Maurizio Maggiore).

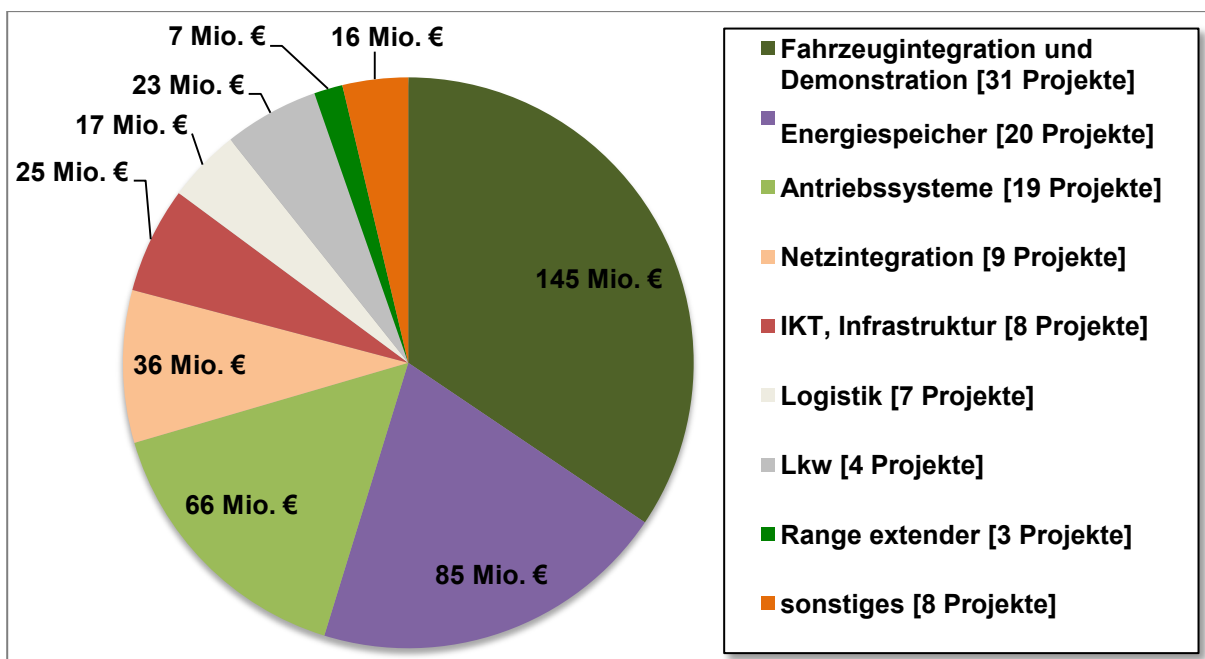


Abb. 5-7 Förderung der Europäischen Kommission unter der „European Green Cars Initiative“

Quelle: persönliche Kommunikation EU-Kommission Maurizio Maggiore

Im Anschluss an die „Green Cars Initiative“ wurde die „European Clean Vehicles Initiative“ 2014 gestartet. Diese fokussiert stärker auf Energieeffizienz von Fahrzeugen und alternative Antriebe und umfasst neben Pkw weitere Fahrzeugtypen. Die erste Ausschreibungsrunde für Fördermittel der „Green Vehicle Initiative“ wurde 2013 im Rahmen der „Horizon 2020“-Ausschreibung veröffentlicht (EGVI 2013). Für diese Ausschreibung stehen für 2014 und 2015 159 Mio. Euro zur Verfügung, unter anderem zur Weiterentwicklung von Lithium-Ionen Batterien, für Energiemanagement in Elektrofahrzeugen, elektrische zwei- und dreirädrige Fahrzeuge, Hybrid-Nutzfahrzeuge und die Integration von Elektrofahrzeugen in das Verkehrssystem und Stromnetz. Neben den spezifischen Ausschreibungen im Rahmen der „Green Vehicles Initiative“ werden Aspekte der Elektromobilität auch durch Forschungsvorhaben in weiteren verkehrsbezogenen oder in Energie- oder IKT-bezogenen „Horizon 2020“-Ausschreibungen adressiert (European Commission 2013a).

Nationale Förderprogramme

In **Frankreich** hat die Regierung im Jahr 2009 für einen Vierjahreszeitraum 120 Mio. Euro für Forschung, Entwicklung und Demonstrationsprojekte für kohlenstoffarme Fahrzeuge sowie Ladeinfrastruktur zur Verfügung gestellt. Zusätzlich sind im „Automobile Pact“ Darlehen von 250 Mio. Euro vergeben worden. Der Plan mit einem Gesamtvolumen von bis zu 7 Mrd. Euro wurde beschlossen, um Darlehen an Fahrzeug- und Komponentenhersteller sowie für die Förderung von Innovationen in der xEV-Industrie zu vergeben (IFA 2014).

In **Großbritannien** stellte die Regierung 2012 82 Mio. GBP (95 Mio. Euro) für die Forschungs- und Entwicklungsförderung bis 2015 zur Verfügung, die vor allem durch das „Technology Strategy Board“ verwaltet wird (IA-HEV 2013). Das „Technology Strategy Board“, eine nichtstaatliche Gesellschaft der britischen Regierung, ist eine zentrale Förderinstitution in Großbritannien und koordiniert die „low carbon vehicles innovation platform“. Die Plattform vergibt in Wettbewerbsverfahren Fördermittel für Forschungs- und Entwicklungskooperationen. Alle Projekte müssen durch die Industrie kofinanziert werden. Die Förderthemen und -konditionen werden in Abstimmung zwischen Industrie (repräsentiert durch das „Automotive Council“) und Regierung (über das Technology Strategy Board) formuliert (Technology Strategy Board 2014). Der „Automotive Council“ wurde 2009 gegründet, um eine Technologie-Roadmap für emissionsarme Fahrzeuge und Kraftstoffe zu entwickeln. Darin wurden fünf strategische Bereiche für weitergehende Forschung und Entwicklung identifiziert:

- Verbesserungen an Verbrennungsmotoren
- Energiespeicherung und Energiemanagement für Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge
- Leichtaufbaufahrzeuge und Antriebsstrangstrukturen
- Entwicklung von Leistungselektronik und elektrischen Maschinen
- Entwicklung und Anwendung intelligenter Transportsysteme

In **Norwegen** ist Transnova die zentrale Institution und fördert Forschung und Demonstrationsprojekte im Bereich nachhaltiger, zukunftsorientierter und klimaeffizienter Mobilität. Themenschwerpunkte sind neue Konzepte der Organisation von Verkehr (z.B. Car-Sharing, E-Bikes, E-Taxis) und neue Konzepte zur Batterieaufladung. Transnova unterstützt hierfür Demonstrations- und Pilotprojekte und führt Informationsaktivitäten durch. Transnova ist unter dem Verkehrsministerium tätig und hatte 2013 ein Budget von 87,2 Mio. NOK (11,75 Mio. Euro) (Transnova 2014)

In **Italien** werden die nationalen Forschungsprogramme und Projekte mit einem Schwerpunkt auf xEV- und HEV-Technologien und Anwendungen weitergeführt, während Forschung und Demonstrationsprojekte für Brennstoffzellenfahrzeuge erheblich reduziert wurden. Forschung und Entwicklung im Bereich xEVs und HEVs sind auch Bestandteil einiger weiterer nationaler Programme. So enthalten die Programme INDUSTRYA 2015 and „Research for the Electrical System“ einige Forschungsaktivitäten zum Thema Elektromobilität (IA-HEV 2012).

Einen **Überblick** über die öffentlich finanzierte Forschung auf dem Feld der Elektromobilität in Europa gibt eine Untersuchung des Joint Research Center der europäischen Kommission

(European Commission 2013). Die Studie betrachtet ca. 320 von EU oder Mitgliedsstaaten finanzierte Projekte zur Elektromobilität, welche sich zu einem Gesamtinvestitionsvolumen von 1,4 Mrd. Euro aufsummieren. Deutsche und EU-Projekte haben, gefolgt von Frankreich, UK und Schweden, das größte Gesamtbudget (Abb. 5-8).

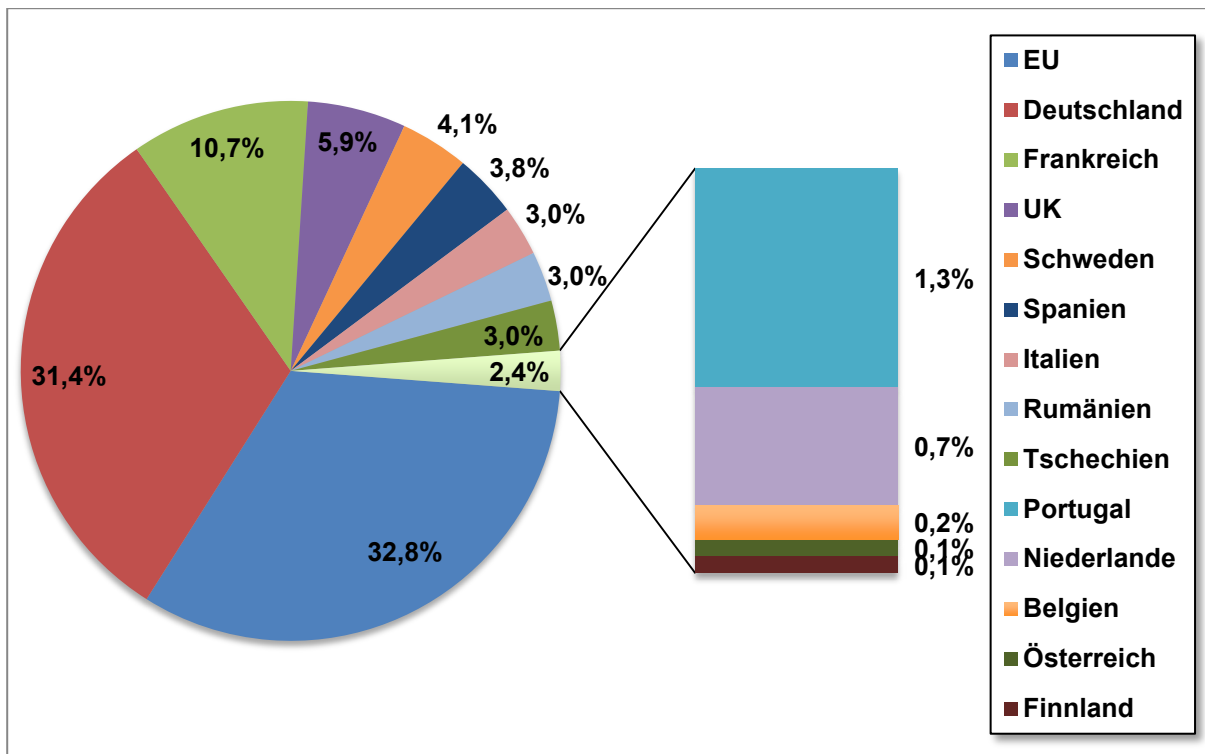


Abb. 5-8 Aufteilung des Förderbudgets auf EU und Mitgliedsstaaten am Gesamtinvestitionsvolumen von 1,4 Mrd. Euro

Quelle: (European Commission 2013, S. 17)

Bei der Verteilung der Budgets auf die verschiedenen Forschungsfelder ergeben sich große regionale Unterschiede: Die von der EU kofinanzierten Projekte konzentrieren sich vor allem auf Forschung an Energiespeichern und Steuerungselementen. Die EU-Programme sowie die nationalen Programme in Deutschland führen mit einem Volumen von ca. 130 Mio. Euro bzw. 118 Mio. Euro im EU-Vergleich die Forschung im Bereich Energiespeicher an. Mit zum Teil unter 20 Mio. Euro investieren Frankreich und UK deutlich weniger in dieses Forschungsthema (Abb. 5-9).

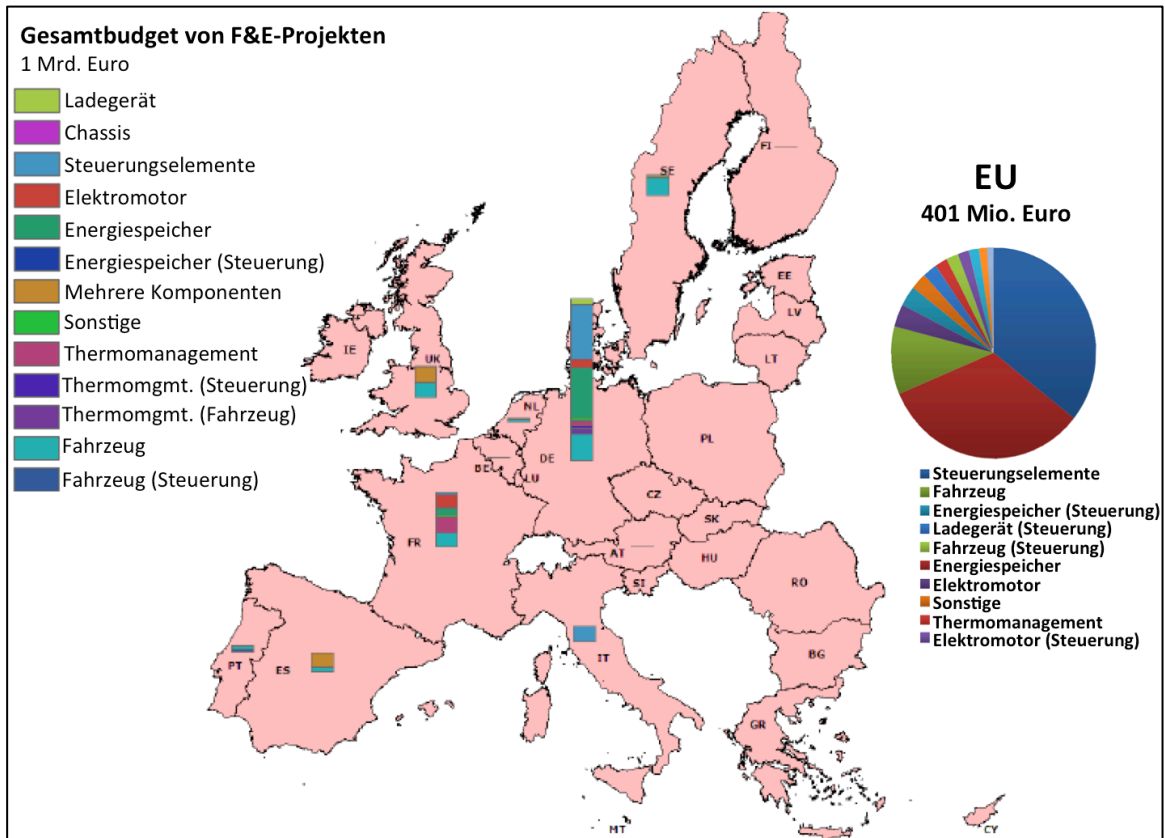


Abb. 5-9 Investitionen in FuE Projekte nach Fahrzeugkomponenten im EU-Vergleich

Quelle: (European Commission 2013, S. 20)

Im Bereich der Steuerung (inkl. Energiemanagement, Batteriemonitoring, Netzintegration) liegen die EU-Förderung und Deutschland ebenfalls mit Volumen von über 120 Mio. Euro deutlich vorne, während andere EU-Länder in diesem Bereich deutlich unter 20 Mio. Euro Forschungsbudget verzeichnen. Hinsichtlich der Forschung an Elektromotoren führt Frankreich im europäischen Vergleich mit über 30 Mio. Euro, gefolgt von Deutschland (ca. 22 Mio. Euro) und der EU-Förderung (ca. 14 Mio. Euro). Frankreich verzeichnet ebenfalls das höchste Budget im Bereich Thermomanagement (ca. 39 Mio. Euro). In Deutschland sind die Projekte zu Thermomanagement meist mit Forschung zu weiteren Komponenten bzw. Gesamtfahrzeugkonzepten verbunden und weisen insgesamt fast ein ähnliches Budget auf wie Frankreich. Im Bereich neuer Fahrzeugkonzepte liegt Deutschland mit über 60 Mio. Euro im europäischen Vergleich an erster Stelle, gefolgt von Schweden, sowie UK und Frankreich mit über 30 Mio. Euro Förderungsvolumen (European Commission 2013).

Wirtschaft und Industrie

Die Bedeutung der Automobilindustrie für die Gesamtwirtschaft ist in den untersuchten Fällen unterschiedlich hoch: Frankreich, Großbritannien und Italien haben eine lange Tradition in der Automobilproduktion. Die Autoindustrie trägt dort mit 1,7 Mio. bzw. 1,5 Mio. und 0,4 Mio. produzierten Pkw mit bis zu 1,5 % zum BIP bei (Tab. 5-8). Norwegen dagegen weist kaum eigene Autoindustrie auf. In Polen produzieren vor allem ausländische Firmen etwa 540.000 Fahrzeuge von europäischen und asiatischen Marken für den Weltmarkt.

	Gesamtzahl produzierter Pkw (2012)	Anteil der Automobilindustrie an Bruttowertschöpfung (2005)
Frankreich	1,7 Mio.	1,5 %
UK	1,5 Mio.	1,1 %
Norwegen	-	-
Italien	0,4 Mio.	0,8 %
Polen	0,5 Mio.	1,7 %

Tab. 5-8 Gesamtzahl produzierter Pkw und Anteil der Automobilindustrie am BIP in den fünf Fallstudienregionen

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (OICA 2012) und EU KLEMS Database

Auch die Bedeutung von xEVs innerhalb der Autoindustrie schwankt stark zwischen den einzelnen Ländern:

Die **französischen** Automobilindustrie bietet seit 2011 BEVs zum Verkauf an. Die wichtigsten Hersteller von xEVs sind dort PSA Peugeot Citroën und Renault-Nissan. Diese haben zugesagt, bis 2015 70 000 PEVs zu produzieren und auszuliefern. Auch im Bereich der Batterien sind die französischen Hersteller vertreten. So bauen Renault, die CEA (Französische Atomenergie- und alternative Energien-Kommission) und Nissan derzeit ein Werk in Flins, 45 km außerhalb von Paris, mit einer Produktionskapazität von 100 000 bis 350 000 Batterien pro Jahr. Die französische Firma Saft, ein weltweit führendes Unternehmen in der Produktion von High-Tech-Batterien, produziert diese seit 2009 in seiner Fabrik in Nersac. Hinzu kommt die Bolloré-Gruppe, das Beteiligungsunternehmen hinter dem BEV-Carsharing Autolib. Zu den gänzlich oder in Teilen in Frankreich hergestellten PEV-Modellen zählen: Mia electric, Renault Kangoo ZE, Renault Zoe und der Smart Fortwo Electric Drive (Proff & Kilian 2012).

In **Großbritannien** produzieren mehr als 40 Unternehmen Fahrzeuge. Diese reichen von global tätigen Volumen-Automobilproduzenten und Transporter-, Lkw- und Bus-Herstellern bis zu Nischenanbietern (IA-HEV 2012). Die Automobilindustrie stellt 7% der Industrieproduktion und 5,3 % der Beschäftigung im verarbeitenden Gewerbe in Großbritannien. Im Bereich der Elektrofahrzeuge ist das wichtigste in Großbritannien gefertigte Modell der Nissan Leaf, dessen Produktion im Jahr 2013 in Sunderland begann.

Aus **Norwegen** stammen einige der Pioniere in der Entwicklung von Elektrofahrzeugen, insbesondere der Buddy von Buddy Electric (ehemals früher Elbil Norge AS) sowie die Firma Think Global AS. Allerdings ist die Produktion von Elektrofahrzeugen heute kaum noch existent. Think Global AS ist seit 2011 insolvent, vom Buddy Electric wurden Experten zufolge zuletzt nur noch etwa 30 Fahrzeuge pro Jahr verkauft (Experteninterview Transnova).

In **Italien** gibt es etwa 3 500 Unternehmen in der Automobilindustrie, für die direkt und indirekt rund 1,2 Mio. Mitarbeiter beschäftigt sind. Die Automobilindustrie investiert außerdem pro Jahr mehr als 2 Mrd. Euro in Forschung und Entwicklung. Hierzu gehören auch größere Unternehmen, die Elektro- und Brennstoffzellen-Fahrzeuge entwickeln, insbesondere Fiat, Pininfarina und der Batteriehersteller FIAMM. Zu den in Italien gebauten PEV-Modellen zählen der Bolloré – Blue Car und der Tazzari ZERO.

Die europäischen Automobilhersteller verfolgen hinsichtlich der Produktion von **xEV-Komponenten** unterschiedliche Strategien: Während einige Hersteller wie BMW und Volkswagen eine eigene Inhouse-Produktion der wichtigsten Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs (z.B. Elektromotoren, Batteriemontage) aufbauen, haben sich andere Hersteller dazu entschieden, diese Komponenten meist außerhalb von Europa herstellen zu lassen (siehe Proff und Kilian 2012).

Nissan will für sein Modell Leaf eine weltweite Produktionskapazität von 250 000 Fahrzeugen jährlich schaffen, wovon 25 000 Einheiten in Sunderland (Großbritannien) produziert werden sollen. Opel produziert seinen Ampera mit Range Extender, der identisch mit dem Chevrolet Volt ist, in Hamtramck (Michigan). Die Fiat-Chrysler-Gruppe plant, die elektrische Version des Fiat 500 in Toluca (Mexiko) zu fertigen. Der Citroen C-Zero und Peugeot Ion werden dagegen im Mitsubishi-Werk in Okazaki (Japan) gefertigt, während Renault seine Elektrofahrzeuge in Europa produziert: Der Kangoo Z.E. wird auf der gleichen Fertigungslinie wie der Kangoo mit Verbrennungsmotor in der Produktionsanlage in Maubeuge (Frankreich) hergestellt. 2012 hat Renault außerdem den Twizy Z.E., der in Valladolid (Spanien) produziert wird, sowie die Fluence Z.E. Limousine, die in Bursa (Türkei) hergestellt wird, auf den Markt gebracht. Außerdem baut Renault sein Elektrofahrzeug Zoé in Flins, nahe Paris (Proff & Kilian 2012).

Fast die komplette **Produktion von Lithium-Ionen-Zellen** ist dagegen momentan in Übersee beheimatet. Innerhalb der Europäischen Union gibt es nur einige wenige Produktionsstandorte wie die japanische Allianz von NEC, Nissan und Renault, genannt AESC in Großbritannien und Spanien, die Saft S.A. (Frankreich) oder das deutsche Joint-Venture LiTec der Daimler AG und Evonik. In Frankreich haben außerdem Renault und Nissan in Zusammenarbeit mit der CEA (Französische Kommission für Atomenergie und alternative Energien) eine Fabrik in Flins gebaut, um Batterien in großem Maßstab zu produzieren. Innerhalb der EU hat Frankreich damit momentan eine führende Rolle in der Batterieproduktion (Proff & Kilian 2012).

Verbraucher und Markt

In der gesamten EU waren 2012 etwa 250 Mio. Pkw zugelassen. Italien, Frankreich und Großbritannien sind hierbei mit 37 Mio., 31 Mio. und 30 Mio. zugelassenen Fahrzeugen wichtige Märkte (Tab. 5-9). Die Gesamtzahl der zugelassenen PEV war Mitte 2014 noch relativ gering. Norwegen hat unter den untersuchten Ländern die größte PEV-Flotte mit fast 34 000 Fahrzeugen, trotz der geringen Größe des Gesamtmarktes. In Frankreich waren ca. 24 000 PEV registriert. In allen Untersuchungsregionen ist die BEV Flotte deutlich größer als die PHEV-Flotte (siehe EEO 2014, Eurostat, 2014, IA-HEV 2013).

	Gesamtzahl registrierter Pkw (Stand 2012)	Gesamtzahl registrierter BEV (Stand Juni 2014)	Gesamtzahl registrierter PHEV (Stand Juni 2014)	Marktanteil PEV 2013 an neuen Registrierungen
Frankreich	31,4 Mio.	21 589	1 967	0,49 %
Großbritannien	29,7 Mio.	7 385	3 578	0,16 %
Norwegen	2,4 Mio.	31 992	1 698	7,6 %
Italien	37,1 Mio.	1 860	366	0,09 %
Polen	16 Mio.	n.v.	n.v.	n.v.

Tab. 5-9 Gesamtzahl, und Marktanteile von BEV und PHEVs im Pkw Bereich in den fünf Fallstudienregionen

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (EEA 2014, EEO 2014, CCFA 2014, Grønn Bil 2014, SMMT 2014, IA-HEV 2013, ICCT 2014)*

Somit bleibt Elektrofahrzeugen in allen untersuchten Fallregionen, bis auf Norwegen, aktuell nur eine Nischenrolle. Aufgrund der geringen Anteile an den Neuregistrierungen wird sich dies vermutlich erst mittelfristig ändern: Insgesamt wurden in der EU (EU-27) im Jahr 2013 über 55 000 PEVs neu registriert. Bei einer Gesamtzahl von 11,8 Mio. neu registrierter Fahrzeuge liegt der Marktanteil bei ca. 0,47 %. Mit 0,52 % der Neuregistrierungen liegt Frankreich leicht über dem EU-Durchschnitt, während Italien mit 0,09 % den geringsten Marktanteil der dargestellten Länder aufweist (vgl. Abb. 5-10). Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Marktanteil in Polen wesentlich geringer ist. Großbritannien erreichte einen Marktanteil von 0,16 im Jahr 2013. Der höchste Marktanteil wird mit ca. 7,6 % im Jahr 2013 in Norwegen erreicht. Dadurch stellt Norwegen unter den Vergleichsregionen in 2013 auch den größten absoluten Markt für PEV, was angesichts der vergleichsweise geringen Einwohnerzahl durchaus beachtlich ist.

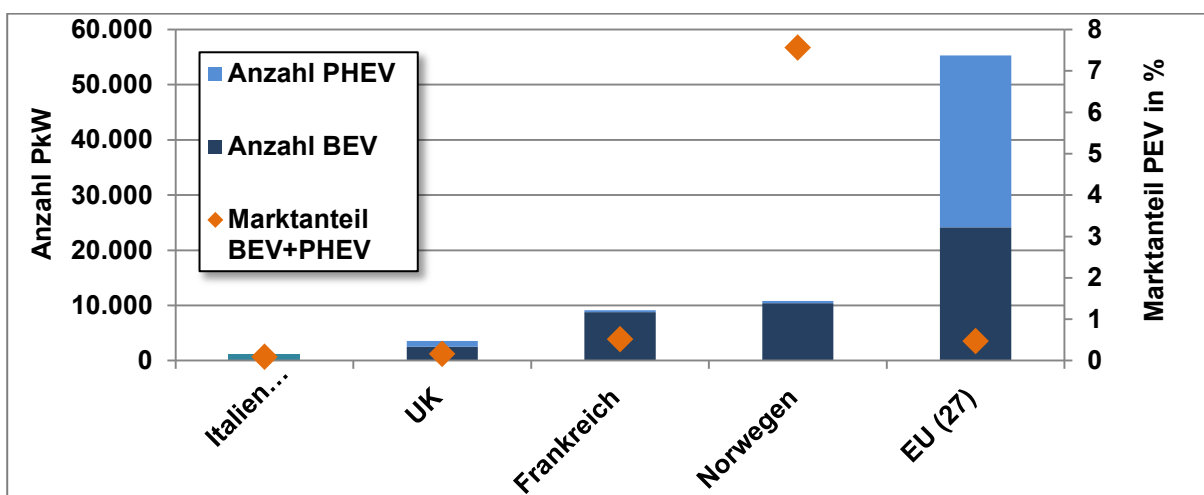


Abb. 5-10 Anzahl von BEV und PHEV an Verkäufen/Registrierungen und Marktanteil im Jahr 2013

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (EEA 2014, CCFA 2014, Grønn Bil 2014, SMMT 2014, IA-HEV 2013, ICCT, 2014)

In Großbritannien wird die Förderung von xEVs durch den Kaufzuschuss über die „Plug-in Car Grant“ (s.o.) als wichtiger Treiber für die Marktentwicklung der Elektromobilität gesehen. Dieses im Januar 2011 eingeführte und im Februar 2012 auf Transporter erweiterte An-

reizsystem war essentiell in der Kaufentscheidung von 85 % der Käufer eines Niedrigemissionsfahrzeugs, wie in einer aktuellen Studie gezeigt wurde (TRL 2013).

Norwegen erreicht in Europa den ersten Platz hinsichtlich der Anzahl von Elektrofahrzeuge pro Kopf. Dies ist einem starken Anreizsystem für xEVs zu verdanken, das teilweise bereits seit 2000 in Kraft ist. Die Situation wird durch Subventionen und Steuervergünstigungen auf der einen Seite und durch einen hohen Anteil erneuerbarer Energien (Wasserkraft) im Energieerzeugungsmix auf der anderen Seite begünstigt. Obwohl die Anreize überwiegend schon in den späten 1990ern oder zur Jahrtausendwende implementiert wurden, ist der Absatz von Elektrofahrzeugen in Norwegen erst seit 2010 stark gestiegen als der Mitsubishi i-Miev und der Nissan-Leaf in Norwegen auf den Markt kamen. Seitdem dominieren ausländische Marken eindeutig den norwegischen Markt (EV Norway 2014). Experten zufolge werden xEVs am häufigsten in den Vororten rund um die großen Städte genutzt, während aktuell das größte Wachstum in ländlichen Gebieten beobachtet wird. In Norwegen besitzen viele Haushalte zwei Autos, sodass das Elektrofahrzeug insbesondere als Zweitwagen dient (Grønn Bil 2013).

Bedenken hinsichtlich der Reichweite, Kosten und fehlende Infrastruktur sind generell die wichtigsten Hindernisse für eine höhere Verbreitung von xEVs in Europa. Mehrere interviewte Experten waren sich einig, dass es ein mangelndes Bewusstsein für die Eigenschaften von Elektrofahrzeugen nicht nur bei den Kunden gibt – auch für Autohändler seien in dieser Hinsicht Schulungen erforderlich. Toyota die Erfahrung gemacht, dass neben höheren Kosten paradoxerweise auch für PHEV die Sorge um Reichweiten eine Rolle für Verbraucher spielt, da sie die Fahrzeuge mit BEVs gleichsetzen. Auch ein französischer Experte hat hervorgehoben, dass wesentliche Informationen, wie z.B. Vorteile bei den Total Cost of Ownership, nur unzureichend kommuniziert werden – sowohl unter den Akteuren der Versorgungsseite als auch in der Gesellschaft bzw. bei potenziellen Kunden. Im Moment werden die meisten xEVs in den hier betrachteten europäischen Ländern für private Zwecke genutzt. Viele der interviewten Experten sehen allerdings Flotten als Hauptmarkt für xEVs in der nahen Zukunft. Kaufentscheidungen der privaten Verbraucher hängen dagegen vor allem von den Anfangsinvestitionen ab und die Rolle der TCO wird unterschätzt, sodass es xEVs auf dem Privatkundenmarkt schwerer haben. Wie von einem norwegischen Experten erwähnt, sehen kleine und mittlere Unternehmen ein hohes Investitionsrisiko in der Umstellung ihrer Flotten auf xEVs, was die Marktentwicklung in Flotten hemmt. Insbesondere herrscht Unsicherheit über den Wiederverkaufswert der Fahrzeuge.

Zur Analyse der Marktperspektiven entwickelten Proff und Kilian (2012) auf Basis von geschätzter Marktnachfrage, Kosten-Nutzen-Schätzungen sowie Segmentierung und Kaufverhalten der Kunden eine Marktprognose für Europa. Demnach wird für 2020 noch eine deutliche Dominanz von ICE (Internal Combustion Engine)-Fahrzeugen mit einem Marktanteil von 84 % prognostiziert, während HEV und PHEV (einschließlich REEV) etwa 9 % bzw. 6 % und BEV sogar nur 1,1 % der Neuzulassungen in den EU 27 – Ländern ausmachen. Bis 2030 wird für BEVs und PHEVs jedoch ein starker Anstieg der Marktanteile auf 11 % bzw. 20 % prognostiziert, wohingegen HEVs ihren Anteil nur moderat auf 13 % steigern können (Tab. 5-10).

Für die wichtigsten europäischen Märkte haben Proff und Kilian (2012) zusätzlich eine detaillierte Analyse der länderspezifischen Marktentwicklung durchgeführt (Tab. 5-10). So wird erwartet, dass in Frankreich aufgrund der spezifischen Strategien der französischen Auto-

mobiler Hersteller und anderer Akteure (z. B. Car-Sharing- und anderer wichtiger Unternehmen) BEV eine vergleichsweise hohe Bedeutung einnehmen werden. Für das Vereinigte Königreich wird ein PEV-Marktanteil von 7 % projiziert. In der nationalen Studie des OLEVs wurde ebenfalls ermittelt, dass die „ultra low emission vehicles“ im Jahr 2020 zwischen 3 % und 7 % Marktanteil erreichen könnten.

		Frankreich	UK	Italien	Spanien	Deutschland	EU 27
2020	HEV	9	7	10	7	7	9
	PEV	9	7	3	7	9	7
2030	HEV	11	8	23	13	7	13
	PEV	38	18	22	29	19	31

Tab. 5-10 Überblick über projizierte Marktanteile von xEVs an den Pkw-Neuregistrierungen in ausgewählten Ländern

Quelle: eigene Zusammenstellung auf Basis von (Proff & Kilian 2012)

Fazit

Mit Ausnahme von Polen, wo Elektromobilität derzeit keine hohe Priorität genießt, finden in den untersuchten Fokussländern in Europa starke Aktivitäten in Bezug auf Elektrofahrzeuge statt. In Frankreich, Italien, UK und Norwegen profitieren Elektrofahrzeuge von Kaufanreizen, die jedoch unterschiedlich in ihrer Höhe und hinsichtlich der Förderkriterien ausgestaltet sind. Insbesondere die Systeme in Frankreich und Italien sind mit ihrem Bezug auf CO₂-Emissionen sehr technologieoffen angelegt. Das norwegische Anreizsystem entfaltet die stärksten Auswirkungen auf die Kosten eines BEV im Vergleich zu einem Verbrennungsfahrzeug. Die betrachteten Länder in Europa investieren zudem in Forschung und Entwicklung sowie in Demonstrationsprojekte. Frankreich wendet in diesen Bereichen die größten Investitionen auf. Mit Ausnahme von Norwegen scheint die Förderung von xEVs in den meisten Fällen auch von nationalen industriepolitischen Interessen geleitet zu sein. Diese liegen zum Teil in einer starken, bereits bestehenden inländischen Automobilindustrie begründet, wie es in Frankreich und Italien der Fall ist, oder in Ambitionen im Bereich FuE, um eine dementsprechende Industrie aufzubauen. So legt die britische Politik für xEVs einen Schwerpunkt auf die FuE-Förderung mit der Perspektive, dass die xEV-Industrie ein wichtiger Motor für die Schaffung von Arbeitsplätzen werden kann. Französische Hersteller haben erfolgreich einige PEV-Modelle auf dem Markt gebracht, die zum Teil auch in Frankreich produziert werden. Großbritannien profitiert mit der Produktion des Nissan Leaf in Sunderland von den Aktivitäten ausländischer Hersteller. Großbritannien und Norwegen weisen spezifische Akteursstrukturen im Bereich Elektromobilität auf: In den meisten Ländern liegen die Zuständigkeiten bei den Ministerien auf Abteilungsebene oder in interministeriellen Arbeitsgruppen. In Großbritannien wurde dagegen mit dem „Office for Low Emission Vehicles“ eine neue Institution gegründet, die für den Ausbau des Anteils der xEVs auf den Straßen sorgen soll. In Norwegen ist die gemeinsame Initiative „Grønn Bil“ von Regierung und Industrie ein zentraler Akteur im Bereich Elektromobilität.

5.2.3 USA

D. Kreyenberg (DLR)

Regierung / Politik / Öffentliche Infrastruktur

Die Mobilität ist in den USA sehr stark vom Pkw beeinflusst. Das Land ist stark zersiedelt und aufgrund des über lange Jahrzehnte niedrigen Ölpreises und der fehlenden staatlichen Lenkungen gibt es fast keine öffentlichen Verkehrsmittel als Alternative zum Auto. Der öffentliche Personenverkehr über Bahn- und Bus- Systeme konzentriert sich fast ausschließlich auf Großstädte wie New York, Chicago oder San Francisco. Auf politischer Ebene gab es in der Vergangenheit bis heute wenig Anstrengungen, das zu verändern, und so werden Pkw aller Voraussicht nach auch weiterhin für viele Jahre das dominierende Fortbewegungsmittel im US-Transportsystem darstellen.

Die Elektrifizierung von Fahrzeugen wird von der Politik mit den Zielstellungen (I) Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Verkehr (II) Verringerung der Abhängigkeit von Erdöl (III) Verbesserung der lokalen Luftqualität verfolgt. Die Entwicklung einer nachhaltigen Elektrofahrzeugindustrie wird dabei als eine komplexe, langfristige und multi-sektorale Aufgabe mit zahlreichen Akteuren aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung gesehen. Diese Aufgabe wird von der Politik durch Forschungs-, Infrastruktur-, und Absatzförderung gesteuert. Das Ziel der US-Regierung liegt bei 1 Mio. PEV bis 2015.

Akteure

In der landesweiten Förderung der Elektromobilität spielt das „United States Department of Energy“ (DOE) die zentrale Rolle. Es ist verantwortlich für die Durchführung von Forschung, Forschungsförderung, Kreditvergabe an Unternehmer und für die Unterstützung der Marktentwicklung. Die „Environmental Protection Agency“ (EPA) ist der zweitwichtigste Akteur und zuständig für die Durchsetzung des „Clean Air Acts“ und anderer Umweltbestimmungen. Die EPA regelt die Emissionsvorschriften von Fahrzeugen, aber auch der Industrie. Das „Department of Commerce“ ist als dritter Akteur zu erwähnen und trägt durch die Steuergutschriften zur Unterstützung des PEV Markts bei.

Auf bundesstaatlicher Ebene ist das California Air Resources Board (CARB, auch ARB) der wichtigste Impulsgeber. Das CARB ist bekannt dafür, besonders weitreichende Vorschläge zur Luftreinhaltung zu erarbeiten. In diesem Zusammenhang ist die im Folgenden näher beschriebene ZEV-Gesetzgebung besonders hervorzuheben.

Weitere wichtige Impulsgeber finden sich auf städtischer und kommunaler Ebene. Hier werden, ähnlich wie in Deutschland, spezielle Programme zur Förderung und Vernetzung der Stakeholder und zum Infrastrukturaufbau betrieben.

Programme und Maßnahmen

Die Rezession der letzten Jahre, die finanzielle Rettung von GM, steigende Kraftstoffpreise, das Engagement für eine neue Energiewirtschaft und der Wille die Konjunktur zu fördern, haben auf nationaler Ebene eine Neuausrichtung der Politik unter der Obama Administration hervorgerufen. So wurde eine Reihe von integrativen Maßnahmen beschlossen, welche eine neue Batterie-Industrie, Elektro-Fahrzeug Fertigungskapazitäten, die Entwicklung von Fahrzeug-Ladegeräten sowie den Rollout von Ladeinfrastruktur initiieren sollte. Der Erfolg und

Misserfolg dieser Maßnahmen und die daraus entstehenden Unternehmen werden genau beobachtet.

Auf bundesstaatlicher Ebene war die ZEV-Gesetzgebung in der Vergangenheit besonders erfolgreich. „Die ZEV-Gesetzgebung hat ihren Ursprung im US-Bundesstaat Kalifornien. Das ZEV-Mandat aus dem Jahr 1990, wonach 10 % aller Personenwagen (rund 200 000 Stück) ab 2003 Nullemissionsfahrzeuge (Zero Emission Vehicles - ZEV) sein sollten, wird heute als Initialzündung der neueren Entwicklung von alternativen Antrieben gesehen. Als Reaktion auf das Gesetz haben bis Ende der 1990er Jahre alle großen OEM die Entwicklung von Batteriefahrzeugen vorangetrieben, welche danach durch die Entwicklung der aussichtsreicher erscheinenden Brennstoffzellenfahrzeuge ersetzt wurde. Mittlerweile wurde das ursprüngliche Gesetz immer weiter verändert. So hat sich die kalifornische Behörde bereit erklärt, ein Punktesystem für emissionsarme Fahrzeuge einzuführen, weil sich das ursprüngliche Ziel als unerreichbar herausgestellt hat. In der aktuellen ZEV-Gesetzgebung errechnet sich der verbindliche Zielwert für die Absatzmenge von ZEV-Fahrzeugen (Roland Berger & fka 2014) eines Herstellers aus dem durchschnittlichen Absatz von konventionellen Fahrzeugen, multipliziert mit einem über die Jahre ansteigenden ZEV-Prozentsatz. Aufgrund ihres Vorbildcharakters wurde die ZEV-Gesetzgebung bereits in 12 weiteren US-Bundesstaaten implementiert“ (Kreyenberg et al. 2015)

Für verbrennungsmotorisch angetriebene Pkw verschärfte die Obama-Regierung im März 2009 die seit 1985 unveränderten Flottenemissionsgrenzwerte in der Corporate Average Fuel Economy (CAFE) Gesetzgebung. Seit dem Jahr 2010 entwickeln die Bundesbehörden EPA und NHTSA (National Highway Traffic and Safety Administration) Vorschriften zur expliziten Reduktion der durch Pkw verursachten THG-Emissionen.

Förderschwerpunkte und finanzieller Rahmen der Förderung

Die Förderschwerpunkte der US-Regierung lassen sich in die drei Themenfelder (I) Forschungs-Förderung (II), Infrastruktur-Förderung und (III) Absatzförderung unterteilen:

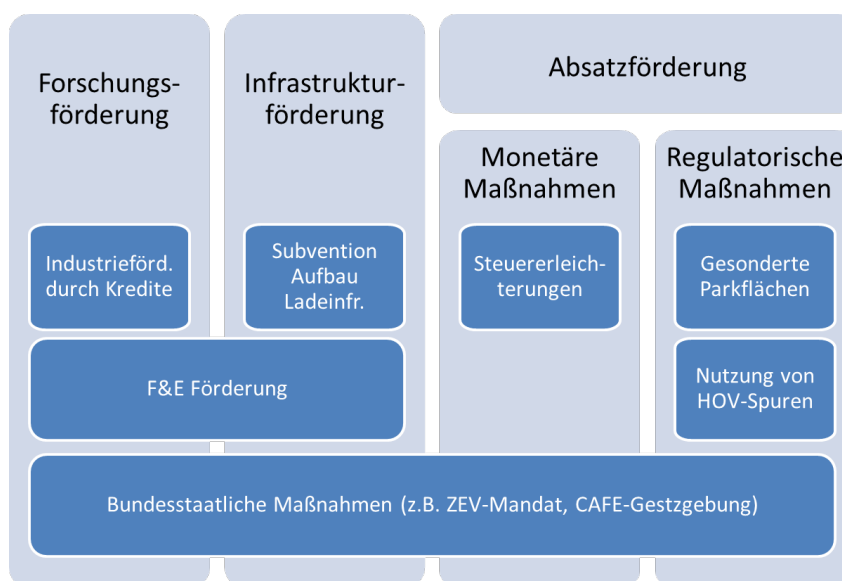


Abb. 5-11 Förderstrategie Elektromobilität USA

Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (Korthauer 2014)

(I) Forschungsförderung: Die Forschungsförderung der Elektromobilität wird hauptsächlich aus einem 41,7 Mrd. USD (32,1 Mrd. EUR¹²) großen Topf des DOE (2009-2019) bedient. Davon werden 35,2 Mrd. USD (27,1 Mrd. EUR) als direkte Zuschüsse verwendet und 6,5 Mrd. USD (5,1 Mrd. EUR) als Kredite. Sie stammen aus dem im Februar 2009 von Präsident Obama verabschiedeten Konjunkturpaket der USA „American Recovery and Reinvestment Act of 2009“ (ARRA), welches sich auf insgesamt 821 Mrd. USD (632,2 Mrd. EUR) bis 2019 belaufen soll (Wurzelmann 2011).

(II) Infrastrukturförderung: Das „EV-Project“ ist das größte private Demonstrationsprojekt für Ladestation. Das Projekt stellt 230 Million USD (177,1 Mio. EUR) für öffentliche und private Investitionen zur Verfügung, darunter einen Anteil von 115 Million USD (88,6 Mio. EUR) aus den Mitteln von ARRA. Das Transport-und Energieunternehmen „ECotality“ übernimmt die Verwaltung der Installation von 14 000 Ladestationen in 16 Städten aus acht Bundesstaaten. Dabei wird die Gebührenerhebung in den verschiedenen Topographien und Klimazonen untersucht. ECotality installiert in Partnerschaft mit Nissan kostenlos über 8 000 Ladegeräte in den Häusern der Chevrolet Volt und Nissan Leaf Eigentümer. Das Projekt sammelt dabei Daten über die Lademuster dieser häuslichen Ladegeräte und auch öffentlicher Ladegeräte und hofft, die wirksamsten Erlösmodelle für verschiedene Arten von Ladestationen und Regionen zu bestimmen. Ferner soll das EV-Projekt auch das Beschäftigungswachstum durch die Schaffung oder Beibehaltung von 1 200 Arbeitsplätzen sichern.

(III) Absatzförderung: Die US-Regierung bietet PEV Käufern ab dem 01.10.2009 eine Steuergutschrift, die auf der Grundlage der Batteriegröße berechnet wird, mit einer Mindestgröße von 5 kWh. Es wird für diese Fahrzeuge ein Grundbetrag von 2 500 USD (1 925 EUR) plus zusätzliche 417 USD (321 EUR) für jede kWh Kapazität über 5 kWh, mit einer maximalen Größe (16 kWh und größere Batteriekapazitäten) von 7 500 USD (5 775 EUR) gewährt. Dieses Programm war bis zu einer Anzahl von 200 000 Fahrzeugen pro Hersteller begrenzt.

Ab 2013 gibt es auf Bundesstaatenebene eine Reihe von Kaufanreizen für PEV Käufer. Diese sind in ihrer Ausgestaltung sehr unterschiedlich wie Tabelle 1 zeigt. In Kalifornien gibt es z. B. Rabatte oder „Einkaufsgutscheine“ im Wert von 2 500 USD (1 925 EUR) für den Kauf eines Zero Emission Vehicles (xEV und CNG) und 1 500 USD (1 155 EUR) für den Kauf eines Plug-in-Hybriden.

US-Bundestaat	Programm	Betrag	Einschränkung
COLORADO	Innovative Motor Vehicle Credit	8 260 USD (6 360 EUR)	Keine Umbauten
GEORGIA	Zero Emission Vehicle Tax Credit	5 000 USD (3 850 EUR)	20 % auf Kaufpreis, max. 5 000 USD
ILLINOIS	Illinois Alternate Fuels Rebate Program	4 000 USD (3 080 EUR)	80 % auf Kaufpreis, max. 4 000 USD
KENTUCKY	Alternative Fuel Vehicle Credit	3 000 USD (2 310 EUR)	10 % auf Kaufpreis, max. 3 000 USD
PENNSYLVANIA	Alternative Fuel Incentive Grant Program (AFIG)	3 000 USD (2 310 EUR)	für BEV und PHEV

¹² Umrechnungskurs 1 Euro = 1,3 USD

CALIFORNIA	Clean Vehicle Rebate Project (CVRP)	2 500 USD (1 925 EUR)	1 500-2 500 USD
TEXAS	Alternative Fuel Vehicle Rebate	2 500 USD (1 925 EUR)	Bis 4 500 kg Fahrzeuggewicht
UTAH	Alternative Fuel Vehicle Credit	2 500 USD (1 925 EUR)	15 % auf Kaufpreis, max. 2 500 USD
INDIANA	Indiana Alternative Fuel Vehicle Grant Program	2 000 USD (1 540 EUR)	
SOUTH CAROLINA	PHEV Tax Credit	2 000 USD (1 540 EUR)	667-2 000 USD, ab 4 kWh Batterie
MARYLAND	PEV Tax Credit	1 000 USD (770 EUR)	600-1 000 abhängig von Batteriegröße
MONTANA	Alternative Fuel Vehicle Credit	500 USD (385 EUR)	Bis 4 535,92 kg Fahrzeuggewicht
RHODE ISLAND	Warren County Alternative Fuel Vehicle Credit	100 USD (77 EUR)	

Tab. 5-11 Kaufanreize für ZEV-Fahrzeuge auf US-Bundesstaatenebene

Quelle: eigene Darstellung

Ferner gibt es für Fahrer von PEV in einer Reihe von Großstädten Zugang zu speziellen Fahrspuren (High Occupant Vehicle – HOV Lanes) sowie einen bevorzugten Zugang zu High-Occupant und Toll (HOT) Lanes. Angewendet werden diese Maßnahmen vor allem in der Bay Area in Kalifornien, Los Angeles, San Diego, Washington DC, Texas, und Seattle. In der Vergangenheit sollten diese Maßnahmen z.B. Fahrgemeinschaften für Pendler fördern. PEV in den genannten Regionen fallen nun ebenfalls unter diese Regelung.

Infrastruktur

Das „Alternative Fuels Data Center“ des Energieministeriums (DOE - Department of Energy) unterhält eine Karte von öffentlichen und privaten Ladestationen in den USA, einschließlich der Anzahl ihrer Ladepunkte:

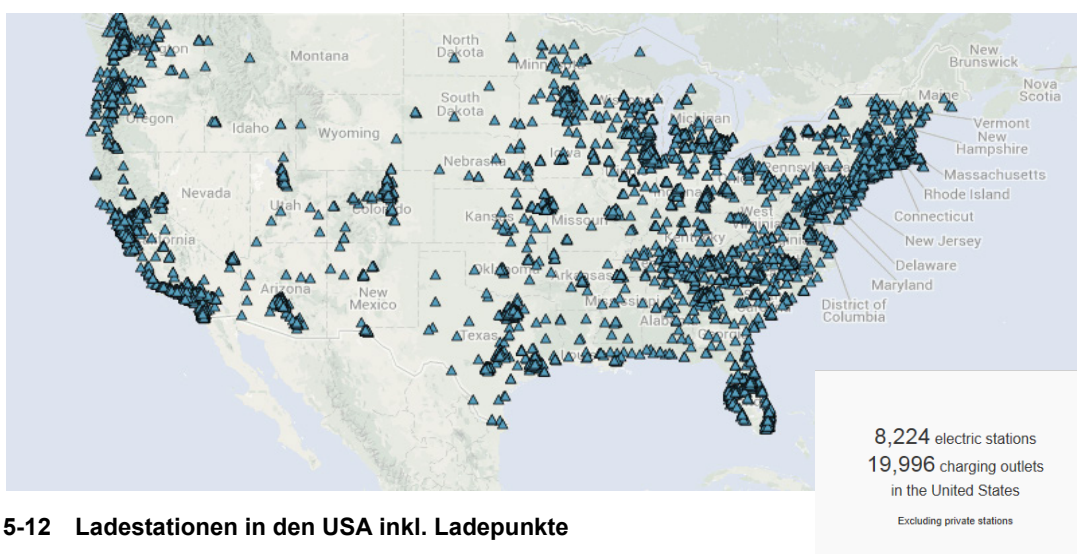


Abb. 5-12 Ladestationen in den USA inkl. Ladepunkte

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (DOE 2014). Stand: 04.06.2014.

Der Ausbau und die Verbesserung der Ladeinfrastruktur ist im Ergebnis der Experteninterviews eine der wichtigsten Maßnahmen für eine erfolgreiche Elektromobilität. Das derzeitige Lade-Netzwerk wird von den Experten als unzuverlässig eingestuft. Dabei sind die Verfügbarkeit und Abrechnung, aufgrund der verschiedenen Anbieter und Ladeprotokolle, besonders hervorzuheben. Die durchschnittliche Haushaltsspannung beträgt in den USA 110V, was eine deutlich langsamere Ladung bedeutet als beispielsweise in Deutschland, wo mit 230V geladen werden kann. Höhere Spannungen von 220V sind gegen Aufpreis im öffentlichen und privaten Raum möglich, wenn die entsprechende Anschlussleistung verfügbar ist.

Die Verfügbarkeit von Ladeoptionen variiert stark zwischen den Staaten. Selbst innerhalb der Staaten sind Ladestationen in der Regel nur in bestimmten Städten konzentriert. Dies begrenzt die Fähigkeit eines PEV-Fahrers, sich zu den angrenzenden Städten mit begrenzter Ladeinfrastruktur zu bewegen. Um diesem Bedarf gerecht zu werden, half der „American Recovery and Reinvestment Act“ die Installation von 1 500 Ladestationen im ganzen Land voranzubringen. Zum Beispiel ist der „West Coast Green Highway“ eine Initiative auf der Interstate-5, die sich von Kanada nach Mexiko an der US-Westküste erstreckt. Wenn sie fertig ist, wird das Projekt der Öffentlichkeit Schnellladung alle 25-60 Meilen bieten, entlang der gesamten Länge von 1 300 Meilen.

Forschungsinstitutionen und -förderung

Die Forschungsschwerpunkte des DOE liegen in der FuE-Förderung von Fahrzeugtechnologien und der Produktionsförderung von Batterien. Dadurch sollen vor allem die Batteriekosten sinken und die Leistung bzw. Energiedichte der Batterien steigen. Die Forschungsprogramme beinhalten deshalb Mittelzusagen, die die Reduzierung der Kosten und Verbesserung der technischen Parameter der Batterien versprechen. Das Gesamtbudget des DOE für diese Themen beläuft sich auf 35,2 Mrd. US-Dollar (27,1 Mio. EUR) über 10 Jahre. Innerhalb des DOE sind drei Abteilungen für die Elektromobilität von Bedeutung.

Office of Science/Basic Energy Sciences (BES): Grundlagenforschung z.B. in der Nanotechnologie, in Chemie- und Materialwissenschaften sowie den Schnittstellentechnologien.

Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E): Budget von 387 Mio. US-Dollar (298 Mio. EUR): Fördert neue und revolutionäre Forschungsansätze, welche großes technisches Potenzial und signifikante wirtschaftliche Effekte mit sich bringen könnten, aber auch ein hohes Erfolgsrisiko mit sich bringen. Erwähnenswert ist weiterhin die Batterieforschung, insbesondere diverser Post-Lithium-Ionen-Batterietechnologien, unter dem Programm »Batteries for Electrical Energy Storage in Transportation (BEEST). Die mit Fördermitteln unterstützten Organisationen sind sowohl private Unternehmen als auch Universitäten oder Forschungsinstitute.

Office of Electricity / Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE): FuE-Tätigkeiten zu Batterien, um die Marktdurchdringung mit Elektrofahrzeugen zu ermöglichen. Innerhalb des EERE ist das Vehicle Technology Program (VTP) von Bedeutung. Dieses Programm zielt darauf ab, durch Entwicklung von Lithium-Ionen-Batterien der 3. Generation und Verbesserung der Produktionsprozesse die Batteriekosten weiter zu senken. Die Einzelprogramme des VTP wurden hauptsächlich von der amerikanischen Automobilindustrie in Detroit in Anspruch genommen. Sie können u.a. hier eingesehen werden:

(<http://energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office-key-activities-vehicles>)

Im Rahmen des Konjunkturpaketes ARRA stellt das DOE insgesamt 2,4 Mrd. US-Dollar (1,8 Mrd. Euro) zur Förderung der Entwicklung von Elektrofahrzeugen bereit. Damit werden 48 Projekte in 20 Bundesstaaten gefördert. Ein Schwerpunkt liegt mit einer Förderung von 1,5 Mrd. US-Dollar (1,2 Mrd. Euro) auf FuE, Produktion und die Entwicklung von Maßnahmen zum Recycling von Batterien. Damit soll eine Verdoppelung der Energiedichte und eine Kostensenkung um 70 % von PHEV- und BEV- Batterien erreicht werden. Die 1,5 Mrd. US-Dollar (1,2 Mrd. Euro) sind auf folgende Wertschöpfungsstufen aufgeteilt: 28,4 Mio. US-Dollar (21,9 Mio. Euro) für Abbau und Aufbereitung von Lithium, 259 Mio. US-Dollar (199 Mio. Euro) für Komponentenentwicklung, 735 Mio. US-Dollar (566 Mio. Euro) für Entwicklung der Batteriezellen, 462 Mio. US-Dollar (356 Mio. Euro) für Batterie-Packaging-Anlagen und 9,5 Mio. US-Dollar (7,3 Mio. Euro) für eine Lithiumrecyclinganlage. Dadurch wird deutlich, dass hier vor allem die Batterieindustrie, insbesondere der Auf- und Ausbau von Produktionsanlagen, gefördert wird. Weitere 500 Mio. US-Dollar (385 Mio. Euro) fließen in die Entwicklung des Antriebsstrangs (Elektromotoren, Leistungselektronik und andere Komponenten). 400 Mio. US-Dollar (308 Mio. Euro) werden für PHEV Demonstrationsvorhaben, die Installation von Ladeinfrastruktur und die Ausbildung von Fachpersonal für die Elektromobilität bereitgestellt.¹³ (Peters et al. 2012)

Im Jahr 2012 wurde von Präsident Obama das EV Everywhere Projekt gestartet, welches in den nächsten zehn Jahren die Anschaffung und Betriebskosten von Elektrofahrzeugen signifikant senken soll, damit jeder Amerikaner in der Zukunft ein Elektrofahrzeug leisten kann. Dazu werden vom DOE die unterschiedlichsten Forschungsprojekte unterstützt.

Wirtschaft und Industrie

Die Vereinigten Staaten sind eine stark urbanisierte Industriegesellschaft mit einer traditionell starken Automobilindustrie. Einige der weltweit größten Automobilhersteller wie GM, Chrysler und Ford haben in den USA ihren Firmensitz und bedeutende Produktionsstandorte. Der Automobilsektor, einschließlich der Herstellung von Stahl, Kunststoffen und Textilien, die Finanzierung, Verkauf und Wartung von Fahrzeugen und der Bau von Straßen und Brücken ist bis heute eine tragende Säule in der amerikanischen Wirtschaft.

„Historisch gesehen trägt die Automobilindustrie etwa 3 bis 3,5 % zum amerikanischen Bruttoinlandsprodukt bei. Im Jahresdurchschnitt 2011 waren über 2,7 Millionen Menschen in der Herstellung von Kfz und Kfz-Teilen sowie im Groß- und Einzelhandel dieser Erzeugnisse beschäftigt. Aufgrund der Verbindungen zu anderen Industrien, insbesondere im Einkauf von Waren die für die Herstellung benötigt werden, hängen jedoch weit mehr Arbeitsplätze von der Automobilindustrie ab. So ist die Branche beispielsweise mit Bezug von etwa 20 % des gesamten inländischen Stahlbedarfs der größte Stahlkonsument in den USA. Schätzungen gehen von bis zu 13 Millionen Jobs aus, die direkt oder indirekt mit der Automobilindustrie in Verbindung stehen. Das sind etwa 10 % des gesamten amerikanischen Arbeitsmarktes. Diese Jobs generieren ein Einkommen von jährlich über 500 Mrd. USD (385 Mrd. Euro) und Steuereinnahmen von etwa 70 Mrd. USD (54 Mrd. Euro) - Stand 2010“ (Daimler 2011)

¹³ Dieser Abschnitt basiert im wesentlichen aus einem Bericht für das Büro für Technikfolgen- Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) von (Peters et al. 2012)

Der Übergang zur reinen Elektromobilität wird von den Experten als ein über mehrere Jahrzehnte andauernder Prozess gesehen. Die Förderprogramme des DOE sind dabei ganz bewusst auf die Entwicklung, Produktion und Recycling der Batterien für Elektrofahrzeuge in den USA ausgelegt, um diese Wertschöpfung im eigenen Land zu etablieren.

Die größte Herausforderung der Autoindustrie für die kommenden Jahrzehnte liegt dabei in der parallelen Entwicklung der Wertschöpfungskette für die elektrifizierten Antriebe. Diese werden in den ersten Jahren aller Voraussicht nach keine Gewinne erwirtschaften und sind nur durch staatliche oder OEM-interne Subventionen zu finanzieren. Wie schwer dieser Beginn sein kann, haben bereits die Insolvenzen von Better Place, Fiskar und mehrerer Batteriehersteller gezeigt. Der derzeitige Erfolg von Tesla ist dabei eine positive Ausnahme. Die zweitgrößte Herausforderung liegt in der Konkurrenzfähigkeit der Technik, welche von den Verbrauchern wahrscheinlich immer mit dem gewohnten Komfort und der Reichweite von verbrennungsmotorisch angetriebenen Pkw verglichen werden wird.

Abb. 5-13 zeigt die 10 umsatzstärksten PHEV und BEV Modelle in den USA nach ihrem Herkunftsland von 2011 bis 2013. Diese Auswertung zeigt deutlich, dass ein Großteil der in den USA abgesetzten PEV auch in den USA produziert wurde.

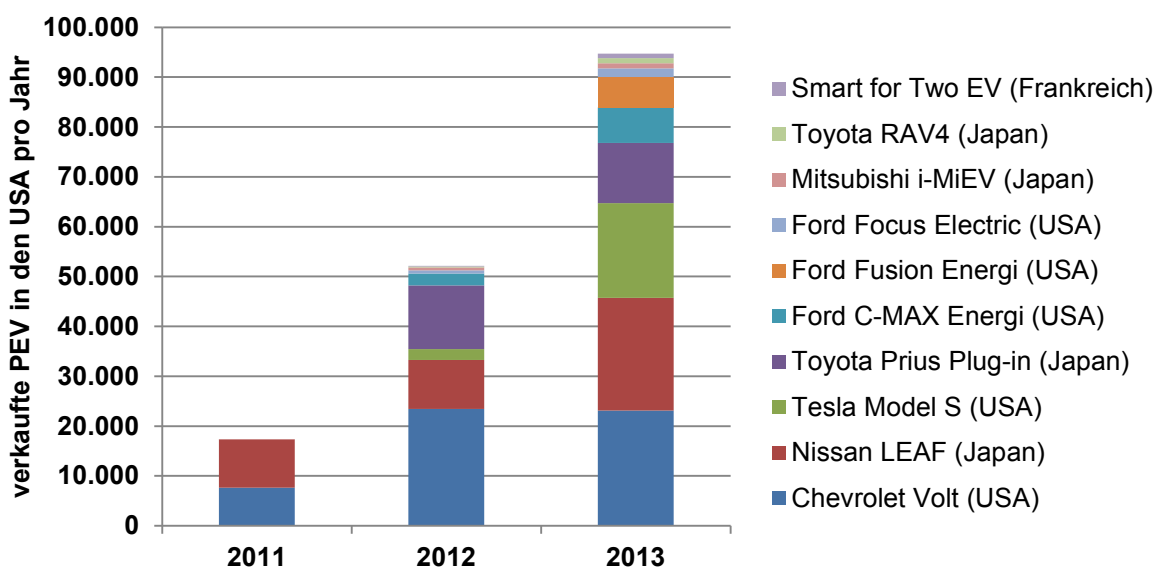


Abb. 5-13 Anzahl abgesetzter PEV in den USA nach Verkaufsjahr und Herkunftsland

Quelle: eigene Darstellung nach (AFDC 2014)

Wie sich die heimischen Produktionskapazitäten in den nächsten Jahren entwickeln werden ist schwierig vorherzusagen. Die deutschen Hersteller kommen in den nächsten Jahren mit BMWi3, Mercedes-Benz B-Klasse, VW e-up und e-Golf mit volumenstarken BEV-Modellen auf den USA-Markt. Hinzu kommen zahlreiche PHEV-Ankündigungen deutscher und japanischer Hersteller.

Verbraucher und Markt

Im Jahr 2011 legte Präsident Obama das Ziel fest, bis 2015 in Amerika eine Million Elektroautos (PHEV und BEV) auf die Straßen zu bringen. Dieses Ziel wird aller Voraussicht nach

verfehlt, wie Tabelle 2 zeigt. Mit einer Flotte von über 220 000 BEV und PHEV (bis 1.HJ 2014) sind in den USA dennoch die meisten Elektrofahrzeuge weltweit angemeldet. Im 1.HJ 2014 betrug der US-Marktanteil an den weltweiten Neufahrzeugverkäufen von BEV und PHEV knapp 50 %. Der Markt von HEV erreicht in den USA schon eine beachtliche Größe von knapp 500 000 Fahrzeugen in 2013. Am gesamten US Pkw-Markt kamen in 2013 HEV auf einen Marktanteil von etwa 3 %, BEV und PHEV auf jeweils 0,3 %.

Aktuell werden den Fahrzeugkäufern von 16 Fahrzeugherstellern 10 BEV und 7 PHEV Modelle angeboten. Die Gesamtzulassungen bis Juli 2014 führt der Chevrolet Volt mit 65 187 verkauften Fahrzeugen an. Danach kommen Nissan Leaf (57 877) Toyota Prius Plug-In (35 509) und Tesla S (28 455). Für die Jahre 2014 und 2015 sind von den OEM rund 20 Neuerscheinungen, vorwiegend im Kleinen und Mittleren Segment, angekündigt. Das Umsatzplus bei PHEV und BEV von 2012 zu 2013 ist einerseits auf die gestiegene Angebotsvielfalt zurückzuführen. Andererseits und vielleicht noch wichtiger wurde in dieser Zeit von den Fahrzeuganbietern die gewährte Steuergutschrift in die Leasingverträge der Fahrzeuge integrieren, so dass die Leasingkosten einiger Modelle unter denen vergleichbarer Verbrenner lagen.

Verkaufszahlen Pkw USA					Grafik
Jahr	HEV	BEV	PHEV	Gesamt	
2007	352 274	0	0	11 777 314	
2008	313 673	0	0	13 260 747	
2009	290 292	0	0	10 429 014	
2010	274 210	19	326	11 588 783	
2011	266 329	7 671	10 064	12 734 356	
2012	434 645	14 251	38 584	14 439 684	
2013	495 530	47 694	49 008	15 531 609	
1.HJ 2014	232 318	25 844	29 129	-	
Summe	2 659 271	95 479	127 111	-	

Tab. 5-12 Verkaufszahlen Pkw in den USA 2007 - 2014

Quelle: (EDTA 2014)

Geographisch ist der Verkauf von BEV und PHEV in wenigen Regionen konzentriert, insbesondere in den Stadtregionen an der West und Ostküste (San Diego, Los Angeles, San Francisco Bay Area, Portland Oregon, Seattle und Washington). Der Bundesstaat Kalifornien ist dabei Spitzenreiter mit etwa 1/3 der nationalen BEV und PHEV Verkäufe, bei etwa 12 % aller Neuwagenverkäufe in den USA in 2012. Innerhalb der PEV Käuferschicht gibt es spezifischere Markttrends. So sind unter den Käufern vorwiegend wohlhabende Haushalte mit freistehenden Einfamilienhäusern, die auch die Möglichkeit der Ladung des Pkw bieten, zu

finden. Die durchschnittliche Anzahl an Pkw liegt bei den PEV Käufern mit 2,7 Fahrzeugen im Haushalt überdurchschnittlich hoch, bei sonst durchschnittlich 2,1 Fahrzeugen pro US-Haushalt. Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich derzeit mindestens ein Verbrennungsmotor-Pkw zusätzlich zu dem Elektrofahrzeug im Haushalt befindet.

Die Anfangsphase hat gezeigt, dass die Mehrheit der EV-Nutzer ihr Fahrzeug zu Hause oder am Arbeitsplatz lädt. Wie in Deutschland sind sich die Experten daher uneinig, wie groß die benötigte öffentliche Ladeinfrastruktur wirklich sein sollte.

Fazit - Gesamtbetrachtung des Status quo der Elektromobilität in den USA

Der Markt ist in den ersten Jahren stark mit Anreizen und Bundessteuergutschriften gefördert worden. Kalifornien fiel durch die strenge Gesetzgebung und den zahlungskräftigen und umweltbewussten Kunden die Rolle des „Early Markets“ zu. Zusätzlich wurden staatliche Kredite und Rabatte sowie lokale Anreize wie kostenlose Parkplätze an Lade- und Arbeitsstätten geschaffen. In den letzten Monaten wurden kostengünstige Leasingverträge, HOV-Spur-Privilegien (Fahrbahn für stark besetzte Fahrzeuge) und kostenlose Lade- und Parkmöglichkeiten eingerichtet, welche den Markt für Käufer mit mittlerem Einkommen zugänglich gemacht haben. Diese Anreize sind wahrscheinlich nicht nachhaltig und stoßen mit wachsender Anzahl von Fahrzeugen an ihre Grenzen.

In den ersten Jahren des Marktes waren PEVs teurer, die Ladeinfrastruktur noch nicht gut entwickelt, und reine Batterie-Elektrofahrzeuge hatten Reichweiten-Einschränkungen. Elektrofahrzeuge hatten aber auch einige Vorteile für die Verbraucher, einschließlich des guten Fahrgefühls, des im Vergleich zu Kraftstoffen weniger teuren Stroms, möglicherweise weniger Reparaturen und nicht zuletzt wegen des ökologischen Vorteils. Der Markt entwickelte sich zuerst unter gut ausgebildeten, wohlhabenden und technisch versierten Autokäufern. Ferner besaßen diese Käufer meist ein Haus mit einem direkten Zugang zu einer Lademöglichkeit.

Bis heute fanden die EV-Verkäufe vorwiegend im Kleinwagensegment und nicht in den in den USA sonst so absatzstarken Pickup und Limousinenmarkt statt. Aufgrund des höheren Energiebedarfs für größere und schwerere Fahrzeuge sind rein elektrische Pickups oder Limousinen auch in naher Zukunft nicht darstellbar. Auf Seiten der Produktion von E-Fahrzeugen und deren Komponenten gab es bereits einige bedeutende Insolvenzen in der Anfangsphase, einschließlich dem Projekt Better Place, Fiskar und mehrere Batteriehersteller. Besonders interessant wird in der Zukunft die Entwicklung von Tesla und der von Tesla geplanten Batteriefabrik sein.

Bei der Analyse der abgesetzten Fahrzeuge nach ihrem Herkunftsland wurde festgestellt, dass bis zum Jahr 2013 ein Großteil der in den USA abgesetzten PHEV und BEV auch in den USA produziert wurden. Wie sich die heimischen Markt- und Produktionskapazitäten in den nächsten Jahren entwickeln werden ist schwierig vorherzusagen und nicht Gegenstand dieser Arbeit. Ferner konnte die massive Förderung der US-Regierung in Anbetracht auf die heimische Wirtschaftswirkung und der eingesparten Emissionen nicht hinreichend untersucht werden. Für zukünftige Untersuchungen sind diese Punkte allerdings wünschenswert.

5.2.4 Japan

H. Hüging (WI), T. Koska (WI)

Die Regierung Japans fördert Elektrofahrzeuge aus ökonomischen und ökologischen Gründen. Mit einem Anteil von 20 % an Produktion und Arbeitsplätzen ist die Automobilindustrie eine Schlüsselindustrie in Japan. Die Regierung will durch die Förderung von xEVs die Erhaltung ihrer globalen Wettbewerbsfähigkeit gewährleisten. Gleichzeitig strebt die Regierung eine Verringerung von Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor an und sieht Elektrofahrzeuge als wichtiges Element ihrer CO₂-Reduktionsstrategie. Im Zuge der Tsunamikatastrophe und des Atomunfalls in Fukushima im Jahr 2011 haben xEVs außerdem eine Bedeutung als mögliche Energiespeicher im Falle von Katastrophen und Stromausfällen gewonnen. Die batteriebasierte Elektromobilität wird unter den möglichen zukünftigen alternativen Fahrzeugtechnologien als das Konzept mit der höchsten Marktreife betrachtet.

In der Politik zur Förderung der Elektromobilität in Japan nehmen vier Ministerien eine zentrale Rolle ein: Das Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie (METI), das Ministerium für Land, Infrastruktur, Transport und Tourismus (MLIT), das Ministerium für Umwelt (MOEJ) sowie das Ministerium für Bildung, Kultur, Sport, Wissenschaft und Technologie (MEXT). Das METI, insbesondere die Automobilabteilung, ist für den Bereich Automobilherstellung sowie für verwandte Branchen verantwortlich. Hierzu zählen vor allem die Entwicklung von Pkw betreffenden Maßnahmen, die FuE im Bereich Batterie, Motoren und magnetische Materialien in enger Zusammenarbeit mit privaten Unternehmen sowie die Festlegung von Kraftstoffeffizienzstandards. Die Automobilabteilung des MLIT ist für die Politik hinsichtlich öffentlicher Verkehrsmittel, Lkw, Bussen und Taxen zuständig. Hinzu kommen Fragen der Automobilsicherheit, Politiken mit Umwelt- und Technikbezug und die Formulierung von Fahrzeugnormen. Das MEXT leitet und fördert FuE für Automobile an den Hochschulen, während das MOEJ für die Formulierung von Emissionsvorschriften zuständig ist.

Als wichtigste Strategie hinsichtlich Elektromobilität hat das METI im April 2010 die "Next Generation Vehicle Strategy 2010" vorgelegt. Als "Next Generation Vehicles" werden Hybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeuge (HEVs und PHEVs), sowie Fahrzeuge mit Batterieantrieb (BEVs) und Brennstoffzellenantrieb (FCEVs), saubere Diesel- (CDV) sowie Fahrzeuge mit Antrieb auf Gasbasis (CNG) bezeichnet. Die Strategie zielt darauf ab, die Verbreitung dieser Fahrzeuge durch einen integrierten Ansatz zu erhöhen. Dieser beinhaltet die Förderung von FuE und die Erzeugung von Skaleneffekten durch Massenproduktion. Dadurch sollen die Leistung von Akkus erhöht und die Kosten gesenkt werden; Bauteile sollen leichter und energieeffizienter werden und die internationale Standardisierung soll vorangetrieben werden. Die Strategie enthält sechs Teilstrategien: Gesamtstrategie, Batteriestrategie, Ressourcenstrategie, Infrastrukturstrategie, Systemstrategie und die Strategie zur internationalen Standardisierung (Abb. 5-14). Offizielles Ziel ist, dass BEV und PHEV mehr als 15 % der Neuwagenverkäufe im Jahr 2020, sowie mehr als 20 % der Fahrzeugverkäufe im Jahr 2030 ausmachen werden. Bezogen auf die derzeitigen jährlichen Neuzulassungen (4,5 Mio. Pkw in 2013), entsprechen 675 000 PEV-Neuzulassungen 2015 bzw. 900 000 PEV-Neuzulassungen 2020 diesem Ziel.

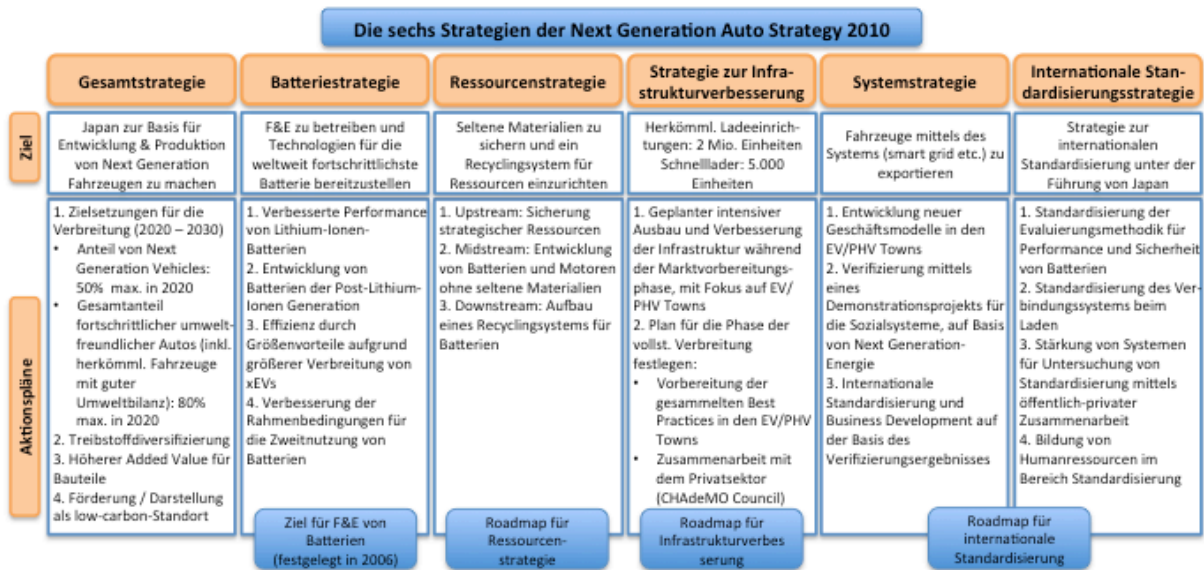


Abb. 5-14 Darstellung der Next Generation Vehicle Strategy 2010

Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (METI 2010)

Verschiedene politische Maßnahmen zielen auf effiziente bzw. umweltfreundlichere Fahrzeuge ab, wobei je nach Programm “next generation vehicles”, “low-emission vehicles” oder “clean energy vehicles” adressiert werden. Obwohl sich die Fahrzeugkategorien leicht voneinander unterscheiden, sind Elektrofahrzeuge in allen drei Begriffen enthalten. Eine hohe Fahrzeugeffizienz soll in Japan insbesondere durch die japanische Kraftstoffeffizienzstandards des “top runner programme” werden: Für Pkw lagen diese bei 14,4 km/l für 2010 und liegen bei 16,8 km/l für 2015. Im Jahr 2010 betrug der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch neuer heimischer Pkw 18,7 km/Liter, sodass die Ziele deutlich übertroffen werden konnte. Hinzu kommen die vom MOEJ festgelegten Emissionsregulierungen für Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffe sowie Stickoxide für Pkw, Lkw, Busse und Motorräder. Um das öffentliche Bewusstsein für umweltfreundlichere Fahrzeuge zu erhöhen, können Fahrzeuge, die entsprechend zertifiziert sind, mit zwei codierten Aufklebern versehen werden; einer kennzeichnet die Kraftstoffeffizienz und einer das Emissionslevel.

Die japanische Regierung vergibt seit 2009 Subventionen für die Anschaffung von Fahrzeugen, die in die Kategorie “Next Generation Vehicles” fallen, sowie für die Installation von Infrastruktur zur Lieferung von Kraftstoff, wie z. B. Schnellladestationen. Im Bereich der elektrifizierten Fahrzeuge können BEV und PHEV Subventionen erhalten. HEV wurden im vorherigen Förderprogramm von 2003 bis 2009 bezuschusst. Die Zuschüsse werden aus Mitteln des METI zur Verfügung gestellt und vom “Next Generation Vehicle Promotion Center” (NeV) vergeben. Das staatliche Budget für das Subventionssystem betrug 4,27 Mrd. Yen (36,7 Mio. Euro) im Jahr 2009, stieg auf 28,2 Mrd. Yen (242,6 Millionen Euro) im Jahr 2011, 29,2 Mrd. Yen (251 Millionen Euro) im Jahr 2012 und auf 30 Mrd. Yen (258 Millionen Euro) im Jahr 2013. Der maximale Zuschuss für batteriebetriebene und Plug-in-Fahrzeuge, einschließlich normaler Pkw und Kei-Cars¹⁴ lag 2011 bei 1 Mio. Yen (8 603 Euro) pro Fahrzeug. Für vier- und zweirädrige Motorräder betrug die Subvention 70 000 Yen (602 Euro) und für saubere

¹⁴ Kei Cars bezeichnet eine japanische Fahrzeugkategorie, die kleine Pkw, Vans und Kleintransporter umfasst. Die Fahrzeuge dürfen maximal 3,4m lang und 1,48m breit sein sind in Hubraum und Leistung beschränkt. Kei Cars genießen in Japan Steuerbegünstigungen und weitere monetäre und nichtmonetäre Vorteile.

Dieselfahrzeuge 400 000 Yen (144 Euro). Die Installation von normalen und Schnellladestationen wird, je nach Art der Anlage, mit 200 000 Yen (1 721 Euro) bis zu 1,5 Mio. Yen (12 904 Euro) bezuschusst. Einem Interview mit METI zufolge werden die Subventionen als Pauschale allen Kunden bzw. Investoren, sowohl privaten als auch öffentlichen, angeboten. Im Jahr 2012 deckte der Zuschuss bis zu 50 % der Preisdifferenz zwischen einem BEV, PHEV oder „Clean Diesel Vehicle“ und einem entsprechenden konventionellen Fahrzeug ab. 2013 wurde der Fördersatz auf bis zu zwei Drittel der Preisdifferenz erhöht. Der Zuschuss für Ladeinfrastrukturanlagen deckt bis zu 75 % der Gesamtkosten der Installation einer Schnellladestation oder einer CNG-Station ab. Ergänzend wurde bis zu 533 Mio. Yen (4,6 Mio. Euro) als Subvention für Verwaltungskosten im Rahmen der Förderung umweltfreundlicher Fahrzeuge, wie zum Beispiel der Ausrichtung von Konferenzen, Outsourcing und Werbung, zur Verfügung gestellt.

Zusätzlich bieten mehrere japanische Regionalregierungen weitere finanzielle Anreize: So erteilt die Präfektur Kanagawa zusätzliche finanzielle Unterstützung in Höhe von etwa der Hälfte des nationalen Subvention für BEV.

		2008	2009	2010	2011	2012
Elektrofahrzeuge inkl. Plug-in- Hybrids	Anzahl geförderter Fzg.	84	1 604	6 544	9 283	16 410
	Subventionsvolumen in Mio. Euro	0,2	18,5	47,6	58,4	82,9
Ladestationen	Anzahl geförderter Stationen	1	141	724	1 846	998
	Subventionsvolumen in Mio. Euro	0,0	1,8	3,8	4,5	2,2

* Normale und Kei-Cars, sowie zwei- und vierrädrige Motorräder

Tab. 5-13 Entwicklung des japanischen Subventionssystems 2008 - 2012

Quelle: (NEV 2014)

Tab. 5-14 gibt einen Überblick über die verschiedenen finanziellen Anreize, die von der japanischen Regierung zur Förderung von Elektrofahrzeuge und entsprechender Infrastruktur eingesetzt werden. Neben den dargestellten finanziellen Anreizen gibt es zusätzlich spezielle Subventionen für Brennstoffzellen- und Wasserstofffahrzeuge auf kommunaler Ebene sowie Subventionen für erdgasbetriebene oder Hybrid-Busse und Lkw.

Experten aus Industrie und Beratungsunternehmen wiesen auf das mögliche Problem einer zeitlichen Lücke im Anschluss an die Förderprogramme hin: Während die Subventionen auf nationaler Ebene im Jahr 2016 auslaufen sollen, ist noch unsicher, ob der Kaufpreis von Elektrofahrzeugen bis dahin stark genug gefallen sein wird, um eine selbsttragende Nachfrage zu gewährleisten. Bis 2016 müssten die Hersteller demnach ein tragfähiges Geschäftsmodell etabliert haben, um einen Einbruch der Nachfrage zu verhindern.

Maßnahme	Zugelassene Fahrzeugtypen						Zugelassene Förderempfänger / Grundlage der Förderung	Typ
	FCE V	PEV	CNG	HEV	An-dere	An-lagen		
Förderung der Vision einer "low carbon society" auf Basis der "my-car" Regulierung	●	●	●	●	●	●	Subventionen für private Verkehrsunternehmen, die Hybridfahrzeuge (HVs) und Aufladestationen für Transportdienstleistungen in den von "my-car" regulierten Bereichen in Nationalparks erwerben.	Subventionen
Förderung der Verbreitung von BEVs durch die Ökologisierung lokaler Transportsysteme		●			●	●	Subventionen an Betreiber von Lkw, Bussen und Taxis, die BEVs und Ladestationen erwerben oder bestehende Fahrzeuge in BEVs umwandeln	
Freistellung / Ermäßigungen bei Tonnagesteuer und Erwerbsteuer von Automobilen	●	●	●	●	●		Basierend auf Umweltleistung/eigenschaften innerhalb eines bestimmten Zeitraums	Steuerermäßigungen
Ermäßigung bei der Automobilsteuer, um ökologische Autos zu fördern	●	●	●	●	●		Reduzierung der Automobilsteuer im Jahr nach der Registrierung für Neufahrzeuge, die bis Ende 2013 als emissionsarme Fahrzeuge zertifiziert sind	
Ermäßigungen bei Einkommensteuer und Körperschaftsteuer auf Basis von Steuersenkungen für "grüne Investitionen"		●		●	●	●	Spezielle Steuervergünstigungen für den Erwerb von emissionsarmen Fahrzeugen und Schnellladeanlagen	
Sonderbehandlung bei der "fixed asset"-Steuer für den Einbau von Kraftstoffversorgungseinrichtungen usw.						●	Verfügbar für den Einbau von Kraftstoffversorgungseinrichtungen usw.	
Zinsgünstige Finanzierung für kleine und mittelständische Unternehmen sowie für öffentliche Einrichtungen durch die Japan Policy Finance Bank		●	●	●	●	●	Für den Erwerb von emissionsarmen Fahrzeugen und relevante Kraftstoffversorgungseinrichtungen	Finanzierungsoptionen

Anmerkung: Dargestellt werden nur die für PEVs oder HEVs relevanten Maßnahmen).

"Andere" enthält Wasserstofffahrzeuge, emissionsarme Dieselfahrzeuge, andere Fahrzeuge, die als hocheffizient und emissionsarm zertifiziert sind.

Tab. 5-14 Ausgewählte finanzielle Anreize zur Förderung emissionsarmer Fahrzeuge in Japan

Quelle: Regionalstudie Japan

Als zentrales Demonstrationsprojekt wurde das "EV/PHEV Towns Concept" vom METI zur Förderung der Verbreitung von xEVs entwickelt. Im März 2009 wurden acht Präfekturen als EV/PHEV-Städte ausgewählt und 2010 um zehn weitere Präfekturen ergänzt. Diese werden in den vier Schwerpunktbereichen des Konzepts gefördert:

1. Schaffung von erster Nachfrage;
2. Entwicklung von Infrastruktur;
3. Bildung und Sensibilisierung der Öffentlichkeit;
4. Evaluierung und Verbesserungen.

In den derzeit ausgewählten 18 Präfekturen werden verschiedene Initiativen umgesetzt, wie z. B. der Einsatz von xEVs als Dienstwagen, Mietwagen, Taxis oder Busse. Hierfür werden oftmals spezielle Subventionen zur Verfügung gestellt. Zusätzlich tragen die lokalen Regierungen mithilfe von Ausstellungen, Testfahr-Events und der Verbreitung von Informationen über Websites usw. aktiv zur Sensibilisierung der Öffentlichkeit bei.

Die japanischen Demonstrationsprojekte ("EV/PHEV Town Concept" s.u.) spielen auch eine Schlüsselrolle beim Aufbau von Ladeinfrastruktur.

Bis Ende 2012 wurden in Japan insgesamt 5 075 Ladestationen mit Hilfe von Fördermitteln aufgebaut. Davon sind 1 750 Schnellladestationen (NEV 2014). Im Rahmen des aktuellen nationalen Förderprogramms, gültig bis Ende Februar 2014, werden von Regierungsseite Gesamtmittel in Höhe von 100,5 Mrd. Yen (734 Mio. Euro) für Ladeinfrastruktursubventionen zur Verfügung gestellt. Die Subventionen sind für Gewerbe und private Nutzer zugänglich und betragen 50 % der Kauf- und Installationskosten. Ladestationen, die mit den sogenannten "Visions Lists" konform sind, können bis zu zwei Drittel der Kosten erstattet bekommen (NEV 2013). Bei den "Vision Lists" handelt es sich um Pläne zur Anzahl, Standort und Art von Ladestation, die von den Präfekturen oder der Straßenbehörde entwickelt werden. Zusätzliche Subventionen auf lokaler Ebene variieren je nach Präfektur.

Die Planungen sehen vor, dass normale Ladestationen vor allem bei Autohändlern, Geschäften, Krankenhäusern, und Parkplätzen installiert werden, während Schnellladeeinrichtungen primär am Straßenrand, an Tankstellen, Schnellstraßen-Rasthöfen, sowie ebenfalls bei Autohändlern und Gewerbeanlagen installiert werden. Hinzu kommen zwei weitere Ansätze der Förderung durch die japanische Regierung: Die proaktive Einrichtung von öffentlichen Ladestationen an Standorten der lokalen Regierungen und der Mitglieder des Förderprogrammes sowie die gezielte Werbung für Ladeanlagen.

Die Entscheidung, ob bei öffentlichen Ladeeinrichtungen Gebühren erhoben werden, treffen in der Regel die Betreiber. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erheben allerdings viele Einrichtung keine Gebühren. Dies führt zum Teil dazu, dass Nutzer lieber die kostenlosen öffentlichen Schnellladegeräte in ihrer Nachbarschaft verwenden, anstatt zu Hause zu laden. Hotels, Restaurants oder Supermärkte sowie öffentliche Stellen bieten häufig ebenfalls kostenlose Lademöglichkeiten an. Das Aufladen an Tankstellen und Autobahnen ist in Japan meist kostenpflichtig. Elektrizitätsunternehmen haben zudem angefangen, kostenpflichtiges Laden als Geschäftsmodell zu etablieren.

Automobil- und Regierungsexperten sehen xEVs als eine mögliche Lösung für Lücken in der Stromversorgung und als mobiler Energiespeicher. In einem dreistufigen Ansatz plant das METI daher, Autos in mobile Stromquellen zu verwandeln: In einem ersten Schritt können

Fahrzeuge mit Steckdosen ausgestattet werden, um Laptops und Handys aufzuladen; diese Modelle sind bereits verfügbar. Ein weiterer Schritt ist die Verbindung von Fahrzeugen mit Häusern, um Klimaanlage oder Beleuchtung im Haus mit Strom zu versorgen. Diese Systeme werden momentan von Nissan und Toyota entwickelt und sind vor allem für Notfallversorgung im Falle von Stromausfällen ausgelegt. Der nächste Schritt ist, Fahrzeuge mit dem Stromnetz zu verbinden, so dass xEVs als temporäre Energiespeicher arbeiten können, um Strom aus erneuerbaren Energien zu speichern und an das Netz zurückzugeben, sobald die Nachfrage höher ist. Experten sehen diese Netzintegration allerdings als ein langfristiges Projekt, das neue Regulierungen und Technologien benötigt. Ein Experte aus der Batterieforschung erwähnte, dass die Verwendung der Batterie als Energiespeicher zu relevanten Verlusten in Qualität und Lebensdauer führt, so dass der Erfolg dieser Konzepte zweifelhaft ist. Laut einem Experten einer internationalen Beratung sind die japanischen Elektrizitätsunternehmen außerdem sehr zurückhaltend hinsichtlich der Netzintegration und in Richtung erneuerbare Energien. Die Netzintegration von Elektrofahrzeugen erscheint daher für die nahe Zukunft als kein realistisches Szenario.

Forschungsförderung und Institutionen

Fördermittel für Elektrofahrzeuge werden in erster Linie durch das Wirtschaftsministerium (METI) bzw. durch die NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization), welche die Forschungsfinanzierung organisiert, vergeben. Im Steuerjahr 2011 wurden ca. 10,5 Mrd. JPY (ca. 80 Mio. EUR) vom Wirtschaftsministerium für Forschungsprojekte zu Elektrofahrzeugen (v.a. Batterieforschung) bereitgestellt. Laut Auskunft von NEDO war das Forschungsbudget für Elektrofahrzeuge seit 2007 mit ca. 7 bis 8 Mrd. JPY (50 bis 60 Mio. Euro) jährlich relativ konstant. Davon werden ca. 3 Mrd. JPY (26 Mio. Euro) in Grundlagenforschung investiert, jeweils weitere 2 Mrd. JPY (17 Mio. Euro) fließen in die Produktentwicklung im Bereich stationäre Batterien und in die Produktentwicklung von elektrifizierten Fahrzeugen.

Die meisten Investitionen in Forschung und Entwicklung in Japan konzentrieren sich auf die Kapazitätserhöhung und die Kostensenkung von Batterien. Gemäß der aus 2006 stammenden "Battery R&D Roadmap" sollen bis zum Jahr 2015 weiterentwickelte Batterien mit einer um das 1,5 fache erhöhten Kapazität bei gleichzeitiger Kostenreduzierung auf 1/7 des aktuellen Niveaus entwickelt werden. Bis 2030 sollen revolutionäre Batterien entwickelt werden, die die Kapazität um das siebenfache erhöhen und die Kosten auf 1/40 des aktuellen Niveaus senken.

In der Budgetplanung für den Zeitraum 2007-2011 hat der Regierung daher ein jährliches Budget zwischen 1,6 Mrd. Yen (13,7 Mio. Euro) und 2,48 Mrd. Yen (21 Mio. Euro) für die Entwicklung von weiterentwickelten Lithium-Ionen-Batterien zur Verfügung gestellt. In der Planung für 2009-2015 ist für die Entwicklung von revolutionären Batterien der Post-Lithium-Ionen-Ära ein Jahresbudget zwischen 2,8 Mrd. Yen (24,1 Mio. Euro) und 3,9 Mio. Yen (33,6 Mio. Euro) vorgesehen.

Äquivalent zur Batteriestrategie gibt es zwei wichtige, von der Regierung geförderte Forschungsprojekte: das RISING-Projekt zur revolutionären Batterietechnologie und das Li-EAD Projekt zur Weiterentwicklung von Lithium-Ionen Batterien. Im RISING-Projekt („Research & Development Initiative for Scientific Innovation of New Generation Batteries“) werden über einen Zeitraum von 7 Jahren innovative Batterien mit einem Schwerpunkt auf hohe Energie-

dichte entwickelt. In diesem Forschungsbereich ist das RISING-Projekt das Schlüsselprojekt der Regierungsförderung. Aktuell forscht das Projekt an sogenannten Zink-Luft-Batterien. Andere Materialien, sowohl luftbasierte als auch halbleiterbasierte Technologien, werden ebenfalls getestet. Beteiligte Experten erwarten, dass diese neuen Arten von Batterien in den 2020er Jahren für die Markteinführung bereit sein werden. Das Li-EAD-Projekt ("Li-ion and Excellent Advanced Batteries Development") umfasst die Entwicklung von hochwertigen Akku-Systemen für Fahrzeuge der nächsten Generation. Die befragten Experten gehen davon aus, dass Lithium-Ionen-Batterien den Markt weiterhin beherrschen und bis 2020 schrittweise Verbesserungen an diesen Batterien möglich sind.

Nach Expertenmeinung ist Japan hinsichtlich der Weiterentwicklung bestehender Materialkonzepte generell gut positioniert. Japan ist zwar führend im Bereich Lithium-Ionen-Technologien, allerdings gibt es auf dem Markt für Lithium-Ionen-Batterien eine starke internationale Konkurrenz, und vor allem Südkorea gewinnt dort dank Kostenvorteilen Marktanteile. In der Grundlagenforschung an Batterien und der Entwicklung von innovativen Materialien wird Europa als führend angesehen. Während auch die USA sehr aktiv sind, wird die Position Japans auf diesem Gebiet als schwächer eingeschätzt. Ferner wurde erwähnt, dass es nur wenig Forschungszusammenarbeit mit anderen Weltregionen gibt.

Die befragten Experten nannten Batterie-Recycling und Weiternutzung als wichtiges zukünftiges Forschungsthema. Diese Forschungsfelder werden in fünf bis zehn Jahren an Bedeutung gewinnen, sobald der xEV-Markt stärker wächst.

Neben den Batterien zählen die Leichtbauweise, Leistungselektronik, insbesondere Leistungshalbleiter mit hoher Schaltfrequenz, Wärmemanagement und allgemein die Energieeffizienz der Fahrzeuge zu den wichtigen Forschungsfeldern. Für den Leichtbau sind Kohlenstofffasern ein vielversprechendes Material zur Gewichtsreduzierung im Massenmarkt. Im Bereich der Leistungselektronik werden neue Materialien für Halbleiter wie Siliziumkarbid und Galliumnitrid erforscht, um die Leistungselektronikmodule zu verbessern; hinzu kommt das Thema der Reduktion des Bedarfs an seltenen Erden in Elektromotoren. Geforscht wird in Japan außerdem zu den Themen Mikro-xEVs (an der Gumma University), automatisiertes Fahren (Japan Automobile Research Institute), Optimierung der Installation der Ladeinfrastruktur (Osaka Prefectural University) und Informationsmanagement bei Ladestationen für xEVs (National Institute for Land and Infrastructure Management).

Wirtschaft und Industrie

Die Automobilherstellung ist einer der industriellen Kernsektoren der japanischen Volkswirtschaft. Die Entwicklung der Automobilwirtschaft wird als Konjunkturbarometer für die gesamte nationale Wirtschaft gesehen. Derzeit liegt die Gesamtbeschäftigtenzahl in der Automobilherstellung und verwandten Industrien in Japan bei 5,45 Mio., was 8,7 % der gesamten japanischen Arbeitskräfte entspricht. 787 000 hiervon arbeiten direkt in der Automobilherstellung. Im Jahr 2011 produzierte die japanische Automobilindustrie 8,4 Mio. Kraftfahrzeuge, davon 7,16 Mio. im Pkw-Segment.

Japans Automobilindustrie trat im Jahr 2009 mit der Massenproduktion des Mitsubishi i-MiEV in den Markt für Elektrofahrzeuge ein. Die wichtigsten japanischen Autokonzerne in diesem Markt sind Mitsubishi, Nissan, Toyota und Honda:

- **Mitsubishi** führte den i-MiEV nach der Veröffentlichung auf dem heimischen Markt 2009 nach und nach durch die Zusammenarbeit mit Peugeot und Citroen in der EU und in Nordamerika ein. Seit 2011 bietet Mitsubishi außerdem den MINICAB-MiEV an, der den Spezifikationen der Kei-Cars Fahrzeugkategorie entspricht.
- **Nissan** produziert seit 2010 den Nissan LEAF in Massenproduktion für die Märkte in Japan, Nordamerika und Europa. Zusätzlich wird ab Mai 2014 der Nissan E-NV200, ein Van mit Elektroantrieb, in einer Fabrik in Barcelona gefertigt. Seit dem Verkaufsstart in 2010 konnten weltweit bereits über 100 000 Nissan LEAFs verkauft werden (Stand Januar 2014).
- **Toyota** offeriert mit dem Prius einen Mittelklassewagen mit Hybridantrieb. Seit Januar 2012 verkauft Toyota den Prius außerdem als Plug-in-Hybrid. Der Toyota Scion iQ von 2013 ist darüberhinaus ein batteriebetriebenes Viersitzer-Pendlerauto, welches für Car-Sharing-Programme in städtischen Umgebungen entwickelt wurde.
- **Honda** enthüllte im November 2012 die verbesserte Version ihres "Micro Commuter"-Prototyps, einem batteriebetriebenen Stadtmobil in Mikro-Größe. Dieser unter Berücksichtigung der Initiative des MLIT entstandene Zweisitzer ist speziell für Senioren, Lieferdienste, Pendler und Car-Sharing geeignet. Außerdem bietet Honda seit Ende 2013 den Accord Plug-in auf dem japanischen und dem amerikanischen Markt an.

Weitere bedeutende Fahrzeughersteller mit eigenen xEV-Konzeptfahrzeugen sind Subaru, Suzuki, Mazda, Infiniti, Lexus und Daihatsu.

Die Produktion von BEVs ist zwischen 2009 und 2011 von rund 1 700 Pkw auf 42 000 stark gestiegen. Dies ist auf die Einführung mehrerer BEV-Modelle in dieser Zeit, vor allem dem Mitsubishi i-MiEV im Jahr 2009, dem Nissan Leaf 2010 und dem Minicab MiEV im Jahr 2011, zurückzuführen. 2012 gingen die BEV-Produktionszahlen im Vergleich zum Vorjahr deutlich zurück (siehe Tab. 5-8). Stattdessen wurden mit ca. 36 000 Fahrzeugen deutlich mehr PHEV als in den Vorjahren produziert, was unter anderem auf die Neuerscheinungen von verschiedenen PHEV-Modellen 2012 und 2013 zurückgeführt werden kann. Auch bei den HEVs steigt sich eine deutliche Steigerung der Produktionszahlen zwischen 2009 und 2012. Die Produktionszahlen übertreffen dabei die Inlandsverkäufe von Elektrofahrzeugen deutlich, was auf die starke Rolle des Exports im xEV-Segment hinweist. So wurden im Jahr 2012 rund 65 500 Pkw-BEVs produziert, aber nur etwa 27 000 im Inland abgesetzt .

Pkw-Segment*	2009	2010	2011	2012
PHEV	515	251	8 472	35 782
BEV	1 744	16 169	42 036	29 757
HEV	821 946	729 682	1 028 162	1 244 770

* Standard- und Kleinfahrzeuge sowie LDV, ohne Sonderfahrzeuge

Tab. 5-15 Produktion von PHEVs, BEVs und HEVs in Japan 2009-2012

Quelle: eigene Zusammenstellung auf Basis von (NEV 2013)

Die befragten Experten benennen unterschiedliche Anwendungsgebiete für die verschiedenen Fahrzeugtypen: Kleine BEVs für städtische Gebiete und Plug-in-Hybrids für größere Fahrzeuge sowie für die Nutzung auf längeren Strecken. Fahrzeughersteller sehen die Notwendigkeit starker Fortschritte in der Leistungselektronik. Wenn die Kombination aus Elektroantriebsstrangsystem und Verbrennungsmotoren kompakter gebaut werden könnte, könnten Plug-in-Hybrids auch eine Option für kleinere Fahrzeugklassen sein. Experten erwähnen außerdem, dass es in der Regel ein hohes Maß an Zusammenarbeit zwischen OEMs und Komponentenherstellern der BEVs, vor allem für Batterien, gibt. So arbeitet üblicherweise jeder OEM primär mit einem Hersteller für Batterien zusammen; Mitsubishi zum Beispiel bezieht seine Batterietechnologie großteils von Toshiba. Einige Batteriehersteller beliefern allerdings auch mehrere OEMs. Allgemein erwähnen die meisten Experten die Batterie als Kernkomponente von xEVs und gleichzeitig als größte Herausforderung. Obwohl japanische Batterielieferanten viel forschen und in neue Produkte investieren, rentieren sich die Investitionen laut einem Experten einer Unternehmensberatung noch nicht. Als weiteres Hindernis wird eine erwartete Marktkonsolidierung der Batteriehersteller gesehen.

Obwohl laut Expertenmeinung neue Geschäftsmodelle wie Car-Sharing in Japan nicht weit verbreitet sind und die meisten der BEV von privaten Nutzern gekauft werden, zeigen mehrere Demonstrationsprojekte mögliche Nischen für Business-Anwendungen von BEVs. Zum Beispiel gewähren manche japanischen Stadtverwaltungen Taxibetreibern einen Zuschuss für die Anschaffungskosten von xEV-Taxis und stellen spezielle Flächen für Taxistände mit xEVs vor Bahnstationen und Kaufhäusern zur Verfügung. In einem Car-Sharing Modellprojekt in Kanagawa arbeitet die Präfektur mit einer Autovermietung zusammen, um eine Doppelnutzung der Fahrzeuge zu ermöglichen: Während der Arbeitszeiten werden die Fahrzeuge für die Nutzung durch die Angestellten reserviert, in der restlichen Zeit können sie von Privatpersonen als Mietwagen genutzt werden.

Darüber hinaus präsentiert die lokale Regierung in Nagasaki ein Demonstrationsprojekt mit dem Namen "driving tourism of the future". Hierbei wird der örtliche Tourismus gefördert, indem mit neuesten Navigationssystemen ausgestattete BEVs als Mietwagen für Touristen in Nagasaki zur Verfügung gestellt werden.

Verbraucher und Markt

Auf dem japanischen Markt für Elektromobilität sind gemäß dem Clean Energy Vehicles Guidebook von 2012 (MOEJ et al. 2012) 26 Typen von Elektrofahrzeugen, ein Plug-in-Elektrofahrzeug sowie 37 Arten von Hybridfahrzeugen einschließlich der Segmente Pkw, Lkw, Busse und Motorräder. Weitere Fahrzeuge wie der Honda Accord Plug-in und der Mitsubishi Outlander PHEV sind in 2013 hinzugekommen.

Im Jahr 2012 waren in Japan knapp 59 Millionen Pkw registriert, davon fast drei Millionen elektrifizierte Fahrzeuge (HEVs, PHEVs und BEVs). Hybridfahrzeuge dominieren dabei klar, während PEVs nur ca. 51 000 Fahrzeuge ausmachten. Mit etwa 34 000 zugelassenen Fahrzeugen im Pkw-Sektor (einschließlich Kei-Cars) im Jahr 2012 konnten BEVs erhebliche höhere Zulassungszahlen als Plug-in-Hybrids (ca. 17 000 Pkw) erreichen. Laut den befragten Experten liegt dies an der begrenzten Verfügbarkeit von Plug-in-Modellen, außerdem wurden

die meisten verfügbaren PHEV-Modelle erst vor kurzem eingeführt¹⁵. Hinzu kommt, dass manche lokale Subventionen eine bestimmte Technologie begünstigen. So sind beispielsweise die von der Präfektur Kanagawa bereitgestellten Zuschüsse auf BEVs begrenzt. Zusätzlich zu den elektrifizierten Pkw waren in Japan 2011 etwa 5 500 batteriebetriebene Motorräder sowie eine kleine Anzahl von Lkw und Bussen mit Elektroantrieb registriert.

Pkw-Segment*		2009	2010	2011	2012
PHEV	Bestand	165	379	4 132	17 281
	Verkäufe	165	214	3 753	13 149
BEV	Bestand	1 889	8 977	20 156	34 066
	Verkäufe	1 622	7 110	11 202	14 023
HEV	Bestand	971 121	1 404 138	2 012 559	2 833 443
	Verkäufe	452,098	447,626	633,417	854 904

* inkl. Kei-Cars und Leichtbau-Pkw, ohne gewerbliche Kei-Cars und Sonderfahrzeuge

Tab. 5-16 Eckdaten zum Bestand und Verkäufen von PHEV, BEV und HEV in Japan 2009-2012

Quelle: eigene Zusammenstellung auf Basis von (NEV 2013)

Die Einstellungen und das Verhalten der japanischen Verbraucher hinsichtlich xEVs hat Deloitte im Jahr 2012 in einer Verbraucherumfrage mit 2 075 Teilnehmern analysiert. Während ein Großteil der Befragten (88 %) über BEVs Bescheid wusste, dachten nur 18 % über den Kauf eines BEVs nach. Auf die Frage nach den Gründen für den Kauf eines BEVs nannten 79 % die Umweltfreundlichkeit; 59 % erwähnten die Möglichkeit, BEVs zu Hause aufzuladen und 58 % nannten als einen der Gründe, dass BEVs im Falle eines Notfalls oder einer Katastrophe Strom liefern könnten. Die drei wichtigsten Bedenken gegenüber BEVs waren der hohe Preis (46 %), die geringe Reichweite (16 %) und eine unzureichende Infrastruktur (12%). Gefragt nach dem Preis, zu dem sie ein BEV kaufen würden, nannten die meisten Befragten weniger als 2,5 Mio. Yen (ca. 21 500 Euro). Hinsichtlich des Fahrzeugtyps bei einem eventuellen Neuwagenkauf bevorzugten 42 % der Befragten ein Hybridfahrzeug (HEV) und 22 % ein PHEV, während sich 18 % für ein BEV und 8 % für ein FCEV entscheiden würden.

Nach Ansicht von Experten ist die Affinität zu innovativen Technologien die stärkste Motivation für heutige Kunden, ein xEV zu erwerben. Die sogenannten „First-Mover“ sind vor allem Menschen mit hohem Interesse an den neuen Technologien. Die japanische Tradition der Kei-Cars wird als vorteilhaft für die Akzeptanz von BEVs gesehen. Die seit dem Zweiten Weltkrieg existierende Fahrzeugklasse von Kleinwagen profitiert von Steuervorteilen und ist in ländlichen Gebieten von Parkplatzvorschriften ausgenommen¹⁶. Kei-Cars sind begrenzt in Größe und Kapazität und werden daher vor allem als Zweitwagen für das Pendeln eingesetzt. Heutzutage haben sie einen Marktanteil von etwa 30 %. Elektrofahrzeuge wie der Mitsubishi i-MiEV ersetzen dabei immer öfter konventionelle Kei-Cars.

¹⁵ 2012: Toyota Prius PHV, 2013: Honda Accord Plug-in und Mitsubishi Outlander PHEV

¹⁶ In Japan müssen Autokäufer bei der Registrierung ihres Autos nachweisen, dass sie Zugang zu einem Parkplatz haben

Neben dem heimischen Markt definieren japanische xEV-Hersteller die USA und Europa als wichtige Märkte für ihre Produkte, während in China weniger Potenzial gesehen wird. Gleichzeitig sehen Experten auch ein hohes Potenzial für ausländische xEVs auf dem japanischen Markt. Vor allem Autos des A-Segments wie der VW E-Up können mit den herkömmlichen Kei-Cars konkurrieren und auf dem japanischen Markt erfolgreich sein.

Eine Beurteilung der Marktperspektiven erfolgte im Rahmen einer Schätzung der "Study Group on Next Generation Vehicle Strategy" (vgl. Tab. 5-17). Die Einschätzungen basieren auf den angekündigten Produktionsplänen der Automobilhersteller. Die Studie schätzt, dass BEVs kontinuierlich steigende Marktanteile erreichen werden. Im Kei-Car-Segment wird ein Wachstum von etwa 0,3 % Marktanteil für BEVs im Jahr 2010 auf 14,4 % im Jahr 2020 und 20,5 % im Jahr 2050 erwartet. Im Kleinwagensegment erwarten die Experten bei ebenfalls starkem Wachstum einen geringeren Marktanteil der BEVs von 6,2 % für 2020 und 11,2 % im Jahr 2050. Im Vergleich zur aktuellen Dominanz der BEVs werden laut Studie in Zukunft die PHEVs eine größere Rolle spielen und bis 2050 einen Marktanteil von 26,3 % erreichen. Unter Voraussetzung der dargestellten Marktanteile wird somit eine Flotte von mehr als zwei Millionen BEVs erwartet. Davon sollen 1,5 Millionen Fahrzeuge im Kei-Car Segment zugelassen sein und ca. 0,7 Millionen batterieelektrische Kleinwagen. Hinzukommt eine Flotte von 1,3 Millionen PHEV.

Pkw-Segment		2010	2015	2020	2030	2050
Kei BEVs	Marktanteil von BEVs am Kei-Car-Absatz	0.3 %	7 %	14.4 %	19,7 %	20.5 %
	Gesamtzahl von genutzten Kei BEVs	8.729	339.953	1.521.194	3.816.346	5.509.479
Kleinwagen-BEVs	Marktanteil von BEVs an Kleinwagenverkäufen	0.09 %	1.6 %	6.2 %	10.5 %	11.2 %
	Gesamtzahl von genutzten BEV im Kleinwagensegment	2.500	142.433	667.730	2.143.868	3.266.433
PHEVs	Marktanteil von PHEV am Pkw-Absatz	0,1 %	3.2 %	12.7 %	23.6 %	26.3 %
	Gesamtzahl von genutzten PHEV	3.000	245.786	1.312.909	4.960.330	7.797.487

Tab. 5-17 Marktperspektiven von xEVs in Japan auf Basis von Schätzungen der Study Group on Next Generation Vehicle Strategy

Quelle: (METI 2010)

Um die Nachfrage nach Pkw, Lkw und Bussen mit Elektroantrieb zu befriedigen, wird erwartet, dass sich die Zahl der produzierten Lithium-Ionen-Batterien auf 54,2 Millionen Zellen im Jahr 2015 erhöht. Gleichzeitig könnten laut Low-carbon Society Achievement Action Plan und METI die Leistungsfähigkeit auf das 1,5-fache erhöht und die Kosten bis 2015 von etwa 18 000 Yen (154,9 Euro) auf 2 600 Yen (22,4 Euro) gesenkt werden. Als wichtige Voraussetzung dafür, die erwartete Gesamtzahl von fast 9 Mio. BEVs im Jahr 2050 bedienen zu können, soll die Ladeinfrastruktur von ehemals 65 Schnellladestationen im Jahr 2009 bis dahin auf 13 600 Stationen ausgebaut werden. Der Stromverbrauch von BEVs und PHEVs des Pkw-Segments wird auf 9,2 TWh pro Jahr in 2030 und 11,5 TWh pro Jahr in 2050 geschätzt.

Damit machen BEVs und PHEVs etwa ein Prozent des gesamten nationalen Stromverbrauchs (176 TWh im Jahr 2007) aus.

Die befragten Experten sehen das politische Engagement und finanzielle Anreize von staatlicher Seite als essentiell für eine erfolgreiche Marktdurchdringung der xEVs in der näheren Zukunft. Japanische Hersteller erwarten, dass BEVs und PHEVs hinsichtlich der Kosten im Vergleich zu konventionell angetriebenen Autos erst in zehn bis 15 Jahren wettbewerbsfähig sein werden. Folglich wird befürchtet, dass, falls die japanischen Subventionen in den nächsten Jahren gestoppt werden, die Preise für xEVs nicht mehr wettbewerbsfähig wären und der Markt zusammenbrechen könnte. Es wird vermutet, dass BEVs in der näheren Zukunft nur begrenzte Marktanteile erreichen können. Die meisten Haushalte in Japan besitzen nur ein Auto. Aufgrund der benötigten Flexibilität haben die BEVs durch ihre begrenzte Reichweite nur ein begrenztes Marktpotenzial. BEVs könnten daher vor allem von Pendlern und als Stadtfahrzeug mit niedrigen Geschwindigkeiten verwendet werden. Allerdings bieten die kleineren japanischen Inseln ein großes Marktpotenzial für BEVs. Der Kraftstoffpreis ist dort teilweise bis zu 30 % höher als auf der japanischen Hauptinsel, was aus Kostengründen den Einsatz von Strom attraktiver macht, während die begrenzte Reichweite weniger wichtig ist. Elektrofahrzeugen mit Reichweitenverlängerer oder PHEVs wird dagegen für die Mehrheit der japanischen Ein-Auto-Haushalte ein höheres Potential als den BEVs zugeschrieben. Dementsprechend sehen Experten für die nahe Zukunft eine stärkere Marktdurchdringung der PHEVs als der BEVs.

Fazit - Gesamtbetrachtung des Status quo der Elektromobilität in Japan

Japan hat sowohl ökologische als auch ökonomische Motivationen für die Förderung der Elektromobilität. Hierbei sind vor allem die Zukunftsfähigkeit der Autoindustrie, die Verringerung der Abhängigkeit von Ölimporten, die generelle Energiesicherheit, die Ereignisse in Fukushima und das Ziel einer Reduktion der CO₂-Emissionen zu nennen.

Japan hat bei der Ausgestaltung der Förderung von Elektromobilität einen sehr umfassenden Ansatz gewählt: Neben der Förderung von Forschung und Entwicklung zu Batterien und Ladeinfrastruktur wurden insbesondere finanzielle Anreize geschaffen, um den Erwerb von BEVs und PHEVs durch Privatpersonen, lokale Verwaltungen oder private Unternehmen zu unterstützen. In einem früheren Programm wurden ebenfalls HEV bezuschusst. In den Demonstrationsprojekten des EV/PHEV Town Concepts werden außerdem Geschäftsmodelle für die Verbreitung von BEVs und PHEVs entwickelt und getestet.

Die Forschung in Japan ist insbesondere im Bereich der Li-Ionen Batterien, der Leistungselektronik und der Elektromotoren stark. Die japanischen Automobilhersteller gehören zu den führenden Herstellern von elektrifizierten Fahrzeugen weltweit und zu den ersten Herstellern, die HEV- und BEV-Modelle breit auf den Markt gebracht haben. Heute stellt Japan einen der wichtigsten Produktionsstandorte für elektrifizierte Pkw dar, mit über 65 000 produzierten PEV und 1,2 Mio. produzierten HEV im Jahr 2012. Auch Modelle europäischer Hersteller werden zum Teil in Japan produziert.

Japan gehört heute zu den am weitesten entwickelten Märkten für elektrifizierte Fahrzeuge, wobei die Subventionsprogramme der nationalen und regionalen Regierungen eine bedeutende Rolle für den Marktanteil von PEV spielen. Ein besonderes Potential gibt es in Japan für PEVs, im Bereich der Kei Cars, auf kleineren Inseln und als mobile Stromspeicher.

5.2.5 China

P. Hillebrand (WI), H. Hüging (WI)

China ist mit 9,6 Millionen Quadratkilometern das größte Land in Asien und das zweitgrößte der Welt; mit mehr als 1,3 Milliarden Bürgern hat es die größte Bevölkerung weltweit. Sowohl die große Bevölkerung als auch die Ausdehnung des Landes führen zu zahlreichen Herausforderungen in Bezug auf Energiebereitstellung, das Management von Umweltverschmutzung und die Energiesicherung. Die Bereitstellung von Wärme und Strom für die Vielzahl an Menschen und überdies über eine derart große Fläche ist eine komplexe Aufgabe. Dementsprechend sind die Kosten hierfür historisch betrachtet stark gestiegen.

Aufgrund des immensen Verkehrsaufkommens stehen Städte und Ballungsräume vor enormen Herausforderungen. Um den Ausstoß lokaler Luftschadstoffe in städtischen Räumen zu reduzieren, setzt die chinesische Regierung auf Elektromobilität. Jedoch stammt ein Großteil des produzierten Stromes aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen. Da Kohle der in China am meisten vorkommende Rohstoff ist, hat der derzeitige Strommix eine hohe CO₂-Intensität, so dass eine breite Einführung von Elektrofahrzeugen unter den derzeitigen Bedingungen keinen Beitrag zu Klimaschutz leisten kann.

In China gibt es in Bezug auf Mobilität vier Megatrends und Herausforderungen:

1. Urbanisation (wachsende urbane Räume, hohe Bevölkerungsdichte),
2. ökonomische Entwicklung (Wachstum der verfügbaren Einkommen, globaler Wettbewerb, wachsende Nachfrage nach Mobilität)
3. unzureichende Infrastruktur (ineffiziente Verkehrsmittel, rückständige Verkehrsmitteltechnologie, Nachfrage der Öffentlichkeit nach bislang weitgehend fehlenden Angeboten im Mobilitätsmanagement).
4. Diversifizierung des Kraftstoffsektors, Versorgungssicherheit aufgrund wachsender Bevölkerung und zukünftiger Verknappung von Erdöl

Dementsprechend beabsichtigt die Zentralregierung unter anderem die Unterstützung der Entwicklung und Verbreitung elektrischer Fahrzeuge. Dies stärkt zudem die Energiesicherheit durch eine breitere Basis der Inputs, verringert die Luftverschmutzung in Ballungsräumen und stärkt den Wettbewerb der Automobilindustrie. Auch Vertreter der Automobilindustrie haben diese Absichten bestätigt.

Regierung/Strategien/öffentliche Infrastruktur

In China ist über einen Zeitraum von mehr als zehn Jahre ein sogenanntes 'New Energy Vehicle' (NEV) Programm umgesetzt worden. Grundsätzlich hat sich jedoch gezeigt, dass die bislang getätigten Investitionen der OEM in die Forschung und Entwicklung von "New Energy Vehicle" nicht ausreichend sind.

Aktuell verfolgt die chinesische Regierung das Ziel, dass bis zum Jahr 2015 300 000 elektrische Fahrzeuge sowie bis zum Jahr 2020 zwei Millionen elektrische Fahrzeuge in China registriert sind.

Regierungsvertreter erklärten, dass die Umsetzung realistisch sei, da die chinesische Zentralregierung weiterhin finanzielle Unterstützung bereitstellt. Diese sieht wie folgt aus:

Mehr als 486,3 Milliarden Euro sollen in sogenannte *green-related programs* investiert werden. Ferner ist die Installation von 220 000 Aufladestationen und 2 351 Batteriewechselstationen bis zum Jahr 2015 geplant.

Die Subventionen für NEV in China sind z.Z. wie folgt ausgestaltet: Beispielsweise kostet ein Dongfeng i30 derzeit 150 000 RMB (ca. 19 000 Euro). Zentralregierung und eine jeweilige Stadt fördern diesen Kauf mit jeweils rund 40 000 RMB, ca. 5 000 Euro, also insgesamt 80 000 RMB, ca. 10 000 Euro. Die finanzielle Unterstützung hängt seit 2013 nicht mehr von der Batteriekapazität, sondern von der Reichweite des Fahrzeugs ab. Ein vergleichbares konventionelles Fahrzeug kostet ebenfalls 70 000 RMB (ca. 8 800 Euro). Bei Anschaffung eines E-Fahrzeugs werden allerdings zusätzlich Mautgebühren eingespart, und die Teilnahme an der „Nummernschildlotterie“ ist nicht notwendig (In einigen Metropolen darf pro Monat nur eine bestimmte Anzahl an Fahrzeugen angemeldet werden. Diese werden monatlich aus allen vorliegenden Anfragen ausgelost. E-Fahrzeuge müssen nicht an dieser Verlosung teilnehmen und bekommen sofort ihr Nummernschild). Bei 17 Pkw-Typen und 75 Bus-Typen (BEV) sowie 16 HEV chinesischer Fabrikation wird zudem die Mehrwertsteuer erlassen (Stand Ende August 2014). Mittlerweile werden 88 Demonstrationsstädte gefördert.

Ende 2014 kündigte die chinesische Regierung an, das derzeit bis 2015 laufende Subventionsprogramm bis 2020 zu verlängern. Dabei sollen die Subventionsbeträge jedoch schrittweise verringert werden, um den Wettbewerb zu fördern. Im Jahr 2015 sollen elektrische Pkw Subventionen in Höhe bis zu 55 000 RMB (ca. 7 500 Euro) erhalten, rein elektrische Busse werden mit bis zu 500 000 RMB (ca. 68 000 Euro) subventioniert (Shen & Jourdan 2014).

Im September 2013 gab CATARC einen Bestand von fast 40 000 New Energy Vehicles mit Stand Ende Juli 2013 bekannt, aufgeteilt in 85 % öffentlichen Verkehr bzw. Fahrzeugflotten und 15 % private Fahrzeuge. Zurzeit hat China 8 400 Aufladesäulen und 37 Batteriewechselstationen installiert. Die meisten der elektrischen Fahrzeuge werden in Flotten als Taxis und Busse eingesetzt. Die private Nutzung von E-Fahrzeugen ist kaum verbreitet (CATARC 2013).

Allgemein treten in China dieselben Herausforderungen und Hindernisse auf, welche die Entwicklung von Elektrofahrzeugen auch in anderen Industrienationen beeinträchtigen, wie zum Beispiel das Kostenniveau, Batteriereichweiten, Sicherheitbelange und ein Mangel an Ladeinfrastruktur. Hinzu kommt, dass insbesondere das geringe Durchschnittseinkommen ein Hemmnis in Bezug auf den privaten Kauf von Elektrofahrzeugen darstellt. Auch deshalb liegt der Fokus der Regierung und der Industrie derzeit primär auf den Flottenbetreibern.

Forschungsinstitutionen und -förderung

Der Einstieg in Forschung und Entwicklung im Bereich Elektromobilität kam in China im Vergleich zu anderen Industrienationen weder spät, noch hat sich der Bereich auffallend langsam entwickelt. Dennoch können Rückstände im Forschungsstand gegenüber relevanten Industrienationen festgestellt werden.

Für die Zukunft ist es wichtig, die Entwicklung weg von einer investitionsgesteuerten hin zu einer innovationsgesteuerten Autoindustrie herbeizuführen. Weiter ist zu erwarten, dass sich ausländische Autohersteller den Markt in China erschließen werden.

Zu diesem Zweck erhöhte die chinesische Zentralregierung kontinuierlich das Forschungsbudget für Elektromobilität in ihren Fünf-Jahres-Plänen (FYP) von 107 Mio. Euro im 10. FYP (2001 - 2005) auf 364 Mio. Euro im 12. FYP (2011 - 2015) (siehe Abb. 5-15). Für den 13. FYP (2016-2020) sind Ausgaben in Höhe von 1 200 Mio. Euro geplant.

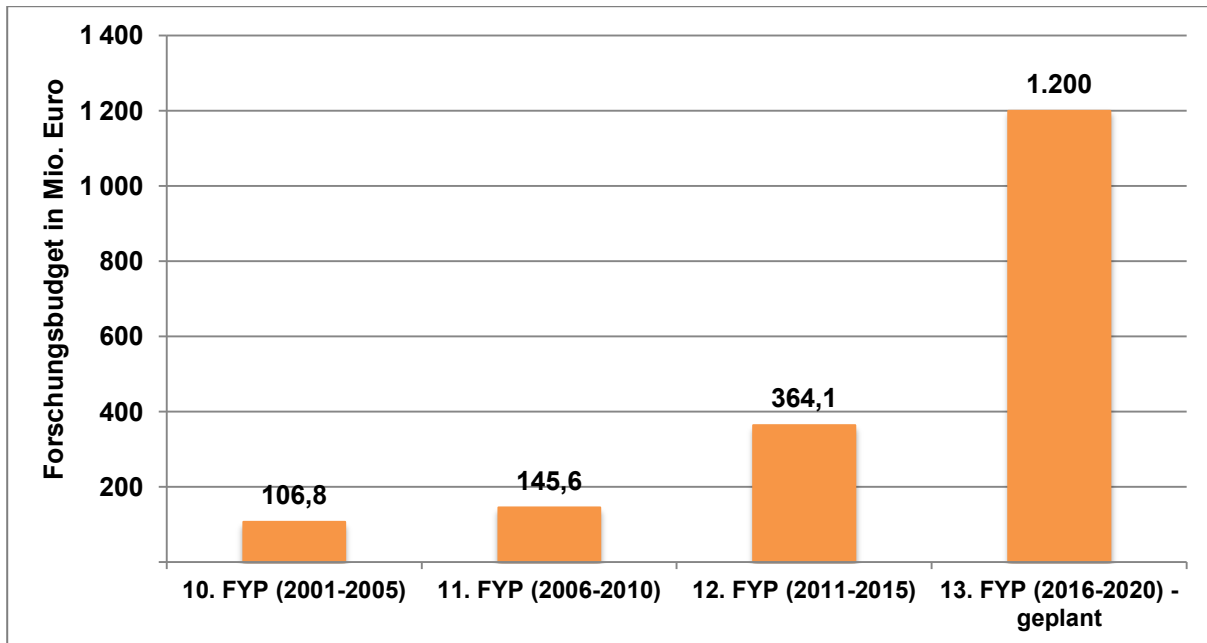


Abb. 5-15 Entwicklung der Forschungsbudgets für die Elektromobilität in den Fünf-Jahres-Plänen der Zentralregierung

Quelle: eigene Darstellung nach (CATARC 2013)

Ein wichtiges Forschungsprogramm ist das *863 High-Tech Development Programm*: Dieses Programm fördert nationale Forschung und Entwicklung zu Elektrofahrzeugen, wovon insbesondere Fahrzeug- und Batteriehersteller profitieren. Beispielsweise erhielt der große chinesische Automobilhersteller FAW im Jahr 2011 87,5 Mio. Euro zum Aufbau einer FuE-Abteilung.

Hinzu kommt das „973 Programm“ zur Grundlagenforschung, insbesondere zur Batterieforschung. Hierbei soll in sieben Teilprojekten die Effizienz der Energiespeichersysteme erhöht werden und kostengünstige Speichersysteme mit hoher Energiedichte entwickelt werden. Dabei werden sowohl Batterietechnologie als auch Brennstoffzellentechnologien adressiert.

Auch in China machen Batterien 60 % der Produktionskosten für das Gesamtfahrzeug aus (Garcke o.J.). Jedoch besitzt China eigene Rohstoff- und Materialressourcen, was zu einem Kostenvorteil in der Produktion im Vergleich zu den westlichen Staaten führen kann. Generell betreffen globale Kostenreduktionen im Bereich von Batterien auch China, was sich unmittelbar auf das Preisniveau von xEVs auswirkt. Eindeutige Priorität hat die Verbesserung der Energiedichte der Batterien. Entsprechend liegt hierauf der Fokus des aktuellen Fünf-Jahresplans (2011 - 2015). Weiterhin ist die Integrationstechnologie zum jetzigen Zeitpunkt unterentwickelt. Insofern sind chinesische Hersteller stark an Kooperationen mit internationalen Universitäten und Forschungsinstituten interessiert.

Wesentliche Herausforderungen sind außerdem die Entwicklung von Ladeinfrastruktur, Standardisierung sowie Bewusstseinsbildung auf dem Gebiet des Verbraucherverhaltens sowie der Akzeptanz von Elektromobilität.

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über verschiedene aktuelle nationale Politiken und Aktivitäten sowie lokale Initiativen in der Forschung und Demonstration im Bereich der Elektromobilität in China.

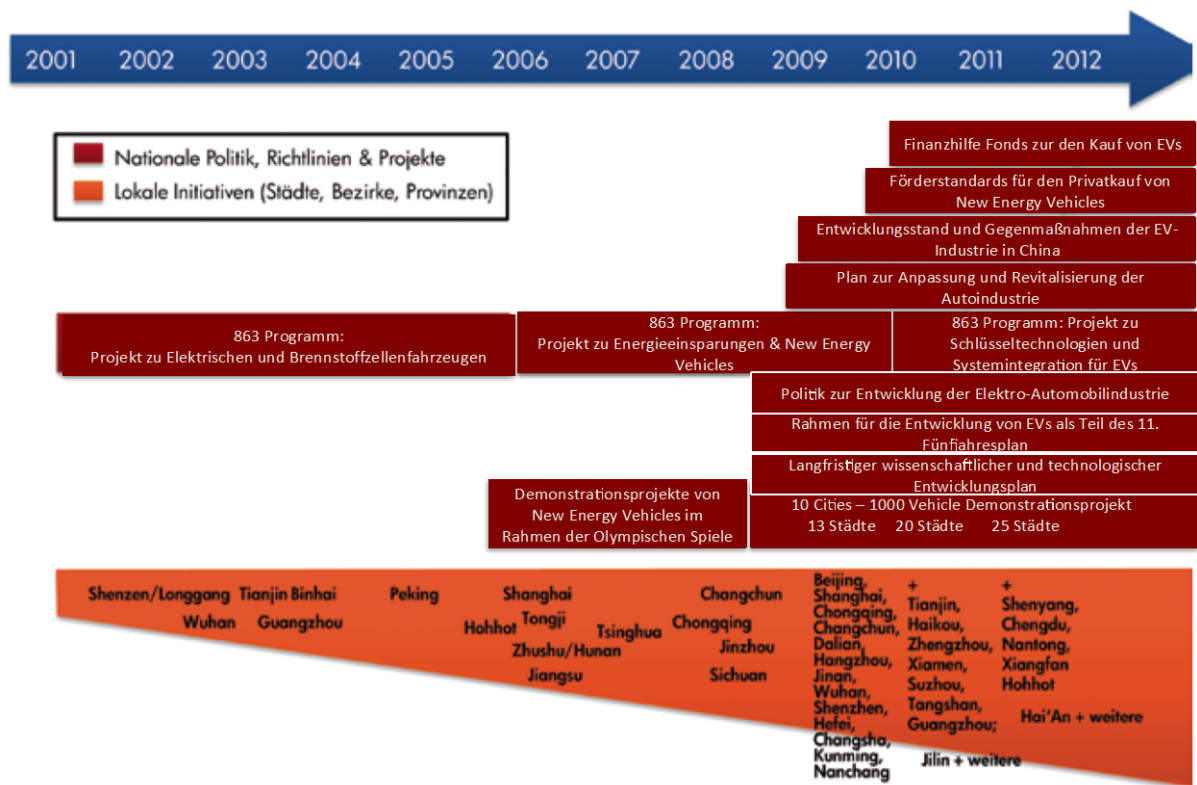


Abb. 5-16 Chinas Politik und Aktivitäten im Bereich Elektromobilität

Quelle: (Klink 2012)

Wirtschaft und Industrie

Im Jahr 2010 erreichte China als weltweit größter Automobilproduzent eine Gesamtproduktion von 18 Millionen Fahrzeugen. Dies entspricht einem Wachstum von rund einem Drittel im Vergleich zum Jahr 2009. Bis zum Jahr 2012 war ein weiterer Anstieg hin zu 19,3 Millionen Einheiten zu verzeichnen (vgl. Abb. 5-17).

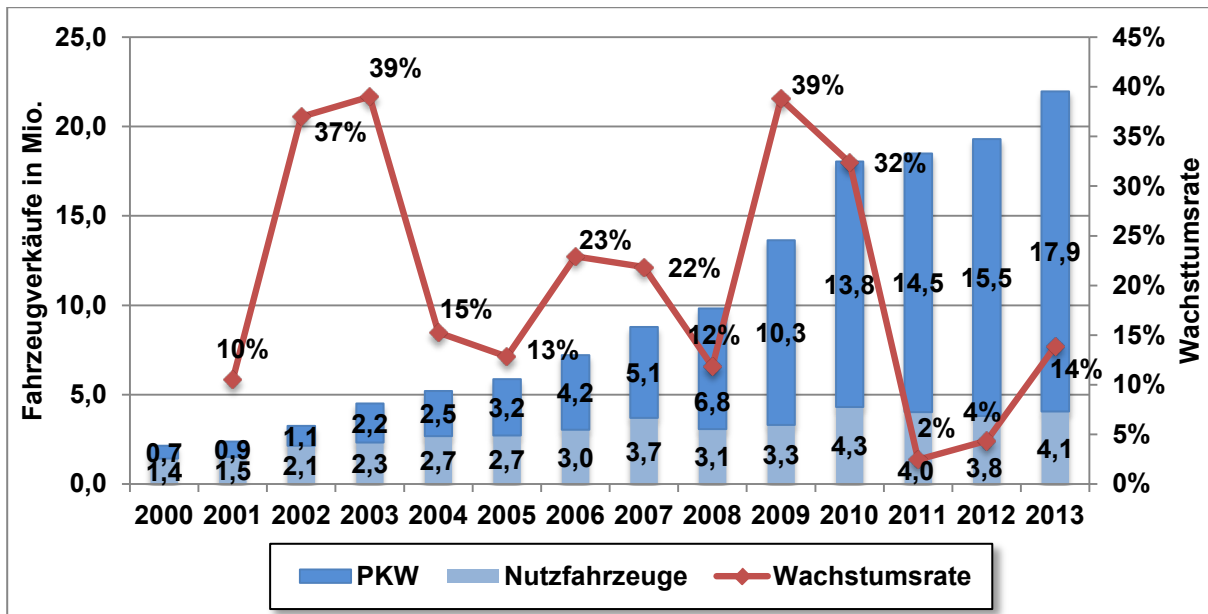


Abb. 5-17 Jährliche Autoproduktion in China

Quelle: Regionalstudie China

Die fünf wichtigsten Hersteller von Elektrofahrzeugen in China sind JAC, Jiangnan Auto, BYD, BAIC Motor and SAIC Motor. Zusammen stellten sie im Jahr 2012 9 000 BEV her. Davon produzierte JAC allein ca. 4 300 Fahrzeuge. Im Bereich der Hybridfahrzeuge ist GAC Toyota der führende Hersteller, mit ca. 6 500 hergestellten HEV in 2013, gefolgt von FAW Toyota, Brilliance BYD and Shanghai GM. Im Jahr 2013 wurden 14 200 batterieelektrische Fahrzeuge in China produziert (Green Car Reports 2014). Dies wurde 2014 durch die Produktion von ca. 48 600 BEV und ca. 30 000 PHEV deutlich übertroffen (Green Car Congress 2015).

Eine nähere Betrachtung der technologischen Seite zeigt, dass Chinas Autoindustrie gegenüber westlichen, japanischen und koreanischen globalen Wettbewerbern von elektrischen Fahrzeugen insgesamt stark zurückliegt, was auch die in STROM durchgeführten Experteninterviews bestätigten. Hinsichtlich der Komponenten für New Energy Vehicles können die chinesische Automobilindustrie und die Zulieferer noch nicht die hohen Produktionsanforderungen bedienen. Joint Ventures zwischen chinesischen und ausländischen Automobilherstellern (Beijing-Benz Automotive, BMW – Brilliance, Dongfeng – Renault, FAW – VW / Audi, SAIC – GM) sind deshalb von besonderer Bedeutung für den chinesischen xEV Markt. Grundlage hierfür sind Marktzugangsbeschränkungen für xEVs ausländischer Hersteller, die nur durch Joint Ventures einen Marktzugang erhalten (siehe Regionalstudie China). So verfügen ausländische Autohersteller in vielen Fällen über weit entwickelte Technologien und ausgeprägtes Nutzervertrauen, von dem chinesische

Unternehmen profitieren können. Beispielsweise entwickelte Daimler zusammen mit dem chinesischen Hersteller BYD das BEV Modell Denza, dessen Produktion im September 2014 startete.

Die hier relevanten Akteure in China stimmen darin überein, dass Investitionen in die Infrastruktur der Schlüssel für eine weitere Entwicklung der Elektromobilität seien. Im Jahr 2009 präsentierten State Grid Corporation, China Southern Power Grid, Sinopec, CNOOC und andere führende chinesische Energiekonzerne ihre Zukunftspläne für den Aufbau und die Auslegung von Ladestationen. So plant der chinesische Stromkonzern State Grid Cooperation of China (SGCC) bis zum Jahr 2020 die Installation von 10 000 Ladestationen und über 500 000 Ladesäulen. In diesem Kontext soll die Investitionssumme für die Erweiterung der Ausstattung laut Information der Unternehmensleitung 3,9 Milliarden Euro betragen (Interview Guo). State Grid Corporation, im Besitz von mehr als 90 % des chinesischen Netzes, plant die Investition von ca. 60 Milliarden Euro in Stromtrassen (überregionale UHV und andere Langstreckenleitungen) in den kommenden fünf Jahren. Als wesentliche Lademethode sieht State Grids Strategie derzeit „battery swapping“ an. Die Batterieaufladung soll zentral erfolgen, die Verteilung der Batterien auf die Stationen soll dynamisch sein. OEM sollen die Fahrzeuge ohne Batterie bereitstellen, sodass die Verbraucher den Akku bei State Grid mieten. Der Konzern ist somit verantwortlich für Instandhaltung und Wiederverwendung.

Bezüglich der AC „charging coupler“ hat die Volksrepublik China seine Standards den internationalen des IEC angepasst. Noch nicht vollzogen ist die Aufnahme von internationalen Regulierungen bezüglich Aufladesystemen. Chinas nationale Standards für AC und DC Charging sind derzeit nicht kompatibel mit internationalen standardisierten Aufladesystemen. Risiken für die chinesischen AC Aufladesysteme sind u.a.:

- fehlender Überanspruchungsschutz der Ladekabel
- kein Schutz vor einer Verbindungsunterbrechung während des Ladens auf der infrastrukturellen Seite
- kein automatisches Erkennen einer „plug-long proxy PIN“

Verbraucher und Markt

Im Jahr 2010 wurde China zum größten Automobilmarkt der Welt. Flotten von eingesetzten Bussen und Taxen machten 2013 ca. 1,7 % aller Fahrzeuge aus. Jedoch verbrauchen diese ca. 27 % des Kraftstoffes in ganz China. Demzufolge konzentriert sich die Volksrepublik bei der Förderung von Elektromobilität auf Flotten, was sich etwa in dem sogenannten „10/25 Cities – 1 000 Vehicles“-Programm, einem chinesischen Förderprogramm für ausgewählte Modellregionen mit Fokus auf Flotten, zeigt. Im Rahmen dieser Demonstrationsprojekte wurden bislang 40 000 PHEV/BEV registriert. Dabei handelt es sich nur bei einem geringen Anteil (15 %) um private Fahrzeuge (Tagscherer 2012).

In China ist der private Sektor bezüglich Elektromobilität immer noch hochgradig unterentwickelt. Betrachtet man generell den Autobesitz pro Kopf, ist ein enormes Wachstumspotenzial für den chinesischen Automarkt erkennbar. Allerdings muss auch konstatiert werden, dass privater Autobesitz in China sich insbesondere auf die Städte und Ballungsräume speziell im Osten des Landes beschränkt.

Der durchschnittliche chinesische Autokäufer war 2013 laut Statistik 31 Jahre alt. 60 % aller Erstkäufer im Bereich Elektromobilität sind junge, männliche Verbraucher, die technikbegeistert sind und neue Produkte ausprobieren möchten. Gleichzeitig steigt das private Einkommen, sodass sich das Ausgabenpotenzial graduell von den verbreiteten Motorrollern hin zu Autos verschiebt, auch wenn die Bereitschaft, höhere Kosten für Elektrofahrzeuge aufgrund von Umweltbewusstsein und Begeisterung für Technologie zu akzeptieren, äußert gering ist.

Chinesische Verbraucher bewerten die Qualität von ausländischen Produkten höher als von Produkten chinesischer Hersteller. Deshalb sind die Wachstumsraten von Joint Ventures zwischen ausländischen und chinesischen Produzenten höher als die rein chinesischer Produkte.

Auch in Städten, die für Demonstrationsprogramme ausgewählt wurden, ist es bislang nicht gelungen, eine wesentlich höhere Zulassungsquote an elektrischen Autos zu erreichen. Dies liegt zum einen an dem begrenzten Budget der Kommunen sowie zum anderen am Mangel an Ladeinfrastruktur und am begrenzten E-Fahrzeugangebot. Bislang ist die Nachfrage nach elektrischen Fahrzeugen noch gering.

Hinsichtlich der Umsetzungskonzepte von Elektromobilität verfolgt China mit der Integration von Mobilitätssystemen ähnliche Konzepte wie europäische Länder. Ein kürzlich aufgekommener Ansatz in Shanghai ist es, Elektromobilität im städtebaulichen Sinn in neuen Tower-Buildings sowie in Car-Sharing integrativ miteinzubeziehen, um die Akzeptanz und den Nutzen der EV zu steigern (Tagscherer 2012).

Fazit - Gesamtbetrachtung des Status quo der Elektromobilität in China

China setzt in vielerlei Hinsicht einige Hoffnung in die Elektromobilität. So soll diese die bislang nur wenig konkurrenzfähige Automobilindustrie beflügeln. Der im Vergleich zur globalen Automobilindustrie große Rückstand im Bereich konventionell angetriebener Fahrzeuge soll durch „Leapfrogging“ im Bereich der Elektrofahrzeuge wettgemacht werden. Ein weiterer wichtiger Beweggrund sind Energiesicherheit sowie die extreme Luftverschmutzung in den Ballungsräumen. Entsprechend unterstützt die Zentralregierung elektrische Fahrzeuge, um die Energiesicherheit zu stärken, Luftverschmutzung in Ballungsräumen zu verringern und die Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Automobilindustrie zu steigern.

Schon allein aufgrund der Luftverschmutzung in den großen urbanen Ballungsräumen bemühen sich auch Kommunalverwaltungen, die Verbreitung der Elektromobilität mit neuen Regelungen zu beschleunigen. Dabei werden in erster Linie Flotten adressiert. Bislang haben chinesische Bürgerinnen und Bürger erst wenig Berührungspunkte zur Elektromobilität. Dies liegt zum einen an den geringen Einkommen und den vergleichsweise hohen Aufwendungen für die Fahrzeuge und zum anderen an dem noch geringen Ausbaustand, was insbesondere Parkregelungen und Ladeinfrastruktur angeht.

5.2.6 Indien

H. Hüging (WI), T. Koska (WI)

Regierung / Politik / Öffentliche Infrastruktur

Eine Bestrebung der indischen Regierung ist es, den Anteil an alternativen Kraftstoffen in der Fahrzeugflotte des Landes zu erhöhen. Neben anderen Technologien spielt auch die Elektromobilität hierbei eine Rolle. Der indische Staat verfolgt mit der Förderung der Elektromobilität nach Expertenansicht drei Ziele: Angesichts der Abhängigkeit des Straßenverkehrs vom Erdöl soll die langfristige Versorgungssicherheit durch die Bereitstellung von alternativen Energiequellen gewährleistet werden. Zweitens soll die heimische Autoindustrie gefördert und die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie des Landes gestärkt werden. Drittens sollen die negativen Effekte des Straßenverkehrs auf die Umwelt gemindert werden; hier steht primär die Verringerung der lokalen Luftverschmutzung und weniger das Potential zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Mittelpunkt.

Akteure

In der Förderung der Elektromobilität spielt das Ministry of Heavy Industries and Public Enterprises (MoHIPE) eine zentrale Rolle. Die dortige Abteilung für Schwerindustrie (Department of Heavy Industries) ist zuständig für die Forschungsförderung im Automobilsektor und hat zu diesem Zweck zukunftsweisende Programme, insbesondere den National Electric Mobility Mission Plan (NEMMP) 2020, aufgelegt. Weitere wichtige Akteure sind die zwei vom Ministerium gegründeten Agenturen National Council for Electric Mobility (NCEM) und das National Board for Electric Mobility (NBEM). Zusätzlich plant die Regierung den Aufbau des National Automotive Board (NAB), das die Funktion eines Beratungsorgans in technischen Fragen und des Sekretariats für das NCEM und das NBEM übernehmen wird. Gleichzeitig soll das NAB als Moderator zwischen Regierung und Industrie dienen sowie die FuE-Aktivitäten im Sektor fördern und wird daher mit verantwortlichen Akteuren aus Ministerien, Verwaltung, Forschung und Industrie besetzt.

Programme und Maßnahmen

Als wichtigste staatliche Programme und Strategien sind die Auto Policy von 2002, der Automotive Mission Plan 2006-16 und der NEMMP 2020 zu nennen.

Das Ziel der Auto Policy von 2002 war die Etablierung einer global wettbewerbsfähigen Autoindustrie in Indien und die Verdopplung ihres Beitrags zur indischen Wirtschaftskraft bis 2010. Der 12. Fünf-Jahres-Plan Indiens für den Zeitraum 2013-17 hat die Gültigkeit dieser politischen Ziele auch über 2010 hinaus bestätigt. Um die lokalen Produktionszahlen zu erhöhen und gleichzeitig die spezifische Binnennachfrage in Indien zu bedienen, unterstützte die Politik gezielt die Herstellung von Kleinwagen. Zur Zielerreichung wurden außerdem ausländische Kapitalbeteiligungen an Auto- und Komponentenherstellern von bis zu 100 % erlaubt. Zusätzlich beinhaltete die Auto Policy steuerliche und finanzielle Anreize für die Förderung von Forschung und Entwicklung in der Automobilindustrie.

Der „Automotive Mission Plan 2006-16“ wurde auf Basis der Ziele der Auto Policy von 2002 entwickelt. Der Plan bekräftigte die Absicht der Auto Policy, Indien als attraktiven Standort für Automobilentwicklung und -fertigung zu etablieren. In der Folge soll die indische Autoindust-

rie bis zum Jahr 2016 einen Beitrag von mehr als 10 % zum BIP liefern und 25 Mio. zusätzliche Arbeitsplätze schaffen. In einer 10-Jahres-Roadmap für die Industrie deckt der Plan sämtliche wachstumsrelevante Aspekte ab, von Fiskalpolitik, Emissions- und Sicherheitsregeln bis zu Globalisierungsaspekten hinsichtlich technischer Standards und der Verbesserung von Wettbewerbsfähigkeit und technischer Fertigkeiten. Besonderes Gewicht legt der Plan auf die Unterstützung von FuE-Initiativen. Er betont die Notwendigkeit der Eigenentwicklung oder des Erwerbs von Technologien für alternative Kraftstoffe und Hybrid-Motoren und die Wichtigkeit einer Förderung der Herstellung von sparsamen, für den indischen Markt geeigneten Fahrzeugen, z.B. Hybridfahrzeugen, um die Abhängigkeit von konventionellen Kraftstoffen zu verringern (MoHIPE 2012).

Die Auto Policy und der Automotive Mission Plan zielen somit primär auf ein generelles Wachstum der von Diesel- und Benzinantrieben dominierten Automobilindustrie ab. Es wird jedoch wegen der negativen Umwelteffekte auf die Notwendigkeit einer Stärkung von alternativen Antrieben hingewiesen.

Dagegen bezieht sich der im Februar 2013 veröffentlichte National Electric Mobility Mission Plan 2020 schwerpunktmäßig auf die Förderung der Elektromobilität. Der NEMMP formuliert das Ziel, bis zum Auslaufen des Plans im Jahr 2020 eine sich selbst tragende Elektroautomobilindustrie zu etablieren. Mithilfe eines Maßnahmenkatalogs soll der Markt für Elektro- und Hybridautomobile bis 2020 auf eine Größe von fünf bis sieben Millionen Fahrzeugen anwachsen (Abb. 5-18).

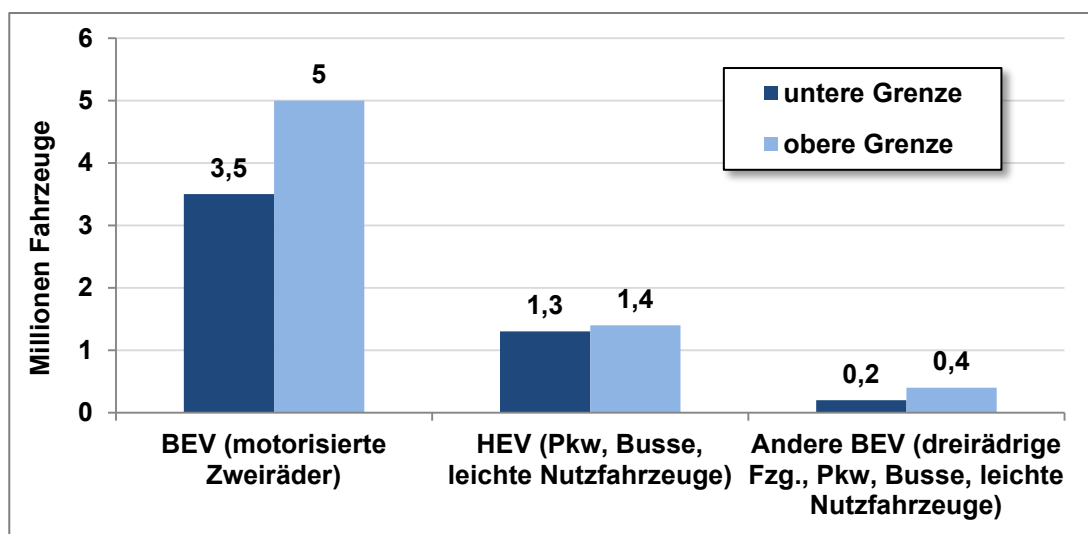


Abb. 5-18 Projizierte Nachfrage nach xEV in Indien bis 2020 laut NEMMP 2020

Quelle: Regionalstudie Indien

Der NEMMP beschreibt das Potenzial für elektrifizierte Fahrzeuge in Indien und benennt konkrete Maßnahmen, die notwendig sind, um die Marktentwicklung voranzutreiben. Die Implementierung der im NEMMP genannten Maßnahmen hängt jedoch von der Übertragung in die verschiedenen Politikinstrumente ab, die separat von der Regierung verabschiedet werden müssen.

Die prognostizierte potenzielle Nachfrage (siehe Abb. 5-18) nach Elektrofahrzeugen soll mithilfe eines Anreizsystems stimuliert werden, welches finanzielle Anreize in Abhängigkeit von

Faktoren wie den verwendeten Technologien, Sicherheitsstandards oder dem Grad der lokalen Fertigung verteilt. Gleichzeitig soll mit weiteren nicht-monetären Maßnahmen zusätzliche Nachfrage geschaffen werden, welche wiederum einen Anreiz für Investitionen in lokale Fertigungskapazitäten bietet. Folgende nicht-monetäre Maßnahmen werden genannt: Erwerb von Elektrofahrzeugen für die Fahrzeugflotten staatlicher Einrichtungen, Mandatierung von Elektroautos in bestimmten Gegenden und Festschreibung eines festen Anteils von elektrischen Bussen in den Flotten staatlicher Transportunternehmen. Zusätzlich empfiehlt der NEMMP 2020 vermehrte FuE-Initiativen im Elektromobilitätssektor.

Die im NEMMP vorgeschlagenen Maßnahmen haben ein erwartetes Investitionsvolumen von bis zu 233 Mrd. INR (2,79 Mrd. Euro), von denen der Großteil auf die finanziellen Anreize zur Nachfrageschaffung entfällt, gefolgt von FuE-Investitionen, welche zum Teil von der Industrie und zum Teil von der Regierung getragen werden sollen. Der NEMMP sieht vor, dass zusätzlich benötigte Infrastrukturinvestitionen von Industrieseite getätigt werden, wohingegen sich die Regierung nur während erster Testphasen im Infrastrukturausbau engagiert.

Von den im Rahmen der Studie interviewten Experten werden die Maßnahmen des NEMMP sehr positiv gesehen, wobei aufgrund der Unklarheit über das Wie und Wann der konkreten Umsetzung auch die tatsächlichen Auswirkungen noch unsicher sind.

Regulatorischer Rahmen und finanzielle Förderung

Zurzeit sind in Indien keine Emissions- oder Kraftstoffverbrauchsstandards für Fahrzeuge in Kraft. Es wird allerdings erwartet, dass Effizienzstandards für Pkw in naher Zukunft implementiert werden. Kleinere Fahrzeuge mit einer Geschwindigkeit von weniger als 25 km/h bzw. weniger als 0,25 KW Leistung sind von der Registrierungs- und Führerscheinplicht ausgenommen. Diese Fahrzeugkategorie spielt derzeit für die Elektrofahrzeuge eine besondere Rolle, insbesondere im Zweiradsegment.

Im Budget 2012-13 sind Vergünstigungen beim Einfuhrzoll auf Hybrid- und Elektrofahrzeuge sowie für zugehörige Akku-Packs vorgesehen.

Bis März 2012 gab es in Indien eine finanzielle Förderung für Elektrofahrzeuge: Das „Ministry of New and Renewable Energy“ zahlte unter der Voraussetzung, dass mindestens 30 % der Fahrzeugkomponenten aus inländischer Produktion stammten, finanzielle Anreize von bis zu 20 % des Kaufpreises. Nach dem Auslaufen der Subvention fielen die Verkaufszahlen für Elektrofahrzeuge um 65 %. Insgesamt wurden bis 2012 rund 47 000 Fahrzeuge gefördert. Dabei handelte es sich hauptsächlich um zweirädrige Fahrzeuge. Dreirädrige Fahrzeuge und kleine batteriebetriebene Autos, wie das Mahindra REVA-Modell, machten nur einen geringen Anteil aus.

Im NEMMP sind nun neue Kaufanreize für einen begrenzten Zeitraum vorgesehen, wobei sich der Elektromobilitätsmarkt nach einiger Zeit selbst tragen soll. Laut Regierungsexperten wird die finanzielle Förderung hierbei zwischen 25 000 und 150 000 INR (300 Euro bis 1 800 Euro), je nach Fahrzeugart, liegen. Die Förderwürdigkeit wird auf von der Regierung entwickelten Kriterien beruhen. Ein Kriterium wird der Grad der einheimischen Fertigung sein. Als weiterer Aspekt wird die Energieeffizienz der Fahrzeuge eine Rolle spielen, so dass beispielsweise Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterie höhere Fördermittel erhalten könnten. Experten zufolge sollen als weitere Kriterien Sicherheit, Emissionen, Garantien, Reichweite, Leistungsparameter, Verfügbarkeit von Service-Centern und die Gesamtbetriebskosten berücksichtigt werden.

Nachrecherchen ergaben, dass das Anreizprogramm des NEMMP bis dato (Anfang 2015) noch nicht beschlossen wurde, es wird jedoch mit der Unterzeichnung der entsprechenden Gesetze im Laufe des Jahres 2015 gerechnet (The Silver Institut; Thomson Reuters GFMS, 2014).

Zusätzlich zu den finanziellen Anreizen der Zentralregierung fördern bestimmte Bundesstaaten und Unionsterritorien Elektrofahrzeuge: Delhi, Rajasthan, Uttarakhand und Lakshadweep haben Elektrofahrzeuge von der Mehrwertsteuer befreit, und Chandigarh, Madhya Pradesh, Kerala, Gujarat und Westbengalen bieten Vergünstigungen bei der Mehrwertsteuer (siehe Finpro 2013). Die größten Anreize für Elektrofahrzeuge bietet die Regierung von Delhi: Dort werden Steuernachlässe von bis zu 29,5 % der Kosten (15 % Bezuschussung auf den Grundpreis des Fahrzeugs, plus 12,5 % Mehrwertsteuerbefreiung, sowie eine Rückerstattung von Kraftfahrzeugsteuer- und Zulassungsgebühren von 2 %) gewährt.

Die gezielte Schaffung zusätzlicher Nachfrage ist eine zentrale Säule der Regierungsstrategie. Einige Experten sind der Meinung, dass die indische Industrie auf ebensolche Anreize wartet, um die aktuelle schwierige Marktsituation zu überwinden.

Infrastruktur

Die derzeitige Situation der Stromerzeugung in Indien stellt eine besondere Herausforderung für die Elektromobilität in Indien dar. Die Stabilität des indischen Elektrizitätsnetzes sehen viele Experten als eine große Herausforderung beim Laden von Elektrofahrzeugen. In einigen Regionen kommt es häufiger zu Stromausfällen, und große Übertragungsverluste treten auf. Zudem basiert die Stromerzeugung in Indien hauptsächlich auf Kohle, so dass Elektrofahrzeuge mittelfristig nur begrenzt zur Minderung des Kohlendioxidausstoßes beitragen können.

Einige Experten sind der Meinung, dass räumlich konzentrierte Ladekapazitäten eine Verbesserung des Netzes erfordern. Dies gilt insbesondere für räumliche Konzentration von Heimladestationen, bei denen die Ladeparameter nicht zentral gesteuert werden können. Eine weitere Option wird in der dezentralen Stromerzeugung für Ladepunkte gesehen. Andere Experten sehen diese Herausforderung jedoch als kurzfristig unbedeutend an, da die Nachfrage nach Elektrofahrzeugen immer noch sehr niedrig ist und sich zunächst auf elektrische Zweiräder und Hybrid-Pkw ohne externe Stromversorgung konzentriert. Zweiräder könnten leicht zuhause ohne öffentliche Infrastruktur aufgeladen werden. Die wenigen Besitzer von Plug-in-Hybriden und reinen Elektrofahrzeugen werden voraussichtlich private Lademöglichkeiten in heimischen Garagen oder am Arbeitsplatz verwenden.

Nach derzeitigem Stand haben nur zwei Städte im Land Initiativen zur Etablierung von Ladeinfrastruktur gestartet: Neben Delhi, das an 50 seiner Umspannstationen in der Stadt Ladestationen errichtete, stattete Bangalore einige Parkplätze von Einkaufszentren und Bürogebäuden mit Ladestationen für Elektroautos aus.

Forschungsförderung und Institutionen

Im zwölften Fünfjahresplan (2012-2017) werden etwa 7,4 Mrd. INR (88,8 Mio. EUR) als Mittel für die Forschung und Entwicklung von Elektrofahrzeugen und Hybriden bereitgestellt. Der Automotive Mission Plan (2006-2016) benennt konkrete Empfehlungen zur Förderung von Forschung und Entwicklung im Automobilsektor: Die Bereitstellung einer 100 %-Förderung für Grundlagenforschung sowie 75 % für vorwettbewerbliche Technologien und 50 % für Produktentwicklung. Hinzu kommen Steuer- und Abgabebefreiungen.

Im NEMMP 2020 wird eine Strategie für die Forschung und Entwicklung im Bereich Elektromobilität vorgeschlagen. Der NEEMP betont die fehlenden FuE-Ressourcen der indischen Hersteller hinsichtlich Elektrofahrzeugkomponenten. Diese besitzen aktuell noch keine eigenen Patente, wohingegen in Indien ansässige ausländische Autohersteller den größten Teil ihrer FuE in ihren Heimatländern betreiben. Mittels Allianzen, Lizenzvergaben, Akquisitionen und Joint Ventures will die Regierung nun entsprechende FuE-Kapazitäten aufbauen. In fünf Forschungsfeldern soll mit besonders hoher Priorität geforscht werden:

1. Batteriezellen,
2. Batteriemanagementsysteme,
3. Leistungselektronik (insbesondere für Hybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeuge),
4. Elektromotoren und Motoren für Hybride sowie
5. Übertragungssysteme für Hybride und die Systemintegration des Antriebsstrangs.

Außerdem wird die Notwendigkeit, die Batteriesysteme an indische Wetter- und Verkehrsbedingungen anzupassen, als besonders wichtig eingestuft.

Es wird erwartet, dass sich Universitäten und nationale Labors auf die Forschung an Batteriezellen und Elektromotoren konzentrieren und zudem Einrichtungen zum Test der entwickelten Komponenten betreiben. Für die verschiedenen Fahrzeugkategorien wurde der Investitionsbedarf durch öffentliche Mittel geschätzt (Tab. 5-18). Fahrzeug- und Komponentenersteller sollen vor allem in den Bereichen Batteriemanagementsysteme, Leistungselektronik, Antriebsstrangintegration und auch Elektromotoren investieren. Die Regierung will die Forschung durch Zuschüsse unterstützen und gemeinsam mit der Industrie eine entsprechende Roadmap entwickeln.

Forschungsfeld	Zweiräder	Pkw	Busse
Unterstützung von Batteriezellen-Allianzen, Technologieerwerb	2 Mrd. INR (24 Mio. EUR)	2 Mrd. INR (24 Mio. EUR)	2 Mrd. INR (24 Mio. EUR)
Entwicklung von Elektromotoren	0,5 Mrd. INR (6 Mio. EUR)	0,5 Mrd. INR (6 Mio. EUR)	0,5 Mrd. INR (6 Mio. EUR)
Komponentenvalidierung; Testeinrichtungen	0,5 Mrd. INR (6 Mio. EUR)	0,5 Mrd. INR (6 Mio. EUR)	0,8 Mrd. INR (9,6 Mio. EUR)
Komponentenentwicklung im Bereich Batteriemanagementsysteme, Leistungselektronik, Antriebsstrang	Investitionen durch OEM und Komponentenhersteller		

Tab. 5-18 Geschätzter Investitionsbedarf im Bereich Elektromobilität in Indien

Quelle: Regionalstudie Indien nach NEMMP 2020

Der Gesamtinvestitionsbedarf wird auf 16 bis 18 Mrd. INR (192-216 Mio. Euro) innerhalb der nächsten fünf Jahre geschätzt. Hiervon soll die Regierung laut NEMMP 9,3 Mrd. INR (111,6 Mio. Euro) für FuE-Zwecke beisteuern.

In den Experteninterviews wurde als eine wichtige Herausforderung für den FuE Bereich in Indien die lange Zeitspanne bis zur Veröffentlichung und Nutzbarmachung neuester Forschungsergebnisse genannt. Die von den Instituten entwickelten Technologien finden oftmals nicht den Weg bis zu marktreifen Produkten.

Die Regierung plant daher die Einrichtung sogenannter 'Centres of excellence' (COE), welche die Forschungskoordination und den Austausch zwischen Forschungsinstitutionen und Industrie verbessern sollen. Die COEs sind Forschungsinstitute, die exzellente Kenntnisse in einem der folgenden spezifischen Forschungsfelder aufbauen sollen:

- Batterien und Batterieladung
- Motoren und Leistungselektronik und
- Systemintegration einschließlich Leichtbaudesign und Wärmemanagement.

Die COE sollen hierbei die Lücke zwischen Forschung und Produktentwicklung schließen und Forschungsergebnisse für die Industrie anwendbar machen.

Experten sind sich außerdem einig, dass Indien sich in den meisten Bereichen nicht auf die Grundlagenforschung fokussieren sollte, da man dort nicht mit der Erfahrung westlicher Forschungseinrichtungen konkurrieren könne. Stattdessen beabsichtigt man, sich auf angewandte Forschung und die Anpassung bestehender Technologien an indische Anforderungen zu konzentrieren. Die befragten Akteure sehen vor allem in der Weiterentwicklung von Fahrzeugkomponenten hinsichtlich der spezifischen Anforderungen an Robustheit, unkomplizierter Wartung und den klimatischen Bedingungen in Indien die Notwendigkeit weiterer Forschung. Das Wärmemanagement ist hierbei ein zentrales Forschungsthema, um den indischen Klimabedingungen gerecht zu werden. In diesem Bereich gelten die Integration der Batterie- und Motorkühlung als ein Kernthema der Forschung. Große Potenziale werden auch in der Forschung und Entwicklung von Leistungselektronik und der Software-Forschung gesehen.

Das NATRiP (National Automotive Testing And R&D Infrastructure Project) ist ein zentraler Akteur im Bereich der indischen FuE Tätigkeiten im Bereich elektrifizierter Fahrzeuge. Es wurde gegründet, um Forschung und Entwicklung zu fördern, sowie Freigaben und Tests im Automobilsektor durchzuführen. Das Programm wird für einen begrenzten Zeitraum vom Staat finanziell unterstützt und soll langfristig als Koordinierungsstelle für Testaktivitäten und als Datenzentrum dienen, mit dessen Hilfe Forschung betrieben werden kann.

Als bedeutende Institutionen, die in Indien Forschung im Automobilsektor betreiben, wurden das Indian Institute of Technologies (IITs), das Council for Scientific and Industrial Research (CSIR), die Automotive Research Association of India (ARAI) und das Indian Institute of Petroleum, identifiziert. In einer durch die ARAI entworfenen Roadmap ist der Aufbau von FuE-Kapazitäten und Kompetenzen geplant, um kostengünstige und an indische Verhältnisse angepasste Technologielösungen zu entwickeln. Neben Leichtbau-Personenbussen liegt der Fokus der Entwicklung auf Hybridfahrzeugen.

Wirtschaft und Industrie

Die Automobilindustrie ist ein wichtiger Wirtschaftszweig in Indien, insbesondere seitdem der Automobilsektor 1991 vollständig für Auslandsdirektinvestitionen geöffnet wurde. Die Fahrzeugproduktion stieg von zwei Mio. Einheiten 1991 auf über 20 Mio. im Bilanzierungszeitraum 2011/2012 an (siehe MoHIPE 2006, MoHIPE 2012). 75 % der in Indien hergestellten Fahrzeuge sind Zweiräder, gefolgt von Pkw mit einem Anteil von 17 %, sowie Nutzfahrzeugen und Dreirädern mit jeweils 4 %.

Der Automobilsektor hat heute einen Anteil von ca. 6 % am BIP. In 2010/2011 betrug der Anteil des Sektors an der industriellen Wertschöpfung 22 %. Direkt und indirekt bietet die Branche Beschäftigung für mehr als 13 Mio. Menschen (MoHIPE 2012).

Derzeit existieren in Indien 19 Hersteller von Pkw und Mehrzweckfahrzeugen und 16 Hersteller von Zwei- und Dreirädern. Hierunter sind neben nahezu allen großen globalen Autoherstellern auch indische Unternehmen. Im Pkw-Segment hat die Maruti Udyog Ltd. den höchsten Marktanteil (49 %), gefolgt von Hyundai (18 %) und Tata Motors (13 %). Bei den Zweirädern ist dagegen die Hero MotoCorp Ltd. mit 55 % Marktanteil in 2010/2011 vor der Bajaj Auto Ltd. (27 %), sowie der Honda Motorcycle and Scooter India (Pvt) Ltd. und der TVS Motor Company Ltd. mit jeweils 7 % der führende Hersteller.

Im Segment der elektrifizierten Pkw sind derzeit nur sehr wenige Marktakteure vertreten:

- Mahindra REVA e2o – seit 2013 verfügbar) als BEV mit einer Reichweite von 100 km und einem Preis ab 700 000 INR (8 400 Euro) (ein Nachfolgemodell des REVA/ G-Wiz, welcher 2001 auf dem Markt gebracht wurde und 2008 vom REVAi / G-Wiz i abgelöst worden war)
- Toyota Prius – seit 2010 auf dem indischen Markt verfügbar, aber aufgrund des hohen Preises von rund 3 Mio. INR kaum Absatz auf dem indischen Markt
- Toyota Camry Hybrid – seit Sommer 2013 für ca. 3 Mio. INR auf dem Markt verfügbar; Fertigung in Indien

Der Civic Hybrid von Honda, der Mitte 2008 auf den indischen Markt gebracht wurde, wurde aufgrund schwacher Verkaufszahlen trotz einer Preissenkung von 2,2 Mio. INR auf 800.000 INR wieder vom Markt genommen. Viele Hersteller haben die Einführung von Fahrzeugen auf dem indischen Markt für die nahe Zukunft angekündigt.

Viele internationale Hersteller, vor allem aus Japan und Südkorea, produzieren aktuell bereits konventionelle Pkw in Indien. Einige befragte Experten erwarten, dass diese Unternehmen Hybrid-Autos für den indischen Markt herausbringen werden. Im Gegensatz dazu werden Premiumhersteller aufgrund des kleinen Marktsegments wahrscheinlich keine Autos speziell für den indischen Markt entwickeln. Ein Produktionsstandort in Indien ist für internationale Hersteller hierbei von hoher Bedeutung, da erwartet wird, dass in den geplanten Anreizsystemen für Elektroautos ein Anteil von 30 % an lokaler Fertigung vorausgesetzt wird.

Ein besonderes Merkmal von Indiens Elektrofahrzeugindustrie ist die Dominanz von Zweirädern. Die befragten Experten sehen Zweiräder als das wichtigste Segment für die Elektrifizierung in den kommenden Jahren. Im Pkw-Bereich wird ein Potenuial für Hybridfahrzeuge (HEV) gesehen.

Auf dem Markt für elektrische Zweiräder ist die Firma Hero Electric Marktführer und stellt eine breite Palette von Elektro-Zweirädern her. Electrotherm (India) Ltd. vermarktet elektrische Zweiräder unter der Marke YObykes in Indien und ist der drittgrößte Zweirad-Hersteller Indiens. Ebenso bietet die TVS Motor Company verschiedene elektrische Zweirad-Modelle an.

Die elektrischen Zweiräder haben in der Regel eine Bleisäure-Batterie und haben eine Reichweite von 40-45 km pro Ladung, wodurch sie geeignet sind für tägliche kurze bis mittellange Wege. Diese Zweiräder werden für 15 000-30 000 INR (180-360 Euro) verkauft und haben mit INR 0.1/km sehr geringe Betriebskosten. Der Batteriewechsel kostet rund 5 000-7 000 INR (60-84 Euro).

Zurzeit gibt es noch keine bewährten Geschäftsmodelle für den Verkauf von Elektroautos in Indien, allerdings haben Mahindra REVA und Hero Electric vor kurzem Batterie-Leasing-Modelle vorgestellt. Der E-Zweirad-Hersteller Hero Electric hat sein Batteriemietmodell bereits für Großkunden eingeführt; ein Batterietauschmodell mit einem Netz an Tauschstationen ist in Planung.

Die Erwartungen an die weitere Entwicklung der E-Auto-Branche in Indien sind stark abhängig von den noch zu verabschiedenden Politikinstrumenten, insbesondere den Kaufanreizen. Nach Ansicht vieler Experten warten die Hersteller angesichts aktueller niedriger Verkaufszahlen auf das Anreizsystem der Regierung. Da es eine zeitliche Lücke zwischen der alten und der bevorstehenden Subventionsregelung gibt, ist die derzeitige Strategie der Elektrofahrzeughersteller nicht auf Wachstum, sondern auf das Überleben ausgerichtet. Aufgrund dieser unsicheren Situation haben die Hersteller herkömmlicher Fahrzeuge in Indien kaum Interesse an Investitionen in Elektromobilität. Darüber verfügen die meisten inländischen Hersteller nicht über die erforderlichen Überschüsse, um in FuE für Elektroautos investieren zu können.

Robustheit und Einfachheit sind die zentralen Merkmale bestehender indischer Elektrofahrzeuge. Anstelle von technologischer Neu- und Weiterentwicklung werden bestehende und bewährte Komponenten verwendet und funktionell kombiniert. Dies ermöglicht Automobilherstellern und Lieferanten den relativ leichten Eintritt in den Markt der Elektromobilität. Für die Zukunft erwarten Experten viele technische Weiterentwicklungen, wie z.B. den Einsatz von dauermagneterregten Elektromotoren. Außerdem gehen Experten davon aus, dass die elektrische Spannung der indischen Elektroautos, aufgrund geringerer Kosten und höherer Sicherheit, niedriger als in anderen Märkten sein wird. Die niedrigere Spannung ermöglicht auch eine einfachere Wartung in den für Indien typischen relativ simplen Werkstätten.

Eine Anpassung der Komponenten an die lokalen Klimabedingungen und Nutzungsmuster ist laut Experten nötig. Problematisch sei jedoch, dass der indische Markt sehr begrenzt ist, so dass nicht immer eine ausreichend große Menge dieser Technologien nachgefragt wird.

Die momentane Batterietechnologie in Indien beschränkt sich auf herkömmliche Bleisäurebatterien, Obwohl Mahindra REVA bereits eine eigene Lithium-Ionen Batterie für den e2o entwickelt hat, wird erwartet, dass fortschrittlichere Li-Ion-Akkus aufgrund der relativ hohen Kosten keine relevante Rolle im indischen Markt der näheren Zukunft spielen werden.

Verbraucher und Marktentwicklung

Indien ist derzeit zweitgrößter Zweirad-Markt und siebtgrößter Pkw-Markt der Welt (ICRA 2011). Weiteres starkes Wachstum wird für die Zukunft erwartet.

Neben den dominierenden Zweirädern sind Pkw das zweite wichtige Segment auf dem indischen Markt. Innerhalb dieses Segments sind Kompakt- und Kleinwagen der Kategorien A2 (3401-4000 mm) und A1 (bis 3400 mm) die meistverkauften Modelle. Es gibt eine starke Präferenz indischer Kunden für kleine, günstige und verbrauchsarme Autos. Allerdings erlebte auch die Nachfrage nach Luxusautos ausgehend von einem sehr niedrigen Niveau seit 2005/2006 ein beispielloses Wachstum.

In Indien werden jährlich ca. 2.5 Millionen Neuwagen (inkl. Pkw und Mehrzweckfahrzeugen) abgesetzt. Die indischen Konsumenten fragen überwiegend Fahrzeuge mit Benzinmotor nach (Marktanteil von 77 %). Vollständige Daten für den Marktanteil von Elektrofahrzeugen sind für Indien nicht verfügbar. Aus Verkaufszahlen einzelner Hersteller oder Modelle lässt sich jedoch ableiten, dass Elektrofahrzeuge nur einen sehr geringen Anteil der verkauften Fahrzeuge auf dem indischen Markt ausmachen. Beispielsweise wurden vom REVA, Indiens einzigem reinen Elektro-Auto, im Januar 2011 nur rund 50 Einheiten verkauft, was bei 184 332 abgesetzten Neuwagen in diesem Monat nur einen Anteil von 0,027 % darstellt. Auf dem Markt für Zweiräder waren von etwa 13 Millionen verkauften Einheiten in 2010/2011 rund 85 000 bzw. 0,65 % mit Elektroantrieb ausgestattet (Deloitte 2011). Die Entscheidung der indischen Verbraucher für ein Fahrzeug beruht generell auf den Faktoren Anschaffungs-, Betriebs- und Wartungskosten, Leistung, sowie der Eignung für die eigenen Bedürfnisse und die Verkehrsbedingungen. In Indien spielt der Kaufpreis eine wichtige Rolle, während die Gesamtbetriebskosten (TCO) von den Verbrauchern weniger stark berücksichtigt werden. Auch wenn Elektroautos zum Teil niedrigere TCO als herkömmliche Fahrzeuge haben, bevorzugen die meisten Verbraucher herkömmliche Fahrzeuge aufgrund ihres geringeren Kaufpreises. Elektroautos gelten als untermotorisiert und zu teuer. Die sehr preissensiblen indischen Verbraucher sind außerdem nicht bereit, für technologische Innovation einen Preiszuschlag zu bezahlen. Laut der Verbraucherbefragung im NEMMP 2020 waren die Verbraucher bereit, eine Prämie von bis zu 10 bis 20 % für Hybridfahrzeuge zu zahlen, wenn sie von niedrigeren Betriebskosten innerhalb von 2-3 Jahren ausgeglichen würden.

Die Umweltfreundlichkeit ist hingegen für viele Kunden kein entscheidendes Kriterium, wie auch eine Verbraucherbefragung im Rahmen des NEMMP 2020 bestätigt. Dennoch ermittelte die Verbraucherbefragung eine hohe latente Nachfrage nach Elektroautos: Etwa 25 bis 30 % der befragten Verbraucher äußerten eine starke Präferenz für Elektroautos, allerdings unter der Voraussetzung, dass Preis- und Leistungserwartungen angemessen erfüllt werden. Hybridfahrzeuge werden von 14 bis 15 % der Befragten bevorzugt, gefolgt von Plug-Ins (9-10 %), wohingegen nur 5 % sich für reine batteriebetriebene Fahrzeuge entscheiden würden. Aufgrund wirtschaftlicher Vorteile haben im Zweirad-Segment sogar 55 bis 60 % der Befragten eine hohe Präferenz für batteriebetriebene Zweiräder.

In der Folge ist die momentane Kundenbasis für Elektrofahrzeuge sehr klein. Elektro-Pkw werden vor allem von gehobenen Kunden genutzt. Darüber hinaus werden Elektrofahrzeuge oft lediglich als Zweit- oder Drittwagen der Familie verwendet, da sie aufgrund eines Mangels an Vertrauen in die neue Technologie nicht als Erstwagen infrage kommen (Finpro 2013).

Ähnlich ist es im Segment der Zweiräder, allerdings wurde in Folge der Anreizsetzung zur Nachfragegenerierung durch die MNRE-Regelungen ein Anstieg der Verkäufe insbesondere von Elektrozeigern beobachtet. Diese profitieren von einem relativ großen Angebot durch regionale Hersteller und davon, dass Fahrzeuge mit Motorleistung von weniger als 250 W und Spitzengeschwindigkeit von 25 km/h von der Registrierung und Kfz-Steuer befreit sind und ohne Führerschein gefahren werden können.

Der NEMMP rechnet, basierend auf Verbraucherbefragungen, Expertendiskussionen und einem TCO-Modell, mit einer Marktdurchdringung von 14 bis 16 % von Elektro- und Hybridfahrzeugen bis 2020. Die projizierte Marktdurchdringungsrate basiert auf der Annahme einer Implementierung von starken Nachfrageschaffungsmaßnahmen, wie sie im NEMMP vorgesehen sind.

Die meisten Experten sehen die hohen Kosten als die größte Herausforderung für die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen in Indien. Die befragten Experten bestätigen die Annahme, dass die indischen Verbraucher viel sensibler als europäische Kunden auf Preisunterschiede reagieren. Experten aus der Industrie erwähnten, dass die Verbraucher erhebliche Preisnachlässe auf Elektromobile mittels staatlicher Subventionen erwarten. In der Vergangenheit hatten bereits geringe Anreize große Auswirkungen auf die Marktdurchdringung von Elektromobilen im Zweirad-Segment. Die befragten Experten gehen davon aus, dass in Indien – insbesondere in Ballungsräumen - ein erhebliches Potenzial für leichte, einfache und kleine Fahrzeuge besteht, die für kurze Strecken geeignet sind. Ein Regierungsexperte plädierte dafür, Elektrofahrzeuge in Indien insbesondere im öffentlichen Verkehr als Busse, Transporter oder Taxis einzusetzen, da das Potenzial für privat gehaltene Elektrofahrzeuge begrenzt sei.

Im Vierrad-Segment sehen die befragten Stakeholder nur für Hybrid-Fahrzeuge ein erhebliches Potenzial. Da die Kosten für Mild-Hybride vergleichsweise niedrig sind, gehen die Experten davon aus, dass diese in drei bis vier Jahren sehr häufig in Indien zu finden sein werden. Künftige Kraftstoffeffizienznormen für Pkw könnten die Verbreitung der Hybride steigern. Hinsichtlich der Entwicklung bei Fahrzeugen mit einem höheren Grad an Elektrifizierung unterscheiden sich die Expertenmeinungen: Einige sehen eine Schritt-für-Schritt-Elektrifizierung von Hybriden über Plug-Ins zu reinen Elektromobilen, andere erwarten eine parallele Verbreitung, wobei reine Elektromobile hauptsächlich für Nischenanwendungen eingesetzt werden. In der Regel wird relativ wenig Potenzial für rein batterieelektrische Pkw in Indien gesehen, während das Potential für rein elektrische Zweiräder deutlich höher eingeschätzt wird. Laut Expertenmeinung werden 75 bis 80 % der elektrifizierten Fahrzeuge im Jahr 2020 batteriebetriebene Zweiräder sein.

Fazit - Gesamtbetrachtung des Status quo der Elektromobilität in Indien

Indien verfügt über einen stark wachsenden Kraftfahrzeugmarkt, gleichzeitig leiden viele indische Städte unter massiver Luftverschmutzung. Die Entwicklung der Elektromobilität befindet sich in Indien jedoch noch im Anfangsstadium. Dies betrifft sowohl die derzeitige Verfügbarkeit elektrifizierter Fahrzeuge und das Technologielevel heimischer Produkte als auch die politischen Rahmenbedingungen und die Reife des Marktes. Auch im Bereich der Forschung und Entwicklung von elektrifizierten Fahrzeugen liegt Indien weit hinter etablierten

Herstellernationen zurück und leidet an einer fehlenden Integration zwischen Forschung und Industrie.

Die Regierung zeigt jedoch Ambitionen, Elektromobilität in Indien voranzutreiben, insbesondere durch die Entwicklung des ‚National Electric Mobility Mission Plan 2020‘. Die darin formulierte Strategie beruht insbesondere auf der Entwicklung des Marktes durch monetäre Kaufanreize sowie der Stärkung heimischer Industrie und der Forschung und Entwicklung. Auch wenn einige der im NEMMP genannten Maßnahmen bereits implementiert worden sind, wurden zentrale Elemente wie beispielsweise Kaufanreize noch nicht verabschiedet. Aktuell ist noch unklar, inwieweit die Regierung den im Plan ausgearbeiteten Vorstellungen folgt.

Indische Verbraucher reagieren sehr sensibel auf den Kaufpreis angebotener Fahrzeuge. Dass Kaufanreize das Potential haben, den indischen Markt für Elektrofahrzeuge signifikant zu beeinflussen, hat sich in der Vergangenheit durch das mittlerweile ausgelaufene Subventionsprogramm des MNRE gezeigt. Um den Ansprüchen der Nutzer gerecht zu werden, konzentrieren sich die indischen FuE-Aktivitäten und die Produktentwicklung der heimischen Industrie auf simple, kostengünstige und robuste elektrifizierte Fahrzeuge, die den lokalen Ansprüchen entsprechen.

Es ist zu erwarten, dass auch unter positiven Voraussetzungen, d.h. Implementierung von Kaufanreizen, Indien kurzfristig in erster Linie einen signifikanten Markt für elektrische Zweiräder darstellt. Diese sind im Betrieb und hinsichtlich der ökonomischen Rahmenbedingungen für die Nutzer attraktiver als elektrifizierte Pkw. Während Hybrid-Pkw mittelfristig Absatz bei der aufstrebenden indischen Mittelschicht finden könnten, wird der Einsatz von Plug-in-Hybriden und rein elektrischen Pkw auch durch eine fehlende Infrastruktur eingeschränkt. Ein signifikanter Ausbau der Ladeinfrastruktur ist durch fehlende finanzielle öffentliche Mittel und Anreize für Investoren sowie ein überlastetes Stromnetz mittelfristig kaum zu erwarten.

Die Situation der Elektromobilität in Indien unterscheidet sich stark von der in Europa, USA oder Japan und steht in einigen Punkten exemplarisch für weitere Schwellen- und Entwicklungsländer. Produkte, die den speziellen Ansprüchen des indischen Marktes entsprechen, könnten auch in anderen Schwellenländern Absatz finden.

5.2.7 Entwicklungen außerhalb der Fokusbänder

H. Hüging (WI), J. Tenbergen (WI)

Südkorea

In Südkorea liegen die wesentlichen Gründe zur Förderung der Elektromobilität in der Reduktion von Treibhausgasemissionen und in der Förderung der heimischen Automobilindustrie. Der Regierungsbeschluss zur Implementierung umweltfreundlicher Fahrzeuge erfolgte in Südkorea bereits im Jahr 2004. Zudem weisen die staatlichen Ziele und Programme zum Teil sehr ehrgeizige Ziele auf:

- Green Car Roadmap: Green Cars umfassen in dieser Roadmap sowohl BEV, (P)HEV, FCEV als auch saubere Dieselfahrzeuge. Dabei benennt die Roadmap unter anderem die folgenden Ziele: Südkorea soll bis zum Jahr 2017 weltweit die viertstärkste xEV-Nation werden, der globale xEV-Anteil am Kleinwagenmarkt soll im Jahr 2015 12 % betragen und bis 2020 sollen durch die Verbreitung von xEV 1,2 Millionen Tonnen CO₂ eingespart werden.
- Automotive Policy Master Plan: Dieser Plan wurde im Jahr 2012 durch das Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MLTM) verabschiedet und beinhaltet Leitlinien zum systematischen Ausbau der Elektromobilität. Ein Schwerpunkt liegt beispielsweise in der Verbesserung der Fahrzeugsicherheit (Cho et al. 2012).

Die Entwicklung und Produktion von Elektrofahrzeugen ist in Südkorea durch einen sehr hohen Stand der Technik geprägt. Die wichtigsten Forschungs-Akteure sind das Korean Transport Institute (KOTI), das Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), das Korea Automobile Testing and Research Institute (KARTI), das Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) und das Korea Automotive Technology Institute (KATECH).

Obwohl Südkorea über keine eigenen Lithiumvorkommen verfügt, ist das Land mit den Unternehmen LG Chem, Samsung SDI, SB Limotive und SK Energy einer der wichtigsten Hersteller für Lithium-Ionen-Batterien. Auch im Bereich der Elektrofahrzeugproduktion ist Südkorea gut aufgestellt, obwohl nur einer (Hyundai Kia Automotive Group) von vier angesiedelten Konzernen koreanischen Ursprungs ist. Die Produktion des Hyundai BlueOn startete bereits im Jahr 2010, wobei sich die Verkäufe stark auf den heimischen Markt konzentrieren. Wie in den meisten Ländern, gestaltet sich die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen auch in Südkorea eher verhalten. Ende 2012 waren insgesamt 860 BEV in Korea zugelassen, was bei 2 500 geplant zugelassenen BEV einem Zielerreichungsgrad von 35 % entspricht. Die Gründe dafür liegen vor allem in den hohen Anschaffungskosten der Fahrzeuge.

Kanada

Im Jahr 2010 wurde die nationale „Electric Vehicle Technologie Roadmap“ (evTRM) verabschiedet. Diese wird von der kanadischen Regierung koordiniert, die Federführung liegt jedoch bei der Industrie. Angekündigt wird darin das Ziel von 500 000 PHEV bis zum Jahr 2018, jedoch bisher ohne offizielle Bestätigung.

Die Elektromobilität wird in Kanada meist als Konzept der urbanen Mobilität gesehen. Die großen Distanzen in Kanada sind für den Einsatz von Elektrofahrzeugen auf Langstrecken eher ungeeignet. Der Aufbau eines Netzes aus Ladestationen zwischen einzelnen Ballungsräumen ist bislang nicht vorgesehen. Für kanadische Großstädte geht man davon aus, dass der Fahrzeugbesitz stark abnehmen wird, da die öffentlichen Nahverkehrsnetze gut ausgebaut sind und die Kosten für das Abstellen des Autos in der Stadt hoch sind. Car-Sharing wächst zurzeit sehr stark in Städten wie Vancouver oder Toronto (STROM-Arbeitspapier Nordamerika).

Die Provinzen zeigen wiederum eine unterschiedliche Bereitschaft zur Einführung der Elektromobilität. Besonders Ontario, Quebec und British Columbia bemühen sich um die starke Förderung der Elektromobilität und vergeben Kaufanreize, die sich meistens auf Basis der Batteriekapazität errechnen, sowie Leasingrabatte auf Basis der Leasingdauer. Zu den regionalen Programmen für Elektrofahrzeuge zählen:

- Ontario Electric Vehicle Incentives Program: Das Incentive Program in Ontario richtet sich an PHEV und BEV, die im oder nach Juli 2010 gekauft wurden und zudem für die Highways in Kanada zugelassen sind und bietet Kaufsubventionen und Leasingrabatte (Ministry of Transportation Ontario 2013).
- Québec's Drive Electric Program: Dieses Programm gestattet Kauf- sowie Leasing-Rabatte für zugelassene Fahrzeuge von Privatpersonen, Unternehmen und Organisationen (Québec EV 2013).
- The Clean Energy Vehicle (CEV) Program in British Columbia: Neben Kaufanreizen und Leasingrabatten ist zudem die Installation von Ladeinfrastruktur in Mehrfamilienhäusern förderfähig. Das landesweite Netz öffentlicher Ladeinfrastruktur wird durch die „Community Charging Infrastructure (CCI) Fund“ mit 2.74 Mio. CAD (1,96 Mio. Euro) gefördert (British Columbia 2013).

In Kanada ist die Automobilindustrie mit einem Anteil von zehn Prozent der größte Produktionssektor. Auch die Branche der Elektromobilität wächst stetig und beinhaltet sowohl die Bereiche Batterieentwicklung und -produktion, Entwicklung des Antriebsstrangs und Systemintegration als auch die Produktion von sauberer Energie. Als Produktions- und Entwicklungsstandort spielt Kanada auch für US-Firmen eine wesentliche Rolle. Rund 75 % aller kanadischen Exporte gehen in die USA. Viele in Kanada gefertigten Fahrzeuge, darunter auch Elektrofahrzeuge, sind ausschließlich für den US Markt vorgesehen und werden in Kanada nicht geführt. General Motors und Ford betreiben in Kanada eigene Forschungsstandorte und kooperieren vor Ort mit Forschungsinstituten und Universitäten. Unter den gemeinsamen Forschungsbereichen spielt insbesondere der Leichtbau eine wichtige Rolle. Die nationale Regierung in Kanada hat sich zum Ziel gesetzt, insbesondere Forschungsaktivitäten in den Bereichen Leichtbau und Antriebssysteme zu investieren (STROM Arbeitspapier Nordamerika).

Laut den Experten aus Kanada ist man bislang mit der Einführung von Elektrofahrzeugen nicht zufrieden; die Anzahl der verkauften Fahrzeuge ist sehr gering (STROM Arbeitspapier Nordamerika). Ende 2012 waren in Kanada 875 BEV und 1 716 PHEV registriert, wobei ein Großteil der Flotte im selben Jahr verkauft wurden (621 BEV in und 1 399 PHEV) (IA-HEV 2013). Viele Käufer schreckt die geringe Reichweite ab. Experten gehen davon aus, dass sich in Kanada Plug-In Hybride als Elektrofahrzeugkonzept durchsetzen. Allerdings muss

dazu die Ladeinfrastruktur noch weiter ausgebaut werden. Im April 2013 gab es in Canada nur 746 Ladestationen (IA-HEV 2013).

Südafrika

Südafrikas Automobilmarkt unterliegt einer schnellen Entwicklung mit großer Bedeutung für den gesamten Kontinent. Obwohl die Entwicklungen Südafrikas im Bereich der Elektromobilität nicht mit denen der untersuchten Fokusregionen vergleichbar sind, können auch hier einige Anstrengungen zur Verbreitung elektrischer Fahrzeuge verzeichnet werden: Die Südafrikanische Innovationsagentur (South Africa's Technology Innovation Agency (TIA)) startete zu Beginn des Jahres 2013 ein Elektromobilitätsprogramm, und das Department of Environmental Affairs initiierte ein Green Cars - Programm (Zero Emissions xEV) (Dane 2013). Das Department of Trade and Industry entwickelte zur Zeit der Recherche eine „Electric Vehicle Industry Roadmap“. Diese soll Anreize sowohl für Hersteller als auch steuerliche Vergünstigungen für Verbraucher beinhalten (Southafrica.info 2013). Die Anreize für die Hersteller dienen dazu, das *Automotive Development Program (APDP)* zu realisieren und treten in Kraft, sobald diese mehr als 5 000 xEV pro Jahr produzieren. Ab dieser Produktionszahl werden durch die Regierung 35 % der Produktionskosten der letzten drei Jahren erstattet. Der Toyota Prius Hybrid ist das einzige Hybridfahrzeug, das in Südafrika gebaut und verkauft wird, wobei die Verkaufszahlen sehr niedrig sind.

Brasilien

Bisher verfolgte die brasilianische Regierung die Einführung der Elektromobilität nicht strategisch, da der Fokus auf Flex-Fuel-Fahrzeugen lag. Im Jahr 2011 wurde jedoch die Errichtung eines Produktionswerkes für Automobile in der Nähe von Rio de Janeiro angekündigt. Ab dem Jahr 2014 sollen hier bis zu 200 000 Fahrzeuge, unter anderem auch der Nissan Leaf, produziert werden. Damit fände die erste Produktion von Elektrofahrzeugen Südamerikas in Brasilien statt. Ziel ist nun die strategische Ausrichtung zum Aufbau eines signifikanten E-Fahrzeugmarktes in Brasilien. Daher wurden bereits einige Pläne zur Förderung der Elektromobilität erarbeitet, wie beispielsweise die Pläne zu Steuersenkung für reine BEV von Senator Eduardo Amorim (Costa 2013). In einigen Regionen Brasiliens erhalten Fahrzeughalter von E-Fahrzeugen bereits Steuervergünstigungen.

Israel:

In Israel wurde das Konzept des Batteriewechsels erstmals für den privaten Pkw in größerem Maßstab umgesetzt. Die Firma Better Place hat 2011 in Kooperation mit Renault-Nissan ein Batteriewechselsystem in Israel aufgebaut. Das Projekt profitierte unter anderem von Kaufanreizen für Elektrofahrzeuge in Israel: Seit 2008 wurde die Verkaufssteuer für Elektrofahrzeuge auf 10 % reduziert – gegenüber 80 % für konventionelle Fahrzeuge. Better Place installierte Batteriewechselstationen in Israel, die den Wechsel von Batterien für das Model Renault Fluence Z.E. anboten. Kunden erwarben das Fahrzeug ohne Traktionsbatterie. Die Batterie wird vom Anbieter Better Place gestellt und über die Fahrleistung abgerechnet. 2013 musste das Unternehmen Insolvenz anmelden. Von den ursprünglich geplanten 100 000 Fahrzeugen bis 2016, wurden nur ca. 1 000 Fahrzeuge abgesetzt und nutzen das System.

5.3 Vergleichende Globalstudie

Nachfolgend werden die Erkenntnisse aus den einzelnen Regionen entlang der vier Untersuchungsfelder verglichen. Es werden zum Teil weitere Nationen in die Analyse mit einbezogen, wenn es in diesen Regionen wichtige Entwicklungen hinsichtlich eines Themenfeldes gibt.

5.3.1 Regierung/Politik/Öffentliche Infrastruktur

T. Koska (WI)

Ziele und Strategien

Weltweit ist die Förderung von Elektromobilität in den letzten zehn Jahren ein relevantes Thema für die Politik geworden – auf nationaler sowie zum Teil auch auf regionaler Ebene.

Vorreiter der Förderung von Elektromobilität war unter anderem Norwegen, wo für Elektrofahrzeuge bereits seit Mitte der 1990er Jahre Ausnahmen von den in Norwegen üblicherweise sehr hohen Kraftfahrzeugsteuern gelten.

Auch im US-Bundesstaat Kalifornien gab es bereits seit 1990 gesetzliche Regelungen zur Markteinführung von Nullemissionsfahrzeugen: die Hersteller wurden verpflichtet, dass Nullemissionsfahrzeuge bis 2003 einen Marktanteil von zehn Prozent der zugelassenen Personenkraftwagen erreichen.

Die **Motivationen** der Förderung von Elektromobilität sind dabei vielfältig. Zum einen streben nahezu alle Regierungsprogramme die Reduktion von CO₂-Emissionen des Autoverkehrs durch die Einführung von Elektromobilität an. Tatsächlich ist der Straßenverkehr mit 17 % des weltweiten energiebedingten CO₂-Ausstoßes ein wesentlicher Faktor bei dem Bestreben, selbstgesetzte oder im Rahmen von internationalen Abkommen beschlossene Klimaziele zu erreichen. Jedoch hängt die tatsächliche CO₂-Reduktion stark vom jeweiligen Strommix ab, so dass Elektromobilität nur bei einem großen Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung einen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann – was etwa in Indien und China aufgrund des hohen Kohlestromanteils auch mittelfristig nicht zu erwarten ist. Ein weiterer Faktor, der die Förderung der Elektromobilität in den USA, aber auch in China besonders motiviert, ist die Reduktion von Luftschadstoffen. Als Reaktion auf den Smog in Megacities bietet Elektromobilität durch lokal emissionsfreies Fahren eine Aussicht auf eine Lösung der Gesundheitsproblematik durch Schadstoffemissionen.

Eine z.T. weniger öffentlichkeitswirksam dargestellte, dafür umso relevantere Motivation ist die Förderung der nationalen Forschung, Technologie und Industrie, insbesondere der Automobilindustrie und deren Zulieferer. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen Ländern mit einer relevanten Automobilindustrie, wie etwa Deutschland, Frankreich, den USA, Japan und China, und Ländern ohne eine bedeutende Automobilproduktion wie etwa Norwegen oder die Niederlande, die bei ihrer Förderung von Elektromobilität weniger Rücksicht auf die Bedingungen von Automobilherstellern nehmen. Da die zukünftige Bedeutung von Elektromobilität als neues Marktsegment schwer zu prognostizieren ist, der Automobilmarkt insgesamt aber von hoher wirtschaftlicher Relevanz ist, wollen die nationalen Regierungen nach Ein-

schätzung von Experten durch ihre Förderung verhindern, dass die heimische Industrie den Anschluss in einer künftigen Schlüsseltechnologie verliert.

Viele nationale Regierungen haben konkrete **Ziele** für die Marktdurchdringung benannt, die sie durch die Förderung von Elektromobilität erreichen wollen. Noch ambitionierter als die in Deutschland anvisierten 1 Mio. Elektrofahrzeuge bis 2020 will etwa Frankreich die doppelte Zahl zum gleichen Zeitpunkt erreichen. Japan strebt einen Marktanteil von 15-20 % an; die USA wollen bereits bis zum kommenden Jahr 1,5 Mio. Elektrofahrzeuge auf die Straße gebracht haben. Gemeinsam ist den Zielen, dass sie aus Sicht von Marktbeobachtern weitgehend als schwer erreichbar, zum Teil als unrealistisch betrachtet werden (vgl. Kap 5.3.4). Darauf weist auch der Vergleich der Ziele mit dem aktuellen Stand zugelassener Elektrofahrzeuge in den einzelnen Ländern hin.

Ziele xEV Flotte	USA	Japan	China	Frank- reich	GB	Norwe- gen	Indien	Deutsch- land
Ziel	1 Mio. bis 2015	15-20 % Marktanteil bis 2020	0,5 Mio. bis 2015 [5 Mio. bis 2020]	2 Mio. bis 2020	-	-	6-7 Mio. bis 2020	1 Mio. bis 2020
EV- Bestand (2012)	71 000	45 000	12 000	20 000	8 000	10 000	1 400	6 000
Anmer- kung	PHEV/BEV /FCEV; ca. 2,4 Mio. auf 2020 hoch- gerechnet	BEV/PH EV ca. 850 000 Fzg.	„New Ener- gy Vehicles“ v.a. BEV/PHEV	BEV/PH EV	(Emp- fehlung 1,5 Mio. bis 2020)	inoffiziell (Grønn Bil) 200 000 bis 2020	HEV, PHEV, BEV, v.a. Krafräder	BEV/PH EV

Tab. 5-19 Regierungsziele zur Verbreitung von xEVs im Vergleich

Quelle: eigene Darstellung (nach STROM Regionalstudien; für EV-Bestand: nach EVI 2013)

Die **Strategien** der einzelnen Länder sind häufig in zentralen Regierungsprogrammen niedergelegt, die die Regierungsziele darstellen und Maßnahmen und Instrumente zu deren Erreichung auführen. Ähnlich wie Deutschland mit dem 2009 veröffentlichten „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ verfügt Frankreich über einen „Electric Vehicle Plan“, Norwegen verabschiedete 2012 ein „Commitment to a Change in Vehicle Technology“, Japan legte 2010 die „Next Generation Vehicle Strategy“ vor, und auch China hat 2010 mit dem „Development of New Energy Vehicle Industry“ einen Plan vorgestellt, der sich primär auf die Förderung von Plug-In-Hybrids und batterieelektrischen Fahrzeugen konzentriert. In Indien wurde mit dem „National Electric Mobility Mission Plan“, der im Frühjahr 2013 vorgestellt wurde, ein erster Schritt zu einer nationalen Elektromobilitätsstrategie getätigt.

Gemeinsam haben diese Pläne die Integration verschiedener Maßnahmentypen zur Förderung von Elektromobilität: Angekündigt oder implementiert werden in diesen Dokumenten regulatorische Rahmenbedingungen, monetäre sowie nicht-monetäre Anreize zum Kauf von Elektrofahrzeugen, die Förderung von Forschung und Entwicklung und von Demonstrationsprojekten sowie Maßnahmen zum Aufbau von Ladeinfrastruktur.

Regulatorischer Rahmen

Ein wichtiger Treiber für die Entwicklung und Markteinführung von Elektromobilität, der direkt die Automobilhersteller adressiert, sind gesetzliche Vorgaben zu Emissionen von Neuwagenflotten oder zu Marktanteilen von Nullemissionsfahrzeugen. Erstere bestehen in der EU in Form der CO₂-Flottengrenzwerte für Pkw, die aktuell bei 130 g CO₂/km, ab 2020 bei 95 g CO₂/km liegen. Zwar ist es den Herstellern freigestellt, durch welche Antriebstechnik sie die Reduktion erreichen. Insbesondere mit Blick auf den Zielwert für 2020 ist es jedoch für Hersteller von großen und verbrauchsintensiven Fahrzeugen attraktiv, die eigenen Durchschnittsemissionswerte durch Elektrofahrzeuge zu senken, da diese für eine Übergangszeit doppelt als Nullemissionsfahrzeuge angerechnet werden. Ähnlich verfasste, wenn auch deutlich mildere Flottenemissionslimits bestehen auch in den USA, wo erst ab 2020 ein Durchschnittswert von 140 g CO₂/km zu erreichen ist. In Japan werden die Flottengrenzwerte, die über die Kraftstoffverbrauchseffizienz in km/l ausgedrückt werden, im Rahmen eines „Top-Runner“-Ansatzes dynamisch weiterentwickelt; Der Grenzwert orientiert sich dabei an den Verbrauchswerten, die von den jeweils effizientesten Modellen im jeweiligen Marktsegment erreicht werden.

Quoten für die Markteinführung von Nullemissionsfahrzeugen gibt es mit der ZEV-Gesetzgebung in Kalifornien, die mittlerweile von mehreren US-Bundesstaaten adaptiert wurde.

Finanzielle Förderung und Anreize

Neben den begrenzten Reichweiten von Elektrofahrzeugen und den damit verbundenen Herausforderung für die Ladeinfrastruktur stellt der hohe Preis nach wie vor ein wesentliches Hindernis für eine größere Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen dar (vgl. Abschnitt 5.3.4, Abschnitt „Nutzerakzeptanz“). Dieses Hemmnis zu verringern ist das Ziel von Kaufanreizen, die – abgesehen von Deutschland – nahezu alle betrachteten Länder als Instrument zur Förderung von Elektromobilität einsetzen. Die Förderung variiert dabei zwischen den Ländern sowohl in ihrer Höhe wie in der Struktur, wie Tab. 5-20 zeigt.

Land	Einmalige Kaufanreize*	regelmäßige fiskalische Anreize*	Sonstige Anreize**
Deutschland	-	Befreiung von Kfz-Steuer für 10 Jahre (danach 50 % Ermäßigung)	Bessere Anrechnungsmöglichkeit für Dienstwagen
USA	max. 5 400 Euro [abh. von Batteriekapazität]	-	Nutzung HOV-Lanes, teilw. Befreiung von Parkgebühren, vergünstigte Stromtarife
Japan	max. 6 300 Euro [2/3 der Preisdifferenz zu konv. Pkw]	Reduktion Kfz-Steuer um 50 %	Teilw. Befreiung von Parkgebühren und Erstattung von Mautgebühren
China	max. 7 200 Euro für BEV [abh. von Reichweite] PHEV: 4 200 Euro	befreit von Kfz-Steuern, Befreiung von der MwSt bei chinesischen Modellen	Befreiung von „Nummernschild-Lotterie“ für Neuzulassungen (z.B. Peking, Shanghai)

Frankreich	max. 6 300 Euro [abh. von CO ₂ -Emissionen]	Vergünstigte CO ₂ -Steuer für Firmenwagen	Vergünstigte Raten für Maut- und Parkgebühren
Großbritannien	max. 6 300 Euro [25 % des Fzg.-Preises]	bis zu 600 Euro	Befreiung von Londoner City- Maut, teilw. Befreiung von Parkgebühren
Norwegen	Wegfall der gewichtsabh. Importsteuer u. MwSt [Ø 15 000 – 20 000 Euro pro Fahrzeug, beim. Tesla S ca. 100 000 Euro]	bis zu 3 800 Euro	Nutzung von Busspuren, Befreiung von Park- und Mautgebühren

* Bezug auf nationale Anreize, zusätzlich kann es auf untergeordneten Ebenen zusätzliche Anreize geben (e.g. durch Länder, Präfekturen)

** exemplarisch

Anmerkung: zur Zeit keine Kaufanreize auf nationaler Ebene in Indien implementiert

Tab. 5-20 Struktur der Subventionen in ausgewählten Ländern im Vergleich

Quelle: eigene Darstellung (nach STROM Regionalstudien)

Ein Bestandteil der Förderung sind direkte Subventionen, die im Rahmen von Regierungsprogrammen an den Käufer eines Elektrofahrzeugs ausgezahlt werden, sowie Nachlässe auf einmalig fällige Steuern, etwa der Mehrwertsteuer beim Fahrzeugkauf oder Zulassungssteuern, die in vielen Staaten bestehen. Weitere Vergünstigungen basieren auf einer Reduktion oder dem Wegfall der jährlichen Kfz-Steuer, bei denen aber in der Regel vergleichsweise kleine Summen erreicht werden.

Die Höhe der Förderung wird in den einzelnen Programmen unterschiedlich bestimmt: In Japan beträgt die nationale Förderung bis zu zwei Dritteln der Kaufpreisdifferenz zwischen dem „Next Generation Vehicle“ (rein batterieelektrische, Plug-In-Hybrid oder Clean-Diesel-Fahrzeuge) einerseits und dem vergleichbaren konventionellen Fahrzeugmodell andererseits; in den USA gibt es einen Steuernachlass, der in Abhängigkeit von der Batteriegröße zwischen 2 500 und 7 500 USD beträgt; in Kalifornien wird ein einmaliger fester Bonus ausgezahlt, der nur zwischen den Fahrzeugtypen (BEV, PHEV) variiert. Frankreich zahlt im Rahmen seines aufkommensneutralen Bonus-Malus-Systems der Fahrzeugbesteuerung einen einmaligen Bonus von 7 000 Euro für Fahrzeuge, die weniger als 20 g CO₂/km emittieren (i.d.R. rein batterieelektrische Fahrzeuge); für Fahrzeuge bis zu 50 g CO₂/km (d.h. PHEVs) werden 5 000 Euro gezahlt. In Deutschland bestehen dagegen keine Kaufsubventionen; die Vergünstigungen durch die zehnjährige Befreiung von der Kfz-Steuer hat für niedrig motorisierte Elektrofahrzeuge nur sehr geringe Auswirkungen; bei Fahrzeugen mit höherer Motorisierung können jährlich Steuern in der Größenordnung von 100 bis 250 Euro gespart werden.

Sehr hohe Subventionen je Fahrzeug werden in Norwegen gewährt, wo eine im internationalen Vergleich extrem hohe Zulassungssteuer auf Kfz besteht, die sich unter anderem auf Basis der CO₂-Emissionen bestimmt. Die Reduktionen für Elektrofahrzeuge machen bereits bei Kleinwagen wie dem Renault Zoe über 11 000 Euro aus; hochmotorisierte größere Fahrzeuge profitieren in noch höherem Maße, so dass rein batterieelektrische Fahrzeuge in der Regel günstigere Gesamtkosten (TCO) aufweisen als vergleichbare konventionelle Fahrzeuge.

Eine solche Überkompensation der Mehrkosten gelingt ansonsten nur in Dänemark, wo noch höhere Steuernachlässe gewährt werden als in Norwegen, sowie in den Niederlanden im Bereich der PHEV-Fahrzeuge, die durch eine Befreiung von der Registrierungssteuer für Fahrzeuge mit weniger als 95 (Benziner) bzw. 88 g CO₂/km (Diesel) und der jährlichen Kfz-Steuer vor allem Plug-In-Hybride günstiger stellen.

In den anderen betrachteten Ländern wird dagegen die Kostendifferenz zwischen Fahrzeugen mit elektrischen und konventionellen Antrieben nur mehr oder weniger stark verringert, aber nicht aufgehoben.

Ein Anreiz, Elektrofahrzeuge nicht nur für private, sondern auch für gewerbliche Halter zu attraktiveren, wird in einigen Ländern durch Vergünstigungen bei der Dienstwagensteuer erreicht.

Um die Gesamthöhe der Subventionen international vergleichen zu können, ist der Bezug auf ein ausgewähltes Fahrzeugmodell sinnvoll, da die Förderung häufig von den Spezifika des Elektrofahrzeugs abhängig sowie – im Falle von Steuernachlässen – von der Höhe der Steuer für das zu vergleichende konventionelle Fahrzeug. Abb. 5-19 zeigt die Höhe der Anreize für einen Renault Zoe im Vergleich mit dem konventionellen Modell Clio ähnlicher Größe und Motorisierungsstärke.

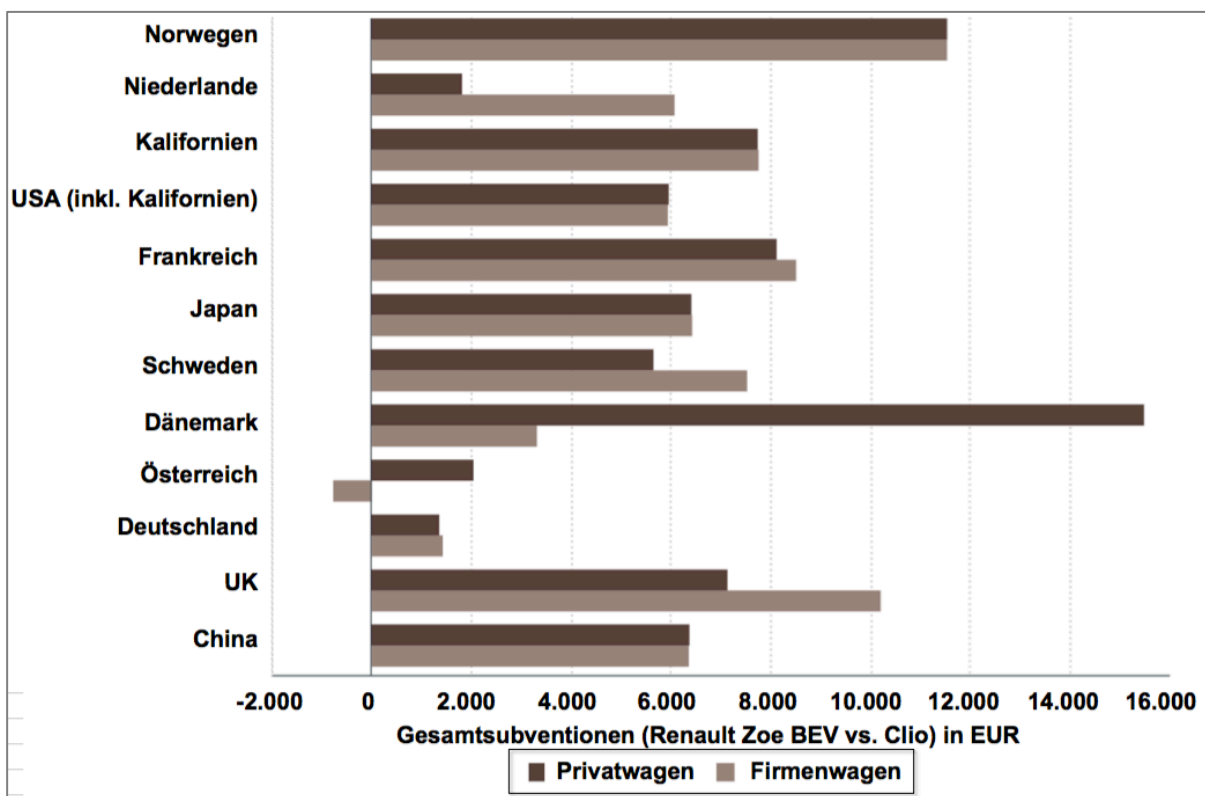


Abb. 5-19 Gesamthöhe der Subventionen in verschiedenen Ländern für einen Renault Zoe (BEV, 65 kW) im Vergleich zu einem Renault Clio (Benzin, 66 kW)

Quelle: (ICCT 2014)

Eine Aufgliederung der Kostenbestandteile Kaufpreis, Steuern bzw. Steuernachlässe und Treibstoff- bzw. Stromkosten über vier Jahre zeigt, dass es durch diese Subventionen nur in Norwegen und Dänemark gelingt, günstigere Gesamtkosten (TCO) eines Renault Zoe im Vergleich zum Clio zu erreichen. Eine Annäherung des Kostenniveaus erreichen immerhin Frankreich, Kalifornien, Großbritannien oder China, während hier in den Niederlanden, Deutschland oder Österreich eine deutliche Lücke erhalten bleibt (vgl. Abb. 5-20).

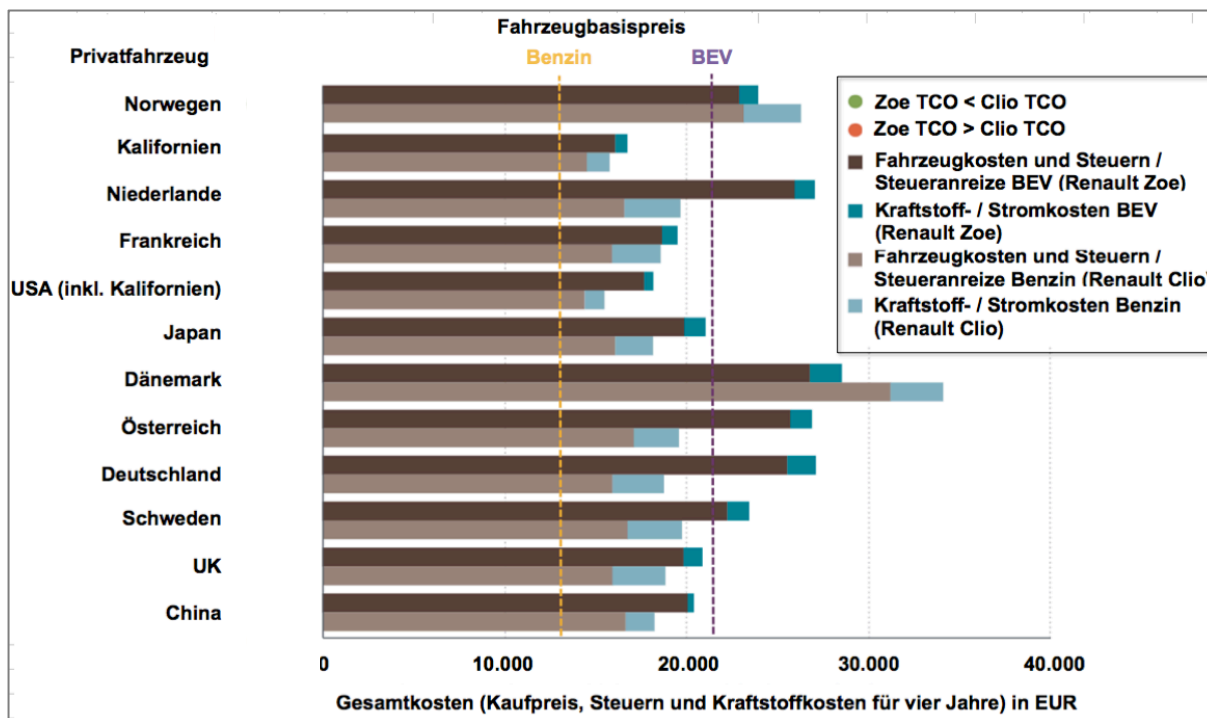


Abb. 5-20 Gesamtkosten (TCO) über vier Jahre in ausgewählten Ländern für einen Renault Zoe (BEV, 65 kW) im Vergleich zu einem Renault Clio (Benzin, 66 kW)

Quelle: (ICCT 2014)

Nicht-monetäre Anreize

Neben den Subventionen und Steuervergünstigungen werden in verschiedenen Ländern, Regionen und Städten Vorteile für die Nutzung von Elektrofahrzeugen gewährt.

Diese bestehen zum Einen in der Möglichkeit, ansonsten für Busse und Taxis oder für Fahrzeuge mit hohem Besetzungsgrad reservierte Fahrspuren zu nutzen (z.B. Norwegen oder Kalifornien), wodurch den Fahrern insbesondere im Berufsverkehr und zu anderen Stauzeiten erhebliche Zeitvorteile entstehen können. Zum anderen kann durch Ausweisung von öffentlichen Parkplätzen speziell für Elektrofahrzeuge die Parkplatzsuche für Nutzer von Elektromobilität deutlich verkürzt werden; die Parkplätze sind dabei in der Regel mit einer Ladestation ausgestattet.

Bereitstellung von Infrastruktur

Ein großer Teil der betrachteten Länder hat sich Ziele für den Ausbau der Ladeinfrastruktur gesetzt. Die ambitioniertesten Ziele verfolgen dabei Frankreich (mit 1 Mio. regulären und

150 000 Schnellladepunkten) und Japan (mit 2 Mio. regulären und 5 000 Schnellladepunkten).

	USA	Japan	China	Frankreich	GB	Norwegen
Ausbauziele	-	2 Mio. Langsam-ladestationen 5 000 Schnell-ladestationen, (2020)	220 000 Ladepunkte, 2 350 Batteriewechsel-stationen (2015)	1 Mio. öffentliche Ladepunkte davon 150 000 Schnellladung	-	-

Tab. 5-21 Ausbauziele für Ladeinfrastruktur im Vergleich

Quelle: eigene Darstellung (nach STROM Regionalstudien)

Die Entwicklung des tatsächlichen Aufbaus der Ladeinfrastruktur weicht jedoch von diesen Zielen ab. Während in den USA – ohne dass dort Ausbauziele bestehen – mit 7 600 Stationen und 19 700 Ladepunkten aktuell die meisten Lademöglichkeiten weltweit bestehen, lag etwa Frankreich bis Ende 2012 mit 750 Stationen und 2 500 Ladepunkten weit hinter den Zielen zurück.

Die Entwicklung des tatsächlichen Aufbaus der Ladeinfrastruktur weicht jedoch von diesen Zielen ab. Während in den USA – ohne dass dort Ausbauziele bestehen – mit 7 600 Stationen und 19 700 Ladepunkten aktuell die meisten Lademöglichkeiten weltweit bestehen, lag etwa Frankreich bis Ende 2012 mit 750 Stationen und 2 500 Ladepunkten weit hinter den Zielen zurück.

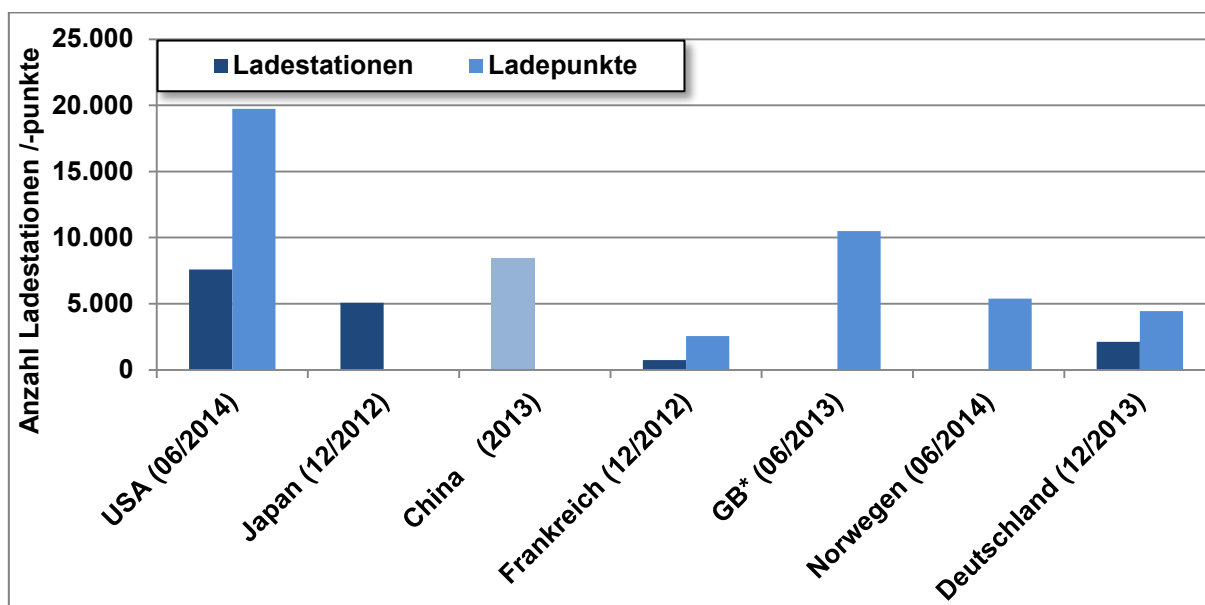


Abb. 5-21 Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur in verschiedenen Regionen¹⁷

Quelle: eigene Darstellung (nach STROM Regionalstudien)

¹⁷ Bei China handelt es sich bei den in der Abbildung dargestellten Kennzahlen um Ladesäulen.

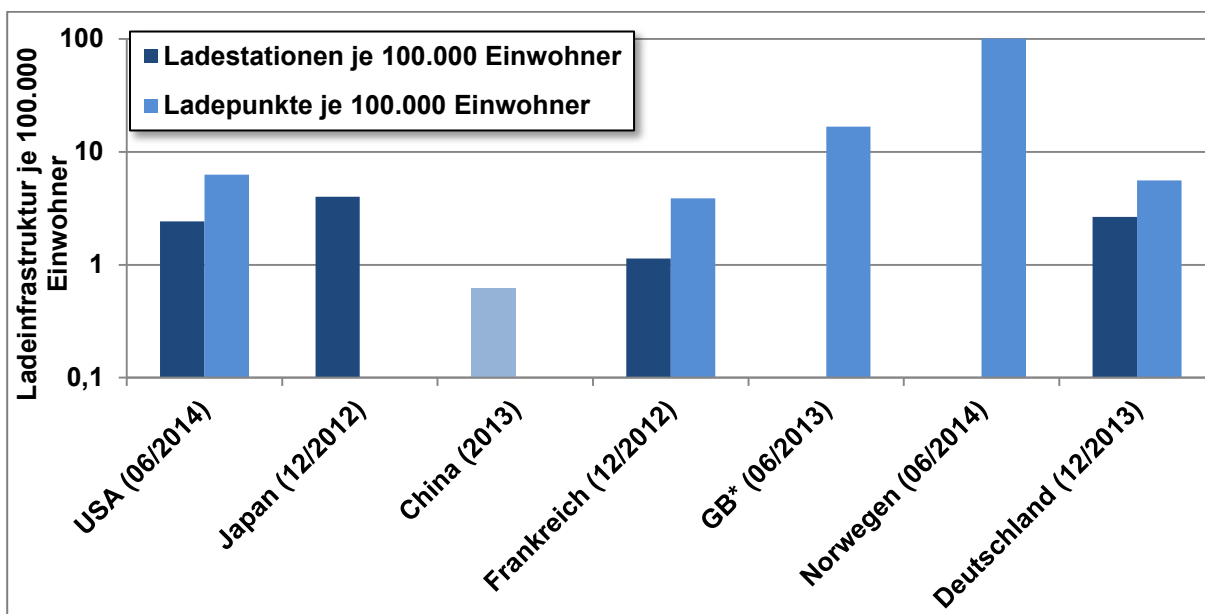


Abb. 5-22 Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur in verschiedenen Regionen je 100 000 Einwohner¹⁸

Quelle: eigene Darstellung (nach STROM Regionalstudien)

Zum Aufbau eines Ladestationsnetzes verfolgen die verschiedenen betrachteten Länder unterschiedliche Strategien. Weltweit wird die Ladeinfrastruktur aktuell noch überwiegend dezentral geplant und umgesetzt.

Dabei wird der Aufbau von Stationen zum einen in räumlich begrenzten Gebieten im Rahmen von Modellprojekten oder Demonstrationsvorhaben gefördert, insbesondere in Deutschland, Japan, China oder Großbritannien. Zum anderen werden Subventionen für den Aufbau öffentlicher, zum Teil auch privater Infrastruktur vergeben, etwa in den USA, Japan, Großbritannien oder Norwegen. Die US-Regierung vergibt beispielsweise Subventionen für den gezielten Aufbau von Ladeinfrastruktur. Das „EV project“ des DOE sieht 230 Mio. USD (ca. 205 Mio. Euro) öffentlicher und privater Gelder (50/50) vor zum Aufbau von 14 000 Ladestationen in z.Z. 21 Städten und Ballungsräumen in neun US-Bundesstaaten. Einen Schwerpunkt auf Schnellladestationen setzt insbesondere Japan; in den USA besteht bereits ein Schnellladenetz des Elektrofahrzeugherstellers Tesla, in Deutschland wird der Aufbau eines Schnellladenetzes vorbereitet. In Japan sowie in den USA sind Angebote von Ladestationen durch Hotels, Restaurants oder Einkaufszentren weit verbreitet – die oftmals kostenfrei zu nutzenden Ladestationen sollen als Alleinstellungsmerkmal Kunden anlocken. Eine Verpflichtung zur Installation von Lademöglichkeiten in Neubauten wurde in Frankreich künftig auch verpflichtend für Betriebsparkplätze.

Für die Ladeinfrastrukturen bestehen inzwischen Standardisierungen, die innerhalb der Weltregionen weitgehend durchgesetzt sind (etwa in Nordamerika, Europa und Japan). In China bestehen dagegen weiterhin Hemmnisse bei der Standardisierung der Ladeinfrastruktur. Der Hersteller Tesla verfolgt mit seinem Hochgeschwindigkeitsladenetz, das sukzessive in den

¹⁸ Bei China handelt es sich bei den in der Abbildung dargestellten Kennzahlen um Ladesäulen

USA, Europa, Japan und China aufgebaut wird, einen firmenspezifischen Ansatz – die Ladestationen sind bislang nur mit den eigenen Fahrzeugen kompatibel.

5.3.2 Forschungsförderung und Institutionen

P. Hillebrand (WI), H. Hüging (WI)

Fördermittel im Bereich Forschung, Entwicklung und Demonstration von Elektromobilität

In allen untersuchten Ländern findet eine staatliche Förderung der Forschung und Entwicklung im Bereich Elektromobilität statt. Förderung wird dabei sowohl für institutionelle Grundlagenforschung, für anwendungsorientierte Forschung als auch für Produktentwicklung bereitgestellt. Zudem werden in einigen Ländern Darlehen und Zuschüsse für die Gründung von Technologieunternehmen oder den Aufbau von Produktionskapazitäten gewährt.

Neben der Entwicklung neuer Technologien und Materialien wird auch die Erprobung, Verbesserung und das Heranführen von Nutzern an neue Produkte in Form von Demonstrationsprojekten gefördert.

Im Folgenden werden die nationalen Investitionen in die Förderung von Forschung, Entwicklung und Demonstration der Untersuchungsregionen gegenübergestellt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass eine Vergleichbarkeit der zur Verfügung stehenden Daten, durch variierende Ausgestaltung der Förderung sowie durch unterschiedliche Bezugszeiträume und Unterschieden in der Datengrundlage (z.B. ungenaue Abgrenzung der angekündigten, der zur Verfügung gestellten oder der abgerufenen Fördermittel) nur bedingt hergestellt werden kann.

In der Vergangenheit haben die untersuchten Staaten stark in die Forschung, Entwicklung und Demonstration der Elektromobilität investiert (Abb. 5-23). Über den Zeitraum 2008 bis 2012 wurden laut der Abfragen durch die IEA im Rahmen des EV-Outlook die größten Ausgaben von den USA und China getätigt (EVI 2013). In den USA gab es insbesondere 2009 erhebliche Ausgaben zur Förderung von Elektromobilität. In diesem Jahr wurde der „American Recovery and Reinvestment Act“ verabschiedet, unter dem auch das US Department of Energy erhebliche Mittel zur Förderung der Elektromobilität erhielt. Die meisten der dargestellten Länder investierten bereits 2008 und 2009 stark in die Entwicklung der Elektromobilität, wohingegen die Ausgaben Deutschlands zu diesem Zeitpunkt relativ gering waren. 2010 waren die Investitionen in Deutschland, Japan und den USA auf ähnlichem Niveau. Sowohl Japan als auch Deutschland zeigen eine kontinuierliche Steigerung ihrer Ausgaben im Zeitraum 2008 bis 2012.

Indiens Ausgaben zur Förderung der Elektromobilität in den Jahren 2011 und 2012 liegen in einer ähnlichen Größenordnung, wie im Nationalen Entwicklungsplan zur Elektromobilität (NEMMP) als Gesamtinvestitionsbedarf für die nächsten fünf Jahre veranschlagt wurde. Im NEMMP wurde ein Gesamtinvestitionsbedarf in die Forschung und Entwicklung zur Elektromobilität von 16-18 Mrd. INR (192-216 Mio. EUR) ermittelt. Hiervon soll die Regierung laut NEMMP 9,3 Mrd. INR (111,6 Mio. EUR) für FuE-Zwecke beisteuern (Department of Heavy Industries 2012).

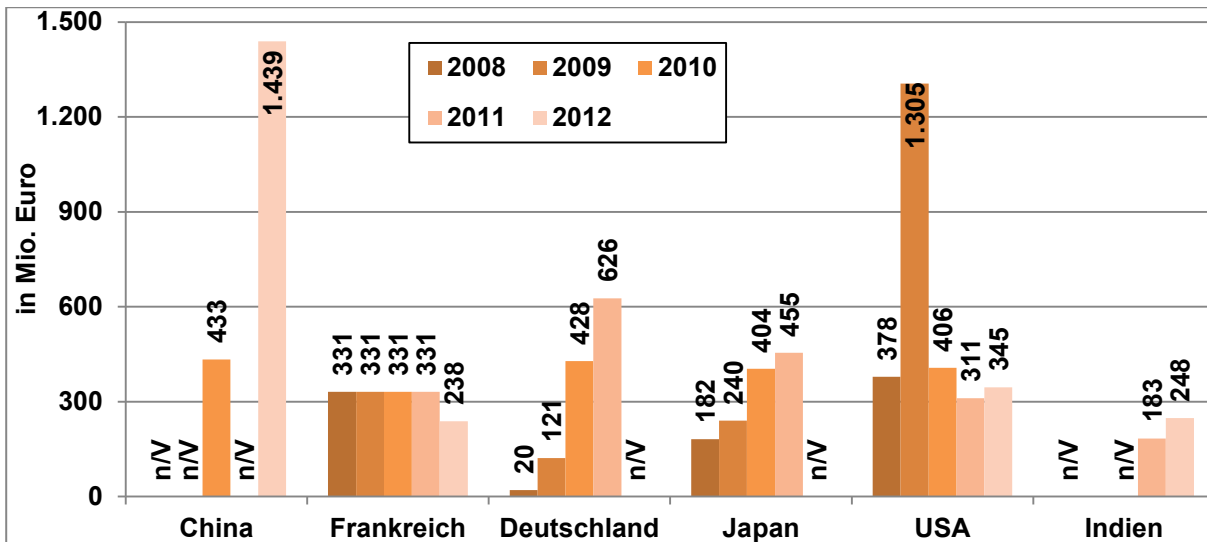


Abb. 5-23 Öffentliche Ausgaben zur Förderung von Forschung, Entwicklung und Demonstration von Elektromobilität (inkl. Brennstoffzellenfahrzeuge) (2008-2012)

Quelle: eigene Darstellung nach (EVI, 2013) und ergänzender Datenbereitstellung durch die IEA (Umrechnungskurs: 1 USD = 1,28 Euro)

Betrachtet man die im Zeitraum 2008 bis 2012 getätigten Investitionen differenziert nach FuE-Förderung und der Förderung von Demonstrationsprojekten (vgl. Abb. 5-23), so zeigt sich, dass in diesem Zeitraum in den Untersuchungsregionen – mit Ausnahme von China – die Investitionen in FuE gegenüber den Demonstrationsprojekten überwiegen, was darauf schließen lässt, dass noch großes Potential in der Weiterentwicklung und Verbesserung der Technologien gesehen wurde. Dennoch wurde in den meisten Untersuchungsregionen der Ermittlung der Alltagstauglichkeit und der Erfahrbarmachung der Elektromobilität durch signifikante Förderung von Demonstrationsprojekten Rechnung getragen.

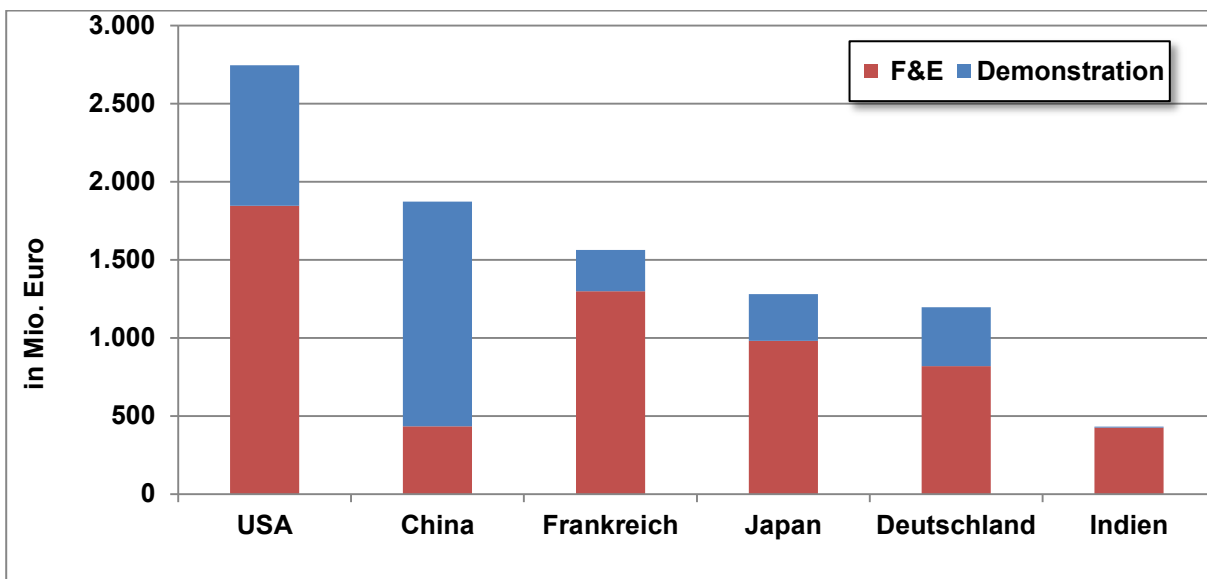


Abb. 5-24 Öffentliche Ausgaben zur Förderung von Forschung, Entwicklung und Demonstration kumulativ über 2008 - 2012

Quelle: eigene Darstellung nach (EVI, 2013). (Umrechnungskurs: 1 US-\$ = 1,28 Euro) – nicht für alle Jahre Daten verfügbar

Bezüglich der aktuell laufenden Förderprogramme investiert China derzeit am stärksten in die Forschung und Entwicklung zur Elektromobilität (vgl. Abb. 5-24). Wie in Abschnitt 5.2.5 darstellt, hat China in den letzten Jahren seine Investitionen in Forschung und Entwicklung stark erhöht (vgl. Abb. 5-16). Zudem hat China bereits angekündigt, die Investitionen in die Elektromobilität weiter stark zu steigern. Für den 13. Fünf-Jahres-Plan (2016-2020) ist ein Budget von 1,2 Milliarden Euro vorgesehen, was eine Verdreifachung gegenüber dem 12. Fünf-Jahres-Plan darstellt (CATARC 2013). Die USA und Deutschland sind derzeit mit ca. 2 Milliarden Euro Förderbudget auf ähnlichem Niveau, trotz der höheren Gesamtwirtschaftsleistung der USA. Unter den traditionellen Pkw-Herstellernationen hat Deutschland ein vergleichsweise hohes Budget für FuE zur Elektromobilität. Zusätzlich investiert Deutschland im Rahmen der NPE auch stark in verwandte Themenfelder wie Leichtbau oder Recycling.

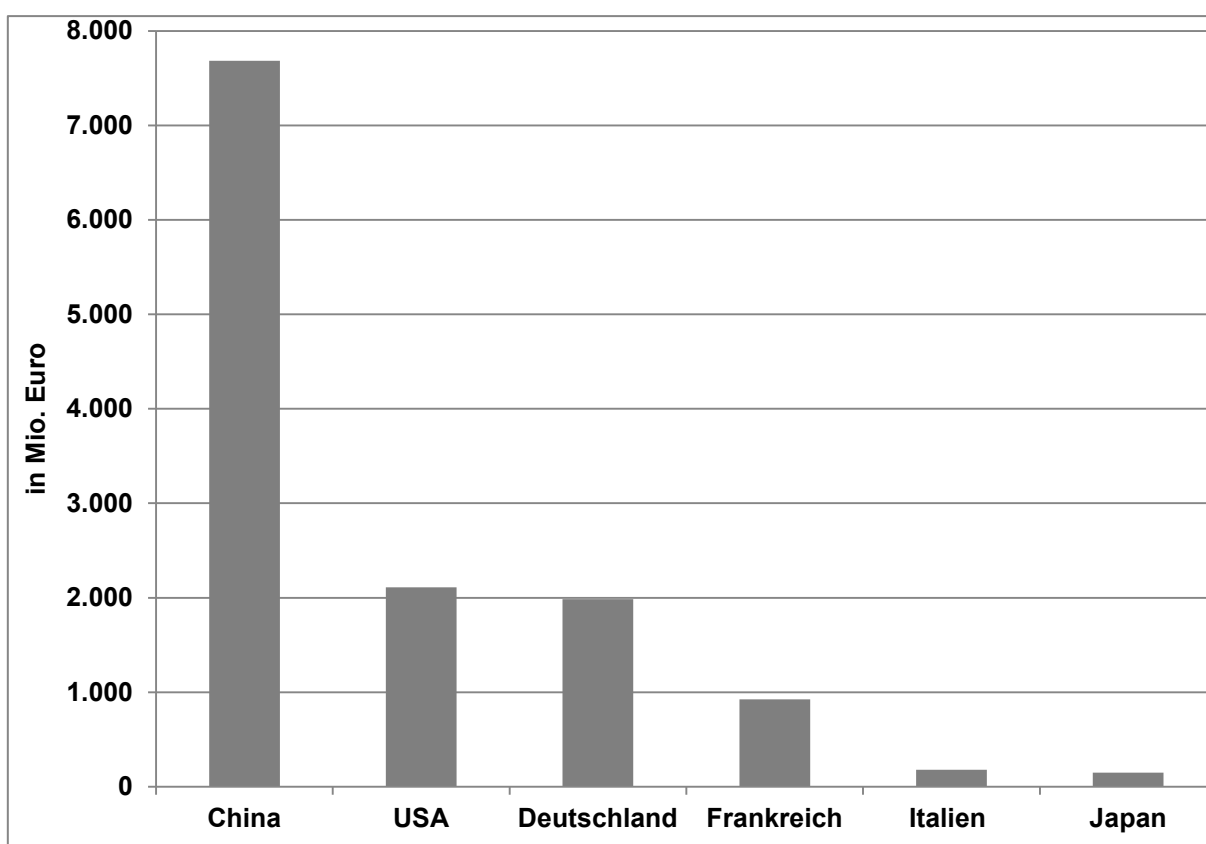


Abb. 5-25 Laufende FuE Förderung zur Elektromobilität in 2014 (bis 2016)

Quelle: eigene Darstellung nach (Roland Berger & fka 2014)

Unterschiede bestehen zwischen den betrachteten Ländern auch in der Ausgestaltung und Abwicklung der Förderung. Deutschland unterstützt Forschung und Entwicklung vor allem durch direkte Projektförderung (vgl. Abschnitt 5.2.1). In den USA spielen neben der Projektförderung vergünstigte Industriekredite eine große Rolle, die im Rahmen des „American Recovery and Reinvestment Act“ bereitgestellt wurden (vgl. Abschnitt 5.2.3).

In China ordnet die Zentralregierung die Errichtung von FuE- und Produktionseinrichtungen direkt an. Zusätzlich gewährt sie für jedes in China produzierte Elektrofahrzeug Produktionszuschüsse.

Inhalte der Forschungsförderung

Bei der Betrachtung der inhaltlichen Ausrichtung der Forschungsförderung ist zu berücksichtigen, dass die Staaten ihre Forschungsausgaben in unterschiedliche Themenblöcke gliedern und zudem thematisch übergreifende Projekte einen direkten Vergleich erschweren.

Nachfolgend werden die Schwerpunkte der nationalen Förderung genauer betrachtet.

In den USA ist das Department of Energy (DOE) der wichtigste öffentliche Fördergeber im Bereich Elektromobilität. Die Fördermittel werden in drei Schwerpunkten vergeben: Energiespeicher, Leistungselektronik sowie Fahrzeugsimulation und Test. Wie in Abb. 5-25 dargestellt, fließen über die Hälfte der Fördermittel in die Forschung und Entwicklung zu Energiespeichern für Elektrofahrzeuge. In der „EV Everywhere Grand Challenge“ wurde das Ziel gesetzt, bis 2022 die Kosten um ca. 75 % auf 125 USD/kWh (110 Euro/kWh) zu senken und die Energiedichte auf 400 Wh/l zu erhöhen. Ein zweiter Förderschwerpunkt ist die Leistungselektronik. Auch für 2015 ist mit 135 Mio. USD (ca. 118 Mio. Euro) ein hohes Budget für die Forschung und Entwicklung im Bereich Energiespeicher und Elektroantrieb vorgesehen (vgl. Regionalstudie USA). Der dritte Förderschwerpunkt Fahrzeugsimulation und Test hat seit 2008 an Bedeutung gewonnen. Auch 2015 soll dieser Bereich mit ca. 40 Mio. USD (ca. 35 Mio. Euro) gefördert werden. Als weiterer Forschungsschwerpunkt, der indirekt zur Weiterentwicklung der Elektrofahrzeuge beiträgt, werden im Bereich Leichtbau durch das „Vehicle Technology Program“ Fördermittel von ca. 40 Mio. USD (35 Mio. Euro) pro Jahr für FuE bereitgestellt.

Jüngst wurden weitere 55 Mio. USD (48 Mio. Euro) des DOE für 31 Forschungsprojekte u.a. in den Bereichen „Beyond Lithium-Ion Technologies, Integrated Computational Materials Engineering (ICME) Development of Carbon Fiber Composites for Lightweight Vehicles sowie Development of Lowcost, High Strength Automotive Aluminum Sheet“ in Aussicht gestellt (Green Car Congress 2014).

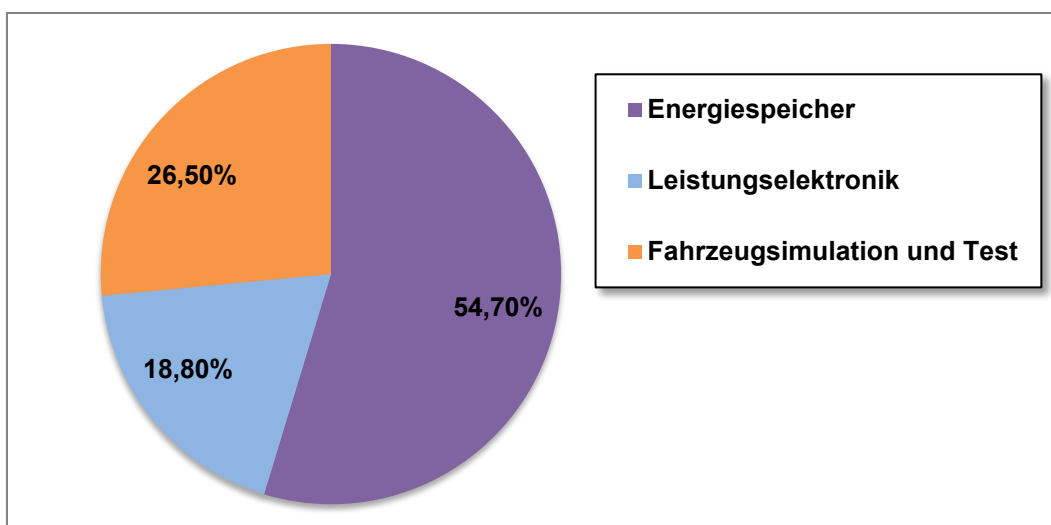


Abb. 5-26 Verteilung der Forschungsfördermittel den USA (laut DOE)

Quelle: eigene Darstellung (nach STROM Regionalstudien USA)

In der FuE-Förderung Japans dominiert mit über 50 % der Fördermittel deutlich die Weiterentwicklung der Energiespeicher (Abb. 5-27). Zum einen wird die Weiterentwicklung bestehender Batterietechnologien (insbesondere Lithium-Ionen-Batterien) gefördert, zum anderen die Entwicklung neuer Batteriematerialien. Diese Förderschwerpunkte wurden auch im Rahmen der „Next Generation Vehicle Strategy“ in einer Batteriestrategie definiert. Ähnlich wie die USA hat sich Japan in dieser Strategie hohe Ziele zur Weiterentwicklung der Batterietechnologie gesetzt. Die Weiterentwicklung der bestehenden Batterietechnologie soll bis 2015 zu einer signifikanten Kostensenkung (auf 1/7 der Kosten) und Leistungserhöhung führen. Sogenannte „revolutionary batteries“, basierend auf neuen Materialien, sollen bis 2030 entwickelt werden und eine siebenfach höhere Leistungsfähigkeit aufweisen (METI 2010). Die Kyoto Universität leitet zur Zeit das zentrale Förderprojekt in diesem Bereich und testet verschiedene Materialien wie Zink-Luft Batteriekonzepte. Neben der Batterieforschung wird im Rahmen der Grundlagenforschung und Produktentwicklung insbesondere zu Leistungselektronik, Thermomanagement und Leichtbau gearbeitet. Im Bereich der Leistungselektronik werden beispielsweise Siliziumkarbid und Galliumnitrid als Halbleitermaterialien getestet. Im Rahmen der Teilstrategie zu Ressourcen im Rahmen der „Next Generation Vehicle Strategy“ wurden auch die Bereiche Batterierecycling und Reduktion bzw. Substitution von Seltenen Erden als Forschungsschwerpunkt definiert. Derzeit findet in diesen Bereichen in Japan jedoch vergleichsweise wenig Forschung statt.

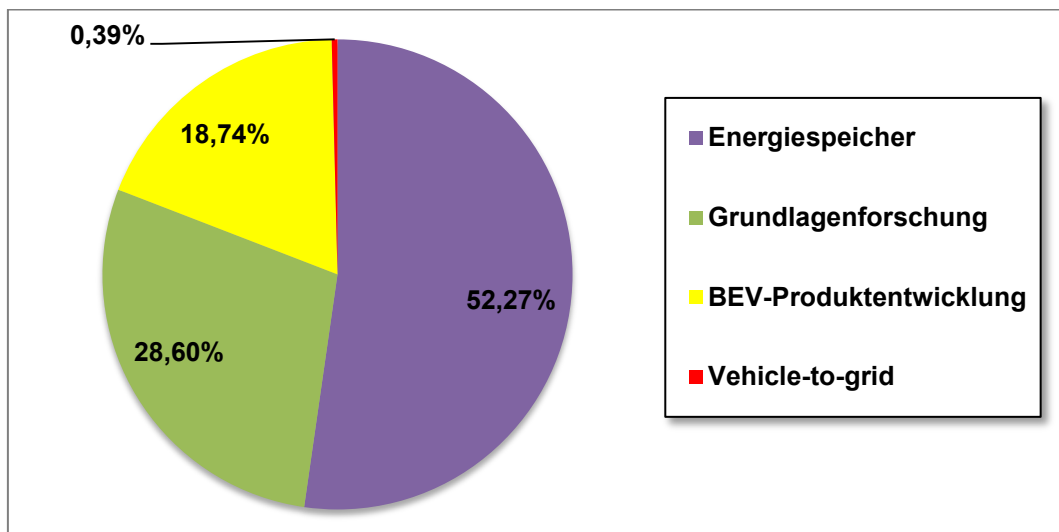


Abb. 5-27 Verteilung der Forschungsfördermittel in Japan (laut METI,MLIT,NEDO. MEXT-Daten nicht beinhaltet)

Quelle: eigene Darstellung (nach STROM Regionalstudie Japan)

Indien befindet sich derzeit erst im Status des Aufbaus einer entsprechenden Förderlandschaft für Elektromobilität. Im NEMMP 2020 wird von der Regierung eine Strategie für die Forschung und Entwicklung im Bereich Elektromobilität vorgeschlagen. In den folgenden Forschungsfeldern (gelistet in abnehmender Priorität) soll verstärkt geforscht werden: 1) Batteriezellen 2) Batteriemanagementsysteme, 3) Leistungselektronik, 4) Getriebesystem für Hybride. Neben diesen prioritären Forschungsfeldern soll in den Bereichen Leichtbau, Leichtlaufreifen und Downsizing geforscht und entwickelt werden. Der Gesamtinvestitionsbedarf wird auf 16 bis 18 Mrd. INR (192 – 216 Mio. Euro) innerhalb der nächsten

fünf Jahre geschätzt. Hiervon soll die Regierung laut NEMMP 9,3 Mrd. INR (111,6 Mio. Euro) für FuE-Zwecke beisteuern.

Forschungsfelder	Zweiräder	Pkw	Busse
Unterstützung von Batteriezellen-Allianzen, Technologieerwerb	2 Mrd. INR (24 Mio. EUR)	2 Mrd. INR (24 Mio. EUR)	2 Mrd. INR (24 Mio. EUR)
Entwicklung von Elektromotoren	0,5 Mrd. INR (6 Mio. EUR)	0,5 Mrd. INR (6 Mio. EUR)	0,5 Mrd. INR (6 Mio. EUR)
Komponentenvalidierung; Testeinrichtungen	0,5 Mrd. INR (6 Mio. EUR)	0,5 Mrd. INR (6 Mio. EUR)	0,8 Mrd. INR (9,6 Mio. EUR)
Gesamtinvestitionsbedarf: 16-18 Mrd. INR (192-216 Mio. EUR)			

Tab. 5-22 Verteilung der nötigen Investitionssummen auf die verschiedenen Forschungsfelder

Quelle: eigene Darstellung nach NEMMP 2020

In Deutschland wurden im Regierungsprogramm Elektromobilität sechs Themenfelder als Forschungsschwerpunkte bzw. Leuchttürme definiert (vgl. Abschnitt 5.2.1), die insgesamt mit einer Milliarde Euro gefördert werden sollen. Die Verteilung der Projektbudgets auf die einzelnen Forschungsbereiche ist in Abbildung 5-25 auf Basis des Dritten Fortschrittsberichts der NPE dargestellt. Ähnlich wie in den USA und Japan liegt auch in Deutschland ein Schwerpunkt auf der Energiespeicherforschung. Antriebstechnologie (inklusive Leistungselektronik) ist ein weiterer deutlicher Schwerpunkt der FuE-Förderung. Wie auch in Japan wurde Recycling als Forschungsschwerpunkt definiert, hat jedoch zur Zeit ein vergleichsweise geringes Budget.

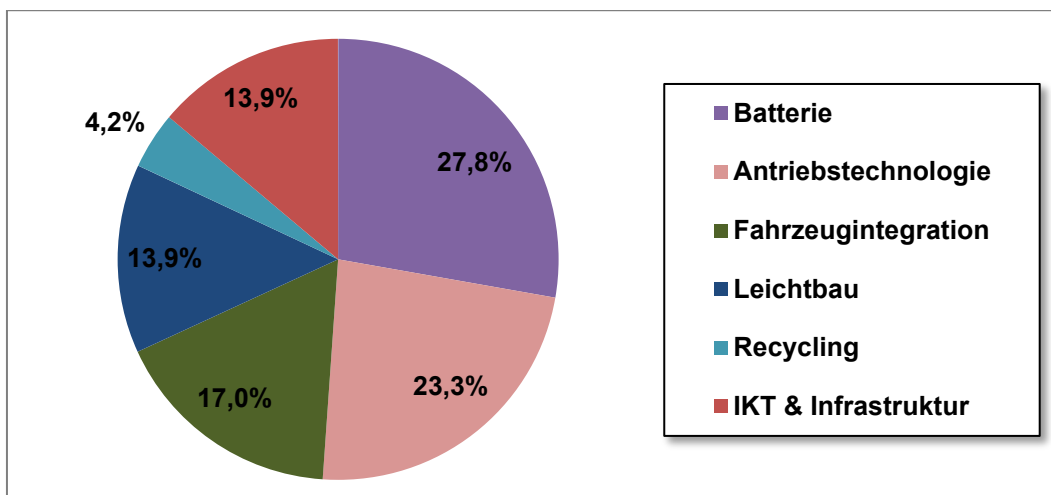


Abb. 5-28 Verteilung der Forschungsbudgets in Deutschland in den Leuchttürmen der NPE

Quelle: eigene Darstellung (nach STROM Regionalstudie Deutschland) nach NPE 2013

Auf EU-Ebene findet die Förderung von FuE im Bereich Elektromobilität insbesondere im Rahmen der „Green Cars Initiative“ statt (vgl. Abschnitt 5.2.2). Auch auf europäischer Ebene zählen Energiespeicher zu den wichtigsten Forschungsbereichen. Die meiste Förderung fließt jedoch in den Bereich Fahrzeugintegration, welcher hier Klimatisierung, Leichtbau, Recycling, Leistungselektronik und Optimierung von existierenden Komponenten umfasst.

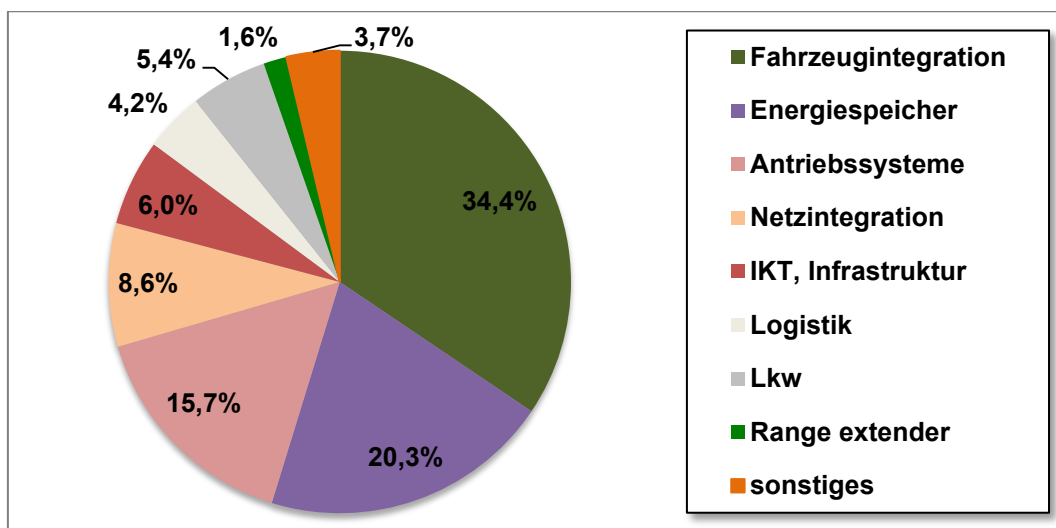


Abb. 5-29 Verteilung der Forschungsfördermittel der Europäischen Kommission im Rahmen der European Green Cars Initiative

Quelle: eigene Darstellung (nach STROM Regionalstudie Europa). European Green Cars Initiative (EGCI) (65 von 109 Projekten zu Elektrifizierung)

Demonstrationsprojekte im internationalen Vergleich

Demonstrationsprojekte werden in verschiedenen Ländern genutzt, um die Anwendung von Elektrofahrzeugen zu testen und Nutzer mit der Elektromobilität vertraut zu machen. Insbesondere China mit dem „10/25 Cities – 1 000/25 000 Vehicles“ Programm (vgl. Abschnitt 5.2.5), Japan mit dem „EV/PHEV Towns Concept“ (vgl. Abschnitt 5.2.4) und Deutschland mit den „Modellregionen“ und „Schaufenstern Elektromobilität“ (vgl. Abschnitt 5.2.1) setzen das Instrument gezielt ein, um Elektromobilität zu fördern. Das britische Programm „Ultra Low Carbon Vehicle Demonstrators“ hat einen wesentlich geringeren Umfang. Den Pilotprojekten ist gemein, dass sie meist in Zusammenarbeit zwischen öffentlicher Hand, Industrie, Serviceunternehmen und Forschungseinrichtungen durchgeführt werden.

Das deutsche Demonstrationsprogramm „Schaufenster Elektromobilität“ hat die Erprobung und begleitende Untersuchung von Elektrofahrzeugen im Realbetrieb zum Ziel. Die Alltagstauglichkeit der Fahrzeuge, Infrastrukturtechnologien und Rahmenbedingungen soll in den Schaufenstern erprobt werden und der Nutzen von Elektromobilität soll sichtbar und erfahrbar gemacht werden (BMW et al. 2011). Das Schaufensterprogramm beinhaltet neben der Demonstration auch Aspekte der Forschung und Entwicklung.

Das japanische „EV/PHEV Towns Concept“ ist vergleichbar mit den Modellregionen und Schaufenstern Elektromobilität in Deutschland. 18 Präfekturen nehmen an dem Programm zur Schaffung von erster Nachfrage sowie zur Entwicklung der Infrastruktur teil. Auch Bildung und die Sensibilisierung der Öffentlichkeit ebenso wie die Evaluierung der Entwicklungen im Bereich Elektromobilität zählen zu den Motiven des Aufbaus der EV/PHEV Towns. Ein weiteres Entwicklungsziel ist der forcierte Aufbau von Ladeinfrastruktur. Die Präfekturen setzen dabei die verschiedenen Initiativen um, wie z.B. den Einsatz von Elektrofahrzeugen als Dienstwagen, Mietwagen, Taxis oder Bussen. Dementsprechend werden spezifische Subventionen zur Verfügung gestellt. Lokalregierungen tragen mithilfe

von Ausstellungen, Testfahr-Events, der Verbreitung von Informationen über Websites usw. aktiv zur Sensibilisierung der Öffentlichkeit bei. Das „EV/PHEV Town Concept“ hat somit einen klaren Fokus auf die Erzeugung von Nachfrage nach Elektrofahrzeugen sowie auf Erhöhung der Bekanntheit und Schaffung von Bewusstsein. Ein explizites Forschungsinteresse wie beispielsweise in den deutschen Schaufensterregionen besteht kaum.

Die Volksrepublik China konzentriert sich bei der Förderung von Elektromobilität auf Demonstrationsprogramme mit Fahrzeugflotten, was sich auch in dem Demonstrationsprogramm „10/25 Cities – 1 000/ 25 000 Vehicles“ niederschlägt. Die beteiligten Städte sollen jeweils 1 000 „New Energy Vehicles“ als Pilotvorhaben in Busflotten, Taxiflotten, Postflotten oder Flotten der Stadtverwaltung einsetzen. Wenn auch andere Technologien hier adressiert sind, liegt ein deutlicher Schwerpunkt der Aktivitäten auf Elektrofahrzeugen. Nur sechs der 25 Städte des chinesischen Demonstrationsprogramms adressieren private Nutzer. Im Rahmen der Demonstrationsprojekte werden die eingesetzten Fahrzeuge subventioniert. Die genaue Ausgestaltung der Demonstrationsvorhaben obliegt den einzelnen Städten. Beispielsweise kooperieren einige Städte stark mit regional ansässigen Fahrzeugherstellern und fördern Industrieallianzen und Erfahrungsaustausch.

Ähnlich wie in einigen der deutschen Schaufensterprojekte hat Großbritannien in seinem „Low Carbon Vehicle Demonstrator Programme“ den Einsatz von Elektrofahrzeugen im Alltagsbetrieb erprobt und begleitet um Erkenntnisse zur Alltagstauglichkeit und dem Nutzerverhalten zu erlangen.

Im Rahmen des „EV Project“ in den USA wurden in neuen Regionen in den USA gezielt Ladeinfrastruktur aufgebaut und BEV sowie PHEV eingesetzt, um den Prozess des Infrastrukturaufbaus, das Nutzerverhalten und Einflüsse auf das Stromnetz zu untersuchen sowie eine Basis für regulatorische Rahmenbedingungen und Standards zu schaffen (vgl. Regionalstudie USA).

In Abb. 5-30 sind die Förderbudgets zentraler Demonstrationsprojekte in der öffentlichen Förderung in verschiedenen Ländern gegenübergestellt.

China und Japan weisen hier die höchsten Fördermittel aus. Es ist zu beachten, dass in den Budgets der öffentlich geförderten Demonstrationsprogramme auch die in diesen Programmen verankerten Kaufsubventionen für Fahrzeuge enthalten sind. In China stehen die nationalen Kaufsubventionen für Elektrofahrzeuge nur in den Städten des „10/25 Cities – 1000 Vehicles“ Programms zur Verfügung. Dadurch erreicht China eine Spitzenposition in der öffentlichen finanziellen Förderung von Demonstrationsaktivitäten.

Auch Japan investiert deutlich in sein zentrales Demonstrationsprojekt „EV/PHEV Town“. Deutschland und insbesondere Großbritannien investieren in diesem Benchmark im Vergleich zu China und Japan geringere Beträge. In den verschiedenen Staaten existieren darüber hinaus auch z.T. lokal geförderte Demonstrationsprojekte.

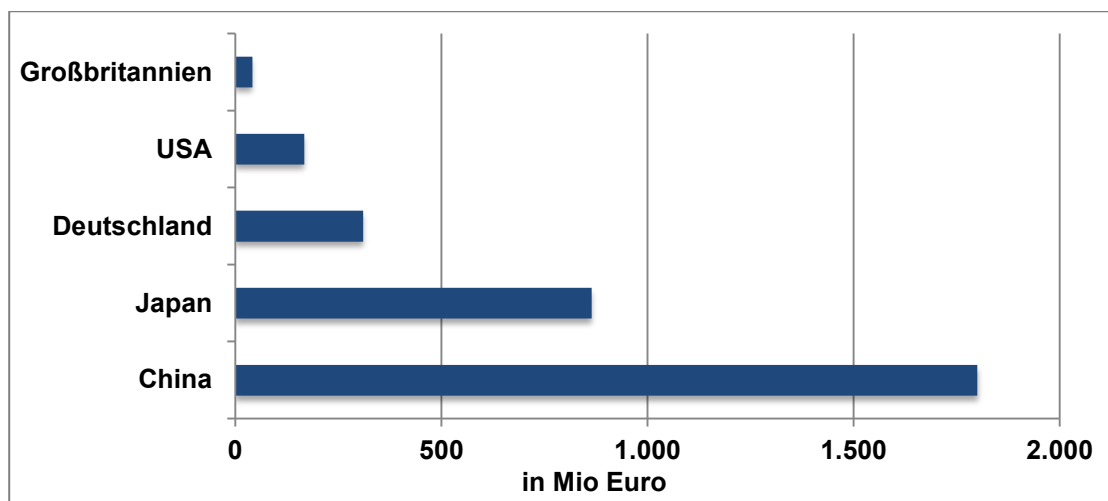


Abb. 5-30 Gesamtförderbudget zentraler Demonstrationsprojekte in der öffentlichen Förderung im Vergleich

Quelle: eigene Darstellung (nach STROM Regionalstudien)

Land	Programm	Förderbudget
China	10/25 Cities – 1 000 Vehicles (Start 2009)	1,8 Mrd. Euro (geplant 2009-2011)
Japan	EV/ PHEV Towns Concept (2009-2014)	864 Mio. Euro (nur Infrastrukturausgaben)
Deutschland	Modellregionen Elektromobilität Phase I (2009-2011)	130 Mio. Euro
	Schaufenster Elektromobilität (2012-2016)	180 Mio. Euro
USA	DOE EV Project	167 Mio. Euro
GB	Ultra Low Carbon Vehicle Demonstrators (Start 2009)	31 Mio. Euro

Tab. 5-23 Gesamtförderbudget zentraler Demonstrationsprojekte in der öffentlichen Förderung im Vergleich

Quelle: eigene Darstellung (nach STROM Regionalstudien)

Aufbau von Forschungskapazitäten und Strukturen in Indien und China

Wie in den Regionalstudien (siehe Anlage zu diesem Bericht) dargestellt, sehen verschiedene Experten noch einen erheblichen Rückstand Indiens und Chinas in der Entwicklung von Elektrofahrzeugen und in der Komponentenforschung. China beabsichtigt mittels Allianzen, Lizenzvergaben, Akquisitionen und Joint Ventures die Entwicklung von FuE-Kapazitäten voranzutreiben. Von strategischen Joint Ventures und Technologiekooperationen mit ausländischen OEM verspricht sich China Innovationssprünge. Indien beabsichtigt, gezielt FuE Kapazitäten aufzubauen und diese in „Exzellenzzentren“ zu den Themenfeldern „Batterien und Ladeinfrastruktur“ „Motoren und Leistungselektronik“ sowie „Systemintegration“ zu bündeln. Dabei soll eine anwendungsorientierte Strategie verfolgt werden. Das bedeutet, dass bestehende Technologien an die speziellen Erfordernisse beispielsweise hinsichtlich klimatischer Bedingungen auf dem indischen Subkontinent angepasst werden sollen. Im Bereich der Batterieforschung bedeutet dies, dass bewährte Materialien wie Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit unter indischen Klimabedingungen

verbessert werden sollen. In der Grundlagenforschung sehen die Experten Indien auch mittelfristig nicht konkurrenzfähig.

5.3.3 Wirtschaft und Industrie

J. Tenbergen (WI), H. Hüging (WI)

Wie in Kapitel 5.3.1 dargestellt, sind die Gründe zur Förderung und Implementierung der Elektromobilität vielfältig und reichen in den untersuchten Ländern von überwiegend wirtschaftlichen zu ökologischen Interessen der einzelnen Länder. Deutschland, die USA und Japan haben mit ihrer ausgeprägten heimischen Automobilindustrie ein besonderes Interesse, auch auf dem Gebiet der Elektromobilität konkurrenzfähig zu bleiben. China als derzeit größter Pkw-Produzent (Abb. 5-31) sieht durch die Elektromobilität ebenfalls eine Möglichkeit, die heimische Automobilindustrie zu stärken.

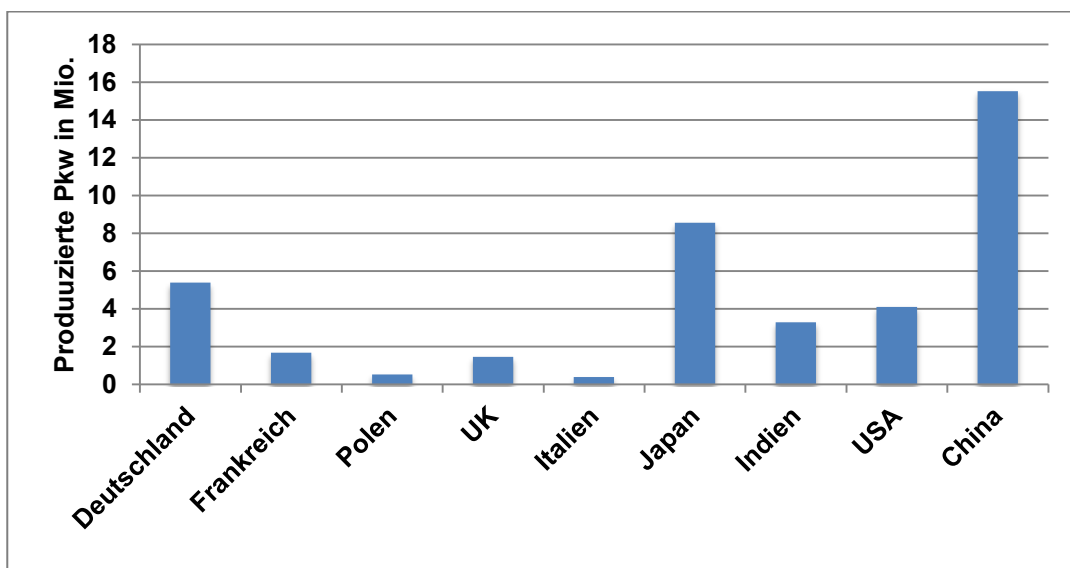


Abb. 5-31 Anzahl produzierter Pkw in 2012 in den Untersuchungsregionen

Quelle: (OICA 2012)

Die Automobilindustrie in China konnte in den letzten Jahren ein sehr starkes Wachstum verzeichnen, wobei sich bei der Betrachtung des technologischen Stands elektrischer Fahrzeuge ein deutliches Defizit gegenüber westlichen, japanischen und anderen globalen Wettbewerbern abzeichnet. Auch in Indien ist die Automobilindustrie ein wichtiger Wirtschaftszweig, obwohl erwartet wird, dass die Dominanz von Zweirädern auch in Zukunft weiter bestehen bleibt. In Europa hat die Automobilindustrie dagegen eine sehr unterschiedliche Bedeutung in den einzelnen Ländern. Während Deutschland, Frankreich und Italien eine lange Tradition in der Automobilproduktion haben, findet in Norwegen keine eigene Automobilproduktion statt. In Deutschland ist die Automobilindustrie gemessen an ihrem Umsatz von 360 Mrd. Euro der mit Abstand wichtigste Industriezweig. Auch in den USA gehört die Automobilindustrie zu den dominierenden Wirtschaftssektoren.

Fahrzeugkonzepte

Wie bereits in Kapitel 4.1 dargestellt, lassen sich auf dem derzeitigen Neuwagenmarkt eine Vielzahl unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte mit elektrifizierten Antriebssträngen finden. Dabei zeigt sich die deutliche Zunahme der Aktivitäten zu allen elektrifizierten Fahrzeugkonzepten seit 2006 (vgl.4.1). Nachdem viele Fahrzeughersteller erste Serienmodelle auf den Markt gebracht haben, flachen die Aktivitäten seit 2011 leicht ab. Die folgende Abb. 5-32 zeigt die deutliche Zunahme der zwischen 2006 und 2013 vorgestellten PEV-Serienfahrzeuge nach Herkunftsland des Herstellers. Insgesamt wurden in diesem Zeitraum 87 neue Modelle (Serienfahrzeuge) vorgestellt. Ab dem Jahr 2008 ist in allen Ländern ein deutlicher Zuwachs zu verzeichnen. Experten sehen in der Vielfalt von Modellen und Aktivitäten verschiedener Hersteller wichtige Faktoren für die Marktentwicklung – zum einen, um potentielle Nutzer ein breites Angebot verschiedener Fahrzeuge zu bieten und zum anderen, um deutlich zu machen, dass es sich hierbei nicht um eine Strategie einzelner Hersteller handelt. US-amerikanische, deutsche und chinesische OEMs tragen hierbei wesentlich zur Modellvielfalt bei.

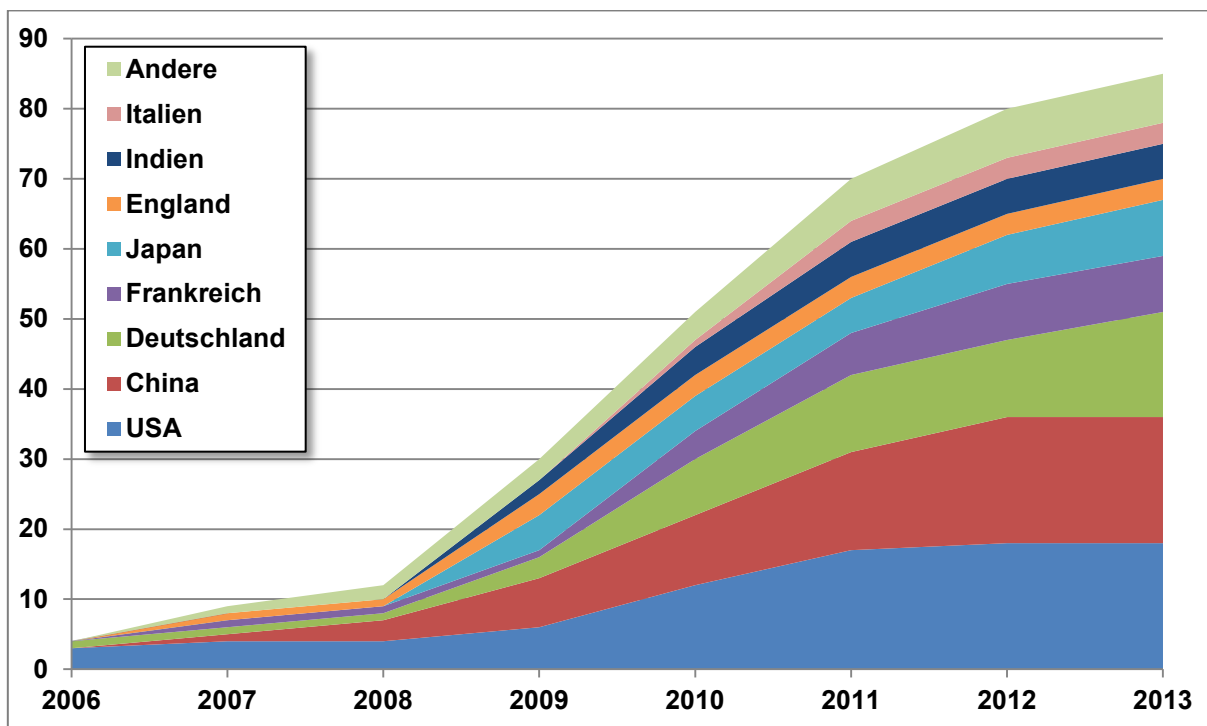


Abb. 5-32 PEV-Serienmodelle nach Herstellerländern die zwischen 2006 und 2013 vorgestellt wurden (kumulativ)

Quelle: eigene Darstellung nach STROM-Fahrzeugdatenbank des DLR

Abb. 5-33 stellt die Anzahl der Konzeptfahrzeuge, Prototypen und der angekündigten sowie eingeführten Serienmodelle nach Herstellern und Elektrifizierungsgrad dar. Deutlich werden hier die unterschiedlichen Strategien der Automobilhersteller zur Elektrifizierung des Antriebs. Beispielsweise setzt der japanische Automobilhersteller Toyota bei der Elektrifizierung des Fahrzeugantriebs hauptsächlich auf das Konzept des Voll-Hybrids, was bedeutet, dass das Fahrzeug über kurze Strecken rein elektrisch betrieben werden kann. Auffällig ist, dass der französische Hersteller Renault und der japanische Hersteller Lexus ihre Elektrifizie-

rungsstrategien bislang jeweils ausschließlich auf eine Form des Antriebs fokussieren (Renault: BEV, Lexus: Voll-Hybrid). Dagegen setzten die übrigen Automobilhersteller auf ein breiteres Portfolio des elektrischen Antriebs. Die Antriebsform des Range-Extenders wird derzeit (Stand April 2014) nur von knapp einem Drittel der aufgeführten Automobilhersteller in ihren Fahrzeugen entwickelt bzw. eingesetzt.

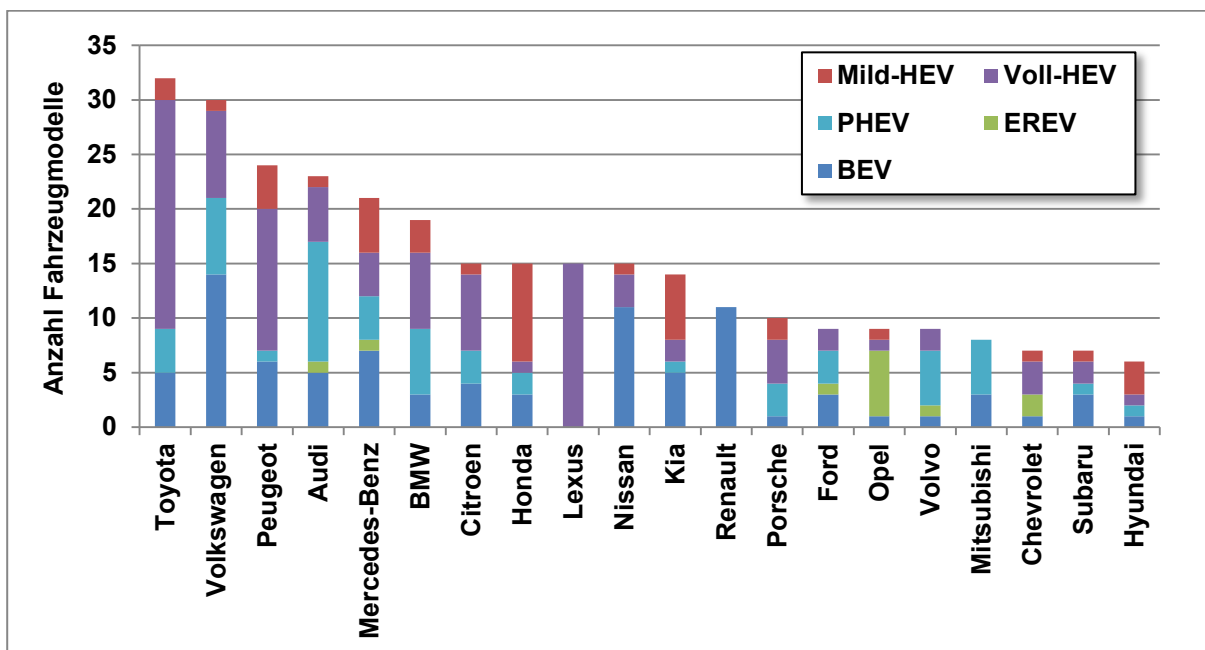


Abb. 5-33 Anzahl der Konzeptfahrzeuge, Prototypen und der angekündigten und eingeführten elektrischen Fahrzeuge nach Herstellern und Elektrifizierungsgrad, Stand April 2014

Quelle: STROM-Fahrzeugdatenbank des DLR (siehe Abschnitt 4.1.3)

Neben den unterschiedlichen Antriebskonzepten setzten die Automobilkonzerne bei der Entwicklung der Elektrofahrzeuge zum Teil auf unterschiedliche Konzepte bei der Neuentwicklung (Purpose Design) bzw. Anpassung ihrer Fahrzeugmodelle (Conversion Design) (Abb. 5-34). Dabei stellt der Conversion Design-Ansatz insbesondere für die etablierten Hersteller eine kostengünstige Möglichkeit dar, die bestehenden Strukturen verbrennungsmotorisch angetriebener Serienfahrzeuge hinsichtlich des elektrischen Antriebsstranges zu modifizieren. Beispielhaft genannt werden können hier die Hersteller Volkswagen (e-Golf) oder auch Daimler (Smart fortwo electric drive). Dagegen folgt BMW mit dem BMW i3 dem Ansatz des Purpose Designs.

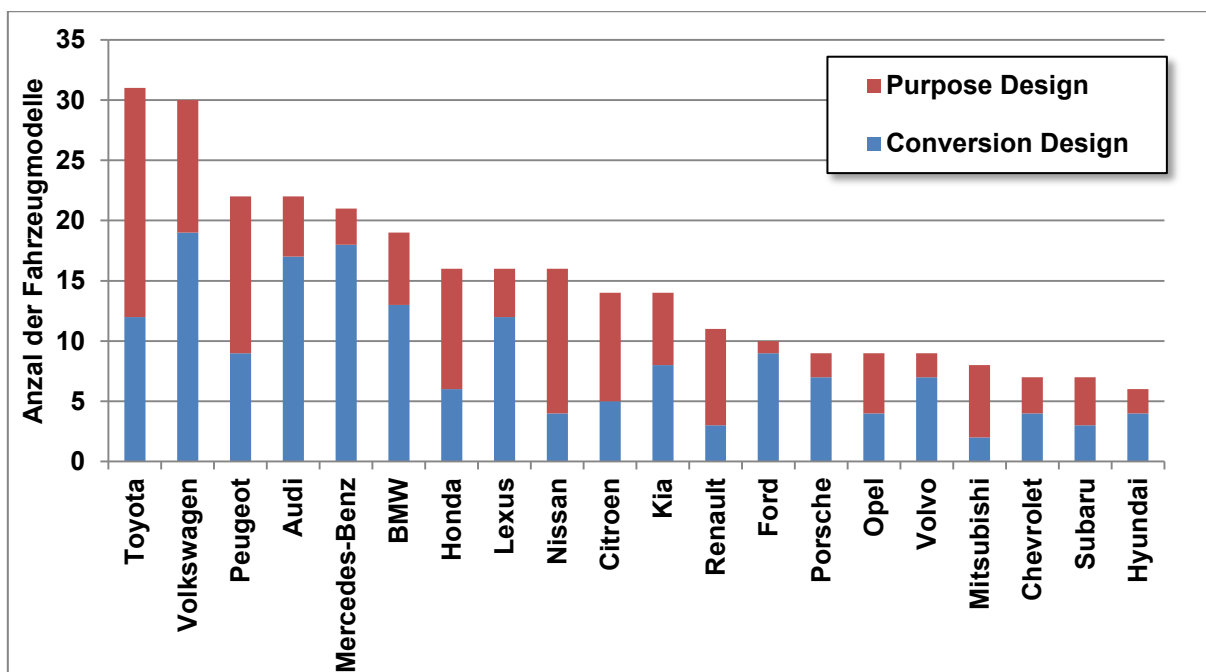


Abb. 5-34 Anzahl der Konzeptfahrzeuge, Prototypen und der angekündigten sowie eingeführten elektrischen Fahrzeuge nach Herstellern und Designansatz

Quelle: STROM-Fahrzeugdatenbank des DLR (siehe Abschnitt 4.1.3)

Produktion elektrifizierter Pkw

Die Produktion elektrischer Pkw in den untersuchten Weltregionen stellt sich sehr unterschiedlich dar. Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft die Produktionszahlen der verschiedenen elektrisch angetriebenen Fahrzeuge in den ausgewählten Ländern Japan und Deutschland. In Japan ist die Produktion von BEV zwischen 2009 und 2011 von rund 1 700 Fahrzeugen auf 42 000 Fahrzeugen stark gestiegen (Abb. 5-35). Dies ist auf die internationale Einführung mehrerer BEV-Modelle in dieser Zeit, vor allem dem Mitsubishi i-MiEV im Jahr 2009, dem Nissan Leaf 2010 und dem Minicab MiEV im Jahr 2011, zurückzuführen. 2012 ging die BEV-Produktion in Japan gegenüber dem Vorjahr mit ca. 30 000 Fahrzeugen leicht zurück. Dafür stieg die Produktion von PHEV zwischen 2011 und 2012 deutlich von ca. 8 000 PHEV auf 35 000 PHEV. Nach einigen BEV-Modellen wurden seit 2012 vermehrt PHEV-Modelle auf den Markt gebracht. So wurden beispielsweise mit dem Toyota Prius Plug-in Hybrid und dem Mitsubishi Outlander PHEV verstärkt Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge in Produktion gebracht. Auch im Bereich der HEV ist Japan ein wichtiger Fertigungsstandort und konnte die Produktion im Zeitraum von 2009 bis 2013 von ca. 800 000 auf 1,2 Mio. Fahrzeuge steigern.

Deutschland spielt im Vergleich eine wesentlich geringere Rolle. Mit ca. 20 000 produzierten elektrifizierten Fahrzeugen (BEV/PHEV/HEV) im Jahr 2012 liegt Deutschland deutlich hinter den 1,3 Mio. in Japan produzierten elektrifizierten Fahrzeugen zurück. 2013 wurden in Deutschland nur ca. 3 000 BEV gefertigt. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass Fahrzeuge deutscher Hersteller zum Teil im Ausland produziert werden – wie beispielsweise der smart fortwo electric drive in Frankreich und der Opel Ampera in den USA.

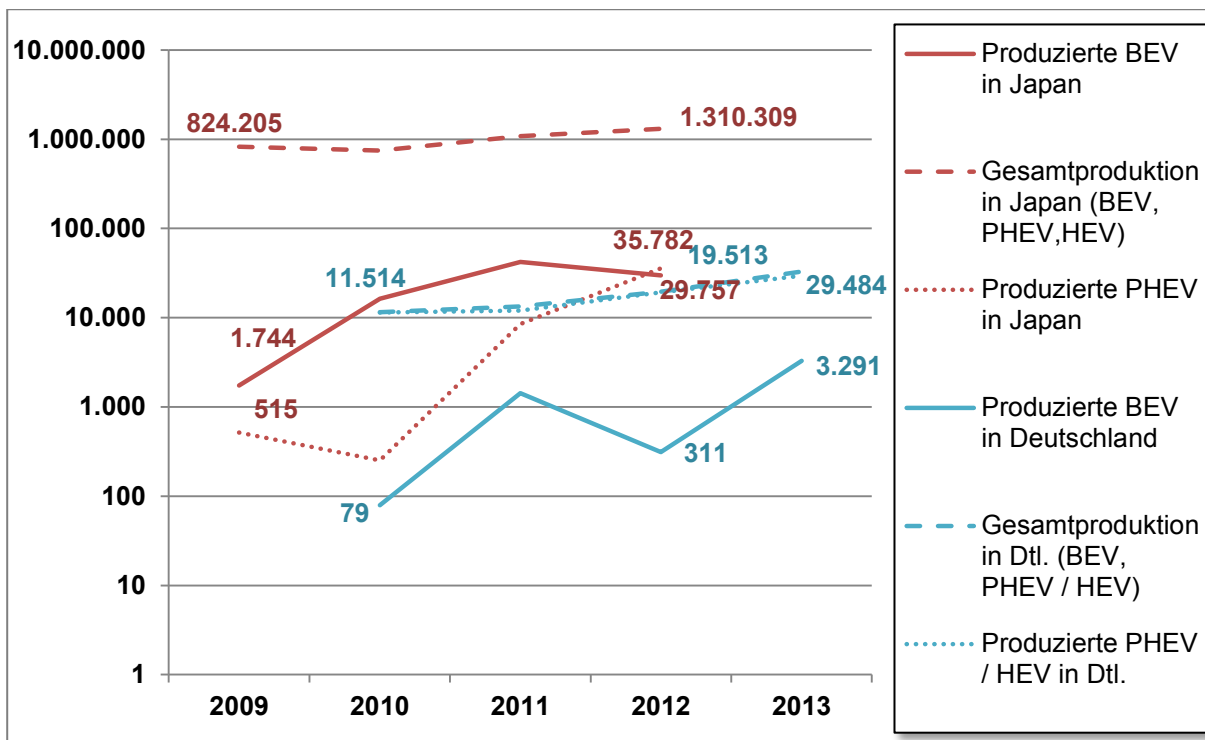


Abb. 5-35 Jährliche Produktion von elektrischen Pkw in Japan und Deutschland

Quelle: eigene Darstellung nach Regionalstudien, Daten NEV (2013) (Japan) und VDA 2014 (Deutschland)

Chinesische Hersteller haben bis 2014 noch kein heimisches EV-Modell auf den internationalen Markt gebracht. Dennoch produziert China Elektrofahrzeuge für den nationalen Markt. (Abb. 5-41). Dagegen sind in Indien trotz der zahlreichen Hersteller, unter denen auch nahezu alle großen globalen OEMs vertreten sind, nur sehr wenige Akteure im Bereich elektrifizierter Pkw aktiv: Mahindra REVA ist Indiens einziger Hersteller, der BEV produziert. In den USA produzieren viele große Automobilhersteller bereits PEVs oder planen dies zu tun. Dabei sind insbesondere die etablierten Hersteller in einer guten Position, um den Übergang zu PEVs zu ermöglichen, da sie bestehende Produktionsmaßstäbe, Markenbekanntheit, Supply-Chain-Beziehungen sowie Kundendienstkanäle nutzen können und über ausreichendes Kapital verfügen. In Europa gestaltet sich die Produktion von elektrischen Fahrzeugen in den einzelnen Ländern sehr unterschiedlich. Beispielsweise bietet die französische Automobilindustrie seit 2011 BEVs zum Verkauf an, die wichtigsten Hersteller sind hier PSA Peugeot Citroën und Renault-Nissan. Diese haben sich verpflichtet, bis zum Jahr 2015 70 000 PEVs zu produzieren. In Großbritannien wird dagegen seit 2013 der japanische Nissan Leaf mit jährlich 25 000 Einheiten in einem Werk in Sunderland produziert.

Ein Vergleich der Marktanteile der Fahrzeugneuzulassungen zeigt, dass heimische Modelle in den meisten Fällen die heimischen Märkte dominieren. Im folgenden werden die Marktanteile der erfolgreichsten Modelle am PEV-Gesamtabsatz in den ausgewählten Ländern Deutschland, Frankreich, Norwegen, USA, Japan und China dargestellt.

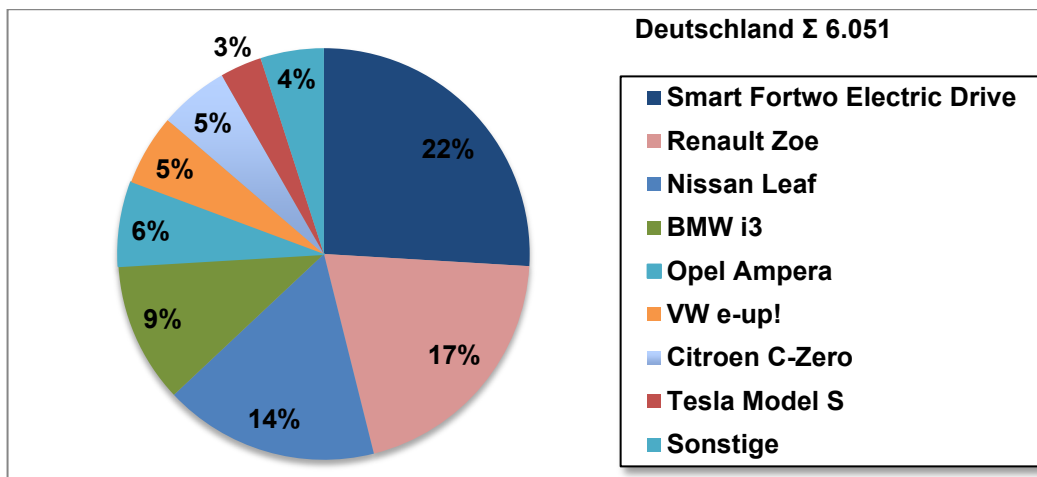


Abb. 5-36 Marktanteile der erfolgreichsten Modelle am PEV-Gesamtabsatz in Deutschland 2013

Quelle: eigene Darstellung nach (KBA 2014c)

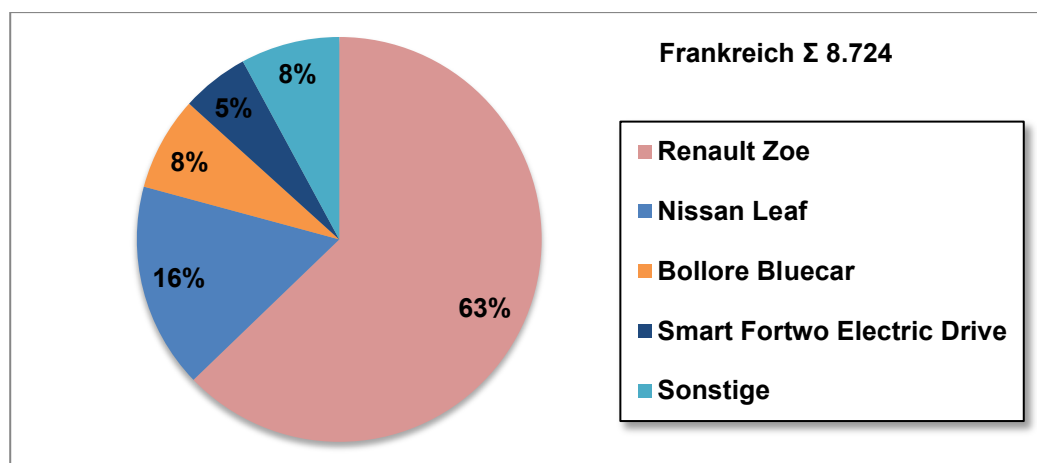


Abb. 5-37 Marktanteile der erfolgreichsten Modelle am PEV-Gesamtabsatz in Frankreich 2013

Quelle: eigene Darstellung nach (Avere-France 2014)

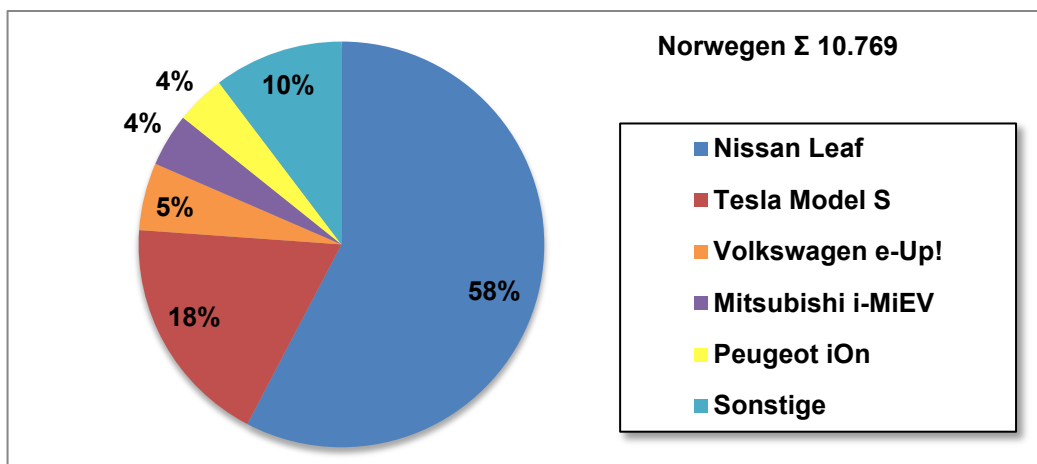


Abb. 5-38 Marktanteile der erfolgreichsten Modelle am PEV-Gesamtabsatz in Norwegen 2013

Quelle: eigene Darstellung nach (Grønn Bil 2014)

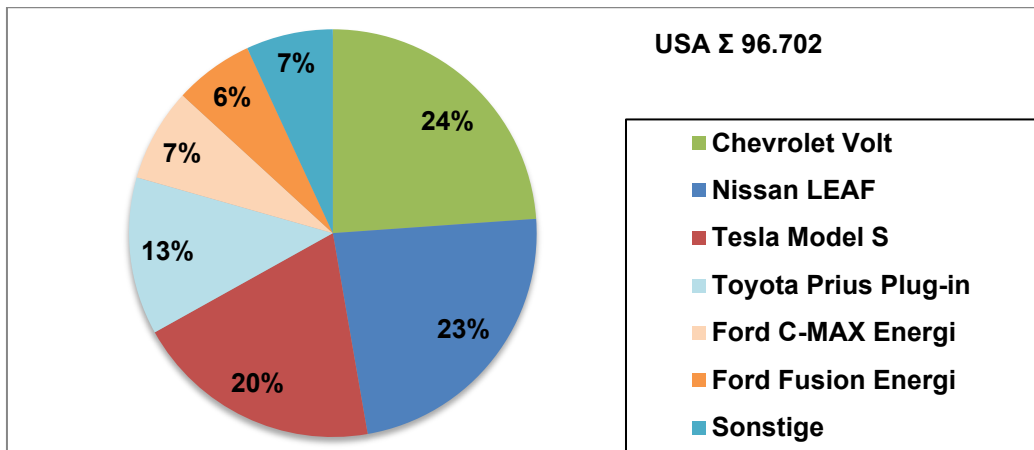


Abb. 5-39 Marktanteile der erfolgreichsten Modelle am PEV-Gesamtabsatz in den USA 2013

Quelle: eigene Darstellung nach (InsideEVs 2014)

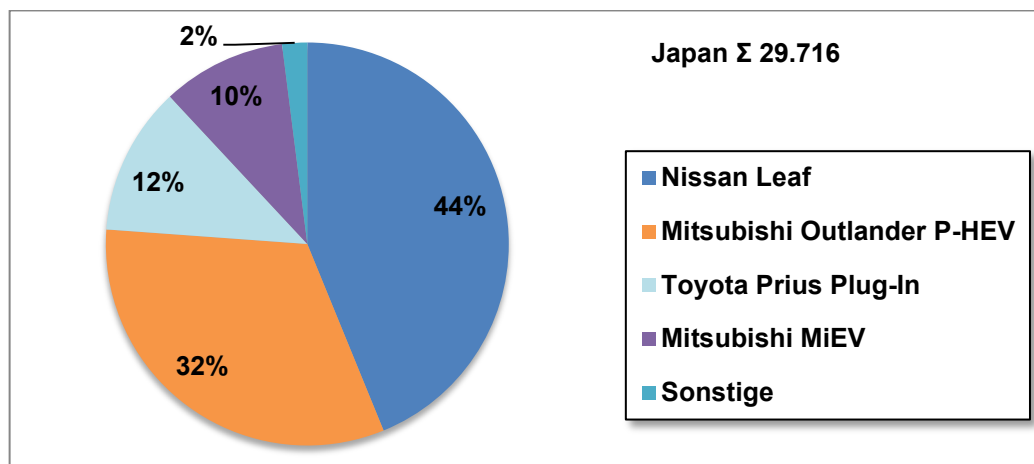


Abb. 5-40 Marktanteile der erfolgreichsten PEV-Modelle am PEV-Gesamtabsatz in Japan 2013

Quelle: eigene Darstellung nach (EV Sales 2014)

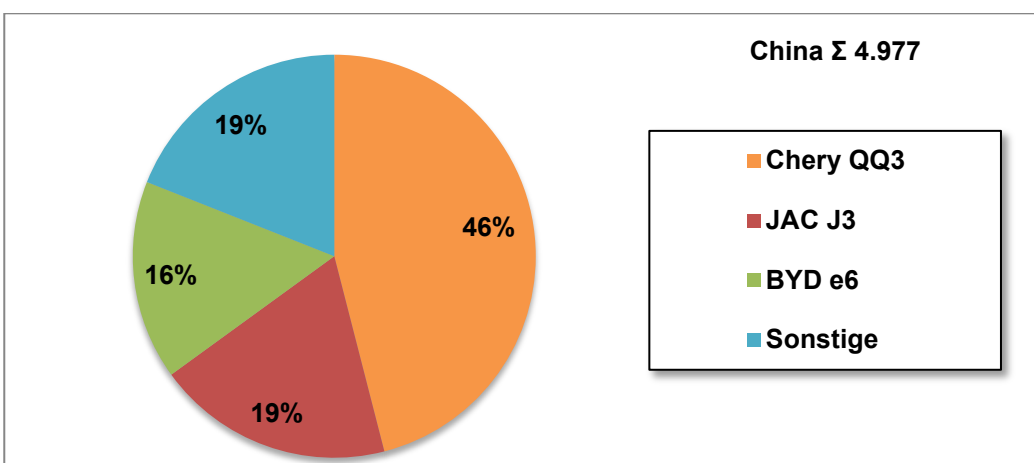


Abb. 5-41 Marktanteile der erfolgreichsten PEV-Modelle am PEV-Gesamtabsatz in China 2011

Quelle: eigene Darstellung nach (China Association of Automobile Manufacturers 2013)

Fahrzeugtechnologie und Komponenten

In Bezug auf die Fahrzeugtechnologie und Fahrzeugkomponenten für Elektrofahrzeuge ist die chinesische Automobilindustrie noch nicht in der Lage, die hohen Produktionsanforderungen konkurrierender internationaler Automobilkonzerne zu bedienen. Daher sind für den chinesischen EV-Markt internationale Joint Ventures von Bedeutung. Auch in Japan sehen die meisten Fahrzeughersteller insbesondere in Bezug auf die Leistungselektronik die Notwendigkeit starker technischer Fortschritte. Hier bestehen zwischen OEMs und Herstellern von Komponenten jedoch vor allem im Bereich der Batterieentwicklung bereits weitreichende Kooperationen. In Indien besteht bei der Weiterentwicklung und Herstellung von EV-Komponenten die Notwendigkeit einer Anpassung an die klimatischen Bedingungen. Problematisch ist hier jedoch die geringe Nachfrage nach Elektrofahrzeugen. Zudem erwarten Experten, dass die elektrische Spannung der Elektroautos in Indien aufgrund geringerer Kosten und Sicherheitsanforderungen niedriger als in anderen Märkten sein wird.

Die europäischen Automobilhersteller verfolgen bei der Produktion von xEV-Komponenten unterschiedliche Strategien: Während einige Hersteller wie BMW und Volkswagen dazu übergegangen sind, eine eigene Produktion der wichtigsten Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs (z.B. Elektromotoren, Batteriemontage) aufzubauen, haben sich andere Hersteller dazu entschieden, diese Komponenten, meist außerhalb von Europa, zu erwerben (Proff & Kilian 2012).

Neben der Batterie ist die Ladetechnologie und -infrastruktur eine der wichtigsten Komponenten der Elektromobilität. Hierbei setzen alle untersuchten Staaten auf den verstärkten Ausbau der Stromtankstelleninfrastruktur im öffentlichen sowie im privaten Raum (vgl. Kapitel 5.3.1). Sowohl China als auch Indien setzen zudem auf die Lademethode des „battery swapping“, bei dem leere Batterien an Ladestationen gegen volle getauscht werden. Verbunden damit ist ein spezifisches Geschäftsmodell: die Kunden kaufen die Elektrofahrzeuge ohne Batterie – diese bleibt über ein Leasing-Modell im Besitz und in der Wartungsverantwortlichkeit der Hersteller oder eines Serviceunternehmens. Hinsichtlich der Standardisierung und Normierung der Ladeinfrastruktur besteht vor allem in China noch weiterer Handlungsbedarf. Chinas nationale Standards für AC und DC Charging sind derzeit nicht kompatibel mit den international standardisierten Aufladesystemen. Aber auch in den USA wird das Ladenetz von Experten hinsichtlich teilweise unzureichender Verfügbarkeit in den einzelnen Bundesstaaten, verschiedener Anbieter und Ladeprotokollen als unzuverlässig eingestuft.

Im Bereich der Geschäftsmodelle und Mobilitätskonzepte sind in einigen der untersuchten Staaten bereits verschiedene Anbieter von Car-Sharing-Konzepten aktiv. Diese sind bisher jedoch räumlich nicht weit verbreitet – der Fokus liegt weltweit auf Metropolen und Großstädten. Nur wenige Anbieter betreiben dabei reine E-Fahrzeugflotten, häufig ergänzen EVs konventionelle Flotten. Einige japanische Stadtverwaltungen gewähren Taxibetreibern einen Zuschuss zu den Anschaffungskosten von xEV-Taxis, kooperieren dabei auch mit nahegelegenen touristischen Regionen und stellen spezielle Flächen für Taxistände mit xEVs vor Bahnstationen und Kaufhäusern zur Verfügung.

5.3.4 Verbraucher und Marktentwicklung

H. Hüging (WI)

Marktentwicklung elektrischer Fahrzeuge

Die weltweiten Verkäufe von Plug-in elektrischen Fahrzeugen zeigen ein deutliches Wachstum in den letzten fünf Jahren (Abb. 5-42). Im Jahr 2009 wurden noch unter 10 000 Plug-in-Pkw verkauft. Ein besonders starkes Wachstum kann seit 2011 beobachtet werden. In den Jahren 2011 bis 2013 verdoppelte sich die Zahl der Verkäufe jeweils im Vergleich zum Vorjahr. Im Jahr 2013 wurden insgesamt 210 000 PEV verkauft (ICCT 2014), wobei BEV gegenüber PHEV mit ca. 53 % der Plug-in-Pkw-Verkäufe leicht überwiegen (EVObsession 2014).

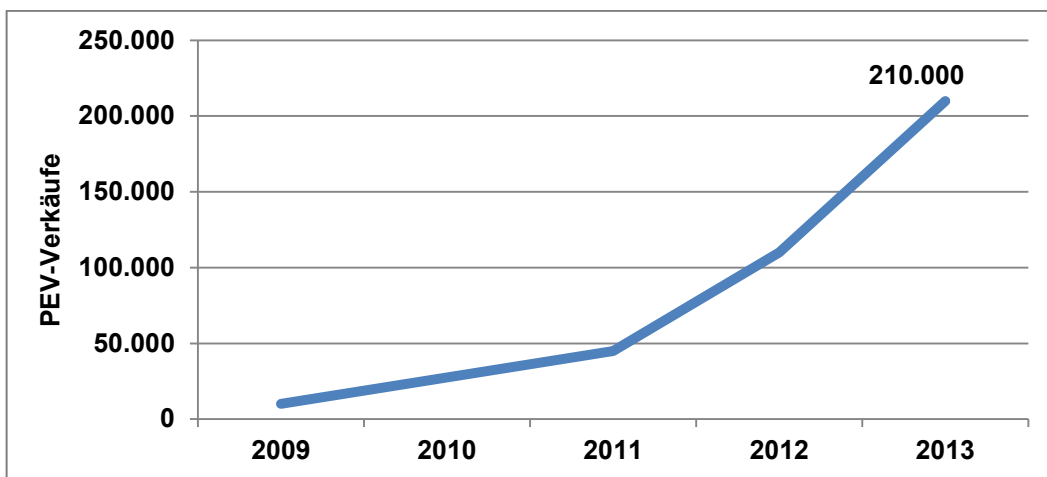


Abb. 5-42 Weltweite jährliche Verkäufe von PEV (Pkw) von 2009 bis 2013

Quelle: eigene Darstellung nach (ICCT 2014)

Mit ca. 97 000 Fahrzeugen wurde ungefähr die Hälfte der genannten 210 000 weltweit verkauften PEV-Pkw in den USA abgesetzt (Abb. 5-44). Die EU ist mit ca. 55 000 Fahrzeugen der zweitwichtigste Markt, gefolgt von Japan mit ca. 29 000 Fahrzeugen und China mit ca. 18 000 Fahrzeugen. Indien stellt mit 2,5 Millionen Neuwagenverkäufen im Jahr 2013 mittlerweile einen wichtigen Automobilmarkt dar. Vollständige Daten für den Absatz an Elektrofahrzeugen in Indien sind nicht verfügbar. Auf Basis der geringen Anzahl der auf dem indischen Markt verfügbaren PEV-Modelle und der Verkaufszahlen einzelner Modelle lässt sich jedoch ableiten, dass die Verkäufe von PEV in Indien sehr gering sind und das Land im Bereich der elektrifizierten Pkw heute noch keinen relevanten Markt darstellt (vgl. Regionalstudie Indien).

In Europa waren 2013 die Niederlande der größte Abnehmer von PEV. Daneben ist Norwegen trotz seines relativ kleinen Gesamtmarktes einer der wichtigsten Abnehmer von PEV in Europa. Deutschland hat zwar in Europa den größten Markt für Neuwagen, spielt jedoch bei den Verkäufen von PEV eine geringere Rolle als Frankreich, Norwegen und die Niederlande.

Hinsichtlich der Elektrifizierungskonzepte zeigen die USA, die EU-27 und Japan im Jahr 2013 ein nahezu ausgewogenes Verhältnis zwischen BEV und PHEV Verkäufen, während in China BEV deutlich dominieren. Norwegen und die Niederlande, die beiden führenden Län-

der in Europa, unterscheiden sich deutlich in der Rolle von Plug-in-Hybriden und rein batterieelektrischen Fahrzeugen. In Norwegen waren deutlich über 90 % der verkauften Fahrzeuge BEV, während es sich in den Niederlanden bei fast 90 % der Fahrzeuge um PHEV handelte. Die unterschiedliche Bedeutung der Fahrzeugkonzepte in den genannten Ländern lässt sich auf die jeweiligen Anreizsysteme für elektrifizierte Fahrzeuge zurückführen, die maßgeblich die Kosten der Fahrzeuge beeinflussen. Auch in China fällt der Zuschuss für BEV mit maximal 7 200 Euro deutlich größer aus als der Zuschuss für PHEV von maximal 4 200 Euro (vgl. 5.3.1). In Norwegen sind lediglich BEV völlig von der Import- und Mehrwertsteuer befreit, während PHEV mehrwertsteuerpflichtig sind und eine reduzierte Importsteuer anfällt (vgl. 5.3.1). In den Niederlanden wirken sich die CO₂-basierten Steuervorteile bei größeren Fahrzeugen deutlich stärker aus. Plug-in-Hybridtechnologie, die insbesondere bei Mittelklasse- und Oberklasse-Pkw eingesetzt wird, überwiegt aus diesem Grund deutlich gegenüber den in der Kompaktklasse eingesetzten BEV (vgl. 5.3.1). Auch in Deutschland überwiegen mit ca. 80 % der Verkäufe BEV Fahrzeuge deutlich. Durch die insgesamt niedrigen finanziellen Anreize für elektrifizierte Fahrzeuge in Deutschland lässt sich vermuten, dass Unterschiede im Anreizsystem nur einen geringen Einfluss auf die Präferenz für BEV hat. BEV genießen gegenüber PHEV leichte Vorteile bei der Dienstwagenbesteuerung, welche die Batteriekapazität der Fahrzeuge berücksichtigt. Gründe für den höheren Marktanteil sind vermutlich die größere Modellvielfalt bei BEV (vgl. 5.3.3) sowie der Einsatz von BEV in geförderten Modellprojekten und im Carsharing.

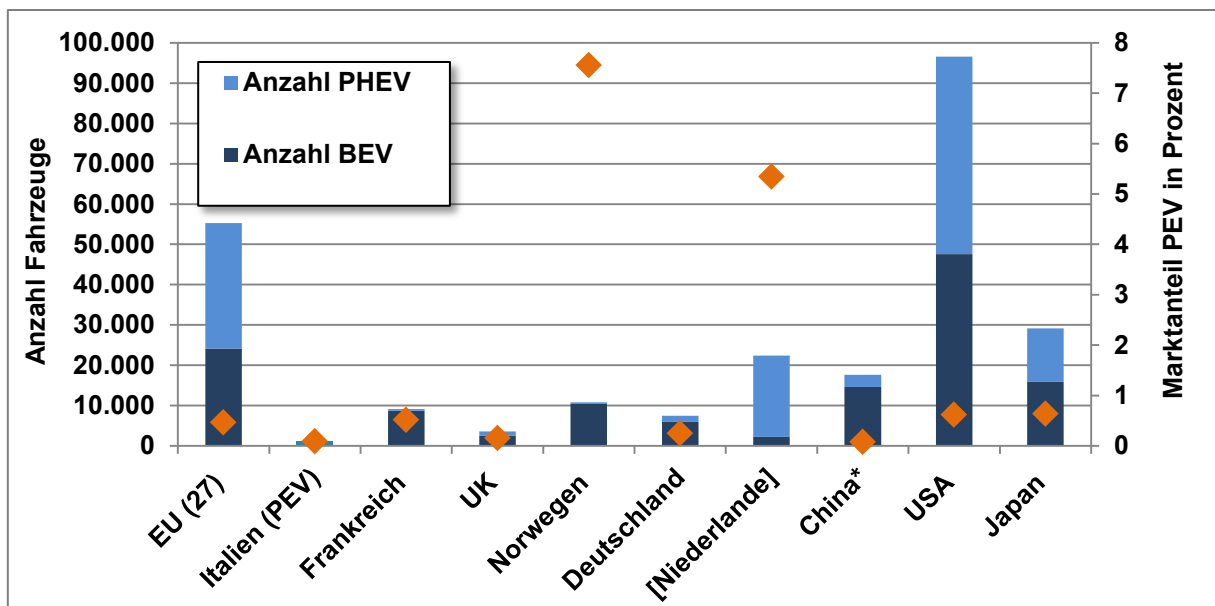


Abb. 5-43 Jährliche Registrierungen/Verkäufe Marktanteile (Neuwagen) von PEV in den untersuchten Ländern (+ Niederlande, ohne Indien) im Jahr 2013 im internationalen Vergleich¹⁹

Quelle: eigene Darstellung nach (KBA 2014a, CCFA 2014, Grønn Bil 2014, IA-HEV 2013, ICCT 2014, OICA 2014, EEA 2014, Green car reports 2014, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland 2013, Hybridcars.com 2013)

¹⁹ * die Daten für China enthalten neben Pkw auch weitere Fahrzeuge

Neben der Anzahl der verkauften Plug-in-Fahrzeuge ist insbesondere ihr Anteil bezogen auf die Gesamtzahl der verkauften Neufahrzeuge für die Beurteilung der Reife der nationalen Märkte relevant. Den weltweit höchsten Marktanteil von PEV weist Norwegen mit ca. 7,6 % im Jahr 2013 auf (Abb. 5-44). Die Niederlande haben mit ca. 5,3 % ebenfalls einen deutlich höheren Marktanteil als die übrigen Länder. Bei den übrigen Ländern liegt der Marktanteil durchgehend unter einem Prozent. Unter diesen Ländern weisen die USA und Japan mit über 0,6 % den höchsten Marktanteil auf. Deutschland liegt mit ca. 0,3 % hinter den USA, Japan und Frankreich zurück, weist jedoch einen höheren Marktanteil als China und Großbritannien auf. Deutschland ist derzeit sowohl als absoluter Markt als auch hinsichtlich des Anteils der PEV-Verkäufe noch deutlich vom Ziel des globalen Leitmarktes für Elektromobilität entfernt.

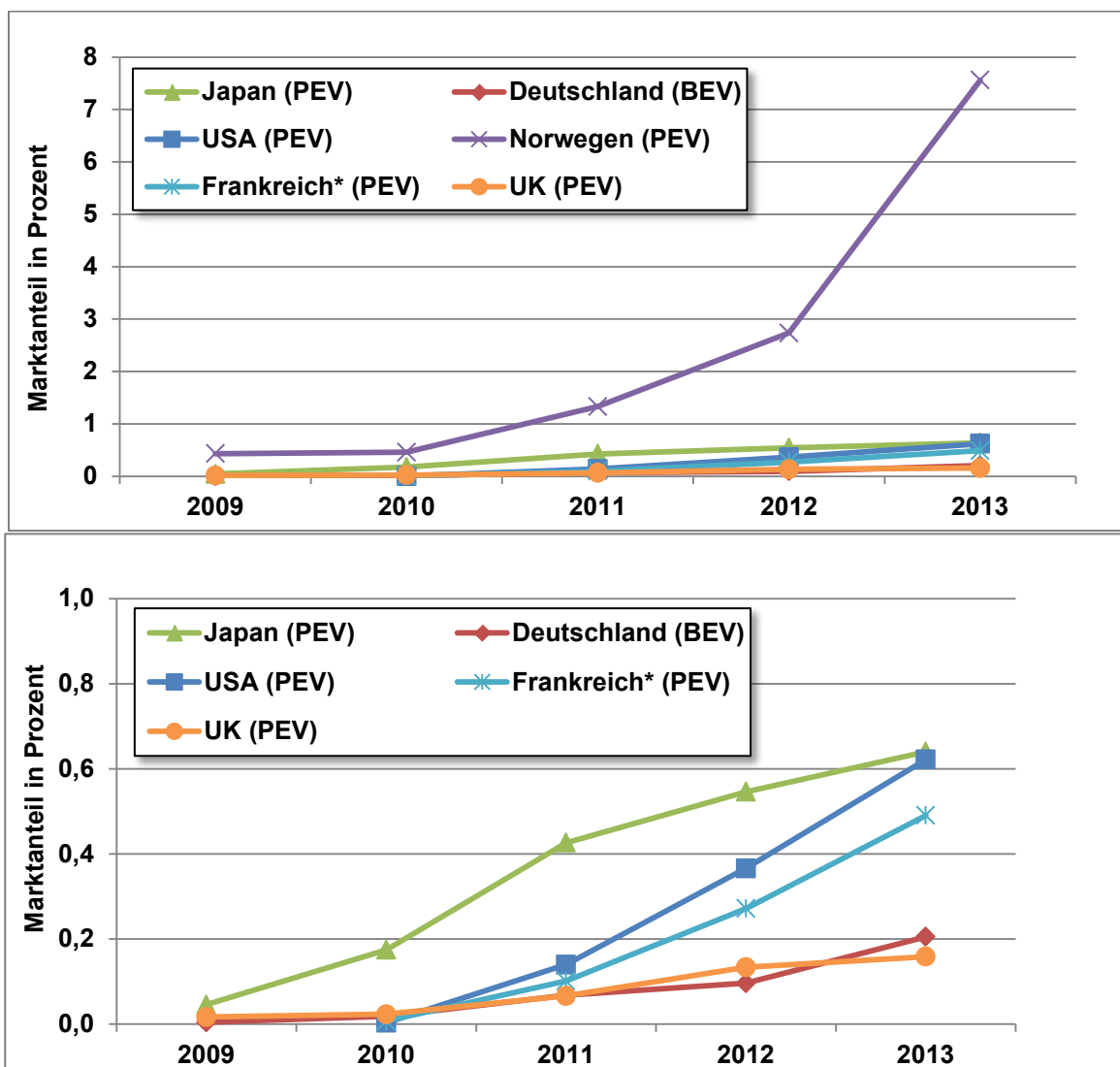


Abb. 5-44 Zeitlicher Verlauf der Marktentwicklung von PEV in ausgewählten Ländern, unten: Verlauf im Detail ohne Norwegen

Quelle: eigene Darstellung nach (KBA 2014, Grønn Bil 2014, IA-HEV 2012, IA-HEV 2013, OICA 2014, UNECE 2014, Hybridcars.com 2014, Regionalstudie Japan, Proff & Kilian 2012)

Bei Betrachtung der Entwicklung des Marktanteils in den letzten fünf Jahren in ausgewählten Ländern (vgl. Abb. 5-44) lässt sich eine deutlich positive Entwicklung feststellen, wobei Norwegen über den gesamten Zeitraum den höchsten Marktanteil und insbesondere seit 2011 ein starkes Wachstum aufweist. Seit 2011 sind Mitsubishi i-MiEV / Peugeot iOn / Citroën C-Zero und Nissan Leaf auf dem norwegischen Markt verfügbar, was wesentlich zum starken Wachstum des Marktanteils beigetragen hat. Auch die anderen betrachteten Märkte zeigen seit 2011 ein starkes Wachstum des Marktanteils von PEV (vgl. Abb. 5-44 – unten). Deutschland, Frankreich und Großbritannien lagen im Jahr 2010 mit 0,01 bis 0,02 % auf ähnlichem Niveau. Seit 2011 zeigt Frankreich eine deutlich positivere Entwicklung als Deutschland und Großbritannien. Das für PEV besonders vorteilhafte französische Bonus-Malus-System wurde bereits 2008 eingeführt (vgl. Abschnitt 5.3.1). Während Großbritannien 2012 noch einen leicht höheren Marktanteil von PEV als Deutschland erreichte (Einführung der Plug-in Car Grant Anfang 2011), war der Anteil von PEV an den Gesamtverkäufen im Jahr 2013 in Deutschland höher als in Großbritannien.

Japan weist bereits zwischen 2009 und 2010 ein deutliches Wachstum des PEV-Marktanteils auf. Japans Kaufanreize für PEV wurden 2009 eingeführt (vgl. Abschnitt 5.3.1). Außerdem war der Mitsubishi-iMiEV in Japan bereits im Sommer 2009 auf dem Markt verfügbar und der Nissan Leaf wurde im Herbst 2010 auf eingeführt (vgl. Regionalstudie Japan).

Nutzerakzeptanz

Die Akzeptanz und die Erwartungen gegenüber Elektrofahrzeugen wurde in den meisten betrachteten Ländern in verschiedenen Studien durch Nutzerbefragungen erhoben (vgl. Bozem et al. 2013, Paternoga et al. 2013, Deloitte 2012, TRL 2013). Für eine überregionale Betrachtung der Nutzerakzeptanz sind quantitative Ergebnisse aus regionalen Untersuchungen durch ihr unterschiedliches Design und unterschiedliche Fragestellungen nur bedingt vergleichbar. Aus diesem Grund werden die Unterschiede in der Nutzerakzeptanz in erster Linie qualitativ auf Basis der Regionalstudien sowie der im Rahmen des Projekts durchgeführten Experteninterviews dargestellt.

Die Hemmnisse für den Kauf eines elektrifizierten Fahrzeugs sind in allen untersuchten Ländern ähnlich. Als primäre Faktoren sind hier **Mehrpreis**, **begrenzte Reichweite** und **Infrastrukturverfügbarkeit** zu nennen. Wie Umfragen unter japanischen und deutschen Nutzern bestätigen, ist der Mehrpreis der bedeutendste Hemmnisfaktor – vor begrenzter Reichweite und fehlender Infrastruktur (vgl. Regionalstudie Deutschland, Regionalstudie Japan). Gemäß der Untersuchung von Paternoga et al. (2013) für Deutschland wären 25 % potenzieller Käufer bereit, einen Mehrpreis für ein Elektrofahrzeug zu zahlen, welcher jedoch bei den meisten dieser potenziellen Käufer unter 3 000 Euro liegen müsste. Die japanischen Konsumenten würden bei einem Kaufpreis von unter 2.5 Millionen JYP (21 500 Euro) den Kauf eines BEV in Betracht ziehen (Deloitte 2012). Die indischen Nutzer werden als besonders preissensitiv betrachtet, wobei sie in erster Linie den Kaufpreis berücksichtigen, während das Konzept der Total Costs of Ownership (TCO) weniger verbreitet ist. Indische Käufer erwarten, dass der Kaufpreis für ein vierrädriges elektrifiziertes Fahrzeug unter umgerechnet 4 800 Euro liegt, was einem konventionellen Klein- bis Kompaktwagen in Indien entspricht. Die hohen Anschaffungskosten für Elektrofahrzeuge werden als besonderes Hemmnis für den Einsatz von xEVs in gewerblichen Flotten in Norwegen eingeschätzt. Klein- und Mittelständische Flottenbetreiber ziehen Elektrofahrzeuge häufig nicht in Betracht, da für sie durch Unsicherheiten

hinsichtlich der Lebensdauer und des Wiederverkaufswertes ein hohes Risiko besteht, in xEVs zu investieren (Regionalstudie Europa).

Im Bereich der **Ladeinfrastruktur** spielen Heimplademöglichkeiten eine besondere Rolle. In der Studie von Bozem et al. (2013) für Deutschland schätzten 90 % der Befragten Heimplademöglichkeiten als wichtig bis sehr wichtig ein. Laden am Arbeitsplatz oder Schnellademöglichkeiten an Tankstellen wurden von der Hälfte der Befragten als wichtig eingeschätzt. In Norwegen wurde insbesondere zu Beginn der Entwicklung des BEV-Marktes konventionelle Haushaltsanschlüsse zum Laden genutzt. Die meisten BEV-Besitzer in Norwegen wohnen in den Vororten größerer Städte. Auch wenn sich die Nutzer in Norwegen mehr Schnellademöglichkeiten wünschen, werden Schnellademöglichkeiten heute nur von 8 % der Besitzer wöchentlich genutzt (Grønn Bil 2013). Auch in Japan laden die meisten Besitzer ihr Elektrofahrzeug zu Hause. Jedoch wünschen sie viele Schnellademöglichkeiten im Umkreis von weniger als 3 km von ihrer Wohnung (Deloitte 2012). Insgesamt sind die Möglichkeiten zur Heimpladung in den Großstädten eingeschränkter. Dies stellt auch eine besondere Herausforderung für China dar, wo große Apartmenthochhäuser dominieren. Selbst falls genügend Platz zur Verfügung stände, würde die Ausstattung von bestehenden Apartment- oder Parkhäusern hohe Kosten verursachen (Regionalstudie China).

In vielen Ländern (z.B. Frankreich, Norwegen und den USA) werden Elektrofahrzeuge im privaten Bereich in erster Linie als Zweit- oder Drittwagen genutzt (Regionalstudie Europa, Regionalstudie USA). Auch in Indien kommen elektrifizierte Fahrzeuge meist nur als Zweit- oder Drittfahrzeug in Betracht (Regionalstudie Indien). Durch die Verfügbarkeit eines weiteren konventionellen Fahrzeugs sind die Reichweitenbegrenzung und die Infrastrukturverfügbarkeit ein geringeres Hemmnis.

Fehlendes **Bewusstsein und Wissen** über Elektrofahrzeuge wurde insbesondere in Indien und China als wichtiger Hemmnisfaktor identifiziert (Regionalstudie Indien, Regionalstudie China). In China werden Elektrofahrzeuge kaum beworben, und das Wissen über die Technologie ist auch bei Fahrzeugverkäufern sehr begrenzt. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass sich die bisherigen Aktivitäten der Regierung im Bereich Elektromobilität insbesondere auf staatliche Flotten konzentrierten, so dass die Bevölkerung kaum mit Elektromobilität in Berührung kommt (vgl. Regionalstudie China). In Indien fehlt häufig das Verständnis für die Technologie, zudem kursieren laut NEMMP 2020 Fehlinformationen zu Elektrofahrzeugen. Die Kaufbereitschaft für elektrische Zweiräder liegt in Indien wesentlich höher als für elektrische Pkw.

Auch in Europa ist das Wissen über Elektrofahrzeuge eingeschränkt. Beispielsweise wurde von Experten geäußert, dass Reichweitenangst zum Teil auch bei der Akzeptanz von PHEV eine Rolle spielt, da die potentiellen Nutzer nicht mit dem Konzept vertraut sind (vgl. Regionalstudie Europa). Auch in Frankreich werden wichtige Aspekte wie TCO-Vorteile unzureichend kommuniziert. In Japan stieg die Angabe eigener Kenntnisse über Elektrofahrzeuge zwischen 2011 und 2012 deutlich von 20 % auf 80 % der Befragten, jedoch ging dies nicht mit einer entsprechenden Steigerung der Kaufbereitschaft einher (Deloitte 2012). In verschiedenen Ländern wurde Bewusstseinsbildung von potentiellen Nutzern sowie Ausbildung von Verkäufer als wichtiges Handlungsfeld für die nahe Zukunft genannt (vgl. z.B. Regionalstudie Europa, Regionalstudie China). In vielen der betrachteten Länder wurde festgestellt, dass Testfahrten oder -nutzung die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen deutlich steigern können.

Wenn auch als weniger wichtig eingestuft, wurde auch die **begrenzte Produktpalette** von Elektrofahrzeugen als Hemmnisfaktor für die Verbreitung der Fahrzeuge gesehen (Regionalstudie Japan, Regionalstudie China). In China sind weniger als 10 Modelle auf dem Markt, wobei es sich bei den meisten um Kleinwagenmodelle handelt. Private Konsumenten legen jedoch besonderen Wert auf große, luxuriöse Autos, da Pkw in China einen besonderen Stellenwert als Statussymbol haben. In Norwegen hinderte die begrenzte Produktpalette sowie begrenzte Lieferbarkeit von Fahrzeugen das Marktwachstum.

Umweltfreundlichkeit ist in Japan, Deutschland und Großbritannien ein wichtiges Kaufkriterium, wobei es meist an zweiter Stelle hinter den reduzierten **Betriebskosten** steht (siehe Bozem et al. 2013, Deloitte 2012, TRL 2013). In Norwegen waren laut einer Untersuchung von Haugneland und Kvisle (2013) für 41 % der Befragten xEV Besitzer finanzielle Vorteile der Grund für den Kauf, und für 29 % war die Umweltfreundlichkeit das entscheidende Kaufkriterium. In Indien und China ist die Umweltfreundlichkeit ein eher nachrangiges Kaufkriterium. Für japanische Kunden ist zudem die **Innovativität** der Technologie ein wichtiger Einflussfaktor. Auch in Großbritannien war das mit Elektrofahrzeugen verbundene Image der innovative, neue, spaßbringenden Technologie ein wichtiges Kaufkriterium, noch vor monetären Anreizen wie der ‚Plug-in Car Grant‘ (TRL 2013). In Japan waren die **Subventionen und Steuerreduktionen** für die Hälfte der Befragten ein wichtiger Grund, ein BEV zu kaufen (Deloitte 2012). Als wichtigen Vorteil, den potentielle Nutzer mit Elektrofahrzeugen verbinden, wird in Japan auch die Möglichkeit der Nutzung von EVs zur Notstromversorgung gesehen, was eine regionale Besonderheit darstellt. Sogenannte Vehicle-to-home-Konzepte werden von der Regierung und verschiedenen Automobilherstellern verfolgt und beworben (vgl. Abschnitt 5.2.4).

Nicht-monetäre Vorteile wie die Nutzung von HOV-Lanes (High occupancy vehicle lane, d.h. Sonderspuren für Fahrzeuge mit hohem Besetzungsgrad) spielen laut Experten in den USA eine wesentliche Rolle bei der Kaufentscheidung und können sogar einen größeren Einfluss haben als rein finanzielle Aspekte (STROM-Arbeitspapier USA). Der Zugang zu Busspuren wird auch von vielen xEV-Nutzern in Norwegen als ein wichtiger Anreiz für die Nutzung eines Elektrofahrzeuges genannt (gemeinsam mit niedrigen Treibstoffkosten, Mautbefreiung und Steuerbefreiung) (Haugneland & Kvisle 2013).

Hinsichtlich der verschiedenen **Elektrifizierungsgrade** gibt es in Indien und Japan eine Präferenz für HEV, gefolgt von PHEV; BEV werden weniger präferiert (Regionalstudie Japan, Regionalstudie Indien). Im Gegensatz dazu gibt es laut der Untersuchung von Bozem et al. (2013) in Deutschland eine leichte Nutzerpräferenz für PHEV vor HEV und BEV, die sich bislang jedoch nicht am Fahrzeugmarkt widerspiegelt. In den USA besteht im Allgemeinen eine vergleichsweise hohe Präferenz gegenüber großen Fahrzeugen wie SUVs oder Pickups. Hersteller wollen diese Präferenz mit (Plug-in)Hybridmodellen in den Klassen adressieren (Arbeitspapier USA). Durch klare die steuerliche Bevorteilung von BEV gegenüber PHEV in Norwegen und den höheren Kosten von PHEV gegenüber konventionellen Fahrzeugen, werden PHEV als nicht wirtschaftlich eingeschätzt (Regionalstudie Europa).

Marktperspektiven

Um die Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen zu untersuchen, werden zum einen Einschätzungen der Experten, die im Rahmen der Regionalstudien interviewt wurden, einbezo-

gen und zum anderen Studien berücksichtigt, welche die perspektivische Entwicklung elektrifizierte Fahrzeuge untersuchen. Dazu wurden Studien ausgewählt, welche die Marktentwicklung für mehrere der untersuchten Länder modellieren (d.h. Proff und Kilian 2012, IEA 2 Grad Szenario aus Fulton 2014, Nemry und Brons 2010). Die Studien variieren in ihrer Methodik, Ausrichtung und Annahmen, sowie in den betrachteten Einflussfaktoren, wodurch die Ergebnisse nur begrenzt vergleichbar sind. Proff und Kilian (2012) haben die globale Marktdurchdringung von elektrifizierten Fahrzeugen mit Hilfe eines Marktmodells untersucht, welches neben ökonomischen und fahrzeugspezifischen Faktoren auch nutzerspezifische Faktoren und politische Rahmensetzung berücksichtigt. In Abb. 5-45 wird das Basis-Szenario dargestellt, welches den Referenzfall ohne zusätzliche Politikinitiativen beschreibt. Das IEA 2DS-Szenario hingegen basiert auf einer Reihe von zusätzlichen Maßnahmen im Verkehrssektor, die sicherstellen sollen, dass das eine CO₂-Reduktion erreicht wird die mit dem 2°C-Ziel konsistent ist (Fulton et al. 2013). Effizienten Fahrzeugen wie Elektrofahrzeugen wird hier eine entscheidende Rolle zugeschrieben. Nemry und Brons (2010) analysiert die mögliche Entwicklung des E-Fahrzeugmarktes mit Hilfe des REMOVE Modells auf Basis verschiedener Annahmen zur Entwicklung der Batteriekosten und der Infrastrukturverfügbarkeit. In Abb. 5-45 wird das optimistischste Szenario (Batt2_Inf2) dargestellt.

Wie man anhand der projizierten Marktdurchdringung von PEV in Europa, sowie dem Vergleichsfall Deutschland sehen kann, projizieren Nemry und Brons (2010) für das Jahr 2020 die stärkste Marktdurchdringung mit ca. 14 % PEV Anteil gegenüber ca. 7 % im IEA 2DS Szenario und im Basis Szenario von Proff und Kilian (2012) (vgl. Abb. 5-45). Einige Hersteller gehen von einem geringeren Marktanteil von PEVs in 2020 aus. So wurde im Rahmen der STROM-Experteninterviews von einem Vertreter eines Automobilherstellers ein erwarteter Marktanteil von 2 bis 8 % bis 2020 genannt, wobei damit gerechnet wird, dass die tatsächliche Marktentwicklung eher im unteren Bereich liegen wird (vgl. Regionalstudie Europa). In allen in Abb. 5-45 dargestellten Studien überwiegen PHEV gegenüber BEV deutlich. Auch die im Rahmen des Projekts interviewten Experten sehen in naher Zukunft ein höheres Potential für PHEV als für BEV (vgl. Regionalstudie Japan).

Das IEA-2DS-Szenario sowie Proff und Kilian (2012) gehen davon aus, dass der höchste Marktanteil für PEV in Japan erreicht wird, wobei Proff und Kilian (2012) von einem deutlich stärkeren Vorsprung von Japan vor den anderen betrachteten Ländern ausgehen und einen Marktanteil von ca. 16 % projizieren. Dies stimmt weitestgehend mit einer nationalen japanischen Studie des METI überein, die von einem Marktanteil von ca. 17 % ausgeht. Dabei überwiegen im Gegensatz zu Proff und Kilian in der Studie des japanischen METI jedoch deutlich BEV (METI 2010). Insbesondere die USA werden in beiden Prognosen recht unterschiedlich bewertet: Bei IEA 2DS Szenario erreichen PEV in den USA einen deutlich geringeren Marktanteil als in der EU, Japan oder China, während die USA in der Studie von Proff und Kilian den zweithöchsten Marktanteil aufweisen.

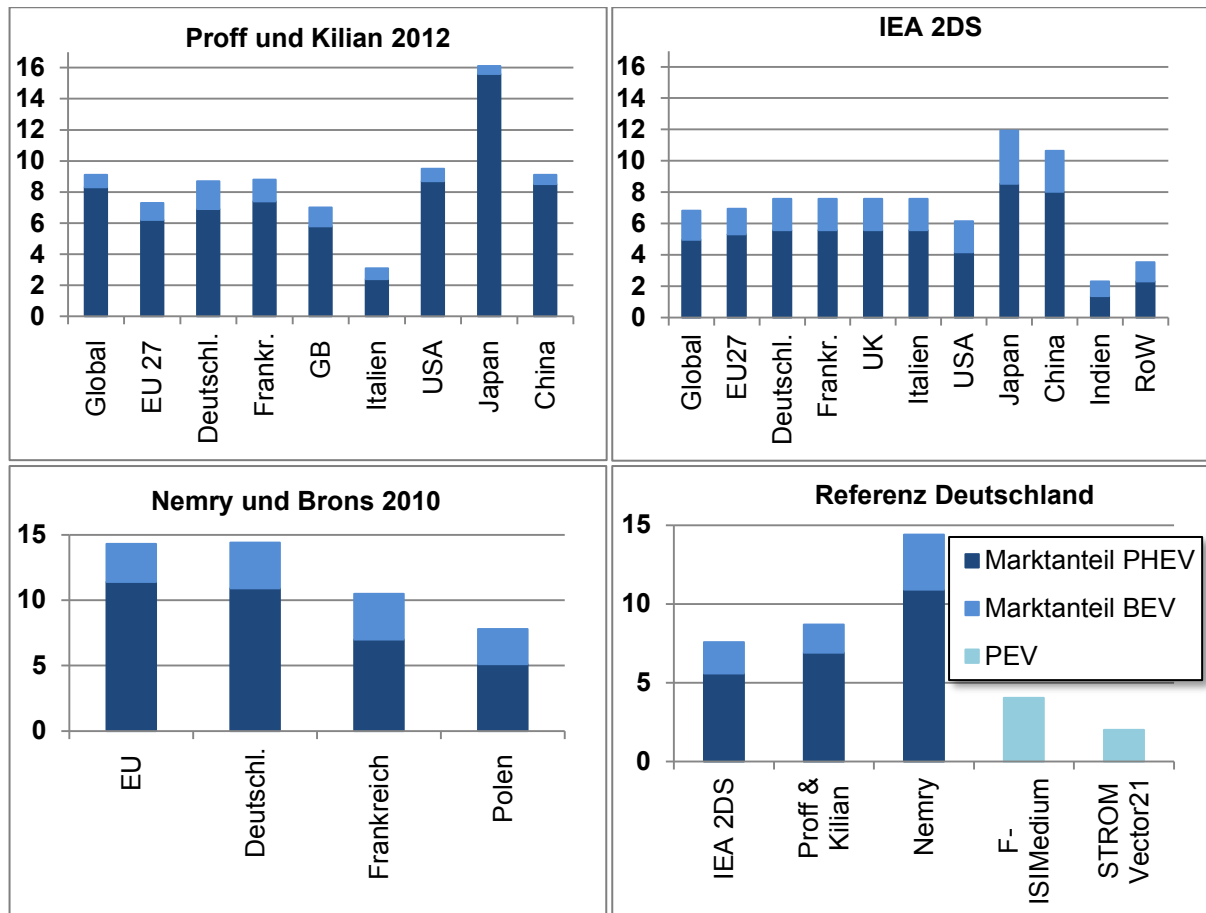


Abb. 5-45 Prognostizierter Marktanteil von BEV und PHEV (inkl. REEV) in 2020 in verschiedenen Studien in Prozent

Quelle: eigene Darstellung nach (Proff & Kilian 2012 – Base Case Scenario, Fulton, Scenarios for the IEA Energy Technology Perspectives 2012 unpublished data 2014–IEA 2DS Scenario, Nemry & Brons 2010 – Batt2_Inf2, Plötz et al. 2013 – Fraunhofer ISI Medium Szenario.)

Innerhalb Europas sehen Nemry und Brons (2010) deutlich höhere Marktanteile von PEV in Deutschland mit 14,4 % als in Frankreich mit 10,5 %. Bei Proff und Kilian (2012) erreichen PEVs in beiden Ländern einen Marktanteil von ca. 9 %, damit führen sie deutlich vor anderen wichtigen europäischen Märkten wie Großbritannien und Italien. IEA 2DS nimmt an, dass die Marktanteile in den dargestellten EU-Ländern ein gleiches Level erreichen. Die in den dargestellten Studien projizierte Marktdurchdringung von PEV in Großbritannien liegt mit ca. 7 % am oberen Ende des in einer nationalen Studie ermittelten Marktanteils von 3 bis 7 % (OLEV 2013).

Indien wird nur im IEA 2DS Szenario separat betrachtet und erreicht darin einen PEV-Marktanteil von ca. 2 %. In der nationalen Studie, die im Rahmen des indischen NEMMP 2020 durchgeführt wurde wird ein Marktanteil von xEV von 18 bis 19 % unter den vierrädrigen Fahrzeugen erwarten, wobei es sich überwiegend um HEV handeln soll (NEMMP 2020). Auch die interviewten Experten in Indien sehen Potential für BEV in naher Zukunft nur in Nischenanwendungen (Regionalstudie Indien).

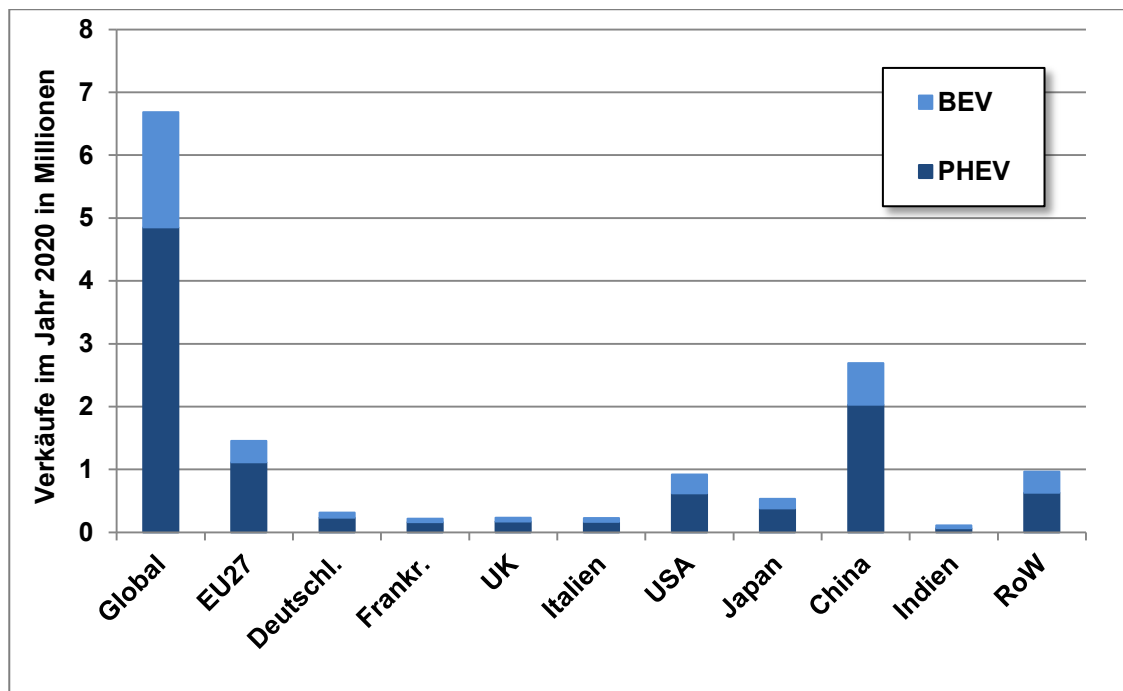


Abb. 5-46 Prognostizierte Verkäufe von BEV und PHEV (inkl. REEV) in 2020 im IEA 2DS Szenario

Quelle: eigene Darstellung nach (Fulton 2014) – IEA 2DS Szenario

Neben der Marktdurchdringung von PEV hat die absolute Größe des Fahrzeugmarktes einen wesentlichen Einfluss auf die Anzahl der PEV-Verkäufe in den jeweiligen Ländern. Abb. 5-46 stellt die projizierten PEV-Verkäufe exemplarisch für das IEA 2DS Szenario dar. Durch das starke Wachstum des Fahrzeugmarktes in China und einen hohen Marktanteil von PEV stellt China hier den größten zukünftigen Absatzmarkt für PEV dar, gefolgt von der EU und den USA. Japan ist wegen des kleineren Pkw-Marktes trotz einer hohen Marktdurchdringung von PEV nur ein vergleichsweise kleiner Absatzmarkt für Plug-in-elektrische Fahrzeuge im Jahr 2020.

Alle berücksichtigten Projektionen gehen von einem relativ langsamen Wachstum des PEV-Marktes bis 2020 aus, während deutliche Marktzuwächse bis 2030 erwartet werden (vgl. Abb. 5-46). Außerdem nimmt in allen Studien der Anteil von BEV gegenüber PHEV bis 2030 deutlich zu. Bei Proff und Kilian (2012) und im IEA 2DS erreichen Plug-in-elektrische Fahrzeuge in 2030 weltweit einen Marktanteil von ca. 30 %. Nemry und Brons (2010) projizieren für Europa sogar einen PEV-Marktanteil von 60 %. Proff und Kilian sehen hingegen auch für Europa ähnlich dem globalen Marktanteile eine PEV-Marktdurchdringung von 30 %.

Die im Rahmen des Projekts interviewten Experten erwarten, dass neue Batterietechnologie erst ab 2020 verfügbar ist und dann den Erfolg von PEV maßgeblich beeinflusst. Es wird damit gerechnet, dass PHEV und BEV ohne monetäre Anreizsysteme erst in 10 bis 15 Jahren gegenüber konventionellen Fahrzeugen wettbewerbsfähig sind (Regionalstudie Japan).

5.3.5 Zentrale Erkenntnisse – Deutschland im internationalen Vergleich

Die Untersuchungen zu den globalen Perspektiven der Elektromobilität haben gezeigt, dass Elektromobilität weltweit als wichtiger Baustein zukünftiger Mobilität betrachtet wird. Durch die Elektromobilität soll die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern reduziert werden, Schadstoff-, CO₂- und Lärmemissionen verringert werden, und langfristig auch ökonomisch effizientere Mobilität ermöglicht werden. Diese Einschätzung hat Wissenschaft, Unternehmen und Regierungen dazu bewegt, Elektromobilität als innovative Technologie zu erforschen, zu entwickeln und zu fördern.

Dabei hat die Entwicklung der Elektromobilität global betrachtet unterschiedliche Ausprägungen. Während in den OECD-Ländern (z. B. Japan, USA, Europa) mit hohem Anteil von privatem Pkw-Verkehr ein Schwerpunkt auf der Entwicklung und dem Einsatz von elektrifizierten Pkw besteht, spielt in Asien die Elektrifizierung von Bussen im ÖPNV und von motorisierter Zweiradverkehr eine größere Rolle.

Die Automobilindustrie in Japan (und z.T. in den USA) hat bei der Entwicklung marktreifer Fahrzeugmodelle zunächst eine Vorreiterrolle übernommen. Der Entwicklungsrückstand wurde von der europäischen Automobilindustrie in den vergangenen Jahren weitgehend aufgeholt; insbesondere bei Herstellern in Frankreich und Deutschland gab es starke Entwicklungen bei den verfügbaren Fahrzeugmodellen, wobei die französischen Hersteller stark von Kooperationen mit japanischen OEMs profitierten. Deutsche Produzenten haben damit in Bezug auf Fahrzeugtechnologien und -modelle im globalen Wettbewerb aufgeschlossen. Dazu konnte auch die systematische und umfassende Förderung von Forschung und Entwicklung einen Beitrag leisten. Im globalen Absatz sind aber japanische Hersteller weiterhin deutlich führend.

Bei der Forschungsförderung zeigt ein Vergleich der Budgets, dass Deutschland unter den europäischen Staaten am stärksten in die Forschung und Entwicklung im Bereich Elektromobilität investiert und international bislang auch im Vergleich zu China und Japan gut aufgestellt ist. In absoluten Summen steht Deutschland hinter der FuE-Förderung der USA zurück, unter Berücksichtigung der Wirtschaftskraft investiert Deutschland jedoch deutlich stärker in die Forschungsförderung zu Elektromobilität. Zudem ist die Beteiligung deutscher Institutionen an europäischen Forschungsprojekten, beispielsweise im Rahmen der Green Cars Initiative, sehr hoch.

Zu den zentralen Forschungsthemen gehört in allen untersuchten Ländern die Batterieforschung. Batterien stellen aktuell den größten Kostenfaktor für Elektrofahrzeuge dar, Energiedichte, Belastbarkeit und Lebensdauer sind weitere Herausforderungen.

Dabei wird häufig sowohl Forschung zur Lithium-Ionen-Technologie betrieben, als auch an der Entwicklung von Post-Lithium-Ionen Batterien gearbeitet. Deutschland konzentriert sich hinsichtlich der Lithium-Ionen Technologie eher auf FuE zur Batterieproduktion sowie zu Sicherheitsaspekten. Da Japan in dieser Batterietechnologie als führend gilt, konzentrieren sich andere Nationen vermehrt auf die FuE von Post-Lithium-Ionen-Batterien. Die Marktreife dieser Batterien ist jedoch erst nach 2020 zu erwarten. In den kommenden Jahren sind daher durch Verbesserung der Batterietechnologie kaum Reichweitensteigerungen abzusehen. Größere Steigerungen können erst mit Post-Lithium-Batterien realisiert werden. Jedoch bieten Effizienzsteigerungen bei verschiedenen Komponenten und im Fahrzeugdesign Potentiale für graduelle Steigerungen in der Reichweite.

Neben der Batterie sind aus diesem Grund Leistungselektronik, Thermomanagement und Leichtbau zentrale Forschungsthemen, zu denen in allen untersuchten Ländern geforscht wird. Die Entwicklung und Markteinführung neuer E-Fahrzeuge durch die deutsche Automobilindustrie führt nicht zwangsläufig zur Stärkung deutscher Produktionsstandorte, da die Modelle häufig im Ausland produziert werden. Auch ist der wachsende chinesische Markt grundsätzlich vielversprechend für deutsche Hersteller, jedoch durch regulative Rahmenbedingungen beschränkt – etwa durch Bindung der Subventionen an lokale Produktion. Heimische Märkte haben in dieser frühen, oftmals durch Subventionen oder Demonstrationsprojekte unterstützten Marktphase noch eine hohe Bedeutung für die Fahrzeughersteller – so dominieren in den meisten Ländern Modelle heimischer Hersteller.

Auch der globale Markt für Elektrofahrzeuge hat sich in den letzten Jahren stark entwickelt. 2009 wurden weltweit erst 50 000 PEVs abgesetzt; 2013 waren es bereits über 200 000.

Deutschland hat hinsichtlich des Marktanteils jedoch einen Aufholbedarf. Mit einem Anteil der PEVs von 0,25 % an den Neuzulassungen liegt Deutschland hinsichtlich der Marktdurchdringung deutlich hinter den USA, Japan und Frankreich – gleichwohl gab es trotz fehlender Kaufanreize eine deutliche Steigerung gegenüber den Vorjahren. Weltweit führende Positionen nehmen Norwegen, Dänemark und die Niederlande ein, die den Kauf von PEVs stark subventionieren und weitere monetäre und nicht-monetäre Anreize geschaffen haben.

Wichtige Hemmnisfaktoren für die Anschaffung von Elektrofahrzeugen sind nach wie vor der Mehrpreis, die begrenzte Reichweite sowie limitierte Infrastrukturverfügbarkeit. Aufgrund dieser Restriktionen liegen häufige Einsatzbereiche von Elektrofahrzeuge aktuell vor allem bei privat genutzten Zweitwagen sowie in Flotten, wodurch hohe Kilometerleistung niedrigere TCO erreicht werden. Aufgrund des hohen Mehrpreises wird beim privaten Einsatz von Elektrofahrzeugen von den Herstellern eher das Premiumsegment adressiert. Neuere Plug-In-Hybride deutscher Modelle der Oberklasse stehen für diese Tendenz. Die US-Marke Tesla zeigt, welche Leistungen und Reichweiten mit rein batterieelektrischen Fahrzeugen heute möglich sind, wenn der Preis keine Rolle spielt. Insgesamt wird eine Erhöhung der Palette an angebotenen Fahrzeugmodellen als wichtiger Faktor für die Marktentwicklung gesehen. Kunden sollten die Wahl zwischen verschiedenen Fahrzeugen und Marken haben, so dass Elektrofahrzeuge nicht mehr als Nischenprodukt, sondern als echte Alternative zum konventionell angetriebenen Auto angesehen wird. Dadurch wird auch das Vertrauen in die Zukunft der Elektromobilität bei den Kunden gestärkt.

Finanzielle Kaufanreize in Form von Subventionen oder Steuernachlässen haben einen großen Einfluss auf Marktdurchdringung, sind aber mit hohem Aufwand öffentlicher Mittel verbunden. Um effektiv zu sein, muss diese Förderung von guten Rahmenbedingungen – hinsichtlich Ladeinfrastruktur, Verbraucherinformation, und flankierender nichtmonetärer Anreize – verbunden sein.

Die stärksten Kaufanreize (in Norwegen, den Niederlanden und Dänemark) werden in Ländern ohne eine relevante Automobilindustrie gewährt, jedoch bestehen Kaufanreize auch in Ländern mit bedeutender Automobilindustrie wie Japan, Frankreich oder den USA. Deutschland bildet hier mit dem Verzicht auf deutliche finanzielle Anreize eine Ausnahme.

Aus Perspektive der Nutzer ist die Zuverlässigkeit des Systems Elektromobilität wichtig. Ein bedeutender Faktor hierfür ist eine verfügbare und zugängliche Ladeinfrastruktur mit standardisierten Ladesystemen. Hinsichtlich der Steckerverbindungen und der Ladespannungen

sind diese Standardisierungen für reguläres Laden inzwischen weitgehend erreicht, wogegen die Harmonisierung von Schnellladesystemen und unterschiedlichen Abrechnungssysteme noch eine Herausforderung darstellt.

Um zuverlässige Lademöglichkeiten zu haben, halten Nutzer sowie potenzielle Nutzer in allen betrachteten Ländern eine dichtere Ladeinfrastruktur für wichtig – auch in Ländern wie Norwegen, wo das Netz bereits heute vergleichsweise dicht ausgebaut ist. Deutschland befindet sich in Bezug auf den Infrastrukturausbau im weltweiten Mittelfeld.

Dabei erfüllt die öffentliche Ladeinfrastruktur meist nur eine Reservefunktion, da sie im Vergleich zum Laden am privaten Stellplatz oder am Arbeitsplatz kaum genutzt werden. Eine wichtigere Bedeutung als ein flächendeckendes Ladenetz könnte daher ein strategisches Netz von Schnellladestationen, etwa an Autobahnraststätten, und die Förderung semi-öffentlicher Stationen (etwa an Einkaufszentren) haben.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die deutsche Strategie zur Elektromobilitätsförderung hinsichtlich von Forschung und Entwicklung sowie zur Erreichung einer Leitanieterschaft im internationalen Vergleich erfolgreich ist, hinsichtlich der Entwicklung eines Leitmarktes aber noch vor großen Herausforderungen steht

6 Materialintensitätsanalysen

O. Soukup (WI), M. Ritthoff (WI), K. Bienge (WI), D. Kreyenberg (DLR), E. Alexopoulou (WI), J. Monscheidt (WI)

6.1 Hintergrund

O. Soukup (WI)

Im Jahr 2009 hat die Bundesregierung im Rahmen ihres nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität die Elektrifizierung des Straßenverkehrs als Thema von hoher strategischer Bedeutung benannt. Sie betont die Potenziale elektrischer Antriebe zur Verringerung der Abhängigkeit von Erdöl sowie zur lokalen Reduktion von CO₂- und Schadstoffemissionen. Der Entwicklungsplan strebt daher bis zum Jahr 2020 das Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen auf Deutschlands Straßen an und hält einen Zuwachs auf über fünf Millionen Fahrzeuge bis 2030 für möglich (Bundesregierung 2009).

Dem Risiko einer bloßen räumlichen Verlagerung von Emissionen soll dadurch Rechnung getragen werden, dass die Förderung der Elektromobilität in Kombination mit einer Energieversorgung aus erneuerbaren Quellen im integrierten Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung (IEKP) verankert wurde (Bundesregierung 2007). Verschiedene Studien haben sich bereits mit der Fragestellung beschäftigt, unter welchen Voraussetzungen elektrische Antriebe im Straßenverkehr unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus von der Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgung der Fahrzeuge hinsichtlich der Treibhausgasbilanz Vorteile gegenüber klassischen verbrennungsmotorischen Fahrzeugen bieten (Notter et al. 2010, Renault 2011).

Für die Umsetzung der Elektromobilitätsstrategien in Deutschland (und weltweit) sind bislang insbesondere Klimaschutz-Kriterien und Abhängigkeiten von Treibstoffimporten politisch maßgeblich. Im Rahmen einer umfassenden Nachhaltigkeitsbewertung der einzelnen Technologien und möglicher Ausbaupfade bedarf es aber darüber hinaus der Berücksichtigung zusätzlicher Kriterien. Wichtige Aspekte sind hierbei z. B. weitere Umweltwirkungen auf Grund von Schadstoffemissionen oder Auswirkungen der Entwicklung von Verkehrssystemen auf die Lebensqualität und den Flächenbedarf in Ballungsräumen. Auch der Ressourcenbedarf, der im Fokus dieser Arbeit steht, ist hier als weiteres relevantes Kriterium zu nennen.

Umfassende Analysen zu den zuvor genannten Aspekten der Ressourceninanspruchnahme, die sowohl verschiedene Antriebstechnologien als auch mögliche langfristige Ausbauszenarien einbeziehen, liegen jedoch bislang nicht vor. Die Auswertung vorliegender Studien hat gezeigt, dass bislang keine Ökobilanzen vollständiger Entwicklungspfade der Elektromobilität – unter Einbeziehung möglicher Fahrzeug- und Batteriekonzepte sowie des zukünftigen Ausbaus der Stromerzeugung und -übertragung – durchgeführt wurden. Ressourcenaspekte werden erwähnt, aber nicht vertiefend im Hinblick auf makroökonomische Knappheitseffekte und Konkurrenzsituationen oder nur unter dem Gesichtspunkt der Ökotoxizität behandelt. Auch stellen Materialintensitätsanalysen, die neben dem direkten auch den indirekten Materialverbrauch eines Produkts ermitteln, keinen Schwerpunkt der bisherigen Untersuchungen dar. Die mögliche dynamische Entwicklung von Ökobilanzen, etwa aufgrund des Einsatzes

anderer Rohstoffquellen, wird bisher ebenfalls nicht systematisch betrachtet, obwohl dieser Aspekt möglicherweise einen erheblichen Einfluss auf die Ökobilanz der Elektromobilität haben kann.

Die vorliegende Studie reduziert die bisherige Bewertungslücke und leistet damit einen Beitrag zur ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbewertung des elektrischen Pkw-Verkehrs. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen es, im Rahmen der angestrebten Entwicklung Deutschlands zum „Leitmarkt für Elektromobilität“ (Bundesregierung 2009) unterschiedlich nachteilige Auswirkungen einer Transformation des Pkw-Verkehrs gleichermaßen zu berücksichtigen.

6.2 Methodischer Aufbau

O. Soukup (WI), M. Ritthoff (WI), K. Bienge (WI)

6.2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel der Analyse ist es, den Bedarf an stofflichen und energetischen Ressourcen sowie die Emissionen von Treibhausgasen (THG) unterschiedlicher Elektromobilitätsstrategien im Bereich des Pkw-Verkehrs bis 2050 abzuschätzen und in Relation zu einer Referenzentwicklung zu betrachten. In diesem Kapitel werden deshalb wesentliche Technologiepfade und Systemkomponenten im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse betrachtet.

Daneben werden auch Versorgungsrisiken (u.a. geologische Verfügbarkeit, Substituierbarkeit und Liefersituation) untersucht und „kritische“ Materialien identifiziert, bei denen es entweder durch begrenztes Vorkommen zu Ressourcenengpässen kommen kann oder bei denen die Umweltbelastung der Gewinnung²⁰ die gesetzten Ausbauziele gefährden könnte. Der Einfluss unterschiedlicher Technologien auf den Bedarf kritischer Ressourcen und erkennbare Optionen zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und von Umweltwirkungen werden zusammenfassend diskutiert.

Der Begriff „Elektromobilität“ bezieht sich im Rahmen der hier vorgenommenen Untersuchungen auf die Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) und beschränkt sich dabei auf vierrädrige Pkw. Weil es Ziel der Studie ist, elektrifizierte und konventionelle Fahrzeuge sowie Pkw-Verkehrsszenarien vergleichend gegenüberzustellen, werden trotz der Schwerpunktsetzung auf elektrifizierte Antriebsstränge auch solche Fahrzeugtypen mit verbrennungsmotorischen Antrieben berücksichtigt, die zur Abbildung heutiger und zukünftiger Flotten relevant sind.

Es bleibt festzuhalten, dass auch andere Fahrzeugsegmente des öffentlichen (z. B. Schienenbahnen) oder Individualverkehrs (z. B. Pedelecs, Leichtfahrzeuge) bereits heute über einen hohen Anteil elektrischer Antriebe verfügen oder entsprechend hohe Potenziale zur Elektrifizierung aufweisen. So hat beispielsweise das E-Bike als bislang einziges (teil)elektrisches Straßenfahrzeug den Übergang in den Massenmarkt bereits bewältigt und weist weiter steigende Verkaufszahlen auf (ZIV 2013). Gegenstand dieser Studie ist jedoch

²⁰ Die Umweltbelastung der Gewinnung wird in diesem Projekt anhand der Ressourceninanspruchnahme abgeschätzt, die je nach Eigenschaften der Rohstoffquelle hinsichtlich Mineralogie, Abraum, Metallgehalt und notwendiger Aufbereitungsverfahren unterschiedlich hoch sein kann.

die automobilen Anwendung der Elektromobilität. Weitere etablierte oder zukünftige Nutzungsmöglichkeiten bleiben deshalb hier unberücksichtigt.

6.2.2 Analyseschritte

Die verschiedenen Teilschritte der Analyse sind zum Überblick in Abb. 6-1 dargestellt und werden im Folgenden beschrieben.

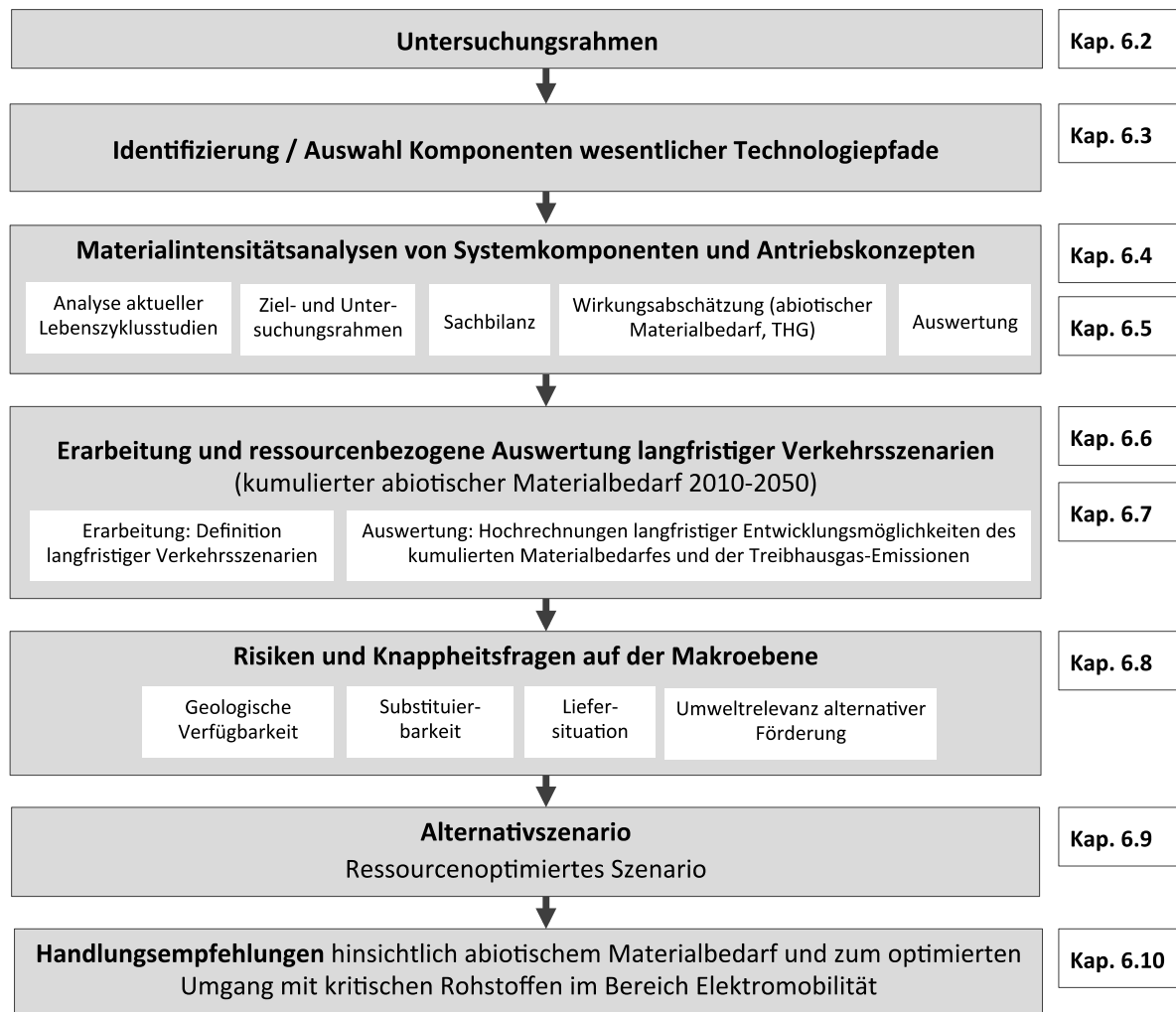


Abb. 6-1 Überblick über die Arbeitsschritte der Materialintensitätsanalyse

- Zunächst wird der Untersuchungsrahmen der vorliegenden Analyse definiert. Zudem werden die verschiedenen berücksichtigten methodischen Ansätze zur Bewertung der Technologien und Verkehrsszenarien voneinander abgegrenzt (Unterkapitel 6.2).
- Anschließend werden die Technologiepfade identifiziert, die für die Entwicklung des Pkw-Verkehrs relevant sind (Unterkapitel 6.3).
- Basierend auf der Literaturanalyse vorhandener Lebenszyklusdaten werden der Stand der Forschung im Themenbereich Umweltwirkungen der Elektromobilität sowie vorhandene ressourcenspezifische Analysen dargestellt. Dies dient auch der Identifizierung zentraler Studien, die als Datengrundlage v.a. für die Modellierung der elektrifi-

zierten Fahrzeugtypen genutzt werden können (Unterkapitel 6.4). Diese werden durch weitere Quellen für Systemkomponenten und Antriebskonzepte ergänzt und fließen in die Materialintensitätsanalyse ein. Die Sachbilanz (Materialinventare) der Systemkomponenten sowie grundlegende Annahmen (z. B. Energiebedarf der Nutzung) werden hergeleitet. Die Berechnungsergebnisse der Materialintensitätsanalyse bezüglich des abiotischen Materialbedarfs und die ermittelten THG-Emissionen werden auf Ebene der einzelnen Antriebskonzepte zusammengefasst (Unterkapitel 6.5).

- Für die Szenariobetrachtungen verschiedener Elektromobilitätspfade werden langfristige Verkehrsszenarien für Deutschland und die Welt definiert, welche die Änderung von Flottenzusammensetzungen nach Antriebskonzepten bei unterschiedlicher Marktdurchdringung elektrischer Antriebe beschreiben (Unterkapitel 6.6). Die Verkehrsszenarien dienen zusammen mit Ergebnissen der Materialintensitätsanalyse auf Fahrzeugebene (Antriebskonzept) dann den Hochrechnungen verschiedener langfristiger Entwicklungsmöglichkeiten von kumulierten Ressourcenverbräuchen und Treibhausgas-Emissionen. Diese werden für jeweils vier nationale und weltweite Pkw-Verkehrsszenarien dargestellt (Unterkapitel 6.7).
- Die in den vorherigen Schritten identifizierten wichtigsten Rohstoffe für Elektromobilität werden in Hinblick auf zu erwartende Versorgungsrisiken untersucht und hinsichtlich ihrer Kritikalität bewertet (Unterkapitel 6.8).
- Auf Grundlage der Ergebnisse der letzten Schritte wird zudem ein Alternativszenario beschrieben, welches auf die Reduktion von Zielkonflikten zwischen THG-Emissionen und Ressourcenbedarf der Elektromobilität abzielt (Unterkapitel 6.9).
- In einem Fazit werden abschließend die Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse zusammengefasst und Handlungsempfehlungen für die weitere Förderung der Pkw-Elektromobilität formuliert (Unterkapitel 6.10).

6.2.3 Bewertungsansätze

Zentrale Aspekte der Analyse sind die Identifikation von lebenszyklusweiten Ressourcenverbräuchen und THG-Emissionen von Pkw-Fahrzeugtypen sowie die Hochrechnung dieser Größen entlang von langfristigen Verkehrsszenarien. Es wird bei der Bewertung der Fahrzeuge und Szenarien auf drei unterschiedliche methodische Ansätze zurückgegriffen:

- **MIPS-Methode („Material-Input pro Service-Einheit“) zur Systembewertung:** MIPS ist ein ökologischer Indikator der Ressourcennutzung über den Lebenszyklus und ist definiert als die Summe der Massen aller natürlichen Rohmaterialien von der Wiege bis zur Bahre, also von der Rohstoffbereitstellung über die Verarbeitung, Nutzung bis zum Recycling oder der Entsorgung, gemessen in der Einheit Tonnen oder Kilogramm. Mittels der Materialintensitätsanalyse (MAIA) kann der Rohstoffbedarf von Produktsystemen berechnet werden. Dazu werden die Materialinputs nach dem MIPS-Konzept getrennt nach fünf verschiedenen Inputkategorien erfasst. Diese fünf Kategorien sind: abiotische Rohstoffe (z.B. Öl, Gas, Metalle), biotische Rohstoffe (z.B. Holz), Bodenbewegung in der Land- und Forstwirtschaft (mechanische Bodenbearbeitung oder Erosion), Wasser und Luft. MIPS berechnet die Ressourcenverbräuche an der Grenze ihrer Entnahme aus der Natur: alle Angaben entsprechen den in der Natur bewegten Mas-

sen, also den genannten Inputkategorien. Alle Materialverbräuche während Herstellung, Nutzung und Entsorgung/Recycling werden auf Ressourcenverbräuche zurückgerechnet (Rohstoffe, Energie, Transporte). Über eine Erfassung dieser Inputs ermöglicht das MIPS-Konzept eine Abschätzung des gesamten Umweltbelastungspotenzials (Schmidt-Bleek et al. 1998, Liedtke et al. 2014).

- **Ermittlung des Treibhauspotenzials zur Systembewertung:** Treibhausgas-Emissionen dienen hierbei als ökologischer Indikator der Klimawirkung über den Lebenszyklus.
- **Identifikation „kritischer“ Materialien:** Gegenstand der Analyse sind diejenigen Materialien, bei denen die Verfügbarkeit oder die Umweltgefährlichkeit der Gewinnung die gesetzten Ausbauziele gefährden könnten. Neben der geologischen Verfügbarkeit wird auch der Zugang zu diesen Rohstoffen bewertet, bestimmt durch die globale Verteilung der Rohstoffe, die Zahl und politische Stabilität der Lieferländer, Nachfrage und Nachfragewachstum nach den Rohstoffen sowie die Recycling- und Substitutionsfähigkeit.

6.2.4 Begriffsdefinitionen

Die in der Materialintensitätsanalyse verwendeten Begriffe werden im Folgenden definiert:

Begriff	Bedeutung
Material-Input (MI)	Im MIPS-Konzept umfasst der MI eines Gutes alle systemweit zu dessen Erschaffung aktiv aus dem natürlichen Zustand entnommenen bzw. dort bewegten abiotischen und biotischen Rohstoffe sowie Wasser und Luft. Sämtliche in einem Produkt oder Prozess enthaltenen Materialien werden bis auf ihren „Ursprung“, d.h. bis an die Grenze des Überganges von der Ökosphäre in die Technosphäre zurückverfolgt.
Material-Input pro Serviceeinheit (MIPS)	MIPS bemisst die Umweltbelastungsintensität von Produkten im Hinblick auf ihren spezifischen Ressourcenverbrauch in allen Lebensphasen. Die Berechnung von MIPS erfolgt durch Bezug des Rohstoffbedarfs, Material-Input (MI) genannt, auf einen bestimmten Nutzen, die Serviceeinheit.
Materialbedarf (abiotisch)	Da die vorliegende Studie den materiellen Ressourcenbedarf thematisiert, beschränkt sich die Analyse auf die Ermittlung des MI für die abiotischen Rohstoffe. Die Ergebnisse der abiotischen Materialintensitätsanalyse werden durch den Indikator abiotischer Materialbedarf ausgedrückt.
Materialzusammensetzung, kumuliert	Die kumulierte Materialzusammensetzung fasst den MI der Herstellungsphase zusammen.
Kumulierter Materialbedarf (abiotisch)	Der kumulierte Materialbedarf fasst den gesamten abiotischen Materialbedarf der Jahre 2011-2050 zusammen.

Tab. 6-1 Begriffsdefinitionen der Materialintensitätsanalyse

6.3 Technologieauswahl

O. Soukup (WI)

6.3.1 Vorgehensweise

Zur Bewertung der Materialintensität und der Treibhauswirkung eines langfristigen Ausbaus der Elektromobilität im Bereich des MIV ist es zunächst erforderlich, die relevanten Komponenten eines zukünftig elektrischen oder teilelektrischen Straßenverkehrs zu ermitteln. Hierfür werden im Rahmen dieses Kapitels diejenigen Technologien identifiziert, die bereits heute wesentlich zur Bereitstellung von Transportdienstleistungen mittels Pkw beitragen oder sich langfristig bis 2050 etablieren könnten. Ziel der Technologieauswahl ist es demnach, die konkreten Untersuchungsgegenstände für die nachfolgenden Analyseschritte dieses Kapitels herzuleiten.

Zu einer ersten Eingrenzung der Fahrzeugtypen, die im Rahmen der ökologischen Bewertung der Elektromobilität in die Untersuchungen einbezogen werden sollen, werden die zu berücksichtigenden Fahrzeugsegmente und Antriebskonzepte bestimmt. Anschließend werden die technischen Eigenschaften, die jeweiligen Komponenten dieser Fahrzeuge sowie relevante Bereitstellungspfade der Antriebsenergie identifiziert.

Die Gesamtheit der berücksichtigten Fahrzeugkomponenten und Varianten der Energiebereitstellung wird zusammenfassend als Technologie- und Prozessmatrix abgebildet, deren Elemente sich zu Typfahrzeugen mit definierter Versorgungsstruktur und bestimmten technischen Eigenschaften (z. B. Fahrzeuggewicht und -effizienz) kombinieren lassen.

6.3.2 Auswahl der Fahrzeugsegmente

Die Gliederung von Fahrzeugmodellen in verschiedene Segmente an Hand optischer, technischer und marktorientierter Merkmale wird beispielsweise durch das Kraftfahrtbundesamt (KBA) zur besseren statistischen Vergleichbarkeit von Fahrzeugdaten durchgeführt. Daneben existieren weltweit je nach Region oder Trägerorganisation weitere Klassifikationssysteme mit hohem Verbreitungsgrad, deren Eingruppierungen sich aber von denen des KBA deutlich unterscheiden können. Hierzu gehören beispielsweise die Klassifizierungen des Euro NCAP (Euro NCAP 2014) oder der Europäischen Kommission (European Commission 1999). Dieser Umstand spiegelt sich auch in vorhandenen Studien zu Szenarien und Marktpotenzialen der Elektromobilität wider, die überwiegend keine einheitlichen Klassifizierungen von Fahrzeugen vornehmen (vgl. z. B. Hacker et al. 2009 und Helms et al. 2011).

Auch in dieser Studie ist es demnach erforderlich, eine eigene Auswahl zu berücksichtigender Klassen von Fahrzeugen zu treffen. Zur vereinfachten Darstellung der Entwicklung von Fahrzeugflotten ist hierbei die Anzahl der zu berücksichtigenden Segmente zu begrenzen, wobei auf der oben bereits erwähnten Segmentierung des KBA aufgebaut wird: Abb. 6-2 zeigt, dass 45 % des Pkw-Bestandes im Jahr 2012 auf die beiden Segmente Kompaktwagen (z. B. VW Golf, Mercedes-Benz A-Klasse) und Mittelklasse (z. B. Audi A4, BMW 3er) entfielen.

Anteile der Fahrzeugsegmente am Pkw-Bestand

in %

2012



2008



Minis

Kleinwagen

Kompaktwagen

Mittelklasse

Obere
Mittelklasse

Geländewagen

Sonstige

Ein Quadrat entspricht einem Prozent

Abb. 6-2 Anteile der Fahrzeugsegmente am Pkw-Bestand

Quelle: (Statistisches Bundesamt 2013)

Auch hinsichtlich der Neuzulassungen in Deutschland im Jahr 2013 können 38 % der Pkw der Kompakt- und Mittelklasse zugeordnet werden, wobei insbesondere die Bedeutung der Kompaktklasse mit 25,6 % als zulassungsstärkstes Segment hervorzuheben ist (KBA 2014d).

Die Segmente Kompaktwagen und Mittelklasse gewährleisten demnach eine relativ gute Abdeckung des heutigen und zukünftigen Pkw-Bestandes. Sie werden deshalb für diese Studie zu einem „mittleren Segment“ zusammengefasst, welches im Weiteren als repräsentatives Segment für die Gesamtflotte verwendet wird. Es wird hier also vereinfachend angenommen, dass die betrachteten Flotten ausschließlich aus Fahrzeugen dieses Segments bestehen.

6.3.3 Auswahl von Antriebskonzepten

Im Anschluss an die zuvor beschriebene Auswahl eines repräsentativen Fahrzeugsegments werden die zu berücksichtigenden Antriebskonzepte definiert. Im Pkw-Bereich wird die Unterscheidung dieser Konzepte in verfügbaren Szenario-, Marktpotenzial- und Life-Cycle-Assessment (LCA)-Studien überwiegend einheitlich gehandhabt (vgl. z. B. DIW 2010 und Huss et al. 2013). Die gängige Differenzierung konventioneller und elektrischer Antriebe wird daher auch hier übernommen und ist in Abb. 6-3 dargestellt. Die Kombinationen aus Fahrzeugsegment und Antriebskonzept werden im Rahmen dieser Untersuchung als „Fahrzeugtypen“ bezeichnet - also bilden z. B. batterieelektrische Fahrzeuge des mittleren Segments einen Fahrzeugtyp.

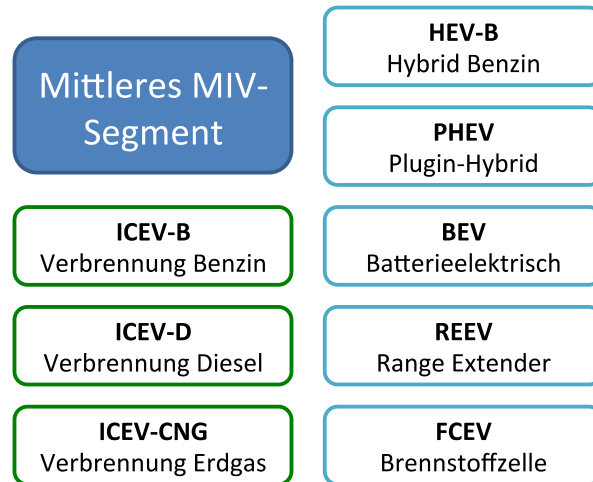


Abb. 6-3 Im Rahmen dieser Studie berücksichtigte Antriebskonzepte des mittleren Pkw-Segments

Die Folgende Auflistung beschreibt die im Rahmen dieser Untersuchung berücksichtigten Konzepte. Sie ordnet diese zudem grob hinsichtlich ihrer heutigen und zukünftigen Marktbedeutung ein, die z. B. an Hand von Kriterien wie Marktpotenzial, Neuzulassungen und Entwicklung des Fahrzeugbestandes abgeschätzt werden kann. Verschiedene Potenzialstudien, die eine Quantifizierung dieser Größen vorgenommen haben, sind zusammenfassend im Anhang aufgeführt (siehe Anhang 10). Als Vergleichsgröße sei hier der zum 1. Januar 2012 in Deutschland zugelassene Gesamtbestand an Personenkraftwagen in Höhe von ca. 43 Mio. Fahrzeugen genannt (KBA 2012). Die Anzahl der Pkw-Neuzulassungen in Deutschland wird für das Jahr 2010 auf ca. 2,9 Mio. Fahrzeuge beziffert (KBA 2011).

Internal Combustion Engine Vehicles (ICEV) sind Fahrzeuge mit konventionellem Verbrennungsmotor. Sie werden weiter unterschieden nach ICEV-B (Benzin), ICEV-D (Diesel) und ICEV-CNG (Compressed Natural Gas/Erdgas).

Der Verbrennungsmotor stellt in allen Pkw-Segmenten heute eine etablierte Technologie dar. Vorhandene Marktszenarien zur Elektromobilität gehen von Effizienzsteigerungen und damit einer zukünftig weiterhin hohen Marktdurchdringung solcher Antriebe aus (Buchert et al. 2011). Es wird deshalb hier in den zuvor genannten Segmenten eine hohe Relevanz auch mit Hinblick auf zukünftige Entwicklungen ausgegangen. Allerdings beschreiben einige Quellen (Konietzko & Gernuks 2011, DLR 2012) unter gewissen Rahmenbedingungen langfristig betrachtet einen erheblichen Bedeutungsverlust von ICEV ohne elektrische Unterstützung. Diese Möglichkeit wird auch in den Verkehrsszenarien in Unterkapitel 6.6 berücksichtigt.

Hybrid Electric Vehicles (HEV) umfassen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor als Hauptantrieb und unterstützendem Elektroantrieb, der durch Bremsenergieerückgewinnung gespeist wird (Mild-Hybrid ohne und Full-Hybrid mit rein elektrischem Betrieb auf Kurzstrecken).

Nach Helms et al. (2011) sind Hybrid-Pkw mit kleinen Hochleistungsbatterien bereits am Markt verfügbar, der Übergang zum Massenmarkt wird kurzfristig erwartet. Konietzko & Gernuks (2011) rechnen insbesondere in einem moderaten Szenario neben Antrieben mit Verbrennungsmotor mit einer Dominanz von HEV mit 20 Mio. (Welt) und 3,5 Mio. (Europa) Neuzulassungen in 2025 sowie 60 Mio. (Welt) und 6 Mio. (Europa) Neuzulassungen in 2050. Auch Berechnungen des DLR mit Hilfe des Fahrzeugtechnik-Szenariomodells VECTOR21 haben für kleine, mittlere und große HEV eine hohe Relevanz hinsichtlich der Neufahrzeuge im deutschen Markt ab ca. 2020 ergeben (DLR 2012). Deren Verbleib im Markt bis 2040 ist

jedoch in diesen Rechnungen stark von Rahmenbedingungen wie Ölpreisfad und Kaufanreizen für stärker elektrifizierte Fahrzeuge (BEV, PHEV) abhängig.

Plugin-Hybrid Electric Vehicles (PHEV) sind Fahrzeuge mit Verbrennungs- und Elektromotor, die auf Kurzstrecken einen rein elektrischen Betrieb ermöglichen (größere Entfernungen als HEV) und deren Batterie sowohl über Rekuperation als auch über das Stromnetz geladen werden können.

Nach Hacker et al. (2009) dominieren insbesondere mittlere und große, aber auch kleine PHEV den Markt und Bestand der Elektrofahrzeuge in Deutschland schon mittelfristig (mit je etwa 200 000 Neuzulassungen in 2025 und steigender Bedeutung bis 2030). Im Bereich teilelektrischer Pkw mit mittlerer Kapazität von 5-25 kWh (PHEV) sind nach Helms et al. (2011) erste Serienfahrzeuge auf dem Markt verfügbar, Massenverfügbarkeit wird nach 2015 erwartet. Dies wird auch in den Szenariorechnungen von DLR (2012) angenommen, die in beiden berechneten Varianten relevante Potenziale für PHEV in allen Pkw-Größenklassen im Zeitraum 2025-2040 zeigen.

Battery Electric Vehicles (BEV) sind Fahrzeuge mit rein elektrischem Antrieb, deren Akkumulatoren über das Stromnetz und zusätzlich per Rekuperation geladen werden.

Gemäß Helms et al. (2011) sind vollelektrische Pkw mit mittlerer Kapazität (5-25 kWh) bereits in Form erster Serienfahrzeuge verfügbar, wobei eine Massenverfügbarkeit nach 2015 erwartet wird. Aus Berechnungen von DLR (2012) ergeben sich ab 2025 hohe Markt- und Bestandsanteile für BEV aller Pkw-Größenklassen, die bis 2040 insbesondere im Szenario mit Kaufanreizen und hohem Ölpreis auf ca. 70 % Markt- und 30 % Bestandsanteil ausgebaut werden können.

Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) verfügen wie batterieelektrische Fahrzeuge über einen rein elektrischen Antrieb, der seine Traktionsenergie jedoch mit Hilfe von Brennstoffzellen aus Wasserstoff gewinnt.

Die Potenziale von Brennstoffzellenantrieben werden in vielen aktuellen Studien nicht als separate Kategorie ausgewiesen oder im Vergleich zu anderen elektrischen Antriebssystemen als gering eingeschätzt (vgl. Buchert et al. 2011, Hacker et al. 2009, DLR 2012). Auch im Pkw-Bereich existieren bislang nur einige wenige Kleinserienfahrzeuge (z. B. die B-Klasse F-CELL von Mercedes Benz). Nach DCTI (2010) stellen hohe Anschaffungspreise, fehlende Treibstoffinfrastruktur sowie die energieintensive Wasserstoffherstellung wesentliche Hindernisse dar. Die fehlende Infrastruktur beschreibt auch ESMT (2010) als relevantes Markthemmnis. Weil der Brennstoffzellenantrieb helfen kann, bestehende Reichweitenprobleme batterieelektrischer Antriebe zu lösen, wird hier eine größere Relevanz für schwere Fahrzeuge angenommen, die tendenziell eher auf Langstrecken eingesetzt werden.

Range Extender Electric Vehicle (REEV) sind Fahrzeuge mit elektrischem Hauptantrieb und Verbrennungsmotor und Generator zum Nachladen der Akkumulatoren.

Range Extender sind nach eigener Einschätzung relevant für solche Fahrzeuge, die auch auf eine hohe Reichweite angewiesen sind. Mit dem Opel Ampera existiert in der Kompaktklasse seit 2012 ein erstes entsprechendes Serienfahrzeug auf dem deutschen Markt. Nach DLR (2012) ist die Bedeutung von REEV in beiden berechneten Szenarien geringer im Vergleich zu BEV und PHEV.

6.3.4 Technische Eigenschaften und Komponenten der Typfahrzeuge

Es wurde zuvor bereits dargestellt, welche Fahrzeugtypen in den Untersuchungen der weiteren Arbeitsschritte dieses Kapitels berücksichtigt werden sollen. Um diese Fahrzeuge über ihren Lebenszyklus hinweg bewerten zu können, ist zudem eine weitere Präzisierung dieser Festlegung erforderlich. Hierzu gehört einerseits eine Festlegung von technischen Basisparametern der betrachteten Fahrzeuge, andererseits auch eine Aufschlüsselung der Fahrzeuge nach zentralen Komponenten. Dies wird im Folgenden beschrieben.

Die für die Durchführung der MAIA erforderlichen technischen Parameter der Fahrzeuge beruhen auf Huss et al. (2013). Hierbei handelt es sich insbesondere um das Gewicht des Gesamtfahrzeugs und einzelner Komponenten sowie um den jeweiligen Bedarf an Traktionsenergie. Huss et al. (2013) weisen hier zunächst für die verschiedenen Antriebskonzepte entsprechende Daten für ein Basisjahr 2010 aus. Diese werden zudem auf Grundlage eigener Expertenschätzungen hinsichtlich zukünftiger technologischer Entwicklungen für einen Zeitraum „2020+“ fortgeschrieben.

Für die langfristige Entwicklung nach 2020, zu der Huss et al. (2013) keine weiteren Abschätzungen vornimmt, werden hier die folgenden eigenen Annahmen getroffen: Gegebenenfalls in Huss et al. (2013) im Zeitraum 2010-2020 ausgewiesene prozentuale Gewichtsreduktionen werden gleichermaßen auch für 2020-2030 angenommen (vgl. Anhang 10C). Die Gewichtsangaben für 2040 und 2050 bleiben dann gegenüber 2030 konstant, es werden also keine weiteren Gewichtsreduktionen erwartet. In Hinblick auf die weiteren technischen Parameter (insbesondere den Bedarf an Antriebsenergie) werden dagegen keine weiteren Veränderungen angenommen. Die entsprechenden Parameter bleiben demnach gegenüber den Annahmen für 2020 unverändert.

Auch die Aufschlüsselung der Fahrzeuge in zentrale Komponenten basiert überwiegend auf der Struktur der in Huss et al. (2013) ausgewiesenen Massenbilanzen der Fahrzeuge sowie auf Angaben aus Notter et al. (2010). Es wird hier zwischen folgenden Komponenten unterschieden (für weitere Erläuterungen s. Unterkapitel 6.5):

- Glider (Masse des Fahrzeugs ohne Antriebsstrang und Energiespeicher)
- Verbrennungsmotor (Diesel, Benzin, Erdgas)
- Restantriebsstrang
- Energiespeicher (Kraftstofftank, Traktionsbatterie)²¹
- Elektromotor
- Leistungselektronik
- Leitungssatz
- Generator des REEV
- Brennstoffzelle

²¹ Das Themenfeld Energiespeicher ist der STROM Begleitforschung EMOTOR des Fraunhofer ISI zugeordnet und damit nicht originärer Bestandteil der STROMbegleitung durch DLR und WI. Dennoch ist es mit Hinblick auf die ökobilanziellen Betrachtungen dieses Kapitels erforderlich, Energiespeicher in den Analysen zu berücksichtigen. Hierzu hat auch eine Auswertung der Ergebnisse der EMOTOR Begleitforschung stattgefunden.

Die Massen und technischen Parameter dieser Komponenten stellen die spätere Basis für die Herleitung der Materialinventare der Fahrzeugtypen dar (s. hierzu Unterkapitel 6.4).

Für einige der Komponenten bestehen derzeit grundlegend unterschiedliche technologische Ausprägungen oder es ist zu erwarten, dass derzeit etablierte Technologien langfristig durch konkurrierende Konzepte verdrängt oder maßgeblich weiterentwickelt werden. Hinweise auf entsprechend relevante Technologien liefert hier auch die Trendanalyse zu Fahrzeugtechnik und -konzepten in Unterkapitel 4.2, die technologische und marktliche Trends für verschiedene Komponenten untersucht. Für die im Folgenden genannten Komponenten werden entsprechende Festlegungen der zu berücksichtigenden Ausprägungen in der Herleitung von Materialinventaren berücksichtigt. Hier nicht aufgeführte Technologien werden auf Basis generischer Materialinventare berücksichtigt. Weitere Erläuterungen zu diesen Technologien finden sich in Unterkapitel 6.5.

Elektromotor

Die Trendanalyse Fahrzeugtechnik und -konzepte in Abschnitt 4.1.3 hat bereits gezeigt, dass permanenterregte elektrische Synchronmaschinen (PSM) bei heutigen xEVs klar dominieren. Demnach verfügen etwa 95 % aller Fahrzeugneuvorstellungen im Zeitraum 2003-2013 über PSM. Asynchronmaschinen (ASM) haben dagegen nur in wenige Fahrzeugen Einzug gehalten - werden aber mit zunehmendem Elektrifizierungsgrad etwas häufiger berücksichtigt. So verfügen ca. 12 % der im oben genannten Zeitraum neu vorgestellten BEV über ASM. Bei Hybriden spielt die höhere Leistungsdichte von PSM eine wichtige Rolle, da auf Grund der Vielzahl von verwendeten Komponenten hohe Anforderungen an die Kompaktheit der Elektromotoren gestellt werden. Der Anteil an ASM bei diesen Fahrzeugen ist daher zur Zeit vernachlässigbar gering. Auch die Untersuchung der Forschungsaktivitäten in Abschnitt 4.2.2 legen den Schluss nahe, dass die Dominanz von PSM in den kommenden Jahren Bestand haben wird. Die Patentanalysen, welche ein Indiz für die Aktivitäten der Industrie und somit für die Technologien der nächsten und übernächsten Generation sein können, zeigen, dass im Zeitraum 2002-2012 84 % der weltweiten Patente zu Motorbauformen im Bereich elektrifizierter Pkw Synchronmaschinen zum Gegenstand haben. Eine leichte Abkehr von dieser Entwicklung ist erst bei den Publikationsanalysen zu erkennen. Hier können verstärkte Aktivitäten in Richtung alternativer Bauweisen identifiziert werden.

In Anlehnung an die Ergebnisse der Trendanalyse sowie der Patent- und Publikationsanalyse wird im Rahmen der MAIA davon ausgegangen, dass es sich bei den Elektromotoren aller xEV zunächst ausschließlich um PSM handelt. Allerdings wird weiterhin auch berücksichtigt, dass im Rahmen früherer Forschungsprojekte (vgl. z. B. Wuppertal Institut 2014, Angerer et al. 2009, European Parliament 2011, Moss et al. 2013) Magnetwerkstoffe bereits als kritische Materialien identifiziert wurden und die Substitution auf Komponentenebene durch ASM zumindest eine technisch geeignete Möglichkeit darstellt, strategische Nachteile durch entsprechende Preisanstiege oder Lieferengpässe langfristig zu umgehen. Es wird deshalb hier angenommen, dass ASM ab 2030 neben PSM zusätzlich eine zunehmende Rolle als Motor-technologie spielen wird (vgl. Unterkapitel 6.3).

Weiterführende Informationen zu Aufbau und Funktionsweise verschiedener Ausführungen von Elektromotoren finden sich in Abschnitt 4.2.2.

Energiespeicher (Batterien)

In Unterkapitel 4.1 wurde bereits die eingesetzten Energiespeicher in elektrifizierten Fahrzeugen analysiert. Dort wird deutlich, dass ab 2007 Batterien mit Li-Ionen-Technologie (Li-Ion) deutlich dominieren und insbesondere bei Fahrzeugen mit externer Lademöglichkeit fast ausschließlich eingesetzt werden. Lediglich Fahrzeuge mit eher geringem Elektrifizierungsgrad (Mild- und Voll-Hybride) nutzen dagegen auch andere Technologien (insbesondere Nickel-Metall-Hydrid, NiMH) in signifikantem Umfang.

Auch die STROM-Begleitforschung EMOTOR des Fraunhofer ISI (Hettesheimer et al. 2013) kommt zu diesem Schluss. Dort wird auch festgestellt, dass hohe Anforderungen an die Batteriekapazität in PHEV und BEV derzeit nur durch Li-Ion-Batterien mit ihrer hohen Energiedichte erfüllbar sind. Als State-of-the-art bei Li-Ion wird dabei NCM (Nickel-Cobalt-Mangan) und LFP (Lithium-Eisen-Phosphat) bezeichnet. Zudem wird als Folge ausgereizter Technologieentwicklung bei NiMH ein deutlicher Anstieg der Nutzung von Li-Ion auch bei HEV erwartet.

Zur Einschätzung zukünftiger Entwicklungen von Batteriespeichern für die Elektromobilität greift die STROM-Begleitforschung EMOTOR auf die Ergebnisse eines Expertenpanels, einer Publikationsanalyse sowie einer Auswertung der in einschlägigen Studien berücksichtigten Zukunftstechnologien zurück. Demnach besteht die Möglichkeit, dass aktuelle Li-Ion-Batterien langfristig durch konkurrierende (disruptive) Technologien verdrängt werden. Entsprechende Potenziale werden vor allem Li-Schwefel-Batterien (LiS), aber auch Li-Luft-Batterien zugeschrieben. Diese Konzepte, die sich durch einen deutlichen Technologiesprung hinsichtlich der Energiedichte von heutigen Batterien abgrenzen, sind derzeit aber noch Gegenstand der Grundlagenforschung, so dass eine Markteinführung nicht vor 2030 zu erwarten ist. (Fan et al. 2013, Sauer & Thielmann 2013)

Weil Li-Ion-Batterien demnach für alle elektrischen Antriebskonzepte voraussichtlich noch lange marktbeherrschend sein werden und im Fall von HEV noch weiter an Bedeutung gewinnen werden, wird für die Analysen im Rahmen dieser Studie die folgende Annahme getroffen: Alle berücksichtigten batterieelektrischen Antriebskonzepte nutzen über den gesamten Betrachtungszeitraum Lithium-Ionen-Batterien. Hierbei wird auf Batterien vom Typ Lithium-Mangan-Oxid (LMO) zurückgegriffen, die beispielsweise im Nissan Leaf genutzt werden und für die eine gute Datenbasis besteht (s. Abschnitt 6.5.2). Weitere aktuelle Fahrzeugbatterie-Technologien werden hier nicht berücksichtigt: Zwar bezeichnet etwa Sauer & Thielmann (2013) Li-Ion-Batterien vom Typ NCM (Nickel-Cobalt-Mangan) und LFP (Lithium-Eisen-Phosphat) als State-of-the-Art heutiger Li-Ion-Batterien. Jedoch wird auch in Notter et al. (2010) der Ökobilanzierung batterieelektrischer Fahrzeuge eine LMO-Batterie zugrunde gelegt. Es wird dort davon ausgegangen, dass Nickel und Cobalt heutiger Batterien bereits in naher Zukunft aus Kosten- und Verfügbarkeitsgründen durch Mangan ersetzt werden. Die Sensitivitätsanalyse verschiedener Li-basierter Kathodenmaterialien wie Nickel, Kobalt oder Eisenphosphat zeigt zudem nur geringfügige Änderungen verschiedener Umweltwirkungen. Im Rahmen einer generischen Abschätzung wird deshalb als vertretbar eingeschätzt, die Vielfalt heutiger Materialkombinationen unberücksichtigt zu lassen, um die Komplexität der Bewertung von Batterien zu reduzieren. Post-Li-Ion-Batterien werden ebenfalls nicht berücksichtigt, weil Unsicherheiten hinsichtlich der Markteinführung bestehen und laut Hettesheimer et al. (2013) zu Batterien der vierten Generation (LiS, Li-Luft) noch keine LCA-Daten vorliegen.

Energiespeicher (Kraftstofftanks)

Für den gesamten Betrachtungszeitraum wird davon ausgegangen, dass Tanks für Flüssigkraftstoffe aus gehärtetem Kunststoff bestehen. Wasserstoff wird im Automobilssektor hauptsächlich bei 350 oder 700 bar gespeichert (U.S. Department of Transportation 2010). In diesem Druckbereich kommen ausschließlich Kohlefaserverbundwerkstoffe (CFK) zum Einsatz. Analog zu Huss et al. (2013) wird angenommen, dass der Tank für Erdgasfahrzeuge zunächst aus Stahl besteht und ab 2020 ebenfalls ein Tank aus Verbundwerkstoffen eingesetzt wird.

Brennstoffzelle

Sauer & Thielmann (2013) kommen zu der Einschätzung, dass Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (Proton-Exchange-Membrane Fuel Cell, PEM-FC) mit Wasserstoff-Drucktank heute und in Zukunft eine relevante Technologie für Energiespeicher der Elektromobilität darstellen. Diese Technologie wird deshalb auch für die Ableitung von Materialinventaren der FCEV verwendet.

6.3.5 Prozessketten und Technologiepfade

Um eine lebenszyklusweite Betrachtung von Fahrzeugen und Szenarien zu ermöglichen, werden nicht nur die Fahrzeuge selbst, sondern alle für ihre Herstellung und ihren Betrieb erforderlichen Aufwendungen berücksichtigt und als Pfade dargestellt. Hierzu gehören neben verschiedenen Fahrzeugkonzepten, Antriebsarten und Energiespeichern auch die Bereitstellung der Traktionsenergie z. B. durch einen Kraftwerkspark oder durch Raffinerien sowie die Förderung und Verarbeitung stofflicher und energetischer Ressourcen.

Flüssigkraftstoffe und Biokraftstoff-Anteile

Hinsichtlich der zukünftigen Zusammensetzung der Flüssigkraftstoffe Benzin und Diesel sind insbesondere die zu erwartenden Beimischungsquoten für Biokraftstoffe zu definieren. Hier bestehen jedoch erhebliche Unsicherheiten: Neben technischen Problemen mit E10 (DAT 2013) haben auch Diskussionen über ein begrenztes Kraftstoff-Potenzial aus nachhaltiger Biomasse (vgl. z. B. Nitsch et al. 2012) zu einer Relativierung von ursprünglichen Vorgaben zur Steigerung der entsprechenden Kraftstoff-Anteile geführt.

Hier wird deshalb für den gesamten Betrachtungszeitraum von einer Betankung mit heute üblichen Kraftstoffmischungen ausgegangen. Hierbei handelt es sich um den Diesel-Regelkraftstoff D7 (7 Vol% Biodiesel) sowie den Otto-Kraftstoff E5 (5 Vol.-% Ethanol aus Biomasse). Die Wahl des Ottokraftstoffs weicht dabei vom aktuellen Regelkraftstoff E10 ab. Dies ist damit zu begründen, dass die Marktanteile von E10 in Deutschland weit hinter den Erwartungen geblieben sind, während E5 in 2013 mit einem Marktanteil von ca. 80 % weiterhin den Ottokraftstoff-Markt dominiert (BAFA 2014).

Wasserstoff

Gemäß der Studie „Energiezukunft 2050“ (FfE 2009) wird die Herstellung von Wasserstoff derzeit durch die katalytische Umsetzung von leichten Kohlenwasserstoffen mit Wasserdampf (Dampfreformierung von Erdgas) dominiert. Allerdings erwartet die Studie, dass dieser Bereitstellungspfad zukünftig an Bedeutung verliert, während gleichzeitig die Anteile der Elektrolyse an der gesamten H₂-Erzeugung steigen – von ca. 25 % in 2010 auf etwa 68 %

im Jahr 2050 (vgl. Abb. 6-4). Teske et al. (2012), IEA (2012) und Nitsch et al. (2012) gehen davon aus, dass die elektrolytische H₂-Erzeugung zukünftig durch Umwandlung erneuerbarer (Überschuss-)Strommengen erfolgen wird.

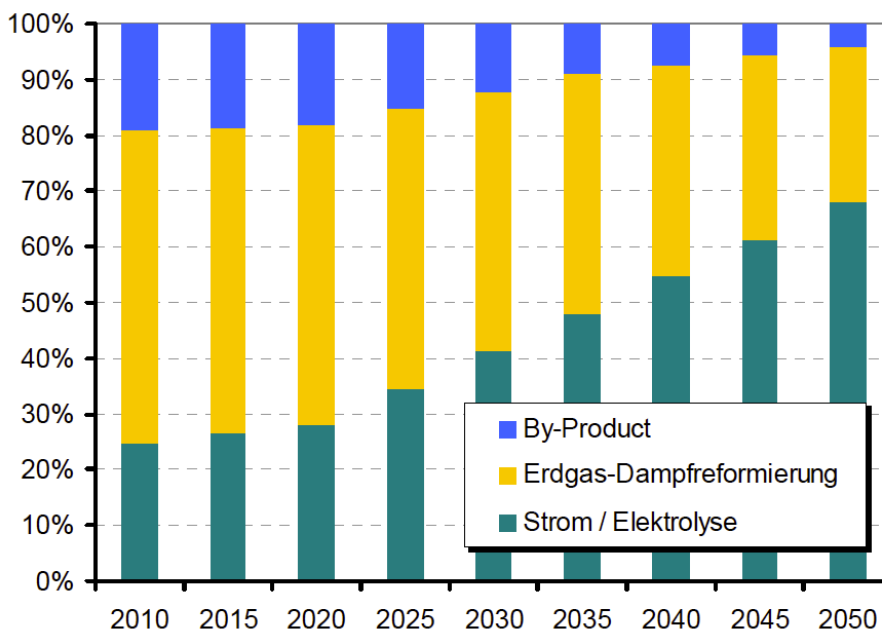


Abb. 6-4 Angenommene Entwicklung der Anteile verschiedener Wasserstoffbereitstellungspfade an der Wasserstoffherzeugung

Quelle: (FfE 2009)

Auf dieser Grundlage wird hier angenommen, dass die Herstellung von Wasserstoff bis zum Stützjahr 2020 ausschließlich auf der Dampfreformierung von Erdgas beruht. Ab 2030 wird von einem deutlichen Anstieg des Herstellungsanteils durch alkalische Elektrolyse mittels Windstrom ausgegangen. Dabei wird für 2030 ein Anteil von 50 % und für 2040 eine vollständige Abdeckung des Wasserstoffbedarfs durch die alkalische Elektrolyse angesetzt.

Erdgas

Eine alternative Einsatzmöglichkeit für regenerativen Wasserstoff ist die Aufbereitung zu synthetischem Erdgas zur Nutzung bestehender Infrastrukturen. Die Wirtschaftlichkeit dieses Konversionsschrittes ist aber von vielen Aspekten abhängig, wie z. B. zukünftiger Speicherkosten für Wasserstoff gegenüber zusätzlichen energetischen Verlusten der Methanisierung oder auch der Technologieentwicklung im Bereich der FCEV (vgl. z. B. Teske et al. 2012).

Es wird hier deshalb davon ausgegangen, dass Wasserstoff aus erneuerbarem Überschussstrom im Verkehrssektor ausschließlich in FCEV genutzt wird, während für die Erdgas-Bereitstellung über den gesamten Betrachtungszeitraum der heutige Erdgas-Produktionsmix ab Tankstelle berücksichtigt wird. Zukünftige Veränderungen der Erdgas-Prozessketten (z. B. durch Veränderung der Lieferstruktur, weitere Transportentfernungen oder den Einsatz von verflüssigtem Erdgas, siehe Arnold et al. 2010) werden vereinfachend nicht berücksichtigt.

Elektrizität

Steigende Anteile erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in Deutschland und weltweit sind mit relevanten Auswirkungen auf die Materialintensität und die THG-Emissionen insbesondere der Nutzung von Elektrofahrzeugen verbunden.

Als Grundlage für die Modellierung des Strombezugs der Herstellung und der Nutzungsphase von Fahrzeugen werden deshalb Annahmen zur langfristigen Entwicklung der Stromerzeugung in den betrachteten Ländern aus der verfügbaren Fachliteratur übernommen. Bei der Auswahl geeigneter Szenarien wurde darauf geachtet, dass diese bestimmte Anforderungen erfüllen. Hierzu gehören die Aktualität der Studie, die Abdeckung eines Betrachtungszeitraums bis 2050, die detaillierte Ausweisung der Anteile verschiedener konventioneller und erneuerbarer Technologien an der Bruttostromerzeugung für alle benötigten 10-Jahres-Schritte sowie hohe Anteile erneuerbarer Stromerzeugung im Zieljahr 2050. Bei der Auswahl eines geeigneten Energieszenarios für Deutschland wurde auch die im Rahmen des Projekts KRESSE (Wuppertal Institut 2014) durchgeführte Szenarioanalyse berücksichtigt.

Für Deutschland treffen diese Kriterien auf die Studie „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“ zu, die von DLR, Fraunhofer IWES und IfnE für das BMU erstellt wurde und Anfang 2012 erschienen ist (Nitsch et al. 2012). Die hier angenommene Langfristentwicklung der Stromerzeugung basiert dabei auf dem zentralen „Szenario 2011 A“ dieser Studie, aus dem sich die erforderlichen Angaben zum Erzeugungsmix sowohl für konventionelle als auch für erneuerbare Technologien für die benötigten Zehnjahresschritte ableiten lassen.

Für den globalen Stromerzeugungsmix bis 2050 wird dagegen auf die Studie *energy [r]evolution* von Greenpeace und EREC aus dem Jahr 2012 zurückgegriffen (Teske et al. 2012). Für die Modellierung werden dabei die Daten aus dem „energy revolution scenario“ verwendet.

Neben den zuvor genannten Annahmen zum Erzeugungsmix wird in einer Sensitivitätsrechnung auch die hypothetische Möglichkeit berücksichtigt, dass der Strombedarf von Elektrofahrzeugen vom Basisjahr an vollständig durch zusätzlich in das Stromnetz eingespeiste Windstrom-Mengen abgedeckt wird („Strommix 100 % REG“).

6.3.6 Fazit der Technologieauswahl

Im Rahmen dieses Kapitels wurde bislang festgelegt, dass sich die nachfolgenden Analysen auf Pkw des mittleren Fahrzeugsegments beziehen und dabei drei konventionelle sowie fünf elektrifizierte Antriebskonzepte berücksichtigen. Zudem wurde konkretisiert, welche technischen Eigenschaften die entsprechenden Typfahrzeuge aufweisen, aus welchen wesentlichen Komponenten sie aufgebaut sind und welche Bereitstellungspfade für die benötigte Antriebsenergie zu berücksichtigen sind.

Die Gesamtheit der identifizierten Fahrzeugkomponenten und Varianten der Energiebereitstellung wird zusammenfassend in der nachfolgenden Tab. 6-1 als Technologie- und Prozessmatrix abgebildet, deren Elemente sich wie dargestellt zu allen Typfahrzeugen dieser Analyse mit jeweils definierter Versorgungsstruktur und technischen Eigenschaften (z. B.

Fahrzeuggewicht und -effizienz) kombinieren lassen. Dabei wird unterschieden zwischen solchen Elementen, die bereits heute oder voraussichtlich zukünftig zur Verfügung stehen.

Systemkomponente	Antriebskonzept für Fahrzeuge des mittleren Segments							
	Verbrennung			Elektromobilität				
	ICEV-B	ICEV-D	ICEV-CNG	HEV	PHEV	REEV	BEV	FCEV
Glider	x	x	x	x	x	x	x	x
Verbrennungsmotor	x	x	x	x	x	x		
Restantriebsstrang	x	x	x	x	x	x	x	x
Tank (Kunststoff)	x	x		x	x	x		
Tank (Stahl)			x					
Tank (CFK)			o					x
Elektromotor (PSM)				x	x	x	x	x
Elektromotor (ASM)				(o)	(o)	(o)	(o)	(o)
Leistungselektronik				x	x	x	x	x
Leitungssatz				x	x	x	x	x
Batterie Li-Ion (LMO)				x	x	x	x	x
Generator						x		
Brennstoffzelle (PEMFC)								x
Energiebereitstellung								
Benzin E5	x							
Diesel D7		x						
Erdgas			x					
H2 Dampfpref. Erdgas								x
H2 reg. Elektrolyse								(o)
Strommix Deutschland				x	x	x	x	
Strommix Welt				x	x	x	x	
Strommix 100% REG				(x)	(x)	(x)	(x)	
Entsorgung	x	x	x	x	x	x	x	x

Tab. 6-2 Antriebskonzepte und deren Zusammensetzung aus Systemkomponenten

Bedeutung der Symbole: **x**: berücksichtigt ab heute, **(x)**: berücksichtigt ab heute als alternative Option, **o**: ab 2030 bisherige Technologie ersetzend, **(o)** ab 2030 als zusätzliche Option

Die Elemente der Matrix in Tab. 6-2 konkretisieren die Untersuchungsgegenstände der nachfolgenden Arbeitsschritte der THG- und Materialintensitätsanalyse. Ihre Hinterlegung mit Lebenszyklus-Inventardaten (LCI-Daten) wird in den beiden folgenden Unterkapiteln 6.4 und 6.5 beschrieben.

6.4 Analyse bestehender Lebenszyklusstudien

K. Bienge (WI), J. Monscheidt (WI)

6.4.1 Vorgehensweise und Zielsetzung

Lebenszyklusanalysen sind etablierte Instrumente zur Analyse und Bewertung sowie zum Vergleich von Umweltwirkungen von Produkten, Technologien, aber auch ganzen Unternehmen. Abhängig von der Fragestellung und Betrachtungstiefe können unterschiedliche Analyse Kriterien und Umweltwirkungskategorien im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse eingesetzt werden. So kann beispielsweise neben dem kumulierten Energieaufwand (KEA), das Treibhauspotential (THG; *global warming potential*, GWP) oder der Ressourcenbedarf im Fokus einer LCA stehen. Häufig werden dabei die Umweltwirkungen und der Bedarf an stofflichen und energetischen Ressourcen unterschiedlicher Technologiestrategien in Relation zu einer Referenzentwicklung betrachtet und bewertet.

Im Rahmen dieser Studie wurde eine Analyse über den gesamten Lebensweg durchgeführt, d.h. neben der Herstellung der Fahrzeuge wurde die Nutzungsphase inklusive der Energiebereitstellung als auch die Entsorgung der Materialien untersucht. Die untersuchten Antriebskonzepte und deren technische Parameter (z. B. Gewicht der Systemkomponenten) orientieren sich dabei an der Studie „*Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context*“ der Gemeinsamen Forschungsstelle (Joint Research Centre) der Europäischen Kommission (Huss et al. 2013) (siehe Unterkapitel 6.3).

Zur Bilanzierung der Umweltwirkungen unterschiedlicher Technologien werden Daten zum Material- und Energiebedarf aller Lebenszyklusphasen benötigt (Sachbilanz). Dieser Einsatz an Rohstoffen bildet die Datenbasis einer umfassenden Bilanzierung der Umweltwirkungen. Die Untersuchung im Rahmen der STROM-Begleitforschung stützt sich auf eine umfangreiche Auswertung von Studien und Forschungsergebnissen aus dem Bereich der ökobilanziellen Bewertung der Pkw-Mobilität. Diese wird im Folgenden erläutert.

6.4.2 Berücksichtigte Studien

Für die Literaturrecherche- und -auswertung wurden einschlägige Studien bis zu einem Publikationsdatum Dezember 2013 ausgewertet. Die Identifizierung und Analyse bereits bestehender Forschungsergebnisse ökobilanzieller Betrachtungen der Elektromobilität zur Bestimmung der Materialzusammensetzung als Datenbasis für die Lebenszyklusanalyse lief in drei Schritten ab:

(1) Quellensichtung

Zunächst wurde eine umfassende Literaturrecherche deutsch- und englischsprachiger Quellen durchgeführt. Dabei wurden insbesondere folgende Pfade verfolgt:

- Auswertung abgeschlossener und laufender einschlägiger Forschungsprojekte
- Internet- und Literaturdatenbankrecherche (inkl. Journals, Konferenzveröffentlichungen etc.)
- Berücksichtigung eigener Vorarbeiten des Wuppertal Instituts

In diesem ersten Schritt wurden existierende ökobilanzielle Betrachtungen der Elektromobilität und konventioneller Antriebskonzepte analysiert. Die hierbei erfassten Quellen wurden in einer Datenbank zusammengefasst. Insgesamt wurden ca. 100 Studien, Projektberichte, Journals und weitere Quellen identifiziert.

(2) Selektionsprozess

Als zweiter Schritt wurden im Rahmen einer Grobanalyse aus den in Schritt 1 identifizierten Quellen diejenigen Studien für eine vertiefende Analyse ausgewählt, die für die STROM-Begleitforschung und die Ökobilanzierung der Elektromobilität relevant erschienen. Es wurden vor allem der Themenbereich der Studie, der Forschungsansatz, die Aktualität und die mögliche Datenverfügbarkeit betrachtet und ein Abgleich mit den Fragestellungen des Arbeitspakets vorgenommen. Fokussiert wurden die untersuchten Ressourcenaspekte und dargestellten Annahmen und Sachbilanzen der Elektromobilität und konventioneller Antriebskonzepte. Darauf aufbauend wurden vor allem Quellen mit Angaben zur Materialzusammensetzung und zu möglichen kritischen Rohstoffen vertieft ausgewertet. Gleichzeitig bildeten die Technologie- und Parametervorgaben nach Huss et al. (2013) das analytische Grundgerüst, an dem sich im Rahmen der Auswertung orientiert wurde. Anhand eines Kriterienrasters zur Einstufung der Relevanz der gesichteten Quellen wurden 25 Studien vertiefend im Hinblick auf genannte, verfügbare und nutzbare Materialzusammensetzungen ausgewertet, um eine abschließende Eignungsprüfung für die Modellierung vorzunehmen. Einige Quellen waren aufgrund von Datenlücken für eine Lebenszyklusanalyse im Rahmen der STROM-Begleitforschung ungeeignet, die technischen Parameter der jeweiligen Systemkomponenten wichen zu stark vom Best-Case-Grundgerüst ab oder andere umfassten eine im Rahmen dieses Berichts nicht betrachtete/s Technologie/Antriebskonzept. Vor diesem Hintergrund wurden beispielsweise Quellen mit Sachbilanzen nicht-relevanter Zukunftstechnologien (z. B. Nickel-Metallhydrid-Akkumulator) im Rahmen der hier durchgeführten Materialintensitätsanalyse nicht berücksichtigt (siehe Anhang 10).

(3) Finale Zuordnung

Im dritten und letzten Schritt der Literaturanalyse erfolgte die endgültige Auswahl der Quellen für die Modellierung der Antriebskonzepte im Rahmen der Materialintensitätsanalyse in Bezug auf Datenqualität und -verfügbarkeit. Die Modellierung wurde mittels einer Ökobilanzsoftware und der Nutzung der Ecoinvent-Datenbank durchgeführt. Daher wurde die Möglichkeit der Zuordnung der Materialinventare zu vorhandenen Ecoinvent-Prozessen geprüft.

Im Folgenden werden die zentralen Studien, die als Datengrundlage verwendet und anhand derer die Systemkomponenten modelliert wurden, vorgestellt (Notter et al. 2010, Schweimer & Levin 2000, Renault 2011, Buchert et al. 2011, POLITO et al. 2008). Weitere ausgewählte Studien, die nicht für die Modellierung genutzt wurden, aber als relevant im Forschungsumfeld erscheinen, werden im Anhang dargestellt. Dabei wird erläutert, warum sie im Rahmen dieser Modellierung nicht nutzbar waren (vgl. Helms et al. 2011, Angerer et al. 2009, Burnham et al. 2006, Burnham et al. 2012). Darüber hinaus wurden weitere Studien herangezogen, um weitere Systemkomponenten abzubilden oder Einzelaspekte zu untersuchen (siehe unten Weitere verwendete Quellen und Vorarbeiten des Wuppertal Instituts und im Abschnitt 6.5.2 zur Herleitung der Materialinventare).

Studie „Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles“

Notter et al. (2010) bilanzieren und bewerten in ihrer Studie *Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles* ein batterieelektrisches Fahrzeug im Vergleich zu einem konventionellen Antriebskonzept, um die Umweltwirkung einer Batterie in der Herstellung, der Nutzung und der Verwertung zu ermitteln. Zur Abschätzung der ökologischen Auswirkungen werden sechs Indikatoren herangezogen, u.a. der Kumulierte Energieaufwand, das GWP 100 und der abiotische Ressourcenverbrauch (abiotic depletion potential, ADP). In der Studie werden detaillierte Materialinventare sowohl des Elektrofahrzeugs als auch des Fahrzeugs mit konventionellem Antrieb aufgeführt. Dabei entstammt das Materialinventar für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor der Ecoinvent-Datenbank 2.2 und basiert auf (Schweimer & Levin 2000). Auf Basis dieser Materialaufteilung wurden die Komponenten, die den Antriebsstrang bilden extrahiert, woraus ein Inventar für einen Glider resultiert. Der Glider wird im Anschluss als Basis für den Aufbau eines Elektrofahrzeug (BEV) verwendet, der um einen elektrischen Antriebsstrang sowie eine Batterie erweitert wurde. Zu den weiteren Komponenten sind ebenfalls Materialinventare angegeben.

Die Studie gibt eine umfassende und detaillierte Auflistung der Materialzusammensetzung für ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor als auch ein Fahrzeug mit Elektromotor (inkl. Energiebedarf für die Herstellung). Auf Grund der Datenverfügbarkeit und -qualität wurde diese Studie als hoch relevant für die STROM-Modellierung eingestuft und dient als Quelle für mehrere Systemkomponenten.

Studie „Fluence and Fluence Z.E. : Life Cycle Assessment“

Die Studie *Fluence and Fluence Z.E.: Life Cycle Assessment* (Renault 2011) umfasst eine Lebenszyklusanalyse nach ISO 14040/44 des Renault Fluence-Modells mit den drei verschiedenen Antriebssystemen batterieelektrisch, Benzin und Diesel. Die Ergebnisse werden anhand von sechs Einflussgrößen (u.a. Kumulierter Energieaufwand, GWP 100 und Versauerungspotential) dargestellt. Die Analyse wird für die gesamten Fahrzeuge durchgeführt, es finden sich jedoch nur Materialzusammensetzungen zu den drei Motoren in der Studie wieder. Während beim Elektromotor das Materialinventar kumuliert als Motor inklusive weiterer Komponenten der Leistungselektronik (Laderegler, Konverter u.Ä.) angegeben ist, umfasst der Verbrennungsmotor keine weiteren Komponenten.

Das Materialinventar der Verbrennungsmotoren wird für die Analyse im Rahmen der STROM-Modellierung als hoch relevant eingestuft und als Datenbasis verwendet.

Studie „OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotentiale von Elektrofahrzeugen“

In der Studie *Ressourceneffizienz und Ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität - Arbeitspaket 7* des Forschungsvorhabens „Optimierung der Umweltentlastungspotentiale von Elektrofahrzeugen“ (OPTUM) (Buchert et al. 2011) wurden die für die Elektromobilität relevanten Metalle identifiziert und der Rohstoffbedarf und die Umweltbelastung für einige davon untersucht. Dabei wurden mehrere Marktdurchdringungsszenarien für die Jahre 2020 und 2050 erstellt, um den künftigen Rohstoffbedarf abzuschätzen. Das Basisszenario I beruht auf der Studie McKinsey & Company (2010). Die Autoren entwickelten Varianten mit Einfluss auf den globalen Bedarf an Primärmetallen, aus denen ein Innovationsszenario II mit zusätzlichen Annahmen zur stärkeren Materialeffizienz getroffen wurden, ein darauf auf-

bauendes Recyclingszenario III, das zudem Annahmen zu einem verstärkten Recycling berücksichtigt sowie ein Substitutionsszenario IV, das zusätzlich eine partielle Substitution von Elektromotoren mit Permanentmagneten durch alternative Motoren vorsieht. Die Umweltwirkungen des durch die Elektromobilität induzierten Rohstoffverbrauchs wurden basierend auf Ecoinvent-Daten berechnet. Es wurde eine Ökobilanzierung der Materialien (Umweltwirkungen der Primärproduktion) durchgeführt, die für die Elektromobilität relevant sind. Die Ergebnisse wurden in verschiedenen Wirkungskategorien dargestellt, u.a. als Kumulierter Energieaufwand (KEA), Ressourcenverbrauch (ADP) und Treibhauspotential (GWP). Abschließend wurden Handlungsempfehlungen hinsichtlich des künftig höheren Rohstoffbedarfs, u.a. eine intensive Betrachtung der Recyclingpotentiale der relevanten Metalle, gegeben.

In der Studie werden benötigte Mengen an Seltenen Erden und Edelmetallen für standardisierte Komponenten der Elektromobilität (u.a. Leistungselektronik und Motor) angegeben. Im Rahmen dieser Studie werden die Daten der Leistungselektronik für die Modellierung der Elektromobilität herangezogen.

Studie „Sachbilanz des Golf A4“

Die *Sachbilanz des Golf A4* von Schweimer & Levin (2000) wurde in der Abteilung Forschung, Umwelt und Verkehr von der Volkswagen AG angefertigt und basiert auf der Entwicklungsstückliste eines Golf A4. Es wird eine lebenszyklusweite (Produktion, Nutzung, Verwertung) Ökobilanz nach den internationalen Standards ISO 14040/41 durchgeführt, beschränkt sich dabei auf Grund der Datenverfügbarkeit auf eine Sachbilanz, ohne eine ökologische Wirkungsabschätzung vorzunehmen. Die Materialinventare sind sehr detailliert angegeben, weshalb diese Studie häufig als Datengrundlagen bei der Ökobilanzierung von Fahrzeugen genutzt wird.

Die Materialinventare werden im Rahmen der Berücksichtigung von Notter et al. (2010) für die STROM-Modellierung genutzt.

Studie „New Energy Externalities Developments for Sustainability“

POLITO et al. (2008) haben im Rahmen des *New Energy Externalities Developments for Sustainability*-Projekts aktuelle Brennstoffzellentechnologien hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften, Kosten und ihrer Sachbilanz untersucht. Neben der Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (PEMFC) und der Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) ist die Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) Teil der Untersuchung.

In ihrer Analyse berücksichtigen sie drei unterschiedliche Szenarien bei der zukünftigen Entwicklung der Brennstoffzellentechnologien, die auf fünf verschiedenen Faktoren basieren. Abhängig von den umweltpolitischen Zielen, der energetischen Versorgungssicherheit, dem technologischen Fortschritt, den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und möglicher konkurrierender Alternativen werden die drei Szenarien sehr optimistisch, optimistisch realistisch und pessimistisch zur Bewertung genutzt.

Die Studie umfasst sowohl für die PEMFC als auch die SOFC detaillierte Materialinventare und wird im Rahmen der STROM-Modellierung verwendet.

Weitere verwendete Quellen und Vorarbeiten des Wuppertal Instituts

Neben der vorgestellten Literatur wurden darüber hinaus noch der Verbrauch von Wasser und Reifen über die Nutzungsphase berücksichtigt (Pusenius et al. 2005) und Materialinventare aus der Ecoinvent-Datenbank Version 2.2²² (Frischknecht et al. 2005) beispielsweise für die Kraftstoffbereitstellung genutzt. Die Energiebereitstellung für die Elektrofahrzeuge beruht auf Nitsch et al. (2012 und Teske et al. (2012).

Darüber hinaus sind auch eigene Vorarbeiten des Wuppertal Instituts (Wiesen 2010, Samus et al. 2013) und Ergebnisse des Forschungsprojekts KRESSE (Wuppertal Institut 2014) eingeflossen. Für detaillierte Erläuterungen zu den genutzten Daten aus den beschriebenen Quellen wird auf die Herleitung der Materialinventare (Abschnitt 6.5.2) verwiesen.

6.4.3 Ergebnis der Auswertung

Tab. 6-3 gibt einen Überblick über die schließlich verwendeten Quellen, die für die Modellierung der Antriebskonzepte und ihrer Systemkomponenten genutzt wurden. Die Herleitung der Systemkomponenten und die Modellierungsschritte werden im folgenden Abschnitt erläutert.

²² Mit dem Stand des Projektendes 09/2014 lag die aktualisierte Version der Ecoinvent Datenbank vor. Diese v3.0 wurde im April 2014 zur Verfügung gestellt, lag aber nicht mit cut-off Kriterien vor, wie sie für die Modellierung nach dem MIPS-Konzept notwendig sind. Das erfolgte teilweise mit v3.01 (im Mai), vollständig wurde die Version mit cut-off Kriterien mit der Version 3.1 bereitgestellt (Juli 2014). Die Nutzung der Datenbank in LCA Software (openLCA) wird erst mit Zeitverzug ermöglicht, sodass für die MAIA im STROM-Projekt keine Nutzung der v3 möglich war.

	Notter et al. 2010	Renault 2011	Buchert et al. 2011	POLITO et al. 2008	Wiesen 2010	Frischknecht et al. 2005	Nitsch et al. 2012	Teske et al. 2012	Eigene Modellierung	Pusenius et al. 2005
Komponente ICEV										
Verbrennungsmotor		x								
Getriebe	x									
Tank	x									
Glider	x									
Systemkomponente x-EV										
Verbrennungsmotor		x								
Restantriebsstrang	x									
E-Motor (PSM)	x									
E-Motor (ASM)					x					
Leistungselektronik	x		x							
Generator (REEV)	x									
Leitungssatz	x									
Tank	x									
Batterie						x				
Brennstoffzelle				x						
Nutzungsphase										
Benzin						x				
Diesel						x				
Erdgas						x				
Wasserstoff									x	
Strommix (Dt.)							x			
Strommix (Welt)								x		
Strommix 100 % REG									x	
Wasserverbrauch										x
Reifenabrieb										x
Entsorgung							x			

Tab. 6-3 Übersicht der verwendeten Quellen zur Bestimmung der Materialinventare der jeweiligen Systemkomponenten und der Energiebereitstellung

6.5 Erstellung von Materialintensitätsanalysen

K. Bienge (WI), J. Monscheidt (WI)

6.5.1 Beschreibung der Materialintensitätsanalyse nach der MIPS-Methodik

Die Analyse des Materialbedarfs verschiedener Fahrzeugtypen wurde in der vorliegenden Studie mittels der Materialintensitätsanalyse (MAIA) basierend auf dem MIPS-Konzept „Material-Input pro Service-Einheit“ (MIPS) durchgeführt (Schmidt-Bleek et al. 1998, Liedtke et al. 2014).

Durch die MIPS-Analyse soll der gesamte Ressourcenverbrauch ermittelt werden, der durch das betrachtete Produkt bzw. dessen Nutzung verursacht wird. Im MIPS-Konzept umfasst der Materialinput (MI) eines Produktes alle systemweit zu dessen Erschaffung aktiv aus dem natürlichen Zustand entnommenen bzw. dort bewegten abiotischen und biotischen Rohstoffe sowie Wasser und Luft. Es werden alle zur Produktion, zum Gebrauch, zur Rezyklierung bzw. zur Entsorgung definierter Produkte eingesetzten Materialien einschließlich ihrer ökologischen Rucksäcke berücksichtigt. Der MI umfasst damit grundsätzlich auch alle aktiven Erdbewegungen, die während einer Wachstumsperiode für die Produktion landwirtschaftlicher Produkte notwendig sind. MI wird in Gewichtseinheiten (Tonnen oder Kilogramm) bemessen.

MIPS nimmt anders als die Ökobilanz nach ISO 14 044:2006 keine Abstraktion von Wirkungen auf bestimmte Wirkungsendpunkte vor (z. B. in Form von Charakterisierungsmodellen), kann aber auf potenzielle Umweltwirkungen hinweisen oder eine Ökobilanz ergänzen.

Im Unterschied zur Ökobilanz werden materielle Rohstoffe umfassender berücksichtigt, indem auch die wirtschaftlich ungenutzte Rohstoffextraktion betrachtet wird. Beispiele für ungenutzte Rohstoffextraktion sind der Abraum in Minen, der Erdaushub im Bau, Ernterückstände in Land- und Forstwirtschaft und Landverluste durch Erosion. Die Berücksichtigung solcher Stoffströme in MIPS geschieht vor dem Hintergrund, dass Umweltbelastungen nicht immer auf die chemischen Eigenschaften von Stoffen zurückzuführen sind. Probleme wie dauerhafte Entfernung fruchtbarer Erde (Translokation), das Absinken des Grundwasserspiegels oder die dauerhafte Veränderung des Landschaftsbildes werden eher durch die absolute Menge der extrahierten Rohstoffe verursacht (Bringezu et al. 2003, Mudd 2009) zeigt in einer Studie zur Nachhaltigkeit australischer Minen etwa, dass die kontinuierlich wachsenden Abraumengen dort und weltweit zu großen Umweltproblemen führen, die (bisher) weitestgehend unterschätzt worden sind.

Die Berechnung von MIPS erfolgt durch Bezug des Rohstoffbedarfs, Material-Input (MI) genannt, auf einen bestimmten Nutzen, die Serviceeinheit:

$$MIPS = \frac{MI [kg]}{Serviceeinheit}$$

Der MI umfasst alle natürlichen Ressourcen, d.h. sämtliche in einem Produkt oder Prozess enthaltenen Materialien werden bis auf ihren „Ursprung“, bis an die Grenze des Überganges von der Ökosphäre in die Technosphäre zurückverfolgt. Die Ressourcen werden in fünf Ressourcenkategorien eingeteilt:

- Abiotische Rohstoffe: Mineralische Rohstoffe, fossile Energieträger, nicht verwertete Rohförderung und bewegte Erde
- Biotische Rohstoffe: Pflanzliche Biomasse aus bewirtschafteten und Biomasse aus nicht bewirtschafteten Bereichen
- Wasser: Oberflächen-, Grund- und Tiefwasser (unterschieden nach Prozess- und Kühlwasser)
- Luft: Gebundene Moleküle (Verbrennung, chemische Umwandlung, physikalische Veränderung)
- Land- und forstwirtschaftliche Bodenbewegungen: Mechanische Bodenbewegung (Pflügen) oder Erosion

Alle Angaben entsprechen den in der Natur bewegten Massen, also den fünf genannten Kategorien. Die Herstellung, Nutzung und Entsorgung/Recycling werden auf ihren Materialbedarf zurückgerechnet.

Da die vorliegende Studie den materiellen Ressourcenbedarf thematisiert, beschränkt sich die Analyse auf die Ermittlung des MI für die abiotischen Rohstoffe. Die Ergebnisse der abiotischen Materialintensitätsanalyse werden im Indikator abiotischer Materialbedarf ausgedrückt. Damit ist nicht ausgeschlossen, dass eines der untersuchten Systeme, trotz relativ geringem abiotischem Materialbedarf in anderen Kategorien (z. B. Wasserbedarf), ressourcenintensiver ist. Für biotische Rohstoffe wird angenommen, dass ihr Anteil am gesamten Materialbedarf der jeweiligen Energiesysteme nicht signifikant ist. Dennoch ist gerade vor dem Hintergrund der steigenden Anteile regenerativer Energien, eine Zunahme des biotischen Materialbedarfs zu erwarten, sodass es zu einem gegenläufigen Effekt kommen könnte. Dieser Aspekt konnte im Rahmen dieser Studie jedoch nicht berücksichtigt werden und erfordert weiteren Forschungsbedarf.

Die für die Analyse zu Grunde gelegten Lebenszyklusanalysen basieren auf der Ecoinvent-Datenbank (Version 2.2²²). Die betreffenden Ecoinvent-Prozesse wurden nach dem MIPS-Konzept auf der Inputseite (um die ungenutzte Ressourcenextraktion) ergänzt. Dies wurde mit Hilfe einer im Ecospond-Format erstellten Methode der Wirkungsabschätzung umgesetzt, die sich in LCA-Software importieren lässt (MIPS-Bewertungsschema). Als Datenbasis für die ungenutzte Ressourcenextraktion wurden Daten aus Wuppertal Institute et al. (2008) genutzt. Die genaue Vorgehensweise ist in Wiesen et al. (2014) und Saurat & Ritthoff (2013) beschrieben.

6.5.2 Herleitung der Materialinventare von Systemkomponenten

Basierend auf den ausgewählten Technologiepfaden (siehe Unterkapitel 6.3) wurden die identifizierten Materialinventare der berücksichtigten Studien (siehe Abschnitt 6.4.2) geprüft. Dabei wurde die Datenqualität und die Möglichkeit der Zuweisung der Materialinventare zu den Systemkomponenten hinsichtlich konsistenter und vergleichbarer Technologiekennelemente nach Huss et al. (2013) berücksichtigt. Dennoch sind Abweichungen der Fahrzeug- und Komponenteneigenschaften der gesichteten Quellen von den technischen Parametern aus Huss et al. (2013) wahrscheinlich. Aus diesem Grund ist eine Skalierung der gesichteten Materialinventare auf das festgesetzte Fahrzeugsegment notwendig. Dazu wurde die Masse

der Systemkomponenten aus der Literatur auf die Komponentenmasse nach Huss et al. (2013) angepasst. Tab. 6-4 stellt dazu beispielhaft die jeweiligen Systemkomponenten für ein Hybridfahrzeug mit den Massenangaben aus der Literatur und Huss et al. (2013) gegenüber.

Für den Verbrennungsmotor ergibt sich beispielsweise ein Skalierungsfaktor von 1,02: bei einer Masse von 145 kg (Huss et al. 2013) und einer Masse von 142 kg, für die ein Materialinventar identifiziert wurde (Renault 2011). Für andere Systemkomponenten fallen die Skalierungsfaktoren entsprechend größer oder kleiner aus. Es ist anzumerken, dass eine lineare Skalierung auf Basis der Komponentenmasse eine Vereinfachung darstellt und nur eine grobe Abschätzung der tatsächlichen Materialinventare erlaubt. Das liegt daran, dass eine lineare Skalierung der Masse bei einigen Systemkomponenten nur bedingt möglich ist (beispielsweise liegt bei den Elektromotoren kein direkter Zusammenhang zwischen Leistung und Masse vor, da weitere Parameter berücksichtigt werden müssten). Dagegen erweist sich die proportionale Beziehung der Komponentenmasse beispielsweise bei dem Glider und dem Verbrennungsmotor als gute Annäherung.

Bei den Gewichtsangaben in Tab. 6-4 handelt es sich um Werte für 2010. Auf Basis von Huss et al. (2013) wurden für die Zeiträume 2010, 2020 und 2030 Gewichtsreduzierungen bei einem Großteil der Systemkomponenten angenommen (vgl. Tab. 10-1 bis Tab. 10-11 im Anhang). Auf Grund dieser Annahmen werden die Materialinventare der einzelnen Systemkomponenten für die Jahre 2010, 2020 und 2030 mit unterschiedlichen Skalierungsfaktoren angepasst. Ab 2030 wird von keiner weiteren Reduzierung ausgegangen, sodass der Materialbedarf bis 2050 konstant bleibt.

	Masse nach Literatur	Masse nach Huss et al. (2013)	Skalierungsfaktor
Systemkomponente	kg	kg	-
Verbrennungsmotor	142	145	1,02
Getriebe	19	80	4,21
Elektromotor (PSM)	60	24	0,40
Leistungselektronik	16	8	0,51
Leitungssatz	3	11	3,53
Tank	12	15	1,25
Batterie	300 bzw. 1 ¹	34	34,00
Glider	782	988	1,26

¹ Der Ecoinvent-Output bezieht sich auf 1 kg Batterie

Tab. 6-4 Gegenüberstellung der Komponentenmasse aus Literatur und der verwendeten Datenbasis für einen HEV für das Jahr 2010 und daraus resultierende Skalierungsfaktoren

Quellen: (Renault 2011, Notter et al. 2010, Frischknecht et al. 2005, Huss et al. 2013)

Die Energie für die Herstellung der Systemkomponenten wird kumuliert für den Glider, die Batterie, die Brennstoffzelle und die als Antriebsstrang zusammengefassten restlichen Systemkomponenten berücksichtigt. Benötigte Energie aus vorherigen Prozessschritten wird über die vorgelagerten Ecoinvent-Prozesse abgebildet, sodass nur der Energiebedarf für die Endmontage der Komponenten ergänzt werden muss. Weiterhin wird davon ausgegangen,

dass der benötigte Energiebedarf für die Produktion der Systemkomponenten über die Jahre konstant bleibt und nur im Rahmen der Gewichtsreduzierung abnimmt. Hierbei handelt es sich um eine konservative Abschätzung, da die Herstellungsprozesse noch weitere Effizienzpotentiale aufweisen können. Der Transportaufwand wird für die Vorketten über Ecoinvent abgebildet, der Transportaufwand der zwischen dem Zusammenbau der Systemkomponenten und der Endmontage des fertigen Fahrzeug anfällt, kann an dieser Stelle auf Grund mangelnder Datenverfügbarkeit hinsichtlich der Produktionsstätten nicht berücksichtigt werden.

In einigen Fällen enthalten die Materialinventare der Systemkomponenten weitere Baugruppen als Unterkomponenten, z. B. Leiterplatten oder Kabel. Diese werden bis auf Materialebene aufgeschlüsselt dargestellt. Die aufgeschlüsselte Berücksichtigung der Unterkomponenten ist weniger für den abiotischen Materialbedarf, als für die Betrachtung kritischer Ressourcen relevant. Gerade in elektronischen Bauteilen finden sich häufig Halbleiterelemente oder andere seltene Rohstoffe, die im Rahmen von Kritikalitätsbewertungen von Bedeutung sein können.

Bei der Verarbeitung der Materialien und dem Herstellungsprozess der Systemkomponenten fallen Verluste an. Diese sind vom jeweiligen Material und der Fertigungsweise abhängig. Die im Rahmen dieser Studie angesetzten Verluste basieren auf den Annahmen von Notter et al. (2010). Tab. 6-5 zeigt eine Übersicht der wichtigsten Materialien mit den zugehörigen Verlustfaktoren, die entsprechend für alle Materialinventare angesetzt wurden. Die Verlustfaktoren beziehen sich auf die Fertigung der finalen Komponenten und berücksichtigen beispielsweise Verluste durch Zerspanen. Vorgelagerte Herstellungsschritte sind über die Vorketten mit berücksichtigt. Bei abweichenden einfließenden Materialien erfolgte eine Zuordnung der Faktoren hinsichtlich ähnlicher Materialien beziehungsweise Herstellungsverfahren.

Material	Verlustfaktor
Aluminium	1,25
Gussstahl	1,5
Kupfer	1
Niedrig legierter Stahl, Kaltfeinblech	1,25
Permanentmagnet (Neodym, Eisen, Bor)	1,25
Synthetische Materialien	1,1

Tab. 6-5 Übersicht der Verlustfaktoren ausgewählter Materialien

Quelle: (Notter et al. 2010)

Herstellungsphase

Im Folgenden wird das Vorgehen der Herleitung der Materialinventare für die einzelnen Systemkomponenten separat erläutert. Für die Materialinventare wird auf die verwendeten Quellen verwiesen. Bei Abweichungen von den in den Quellen angegebenen Angaben als auch bei einer eigenen Modellierung, werden die Annahmen sowie die Materialinventare und Prozesse aufgeführt und erläutert.

Systemkomponente Glider: Die Materialzusammensetzung des Gliders basiert auf Notter et al. (2010) und umfasst unter anderem die Karosserie, das Fahrgestell und die Innenaus-

stattung der Fahrzeuge. Das Materialinventar ist für alle Antriebskonzepte identisch. Die Massen der Glider der jeweiligen Antriebskonzepte und die resultierenden Skalierungsfaktoren bei einem Literaturgewicht von 782 kg sind in Tab. 10-1 im Anhang aufgeführt.

Systemkomponente Verbrennungsmotor: Die Materialzusammensetzung für die Verbrennungsmotoren (Benzin und Diesel) stammt aus Renault (2011). Die Zuordnung der Materialien zu den Prozessen im Rahmen der Modellierung ist in Tab. 6-6 dargestellt. Der Stahlanteil im Motor wird als Guss angesetzt und über den Prozess „*reinforcing steel*“ modelliert. Hierbei handelt es sich um einen Mix aus unlegiertem und niedrig legiertem Stahl. Für den Erdgasmotor liegt kein Materialinventar vor. Als Annäherung wird daher die Materialzusammensetzung eines Benzinmotors angesetzt. Diese Annahme scheint vor dem Hintergrund von Fahrzeugen mit bivalenter Betriebsweise realistisch: Diese Fahrzeuge können ihre Kraftstoffbereitstellung zwischen Benzin und Erdgas wechseln, wobei die notwendigen Umrüstungsmaßnahmen hauptsächlich die Einspritztechnik und den Tank betreffen.

Material nach (Renault 2011)	Ecoinvent-Prozess
Aluminium	aluminium, production mix, cast alloy, at plant
Elastomer Mix	tube insulation, elastomere, at plant
EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)	synthetic rubber, at plant
Glasfaserverstärkter Kunststoff	glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant
Kupfer	copper, at regional storage
Material Mix	Mischung aus lubricating oil, at plant und polyphenylene sulfide, at plant
Nachwachsender Material Mix	thermo-mechanical pulp, at plant
Polymer Mix (PET)	polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, at plant
Polypropylen	polypropylene, granulate, at plant
Rostfreier Stahl	chromium steel 18/8, at plant
Stahl	reinforcing steel, at plant

Tab. 6-6 Materialzusammensetzung und zugeordnete Ecoinventprozesse für den Verbrennungsmotor

Quelle: (Renault 2011), eigene Annahme

Bei den Elektrofahrzeugen HEV, PHEV und REEV, die neben dem Elektromotor auch einen Verbrennungsmotor besitzen, werden ausschließlich Ottomotoren angesetzt, da die Diesel-Hybridvariante wie in Unterkapitel 6.3 erläutert nur eine geringe Bedeutung zukommt. Die einzelnen Massen der Verbrennungsmotoren von 2010 bis 2030 und die daraus resultierenden Skalierungsfaktoren sind in Tab. 10-2 im Anhang dargestellt.

Systemkomponente Restantriebsstrang: Über den Restantriebsstrang werden Komponenten eines motorlosen Antriebsstrangs berücksichtigt. Bei den ICE-Fahrzeugen sind dies unter anderem das Abgas-, Kühl- und Starter-System. Bei den batterieelektrischen Fahrzeugen mit zusätzlichem Verbrennungsmotor wird über den restlichen Antriebsstrang hauptsächlich das deutlich schwerere Getriebe abgebildet. Bei reinen Elektrofahrzeugen fällt das Getriebe entsprechend kleiner aus. Das Kühlsystem wird bei den Elektrofahrzeugen dem Elektromotor zugerechnet. Das Materialinventar basiert auf dem Antriebsstrang von Notter et

al. (2010). Davon abweichend wurde statt eines Aluminium-Produktionsmixes mit einem Hauptanteil an Primärmaterial ein Aluminiumguss mit einem Hauptanteil Sekundäraluminium („*aluminium, production mix, cast alloy, at plant*“) verwendet, um beispielsweise das Gehäuse des Getriebes abzubilden. Der Restantriebsstrang unterliegt keiner Gewichtsreduzierung und hat somit gleichbleibende Skalierungsfaktoren (vgl. Tab. 10-3 im Anhang).

Systemkomponente Tank: Der Tank ist sowohl bei den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (inklusive HEV, PHEV und REEV,) als auch bei dem Brennstoffzellenfahrzeug Teil des Materialinventars. Für flüssige Kraftstoffe (Benzin und Diesel) wird ein Tank aus gehärtetem Kunststoff angenommen und der Materialbedarf über (hochdichtes) Polyethylen (HDPE) ermittelt (Notter et al. 2010). Wasserstoff wird im Automobilsektor hauptsächlich bei 350 bar oder 700 bar gespeichert (Flamberg et al. 2010). In diesem Druckbereich kommen ausschließlich Kohlefaserverbundwerkstoffe (CFK) zum Einsatz. Der Tank für Erdgasfahrzeuge besteht bis 2020 aus Stahl (Huss et al. 2013) und wird über ein Kaltfeinblech modelliert. Ab 2020 wird ebenfalls ein Tank aus Verbundwerkstoffen eingesetzt. Der abiotische Materialbedarf von CFK liegt nach (Stahl im Vergleich) bei 35,594 kg/kg.

Der Wasserstofftank weist auf Grund eines mit der Zeit abnehmenden spezifischen Gewichts im Gegensatz zu den übrigen Tanksystemen eine absolute Gewichtsreduzierung auf (siehe Tab. 10-4 im Anhang). Bei dem Erdgastank resultiert die Gewichtsabnahme aus der Substitution des Materials und der verminderten Anzahl eingesetzter Gaszylinder (Huss et al. 2013).

Systemkomponente Elektromotor: Der Elektromotor wird ab 2010 zunächst als Technologie mit permanenterregtem Synchronmotor (PSM) betrieben. Das Materialinventar (vgl. Tab. 10-5 im Anhang) inklusive des Kühlsystems wurde aus Notter et al. (2010) entnommen. Wie bei dem Restantriebsstrang wurde abweichend der Anteil an Sekundäraluminium erhöht, indem wieder eine Gusslegierung eingesetzt wurde („*aluminium, production mix, cast alloy, at plant*“).

Das Materialinventar des eingesetzten PSM umfasst einen Neodym-Eisen-Bor-Magnet, der Ferrite auf Neodymbasis aufweist. Auf Grund der Betriebstemperaturen des Elektromotors wird zur Steigerung der Temperaturstabilität in der Regel Dysprosium beigelegt. Vor dem Hintergrund der Kritikalitätsbewertung, wird die in Tab. 6-7 dargestellte Materialaufteilung für einen Permanentmagneten basierend auf Wuppertal Institut (2014) nach Du & Graedel (2011) angesetzt und der Anteil an Dysprosium zu der ursprünglichen Materialzusammensetzung hinzugefügt und die neuen Massenanteile bestimmt.

Der abiotische Materialbedarf von Dysprosium wurde unter der Annahme vergesellschafteter Metalle und ähnlicher Abbaumethoden über den Bedarf von Neodym angenähert.

Wie in der Technologieauswahl (Unterkapitel 6.3) dargestellt, wird davon ausgegangen, dass ab 2030 neben dem PSM zusätzlich der Asynchronmotor (ASM) eine zunehmende Rolle als Motortechnologie spielen könnte. Der Materialbedarf eines ASM wurde auf Grund mangelnder Daten näherungsweise anhand der Materialzusammensetzung eines Asynchrongenerators einer Windkraftanlage ermittelt und entsprechend skaliert. Das Materialinventar basiert auf einer Expertenbefragung (Wuppertal Institut 2014)

Material	Anteil %
Neodym	20
Dysprosium	5
Ferrite	74
Bor	1

Tab. 6-7 Materialzusammensetzung des Permanentmagneten

Quelle: (Wuppertal Institut 2014 nach Du & Graedel 2011)

Über den Betrachtungszeitraum wird ein zunehmender Anteil an Fahrzeugen mit ASM erwartet, sodass der Anteil der Fahrzeuge mit PSM entsprechend abfällt. In dem Standardszenario wird ab 2030 der ASM-Anteil auf 15 % festgesetzt und steigt im weiteren Verlauf auf 25 % nach 2040. Die Verteilung der Materialzusammensetzung wurde für diese Jahre entsprechend der Anteile von ASM und PSM ermittelt. In einem Alternativszenario zum optimierten Umgang mit kritischen Ressourcen (vgl. Unterkapitel 6.9) wird von einem deutlich schnelleren Anstieg des ASM-Anteils ausgegangen.

Systemkomponente Leistungselektronik: Die Leistungselektronik ist Bestandteil der batterieelektrischen Antriebskonzepte und beinhaltet u.a. die Lade- und Regeleinheit. Zur Bestimmung des abiotischen Materialbedarfs wird ein leicht abgewandeltes Materialinventar aus Notter et al. (2010) verwendet. Die Leistungselektronik setzt sich unter anderem aus einer Leiterplatte (printed wiring board, PWB) als Model der elektronischen Bauteile zusammen. Zur Abschätzung der einfließenden Materialien wird das PWB in seine Materialbestandteile aufgeschlüsselt. Diese Materialbestandteile berücksichtigen bereits anfallende Verluste, weshalb diese Materialien nicht mit Verlustfaktoren verknüpft wurden. Die Leistungselektronik weist nach Huss et al. (2013) für alle batterieelektrischen Antriebskonzepte die gleiche Masse von 8 kg auf und unterliegt keiner Gewichtsreduzierung über die Zeit.

Zur Abschätzung der Anteile kritischer Rohstoffe wurden ergänzende Annahmen basierend auf spezifischen Quellen vorgenommen. Der Anteil kritischer Rohstoffe aus Notter et al. (2010) ist im Vergleich mit anderen Literaturangaben sehr gering, sodass der Bedarf in der Leistungselektronik anhand weiterer Quellen berücksichtigt wurde. In Buchert et al. (2011) ist der Bedarf kritischer Rohstoffe für die Leistungselektronik für Elektromotoren mit kleiner und großer Leistung angegeben. Nach eigener Annahme wurden entsprechend der Leistungsklasse der Elektromotoren für die Antriebskonzepte HEV und PHEV das Inventar für kleine Leistungen und für REEV, BEV und FCEV das Inventar für große Leistungen angesetzt. Tab. 6-8 zeigt die zu Grunde gelegten Prozesse aus Ecoinvent und den zugewiesenen Anteil an kritischen Rohstoffen je Antriebskonzept.

Material	Ecoinvent-Prozess	Menge nach (Buchert et al. 2011) in g pro Fahrzeug	
		HEV / PHEV	REEV / BEV / FCEV
Gallium	gallium, semiconductor-grade, at regional storage	0,030	0,05
Germanium	gallium, semi-conductor-grade, at regional storage	0,030	0,05
Gold	gold, at regional storage	0,016	0,20
Indium	indium, at regional storage	0,030	0,05
Palladium	palladium, at regional storage	0,064	0,08
Silber	silver, at regional storage	4	6

Tab. 6-8 Materialbedarf an kritischen Rohstoffen für die Leistungselektronik je Antriebskonzept

Quelle: (Buchert et al. 2011), eigene Annahmen

Für die Berechnung des abiotischen Materialbedarfs von Germanium liegen keine Daten vor. Stattdessen wurde der Bedarf über eine Annäherung von Zinksulfid (Sphalerit) getroffen, da nach UKERC (2013) Germanium durch den Abbau von Zinkerzen gewonnen wird, wobei der Anteil bei bis zu 0,3 % liegen kann.

Systemkomponente Generator: Der Generator ist Bestandteil des REEV und dient zur Reichweitenunterstützung durch die Erzeugung elektrischer Energie mittels des Kraftstoffs (Benzin). Im Standardszenario wird der Generator vollständig als permanenterregter Synchronmotor modelliert. Analog zum Motor wurde Aluminiumguss statt dem Produktionsmix verwendet und der Magnet um den Dysprosiumanteil ergänzt. Die Masse und die Skalierungsfaktoren sind in Tab. 10-7 im Anhang aufgeführt. Ein zunehmender Anteil an Asynchronmotoren wird in einem Alternativszenario zum optimierten Umgang mit kritischen Ressourcen berücksichtigt (vgl. Unterkapitel 6.8).

Systemkomponente Leitungssatz: Der Leitungssatz ist Bestandteil der batterieelektrischen Antriebskonzepte und bildet die Verkabelung ab. Wie in Tab. 10-8 dargestellt, ist keine Abnahme der Materialmenge vorgesehen. Der abiotische Materialbedarf wird über den Herstellungsprozess eines Kabels auf Basis von Notter et al. (2010) modelliert. Um die Zusammensetzung abzuschätzen, wird der Leitungssatz wie die Leiterplatte in die einzelnen Materialbestandteile aufgeschlüsselt.

Systemkomponente Batterie: Die Batterie basiert auf der Lithium-Ionen-Technologie auf Lithium-Mangan-Oxid-Basis. Die Batterie wurde über einen Ecoinvent-Prozess (Frischknecht et al. 2005) modelliert und auf das jeweilige Referenzgewicht nach Tab. 10-9 im Anhang skaliert. Die in der Materialzusammensetzung befindlichen Sub-Komponenten Leiterplatte und Kabel wurden ebenfalls bis auf die Materialebene aufgeschlüsselt.

Die Herstellungsenergie für die Batterie bezieht sich auf den letzten Fertigungsschritt (Zusammenbau der einzelnen Batteriekomponenten), und wird mit dem UCTE-Strommix (Mittelspannung) modelliert. Der spezifische Energiebedarf der Batterie beträgt dabei 0,11 kWh/kg, woraus für die jeweiligen Antriebskonzepte entsprechend der Batteriemasse die benötigte Energiemenge je Batterie resultiert.

Die vorgelagerten Herstellungsschritte berücksichtigten sowohl den dafür notwendigen Energiebedarf als auch die anfallenden Verluste. Die Batterielebensdauer beträgt nach Helms et al. (2011) ca. 8 Jahre. Da die Nutzungsphase der Fahrzeuge auf 10 Jahre festge-

setzt wird, wird für die Bilanzierung vereinfacht davon ausgegangen, dass während der Lebensdauer des Fahrzeugs kein Austausch der Batterie notwendig wird.

Systemkomponente Brennstoffzelle: Die Brennstoffzelle des FCEV basiert auf der Protonenaustauschmembran-Technologie (PEM-Brennstoffzelle), dabei wurde das Materialinventar auf Basis von POLITO et al. (2008) genutzt und entsprechend der Gewichtsvorgabe skaliert (vgl. Tab. 10-10 im Anhang). In Tab. 10-11 sind die angesetzten Ecoinvent-Prozesse und die jeweilige Materialmenge für die Jahre 2010 bis 2030 ohne Berücksichtigung von Verlusten dargestellt. Die Herstellungsenergie für die gesamte Brennstoffzelle beträgt für das Jahr 2010 ca. 51 kWh pro Brennstoffzelle.

Zwischenfazit

In Abb. 6-5 ist die kumulierte Materialzusammensetzung der Herstellungsphase für die acht Antriebskonzepte für die Zeiträume 2010 bis 2050 inklusive anfallender Verluste dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass in Folge der größeren Fahrzeugmassen die Elektrofahrzeuge und dabei vor allem das REEV-Konzept mit 2 045 kg pro Fahrzeug im Jahr 2010 deutlich mehr Material als die konventionellen Antriebskonzepte benötigen. Gleichzeitig werden die Unterschiede auf Grund der Gewichtsreduktion mit der Zeit geringer, da sich bei den batterieelektrischen Antriebskonzepten noch deutlich mehr Einsparpotentiale ergeben.

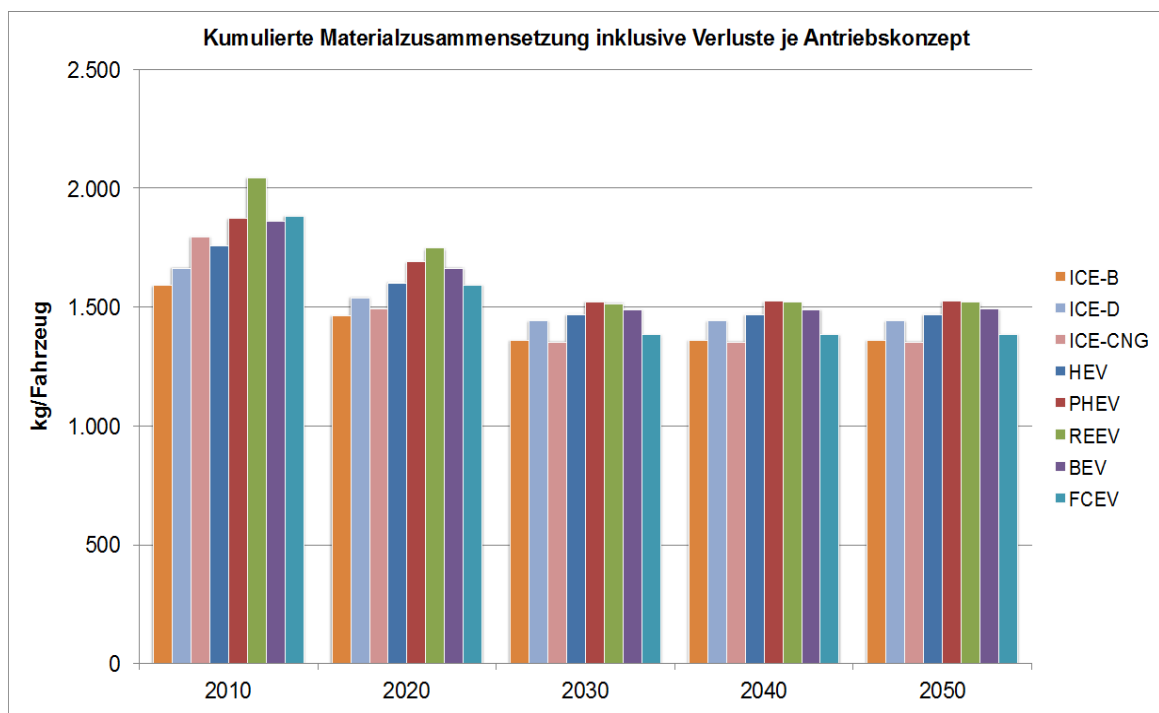


Abb. 6-5 Kumulierte Materialzusammensetzung der Herstellungsphase inklusive Verluste je Antriebskonzept

Ergänzend stellen die Abb. 6-6 und Abb. 6-7 die Materialzusammensetzung der batterieelektrischen Antriebskonzepte dar. Die Anteile der Systemkomponenten werden im Vergleich der Jahre 2010 und 2050 für die Herstellungsphase aufgezeigt.

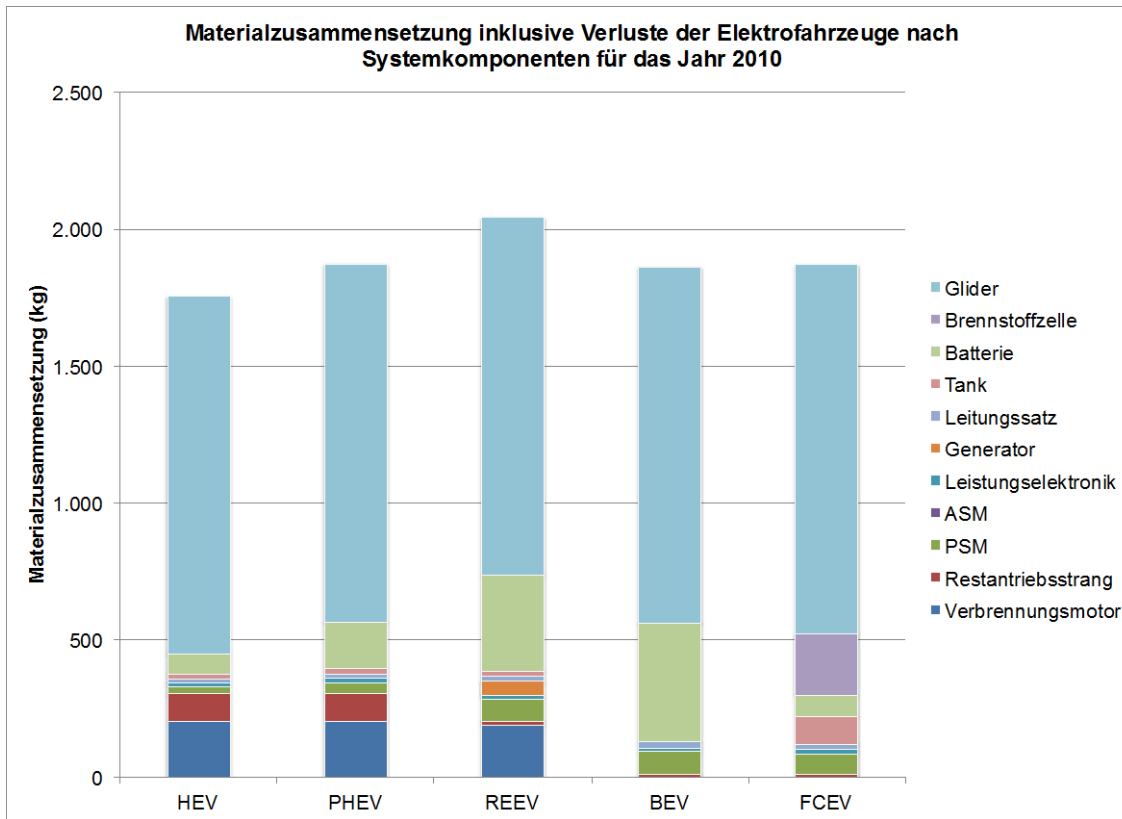


Abb. 6-6 Herstellungsphase: Kumulierte Materialzusammensetzung der batterieelektrischen Antriebskonzepte inklusive Verluste je Systemkomponente in 2010

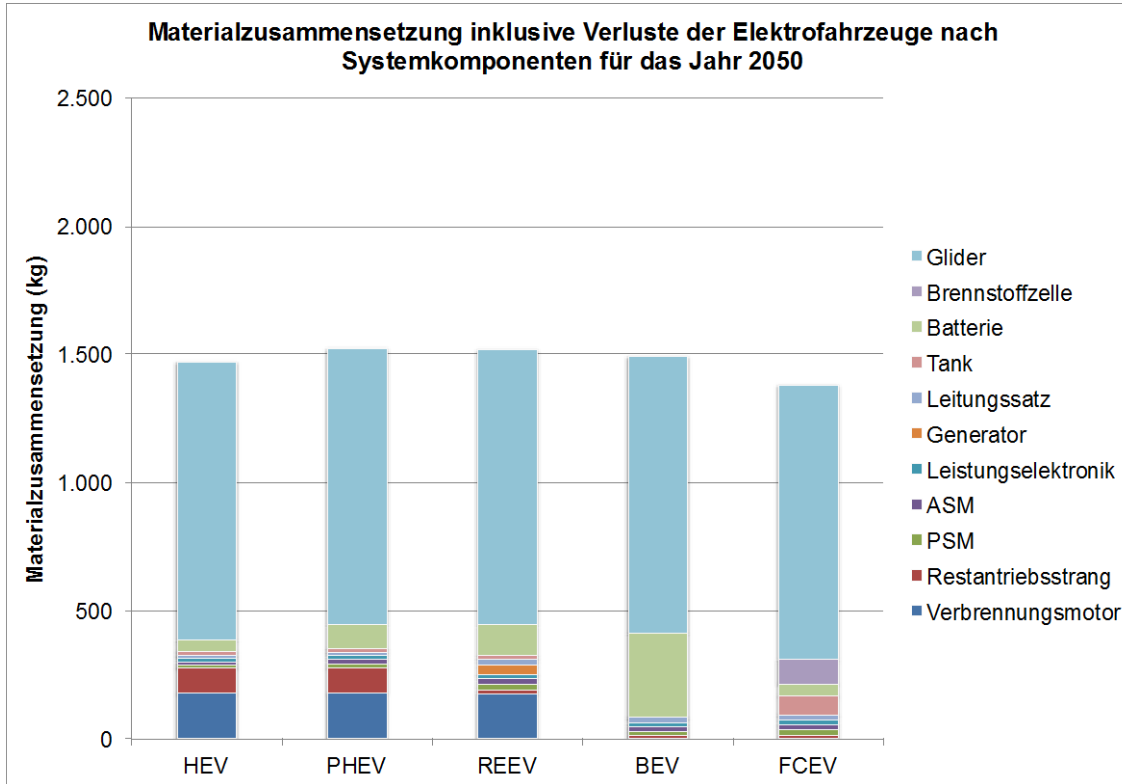


Abb. 6-7 Herstellungsphase: Kumulierte Materialzusammensetzung der batterieelektrischen Antriebskonzepte inklusive Verluste je Systemkomponente in 2050

Nutzungsphase

Die Nutzungsphase der Fahrzeuge wird auf 10 Jahre angesetzt und beinhaltet die Traktionsenergie in Form von Kraftstoff und elektrischer Energie sowie den Wasserverbrauch und den Reifenabrieb. Es wird von keinem Austausch oder Wechsel der Systemkomponenten während der Nutzungsphase ausgegangen.

Der Energieverbrauch der Fahrzeuge basiert nach (Huss et al. 2013) auf dem neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ), berücksichtigt jedoch einen 25%-Aufschlag für eine realistischere Abschätzung des Kraftstoffverbrauchs (Mock et al. 2013). Für die Jahre 2010 und 2020 wird eine technische Entwicklung mit einem abnehmendem Energieverbrauch unterstellt. Ab 2030 wird von einem konstanten Verbrauch ausgegangen (siehe Unterkapitel 6.3). Für das Benzinsegment wird ein Otto-Kraftstoff mit einem Anteil von 5 Vol.-% Ethanol aus Biomasse angesetzt (E5), wohingegen der Diesel eine Beimischung von 7 Vol.-% Biodiesel enthält (B7). Das Erdgas wird auf Grund der Datenverfügbarkeit über einen Mix unterschiedlicher Auslieferungsdrücke für die Schweiz modelliert („*natural gas, production mix, at service station*“). Die Annahmen bezüglich der Kraftstoffbereitstellung der Verbrennungsmotoren bleiben über den gesamten Betrachtungszeitraum unverändert.

Die Brennstoffzellen benötigen für die Energiebereitstellung reinen Wasserstoff zur Reaktion mit Sauerstoff. Der Wasserstoff wird in den Jahren 2010 und 2020 durch die katalytische Umsetzung von leichten Kohlenwasserstoffen mit Wasserdampf (Dampfreformierung von Erdgas) hergestellt. Nach Eichseder & Klell (2012) werden 0,45 Nm³ Methan für 1 Nm³ Wasserstoff bei einem Wirkungsgrad von 75 % bis 80 % benötigt. Unter der Annahme, dass Methan Hauptbestandteil von Erdgas ist, wird von einem Bedarf von 0,6 Nm³ je 1 Nm³ Wasserstoff ausgegangen. Spath & Mann (2001) geben für den Prozess der Dampfreformierung einen Energiebedarf von 6,56 kWh/kg H₂ an. Anhand des Methan- und Energiebedarfs wird über den abiotischen Materialbedarf von Erdgas und des Strommixes der Materialbedarf pro kg Wasserstoff ermittelt. Tab. 6-9 fasst die getroffenen Annahmen bei der Energiebereitstellung und den angesetzten Ecoinvent-Prozessen zusammen.

Antriebskonzept	Energiebereitstellung	Ecoinvent-Prozess
ICEV-B, HEV, PHEV, REEV	Otto-Kraftstoff mit 5 Vol.% Ethanol aus Biomasse	Petrol, 5% vol. ethanol, from biomass, at service station (CH)
ICEV-D	Diesel-Kraftstoff mit 7 Vol.% Biodiesel	Diesel, at regional storage (RER) (93 %) und rape methyl ester, production RER, at service station (CH) (7%)
ICEV-CNG	Erdgas	Natural gas, production mix, at service station (CH)
HEV, PHEV, REEV, BEV	Elektrische Energie	Electricity, production mix
FCEV	Wasserstoff	Auf Basis von natural gas, production mix, at service station (CH); ab 2030 alkalische Elektrolyse

Tab. 6-9 Annahmen bezüglich der Kraftstoff- bzw. Energiebereitstellung für die Nutzungsphase

Input nach Pehnt (2001)	Ecoinvent-Prozess	Einheit	Menge
Elektrischer Energiebedarf	electricity production mix DE	kWh/kg H ₂	47,7
Wasser vollentsalzt	water, ultrapure, at plant	l/kg H ₂	10,1
Kühlwasser	tap water, at user	l/kg H ₂	951,2
Kalilauge	potassium hydroxide, at regional storage	kg/kg H ₂	0,003
Stahl	steel, low-alloyed, at plant	kg/kg H ₂	0,006
Aluminium	aluminium, production mix, at plant	kg/kg H ₂	0,00006
Nickel	nickel, 99.5%, at plant	kg/kg H ₂	0,00064
Chrom	chromium, at regional storage (RER)	kg/kg H ₂	0,00019
Polyethylen	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant	kg/kg H ₂	0,00005
Beton	concrete, normal, at plant	kg/kg H ₂	0,0003
Transport, Lkw	transport, lorry >16t, fleet average	km/kg H ₂	300

Tab. 6-10 Material- und Energiebedarf für die Produktion von 1 kg H₂ durch alkalische Elektrolyse

Quelle: eigene Berechnung auf Basis von (Pehnt 2001)

Ab 2030 wird von einem Wasserstoff-Szenario mit einem deutlichen Anstieg des Herstellungsanteils durch alkalische Elektrolyse mittels überschüssigem regenerativen Strom (100 % Windkraft) ausgegangen. Dabei wird für 2030 ein Anteil von 50 % und ab 2040 eine vollständige Abdeckung des Wasserstoffbedarfs durch die alkalische Elektrolyse angesetzt. Basierend auf Pehnt (2001), wird der abiotische Materialbedarf mittels des angegebenen Material- und Energiebedarfs für die alkalische Elektrolyse zur Gewinnung von Wasserstoff bestimmt (vgl. Tab. 6-10).

Die Stromerzeugung stellt neben den Kraftstoffen Wasserstoff und Benzin das dritte Standbein der Energiebereitstellung der Elektromobilität dar. In dieser Studie wird die Umweltwirkung für folgende drei Varianten der Strombereitstellungs-Szenarien untersucht:

- Deutschland-Szenario (Szenario 2011A in Nitsch et al. 2012)
- Welt-Szenario (energy revolution scenario in Teske et al. 2012)
- 100 %-REG-STROM (Deutschland, Welt)

Die drei Szenarien unterscheiden sich dabei jeweils in ihrer, von dem Zeitpunkt abhängigen, Bruttostromerzeugung, die durch eine variable Anpassung des Produktionsmixes (siehe Tab. 9-11), in ihrer Umweltwirkung berücksichtigt werden. Im Rahmen einer konservativen Abschätzung wird von daher von einem konstanten Materialbedarf für die Stromerzeugung ausgegangen.

Das Deutschland-Szenario orientiert sich bei der Stromerzeugung für den Betrachtungszeitraum an dem Szenario 2011 A (Nitsch et al. 2012), das von einem Anteil regenerativer Stromerzeugung in 2050 von ca. 80 % ausgeht (vgl. Abb. 6-8).

In der Leitstudie sind die Angaben für den Anteil der Öl- und Gaserzeugung summiert dargestellt, daher werden die Anteile für das Jahr 2010 gemäß der AGE (2014) verwendet. Ab 2020 wird der Anteil der Stromerzeugung durch Öl als 0 % angenommen, sodass in der Modellierung die Stromerzeugung mit Gas den gesamten Anteil der Öl- und Gaserzeugung deckt. Für die Wasserkraft wird von einem konstanten Verhältnis aus Lauf- und Speicherwasserkraftwerken ab dem Jahr 2010 ausgegangen.

Ab dem Jahr 2030 spielen in der Leitstudie die Importe von regenerativem Strom aus dem EU-Stromverbund eine Rolle. In 2050 werden diese mit einem Anteil von 68 % durch solarthermische Kraftwerke (concentrated solar power, CSP) erzeugt, der Rest stammt aus Windkraft und anderen erneuerbaren Energieträgern (Nitsch et al. 2012). Es wird angenommen, dass der Rest durch 22 % Windkraft und 10 % durch Photovoltaik gedeckt wird. Dabei wird für die Photovoltaik ein Mix für Spanien angesetzt und der CSP-Strom über eine Maximalabschätzung durch Parabolrinnenkraftwerke auf Basis von Samus et al. (2013) angenommen. Der Anteil der Stromerzeugung durch Geothermie und biogene Abfälle bleibt unberücksichtigt, wodurch sich eine Abdeckung der Bruttostromerzeugung von 99 % in 2010, 98,6 % in 2020, 97,6 % in 2030, 96,9 % in 2040 und 94,4 % in 2050 ergibt.

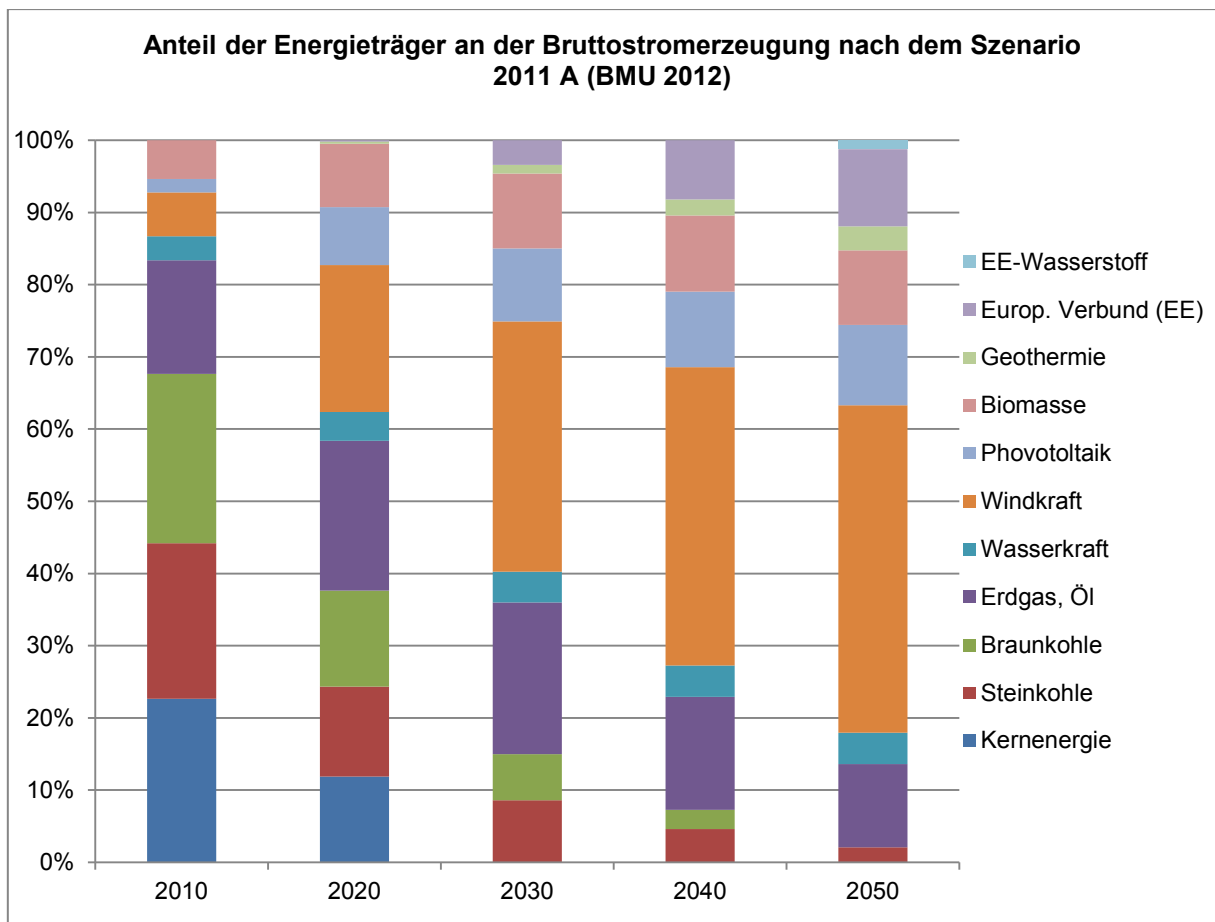


Abb. 6-8 Anteile der Energieträger an der Bruttostromerzeugung für Deutschland von 2010 bis 2050 nach dem BMU Szenario 2011 A

Quelle: basierend auf (Nitsch et al. 2012)

Für die Modellierung des Welt-Szenarios werden die Daten aus dem energy revolution scenario (Teske et al. 2012) verwendet, mit denen wiederum über den Produktionsmix von Strom aus Ecoinvent der abiotische Materialbedarf berechnet wird. Für den Wasserkraftprozess wird als Maximalabschätzung der Landesmix für Kroatien angesetzt, der eine Verteilung von Lauf- und Speicherkraftwerken mit dem größten Materialbedarf aufweist (2 % zu 98 %). Der Anteil der Solarthermie wird wiederum über den CSP-Wert auf Basis von Samus et al. (2013) berücksichtigt und die Meeresenergie wird vereinfacht ebenfalls über den Wasserkraftprozess modelliert. Der Anteil der Geothermie bleibt auf Grund mangelnder Daten

wie im Deutschland-Szenario unberücksichtigt. Die abgedeckte Stromerzeugung liegt beim Welt-Szenario für 2010 bei 99,7 % und in 2050 noch bei 91,4 %.

Die Anteile der einzelnen Energieträger an der Bruttostromerzeugung nach dem energy revolution-Szenario nach Teske et al. (2012) sind in Abb. 6-9 dargestellt, weltweit tragen die regenerativen Energien im Jahr 2050 ebenfalls ca. 80 % zur Stromerzeugung bei.

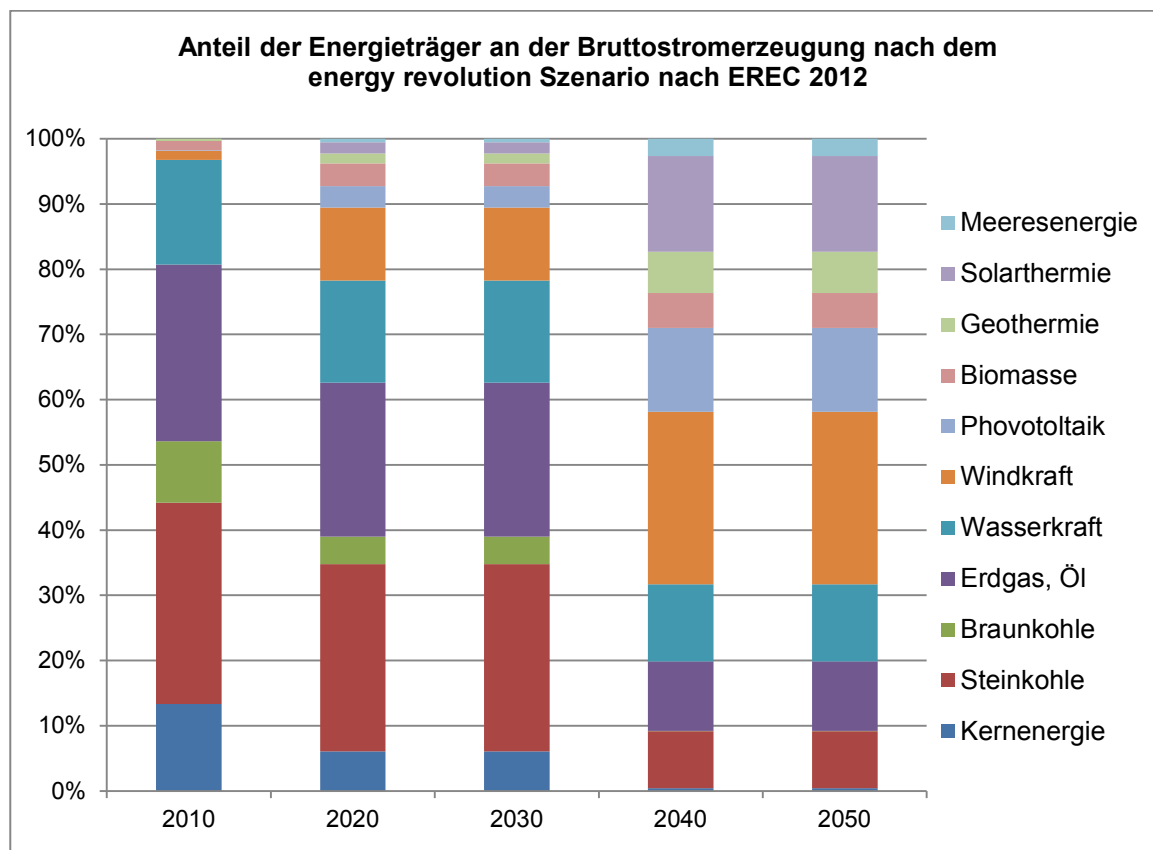


Abb. 6-9 Anteile der Energieträger an der Bruttostromerzeugung für die Welt von 2010 bis 2050 nach dem EREC revolution-Szenario

Quelle: (Teske et al. 2012)

Neben dem Deutschland-Szenario mit sukzessiv ansteigendem Anteil regenerativer Energien an der Stromerzeugung, wird für Deutschland zusätzlich ein Szenario mit einer vollständigen regenerativen Stromversorgung ab 2010 modelliert. Es stellt eine fiktive Annahme dar und soll als Optimalszenario für Vergleichszwecke dienen. Es wird von einer 100 %-igen Deckung mittels Windkraft ausgegangen. Die Berechnung des abiotischen Materialbedarfs dieses Szenarios basiert auf Wuppertal Institut (2014), wo ein abiotischer Materialbedarf von 142 kg/MWh ermittelt wurde.

Neben den Umweltwirkungen der Stromproduktion wurde im Rahmen dieser Studie auch die dabei anfallende Menge der kritischen Rohstoffe untersucht. Nach Wuppertal Institut (2014) sind für die Windkraft vor allem Neodym und Dysprosium relevant, wohingegen bei der Photovoltaik hauptsächlich Indium, Cadmium, Gallium, Selen und Tellur von Bedeutung sind. Für die Umrechnung der Mengen der kritischen Ressourcen von den durchschnittlichen Verbräuchen je nach Zeitpunkt neu zugebauter Technologie (kg/kW) in eine energiespezifische Menge (kg/kWh) wurde für die Photovoltaik eine Lebensdauer von 20 Jahren und 850 Voll-

laststunden und für die Windkraft eine Lebensdauer von 25 Jahren (on- & offshore) und 2 000 Volllaststunden für Onshore-Anlagen bzw. 3 500 Stunden für Offshore-Anlagen angenommen (Kunz 2013). Diese Werte beziehen sich auf Deutschland, werden aber vereinfachend auch für das Welt-Szenario verwendet. Tab. 6-11 zeigt den Bedarf kritischer Ressourcen je erzeugter kWh für die drei untersuchten Szenarien für das Jahr 2010.

Material	Materialbedarf kritischer Rohstoffe für 2010		
	Deutschland-Szenario kg/kWh	100 %-REG-Strom kg/kWh	Welt-Szenario kg/kWh
Neodym	6,05E-09	5,00E-08	1,36E-09
Dysprosium	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Indium	3,84E-10	-	2,04E-11
Cadmium	1,24E-09	-	6,60E-11
Gallium	5,81E-11	-	3,09E-12
Selen	3,16E-10	-	1,68E-11
Tellur	1,05E-09	-	5,58E-11

Tab. 6-11 Materialbedarf kritischer Rohstoffe für die Strombereitstellung

Quelle: (Wuppertal Institut 2014), eigene Berechnungen

Der Reifen- und Wasserverbrauch basiert auf Pusenius et al. (2005) und wird auf die Nutzungsdauer von 10 Jahren skaliert und deren abiotischer Materialbedarf mit Synthesekautschuk und Leitungswasser ermittelt. Der Verbrauch bzw. Abrieb wird für alle Fahrzeuge und Jahre als konstant angenommen. Weitere mögliche anfallende Materialien während der Nutzungsphase beispielsweise durch Wartung wurden nicht berücksichtigt.

End-of-Life

Die Entsorgung der Fahrzeuge wird über den Ecoinventprozess „disposal, passenger car“ (Frischknecht et al. 2005) modelliert, der auf die jeweilige Fahrzeugmasse des betrachteten Antriebskonzepts skaliert wird. Es wird davon ausgegangen, dass ein Großteil des Materialbedarfs der Fahrzeuge recycelt wird und dem Herstellungsprozess wieder zugeführt werden kann. Der Anteil der Materialien, die verbrannt und über die Deponierung entsorgt werden, ist demnach vergleichsweise gering. Diese Annahme deckt sich mit der EU-Direktive über Altfahrzeuge von 2000, die die Wiederverwertungs- und Recyclingrate für 2015 auf 95 % des Fahrzeuggewichts festlegt (EU 2000). Bei den Elektrofahrzeugen wird zusätzlich die Batterie im Entsorgungsprozess berücksichtigt, wobei jedoch ein Großteil der Materialien ebenfalls recycelt wird. Bei der Herstellung der Batterie wird jedoch von keiner Gutschrift durch Sekundärmaterialien ausgegangen, da die Produktion noch rein auf Primärmaterialien beruht.

6.5.3 Ergebnisse der MAIA auf Fahrzeugebene

Herstellungsphase

Ein Vergleich des abiotischen Materialbedarfs für die Herstellungsphase unter den acht Antriebskonzepten zeigt, dass die Referenzfahrzeuge mit Verbrennungsmotor einen deutlich geringeren abiotischen Materialbedarf als die Fahrzeuge mit Elektroantrieb haben. So weist der ICEV-B im Jahr 2010 mit einem Materialbedarf von 35 110 kg pro Fahrzeug nur knapp

67 % des Bedarfs eines PHEVs und nur knapp 56 % eines REEVs auf. Dagegen ist der Unterschied unter den konventionellen Antriebskonzepten eher gering, nur der ICEV-CNG weist auf Grund des schweren Tanks in 2010 einen um 12 % höheren abiotischen Materialbedarf auf und hat wegen der rohstoffintensiven Kohlefaser auch im weiteren Verlauf einen im Vergleich zu ICEV-B und ICEV-D einen relativ hohen Bedarf.

Innerhalb der batterieelektrischen Antriebskonzepte weist im Jahr 2010 der HEV mit 44 612 kg/Fahrzeug den geringsten abiotischen Materialbedarf auf, gefolgt vom PHEV, FCEV und dem BEV. Der REEV hat mit einem Materialbedarf von 63 114 kg/Fahrzeug in diesem Zeitraum den höchsten Bedarf und liegt um knapp 30 % oberhalb des HEVs.

Die Rangfolge in Bezug auf den Materialbedarf ändert sich in den folgenden Jahren, da unterschiedliche Systemkomponenten und eine Gewichtsreduktion berücksichtigt wurden. Generell lässt sich bei allen Fahrzeugtypen in der zeitlichen Entwicklung die erwartete Abnahme des abiotischen Materialbedarfs feststellen. Nur der ICEV-CNG weist auf Grund der Materialsubstitution des Tanks von Stahl auf Verbundwerkstoffe einen ansteigenden Bedarf auf. Jedoch sind die individuellen Abnahmeraten sehr unterschiedlich. Während beim BEV der Materialbedarf für die gesamte Herstellung sowohl im Zeitraum von 2011 auf 2020 als auch von 2021 bis 2030 um ca. 11 % abnimmt, sinkt dieser für den REEV im selben Zeitraum um 20 % und 16 %. Da höhere Potentiale bei der Gewichtsreduktion bei den Elektrofahrzeugen als bei den Referenzfahrzeugen identifiziert werden konnten, diese Weise eine Reduktion um 9 % auf, kann eine Annäherung des abiotischen Materialbedarfs unter den Antriebskonzepten beobachtet werden.

Anteil der Systemkomponenten

Generell lässt sich über alle Antriebskonzepte dem Glider der größte Anteil am abiotischen Materialbedarf zuweisen. Bei dem ICEV-B trägt der Glider beispielsweise 86 % zu dem gesamten Herstellungsaufwand bei. Dahingegen sind es beim BEV lediglich 48 %. Der (anfänglich sehr deutliche) Unterschied zwischen den einzelnen Antriebskonzepten resultiert demnach aus den zusätzlichen Systemkomponenten im Bereich der Elektromobilität, die zudem noch einen hohen spezifischen abiotischen Materialbedarf aufweisen. Abb. 6-10 weist den abiotischen Materialbedarf der Herstellungsphase der elektrisch betriebenen Fahrzeuge separat nach den Systemkomponenten für das Jahr 2010 aus. So tragen beispielsweise die Leistungselektronik und die Batterie des REEV im Jahr 2010 ca. 34 % zum Materialbedarf des gesamten Fahrzeuges bei. Das BEV-Konzept hat trotz fehlendem Tank und Verbrennungsmotor auf Grund der rohstoffintensiven Batterie einen höheren Bedarf als beispielsweise das HEV-oder PHEV-Konzept.

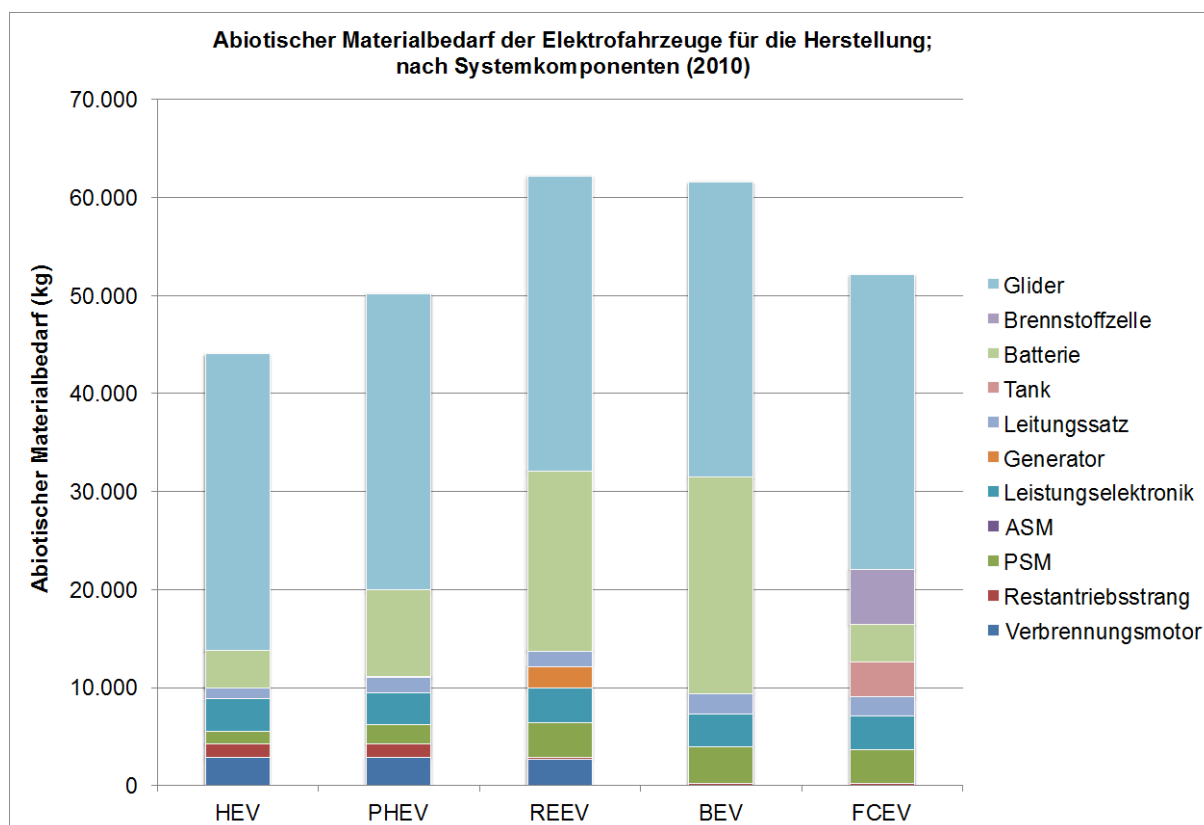


Abb. 6-10 Abiotischer Materialbedarf der Herstellungsphase der batterieelektrischen Antriebskonzepte nach Systemkomponenten für das Jahr 2010

Die Anteile der einzelnen Systemkomponenten ändern sich im Zeitverlauf trotz teilweiser unterschiedlicher Gewichtsreduktion nur unwesentlich (vgl. Abb. 6-11). Leichte Abweichungen resultieren aus den sich ändernden Anteilen der Elektromotoren ab dem Jahr 2030. Dies liegt an dem leicht geringeren abiotischen Materialbedarf der ASM im Vergleich zur PSM. Weist erstgenannter Motortyp in 2030 einen Bedarf von 38,3 kg/kg auf, liegt dieser für den PSM bei 44,8 kg/kg.

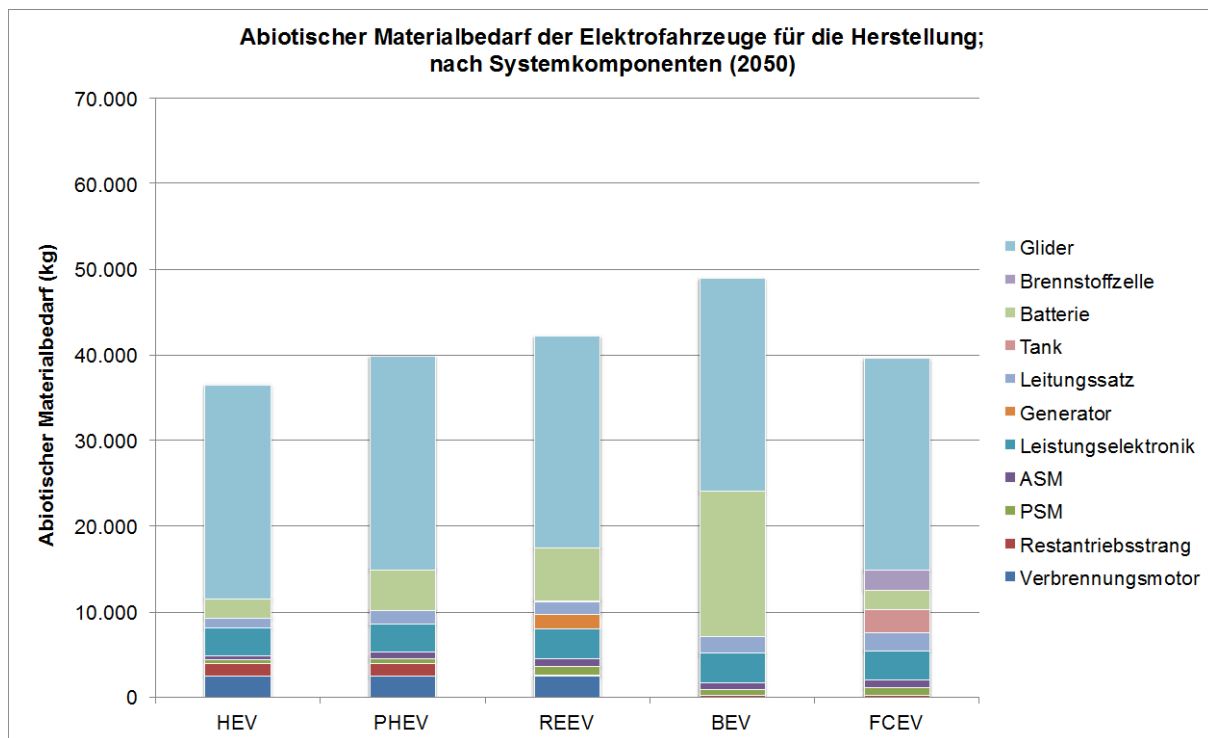


Abb. 6-11 Abiotischer Materialbedarf der Herstellungsphase der batterieelektrischen Antriebskonzepte nach Systemkomponenten für das Jahr 2050

Betrachtung auf Materialebene

Die Analyse des abiotischen Materialbedarfs auf Materialebene erlaubt es, materialintensive Rohstoffe zu identifizieren. Dadurch können vor einer Kritikalitätsbetrachtung (siehe Unterkapitel 6.8) erste Hinweise abgeleitet werden, an welchen Stellen die Substitution von Materialien mit großem Rohstoffbedarf relevante Beiträge zur Entwicklung eines ressourcenschonenderen E-Mobilitätsszenarios leisten könnte. Tab. 6-12 zeigt dazu die zwölf Materialien mit dem höchstem abiotischen Materialbedarf für den BEV und den ICEV-B im Jahr 2010. Dabei sind die verschiedenen Materialformen und die regionalen Spezifikationen zur leichteren Interpretation zusammengefasst.

Der Hauptanteil des verwendeten Stahls fällt sowohl bei dem ICEV-B als auch dem BEV bei der Karosserie (Glider) an, weitere Anteile entfallen auf den Verbrennungsmotor beziehungsweise den Elektromotor. Bei der Batterie hingegen ist der Anteil der Metalle am abiotischen Materialbedarf eher vernachlässigbar. Stattdessen hat hier Kupfer, Lithium und Gold einen großen Anteil am Materialbedarf. Weiterer Kupferbedarf bei dem BEV entfallen auf den Elektromotor und den Leitungssatz. Während Gold beim ICEV-B ausschließlich in der Elektronik im Glider anfällt, ist der Bedarf beim BEV heterogener: neben Glider wird es zudem in der Batterie als auch in der Leistungselektronik eingesetzt. Silber wird ebenfalls hauptsächlich für die Leistungselektronik benötigt, geringe Mengen fallen wiederum im Glider an.

Die Verteilung des Rohstoffbedarfs je Material in Bezug zur eingesetzten Systemkomponente ist im Wesentlichen vom BEV auf die weiteren batterieelektrischen Fahrzeuge übertragbar und auch relativ konstant über die Zeit. Ähnlich verhält es sich bei den konventionellen Antriebskonzepten, wobei jeweils der CFK-Tank des CNG- wie auch FCEV-Fahrzeuges als rohstoffintensive Komponente berücksichtigt werden muss. Auch bei der Brennstoffzelle

zeigt sich der größte abiotische Materialbedarf beim Stahl. Eingesetzte kritischere Stoffe wie Platin sind im Vergleich dazu vernachlässigbar.

Material	Abiotischer Materialbedarf (kg/Fahrzeug)	
	BEV	ICEV-B
Kupfer (Regionallager, primär)	17 361	2 773
Stahl (Kaltfeinblech, Bewehrungsstahl, Chromstahl)	15 090	16 749
Gold (Regionallager, primär)	10 074	5 042
Lithiumsole (konzentriert)	4 132	0
Aluminium (Gusslegierung, Produktionsmix)	2 224	1 145
Kunststoffe	1 703	1 660
Silber	1 181	533
Graphit (Batteriequalität)	774	0
Mangankonzentrat	703	0
Synthetischer Kautschuk	540	350
Zink (Regionallager, primär)	340	337
Neodym-Oxid	325	0
Rest	2 863	1 388

Tab. 6-12 Übersicht der Materialien mit anteilig höchstem abiotischem Materialbedarf für den BEV und ICEV-B in 2010

Nutzungsphase

Ein Vergleich unter den verschiedenen Antriebskonzepten zeigt deutliche Schwankungen des abiotischen Materialbedarfs sowohl zwischen konventionellen und batterieelektrischen Antriebskonzepten als auch innerhalb der Elektromobilität.

Bei den Antriebskonzepten, die nur Kraftstoff zur Traktion nutzen (ICEV-B, ICEV-D, ICEV-CNG, HEV) ist der Anteil der Nutzungsphase am Lebenszyklus im Vergleich zur Herstellungsphase geringer. So entfallen knapp 35 % des abiotischen Materialbedarfs des ICEV-B auf die Nutzungsphase (vgl. Tab. 6-13). Je größer der Anteil der elektrischen Energie an der Traktion wird, desto bedeutender der Anteil der Nutzungsphase. Beim BEV steigt der Einfluss der Nutzungsphase auf knapp 64 %. Durch den vergleichsweise hohen Strombedarf von REEV und BEV sowie die zunächst noch hohen Anteile konventioneller Erzeugung im Strommix, liegt der abiotische Materialbedarf beispielsweise beim BEV im Jahr 2010 bei 11 348 kg/Jahr. Bezogen auf das BEV beträgt der Materialbedarf für die Kraftstoffbereitstellung für das Hybridfahrzeug mit 1 383 kg pro Jahr zum selben Zeitpunkt nur 12 %. Während der Materialbedarf bei der Herstellung des Wasserstoffs mittels Dampfreformierung im Mittelfeld (4 140 kg/Jahr) liegt, sind die Umweltwirkungen der konventionellen Antriebskonzepte nur geringfügig größer als die des HEV.

Die großen Unterschiede zwischen den Antriebskonzepten nehmen im Lauf der Zeit ab. Sind die Senkungspotentiale im Hinblick auf den Materialbedarf bei den konventionellen Antrieben so gut wie ausgeschöpft, kann durch den zunehmenden Anteil regenerativer Erzeugung an der Stromproduktion von knapp 17 % im Jahr 2010 auf ca. 85 % im Jahr 2050 (gemäß Deutschland-Szenario) der Materialbedarf der Elektromobilität noch deutlich gesenkt werden: Im Jahr

2050 liegt der abiotische Materialbedarf eines BEV bei 533 kg pro Jahr, wodurch der Wert von 2010 um gut 95 % reduziert werden würde.

Anteile des abiotischen Materialbedarfs...	Antriebskonzepte 2010							
	Verbrennung			Elektromobilität				
	ICEV-B	ICEV-D	ICEV-CNG	HEV	PHEV	REEV	BEV	FCEV
...der Systemkomponenten in der Herstellung								
Glider	86,2	85,4	75,8	67,8	59,4	47,9	48,4	56,8
Verbrennungsmotor	9,4	10,2	7,9	6,6	5,8	4,4		
Rest-Antriebsstrang	4,4	4,3	4,0	3,5	3,2	0,5	0,5	0,6
Tank	0,1	0,1	12,4	0,1	0,1	0,1		7,1
Elektromotor				3,2	4,1	6,1	6,0	6,8
Leistungselektronik				7,7	6,8	5,7	5,8	6,8
Leitungssatz				2,7	3,2	2,6	3,4	4,0
Batterie				8,5	17,5	29,1	35,7	7,1
Generator						3,9		
Brennstoffzelle								10,8
Gesamt (Herstellung)	100	100	100	100	100	100	100	100
...der Lebenszyklusphasen am gesamten Materialbedarf								
Herstellung	63,7	69,7	70,8	75,6	54,5	39,9	35,2	55,8
Nutzung	35,6	29,8	28,4	23,5	44,7	59,5	64,2	43,6
End-of-Life	0,7	0,8	0,8	0,9	0,7	0,6	0,6	0,6
Gesamt	100	100	100	100	100	100	100	100

Tab. 6-13 Anteile des abiotischen Materialbedarfs der Systemkomponenten an der Herstellung und der Lebenszyklusphasen an dem gesamten Materialbedarf für das Jahr 2010 [in %]
(Nutzungsphase = 10 Jahre mit dem Deutschland-Szenario)

Obwohl das FCEV ab 2030 Wasserstoff aus der relativ energieintensiven alkalischen Elektrolyse verwendet, wirkt sich auch hier der sinkende Materialbedarf der Stromproduktion (in kg/kWh) auf den Gesamtbedarf aus. Im Jahr 2050 liegt dieser für den FCEV mit 468 kg/Jahr noch unterhalb des BEV.

Wie relevant die Art der Energiebereitstellung für die Nutzungsphase ist, zeigt sich in einem Vergleich der drei betrachteten Stromszenarien für die Elektrofahrzeuge im Jahr 2010 (siehe Abb. 6-12). Bei dem Weltszenario liegt der Ressourcenbedarf des BEV-Segments bei 7 468 kg/Jahr, was sich auf den geringeren spezifischen abiotischen Materialbedarf je kWh zurückführen lässt. Im Rahmen einer Sensitivität mit einer 100 %-igen Deckung durch Windkraft im Jahr 2010 würde sich nur noch ein abiotischer Materialbedarf von 433 kg/Jahr für den BEV ergeben.

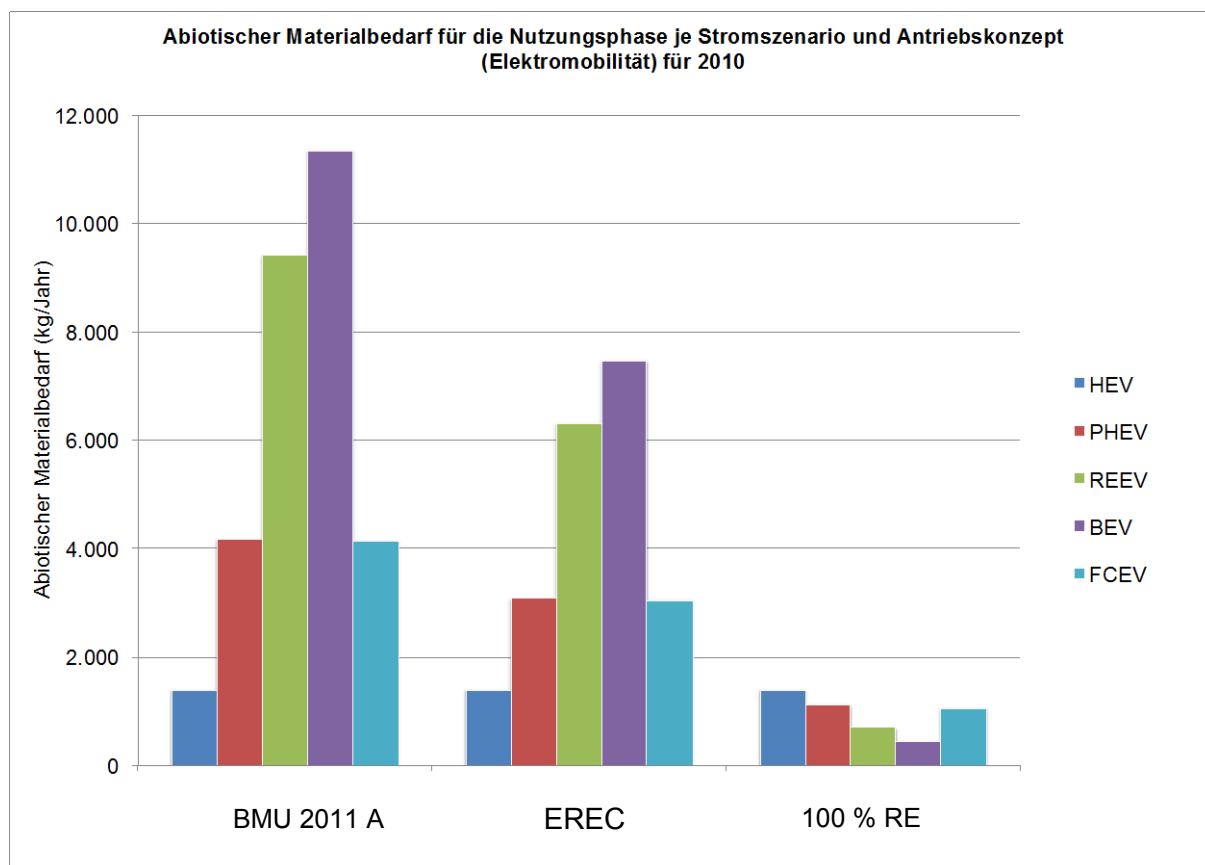


Abb. 6-12 Vergleich des abiotischen Materialbedarfs für die Nutzungsphase mit den Szenarien BMU 2011 A, EREC und 100 % RE je Antriebskonzept (Elektromobilität) für das Jahr 2010

In der Folge der effizienteren Stromproduktion, weisen die Elektrofahrzeuge einen sukzessiv sinkenden abiotischen Materialbedarf auf. Im Jahr 2050 sind alle batterieelektrischen Antriebskonzepte hinsichtlich des Materialbedarfs während der Nutzungsphase umweltschoner als die konventionellen Antriebskonzepte.

Gleichzeitig zeigt sich im zeitlichen Verlauf eine deutliche Verschiebung der jeweiligen Anteile am gesamten abiotischen Materialbedarf. Während der Anteil der Herstellung bei den konventionellen Antriebskonzepten nur geringfügig ansteigt, stellt sie bei den batterieelektrischen Konzepten im Jahr 2050 (vgl. Tab. 6-14) mit 89,4 % am gesamten Materialbedarf beim BEV den Hauptanteil dar.

Anteile des abiotischen Materialbedarfs...	Antriebskonzepte 2050							
	Verbrennung			Elektromobilität				
	ICEV-B	ICEV-D	ICEV-CNG	HEV	PHEV	REEV	BEV	FCEV
...der Systemkomponenten in der Herstellung								
Glider	85,2	82,9	82,2	67,6	61,5	58,0	50,5	61,6
Verbrennungsmotor	9,7	11,9	7,2	6,9	6,4	5,9		
Rest-Antriebsstrang	5,0	5,0	3,7	4,2	3,9	0,7	0,6	0,7
Tank	0,1	0,1	7,0	0,1	0,1	0,1		7,0
Elektromotor				2,7	3,6	4,9	3,1	4,8
Leistungselektronik				9,2	8,5	8,3	7,2	8,8
Leitungssatz				3,2	4,0	3,7	4,2	5,2
Batterie				6,0	12,1	14,4	34,4	5,2
Generator						4,1		
Brennstoffzelle								6,4
Gesamt	100	100	100	100	100	100	100	100
...der Lebenszyklusphasen am gesamten Materialbedarf								
Herstellung	69,4	73,9	78,4	80,5	83,4	85,0	89,0	82,4
Nutzung	29,9	25,3	20,9	18,6	15,6	13,9	9,6	16,7
End-of-Life	0,8	0,9	0,7	0,9	1,0	1,0	1,4	0,8
Gesamt	100	100	100	100	100	100	100	100

Tab. 6-14 Anteile des abiotischen Materialbedarfs der Systemkomponenten an der Herstellung sowie Anteile der Lebenszyklusphasen an dem gesamten Materialbedarf für das Jahr 2050 [in %] (Nutzungsphase = 10 Jahre mit dem Deutschland-Szenario)

End-of-Life

Die Entsorgung ist die Lebenszyklusphase mit dem geringsten abiotischen Materialbedarf und im Verhältnis zur Herstellung und Nutzungsphase vernachlässigbar. Dies liegt daran, dass angenommen wurde, dass ein Großteil der Komponenten bzw. Materialien recycelt wird und wiederverwertet werden. Dies ist dann besonders sinnvoll, wenn neben den ökologischen Vorteilen auch der Aufwand des Recycling geringer ausfällt als beispielsweise der Abbau von Primärmaterialien. Die wenigen nicht-recycelbaren Materialien werden verbrannt und deponiert. Die Deponierung ist im Gegensatz zum Recycling sehr ressourcenintensiv, sodass bei einem höheren Anteil der Deponierung am Entsorgungsprozesses ein höherer abiotischer Materialbedarf für die Entsorgung resultieren würde.

Ein Vergleich unter den Antriebskonzepten zeigt, dass die batterieelektrischen Konzepte einen teilweise doppelt so hohen abiotischen Materialbedarf bei der Entsorgung gegenüber den konventionellen Konzepten aufweisen. Dieser Unterschied resultiert aus dem aufwändigen Recyclingverfahren der Batterie, das zur Zeit angewendet wird (Buchert et al. 2011), wobei vor allem die Trennung der Materialien und der dabei benötigte Energieaufwand ins Gewicht fällt. Durch ein effizienteres Recyclingverfahren, wie es beispielsweise in Buchert et al. (2011) entwickelt wurde, ist es möglich auch den Materialbedarf der Entsorgung der batterieelektrischen Antriebskonzepte zu senken. Vor dem Hintergrund eines Systemwandels zu einem steigenden Anteil der Elektromobilität am Straßenverkehr, ermöglichen neue Recyclingverfahren den Anteil der Nutzung recycelter Materialien bei der Batterieherstellung zu steigern und so möglicherweise durch den Einsatz von Sekundärmaterial auch die Herstellungsphase in ihrer Umweltwirkung zu optimieren.

Die geschilderten Ergebnisse der Auswertung des abiotischen Materialbedarfs der einzelnen Lebenszyklusphasen werden in Abb. 6-13 kumuliert in kg pro Jahr zusammengefasst. Die hinterlegte Nutzungsphase basiert dabei auf dem Deutschland-Szenario.

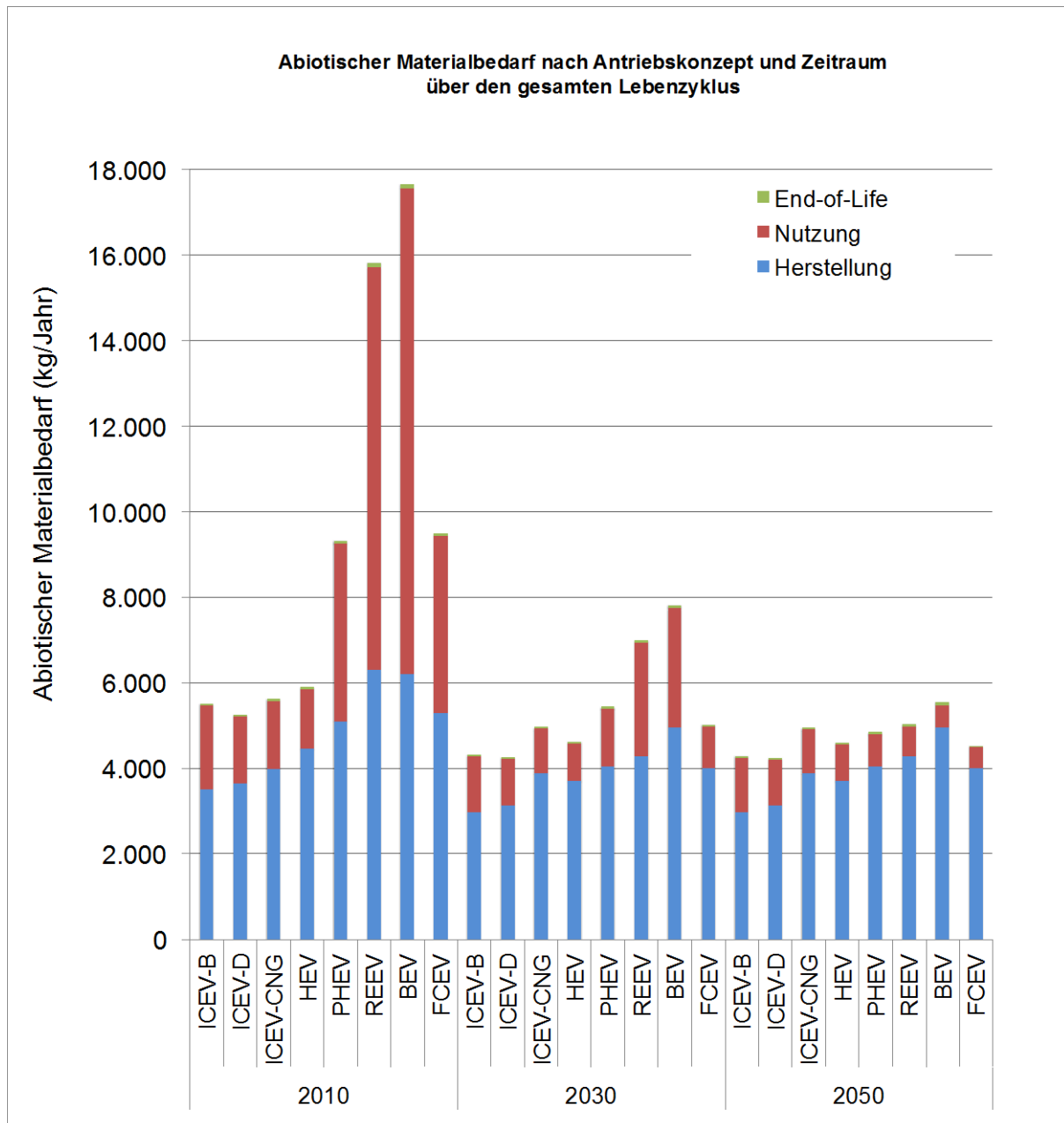


Abb. 6-13 Lebenszyklusübergreifender Vergleich (Herstellung, Nutzung, End of Life) des abiotischen Materialbedarfs aller Antriebskonzepte und für den gesamten Betrachtungszeitraum (Angaben bezogen auf ein Jahr); Deutschland-Szenario als Grundlage

6.5.4 Treibhauspotential

Der Fokus der MAIA liegt auf der Analyse des abiotischen Materialbedarfs. Im Rahmen der Studie wurde ergänzend dazu die Abschätzung des Treibhauspotentials (global warming potential, GWP) vorgenommen. Das GWP wird in kg CO₂-Äquivalenten angegeben und beschreibt den Beitrag zur globalen Erwärmung über einen festgelegten Zeitraum. Vorliegende Studie betrachtet, wie im Allgemeinen üblich, den Beitrag für den Zeitraum von 100 Jahren.

Das Vorgehen zur Bestimmung des GWP 100 folgt in Grundzügen dem der Berechnung des abiotischen Materialbedarfs: Auf Basis der ermittelten Materialzusammensetzungen und der Energiebereitstellung wird das Treibhauspotential mit der IPCC 2007-Methode berechnet. Bei der Nutzungsphase wird die Verbrennung der Kraftstoffe (Benzin, Diesel und Erdgas) über den Ecoinvent-Prozess „operation, passenger car“ modelliert. Die Strombereitstellung wird über die Erzeugung nach dem jeweiligen Szenario (Deutschland, Welt und 100 %-REG-Strom) berücksichtigt, ebenso wie die Nutzung von Wasserstoff beim FCEV. Da bei der umgekehrten Reaktion der H₂O-Elektrolyse mit den Edukten Wasser- und Sauerstoff nur reines Wasser als Produkt entsteht, kann das GWP bei der Umsetzung des Wasserstoffs beim FCEV vernachlässigt werden. Allein die Bereitstellung des Wasserstoffs fällt ins Gewicht. Das Treibhauspotential des Energiebedarfs bei der Herstellung der Systemkomponenten wird über das jeweilige Treibhauspotential der Strom- und Wärmebereitstellung berücksichtigt. Die im Rahmen der Entsorgung der Fahrzeuge anfallenden Emissionen durch die Verbrennung werden weiterhin über den Ecoinvent-Prozess „disposal, passenger car“ abgedeckt. Bei den Elektrofahrzeugen wird zusätzlich die Entsorgung der Batterie berücksichtigt.

Die Ergebnisse der lebenszyklusweiten Treibhauspotentialanalyse sind analog zu Abb. 6-13 in Abb. 6-14 nach Antriebskonzept und Zeitpunkt pro Jahr dargestellt und zeigen deutlich abweichende Ergebnisse von denen des ermittelten abiotischen Materialbedarfs. So kehrt sich die Verteilung der ökologischen Auswirkungen auf die Lebenszyklusphasen im Vergleich zum Materialbedarf um. War bei der Betrachtung des abiotischen Materialbedarfs bei den konventionellen Antriebskonzepten die Herstellung die Lebenszyklusphase mit dem größten Beitrag, stellt nun die Nutzungsphase die Haupteinflussgröße dar. Und auch bei den batterieelektrischen Fahrzeugen ist der Anteil der Nutzungsphase am gesamten Lebenszyklus gegenüber dem Materialbedarf gestiegen. Lediglich beim FCEV hat die Herstellung, analog zum Materialbedarf, einen ähnlichen Anteil.

Darüber hinaus hat sich die Reihenfolge der Antriebskonzepte mit den höchsten Umweltwirkungen bei der Betrachtung des GWP geändert. Die batterieelektrischen Fahrzeuge weisen nun im Vergleich zu den konventionellen Antrieben schon im Jahr 2010 ein geringeres Treibhauspotential in der Nutzungsphase auf. Der Unterschied in der Herstellungsphase ist zudem kleiner geworden. So beträgt das GWP des BEV über alle Lebenszyklusphasen im Jahr 2010 nur gut 62 % des GWP eines ICE-B-Fahrzeuges.

Das gute Abschneiden der Elektrofahrzeuge gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor bei aktuellem Strommix liegt vor allem an dem angesetzten Stromverbrauch. Analog zu den konventionellen Antriebskonzepten wurde der Energieverbrauch während der Nutzungsphase über den NEFZ mit einem Aufschlag von 25 % angesetzt. Diese 25 %-ige Steigerung hat sich in der Praxis vor allem bei den Verbrennungsmotoren als realistisch erwiesen, wohingegen es für Elektrofahrzeuge nur wenige praxisnahe Verbrauchswerte existieren. Für ein batterieelektrisches Fahrzeug resultiert ein Energieverbrauch von 18,11 kWh/100 km im Jahr 2010. Dieser Wert liegt im Vergleich zu anderen wissenschaftlichen Studien der Elektromobilität am unteren Rand der Verbrauchswerte, so wird in (Helms et al. 2011) ein Energieverbrauch von 21 kWh/100 km angesetzt. Unter Berücksichtigung dieses Verbrauchs für den BEV in 2010, würde sich ein um 200 kg/CO₂-Äquivalent größerer GWP-Wert ergeben.

Die Herstellungsphase der batterieelektrischen Antriebskonzepte ist, im Vergleich zu den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, etwas höher ausgefallen. Für die Herstellung eines

BEV werden in 2010 ca. 6,2 t an CO₂-Äquivalenten erzeugt (Helms et al. 2011). Für die Herstellung eines ICEV-B werden dabei ca. 5,2 t CO₂-Äquivalente erzeugt.

Die Entsorgung bzw. die Verwertung der Fahrzeuge weist bei dem Treibhauspotential zwar einen höheren Anteil an dem gesamte Lebenszyklus auf, als dies bei dem abiotischen Materialbedarf der Fall war, ist jedoch im Vergleich zu der Herstellungs- und Nutzungsphase weiterhin vernachlässigbar.

Generell lassen sich jedoch auch im Rahmen dieser Studie vergleichbare Schlussfolgerungen bezüglich der lebenszyklusweiten Klimabilanz von konventionellen Antriebskonzepten gegenüber batterieelektrischen Konzepten wie dies bei Helms et al. (2011) der Fall war zu. So weist die Nutzung elektrifizierter Antriebe im Vergleich zu konventionellen Antrieben bei alleiniger Betrachtung des Treibhauspotentials schon in 2010 einen ökologischen Vorteil auf.

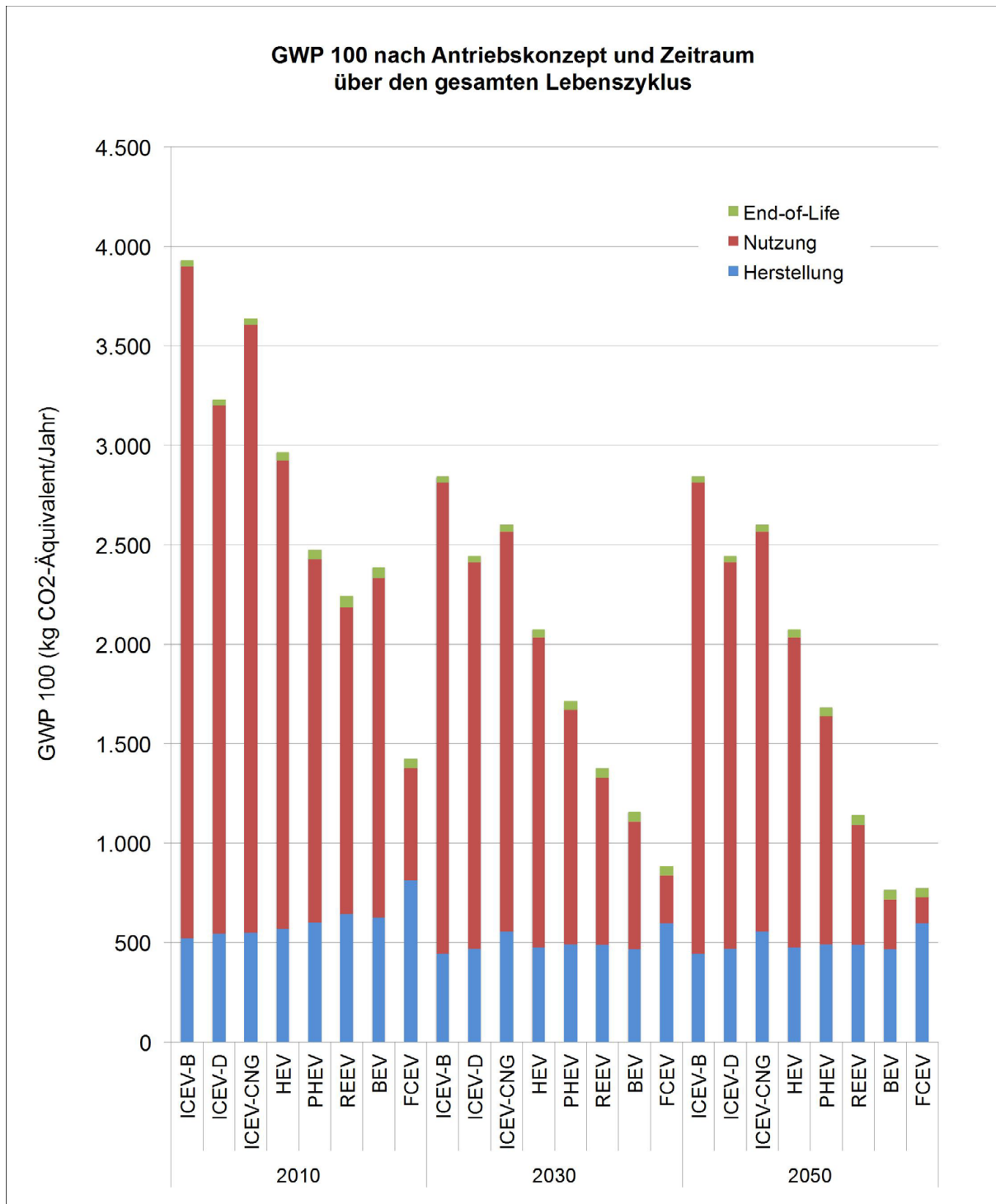


Abb. 6-14 Lebenszyklusübergreifender Vergleich (Herstellung, Nutzung, End of Life) des Treibhauspotentials (GWP 100) aller Antriebskonzepte und für den gesamten Betrachtungszeitraum. (Angaben bezogen auf ein Jahr), Deutschland-Szenario als Grundlage

6.5.5 Daten- und Forschungsbedarf

Bei der Modellierung der Antriebskonzepte und der Energiebereitstellung für die Nutzungsphase wurden teilweise auf Grund von mangelnder Datenverfügbarkeit eigene Annahmen getroffen, die nur eine erste Abschätzung der Ökobilanzierung der betrachteten Fahrzeugkonzepte erlaubt.

Weiterer Forschungsbedarf besteht noch bei der Ressourcenkategorie „biotischer Materialbedarf“. Die bisherigen Abschätzungen mit dem MIPS-Bewertungsschema (siehe Abschnitt 6.5.1 zur Anwendung der MIPS-Methodik mit LCA-Datenbanken) liefern bislang fundierte Aussagen zum abiotischen Materialbedarf. Aktuell ist diese Einschränkung bei einem grundlegenden Teil der Material- und Energiebereitstellungspfade akzeptabel. Vor dem Hintergrund der Zunahme der regenerativen Stromerzeugung und des daraus resultierenden steigenden Bedarfs pflanzlicher Rohstoffe für die Bereitstellung von Energie aus Biomasse scheint eine umfassende Einbeziehung des biotischen Materialbedarfs allerdings als notwendig.

Bei der Batterietechnologie konnten im Rahmen dieser Studie nur Lithium-Ionen-Batterien auf Lithium-Mangan-Oxid-Basis modelliert werden. Weitere im Rahmen der Technologieauswahl als relevant eingestufte Technologien (Lithium-Luft-Batterie) konnten auf Grund mangelnder Daten beziehungsweise Materialinventare nicht berücksichtigt werden und erfordern zusätzlichen Daten- und Forschungsbedarf.

Die elektrischen Maschinen bilden neben der Leistungselektronik die Hauptkomponenten mit hohem Bedarf an Seltenen Erden. Durch den vermehrten Einsatz elektrisch erregter Asynchronmotoren ohne Permanentmagnete lässt sich dieser Bedarf senken. Die Transversalflussmaschine bietet sich als weitere Alternative an, die jedoch im Rahmen dieser Studie auf Grund fehlender Materialinventare nicht berücksichtigt wurde.

Die Mobilitätskonzepte der Zukunft werden immer deutlicher mit in die Energieversorgung integriert und so beispielsweise als große Speichereinheit über die Kraftstoffe Erdgas und Wasserstoff genutzt, indem Überschussstrom aus regenerativen Energieerzeugungsanlagen zur Erzeugung dieser speicherbaren Kraftstoffe verwendet wird. Dabei wurde im Rahmen dieser Studie die elektrolytische Herstellung von Wasserstoff in der Nutzungsphase der Brennstoffzellenfahrzeuge berücksichtigt. Bei der Kraftstoffbereitstellung von Erdgas bildet die Methanisierung von Wasserstoff eine alternative Herstellungsform, die jedoch auf Grund fehlender Daten nicht in die Modellierung der Nutzungsphase eingehen konnte.

Darüber hinaus weisen sowohl die Energiesysteme als auch die Herstellungsprozesse deutliche Effizienzpotentiale auf, die im Rahmen der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt werden konnten. Bei zukünftigen Forschungsarbeiten sind daher Lernkurven einzelner Technologien zu integrieren.

6.6 Definition langfristiger Verkehrsszenarien

D. Kreyenberg (DLR)

6.6.1 Ziel und Vorgehensweise

In diesem Kapitel werden die Rahmendaten zur Verkehrsnachfrage in Deutschland und der Welt dargestellt. Ihre Verwertbarkeit wird für die Ziele dieses Kapitels diskutiert, eine Grundlage für die Hochrechnungen verschiedener langfristiger Entwicklungsmöglichkeiten von Ressourcenverbräuchen und Treibhausgas-Emissionen des Pkw-Verkehrs zu schaffen. Dabei liegt ein besonderer Fokus auf dem bis zum Jahr 2050 erwarteten Pkw-Bestand in Deutschland und der Welt. Der deutsche Pkw-Bestand wird aus Gründen des Projektfokus

und der Datenverfügbarkeit genauer analysiert als der weltweite Pkw-Bestand. Ferner wird im Weiteren die Pkw-Laufleistung und -Lebensdauer kritisch analysiert und diskutiert.

6.6.2 Verkehrsleistung in Deutschland und der Welt

Der Personenverkehr unterlag in Deutschland in den letzten 200 Jahren gravierenden Veränderungen. Ende des 19. Jahrhunderts bis Mitte des 20. Jahrhunderts war die Eisenbahn das mit Abstand meist genutzte Verkehrsmittel. Mit der Entwicklung des Automobils, vor mehr als 125 Jahren, wurde ein individuelles und flexibles Verkehrsmittel geschaffen, welches den Personenverkehr seit Mitte des letzten Jahrhunderts dominiert (Braess & Seiffert 2011). Die genaue Analyse der Verkehrsleistung im motorisierten Personenverkehr der letzten Jahre zeigt, dass der prozentuale Anteil des motorisierten Individualverkehrs (MIV) an der Verkehrsleistung seit den 1970er Jahren auf sehr hohem Niveau nahezu stagniert²³. Der Anteil des öffentlichen Straßenpersonenverkehrs (ÖSPV) am Gesamtverkehr war in diesem Zeitraum stark rückläufig. Dafür konnte sich der Eisenbahnverkehr stabilisieren und der Luftverkehr nahezu verfünffachen (BMVBS 2000, BMVBS 2013).

In absoluten Zahlen hat sich die Verkehrsleistung im motorisierten Personenverkehr (ÖV + MIV) von 556,4 Mrd. pkm im Jahr 1975 auf 1 117 Mrd. pkm im Jahr 2010 erhöht²⁴. Bei einer Bevölkerungsgröße von 61,8 Mio. Einwohnern im Jahr 1975 entspricht das einer jährlich zurückgelegten Strecke von rund 9 000 km pro Einwohner im motorisierten Personenverkehr. Für die 81,8 Mio. im vereinigten Deutschland lebenden Menschen im Jahr 2010 hat sich diese Strecke auf rund 13 700 km/a pro Einwohner erhöht (Tab. 6-15). Außerdem ist in Tab. 6-15 der bisher unberücksichtigte nicht motorisierte Verkehr von Fußgängern und Fahrradfahrern zu sehen. Im Jahr 1975 hat jeder Bürger in der BRD durchschnittlich 421 km/a zu Fuß zurückgelegt. Dieser Wert lag im Jahr 2010 nahezu unverändert bei 423 km/a. Die mit dem Fahrrad zurückgelegte Strecke hat sich von 1975 bis 2010 jedoch von 220 km/a auf 396 km/a signifikant erhöht²⁵.

²³ Als MIV wird der Verkehr von Pkw und motorisierten Zweirädern bezeichnet, wobei heute in Deutschland nahezu die gesamte Verkehrsleistung des MIV auf den Pkw-Verkehr entfällt.

²⁴ 1975 ohne die Bevölkerung der DDR. Die Einheit Personenkilometer (pkm) steht für das Produkt der transportierten Personen mit der von ihnen zurückgelegten Strecke.

²⁵ Eigene Auswertung aus (BMVBS, Verkehr in Zahlen 2000, 2000) und (BMVBS, Verkehr in Zahlen 2012/2013, 2013)

Jahr	Verkehrsleistung gesamt ^a					Verkehrsleistung pro Einwohner ^a				
	ÖV	MIV	Fußwege	Fahrrad	Bevölkerung	ÖV	MIV	Fußwege	Fahrrad	Summe
	[Mrd.pkm]	[Mrd.pkm]	[Mrd.pkm]	[Mrd.pkm]	[Mio.]	[km/a]	[km/a]	[km/a]	[km/a]	[km/a]
1975	115,3	441,1	26	13,6	61,8	1 865	7 134	421	220	9 639
2000	195,5	849,6	30	23,9	82,3	2 377	10 328	365	291	13 360
2010	214,9	902,4	34,6	32,4	81,8	2 629	11 038	423	396	14 486

^a Eigene Auswertung aus (BMVBS Verkehr in Zahlen 2000, S. 105 und S. 216; BMVBS Verkehr in Zahlen 2012/2013, S. 96, S. 219 und S. 224). Öffentlicher Verkehr (ÖV) = ÖSPV + Eisenbahnverkehr + Luftverkehr

Tab. 6-15 Entwicklung der Verkehrsleistung im Personenverkehr in Deutschland von 1975 - 2010

Der zuvor geschilderten Verteilung der (motorisierten) Verkehrsleistung in Deutschland kann auch die entsprechende Situation in anderen Ländern gegenübergestellt werden. Abb. 6-15 zeigt die prozentuale Aufteilung der Verkehrsleistung ausgewählter Länder und Regionen des Jahres 2009 im motorisierten Personenverkehr. Dabei ist auffällig, dass in China und Indien bisher nur ein kleiner Teil der Personenverkehrsleistung auf Pkw entfällt. In Europa und den USA dominiert der Pkw und SUV den Personenverkehr.

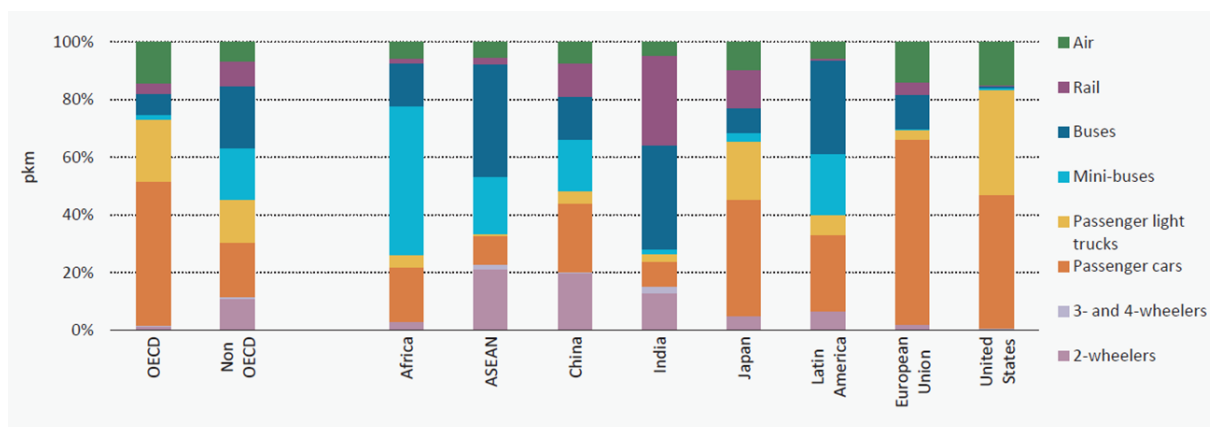


Abb. 6-15 Verkehrsleistung im motorisierten Personenverkehr 2009

Quelle: (IEA 2012, S. 426)

Vor dem Hintergrund einer wachsenden Mittelschicht in China und Indien, dem demographischen Wandel, steigender Kraftstoffpreise und einem durch technologische Möglichkeiten breiteren Angebot unterschiedlicher Mobilitätsoptionen ist davon auszugehen, dass sich der in Abb. 6-15 dargestellte Mix bis zum Jahr 2050 signifikant verändern wird. Es ist jedoch schwer vorherzusehen, wie sich die Verkehrsleistung im motorisierten Personenverkehr in Deutschland und weltweit bis zum Jahr 2050 auf die verschiedenen Verkehrsträger verteilen wird. Entsprechende Prognosen sind daher nicht Gegenstand dieser Arbeit.

6.6.3 Pkw Bestandsentwicklung in Deutschland und der Welt

Der deutsche Pkw-Markt erreichte mit 42 Mio. zugelassenen Pkw im Jahr 2010 nach den USA, Japan und China den viertgrößten Pkw-Landesbestand in der Welt. Am weltweiten Bestand von 842 Mio. Pkw im Jahr 2010 entspricht dies jedoch für die Bundesrepublik Deutschland nur einem Anteil von 5 % (IEA 2012).

Der Fahrzeugbestand ist in den letzten Jahren in Deutschland stetig gewachsen und hat bis zum 01.01.2012 eine Größe von 42,9 Mio. Pkw erreicht. Im Vergleich dazu waren im Jahr 2000 nur 39 Mio. Pkw in Deutschland zugelassen. Das entspricht einer Steigerung von 10 % im Vergleich zur Jahrtausendwende (Statistisches Bundesamt 2013). Tab. 6-16 gibt einen Überblick über den Pkw-Bestand und die Anzahl der Neuzulassungen im Jahr 2012. Dabei ist auffällig, dass der Anteil von neu zugelassenen Diesel-Pkw mit 48,2 % deutlich über dem Bestand von 27,7 % liegt - ein Trend, der schon über mehrere Jahre anhält und langfristig auch den Flottenbestand signifikant verändern wird. Hingegen liegt der Anteil von neu zugelassenen Hybrid- und Elektro-Pkw nur bei 0,8 %.

	Pkw-Bestand 2012 ^a		Neuzulassungen 2012	
	Anzahl	Anteil [in %]	Anzahl	Anteil [in %]
Insgesamt	42 927 647	100	3 082 504	100
Benzin	30 452 019	70,9	1 555 241	50,5
Diesel	11 891 375	27,7	1 486 119	48,2
Flüssiggas (LPG)	456 252	1,1	11 465	0,4
Erdgas (CNG)	74 853	0,2	5 215	0,2
Hybrid	47 642	0,1	21 438	0,7
Elektro	4 541	0,0	2 956	0,1

^a Bestand am 01.01.2012

Tab. 6-16 Pkw-Bestand und Neuzulassungen in Deutschland nach Kraftstoffart (Statistisches Bundesamt 2013)

Tab. 6-17 zeigt die Verteilung des Pkw-Bestands nach dem Segment²⁶ in den Jahren 2012 und 2008. In diesem Zeitraum hat vor allem der Bestand an kleinen Fahrzeugen und Geländewagen zugenommen. Bei den kleinen Fahrzeugsegmenten Minis (z. B. smart) und Kleinwagen (z. B. VW Polo) ist der Bestand von 9,8 Mio. auf 11,7 Mio. Fahrzeuge um knapp 20 % gestiegen. Ein Effekt, der sicherlich mit der in der Bundesrepublik in den Jahren 2009 und 2010 gezahlten Umweltprämie in Verbindung steht (BAFA 2009). Das mittlere Fahrzeugsegment, bestehend aus den Kompaktwagen (z. B. VW Golf) und der Mittelklasse (z. B. Mercedes-Benz C-Klasse) macht in 2012 45 % des Pkw-Bestands aus. Damit hat sich dieses Segment, im Vergleich zu den 49 % aus dem Jahr 2008, um 4 % verkleinert. Hingegen ist der Geländewagen-Bestand um 74 % zwischen 2008 und 2012 auf 2,1 Mio. Pkw gestie-

²⁶ Das KBA teilt die zugelassenen Personenkraftwagen in 13 Fahrzeugsegmente. Die Segmentierung erfolgte in Absprache mit der deutschen Automobilindustrie anhand optischer, technischer und marktorientierter Merkmale (KBA 2013a, S.39).

gen. Hier ist von einer Abwanderungsbewegung von Kunden der Mittelklasse bzw. Oberen Mittelklasse auszugehen.

	Pkw-Bestand 2012		Pkw-Bestand 2008	
	Anzahl [in Mio.]	Anteil [in %]	Anzahl [in Mio.]	Anteil [in %]
Insgesamt	42,9	100	41,2	100
Minis	2,6	6	1,6	4
Kleinwagen	9,1	21	8,2	20
Kompaktwagen	11,6	27	11,5	28
Mittelklasse	7,7	18	8,6	21
Obere Mittelklasse	2,1	5	2,5	6
Geländewagen	2,1	5	1,2	3
sonstige ^a	7,7	18	7,5	18

^a Oberklasse, Sportwagen, SUVs, Mini-Vans, Großraum-Vans, Wohnmobile, Nutzfahrzeuge

Tab. 6-17 Pkw-Bestand in Deutschland nach Segment in 2012 und 2008 (Statistisches Bundesamt 2013)

Weit über die Hälfte der deutschen Pkw-Zulassungen (62 %) im Jahr 2012 wurde nicht von privaten Käufern, sondern von Unternehmen, öffentlichen Einrichtungen und sogenannten freien Berufen als Firmenwagen durchgeführt. Somit wurden nur 38 % der Fahrzeuge von Privatkäufern zugelassen (KBA 2013b). Die Privatkäufer halten aber wiederum knapp 90 % der zugelassenen Fahrzeuge im gesamten Pkw-Bestand. Das erklärt sich durch die kürzere Haltedauer der Firmenwagen, die nach ihrer Nutzung wieder dem Gebrauchtwagenmarkt und damit größtenteils den Privatkunden zur Verfügung stehen (Gnann et al. 2012). Der Gebrauchtwagenmarkt ist mit einer durchschnittlichen Größe von 6,5 Mio. Fahrzeugen etwa doppelt so groß wie der Neuwagenmarkt von 3,3 Mio. neu zugelassenen Pkw pro Jahr (DAT 2013)²⁷. Die Addition von Neuzulassungen und Besitzumschreibungen gebrauchter Fahrzeuge der letzten 10 Jahre in Deutschland ergibt einen Durchschnitt von 9,8 Mio. Pkw-Zulassungen pro Jahr.

Prognose Pkw-Bestand Deutschland

Der zukünftige Pkw-Bestand in Deutschland ist eng verknüpft mit der Nachfrage nach zukünftig zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln. Die zukünftige Verkehrsentwicklung ist in den letzten Jahren in einer Vielzahl von Studien analysiert worden. (Dünnebeil et al. 2013) geben in ihrer Veröffentlichung „Analyse aktueller Szenarien zur Entwicklung des Verkehrs in Deutschland und dessen Umweltwirkungen“ einen ausführlichen Überblick über diese Studien (Abb. 6-16). Zwischen den Studien gibt es große Unterschiede hinsichtlich der verkehrlichen Entwicklung, dem technischen Fortschritt und den sozialen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Dünnebeil et al. 2013).

²⁷ Mittelwert der Pkw -Neuzulassungen u. Besitzumschreibungen von 2003-2012.

	Modell Deutschland	Energie-szenarien	Leitstudie 2011	Renewability	TREMOD
Erscheinungsjahr	2009	2010	2012	2009, 2012	2012*
Auftraggeber	WWF Deutschland	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi	Bundesumweltministerium BMU	Bundesumweltministerium BMU	Umweltbundesamt (UBA), Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) u.a.
Auftragnehmer	Prognos, Öko-Institut	EWI, GWS, Prognos	DLR, IWES, IfNE	Öko-Institut, DLR; in Renewability II auch Fraunhofer ISI	IFEU Heidelberg
Bezugszeitraum	2005-2050	2008-2050	2005-2050	2005-2030	1960-2030/2050
Auswahlgründe für die Studie	Erste umfassende Gesamt-schau bis 2050	Aktuelle Szenarien der Bundesregierung	Aktuelle BMU-Szenarien	Stakeholder-Konzept bei Szenarien	Nationale Berichterstattung, Szenarien für NEC, NKI u.a.

Abb. 6-16 Übersicht Studien zur Verkehrsentwicklung in Deutschland

Quelle: (Dünnebeil et al. 2013, S.9)

Im Personenverkehr treffen die Studien keine übereinstimmenden Annahmen hinsichtlich der Verkehrsleistungen: Renewability und TREMOD erwarten ein weiteres Wachstum bis 2030. Die anderen Studien gehen dagegen durch den Bevölkerungsrückgang von einem Rückgang der Verkehrsleistung aus. Die Verkehrsleistung des öffentlichen Personenverkehrs ändert sich laut den Studien nur wenig (Abb. 6-17).

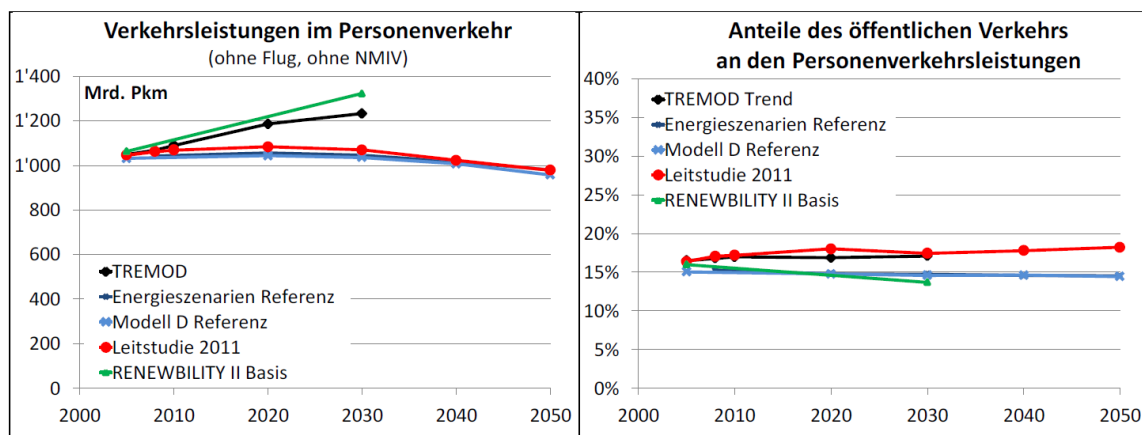


Abb. 6-17 Referenzentwicklung der Verkehrsleistungen im motorisierten Personenverkehr

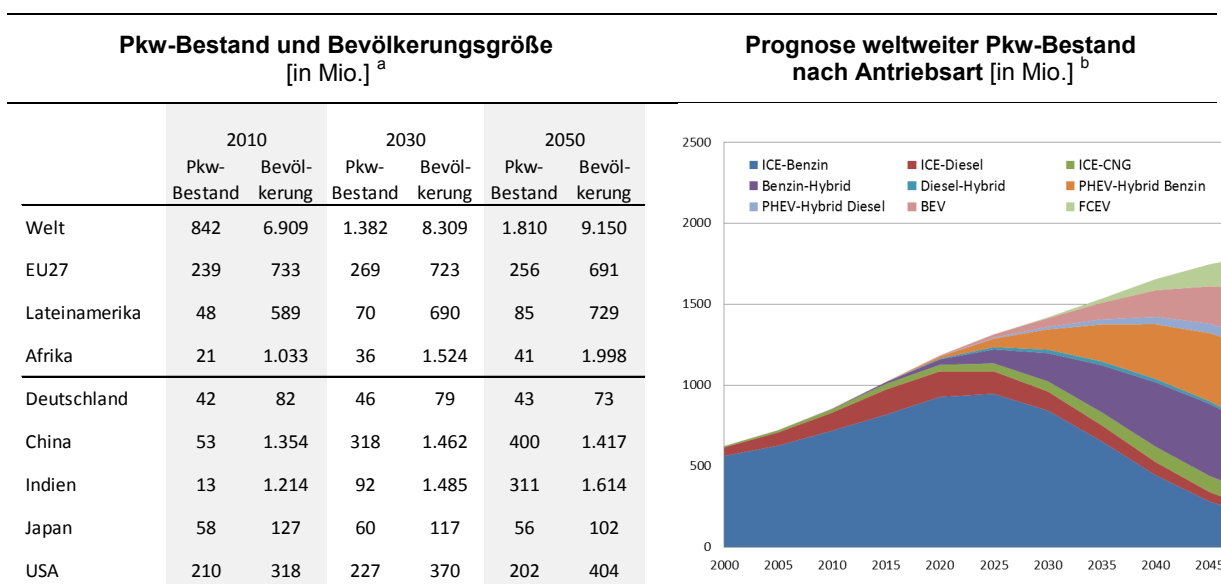
Quelle: (Dünnebeil et al. 2013, S. 19)

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass sich die Verkehrsleistung im MIV von 2010 bis zum Jahr 2050 nicht verändert. Diese Annahme bewegt sich innerhalb der Bandbreite der zuvor abgebildeten Studien. So wird der Pkw-Bestand in Deutschland bis zum Jahr 2050 auf dem Niveau vom Jahr 2010 bei 42 Mio. Pkw belassen (unter den weiteren Annahmen: gleiche Fahrleistung und gleicher Pkw-Besetzungsgrad). Ferner wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sich die gesamte deutsche Pkw-Flotte aus dem in 6.2 beschriebenen

mittleren Pkw-Segment zusammensetzt. Die Zusammensetzung dieser Flotten nach Antriebskonzepten wird in vier Szenarien verändert.

Prognose Pkw-Bestand Welt

Das weltweite Verkehrsaufkommen und der Motorisierungsgrad werden aller Voraussicht nach auch zukünftig rasant zunehmen. Diese Entwicklung wird vor allem ausgelöst durch das Bevölkerungswachstum in Kombination mit steigenden Einkommen in zahlreichen Regionen der Welt (Abb. 6-18). Abb. 6-18 (links) zeigt den prognostizierten Pkw-Bestand im Vergleich zur Prognose der weltweiten Bevölkerung bis zum Jahr 2050. Demnach wird der Pkw-Bestand in den nächsten Jahren vor allem in Indien und China wachsen, Europa und die USA bleiben auf nahezu konstantem Niveau. Abb. 6-18 (rechts) zeigt eine IEA-Prognose des weltweiten Pkw-Bestandes nach der Antriebsart. Das hier dargestellte Szenario stellt den optimistischen Fall eines sehr hohen Flottendurchsatzes alternativer Antriebe dar. Es beruht auf der Annahme einer Verdoppelung des weltweiten Pkw-Bestandes im Vergleich zu heute. Bei einer durchschnittlichen Pkw-Lebensdauer von 10 Jahren wäre eine solche Bestandsentwicklung in der Zukunft mit einer erheblichen Produktionssteigerung von Pkw verbunden.



^a Pkw-Bestand aus (IEA 2012) Basisdaten, Bevölkerungsprognose aus (Eurostat 2010)

^b (IEA 2012), S. 443 Improved Case bzw. 2°C Szenario: Im Jahr 2050 beträgt der weltweite Pkw-Bestand 1,8 Mrd. Pkw. Im weniger optimistischen 4°C Szenario werden 2,3 Mrd. Pkw für 2050 prognostiziert.

Abb. 6-18 Entwicklung Bevölkerungsgröße und Pkw-Bestand

Die gleichzeitig voranschreitende Urbanisierung wird die Umweltwirkungen des Verkehrs noch weiter verschärfen, sodass für ein zukünftig breiteres Angebot an alternativen Antrieben früher oder später auch Absatzmärkte entstehen werden (HWWI 2009). Wie schnell sich welche Antriebe an welchen Märkten durchsetzen werden, ist derzeit bis zum Jahr 2050 nur schwierig vorherzusehen. In dieser Arbeit werden deshalb die zwei Pkw-Bestandsszenarien aus der IEA Technology Perspectives 2012 (IEA 2012) um zwei weitere Szenarien ergänzt, um eine breitere Sicht auf die möglichen Folgen der verschiedenen Motorisierungsoptionen zu bekommen (vgl. Abschnitt 6.6.6)

6.6.4 Pkw-Fahrleistung und Pkw-Lebensdauer in Deutschland und der Welt

Pkw-Fahrleistung

In Deutschland gibt es keine zentrale Stelle, die reale Fahrleistungen der einzelnen Pkw-Antriebe dokumentiert und für wissenschaftliche Untersuchungen nutzbar macht. Verkehrsmodelle und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von alternativen und konventionellen Antrieben unterliegen deshalb oft Annahmen über die tatsächliche Fahrleistung der zu untersuchenden Fahrzeuge. Denkbare Institutionen, um die reale Fahrleistung der Fahrzeuge zu erfassen, wären der TÜV oder die DEKRA, die bei ihren regelmäßigen Hauptuntersuchungen der Fahrzeuge auch den Kilometerstand dokumentieren müssen (BGBl 2012).

Um dennoch gesicherte Daten für Verkehrspolitik und Verkehrsplanung zu erhalten, bedient man sich der Methode der Verkehrsbefragung. In Deutschland existieren derzeit mehrere größer angelegte Verkehrsbefragungen²⁸. Die wohl umfangreichste wurde von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) letztmalig im Jahr 2002 durchgeführt. Dort wurde auf Basis unterschiedlicher Erhebungen (Haltebefragung nach dem Tachostand, Erhebung zum grenzüberschreitenden Verkehr) die Kfz-Fahrleistung empirisch ermittelt. Die Erhebung stützt sich auf eine Befragung von 127 000 Fahrzeughaltern mit einer Rücklaufquote von etwa 70 % (BASt 2002). Da die Fahrleistungserhebung schon älter als 10 Jahre ist, werden hier im weiteren auch neuere Erhebungen betrachtet und mit den Ergebnissen der BASt verglichen.

Nobis und Luley geben in ihrer Veröffentlichung „Bedeutung und gegenwärtiger Stand von Verkehrsdaten in Deutschland“ einen ausführlichen Überblick über die verschiedenen Verkehrserhebungen (Nobis & Luley, 2005). Tab. 6-18 gibt einen Überblick über Art und Umfang der für diese Arbeit näher untersuchten Verkehrsbefragungen. Beim Mobilitätspanel (MOP) werden Personen in Haushalten über insgesamt drei Jahre einmal im Jahr über ihr Mobilitätsverhalten befragt. Die befragten Personen müssen dabei Auskunft über die Fahrleistung und den Benzinverbrauch der im Haushalt vorhandenen Pkw geben. Eine weitere Spezifikation der Pkw nach Typ oder Segment findet in der Erhebung nicht statt. Die Studie Mobilität in Deutschland (MiD) wurde bisher in den Jahren 2002 und 2008 durchgeführt. Sie basiert auf einer komplexen Kombination aus schriftlicher, telefonischer und Online-Erhebung. Im Ergebnis werden die Weghäufigkeit und die Verteilung der Verkehrsmittelnutzung der befragten Personen ausgegeben. Dabei können die berichteten Wege und deren Weglänge direkt einem Pkw zugeordnet werden. In der Studie Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KiD) wird eine statistisch relevante Menge an Fahrzeugen und Haltern zufällig aus dem zentralen Fahrzeugregister des KBA gezogen und den Fahrer gebeten an einem Tag ein Wegtagebuch zu führen. Die Wegtagebücher verteilen sich über alle Wochentage. Die Ergebnisse der letzten Erhebung wurden erst im Frühjahr 2012 vorgestellt. Fahrleistungsdaten verschiedener Antriebsarten sind in der öffentlichen Version nicht gedruckt. In der weiteren Analyse wird daher nur auf die Daten der Erhebung Mobilität in Deutschland (MiD 2008) und der Fahrleistungserhebung (BASt 2002) zurückgegriffen.

²⁸ MiD – Mobilität in Deutschland, MOP – Deutsches Mobilitätspanel, SrV – System repräsentativer Verkehrsbefragungen, KiD – Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland, Fahrleistungserhebung der BASt.

	Mobilitätspanel (MOP)^a	Mobilität in Deutschland (MiD)^b	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KiD)^c
Durchführung	1994-2011	2002, 2008	2002, 2010
Erhebungszeitraum	3 x in 3 Jahren	1 Jahr	1 Jahr
Auftraggeber	BMVBS	BMVBS	BMVBS
Auftragnehmer	KIT	Infas, DLR	WVI, IVT, DLR, KBA
Umfang	1 000 HH	50 000 HH	100 000 Fzge.
Berichtsperiode	7 Tage	1 Tag	1 Tag

^a (KIT 2012)
^b (infas & DLR 2008)
^c (WVI, IVT, DLR, & KBA, 2012)

Tab. 6-18 Verschiedene Verkehrserhebungen im Vergleich

Die Datensätze der MiD lassen sich auch nach Fahrzeugsegmenten auswerten, da die Fahrzeuge in der Erhebung eindeutig den Fahrzeugsegmenten des KBA zugeordnet werden können (Tab. 6-19). In der Analyse fällt auf, dass Fahrzeuge mit einem Diesel- und Gasmotor (CNG/LPG) signifikant mehr fahren als Benzinfahrzeuge. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit den Ergebnissen der Fahrleistungserhebung der BAST aus dem Jahr 2002. Dort liegt die durchschnittliche Fahrleistung von Benzin-Pkw bei 11 934 km/a und von Diesel-Pkw bei 20 925 km/a (IVT 2004) im Vergleich zu den 11 793 bzw. 21 104 km/a aus der MiD 2008 (Tab. 6-19). Im Vergleich zu den eben genannten Zahlen geht das DIW in seiner alljährlich erscheinenden Veröffentlichung „Verkehr in Zahlen“ für das BMVBS von einer durchschnittlichen Laufleistung von 11 900 km/a für Benzinfahrzeuge und 21 100 km/a für Dieselfahrzeuge aus dem Jahr 2008 aus (BMVBS 2013). Für alternative Antriebe lagen die Fallzahlen in der MiD 2008 bei nur 30 Fahrzeugen, welche hier aufgrund der geringen Stichprobengröße nicht dargestellt werden (Redelbach 2012). Zur Laufleistung von alternativen Antrieben liegen noch keine belastbaren Zahlen zur Fahrleistung vor.

Fahrzeugsegment	MiD 2008 ^a				BAST 2002 ^b
	Benzin [km/a]	Diesel [km/a]	CNG/LPG [km/a]	Gesamt [km/a]	Gesamt [km/a]
Minis	10 428	19 257	19 800	10 985	11 325
Kleinwagen	10 904	19 135	15 789	11 534	11 238
Kompaktklasse	11 964	20 843	23 530	13 720	13 298
Mittelklasse	12 847	23 591	23 746	16 065	15 468
Obere Mittelklasse	12 551	24 251	20 538	17 422	16 730
Oberklasse	14 785	22 114	15 000	16 407	18 664
Geländewagen	11 721	19 813	16 700	16 171	16 010
Sportwagen	9 774	13 036	15 000	9 880	-
Mini-Vans	11 847	19 321	21 380	13 853	-
Großraum-Vans	13 588	20 401	20 839	17 075	-
Utilities	12 060	18 445	18 190	16 690	18 320
Wohnmobile	15 000	11 452	-	11 461	-
nicht zuzuordnen	11 193	19 784	16 533	13 323	-
Gesamtergebnis	11 793	21 104	20 452	14 111	13 397

^a (Redelbach 2012 aus infas & DLR 2008)
^b (BAST 2002 aus IVT 2004 Tabelle 9, S. 187)

Tab. 6-19 Vergleich Pkw-Fahrleistung [in km pro Pkw und Jahr] nach Fahrzeugsegment und Kraftstoffart von MiD 2008 und Fahrleistungserhebung BAST 2002

Für die weltweite Pkw-Laufleistung wurde ebenfalls keine belastbare Datenquelle identifiziert. Eine für diese Arbeit durchgeführte Analyse der Pkw-Laufleistung der in STROM betrachteten Länder in den Basisdaten der IEA Technology Perspectives 2012 (IEA 2012) ergab z.T. sehr heterogene Ergebnisse. Im Jahr 2010 betrug laut Basisdaten der Studie die durchschnittliche Pkw-Laufleistung in den USA 24 400 km/a, in Japan 14 800 km/a, in Deutschland 15 000 km/a, in Indien 29 300 km/a und in China 24 800 km/a. Für das Jahr 2000 wurden für Indien und China sogar doppelt so hohe Laufleistungen angenommen. Es ist davon auszugehen, dass diese Daten nicht belastbar sind bzw. für einen anderen Zweck extrahiert wurden. Im Weiteren werden daher Annahmen über die weltweite Pkw-Laufleistung getroffen.

Pkw-Lebensdauer

In der Realität wechseln Pkw im Laufe ihres Lebens mehrfach den Halter. Weil zudem nicht alle Komponenten ein Fahrzeugleben lang halten, werden diese ausgetauscht, um den weiteren Betrieb des Pkw zu gewährleisten. Mit der Außerbetriebsetzung beim KBA muss ein Fahrzeugleben allerdings noch nicht enden. Der Pkw kann dann entweder vorübergehend stillgelegt, ins Ausland gebracht oder verschrottet worden sein. Unter dieser Einschränkung lag das Durchschnittsalter des deutschen Pkw-Bestands im Jahr 2011 bei 8,3 Jahren (ACEA 2013). Es ist aber davon auszugehen, dass das reale Fahrzeugalter, vor allem durch die Weiternutzung im Ausland, wesentlich höher ist.

Prognose der Pkw Fahrleistung und Lebensdauer in Deutschland und der Welt

Aus Gründen der Vergleichbarkeit von Szenarioergebnissen für Deutschland und die Welt wird hier eine einheitliche Pkw-Lebensdauer und Fahrleistung für beide Regionen gewählt. Als jährliche Fahrleistung aller Fahrzeuge werden hier 15 000 km/a angenommen. Damit ist die gewählte durchschnittliche Fahrleistung in etwa so hoch wie in Deutschland (Tab. 6-19). Hinsichtlich der Pkw-Lebensdauer wird von 10 Jahren ausgegangen. Die dadurch entstehende Lebensfahrleistung von 150 000 km pro Pkw entspricht dabei auch der gängigen Praxis relevanter LCA-Studien von Elektrofahrzeugen (Helms et al. 2011, Helms et al. 2013, Renault 2011).

6.6.5 Verkehrsszenarien dieser Arbeit (Deutschland)

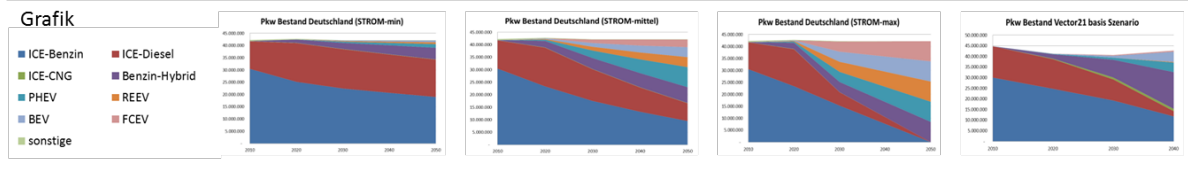
Wie bereits oben beschrieben wird hier davon ausgegangen, dass der Pkw-Bestand in Deutschland bis zum Jahr 2050 auf dem Niveau des Jahres 2010 bei 42 Mio. Pkw verbleibt. Die Flottenzusammensetzung (KBA Bestand 2010) wird bis zum Jahr 2050 in den Szenarien wie folgt verändert:

- **Referenz:** Keine alternativen Antriebe. Flotte besteht von 2020 bis 2050 zu 60 % ICE-Benzin und 40 % ICE-Diesel.
- **STROM-Min:** Lineare Umschichtung der Pkw-Flotte (KBA Bestand 2010) auf einen Anteil von insgesamt 3 Mio. PHEV, REEV und BEV in 2050. FCEV werden nicht berücksichtigt.
- **STROM-Mittel:** Dieses Szenario berücksichtigt das Ziel der NPE, bis zum Jahr 2020 1 Mio. und bis zum Jahr 2030 6 Mio. PHEV, REEV und BEV im Bestand zu haben. Bis zum Jahr 2050 wird der Bestand dann um das Wachstum von 2020 zu 2030 vergrößert. FCEV erreichen in diesem Szenario einen Bestand von 1,4 Mio. Pkw in 2020 und 3 Mio. Pkw in 2050.
- **STROM-Max:** Hier wird davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2050 die gesamte Pkw-Flotte in Deutschland aus jeweils gleichen Teilen (8,4 Mio.) HEV, PHEV, REEV, BEV und FCEV besteht. Herkömmliche Verbrenner sind bis dahin komplett aus dem Bestand verschwunden.

Das zusätzlich in Tab. 6-20 dargestellte Vector21-Basisszenario dient der späteren Einordnung der Vector21-Szenarien aus Unterkapitel 4.4 in die Ergebnisse dieses Kapitels. Es liegt von seiner Bestandsentwicklung etwa zwischen den Szenarien STROM-Min und STROM-Mittel (Tab. 6-20).

Für den Zu- und Abbau an Pkw wird hier vereinfachend davon ausgegangen, dass immer genau so viele Pkw zugebaut werden, wie im Jahr zuvor abgebaut wurden bei der weiter oben beschriebenen Nutzungszeit von 10 Jahren.

	STROM-min	STROM-mittel (NPE)	Strom-max	Vector 21 Basis Szenario
Pkw Bestand (aus Tremod 2012 basis)	42 Mio. (2010-2050)	42 Mio. (2010-2050)	42 Mio. (2010-2050) keine ICE- Benzin, ICE- Diesel bis 2050	42 Mio. (2010, 2020) 41 Mio. (2030) 42 Mio. (2040)
E-Fzg. Bestand (PHEV20, REEV80, BEV)	0,1 Mio. (2020) 1 Mio. (2030) 2 Mio. (2040) 3 Mio. (2050)	1 Mio. (2020) 6 Mio. (2030) 11 Mio. (2040) 16 Mio. (2050)	1 Mio. (2020) 12,6 Mio. (2030) 19 Mio. (2040) 25,3 Mio. (2050)	0,3 Mio. (2020) 2,3 Mio. (2030) 10 Mio. (2040)
FCEV Bestand	0 (2020) 0 (2030) 0 (2040) 0 (2050)	0 (2020) 1,4 Mio. (2030) 2,4 Mio. (2040) 3,1Mio. (2050)	0 (2020) 4,2 Mio. (2030) 6,3 Mio. (2040) 8,4 Mio. (2050)	0,06 (2020) 0,35 (2030) 0,6 (2040)



Tab. 6-20 Pkw Bestand Deutschland in Szenarien 2010 – 2050

6.6.6 Verkehrsszenarien dieser Arbeit (Welt)

Entgegen dem stagnierenden Pkw-Bestand in Deutschland ist weltweit von einem massiven Zubau des Pkw-Bestands auszugehen. Die IEA geht in ihren IEA Technology Perspectives 2012 (IEA 2012) in zwei unterschiedlichen Szenarien von einem Pkw-Bestand von 1,8 bzw. 2,3 Milliarden Pkw in 2050 aus. Im Jahr 2010 befanden sich dabei nur 850 Mio. Pkw im weltweiten Bestand. Die Flottendurchdringung mit alternativen Antrieben ist bei dem Szenario mit dem Bestand von 1,8 Milliarden Pkw auch deutlich höher als in dem Anderen (siehe Abb. 6-19).

Szenario 1: LoStockHiEV

Szenario 3: HiStockLoEV

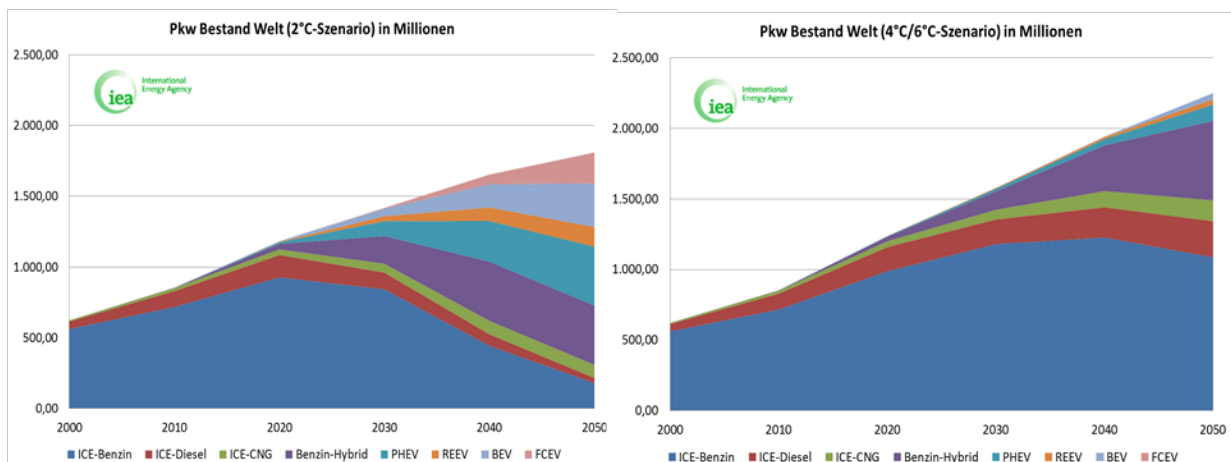


Abb. 6-19 IEA-Szenarien (Eigene Darstellung aus IEA 2012, S. 443)

Da zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht absehbar ist, welches dieser beiden IEA-Szenarien der Realität mehr entspricht, wurden diese im Folgenden um zwei weitere Szenarien erweitert. Diese zusätzlichen Szenarien stellen Varianten der zuvor beschriebenen IEA-Szenarien mit vertauschter Flottendurchdringung der Antriebe dar (Abb. 6-20).

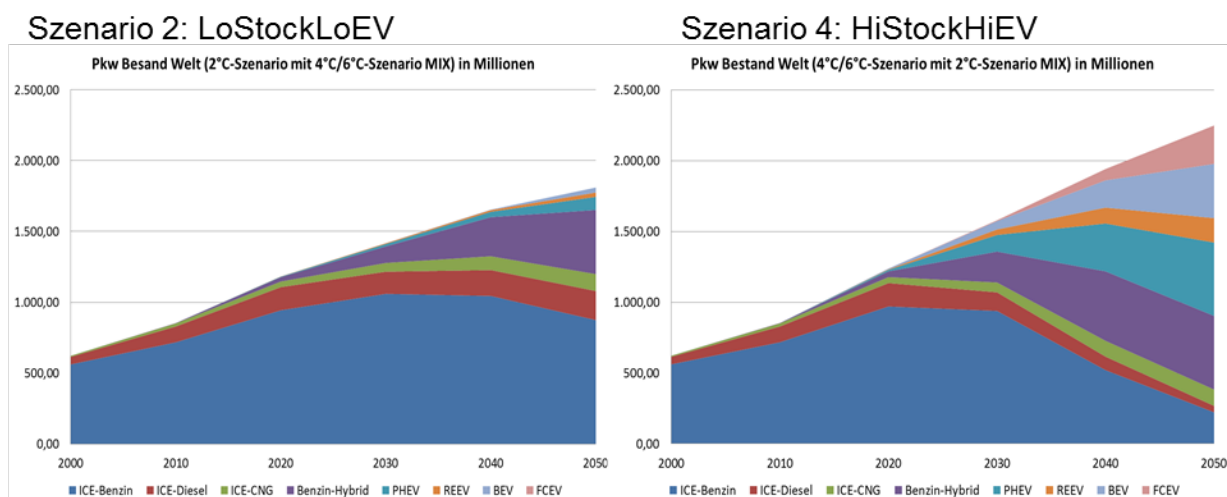


Abb. 6-20 Erweiterte IEA Szenarien

Die Lebensdauer pro Pkw entspricht dabei wieder den vorher festgelegten 10 Jahren. Der Zu- und Abbau an Pkw wurde so gewählt, dass die in Abb. 6-19 und 6-20 dargestellten Bestandszahlen erreicht werden können.

In den weiteren Analysen dieses Kapitels werden demnach zur Beschreibung der weltweiten Entwicklung des Pkw-Verkehrs die im Folgenden aufgelisteten Verkehrsszenarien berücksichtigt. Alle vier Szenarien wurden dabei nach einem einheitlichen Schema benannt, welches mit dem Bestand (Stock) und den Anteilen elektrifizierter Fahrzeuge (Electric Vehicles, EV) die zentralen Unterscheidungsmerkmale der Szenarien aufgreift:

- **LoStockHiEV** (2°C-Szenario IEA): 1,8 Mrd. Pkw in 2050 (83 % EV)
- **HiStockLoEV** (4°C-Szenario IEA): 2,3 Mrd. Pkw in 2050 (34 % EV)
- **LoStockLoEV**: 1,8 Mrd. Pkw in 2050 (34 % EV)
- **HiStockHiEV**: 2,3 Mrd. Pkw in 2050 (83 % EV)

6.6.7 Daten- und Forschungsbedarf

Wie sich die Laufleistung der alternativen Antriebe, insbesondere die Aufteilung von verbrennungsmotorisch und elektrisch gefahrener Wegstrecke bei PHEV und REEV entwickeln wird, dürfte für weitere Forschungen von besonderem Interesse sein.

In dieser Arbeit wurde vereinfachend eine Lebensdauer von 10 Jahren für alle Pkw angenommen. Hier sollten weiterführende Forschungen differenzieren, da z. B. deutsche Pkw schon heute nach ihrer Nutzung im Inland (8,3 Jahre in 2011) weitaus länger im Ausland (bspw. Osteuropa oder Afrika) genutzt werden. Für alternative Antriebe gibt es noch keine Langzeiterfahrungen mit den verbauten Komponenten in einem Massenmarkt. Die Frage

nach der Zweit-Nutzung in einem anderen Markt kann somit noch schwieriger beantwortet werden. Hier wird die Ersatzteil-Verfügbarkeit oder das Werkstatt-Knowhow in den Zweit-Nutzungsländern sicherlich lebensdauerlimitierend wirken.

Um die eben beschriebenen Forschungsfelder genauer zu bearbeiten, sollte mit Hilfe eines Flottenmodells die unterschiedliche Pkw-Laufleistung und die damit einhergehende Flottenumschichtung differenzierter betrachtet werden. Das Flottenmodell hilft dabei, genauere Zu- und Abbauzahlen von Pkw zu bestimmen, sofern die richtigen Überlebenskurven der Pkw hinterlegt worden sind.

Ferner ist die Untersuchung des Mobilitätsverhaltens der Menschen von besonderem Interesse. Unter dem Stichwort „Nutzen statt Besitzen“ könnte sich der Besetzungs- und Nutzungsgrad der Pkw zukünftig signifikant erhöhen und damit den Pkw-Bestand bei gleicher Beförderungsleistung verringern. Die weitere Verbreitung des mobilen Internets in Smartphones und die genaue Positionsbestimmung von multimodalen Mobilitätsoptionen (Fahrrad, ÖPNV, Pkw) bilden dabei die technologische Grundlage.

6.7 Kumulierter Materialbedarf und THG-Emissionen der Verkehrsszenarien

O. Soukup (WI)

Neben der vergleichenden Bewertung verschiedener Fahrzeuge ist es auch Ziel dieser Analyse, die Auswirkungen verschiedener Entwicklungen der Pkw-Flotten in Deutschland und weltweit in Hinblick auf Ressourcenbedarf und THG-Emissionen zu vergleichen. Die Vorgehensweise bei der Berechnung sowie die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

6.7.1 Vorgehensweise

Die Materialinventare der Typfahrzeuge aus Unterkapitel 6.5 und die Verkehrsszenarien aus Unterkapitel 6.6 stellen die Grundlage der vorgenommenen Hochrechnungen verschiedener langfristiger Entwicklungsmöglichkeiten von Ressourcenverbräuchen und THG-Emissionen dar.

Die Materialinventare der Typfahrzeuge umfassen neben den direkten Materialinputs der einzelnen Lebenszyklusphasen und Komponenten auch deren abiotischen Materialbedarf sowie die spezifischen THG-Emissionen (auch als Wirkungskategorien bezeichnet). Die konkreten Werte dieser Kategorien werden in der Darstellung der Methodik vereinfachend mit der Bezeichnung „*Inventardaten*“ zusammengefasst. Die Verkehrsszenarien weisen dagegen Zubau, Bestand und Abbau der jeweiligen Fahrzeugflotten aus, was in der folgenden Beschreibung als „*Flottenentwicklung*“ bezeichnet wird.

Ziel der Analyse ist es, die kumulierten Beiträge der Szenarien zu den zuvor genannten Wirkungskategorien zu ermitteln. Diese Berechnungen werden hier als „*Ermittlung der Wirkungsbeiträge*“ bezeichnet.

Für den Vergleich der Szenarien werden zunächst die Wirkungsbeiträge für die Fahrzeugflotten jedes Szenarios in jedem Zehn-Jahres-Schritt bestimmt und anschließend summiert, um Gesamtergebnisse über den vollständigen Betrachtungszeitraum 2011-2050 zu erhalten.

Die Inventardaten der einzelnen Fahrzeuge werden dabei wie folgt mit den Flottenentwicklungen der Verkehrsszenarien verrechnet:

- Multiplikation der Inventardaten der Herstellungsphase mit dem kumulierten Zubau eines Jahrzehnts zur Bestimmung des Wirkungsbeitrags der Herstellung. Der Herstellungsaufwand wird demnach vollständig dem Jahrzehnt der Herstellung zugeordnet.
- Multiplikation der Inventardaten der Nutzungsphase mit dem jährlichen (interpolierten) Fahrzeugbestand von 2011 bis 2050 zur Bestimmung des Wirkungsbeitrags der Nutzungsphase. Die Fahrzeugnutzung nach 2050 bleibt hierbei unberücksichtigt.
- Multiplikation der Inventardaten der Entsorgungsphase mit dem kumulierten Rückbau eines Jahrzehnts zur Bestimmung des Wirkungsbeitrags der Entsorgung.

Im Fokus der Auswertung dieses Kapitels steht die Darstellung der Wirkungsbeiträge der Szenarien zum abiotischen Materialbedarf und zu den THG-Emissionen (GWP). Hierzu wird eine Aggregation nach Lebenszyklus-Phasen vorgenommen, so dass unterschieden werden kann, ob die jeweiligen Wirkungsbeiträge durch die Herstellung, die Nutzung (getrennt nach konventionellen und elektrifizierten Fahrzeugen) oder durch die Entsorgung verursacht werden. Die Nutzungsphase wird dabei getrennt nach konventionellen und elektrifizierten Fahrzeugen ausgewiesen, wobei die Angaben zu elektrifizierten Fahrzeugen neben elektrischer Antriebsenergie auch die Bereitstellung von Kraftstoffen für Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge einbeziehen.

Der Vergleich der berücksichtigten Szenarien beruht hauptsächlich auf einer kumulativen Darstellung der Wirkungsbeiträge des gesamten Betrachtungszeitraums 2011-2050. Es kann so gezeigt werden, welche Ressourcen- bzw. Klimawirkung die Umsetzung eines Verkehrsszenarios innerhalb des betrachteten Zeitraums insgesamt verursacht - und wie die Wirkung des Szenarios im Vergleich mit anderen möglichen Entwicklungspfaden insgesamt einzuschätzen ist.

Ergänzend hierzu wird auch dargestellt, wie sich die Wirkungsbeiträge der Szenarien vom ersten (2011-2020) bis zum letzten betrachteten Zehnjahreszeitraum (2041-2050) entwickeln. Es wird so erkennbar, wie sich die Ressourcen- bzw. Klimawirkung der einzelnen Szenarien im Laufe des Betrachtungszeitraums verändert, ob also die Veränderungen von Fahrzeugflotten von 2011 bis 2050 zu weiter ansteigenden oder rückläufigen Umweltauswirkungen führt.

Wie bereits zuvor erwähnt, beinhaltet die Hochrechnung der Materialinventare auf Szenarioebene auch die Ermittlung des Bedarfs an direkten Materialinputs (inklusive Verlusten in der Verarbeitung). Diese Mengen werden zunächst für die Szenarien differenziert nach Komponenten ausgewiesen. Anschließend wird eine konsolidierte Materialliste erstellt, welche alle Inputs jedes Materials zu einer Gesamtnachfrage des Szenarios aggregiert. So wird z. B. ausgewiesen, wieviel Neodym, Silber oder Nickel im Zeitraum 2011-2050 in einem Szenario insgesamt benötigt wird. Diese Auflistung der ca. 180 erfassten Rohstoffinputs für jedes Szenario dient als Vorarbeit zur Identifikation kritischer Materialien in Unterkapitel 6.8.

Für eine kompakte Darstellung der vergleichenden Ergebnisse in diesem Kapitel wurde die kumulierte Ausweisung nach Szenarien gewählt. Prinzipiell sind die errechneten Wirkungsbeiträge der Szenarien aber auch differenziert ausweisbar nach Szenario, Zeitraum, Fahrzeugtyp und Komponenten. So ließe sich beispielsweise der berechnete Bedarf an Pri-

märaluminiurn für den Zubau von BEV-Glidern in 2021-2030 im Szenario Strom-Max bei Bedarf gesondert ausweisen.

6.7.2 Abiotischer Materialbedarf Deutschland

Für die Herstellung, Nutzung und Entsorgung aller Fahrzeuge im Zeitraum 2011-2050 ergibt sich aus den Berechnungen für Deutschland der in Abb. 6-21 dargestellte abiotische Materialbedarf. Den Ergebnissen liegt dabei die Annahme zu Grunde, dass die erforderliche elektrische Antriebsenergie aus einem Mix verschiedener Erzeugungsformen mit im Zeitverlauf steigenden Anteilen erneuerbarer Energien bereitgestellt wird. Der angenommene Strommix wurde bereits in Abschnitt 6.5.2 dargestellt und bildet das „Szenario 2011 A“ nach (Teske et al. 2012) ab. Grundlegende Erläuterungen zur Bedeutung des Indikators „Abiotischer Materialbedarf“ finden sich in Abschnitt 6.2.4.

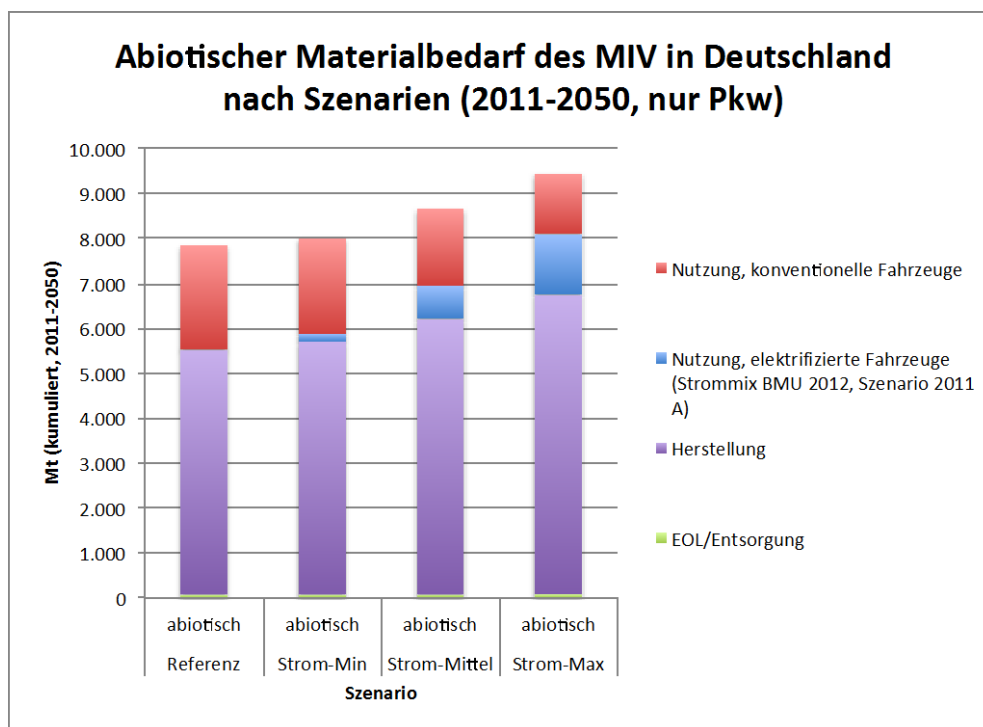


Abb. 6-21 Abiotischer Materialbedarf des Pkw-Verkehrs in Deutschland nach Verkehrsszenarien

Der berechnete kumulierte abiotische Materialbedarf für Deutschland liegt je nach Szenario zwischen 7,8 und 9,4 Gt. Die auf der x-Achse aufgetragenen Szenarien sind von links nach rechts nach zunehmendem Anteil elektrifizierter Antriebe an der Fahrzeugflotte sortiert. Es ist demnach erkennbar, dass alle Elektromobilitätsszenarien gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektromobilität über den gesamten Betrachtungszeitraum einen erhöhten abiotischen Materialbedarf aufweisen – und zudem mit steigender Elektrifizierung der Flotte auch der kumulierte abiotische Materialbedarf ansteigt. Während für das Szenario STROM-Min gegenüber der Referenz lediglich ein geringfügig um 2 % erhöhter Bedarf errechnet wurde, zeigt sich für STROM-Max bereits ein Anstieg um 20 % gegenüber der Referenz.

Aus ressourcenpolitischer Sicht und den in Unterkapitel 6.1 genannten Gründen sollte aber die Senkung des abiotischen Materialbedarfs Ziel einer zukünftigen Entwicklung des MIV sein. Vor dem Hintergrund politischer Ausbauziele für Elektrofahrzeuge in Deutschland sind

daher die Ursachen des erhöhten Materialbedarfs von Elektromobilitätsszenarien von Bedeutung. Da die Größe des Fahrzeugparks in allen Szenarien als konstant angenommen wird, sind die höheren kumulierten Ergebnisse der STROM-Szenarien ausschließlich auf den höheren Materialbedarf der elektrifizierten Fahrzeuge zurückzuführen, der bereits in Abschnitt 6.5.3 dargestellt wurde.

Aus einer differenzierten Betrachtung der Ergebnisse nach Lebenszyklusphasen wird deutlich, dass die Fahrzeugherstellung von zentraler Bedeutung für den abiotischen Materialbedarf der Szenarien ist. Auf sie entfällt in allen Szenarien ein Anteil von gut 70 %. Die Herstellung stellt daher auch den wichtigsten Ansatzpunkt zur Optimierung des Materialbedarfs dar. Zugleich ist erkennbar, dass die bereits in Abschnitt 6.5.3 thematisierte Herstellung zusätzlicher Komponenten für Elektrofahrzeuge (z. B. Batterien, elektrische Maschine, Leistungselektronik) mit zunehmendem E-Fahrzeug-Anteil zu steigendem Materialbedarf führt.

Auch die Nutzungsphase verzeichnet bei steigendem Anteil elektrischer Antriebe einen steigenden kumulierten abiotischen Materialbedarf. Sinkende Beiträge der Nutzung konventioneller Fahrzeuge werden hier durch zunehmende Beiträge der Nutzung elektrischer Antriebe leicht überkompensiert. Dies ist zumindest dann der Fall, wenn (wie hier angenommen) die elektrische Antriebsenergie aus einem Strommix mit zunächst noch hohen und erst im Zeitverlauf sinkenden Anteilen fossiler Erzeugung bereitgestellt wird. Zum erhöhten Materialbedarf der Nutzungsphase trägt also in diesem Fall unter anderem bei, dass über den gesamten Zeitraum ein (abnehmender) Teil der elektrischen Antriebsenergie aus Quellen mit hohem spezifischem Materialbedarf bezogen wird (z. B. Braun- und Steinkohle, vgl. Viebahn & Wiesen 2014).

Bereits die Bewertung des Materialbedarfs auf Fahrzeugebene hat gezeigt, dass die Entsorgung gegenüber Herstellung und Nutzung nur einen vernachlässigbar geringen Anteil aufweist (siehe hierzu auch Abschnitt 6.5.3). Dies spiegelt sich auch in den Szenariovergleichen wider.

Die zuvor dargestellten kumulierten Ergebnisse über den Betrachtungszeitraum dienen dem Vergleich der Szenarien untereinander hinsichtlich des abiotischen Materialbedarfs. Sie ermöglichen aber keine Aussagen dazu, wie sich der Materialbedarf innerhalb eines Szenarios im Zeitverlauf entwickelt – ob also in einem Szenario während des Betrachtungszeitraums davon auszugehen ist, dass der Materialaufwand im Vergleich zur gegenwärtigen Situation weiter ansteigt oder zurückgeht. Um diese Tendenz innerhalb der Szenarien abzubilden, wurden für jedes Szenario der kumulierte abiotische Materialbedarf des ersten und des letzten betrachteten Zehnjahreszeitraums gegenübergestellt (siehe Abb. 6-22). Hierfür wird ebenfalls die Bereitstellung von elektrischer Antriebsenergie nach „Szenario 2011 A“ gemäß Teske et al. (2012) angenommen.

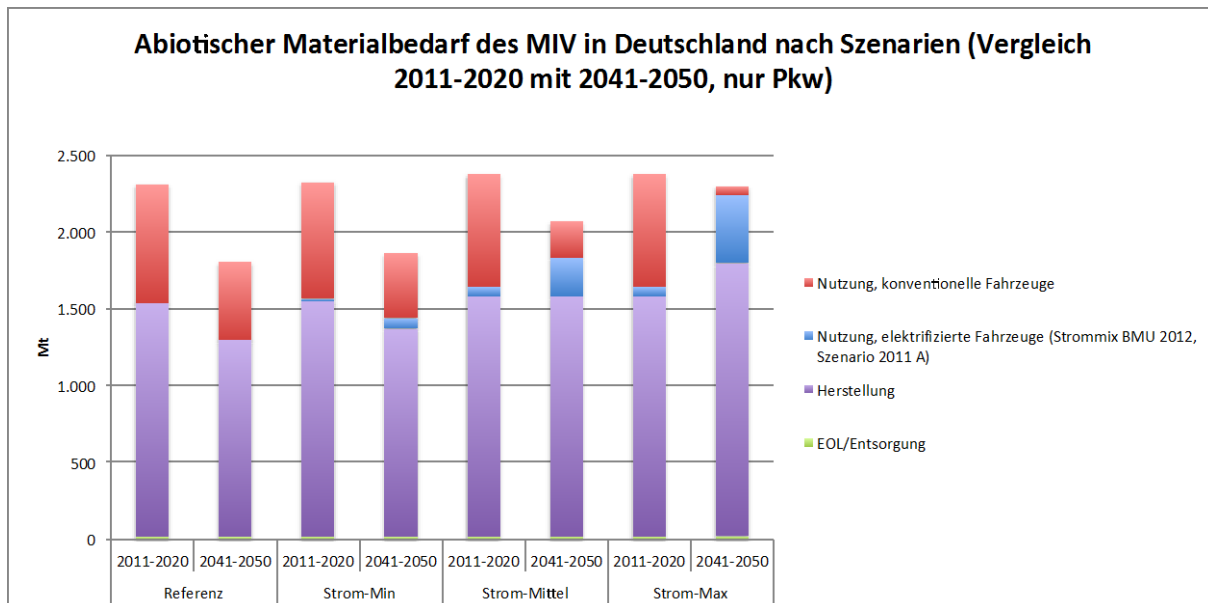


Abb. 6-22 Abiotischer Materialbedarf des Pkw-Verkehrs in Deutschland nach Verkehrsszenarien, Gegenüberstellung der Zeiträume 2011-2020 und 2041-2050)

Die Gegenüberstellung macht deutlich, dass in allen Szenarien eine Reduktion des Materialbedarfs einzelner Dekaden innerhalb des Betrachtungszeitraums erreicht wird. Dies ist auf die angenommene zeitliche Entwicklung des MIV (z. B. veränderte Fahrzeugeigenschaften, veränderte Zusammensetzung der Flotten) zurückzuführen.

Mit zunehmendem Anteil elektrifizierter Fahrzeuge fällt diese Reduktion des Materialbedarfs der letzten im Vergleich zur ersten Dekade jedoch zunehmend schwächer aus. Während für das Szenario Referenz ein Rückgang um 22 % berechnet wurde, kann der Materialbedarf im Szenario STROM-Max nur geringfügig um 3 % reduziert werden.

Die Unterteilung des Materialbedarfs in Lebenszyklusphasen zeigt, dass der Rückgang des Materialbedarfs der Nutzungsphase in allen Szenarien ähnlich stark ausfällt - wenn auch aus unterschiedlichen Gründen. Hinsichtlich der Herstellung ist eine Reduktion des Materialbedarfs dagegen nur in den Szenarien Referenz und STROM-Min zu beobachten, während die hohen Anteile elektrifizierter Fahrzeuge in den weiteren Szenarien zu stagnierendem Bedarf dieser Lebenszyklusphase (STROM-Mittel) oder sogar zu einer Steigerung im Zeitverlauf führen (STROM-Max).

Die Elektrifizierung der Pkw-Flotten allein ist demnach nicht geeignet, den Materialbedarf des Pkw-Verkehrs in Deutschland gegenüber einer Flotte ohne elektrische Antriebe weiter zu senken. Um dieses Ziel zu erreichen, sind weitere Maßnahmen notwendig. Hier sind technische Maßnahmen denkbar, die primär auf die materialintensive Herstellung der Fahrzeuge abzielen: Die Ergebnisse der MAIA auf Fahrzeugebene könnten genutzt werden, um verwendete Materialien mit besonders großem Materialbedarf zu identifizieren und in der Herstellung zu substituieren. Mit stärkeren Auswirkungen auf den Materialbedarf aller Lebenszyklusphasen wären dagegen strukturelle Ansätze verbunden, die auf eine intelligentere Nutzung mit besserer Auslastung des Pkw-Verkehrs sowie auf verlängerte Nutzungsdauern der Fahrzeuge abzielen.

6.7.3 Abiotischer Materialbedarf Welt

Analog zur zuvor beschriebenen Einordnung des abiotischen Materialbedarfs der Deutschland-Szenarien wurde auch eine entsprechende Berechnung für die vier berücksichtigten Welt-Szenarien durchgeführt. Auch hier wird für die Bereitstellung der elektrischen Antriebsenergie von einem Mix mit steigenden erneuerbaren Anteilen ausgegangen. Dieser entspricht dem Szenario ER der Studie Teske et al. (2012) (vgl. Abschnitt 6.5.2).

Für die Herstellung, Nutzung und Entsorgung aller Fahrzeuge im Zeitraum 2011-2050 ergibt sich der in Abb. 6-23 dargestellte weltweite abiotische Materialbedarf.

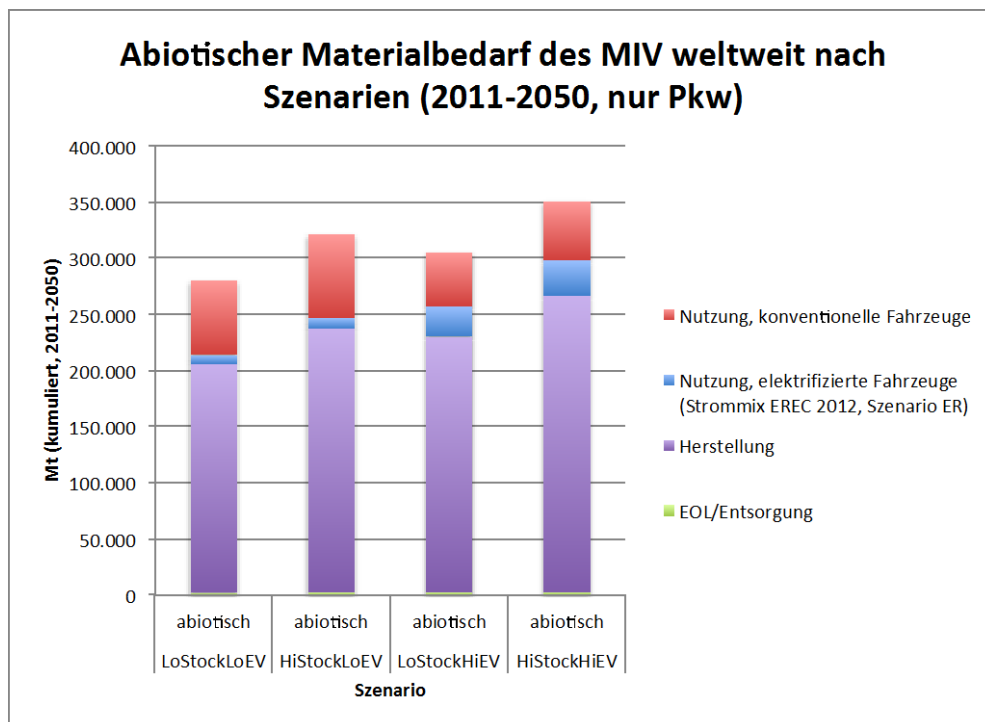


Abb. 6-23 Abiotischer Materialbedarf des Pkw-Verkehrs weltweit nach Verkehrsszenarien

Der berechnete kumulierte abiotische Materialbedarf liegt weltweit je nach Szenario zwischen 281 und 351 Gt. Im Gegensatz zu den Deutschland-Szenarien ist bei der Interpretation des weltweiten Materialbedarfs zu berücksichtigen, dass die verglichenen Szenarien von einem Wachstum der weltweiten Pkw-Flotten bis 2050 ausgehen, welches unterschiedlich stark ausfällt. Dabei wird in den mit „LoStock“ bezeichneten Szenarien ein geringeres Flottenwachstum angenommen als in den „HiStock“-Szenarien (vgl. Unterkapitel 6.6). Dies hat entsprechende Auswirkungen auf den Materialbedarf: Die beiden Szenarien mit kleineren Fahrzeugflotten weisen im Vergleich zu den beiden Szenarien mit großen Fahrzeugflotten einen geringeren kumulierten Materialbedarf auf. Die Gegenüberstellung der Szenarien mit identischer Bestandsentwicklung zeigt, dass sich jeweils für das Szenario mit höherem Anteil elektrifizierter Antriebe auch der höhere kumulierte Materialbedarf ergibt.

Der im Vergleich zu LoStockLoEV erhöhte abiotische Materialbedarf der weiteren Szenarien kann demnach einerseits auf ein stärkeres Flottenwachstum in den „HiStock“-Szenarien, andererseits auf den höheren Materialbedarf der elektrifizierten Fahrzeuge in den „HiEV-Szenarien“ zurückgeführt werden.

Der Vergleich zeigt auch, dass auch bei erhöhter Marktdurchdringung elektrischer Antriebe (LoStockHiEV) eine Senkung des kumulierten abiotischen Materialbedarfs gegenüber einer vorrangig auf Verbrennungsmotoren basierenden Entwicklung (HiStockLoEV) erreicht werden kann, wenn zugleich eine Begrenzung des Wachstums weltweiter Fahrzeugflotten angenommen wird.

Für die Differenzierung der Wirkungsbeiträge einzelner Lebenszyklusphasen zum kumulierten Materialbedarf der Szenarien gelten die bereits zu den Deutschland-Szenarien getroffenen Aussagen:

Die Fahrzeugherstellung ist von zentraler Bedeutung für den abiotischen Materialbedarf der Szenarien, zusätzliche Komponenten für Elektrofahrzeuge (z. B. Batterien, elektrische Maschine, Leistungselektronik) führen mit zunehmendem E-Fahrzeug-Anteil zu steigendem Materialbedarf. Der verbleibende Materialbedarf entfällt fast vollständig auf die Nutzungsphase, wobei sich die absoluten Beiträge bei gleichem Fahrzeugbestand kaum unterscheiden, sondern vorrangig eine Verlagerung von der Nutzung konventioneller zur Nutzung elektrifizierter Fahrzeuge stattfindet. Die Entsorgung weist gegenüber Herstellung und Nutzung nur einen vernachlässigbar geringen Anteil auf.

Die zuvor dargestellten Ergebnisse über den Betrachtungszeitraum ermöglichen eine Einordnung der Szenarien nach ihrem kumulierten abiotischen Materialbedarf. Weil aber in allen Szenarien ein deutliches Wachstum der Flotten angenommen wird, ist für die Berechnung der Welt Szenarien von besonderem Interesse, wie sich der Materialbedarf des Pkw-Verkehrs im Zeitverlauf darstellt. Ergänzend wird deshalb auch für die Welt-Szenarien der kumulierte abiotische Materialbedarf der ersten und der letzten betrachteten Dekade gegenübergestellt (siehe Abb. 6-24). Hierfür wird ebenfalls die Bereitstellung von elektrischer Antriebsenergie nach Szenario ER der Studie Teske et al. (2012) angenommen.

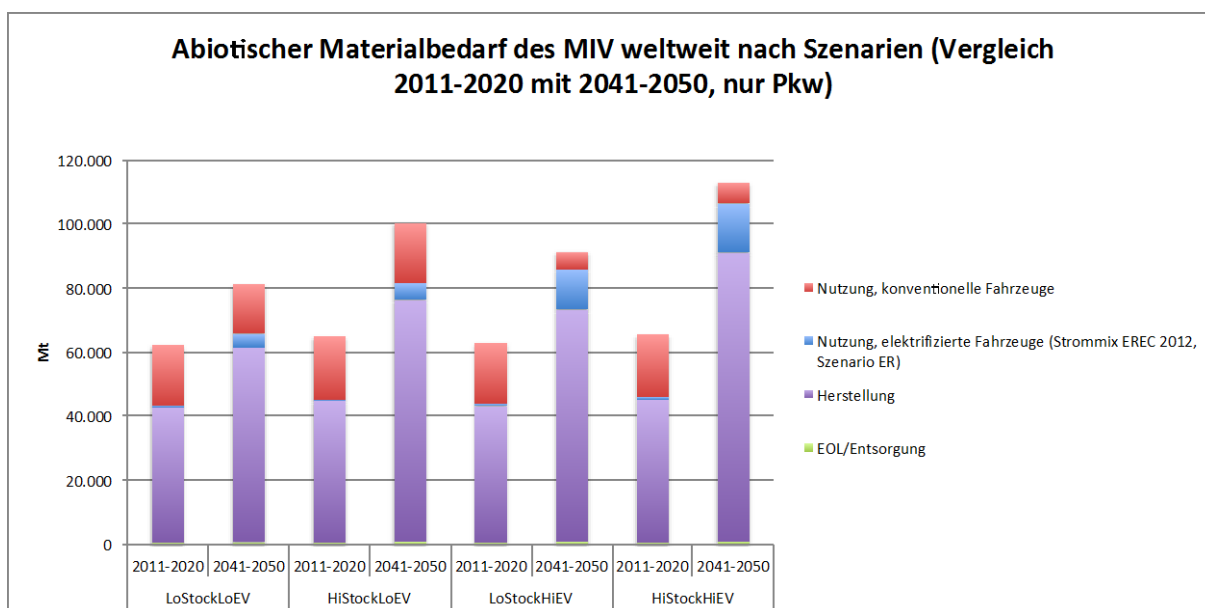


Abb. 6-24 Abiotischer Materialbedarf des Pkw-Verkehrs in Deutschland nach Verkehrsszenarien, Gegenüberstellung der Zeiträume 2011-2020 und 2041-2050)

Im Gegensatz zu den Deutschland-Szenarien führt die Entwicklung des Pkw-Verkehrs weltweit in keinem der Szenarien zu einer Reduktion des Materialbedarfs einzelner Dekaden im

Zeitverlauf. Dies kann insbesondere darauf zurückgeführt werden, dass alle Welt-Szenarien von einem deutlichen Anstieg der weltweiten Fahrzeugflotten ausgehen. Angenommene zukünftige Verbesserungen von Fahrzeugeigenschaften werden so durch zusätzliche Fahrzeuge deutlich überkompensiert.

Ein deutlicher Anstieg des Materialbedarfs ist insbesondere in den Szenarien mit starkem Flottenwachstum zu erkennen. Ein erhöhter Anteil elektrifizierter Fahrzeuge hat zusätzlich einen weiteren Anstieg des Materialbedarfs von der ersten bis zu letzten betrachteten Dekade zur Folge. Demzufolge wurde die höchste Steigerung von 72 % für das Szenario HiStockHiEv berechnet, während das Szenario LoStockLoEv die geringste Steigerung aufweist (+30 %).

Die Unterteilung des Materialbedarfs in Lebenszyklusphasen zeigt, dass der Materialbedarf der Nutzungsphase in den meisten Szenarien stagniert oder geringfügig ansteigt, während nur bei gleichzeitig hohem xEV-Anteil und geringem Flottenwachstum ein leichter Rückgang erkennbar ist. Der absolute Anstieg des Materialbedarfs in allen Szenarien ist dagegen auf die Herstellungsphase zurückzuführen, deren Beitrag sich beispielsweise im Szenario HiStockHiEV in 2041-2050 gegenüber 2011-2020 etwa verdoppelt.

Die Gegenüberstellung der Dekaden zeigt, dass selbst das Szenario LoStockLoEV, welches den geringsten kumulierten abiotischen Materialbedarf im Gesamtzeitraum aufweist, mit einem im Zeitverlauf steigenden Materialbedarf verbunden ist. Keines der betrachteten Szenarien erweist sich damit als geeignet, den absoluten Materialbedarf des weltweiten Pkw-Verkehrs gegenüber der heutigen Situation zukünftig zu reduzieren. Es erscheint auch unwahrscheinlich, dass dieses Ziel durch technische Weiterentwicklungen zur Reduktion des Herstellungsaufwandes (z. B. Substitution von Materialien) erreicht werden kann. Derartige Maßnahmen könnten lediglich einen Beitrag dazu leisten, den Materialbedarf eines stärker elektrifizierten Pkw-Verkehrs weltweit gegenüber einer Flotte mit geringeren Anteilen elektrischer Antriebe zu senken. Die absolute Senkung des Materialbedarfs scheint lediglich durch eine Begrenzung des weltweiten Flottenwachstums gegenüber den in den Szenarien geschilderten Annahmen möglich. Diese könnte erreicht werden durch die intelligentere Nutzung mit besserer Auslastung des Pkw-Verkehrs, verlängerte Nutzungsdauern der Fahrzeuge oder einen veränderten Modal Split.

6.7.4 Treibhausgasemissionen Deutschland

Es wurde zuvor bereits dargestellt, mit welchen Auswirkungen auf den abiotischen Materialbedarf für die betrachteten Elektromobilitätsszenarien zu rechnen ist. Weil bislang jedoch nicht die Senkung des Materialbedarfs, sondern die Reduktion der THG-Emissionen im Fokus politischer Strategien zur Transformation des Pkw-Verkehrs stehen, wurden analog zur Ermittlung des Materialbedarfs auch das Erderwärmungspotenzial der betrachteten Szenarien berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden im Folgenden dargestellt.

Für die Herstellung, Nutzung und Entsorgung aller Fahrzeuge im Zeitraum 2011-2050 ergeben sich aus den Berechnungen für Deutschland die in Abb. 6-25 dargestellten kumulierten THG-Emissionen. Analog zur Berechnung des Materialbedarfs wird ebenfalls die Bereitstellung von elektrischer Antriebsenergie nach „Szenario 2011 A“ gemäß Nitsch et al. (2012) angenommen.

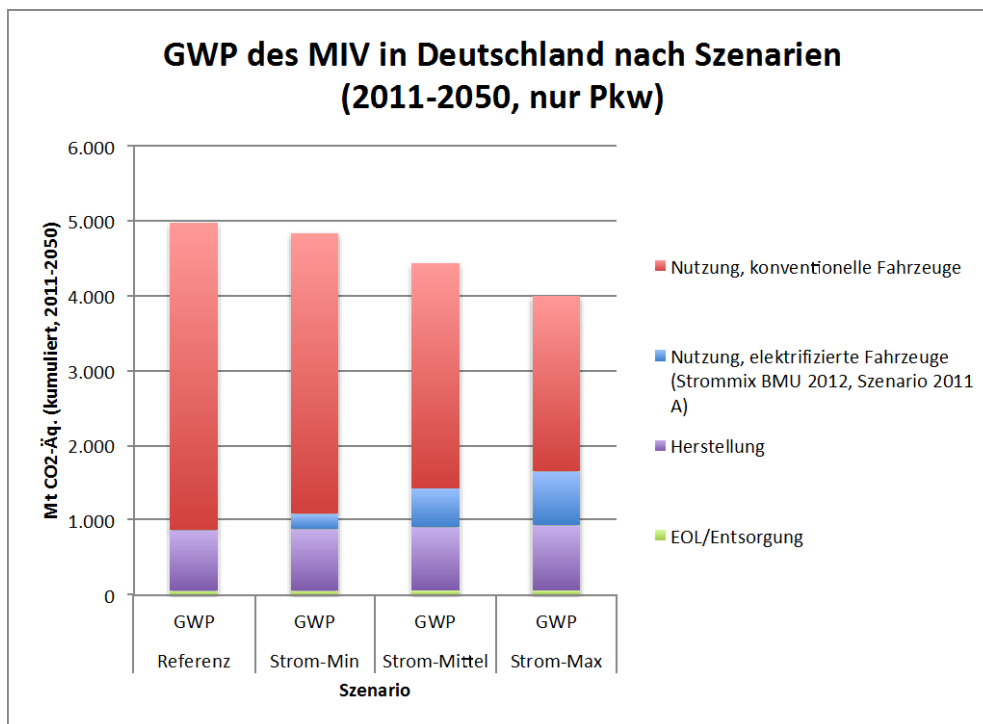


Abb. 6-25 Treibhausgaspotenzial des Pkw-Verkehrs in Deutschland nach Verkehrsszenarien

Der berechneten kumulierten THG-Emissionen für Deutschland liegen je nach Szenario zwischen 4 und 5 Gt CO₂-Äquivalenten. Im Gegensatz zum abiotischen Materialbedarf zeigt sich, dass alle Elektromobilitätsszenarien gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektromobilität über den gesamten Betrachtungszeitraum niedrigere THG-Emissionen aufweisen, wobei mit steigendem Anteil elektrifizierter Fahrzeuge jeweils auch ein weiterer Rückgang der Emissionen verbunden ist. Die stärkste Reduktion der THG-Emissionen (um ca. 20 % gegenüber der Referenz) kann demnach im Szenario STROM-Max erreicht werden.

Da die Größe des Fahrzeugbestands in allen Szenarien als konstant angenommen wird, sind die ermittelten THG-Einsparungen der STROM-Szenarien ausschließlich auf die bessere THG-Bilanz der elektrifizierten Fahrzeuge zurückzuführen, die bereits in Abschnitt 6.5.3 dargestellt wurde.

Eine differenzierte Betrachtung der Ergebnisse nach Lebenszyklusphasen zeigt, dass die THG-Emissionen im Gegensatz zum abiotischen Materialbedarf im Wesentlichen nicht von der Herstellung der Fahrzeuge verursacht werden. Sie verursacht im Referenzszenario mit 814 Mt lediglich 16 % der gesamten THG-Emissionen. Demgegenüber ist der (absolute) Beitrag der Herstellung auch in den weiteren Szenarien nur geringfügig erhöht und steigt nicht über 868 Mt im gesamten Zeitraum.

Hauptverursacherin der THG-Emissionen ist dagegen die Nutzung der Fahrzeuge: Auf sie entfällt in den Szenarien ein Anteil von 80-83 %. Die Nutzung stellt daher auch den wichtigsten Ansatzpunkt zur Reduktion der lebenszyklusweiten THG-Emissionen dar. Die niedrigeren Gesamtemissionen der STROM-Szenarien gegenüber der Referenz sind darauf zurückzuführen, dass bei steigendem Anteil elektrifizierter Antriebe die Zusatzemissionen des Betriebs von xEV geringer ausfallen als die eingesparten Emissionen des Betriebs von ICEV. Die Emissionen der Fahrzeugnutzung in STROM-Max (3,1 Gt) können so gegenüber der Referenz (4,1 Gt) um 25 % gesenkt werden. Eine ebenfalls berechnete Variante (ohne Abbildung) zeigt, dass bei ausschließlicher Nutzung (zusätzlich eingespeister) Strommengen

aus Windenergie über den gesamten Zeitraum nur eine geringfügige zusätzliche Reduktion des Beitrags der Nutzungsphase der STROM-Szenarien gegenüber der Referenz möglich wird. Die Gesamtemissionen des Szenarios sinken dann auf 3,8 (statt 4) Gt gegenüber 5 Gt im Referenzszenario. Dass auch in dieser Variante noch 76 % der Nutzungsemissionen auf xEV entfallen, lässt sich damit erklären, dass hier auch die Vorkettenemissionen der Strombereitstellung sowie die Nutzung von fossilen Brennstoffen in Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen enthalten sind.

Auffällig ist, dass selbst im Szenario STROM-Max die THG-Emissionen mit einem Anteil von 61 % noch von den Auswirkungen der Nutzung konventioneller Fahrzeuge dominiert werden. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Abbildung die kumulierte Darstellung des gesamten Zeitraums ab 2011 zeigt, also auch die THG-Emissionen der ersten Dekaden mit noch hohen Anteilen von Verbrennungsmotoren einbezogen werden.

Bereits die Bewertung der THG-Emissionen auf Fahrzeugebene hat gezeigt, dass die Entsorgung gegenüber Herstellung und Nutzung nur einen vernachlässigbar geringen Anteil aufweist. Dies spiegelt sich auch in den Szenariovergleichen wider.

Zusätzlich zum Vergleich der Gesamtwirkungen des Betrachtungszeitraums werden in Abb. 6-26 auch die THG-Emissionen des ersten und des letzten betrachteten Zehnjahreszeitraums gegenübergestellt, um den Trend der Entwicklung von THG-Emissionen des Pkw-Verkehrs im Zeitverlauf abzubilden. Hierfür wird ebenfalls die Bereitstellung von elektrischer Antriebsenergie nach „Szenario 2011 A“ gemäß Nitsch et al. (2012) angenommen.

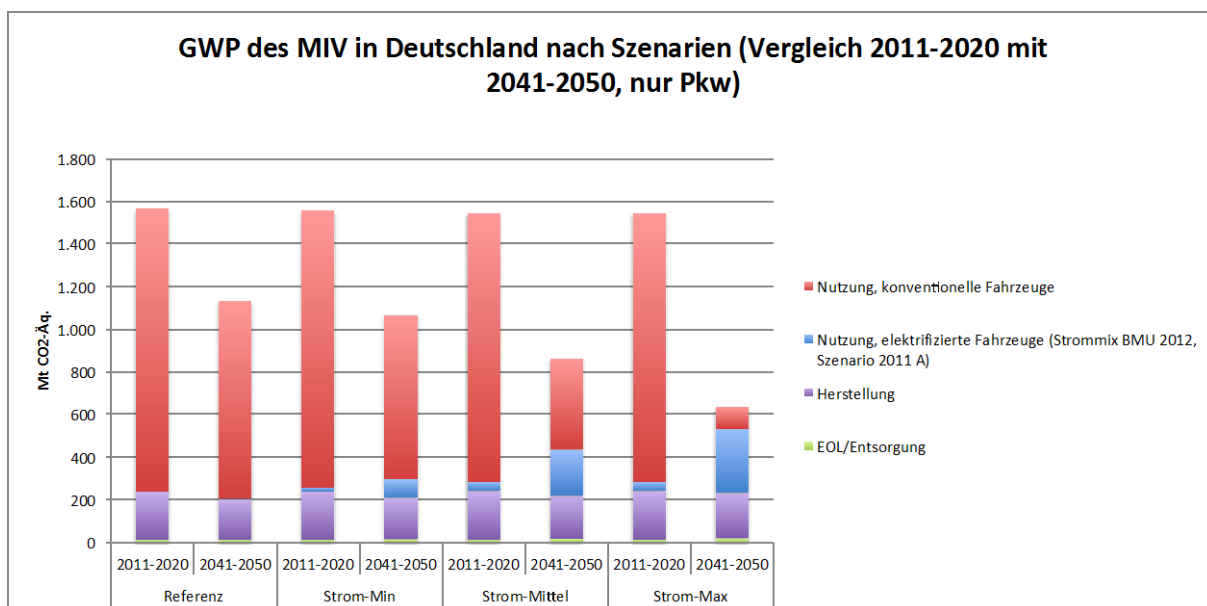


Abb. 6-26 GWP des Pkw-Verkehrs in Deutschland nach Verkehrsszenarien, Gegenüberstellung der Zeiträume 2011-2020 und 2041-2050)

Die Gegenüberstellung macht deutlich, dass in allen Szenarien eine erhebliche Reduktion der THG-Emissionen einzelner Dekaden innerhalb des Betrachtungszeitraums erreicht wird. Dies ist auf die Weiterentwicklung von Fahrzeugen (verbesserte Effizienz) sowie auf die Entwicklung der Fahrzeugflotten mit deutlich veränderter Bereitstellung der Antriebsenergie zurückzuführen.

Mit zunehmendem Anteil elektrifizierter Fahrzeuge fällt diese Reduktion der THG-Emissionen der letzten im Vergleich zur ersten Dekade immer stärker aus. Während für das Szenario Referenz ein Rückgang um nur 28 % berechnet wurde, können die THG-Emissionen im Szenario STROM-Max sogar um 59 % reduziert werden.

Die Zuordnung der THG-Emissionen zu Lebenszyklusphasen zeigt, dass Veränderungen der Emissionen von Herstellung und Entsorgung für diesen Rückgang nicht relevant sind. Die verbesserte THG-Bilanz im Zeitverlauf ist dagegen in allen Szenarien fast ausschließlich auf die Reduktion der Emissionen in der Nutzungsphase zurückzuführen. Die besonders ausgeprägte Transformation des Pkw-Verkehrs hin zu elektrischer Antriebsenergie in STROM-Max hat dabei einen besonders starken Rückgang der Nutzungsemissionen zur Folge. Die verbleibenden 407 Mt CO₂-Äq. der letzten Dekade (gegenüber 1306 Mt in der ersten Dekade) entfallen dabei bereits überwiegend auf den Betrieb elektrifizierter Fahrzeuge.

Die Auswertung der Szenarien hinsichtlich der THG-Emissionen zeigt, dass die Elektrifizierung der Pkw-Flotten eine geeignete Maßnahme darstellt, um die THG-Emissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland zu reduzieren. Es kann dabei sowohl eine absolute Senkung der Emissionen im Zeitverlauf als auch eine Reduktion gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektrofahrzeuge erreicht werden.

6.7.5 Treibhausgasemissionen Welt

Ergänzend zur zuvor beschriebenen Einordnung der THG-Emissionen der Deutschland-Szenarien wurde auch eine entsprechende Berechnung für die vier berücksichtigten Welt-Szenarien durchgeführt. Für die Herstellung, Nutzung und Entsorgung aller Fahrzeuge im Zeitraum 2011-2050 ergeben sich weltweit die in Abb. 6-27 dargestellten kumulierten THG-Emissionen. Analog zur Berechnung des Materialbedarfs wird ebenfalls die Bereitstellung von elektrischer Antriebsenergie nach Szenario ER der Studie Teske et al. (2012) angenommen.

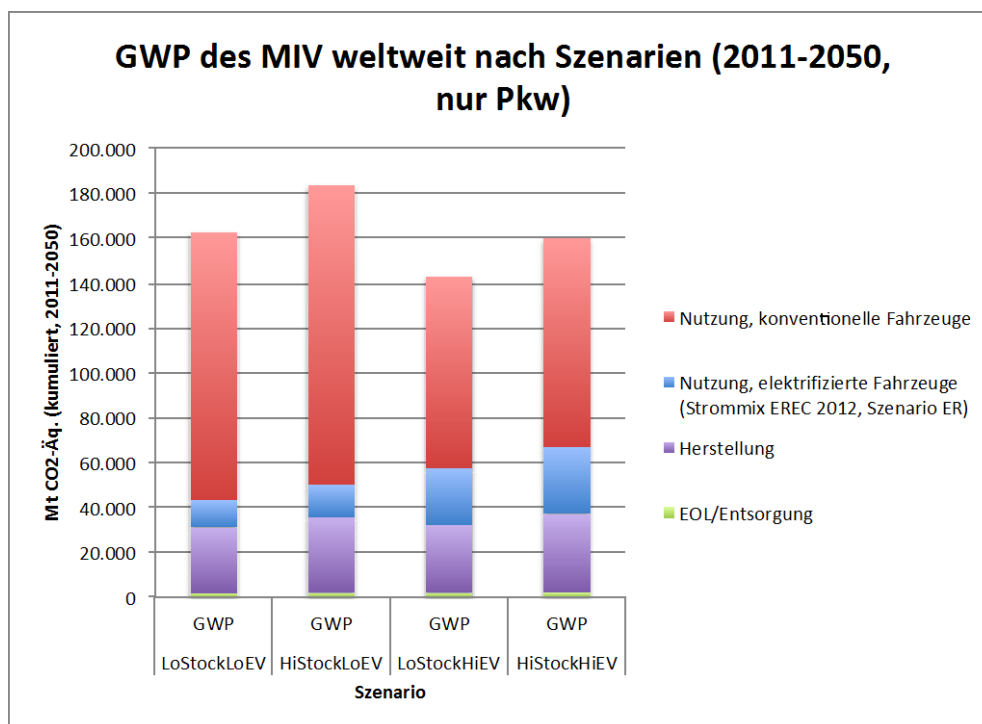


Abb. 6-27 Treibhausgaspotenzial des Pkw-Verkehrs weltweit nach Verkehrsszenarien

Je nach Szenario ergeben sich aus den weltweiten Berechnungen kumulierte THG-Emissionen in Höhe von 143 bis 183 Gt. Auch hinsichtlich der Aussagen zu Treibhausgasen ist zu beachten: Im Gegensatz zu den Deutschland-Szenarien gehen die weltweiten Szenarien von einem Wachstum der Pkw-Flotten bis 2050 aus, welches unterschiedlich stark ausfällt (vgl. Abschnitt 6.6.6). Dies hat entsprechende Auswirkungen auf die THG-Emissionen: Die beiden Szenarien mit kleineren Fahrzeugflotten („LoStock“) weisen im Vergleich zu den beiden Szenarien mit großen Fahrzeugflotten („HiStock“) geringere kumulierte THG-Emissionen auf. Die Gegenüberstellung der Szenarien mit identischer Bestandsentwicklung zeigt, dass jeweils im Szenario mit höherem Anteil elektrifizierter Antriebe niedrigere THG-Emissionen erreicht werden können.

Die geringsten Emissionen von 143 Gt ergeben sich demnach im Szenario LoStockHiEV mit vergleichsweise geringem Bestand und hohem xEV-Anteil. Die im Vergleich hierzu erhöhten THG-Emissionen der weiteren Szenarien können demnach einerseits auf ein stärkeres Flottenwachstum in den „HiStock“-Szenarien, andererseits auf die höhere THG-Intensität der konventionellen Fahrzeuge in den „LoEV“-Szenarien zurückgeführt werden.

Für die Differenzierung der Wirkungsbeiträge einzelner Lebenszyklusphasen zu den THG-Emissionen der Szenarien gelten die bereits zu den Deutschland-Szenarien getroffenen Aussagen: Die Fahrzeugnutzung ist von zentraler Bedeutung für die kumulierten THG-Emissionen der Szenarien, wobei mit erhöhtem Anteil elektrifizierter Antriebe die Zusatzemissionen des Betriebs von xEV geringer ausfallen als die eingesparten Emissionen des Betriebs von ICEV. Die verbleibenden THG-Emissionen werden fast vollständig durch die Herstellungsphase verursacht, wobei sich die absoluten Beiträge bei gleichem Fahrzeugbestand kaum unterscheiden und mit erhöhtem Anteil von xEV lediglich ein geringer Anstieg festzustellen ist. Die Entsorgung weist gegenüber Herstellung und Nutzung nur einen vernachlässigbar geringen Anteil auf – auch hier gelten jedoch die schon zuvor genannten Einschränkungen hinsichtlich der Datenbasis.

Zusätzlich zum Vergleich der Gesamtwirkungen des Betrachtungszeitraums werden in Abb. 6-28 auch die THG-Emissionen des ersten und des letzten betrachteten Zehnjahreszeitraums gegenübergestellt, um den erwarteten Trend der weltweiten Entwicklung von THG-Emissionen des Pkw-Verkehrs im Zeitverlauf abzubilden. Hierbei wird ebenfalls die Bereitstellung von elektrischer Antriebsenergie nach Szenario ER der Studie Teske et al. (2012) angenommen.

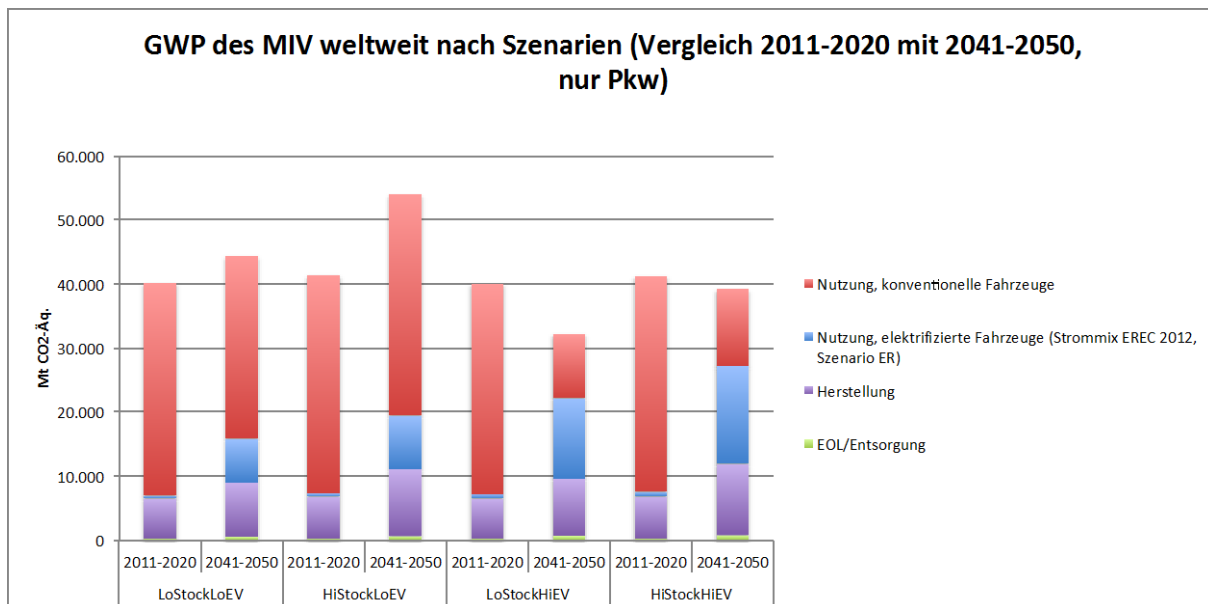


Abb. 6-28 GWP des Pkw-Verkehrs weltweit nach Verkehrsszenarien, Gegenüberstellung der Zeiträume 2011-2020 und 2041-2050)

Im Gegensatz zu den Deutschland-Szenarien führt die Entwicklung des Pkw-Verkehrs weltweit lediglich in den beiden Szenarien mit hohem Anteil elektrifizierter Fahrzeuge zu einer Reduktion der THG-Emissionen innerhalb des Betrachtungszeitraums. Während bei gleichzeitig hohem Flottenwachstum nur ein geringer Minderungseffekt von der ersten bis zur letzten Dekade erkennbar ist (-5 %), können die Emissionen bei reduziertem Wachstum um 19 % gemindert werden. Niedrigere Anteile elektrifizierter Fahrzeuge führen dagegen in beiden Varianten des Flottenwachstums (LoEV-Szenarien) zu steigenden Emissionen im Zeitverlauf. Dieser Anstieg fällt jedoch bei hohem Flottenwachstum besonders stark aus (+30 %). Im Gegensatz zu den Deutschland-Szenarien kann demnach davon ausgegangen werden, dass CO₂-mindernde Effekte technologischer Weiterentwicklung (Effizienzsteigerung, alternative Antriebe) durch ein deutliches Wachstum der weltweiten Fahrzeugflotten abgeschwächt oder aufgehoben werden.

Die Zuordnung der THG-Emissionen zu Lebenszyklusphasen zeigt, dass Veränderungen der Emissionen von Herstellung und Entsorgung im Vergleich zur Nutzung von untergeordneter Bedeutung sind und zugleich in keinem der Szenarien zu einer Senkung der THG-Emissionen beitragen: Die wachsenden Fahrzeugflotten verursachen in allen betrachteten Varianten zunehmende Herstellungsemissionen. Die stärkste Bedeutung für die zukünftige Entwicklung der THG-Emissionen entfällt erneut auf die Nutzung der Fahrzeuge: So können bei hoher Marktdurchdringung elektrischer Antriebe die Nutzungsemissionen von etwa 34 Gt in 2011-2020 auf ca. 23-27 Gt in 2041-2050 reduziert werden. Auch in der letzten Dekade entfallen in diesen beiden Szenarien jedoch noch etwa 44 % der Nutzungsemissionen auf

konventionell angetriebene Fahrzeuge. Bei geringen xEV-Anteilen wurden dagegen unterschiedlich stark steigende THG-Emissionen der Nutzungsphase berechnet, überwiegend verursacht von verbrennungsmotorischen Antrieben.

Die Auswertung der Szenarien hinsichtlich der weltweiten THG-Emissionen zeigt, dass ein umfassender Technologiewechsel zu alternativen Antrieben erforderlich ist, um trotz stark wachsender Fahrzeugflotten eine Reduktion der THG-Emissionen zu erreichen. Nur durch eine umfassende Umstellung der Bereitstellung von Antriebsenergien von fossilen auf regenerative Quellen kann so einerseits eine absolute Senkung der Emissionen im Zeitverlauf als auch eine Reduktion der kumulierten Emissionen gegenüber einer Referenzentwicklung mit reduziertem Anteil an Elektrofahrzeugen erreicht werden. Dennoch zeigt sich, dass die Emissionsreduktion auf Grund der Szenarioannahmen zum Flottenwachstum deutlich schwächer ausfällt als in den zuvor beschriebenen Deutschland-Szenarien.

6.8 Risiken und Knappheitsfragen

M. Ritthoff (WI)

Neben Umweltbelastungen, in diesem Projekt anhand der Ressourceninanspruchnahme abgeschätzt, ist die Verfügbarkeit von Rohstoffen für den Einsatz von Technologien und die Umsetzung von Technologiepfaden von entscheidender Bedeutung. Diese Verfügbarkeit hängt von zahlreichen Aspekten ab, relevant ist zunächst insbesondere die geologische Verfügbarkeit. Daneben spielt aber vor allem auch der Zugang zu diesen Rohstoffen eine große Rolle, der durch die globale Verteilung der Rohstoffe, die Zahl und politische Stabilität der Lieferländer, Nachfrage und Nachfragewachstum nach den Rohstoffen, aber auch die Recycling- und Substitutionsfähigkeit bestimmt wird. Diese Aspekte machen zusammen die Kritikalität eines Rohstoffs aus. Für die relevanten Stoffe soll diese Kritikalität im Folgenden eingeschätzt werden.

In diesem Kapitel wird die Verfügbarkeit der potenziell kritischen Rohstoffe eingeschätzt. Die Menge der für Deutschland ermittelten potenziellen Verbräuche einzelner Rohstoffe, die für die verschiedenen Szenarien des Ausbaus der Elektromobilität benötigt werden, wird hierbei der globalen Jahresförderung sowie den globalen Reserven gegenüber gestellt.

Mit der Berücksichtigung sowohl von Produktionsmengen als auch von Reserven werden Aspekte der kurz- wie langfristigen Verfügbarkeit einbezogen. Für die gesamten Betrachtungen wird dabei berücksichtigt, dass der Bevölkerungsanteil Deutschlands an der Weltbevölkerung derzeit etwas über 1 % liegt und zukünftig voraussichtlich etwas unter 1 % liegen wird. Überträgt man dies auf die vorhandenen Reserven, kann dieser Budgetansatz in eine „1 %-Regel“ für eine erste grobe Einschätzung eines möglichen Anteils Deutschlands an den betrachteten Rohstoffen münden. Hierbei muss natürlich berücksichtigt werden, dass eine Nachfrage nach den betrachteten Stoffen nicht nur aus der Elektromobilität, sondern dass auch andere konkurrierende Nachfragen bestehen (vgl. hierzu auch Wuppertal Institut 2014).

In einer ersten Näherung wird davon ausgegangen, dass eine kumulierte Nachfrage über den gesamten Betrachtungszeitraum (2011 bis 2050) in Höhe von bis zu 10 % der derzeitigen globalen Jahresproduktion sowie in Höhe von bis zu 0,1 % der Reserven problemlos zu decken sind. Dies entspricht – bei konstanter Fördermenge – 0,25 % der Förderung bis

2050. Mit der Differenz zur „1 %-Regel“ wird die konkurrierende Nachfrage außerhalb der Elektromobilität überschlägig berücksichtigt.

Zeigen sich bei der ersten Einschätzung Engpässe, wird diese um zusätzliche Kriterien erweitert. Da die Situation der einzelnen Rohstoffe stets sehr spezifisch ist, erfolgt die Bewertung verbal argumentativ.

Zu den Ausgangsfragen der Studie gehört ebenfalls, ob sich bei steigender Nachfrage die Umweltbelastungen bei der Gewinnung der Rohstoffe, alleine bedingt durch den Rohstoff und die Lagerstätte, deutlich ändern können. Hierzu werden an ausgewählten Beispielen derzeit genutzte und mögliche zukünftig relevante Lagerstätten betrachtet, und es wird versucht, den Aufwand bei der Gewinnung von Rohstoffen abzuschätzen.

6.8.1 Untersuchungsrahmen

Auf der Basis der Materialintensitätsanalyse und der zugrunde liegenden Mengengerüste wurden die potenziell kritischen Rohstoffe identifiziert. Hierbei wurde auf eine Auswertung (Wuppertal Institut 2014) vorhandener Studien zu kritischen Rohstoffen zurückgegriffen, die Grundlage für eine erste Einschätzung der möglichen Kritikalität ist. Im Rahmen dieser Auswertung wurden Studien zur Kritikalität von Rohstoffen unabhängig von den in den einzelnen Studien differierenden Kritikalitätsbegriffen berücksichtigt. Die Anzahl der Studien, die ein Element als kritisch eingestuft haben, wurde hierbei als Indikator für die Relevanz der in diesem Projekt betrachteten Materialien und Technologien verwendet. In Abb. 6-29 wird dieser Indikator auf einer Farbskala von weiß bis dunkelrot dargestellt – je stärker eingefärbt ein Element ist, umso mehr Studien haben dieses Element als kritisch eingestuft.

Auf der Grundlage dieser ersten Einschätzung der möglichen Kritikalität und nach Auswertung der hochgerechneten Materialbedarfe aus den Szenarien wurden für die Bewertung der Kritikalität Seltenerdelemente (insbesondere Neodym (Nd), Praseodym (Pr), Dysprosium (Dy), Terbium (Tb)), Lithium (Li), Silber (Ag), Gold (Au), Platin (Pt), Palladium (Pd), Gallium (Ga), Indium (In), Germanium (Ge) und Tantal (Ta) ausgewählt.

1 IA		Gruppe IUPAC										Gruppe CAS						Nennungen als kritisch						18 VIIIA	
1	2	1 IA										2 IIA						3 IIIA						2	
H	He	Ordnungszahl → 1 ← relevant für										← Elementensymbol						← Elementname							
3 Li	4 Be																								
11 Na	12 Mg																								
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr								
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe								
55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn								
87 Fr	88 Ra	89-103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo								
LANTHANIDE		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu									
ACTINIDE		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr									

Abb. 6-29 Kritikalität und Verwendung von Elementen

Quelle: (Wuppertal Institut 2014)

6.8.2 Seltene Erden

Seltene Erden werden im Rahmen der Elektromobilität insbesondere für Permanentmagneten in Elektromotoren benötigt. Zur Gruppe der Seltenen Erden werden die Lanthanoide Lanthan (La), Cer (Ce), Praseodym (Pr), Neodym (Nd), Promethium (Pm), Samarium (Sm), Europium (Eu), Gadolinium (Gd), Terbium (Tb), Dysprosium (Dy), Holmium (Ho), Erbium (Er), Thulium (Tm), Ytterbium (Yb), Lutetium (Lu) sowie Yttrium (Y) und Scandium (Sc) gezählt. Anders als der Name vermuten lässt sind sie jedoch hinsichtlich ihres Massenanteils an der Erdkruste nicht wirklich selten, sondern vor allem nicht oder kaum lagerstättenbildend. Dementsprechend kommen sie meist in geringen Konzentrationen vor und werden überwiegend als Nebenprodukt gewonnen. Im Rahmen dieser Studie sind insbesondere die Seltenerd-elemente *Pr*, *Nd*, *Tb* und *Dy* relevant. *Pr*, *Nd*, *Tb* und *Dy* werden in Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagneten für Elektromotoren verwendet. Diese sogenannten Seltenerd-magneten haben den Vorteil einer hohen magnetischen Energiedichte, so dass geringere Motorgewichte erreicht werden und somit der Energieverbrauch der Fahrzeuge aufgrund geringerer zu beschleunigender Massen verringert werden kann. Mengenmäßig dominieren Neodym und das chemisch wie physikalisch sehr ähnliche Praseodym. In geringeren Mengen werden auch Zusätze von Dysprosium und Terbium eingesetzt, um die Curietemperatur²⁹ dieser Magnete zu erhöhen. Diese ist andernfalls so niedrig, dass sie bereits im Normalbetrieb erreicht werden kann und so zu einem vorübergehenden Verlust der magnetischen Eigenschaften der Permanentmagneten und damit der Funktionsfähigkeit des Motors insgesamt führt.

²⁹ Die materialspezifische Curietemperatur bezeichnet die Temperatur, bei deren Erreichen ferromagnetische bzw. ferroelektrische Eigenschaften einer Probe vollständig verschwunden sind. Oberhalb der Curietemperatur verschwindet die Magnetisierung. Materialien sind nur deutlich unterhalb der Curietemperatur als Magnetwerkstoff einsetzbar.

Die Gewinnung von Seltenen Erden steigt, mit einigen Schwankungen, kontinuierlich an (siehe Abb. 6-30). Dabei fällt insbesondere auf, dass China als Produzent zunehmend dominant geworden ist. Gab es in den 1990er Jahren noch relevante andere Produktionsländer, insbesondere die USA, so hatte China zwischenzeitlich praktisch eine Monopolstellung entwickelt. Erst in jüngster Zeit kann wieder eine steigende Förderung Seltener Erden außerhalb Chinas beobachtet werden. Es wird erwartet, dass diese Produktionskapazitäten zwischen 2010 und 2014 mit zwei bis vier neuen Minen deutlich erweitert werden (Okadene Hollins 2010, Wuppertal Institut 2014). Aus den gegenwärtig verfügbaren statistischen Informationen lässt sich noch nicht ableiten, ob diese Entwicklung stattgefunden hat.

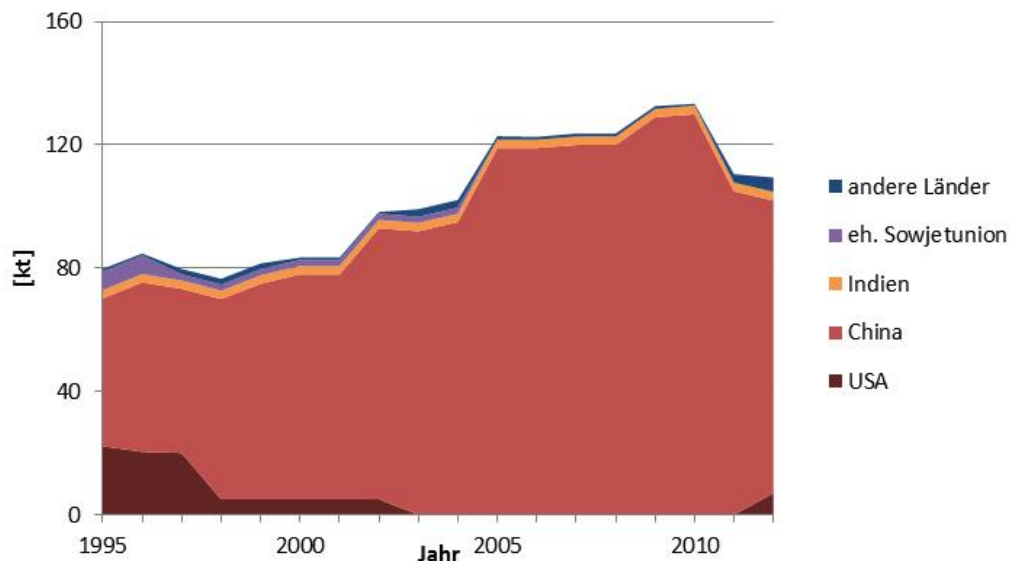


Abb. 6-30 Entwicklung der Produktion von Seltenen Erden nach Ländern

Datengrundlage: (U. S. Geological Survey 1996-2013a)

Die meisten Angaben in der einschlägigen Fachliteratur zu Seltenen Erden beziehen sich auf die Gruppe der Seltenen Erden insgesamt und betrachten nicht die Einzelelemente. Aufgrund der chemischen wie physikalischen Unterschiede zwischen den einzelnen Elementen und ihrer sehr unterschiedlichen Verfügbarkeit ist es jedoch notwendig, die Seltenen Erden differenzierter, d. h. auf der Ebene der einzelnen Elemente zu betrachten. Wichtig hierbei ist, dass es erhebliche Unterschiede im Vorkommen von zwei Gruppen Seltener Erden gibt, den sogenannten „leichten“ Seltenen Erden und den „schweren“ Seltenen Erden. Zu den leichten Seltenen Erden gehören Sc, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm und Eu, zu den schweren Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb und Lu.

Seltene Erden werden aus verschiedenen Mineralen gewonnen, die eine unterschiedliche chemische Zusammensetzung aufweisen (Tab. 6-21). Daher ist es nötig, die Lagerstätten hinsichtlich ihres spezifischen Mineralbestandes zu analysieren und zu bewerten. Verglichen mit anderen Rohstoffen sind nur wenige Angaben zu den Seltenerdelement-Lagerstätten verfügbar. Hinzu kommt, dass Seltene Erden vielfach als Nebenprodukt gewonnen werden und damit eine hohe Abhängigkeit von den Hauptprodukten besteht. Dementsprechend schwierig gestaltet sich eine Abschätzung der weltweit vorhandenen Vorkommen. Es zeigt sich jedoch, dass die Vorkommen Seltener Erden deutlich weiter verteilt sind, als es die derzeitige Verteilung der Förderung vermuten lässt. Neben China verfügen vor allem noch die Staaten der ehemaligen Sowjetunion und die USA über größere Reserven (siehe Abb. 6-31).

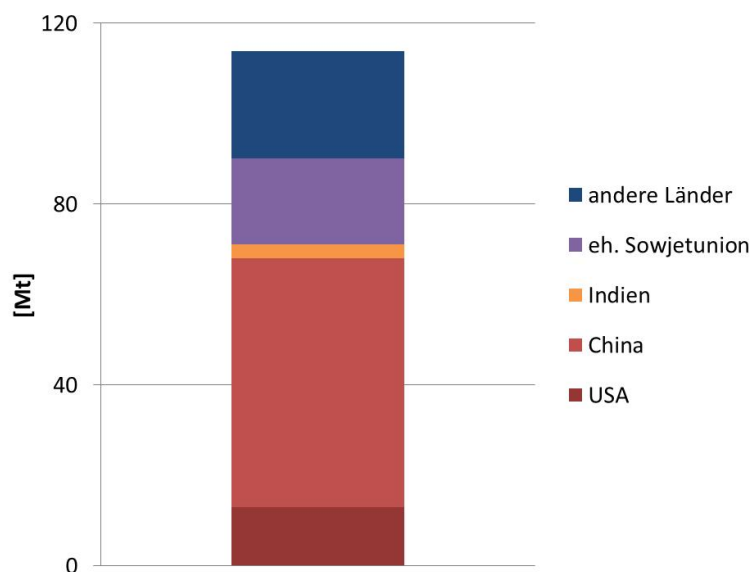


Abb. 6-31 Verteilung der Reserven an Seltenen Erden

Datengrundlage: (U. S. Geological Survey 2013)

Mineral	Monazite	Bastnäsite	Xenotime	Apatite	
	%	%	%	%	
La ₂ O ₃	23,7	33,2	0,5	25,1	leichte Seltene Erden
CeO ₂	45,6	49,1	5	45	
Pr ₆ O ₁₁	5	4,3	0,7	3,9	
Nd ₂ O ₃	17,2	12	2,2	14	
Sm ₂ O ₃	2,5	0,78	1,9	1,6	
Eu ₂ O ₃	0,05	0,11	0,2	0,5	
Gd ₂ O ₃	1,5	0,17	4	1,5	schwere Seltene Erden
Tb ₄ O ₇	0,04	0,016	1	0,1	
Dy ₂ O ₃	0,68	0,031	8,7	1	
Ho ₂ O ₃	0,05	50 ppm	2,1	0,1	
Er ₂ O ₃	0,21	35 ppm	5,4	0,15	
Tm ₂ O ₃	0,02	8 ppm	0,9	0,02	
Yb ₂ O ₃	0,12	13 ppm	6,2	0,08	
Lu ₂ O ₃	0,04	1 ppm	0,4	/	
Y ₂ O ₃	2,4	0,09	60,8	4,3	

SEO = Seltenerdoxide

Tab. 6-21 Gehalte an Seltenerdoxidien bei wichtigen Seltenerdmineralen

Quelle: (Neary & Highley 1984)

Hohe Gehalte schwerer Seltener Erden Elemente sind insbesondere im Mineral Xenotime enthalten, das jedoch wenig verbreitet und nur in wenigen Lagerstätten anzutreffen ist. Hingegen enthalten die häufigeren Minerale Monazite und insbesondere Bastnäsite kaum schwere Seltene Erden. Die Konsequenz daraus ist, dass die Vorräte schwerer Seltener Erden im Vergleich zu den leichten Seltenen Erden deutlich geringer sind. Dementsprechend

stark unterscheidet sich die globale Verteilung der Vorkommen der leichten und schweren Seltenen Erden.

Die derzeit weltweit wichtigste Lagerstätte für Seltene Erden ist die Lagerstätte von Bayan Obo in der Inneren Mongolei (British Geological Survey 2011). Die Lagerstätte enthielt ursprünglich 600 bis 800 Mt Erzvorräte mit einem Durchschnittsgehalt von 6 % Seltenen Erden Oxiden (SEO). Von den bisherigen Vorräten sind bereits 250 Mt mit einer geringen Ausbeute von lediglich 10 % abgebaut worden (Liedtke & Elsner 2009). Die Lagerstätte von Bayan Obo enthält Bastnäsit und damit ganz überwiegend leichte Seltene Erden. Der Neodymannteil an den Seltenen Erden von Bayan Obo wird mit 18,5 % angegeben, wohingegen der Dysprosiumanteil nur 0,1 % beträgt (Long et al. 2010). Ähnlich wie die Lagerstätte von Bayan Obo enthalten die Lagerstätten von Sichuan und Gansu Bastnäsit und damit vor allem leichte Seltene Erden. Die nördlichen Förderregionen in China mit den Lagerstätten von Bayan Obo, Sichuan und Gansu haben einen Anteil von ca. 70 % an der gesamten chinesischen Förderung von Seltenen Erden. Die restlichen 30 % werden in den südlichen Regionen in Guangdong, Hunan, Jinagxi, und Jiangsu gefördert. In den südlichen Regionen erfolgt die Gewinnung von Seltenen Erden aus Ionen-absorbierenden Tonen und lateritischen Erzen. Die lateritischen Erze haben sehr unterschiedliche Gehalte schwerer und leichter Seltener Erden (Long et al. 2010, Wuppertal Institut 2014).

Die Lagerstätte von Mountain Pass in den USA war bis in die neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts die weltweit wichtigste genutzte Lagerstätte für Seltene Erden, bevor sie im Jahr 2002 geschlossen wurde. Sie verfügt über Reserven von ca. 1,12 Mt SEO (British Geological Survey 2011) und enthält Bastnäsit und damit kaum schwere aber vor allem leichte Seltene Erden. In ihr wurden die Seltenen Erden als Hauptprodukt mit einer Ausbringung von 70 % gewonnen (Jackson & Christiansen 1993). Die Schließung der Mine erfolgte einerseits aufgrund fallender Preise für Seltene Erden, andererseits aber auch Umweltschutzgründe, da die Lagerstätte mit ca. 100 ppm einen relativ hohen Thoriumgehalt aufweist und die umweltgerechte Entsorgung der Reststoffe mit hohen Kosten verbunden war (Okadene Hollins 2010, Castor & Hedrick 2006). Die Mine ging ab 2010 wieder in Betrieb. Ihre Kapazität soll bis auf 40 kt SEO/a ausgebaut werden. Hierbei wird durch neue Prozesstechnologie eine Ausbringung von über 90 % angestrebt (Okadene Hollins 2010). Aufgrund der relativ großen Kapazität, sollen gezielt auch die nur in geringen Mengen enthaltenen schweren Seltenen Erden gewonnen werden (Molycorp 2012). Neben Mountain Pass gibt es noch weitere Lagerstätten für Seltene Erden in den USA, die jedoch derzeit für die SEO-Gewinnung nicht genutzt werden und deren Nutzung auch derzeit nicht geplant ist (Wuppertal Institut 2014).

In Australien gibt es ebenfalls mehrere Vorkommen an Seltenen Erden. Die Lagerstätte von Mount Weld enthält Monazit mit einem durchschnittlichen Gehalt an Seltenen Erden von 9,7 % und bezogen auf eine Bauwürdigkeitsgrenze³⁰ von 2,5 % Seltene Erden einem Vorrat von 1,19 Mt (Okadene Hollins 2010). Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Liedtke & Elsner 2009) geht von 11,9 % SEO und 917 kt SEO aus und liegt damit in einer ähnlichen Größenordnung. Der Abbau von Seltenen Erden begann in 2010, die Produktion von SEO-Konzentrat in 2011. Für den hier angewendeten Prozess wird eine Ausbeute von

³⁰ Die Bauwürdigkeitsgrenze beschreibt den mittleren Gehalt eines Minerals, der zur Gewinnung von mineralischen Rohstoffen einer Lagerstätte mit wirtschaftlichem Erfolg mindestens erforderlich ist.

ca. 68,7 % erwartet (Long et al. 2010). Die anderen australischen Vorkommen an Seltenen Erden werden derzeit nicht genutzt (Castor & Hedrick 2006).

Mit der Lagerstätte von Kvanefjeld verfügt Grönland über eines der größten, bisher ungenutzten, Vorkommen an Seltenen Erden. Bei der Mine handelt es sich um eine Uranlagerstätte mit relevanten Gehalten an Seltenen Erden, Zink, Zirkonium, Lithium, Beryllium und Natriumfluorid. Die Ressourcen liegen bei 457 Mt Erz mit einem Gehalt von 1,07 % SEO, entsprechend ca. 4,91 Mt SEO. Die Lagerstätte zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass sie auch relevante Anteile schwerer Seltener Erden enthält. Es wird ein Gehalt von ca. 0,25 Mt schwere Seltene Erden erwartet (GML 2012). Da die Lagerstätte eine Vielzahl von Rohstoffen enthält, wird davon ausgegangen, dass die Gewinnung von Seltenen Erden durch Koppelproduktion vergleichsweise preisgünstig erfolgen kann. Es war lange unklar, ob es zu einer Nutzung der Lagerstätte von Kvanefjeld kommen würde. Nach der Wahl am 12.03.2013 in Grönland scheint die Umsetzung des Projektes jedoch weiter vorangetrieben zu werden (Braune 2013, Süddeutsche Zeitung 2013).

Neben den zuvor beschriebenen Lagerstätten gibt es weiterer, meist kleinere oder auf absehbare Zeit nicht wirtschaftlicher Lagerstätten Seltener Erden. In einer Reihe von Fällen liegen auch keine oder kaum Informationen vor. Weitere Vorkommen gibt es z. B. in den Staaten der ehemaligen Sowjetunion, Indien, Malaysia oder Brasilien (U. S. Geological Survey 2013). Auch Europa verfügt mit den schwedischen Eisenerzlagerstätten von Kiruna und Gällivare über Vorkommen an leichten Seltenen Erden. Der SEO-Gehalt liegt hier bei 0,2 bis 0,7 %, das Potenzial bei 300 bis 1 400 t SEO/a (Liedtke & Elsner 2009).

Auf der Grundlage der vorhandenen und zuvor beschriebenen Informationen und Daten zu den Vorkommen Seltener Erden, ihrer Größe und der spezifischen Zusammensetzung der wichtigsten Lagerstätten (Long et al. 2010, GML 2012) wurde die Verteilung der Reserven einerseits für Neodym und Praseodym und andererseits für Dysprosium und Terbium berechnet (vgl. Wuppertal Institut 2014).

Für *Neodym und Praseodym* zeigt sich, dass China über die bei Weitem größten Reserven verfügt, es jedoch auch relevante Vorkommen in vielen anderen Ländern gibt (siehe Abb. 6-32).

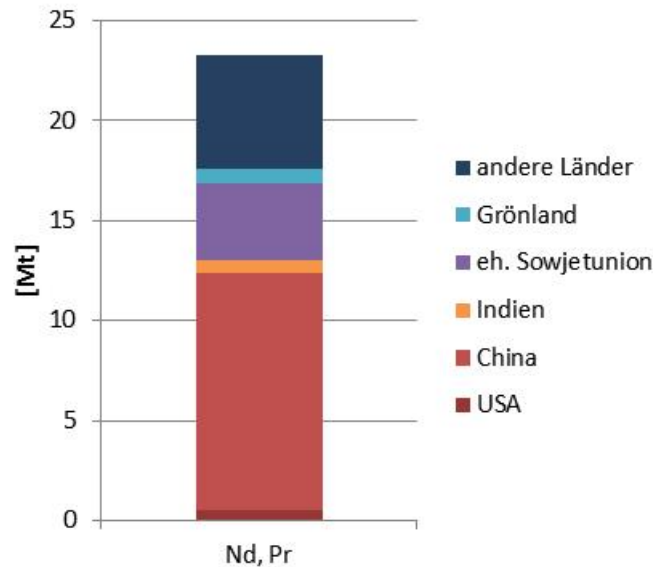


Abb. 6-32 Verteilung der Reserven von Neodym und Praseodym

Der Gesamtbedarf an Neodym und Praseodym für die Elektromobilität in Deutschland wurde mit max. ca. 18 kt ermittelt. Der weltweite Bedarf wurde mit max. ca. 493 kt berechnet. Dem stehen globale Reserven von ca. 23 Mt gegenüber. Es werden damit in Deutschland ca. 0,08 % der globalen Reserven von Nd/Pr für die betrachteten Elektromobilitätsszenarien und 2,1 % der globalen Reserven für den berechneten weltweiten Ausbau benötigt. Elektromobilität wird einen großen Teil der Gesamtnachfrage nach Neodym und Praseodym verursachen. In Anbetracht dieses Umstandes erscheint die Gesamtnachfrage nach Neodym und Praseodym bezogen auf die geologische Verfügbarkeit unkritisch.

Die Reserven für Dysprosium und Terbium sind deutlich anders verteilt als Neodym und Praseodym. Auch hier verfügt China über große Reserven, vergleichbar große Vorkommen, die jedoch bisher noch nicht zu den Reserven gezählt werden, sind jedoch auch in Grönland vorhanden (siehe Abb. 6-33). Hierbei muss berücksichtigt werden, dass sich die Vorkommen auf nur wenige Lagerstätten verteilen und gegenüber den Reserven von Neodym und Praseodym deutlich kleiner sind.

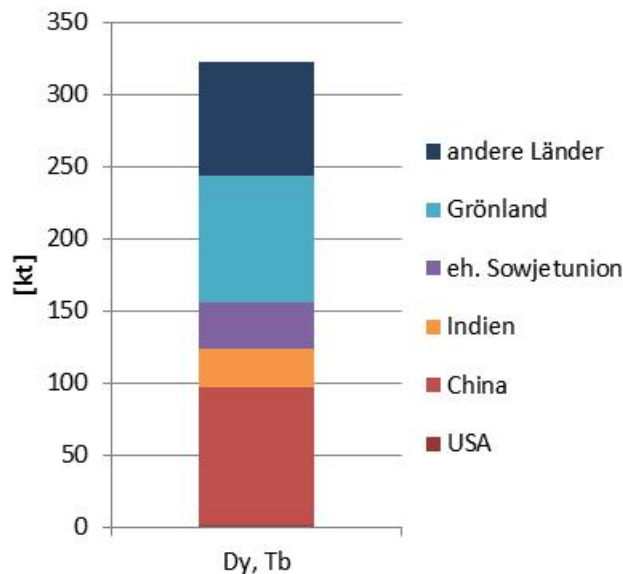


Abb. 6-33 Verteilung der Reserven von Dysprosium und Terbium

Der Gesamtbedarf an Dysprosium und Terbium für die betrachteten Elektromobilitätsszenarien in Deutschland wurde mit max. ca. 5 kt ermittelt, der weltweite Bedarf wurde mit max. ca. 142 kt berechnet. Dem stehen globale Reserven von ca. 320 kt gegenüber. Es werden damit ca. 1,6 % der globalen Reserven von Dysprosium und Terbium für die Elektromobilität in Deutschland und ca. 44 % für den betrachteten weltweiten Ausbau benötigt.

Damit erreicht die erwartete Nachfrage nach Dysprosium und Terbium aus der Elektromobilität sowohl für Deutschland als auch hinsichtlich des weltweiten Bedarfs ein kritisch hohes Maß, dessen Deckung nicht sicher erscheint.

Mögliche Entwicklung der Umweltbelastungen bei der Gewinnung von Seltenen Erden

Bei einer stark wachsender Nachfrage nach Rohstoffen besteht möglicherweise die Notwendigkeit, andere als die bisher genutzten Rohstoffquellen zu erschließen. Viele dieser anderen Rohstoffquellen weisen gegenüber den herkömmlichen Lagerstätten abweichende Eigenschaften hinsichtlich Mineralogie, Abraum, Metallgehalt und notwendiger Aufbereitungsverfahren auf. Auch für Seltene Erden können sich solche veränderten Abbaubedingungen ergeben. Aus diesem Grunde wird versucht, eine erste Abschätzung des möglichen Einflusses veränderter Rohstoffquellen Seltener Erden auf die Umweltbelastungen vorzunehmen.

Für die Seltenen Erden liegen kaum Prozessdaten zur Rohstoffgewinnung vor. Hinzu kommt, dass viele der Lagerstätten schlecht beschrieben sind und wesentliche Informationen, etwa zum Abraum, fehlen. Dennoch ist es möglich, erste Einschätzungen zu treffen, ob sich die Umweltbelastungen bei der Gewinnung von Seltenen Erden bei stark wachsender Nachfrage deutlich verändern würden.

Lagerstätte	Land	Größe t SEO	Gehalt % SEO	In Produktion
Bayan Obo	China	48 000 000	6	x
Araxa	Brasilien	8 100 000	1,8	
Mountain Pass	USA	1 800 000	8,9	x
Mount Weld	Australien	1 700 000	11,2	
Dubbo	Australien	700 000	0,86	
Mrima Hill	Kenia	300 000	5	
Nolan's Bore	Australien	150 000	4	
Xunwu and Longan	China	k. A.	0,05-0,2	x
Lovozero	Russland	k. A.	0,01	x
Maoniuping	China	k. A.	2	x
Weishan	China	k. A.	1,6	x
Aktyus	Kirgisistan	k. A.	0,25	x
Eneabba	Australien	k. A.	0,001	x

SEO = Seltenerdoxide

Tab. 6-22 Größe und Gehalte verschiedener Seltenerdlagerstätten

Quelle: (Castor & Hedrick 2006)

Tab. 6-22 zeigt erhebliche Unterschiede in der Konzentration Seltener Erden in den einzelnen Lagerstätten. Zugleich wird deutlich, dass bereits jetzt sehr unterschiedliche Lagerstätten genutzt werden, die zum Teil sehr niedrige Gehalte an Seltenen Erden aufweisen. Bei den derzeit den Weltmarkt dominierenden Lagerstätten, insbesondere Bayan Obo und Mountain Pass, handelt es sich jeweils um reiche und große Lagerstätten, die auch langfristig eine wichtige Rolle bei der Versorgung mit Seltenen Erden spielen werden. Es kann zwar nicht ausgeschlossen werden, dass noch andere Lagerstätten zukünftig genutzt werden. Absehbar ist dies aber allenfalls für die in dieser Auflistung nicht enthaltene Lagerstätte von Kvanefjeld in Grönland. Insofern werden sich die Abbaubedingungen und die durch die Lagerstätten selbst bedingten Umweltbelastungen bei der Gewinnung voraussichtlich auch bei steigender Nachfrage nicht wesentlich ändern. Dies zeigt auch Abb. 6-34, Sie stellt den Total Material Requirement (TMR) (Adriaanse et al. 1997) der Rohstoffförderung (ohne Aufwand für die Aufbereitung) den verfügbaren Vorkommen Seltener Erden gegenüber. Das breite Plateau bis ca. 50 Mt sind die derzeit genutzten chinesischen Seltenerdlagerstätten, die auch längerfristig hinreichend groß sind, um den Bedarf zu decken.

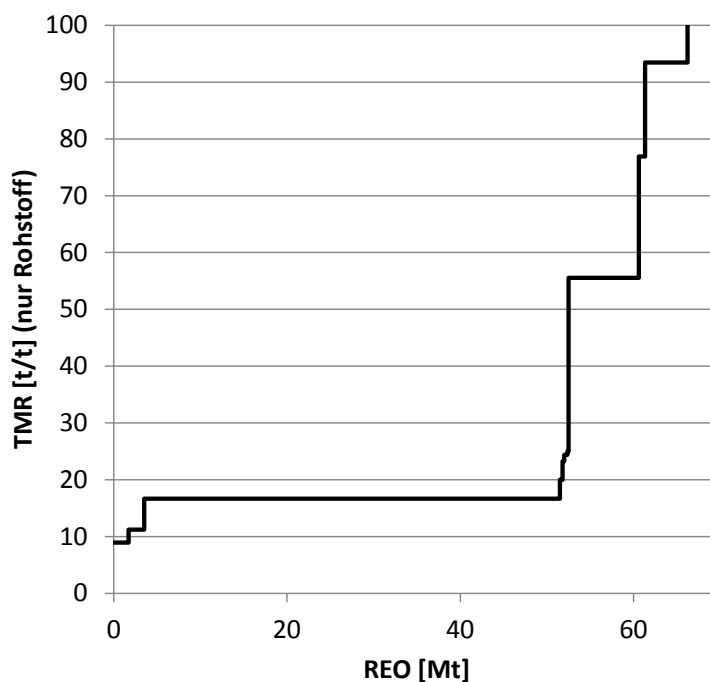


Abb. 6-34 Verfügbare Vorkommen an Seltenen Erden in Abhängigkeit vom TMR

Recycling

Das Recycling von Neodym und Dysprosium aus Schrotten ist sehr schwierig, da beide SEE sehr stabile Verbindungen mit zahlreichen weiteren Elementen eingehen. Zum Recycling von Seltenerdmaterialien wurden verschiedene Verfahren entwickelt. Sie werden jedoch bisher nicht kommerziell eingesetzt, da die Magnete aus recycelten Seltenen Erden schlechtere Eigenschaften als Magnete aus Primärmaterial aufweisen (British Geological Survey 2011, Okadene Hollins 2010). Sowohl hinsichtlich des Recyclings als auch bei der Herstellung besteht weiterer Forschungsbedarf, da bereits bei der Herstellung der sehr empfindlichen Magnete 20 – 30 % Bruch entstehen (Okadene Hollins 2010) und auch für diese Neuschrotte die genannten Einschränkungen beim Recycling gelten. Bisher liegen auch keine Studien zum Aufwand eines hochwertigen Recyclings von Seltenerdmaterialien im Vergleich zum Aufwand der Gewinnung von Primärmaterial vor.

Fazit

Bei den Seltenen Erden gibt es deutliche Unterschiede hinsichtlich der Verfügbarkeit. Für Neodym und Praseodym erscheint die Verfügbarkeit unkritisch, wohingegen für Dysprosium und Terbium die Nachfrage aus der Elektromobilität bezogen auf die betrachteten Szenarien eine kritische Größe erreicht. Recycling kann kurzfristig kaum zu einer Entspannung der Versorgungslage beitragen. Daneben zeigen sich erhebliche Unterschiede hinsichtlich des TMR der Gewinnung von Seltenen Erden in Abhängigkeit von den Lagerstätten. Kurz- und mittelfristig ist jedoch nicht zu erwarten, dass die hinsichtlich des TMR ungünstigeren Lagerstätten in bedeutendem Maße genutzt werden.

6.8.3 Lithium

Lithium ist aufgrund seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften (leichtestes Metall und höchstes Normalpotenzial) das am besten geeignete Element für Batterien. Auch nur ansatzweise gleichwertige Substitute existieren nicht. Daher ist Lithium ein wesentliches Element für Batterien in der Elektromobilität. Lithium kann aus unterschiedlichen Rohstoffquellen gewonnen werden. Ursprünglich wurde insbesondere Spodumen, ein Lithiumsilikat und andere verwandte Lithiumsilikaten als Li-Rohstoff verwendet. Spodumene werden auch heute noch oft als Lithiumrohstoff verwendet. Ihre Hauptverwendung finden Sie jedoch als Glas- und Keramikrohstoff, da sie dort in ihrer natürlichen Zusammensetzung eingesetzt werden können und nicht oder nur gering aufbereitet werden müssen. Im geringeren Maße werden sie jedoch auch für die Batterieproduktion eingesetzt. Neben den Pegmatiten können auch einige Tone für die Lithiumgewinnung genutzt werden. Infrage kommen hier vor allem Tone, die Hectorite, ein lithiumhaltiges Tonmineral, enthalten. Dominierend ist gegenwärtig jedoch die Gewinnung von Lithiumrohstoffen aus Salzlaugen. Ausgangsstoff für Li-Ionen-Sekundärbatterien ist Lithiumkarbonat (Li_2CO_3), das vergleichsweise einfach aus einigen natürlich vorkommenden Salzlaugen gewonnen werden kann.

Die Lithiumgewinnung ist, bedingt durch eine steigende Nachfrage für Li-Ionen-Sekundärbatterien, kontinuierlich gestiegen.

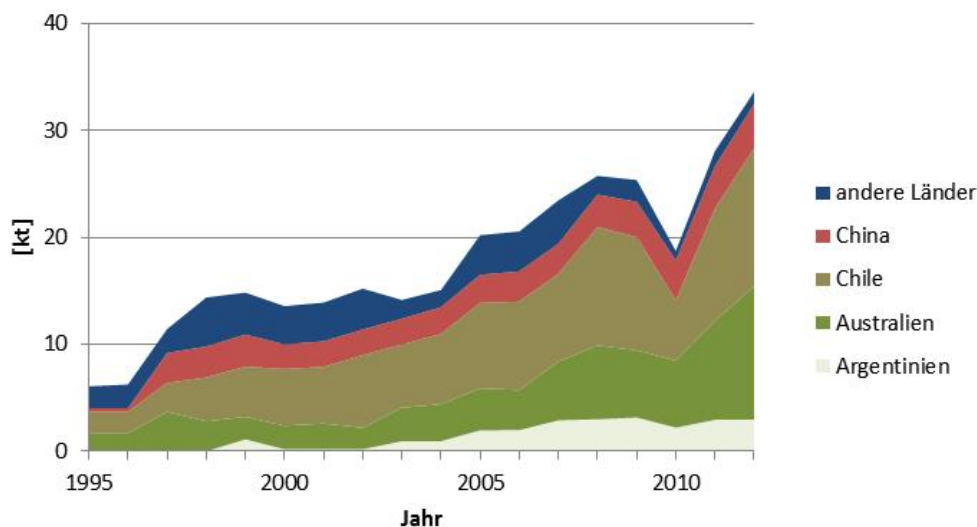


Abb. 6-35 Entwicklung der Produktion von Lithium

Datengrundlage: (U. S. Geological Survey, 1996-2013b)

Bedarf in Deutschland Referenz ca. 15 t für das Referenzszenario, 18,8 kt (Strom-Min), 81,8 kt (Strom-Mittel) bis 152,3 kt (Strom-Max) jeweils kumuliert bis 2050. Der globale Bedarf wird mit 1 037,9 kt – 4 128,1 kt berechnet. Der entlang der Szenarien berechnete Lithiumbedarf für Elektromobilität in Deutschland entspricht damit bei einer derzeitigen Jahresförderung von ca. 34 kt (siehe Abb. 6-35) ca. 0,55 (Strom-Min), 2,41 (Strom-Mittel) bzw. ca. 4,5 Jahresförderungen (Strom-Max) und weisen damit einen hohen Gesamtbedarf auf.

Die Reserven von Lithiumrohstoffen sind auf dieselben Länder verteilt, die heute zu den Hauptproduzenten gehören. Auch hier ist die Bedeutung von Südamerika mit den Reserven

von Chile und Argentinien hervorzuheben. Die globalen Lithiumreserven werden derzeit mit ca. 13 Mt angegeben (siehe Abb. 6-36). Der berechnete Bedarf allein von Deutschland entspricht damit max. 1,17 % der Lithiumreserven. Die berechnete globale Nachfrage der Elektromobilität von ca. 0,86 Mt bis ca. 4,95 Mt entspricht 8-38 % der Lithiumreserven und erreicht damit hohe Werte, wie sie aber auch von anderer Stelle für die globale Li-Nachfrage aus Batterien insgesamt bis 2050 mit einem Li-Bedarf von ca. 9,3 Mt angesetzt werden (Gaines & Nelson 2010).

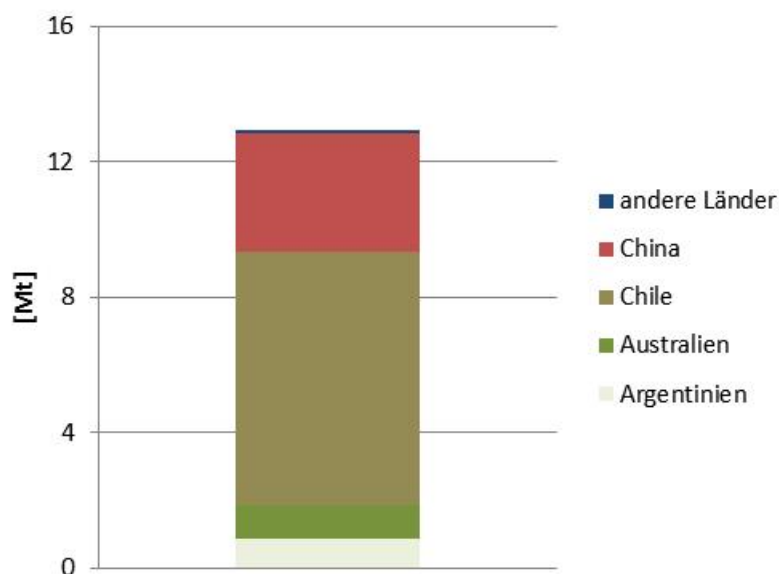


Abb. 6-36 Verteilung der Reserven an Lithium

Datengrundlage: (U. S. Geological Survey 2013)

Berücksichtigt man diese hohe Nachfrage, so erscheint eine Deckung des Bedarfs aus den gegenwärtigen Reserven grundsätzlich möglich, aber keineswegs gesichert, denn die berechnete Nachfrage in den verschiedenen Verkehrsszenarien in diesem Projekt, wie die prognostizierte Gesamtnachfrage einschließlich anderer Anwendungen, ist nur knapp aus den Reserven zu decken. Es ist jedoch bekannt, dass neben den Lithiumreserven noch weitere Rohstoffe, insbesondere weitere Pegmatitlagerstätten, für die Lithiumgewinnung zur Verfügung stehen, die derzeit noch nicht wirtschaftlich gewonnen werden können, jedoch die Nachfrage nach Lithium decken könnten.

Mögliche Entwicklung der Umweltbelastungen bei der Gewinnung von Lithium

Wie bei den Seltenerdelementen besteht auch bei Lithium bei stark wachsender Nachfrage nach Rohstoffen möglicherweise die Notwendigkeit, andere als die bisher genutzten Rohstoffquellen zu nutzen. Auch für Lithium bestand die Möglichkeit, Abschätzungen des Einflusses auf die Umweltbelastungen vorzunehmen. Für einige Aufbereitungsprozesse von Lithiumrohstoffen liegen Prozessdaten vor (siehe Tab. 6-23, Tab. 6-24 und Tab. 6-25). Auf dieser Basis werden überschlägig der TMR, das Treibhausgaspotenzial (THG) und die Kosten der Gewinnung von Lithiumkarbonat (Li_2CO_3) aus den unterschiedlichen Rohstoffen ermittelt.

Prozessschritt	Stoff/Chemikalie	Kosten
		\$/t Li ₂ CO ₃
Entfernung von Mg/SO ₄	Ca(OH) ₂	180 (pro Einheit Mg:Li)
pH Einstellung	HCl	20
Entfernung Restsulfat	CaCl ₂	240
Überführung zu Karbonat	Na ₂ CO ₃	760
Anlagen Amortisation		1 067
Summe		2 267 (bei Mg:Li = 1:1)
Variable Kosten		1 200 (bei Mg:Li = 1:1)

Tab. 6-23 Kosten der Gewinnung von Lithium aus Salzlaugen

Quelle: (Bryon Capital Markets 2010)

Prozessschritt	Stoff/Chemikalie	Kosten
		\$/t Li ₂ CO ₃
Erzabbau		< 1 200
Spodumen Konzentration		500
Kalzination		230
Zerkleinerung/Pulverisierung		100
Laugung	H ₂ SO ₄	585
Waschen	Wasser	0
Überführung zu Karbonat	Na ₂ CO ₃	505
Anlagen Amortisation		3 333
Summe		< 6 453
Variable Kosten		< 3 120

Tab. 6-24 Kosten der Gewinnung von Lithium aus Spodumen

Quelle: (Bryon Capital Markets 2010)

Prozessschritt	Stoff/Chemikalie	Kosten
		\$/t Li ₂ CO ₃
Tongewinnung		308
Vermahlung		100
Rösten		400
	Gips	1 170
Karbonatisierung		480
Anlagen Amortisation		1 000
Summe		3 262
Variable Kosten		2 262

Tab. 6-25 Kosten der Gewinnung von Lithium durch Auslaugung von Ton

Quelle: (Bryon Capital Markets 2010)

Die natürlich vorkommenden lithiumhaltigen Salzlagen unterscheiden sich sehr wesentlich hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Eignung für die Lithiumgewinnung. Der wichtigste Aufbereitungsschritt der Salzlauge besteht in der Aufkonzentration der Ausgangslaugen auf die höhere Konzentration des Zielelementes Lithium sowie die Abtrennung der Begleitstoffe. Problematisch ist hierbei, dass Lithium immer mit anderen Stoffen vergesellschaftet in den Salzlagen vorkommt. Wichtig hierbei sind insbesondere NaCl, KCl, Mg, Bo und Sulfat (Bryon Capital Markets 2010). Bor und Sulfat können bei der elektrolytischen Aufbereitung zu hochreichem Lithium zu Kurzschlüssen in der Elektrolysezelle und zu Produktionsunterbrechungen führen. Magnesium, das im Lithiumkarbonat enthalten ist, wird bei der Elektrolyse nicht abgetrennt und verunreinigt das Lithiummetall (Bryon Capital Markets 2010). Für eine wirtschaftliche Produktion muss das Verhältnis zwischen Magnesium und Lithium kleiner als 9:1 bis 10:1 sein. Die Ursache hierfür ist, dass das Magnesium mit Soda (Na_2CO_3) ausgefällt werden muss, was mit erheblichen Kosten, aber auch mit einer mit der Sodaherstellung einhergehenden Umweltbelastung.

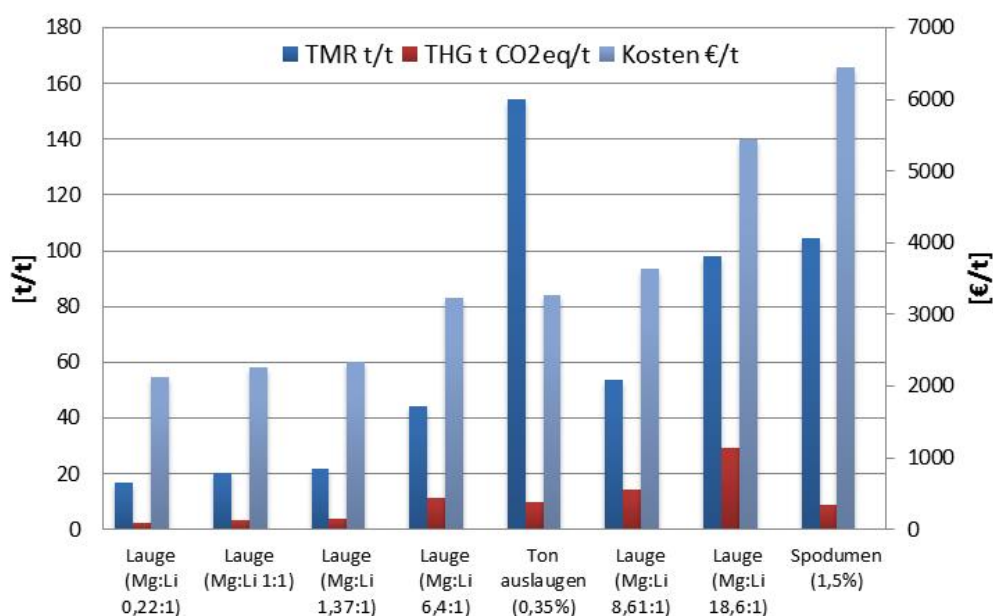


Abb. 6-37 TMR, THG und Kosten der Gewinnung und Aufbereitung von Lithiumrohstoffen (Wuppertal Institut 2014)

Eine überschlägige Berechnung von THG, TMR und Kosten der Lithiumgewinnung (Abb. 6-37) auf der Basis der in Tab. 6-23 bis Tab. 6-25 angegebenen stofflichen und energetischen Inputs sowie zugehöriger THG- und TMR-Werte, die Ecoinvent bzw. der Datenbasis des Wuppertal Instituts entnommen wurden, zeigt sehr deutliche Unterschiede zwischen den betrachteten Lagerstätten. Hierbei fällt auch auf, dass die Gewinnung aus einigen Laugen mit höheren THG-Emissionen verbunden ist als die Gewinnung aus Ton oder Spodumen. Hinsichtlich des TMR ist hingegen die Gewinnung aus Ton, aufgrund der sehr niedrigen Li-Gehalte, am ungünstigsten. Trotz der hohen Kosten und der Umweltbelastung bei der Gewinnung von Lithium aus Spodumen wird in Australien inzwischen Lithium für Batterien aus Spodumen gewonnen. Unberücksichtigt bleiben bei dieser Betrachtung Transporte sowie auch das Vorhandensein von geeigneten Transport- und Versorgungsinfrastrukturen. Hier haben insbesondere die bolivianischen Lagerstätten (Laugen mit Mg:Li 18,6:1) erhebliche Nachteile (Wuppertal Institut 2014).

Auf der Grundlage dieser Information und ergänzt um verfügbare Informationen zur Größe der einzelnen Lagerstätten ist es auch möglich abzuschätzen, welche Mengen Lithium zu welchen Kosten gefördert werden können. Hierzu werden in Abb. 6-38 TMR, THG und die Gewinnungskosten mit der jeweiligen Lagerstättengröße verknüpft.

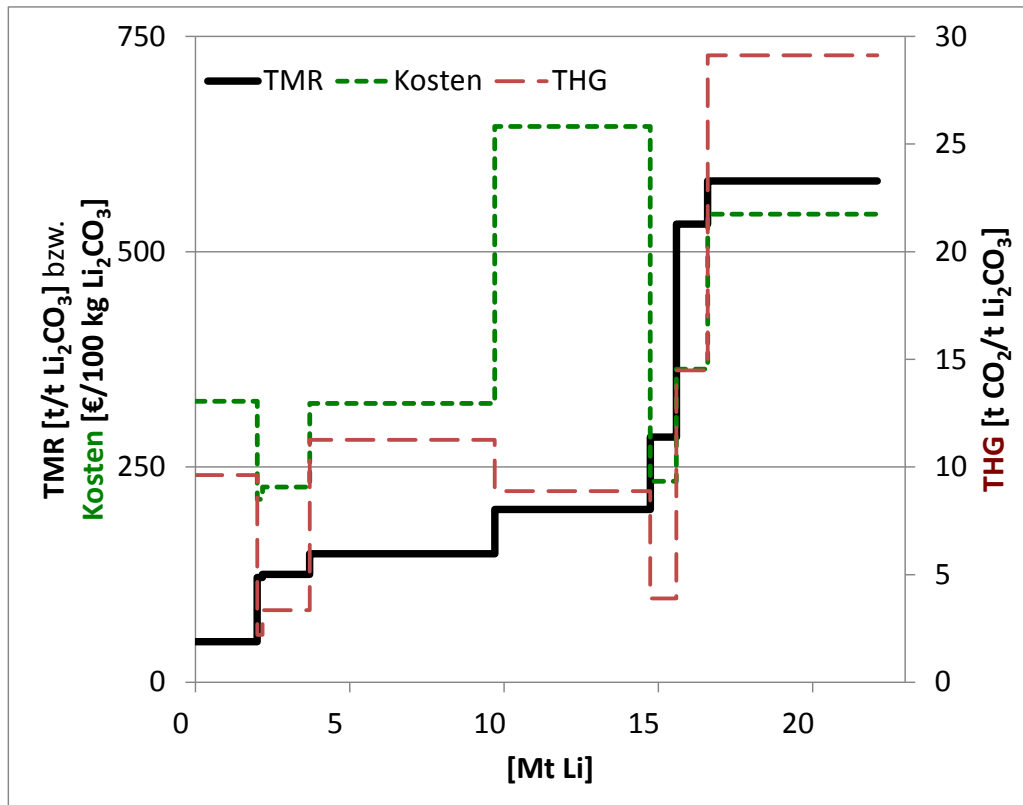


Abb. 6-38 Verfügbare Lithiumreserven und -ressourcen in Abhängigkeit von TMR, THG und Gewinnungskosten

Es ist deutlich sichtbar, dass bei hoher Nachfrage nach Lithium mit erhöhtem TMR, THG und gesteigerten Produktionskosten zu rechnen ist.

Recycling

Mit der zunehmenden Verwendung von Lithium in Batterien ist auch das Recycling von Lithium angestiegen, und es werden weitere Recyclingkapazitäten aufgebaut (U. S. Geological Survey 2013). Damit ist davon auszugehen, dass ein großer Teil des in Li-Ionen-Batterien eingesetzten Lithiums zukünftig zurückgewonnen wird und zu einer Verringerung der Nachfrage nach primär gewonnenem Lithium beitragen wird.

Fazit

Die Nachfrage nach Lithium aus der Elektromobilität erreicht eine kritische Größe, bei der unklar ist, ob sie gedeckt werden kann. Auf Dauer kann jedoch Recycling von Lithium zu einer deutlichen Verringerung des Bedarfs an primär gewonnenem Lithium beitragen. Auch hinsichtlich der Umweltbelastungen und der Gewinnungskosten zeigt sich, dass steigende Umweltbelastungen und Kosten erwartet werden müssen.

6.8.4 Silber

Silber wird innerhalb der Elektromobilität in der Elektronik eingesetzt. Der Silberanteil in der Erdkruste liegt zwischen 0,05 und 0,1 ppm (Ullmann 2007). Silber kommt als gediegenes Silber, gebunden in Silbererzen sowie als Nebenbestandteil anderer Erze vor. Der größte Teil des gewonnenen Silbers wird als Nebenprodukt bei der Aufbereitung anderer Erze gewonnen. Bei einer jährlichen Produktion von 26 kt Silber (s. Abb. 6-39) und Reserven von 521 kt Silber (ohne Russland³¹, s. Abb. 6-40) erreicht Silber nur eine statische Reichweite von ca. 21 Jahren. Hierbei kann jedoch beobachtet werden, dass die Reserven kontinuierlich steigen. Die Reservenmengen nach USGS enthalten auch die Silbermengen, die aus unedlen Metall-Lagerstätten gewonnen werden (U. S. Geological Survey 2014a).

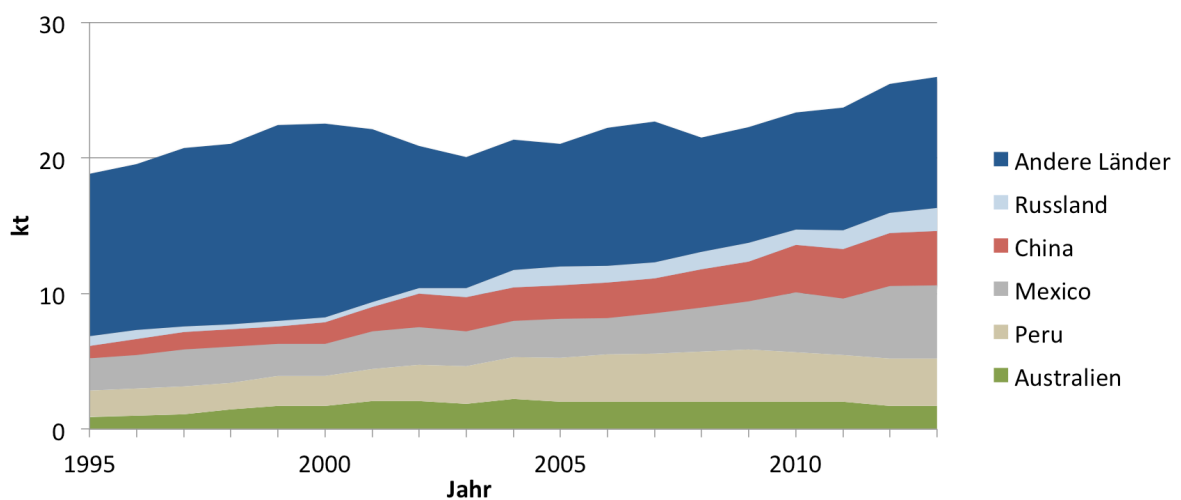


Abb. 6-39 Entwicklung der Produktion von Silber nach Ländern

Datengrundlage: (U. S. Geological Survey 1996-2014a)

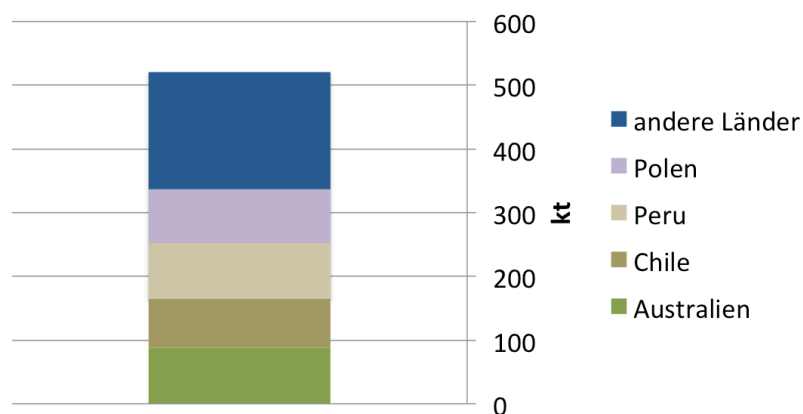


Abb. 6-40 Verteilung der Reserven von Silber

Datengrundlage: (U. S. Geological Survey 2014a)

³¹ Für Russland werden vom USGS keine Angaben zu den Silberreserven gemacht.

Im Rahmen dieser Studie wurde für die Elektromobilität in Deutschland im Zeitraum 2011-2050 ein Bedarf von ca. 2,6-4,5 kt Silber ermittelt. Dieser Bedarf entspricht ca. 10 % bis 17,3 % einer jährlichen Produktion und ca. 0,5 % bis 0,9 % der für 2014 angenommenen Reserven von Silber. Bezüglich des Weltbedarfs im Zeitraum 2011-2050 beträgt der Silberbedarf 119,3 kt bis 171,3 kt. Dies würde ca. 23 % beziehungsweise 33 % der Silberreserven entsprechen. Damit erreicht der Silberbedarf, insbesondere auch angesichts der konkurrierenden Nachfrage, eine kritische Größe. Weitere Sulfidlagerstätten, die Silber als Nebenprodukt führen, werden jedoch zunehmend ökonomisch erschließbar. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Silberreserven durch Nutzung dieser Vorkommen steigen werden.

Recycling

Neben der Primärproduktion wird Silber in beträchtlichen Mengen auch recycelt und dem Markt wieder zur Verfügung gestellt. Silberrecycling ist seit langem etabliert, da sich Silber auf einfache Weise wieder einschmelzen lässt. Die Ausbeute beim Recycling von Edelmetallen wird allgemein mit ca. 95 % als hoch eingeschätzt (Hagelüken et al. 2005). Im Jahr 2013 wurde insgesamt 5 437,4 t Silber wiedergewonnen. Der Anteil der Sekundärproduktion an der gesamten Silberproduktion betrug somit ca. 19 % (The Silver Institut et al. 2014) und reduziert damit den Bedarf an primär gewonnenem Silber. Verglichen mit anderen Metallen ist der Anteil an Sekundärmaterial jedoch relativ gering und kann die Kritikalität kaum verringern.

Substitution

Silber wird zu einem erheblichen Teil für Schmuck, Silberwaren sowie Münzen und Medaillen eingesetzt (zusammen ca. 38 % der Silberverwendung (ABN AMRO et al. 2012)). Für diese Bereiche sind auf den stofflichen Eigenschaften basierende Bedarfsprognosen kaum zu erstellen, wesentliche Änderungen der Nachfrage sind nicht zu erwarten. Im Anwendungsbereich der Elektrik/Elektronik (ca. 25 % der Verwendung ABN AMRO et al. 2012) wird Silber vor allem in Loten eingesetzt. Es lässt sich nur eine geringe Steigerung des Bedarfs feststellen. Hier kann Silber i. d. R. gut durch Kupfer substituiert werden. Der Bedarf an Silber in der Fotografie geht mit sinkender Nachfrage nach Filmen und Fotopapieren stetig zurück. Zudem kann Silber aus Fotochemikalien gut zurückgewonnen werden. In der Herstellung von Hartloten (ca. 5 % der Verwendung ABN AMRO et al. 2012) ist Silber nur schwer zu ersetzen (teilweise nur durch andere eher kritische Stoffe, wie z. B. Indium), jedoch ist auch kein wesentlich steigender Bedarf hinsichtlich der letzten 10 Jahre zu erkennen. In der Herstellung von Spiegeln wird Silber insbesondere durch Aluminium zunehmend substituiert.

Fazit

Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der relativ guten Substituierbarkeit von Silber in der Elektronik und damit auch in der für Elektromobilität eingesetzten Elektronik, die Verfügbarkeit von Silber nicht kritisch für die Elektromobilität sein wird.

6.8.5 Gold

In der Natur kommt Gold meist gediegen in Form von Einschlüssen in Sulfiderzen in sogenannten Primärlagerstätten sowie in Sekundärlagerstätten, den Seifenlagerstätten, vor. Durch die Gewinnung von Gold als Nebenprodukt bei der Nickel- oder Kupferraffination werden manche Erzlagerstätten erst wirtschaftlich. Alle Silberlagerstätten enthalten immer ein wenig Gold, sowie umgekehrt Goldlagerstätten stets Silber enthalten (Ullmann 2007). Gold wird aufgrund seiner Eigenschaften in einer Vielzahl von Produkten eingesetzt. Von größter Bedeutung sind die Schmuckindustrie, Fonds sowie die Elektronik. In der Elektronik findet Gold Anwendung aufgrund seiner Korrosionsbeständigkeit, Kontaktgabe und guter Verarbeitbarkeit.

Die weltweite Primärproduktion von Gold betrug im Jahr 2013 ca. 2,8 kt (siehe Abb. 6-41). Die wichtigsten Produzenten sind Russland, China, die Vereinigten Staaten von Amerika sowie Australien, wobei die Förderung insgesamt weit verteilt ist. Die Reserven werden vom U. S. Geological Survey (USGS) mit 54 kt angegeben (siehe Abb. 6-42).

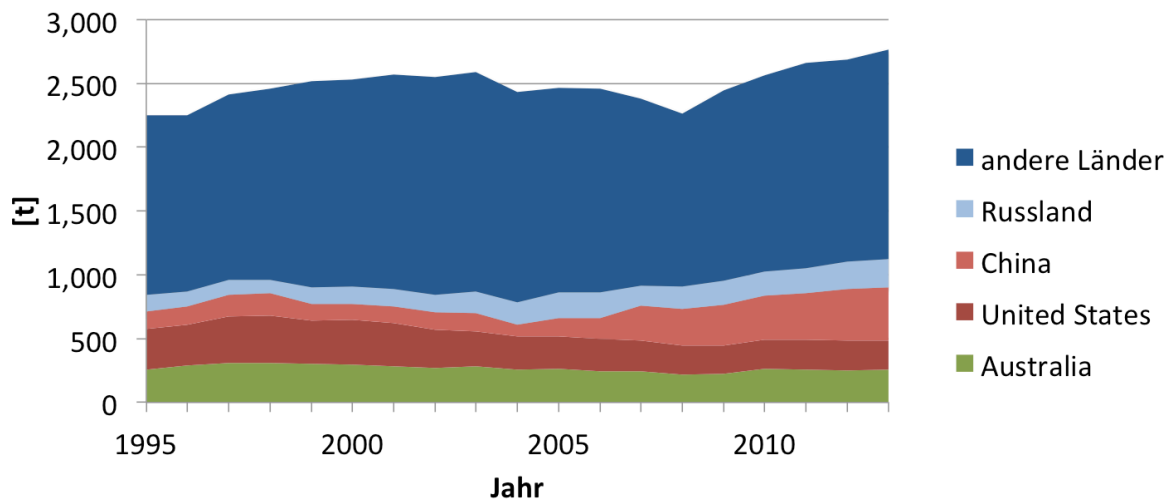


Abb. 6-41 Entwicklung der Produktion von Gold nach Ländern

Datengrundlage: (U. S. Geological Survey 1997-2014b)

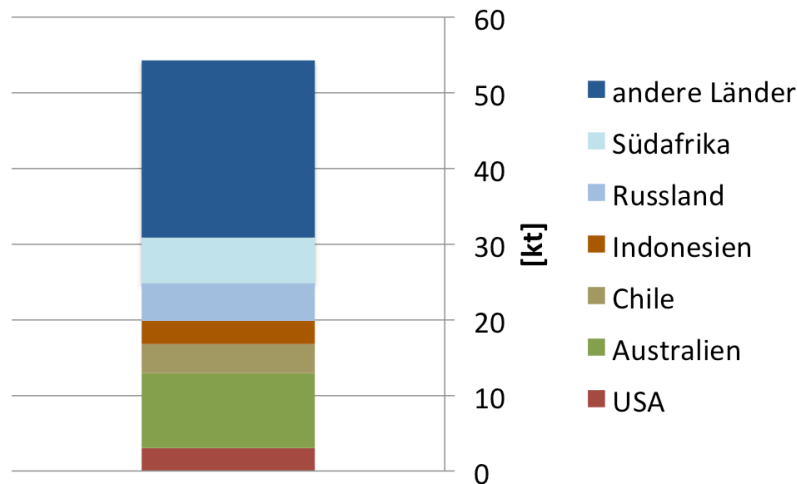


Abb. 6-42 Verteilung der Reserven von Gold nach Ländern

Datengrundlage: (U. S. Geological Survey 1997-2014b)

Die berechnete Nachfrage nach Gold liegt im Szenario für Deutschland für den Zeitraum 2011 bis 2050 zwischen 199 und 322 t. Das entspricht ca. 7 bis 11,6 % einer globalen Jahresproduktion bzw. 0,4 bis 0,6 % der weltweiten Gold-Reserven. Der weltweite Bedarf wurde für die betrachteten Szenarien mit ca. 8,3 bis 12,5 kt berechnet. Dies würde 15,4 % bis 23,1 % der globalen Gold-Reserven entsprechen. Der Goldbedarf erscheint somit kritisch hoch.

Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass Gold gut zu recyceln ist und Recyclingkreisläufe bereits etabliert sind. Hier gibt es jedoch erhebliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Anwendungsbereichen. Im Bereich der Elektronik kommt es im Rahmen des Recyclings zu erheblichen Goldverlusten, wohingegen etwa Schmuck ohne größeren Verlust recycelt werden kann. Unter Einberechnung dessen betragen die jährlichen Recyclingraten 36 bis 50 % der jährlichen Produktion (nach Daten von Fortis Bank 2009).

Generell können Palladium, Platin und Silber Substitute für Gold bilden, die jedoch ebenfalls mögliche kritische Stoffe sind.

Fazit

Die berechneten Goldmengen erreichen eine relativ kritische Größenordnung. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass Gold in der Elektronik gut zu substituieren ist und ebenfalls gut recycelt werden kann.

6.8.6 Palladium und Platin

Palladium und Platin werden einerseits im Abgassystem herkömmlicher Kfz in Abgaskatalysatoren und λ -Sonden, andererseits auch in Brennstoffzellen eingesetzt. Palladium und Platin, sind häufig vergesellschaftet und werden aufgrund ähnlicher Eigenschaften und gegenseitiger Substituierbarkeit meist in der Literatur gemeinsam betrachtet. Sie kommen gediegen und gebunden in Sulfidieren vor und werden meist als Nebenprodukt bei der Kupfer- und Nickelproduktion gewonnen. Die Primärproduktion von Palladium betrug 2013 ca. 211 t,

die Reserven an Palladium umfassten im Jahr 2013 30 kt (siehe Abb. 6-43 und Abb. 6-44) und sind geografisch auf Südafrika konzentriert.

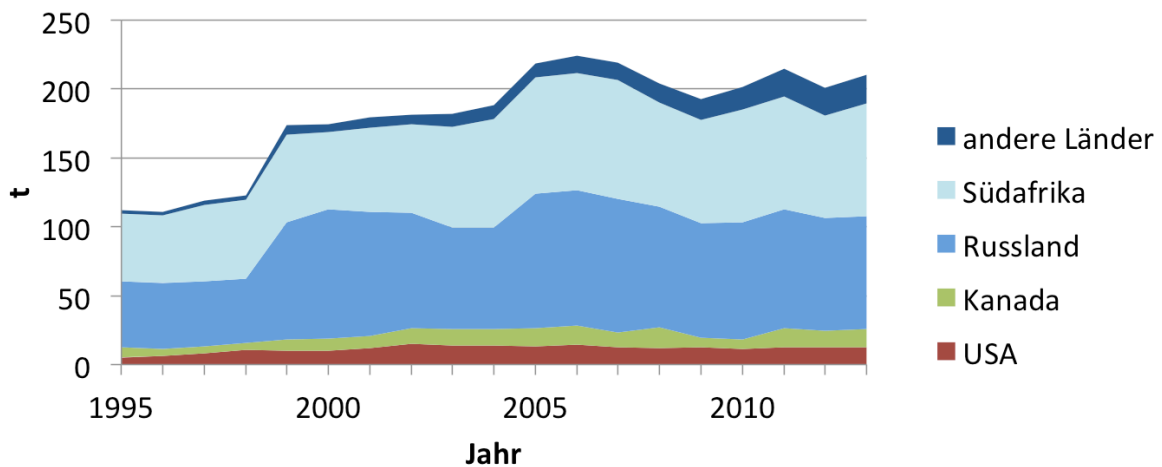


Abb. 6-43 Entwicklung der Produktion von Palladium

Datengrundlage: (U. S. Geological Survey 1996-2014b)

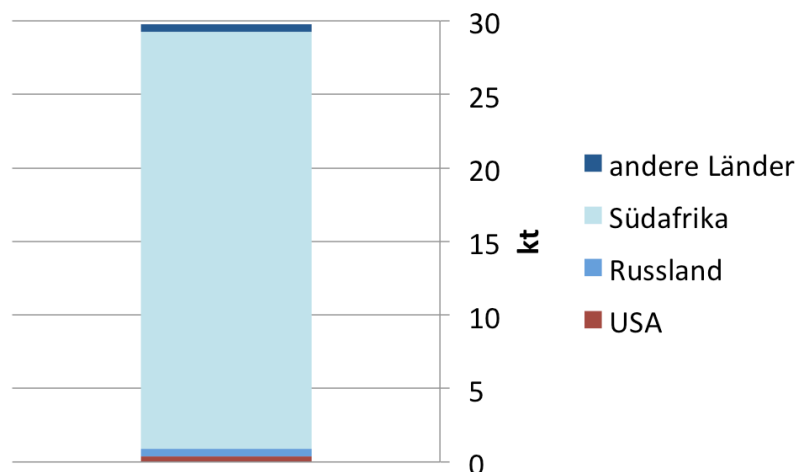


Abb. 6-44 Verteilung der Reserven von Palladium

Datengrundlage: (U. S. Geological Survey 2014b)

In dieser Studie wurde für die Elektromobilität in Deutschland im Zeitraum 2011-2050 ein minimaler Bedarf an Palladium von 22 t (Strom Max) bis 28 t (Referenz) ermittelt. Dem steht eine globale Jahresproduktion von 211 t Palladium gegenüber (siehe Abb. 6-43). Der angenommene Bedarf an Palladium entspricht somit ca. 13 % einer gegenwärtigen jährlichen Palladiumförderung oder ca. 0,1 % der globalen Reserven. Der ermittelte globale Bedarf aus den Szenarien liegt bei 823 t (LoStockHiEV) bis 1 073 t (HiStockLoEV) und entspricht damit ca. 4-5 Jahresproduktionen oder 2,7 bis 3,5 % der globalen Reserven.

Da der Hauptanwendungsbereich von Palladium in der Herstellung von Autokatalysatoren liegt, kommt es bei einem steigenden Anteil der Elektromobilität zu einem sinkenden Palladiumbedarf.

Die gegenwärtige Primärproduktion von Platin beträgt ca. 192 t (Abb. 6-45), die Reserven werden mit knapp 270 kt angegeben (Abb. 6-46).

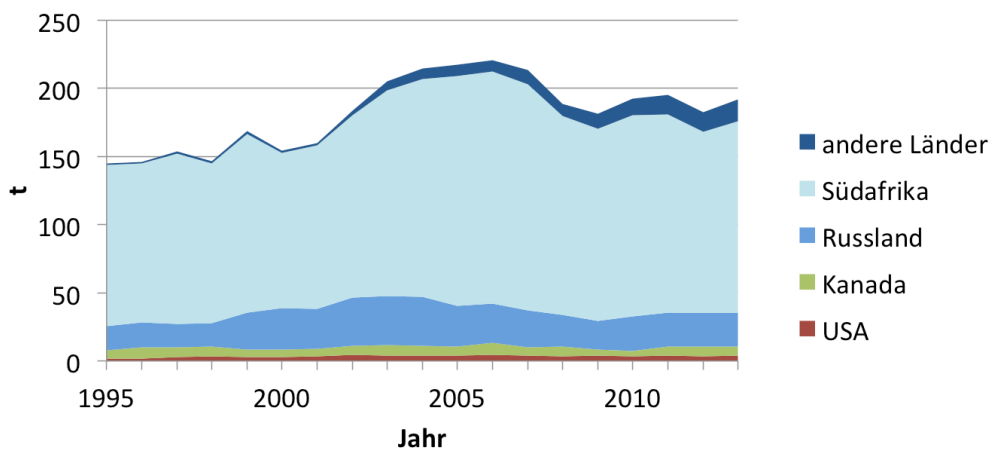


Abb. 6-45 Entwicklung der Produktion von Platin nach Ländern

Datengrundlage: (U. S. Geological Survey 1996-2014b)

Der Bedarf an Platin beträgt für den Pkw-Verkehr in Deutschland 90 t (Strom-Max) bis 116 t (Referenz). Dies entspricht 47-60 % einer jährlichen Platinproduktion bzw. 0,03-0,04 % der Reserven. Es ergibt sich ein globaler Platinbedarf in den betrachteten Szenarien von ca. 2,7 kt (LoStockHiEV) bis ca. 3,9 kt (HiStockLoEV), entsprechend ca. 14-20 Jahresproduktionen oder 1-1,4 % der globalen Reserven.

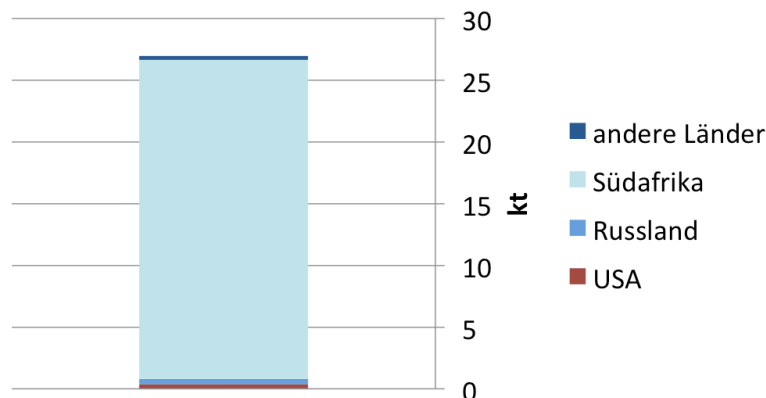


Abb. 6-46 Verteilung der Reserven von Platin

Datengrundlage: (USGS 2014)

Fazit

Der Platin- und Palladiumbedarf in den Szenarien ist insgesamt hoch, hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass durch Elektromobilität der Palladium- und Platinbedarf sinkt und Platin und Palladium daher keine kritischen Elemente für die betrachtete Elektromobilität darstellen. Im Gegenteil, für Platin und Palladium sorgen die betrachteten Szenarien für eine Verringerung der Nachfrage und Kritikalität.

6.8.7 Gallium

Gallium wird insbesondere in unterschiedlichen Halbleitern eingesetzt. Innerhalb der Elektromobilität kommt es daher insbesondere in der Fahrzeugelektronik vor. Die derzeit einzige ökonomisch verfügbare Rohstoffquelle für Gallium sind die Laugen des Bayer-Verfahrens zur Aluminiumoxidherstellung, in denen in Abhängigkeit vom Mineralbestand des eingesetzten Bauxits und der Prozessbedingungen bei der Gewinnung unterschiedliche Galliumkonzentrationen auftreten. Die Verfügbarkeit von Gallium hängt daher unmittelbar von der Aluminiumoxid- und der Aluminiumproduktion ab (Ritthoff 2011). Die Produktion von primärem Gallium hat in den letzten Jahren erheblich zugenommen. Wurde sie für das Jahr 2000 noch auf ca. 100 t geschätzt, so stieg sie bis zum Jahr 2013 bereits auf 280 t an (U. S. Geological Survey 2001, U. S. Geological Survey 2014c). Diese Steigerung ist vor allem eine Folge des Produktionsausbaus in China wohingegen die anderen Produktionsländer ihre Produktion eher verringert haben. Zu den relevanten Produktionsländern gehören neben China, Deutschland, die Ukraine und Japan. Die Produktionskapazität der meisten Länder wird nicht ausgenutzt (Jaskula 2010). Angaben zu den Reserven von Gallium werden vom USGS nicht gemacht. Rechnet man den Galliumgehalt der Bauxitreserven hoch, so ergibt sich ein gesamter Galliuminhalt von ca. 1,4 Mt und ein jährlich geförderter Galliuminhalt von ca. 13 kt. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass derzeit technologisch bedingte Verluste von ca. 65 % auftreten und damit nicht die gesamte Fördermenge genutzt werden kann (Wuppertal Institut 2014).

In den Szenarien für Deutschland wurde für den Zeitraum 2011 - 2050 ein Galliumbedarf von 552 kg bis 2 982 kg berechnet. Dies entspricht 0,115% bis 0,6 % einer derzeitigen Jahresproduktion bzw. 0,00004 % bis 0,0002 % der weltweiten Reserven. Der Galliumbedarf ist damit niedrig und unkritisch. Für die globalen Szenarien wurde ein Bedarf von ca. 40 bis ca. 134 t Gallium ermittelt, was 8 % bzw. 47,86 % einer Jahresproduktion bzw. 0,003 % bis 0,001 % der weltweiten Reserven entspricht. Die Nachfrage nach Gallium aus der Elektromobilität erscheint daher insgesamt unkritisch.

6.8.8 Indium

Indium wird wie Gallium in Fahrzeugen vor allem in Halbleitern eingesetzt und ausschließlich als Nebenprodukt gewonnen. Die wichtigsten Rohstoffe der Indiumgewinnung sind Nebenprodukte der Zinkgewinnung (Noel 1989, Niederschlag & Stelter 2008) sowie untergeordnet Nebenprodukte der Blei- und Zinnengewinnung (nach Classen et al. 2009, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2008, Pohl 2005). Die weltweite Primärproduktion von Indium steigt seit einigen Jahren stark an und betrug im Jahr 2013 670 t (siehe Abb. 6-47); heute ist der wichtigste Produzent China mit knapp 60 % der globalen Produktion. Weitere wichtige Produzenten sind Japan, Kanada und Südkorea. Die Reserven von Indium werden vom USGS nicht angegeben (Tolcin 2014).

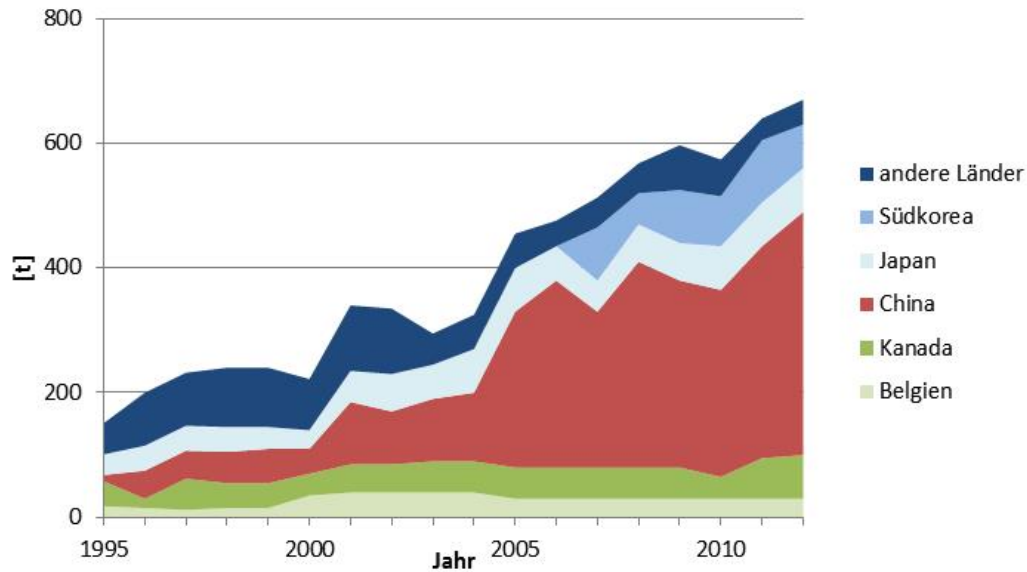


Abb. 6-47 Entwicklung der Produktion von Indium

Datengrundlage: (U. S. Geological Survey 1996-2013c)

Die berechnete Nachfrage nach Indium in Deutschland für Elektromobilität bis zum Jahr 2050 liegt zwischen 0 und 3 234 t. Das entspricht max. 0,5 % der globalen Jahresproduktion. Die globale Nachfrage nach Indium für Elektromobilität wurde mit ca. 35 bis 134 t berechnet, entsprechend 5 bis 20 % einer Jahresproduktion. Damit ist die Nachfrage nach Indium aus der Elektromobilität insgesamt gering und insgesamt unkritisch.

6.8.9 Germanium

Germanium wird ebenfalls in Halbleitern eingesetzt und wird in Fahrzeugen vor allem in der Elektronik benötigt. Germanium kommt insbesondere als Spurenelement in vielen verbreiteten Mineralen vor. Daher wird Germanium hauptsächlich als Nebenprodukt bei der Zinkproduktion, aber auch bei der Kupfer-, und Bleiproduktion gewonnen. Zusätzlich wird Germanium mit dem organischen Anteil der Kohle, genannt Vitrain, assoziiert, aber ist dort auch nur als Spurenelement vorzufinden. Nach dem Verbrennungsprozess ist Germanium dann höher konzentriert in den Kohleaschen vorzufinden. Die weltweite Germaniumproduktion im Jahr 2013 belief sich auf 150 t (Abb. 6-48). Germanium wird hauptsächlich in Russland, China und den USA produziert, wobei China mit 71 % der Hauptproduzent von Germanium ist. Angaben zu den Germaniumreserven sind nicht verfügbar.

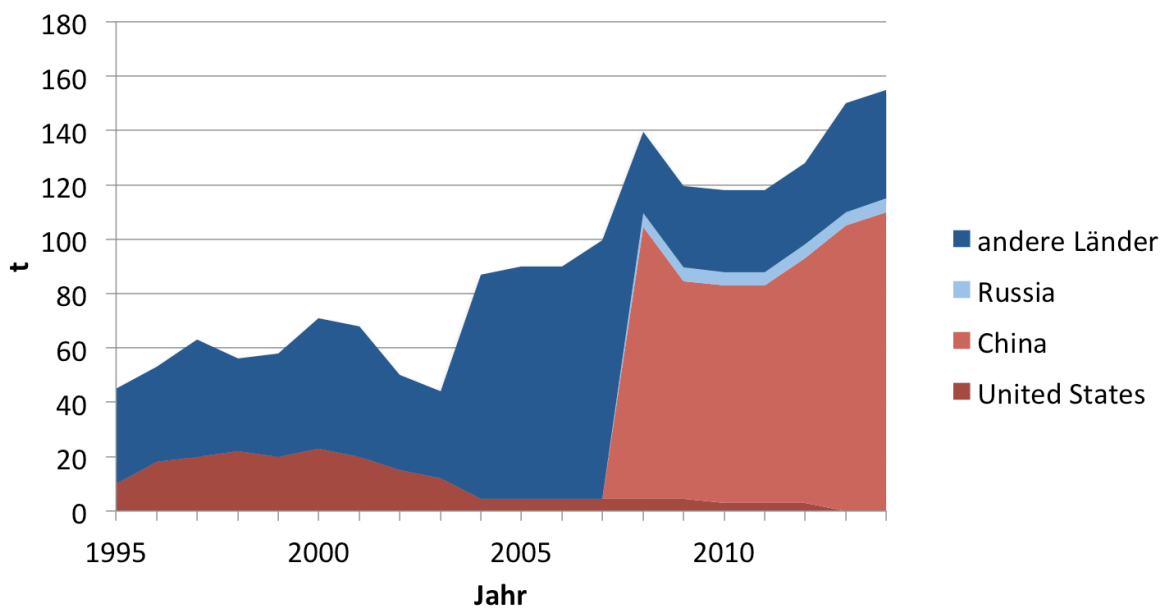


Abb. 6-48 Entwicklung der Produktion von Germanium nach Ländern

Datengrundlage: (U. S. Geological Survey 1996-2014a)

Der Germaniumbedarf für Deutschland im Zeitraum 2011 bis 2050 für Elektromobilität wurde mit 0 bis 2 958 kg berechnet. Dies entspricht somit max. 2 % der weltweiten Produktion im Jahr 2013 und erscheint somit sehr gering. Der weltweite Bedarf für den gleichen Zeitraum wurde auf ca. 35 bis 134 t berechnet. Dies würde ca. 23 beziehungsweise 89 % einer jetzigen jährlichen Germaniumproduktion entsprechen. Hierbei handelt es sich ebenfalls um einen niedrigen und unkritischen Wert.

6.8.10 Tantal

Tantal kommt nur in Form von Verbindungen in verschiedenen Mineralen vor. Da es sich aufgrund ähnlicher Eigenschaften gern mit Niob vergesellschaftet, enthalten Tantalminerale (Tantalit-Reihe) immer auch Niob und andersherum (z. B. Columbit-Reihe). Mischkristalle dieser Mineral-Reihen sind auch unter dem Namen Coltan bekannt. Tantal wird vorwiegend für leistungsfähige Kondensatoren benötigt. Aufgrund seiner Beständigkeit findet Tantal weiterhin

Anwendung in der Medizin und der chemischen Industrie sowie für Superlegierung für Turbinen und Flugzeugtriebwerke (Ullmann 2007).

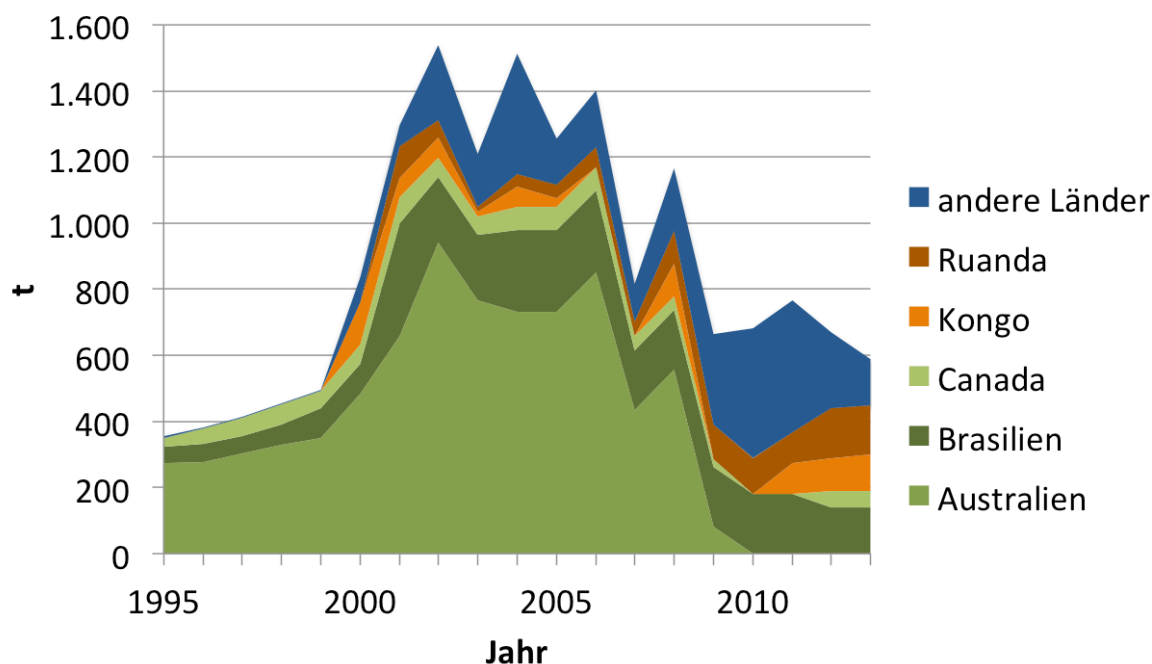


Abb. 6-49 Entwicklung der Produktionsmengen von Tantal nach Ländern

Datengrundlage: (U. S. Geological Survey 1996-2014c)

Wie in Abb. 6-49 zu sehen, sind die jährlichen Produktionszahlen stark schwankend und beliefen sich im Jahr 2013 auf 590 t. Die Hauptproduzenten waren bis zum Jahr 2008 Australien und Brasilien. Seitdem gewinnen afrikanische Länder wie Ruanda oder der Kongo immer mehr an Bedeutung in der Tantal-Produktion, während Australien seit 2010 keine relevanten Mengen an Tantal mehr produziert. Die Tantal-Reserven wurde vom U. S. Geological Survey mit >100 kt angegeben (siehe Abb. 6-50). Dieser Wert berücksichtigt jedoch nur die Tantal-Reserven von Australien und Brasilien, nicht aber die Reserven des afrikanischen Kontinents (nach Daten des U. S. Geological Survey 1996-2014).

In den Szenarien wurde für Deutschland ein Bedarf an Tantal für den Zeitraum 2011 bis 2050 von ca. 530 bis ca. 798 t berechnet. Dies würde 90 % bis 135 % der aktuellen Jahresproduktion oder 0,053 % bis 0,08 % der globalen Reserven entsprechen. Für die globalen Szenarien wurde ein Bedarf an Tantal von ca. 22 bzw. 31 kt ermittelt. Dies würde max. 22 % bzw. max. 31 % der globalen Reserven entsprechen und erreicht eine ausgesprochen kritische Größe. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass der Bedarf an Tantal aus Kondensatoren der Elektronikkomponenten herrührt und dort durch andere Kondensatoren substituiert werden kann.

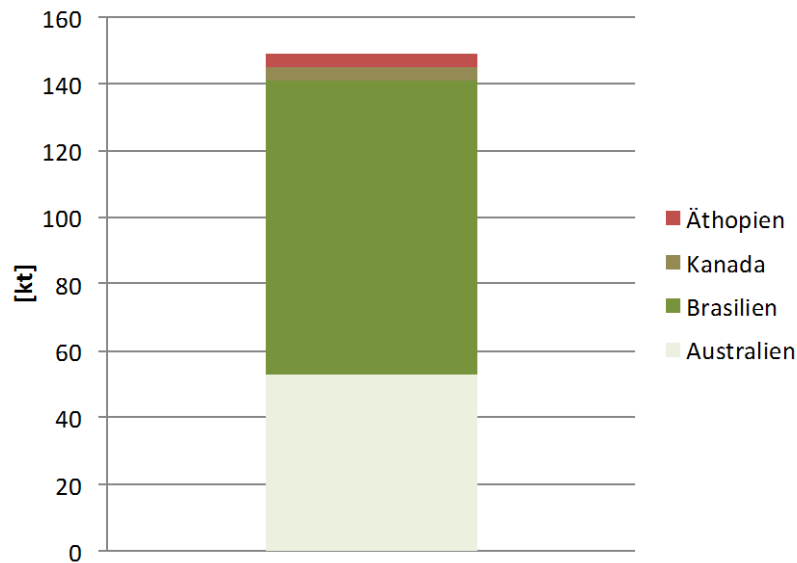


Abb. 6-50 Verteilung der Reserven von Tantal

Datengrundlage: (U. S. Geological Survey 2014d)

6.8.11 Zusammenfassung des Optimierungsbedarfs

Bei der Betrachtung der Kritikalität der untersuchten Elektromobilitätsszenarien und -technologien wurde eine Reihe von kritischen Stoffen identifiziert. Zu einem erheblichen Teil handelt es sich hierbei um Stoffe (insbesondere Silber, Gold, Gallium, Indium, Germanium und Tantal) für die Leistungselektronik und weitere elektronische Bauteile. Hierbei handelt es sich nicht um Stoffe und Anwendungen, die ausschließlich im Bereich der Elektromobilität genutzt werden. Dementsprechend müssen Optimierungsstrategien insgesamt auf den Bereich der Elektronik zielen. Hierbei wird es notwendig sein, einerseits den Einsatz dieser Stoffe insgesamt zu reduzieren und andererseits das Recycling zu verbessern.

Mit Platin und Palladium gibt es auch Elemente, bei denen der Bedarf durch Elektromobilität verringert wird, da sie überwiegend im Abgassystem herkömmlicher Pkw eingesetzt werden.

Daneben gibt es zwei Stoffe, die insbesondere für Elektromobilität kritisch sind. Hierbei handelt es sich einerseits um Lithium für die in der Elektromobilität benötigten Sekundärbatterien und andererseits um Dysprosium für Seltenerdpermanentmagnete in Elektromotoren.

Lithium ist aufgrund seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften (leichtestes Metall und höchstes Normalpotenzial) das am besten geeignete Element für Batterien. Optimierungsbedarf beim Lithium besteht daher einerseits bei der Weiterentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien, d. h. die weitere Erhöhung der Kapazität und Annäherung an die theoretischen Grenzen, andererseits aber insbesondere bei der Etablierung von Recyclingsystemen für Lithiumbatterien.

Dysprosium und Terbium werden derzeit benötigt, um hochleistungsfähige Permanentmagneten für Elektromotoren herzustellen. Hierbei ist ihr Einsatz bisher notwendig, um eine für den Betrieb hinreichend hohe Curietemperatur zu erreichen. Zwar besteht auch heute schon grundsätzlich die Möglichkeit Elektromotoren ohne derartige Magneten herzustellen, etwa durch den Einsatz von Elektromagneten in fremderregten elektrischen Maschinen, jedoch steigt damit das Gewicht bei gleicher Leistung der Elektromotoren an. Verbunden damit ist

ein erhöhter Energieverbrauch der Fahrzeuge. Hinzu kommt ein geringerer Wirkungsgrad, und ein, damit verbunden, ebenfalls höherer Energieverbrauch. Wesentliche Optimierungsmöglichkeiten bestehen einerseits in der Entwicklung anderer, vergleichbar leistungsfähiger Permanentmagneten ohne kritische Rohstoffe, andererseits in einer deutlichen Verbesserung des Recyclings von Seltenerdpermanentmagneten.

6.9 Alternativszenario zum optimierten Umgang mit kritischen Ressourcen

O. Soukup (WI), M. Ritthoff (WI), K. Bienge (WI)

Die vorangegangenen Analysen haben bereits verschiedene Schwerpunktbereiche der Ressourcennutzung des Pkw-Verkehrs aufgezeigt. Mit dem ressourcenoptimierten Szenario soll untersucht werden, ob sich durch den Einsatz alternativer Technologien und Stoffe der Ressourcenverbrauch, aber auch die Kritikalität der eingesetzten Rohstoffe verringern lassen. Es wird hierfür nachfolgend aufgeführt, welche Ansatzpunkte für ein ressourcenoptimiertes Szenario sich aus den gewonnenen Erkenntnissen ergeben.

Einige der Ansatzpunkte werden bottom-up in einer Sensitivitätsanalyse der Basisszenarien betrachtet. Dies ist notwendig, weil sie gegenüber den Basisszenarien den Einsatz anderer Technologien bzw. einen veränderten Technologiemarkt vorsehen und somit veränderte Vorketten des Materialbedarfs in der Modellrechnung zu berücksichtigen sind. Dies gilt für die folgenden Aspekte:

- Reduktion der Nutzung von Permanentmagneten,
- Verstärkter Einsatz erneuerbarer Primärenergie für die Fahrzeugnutzung.

Die Auswirkungen weiterer Ansatzpunkte werden überschlägig ermittelt, weil sie im Wesentlichen auf einer reduzierten Nutzung einzelner Materialien oder auf einer pauschalen Reduktion des gesamten Materialeinsatzes der Herstellung beruhen. Auf diese Weise werden berücksichtigt:

- umfangreiches Lithium-Recycling,
- verlängerte Lebensdauer von Fahrzeugen,
- Ersatz von Tantal-Kondensatoren.

Die vorgenommenen Änderungen werden im Folgenden beschrieben und in Hinblick auf ihre Auswirkungen auf Ressourcenbedarf und THG-Emissionen bewertet. Die verschiedenen Ansatzpunkte beeinflussen dabei die im Rahmen dieser Studie betrachteten Ressourcen- und Umweltwirkungen³² in unterschiedlichem Maße, weshalb in den jeweiligen Unterkapiteln jeweils die besonders relevanten Auswirkungen hervorgehoben werden.

6.9.1 Beschleunigter Technologiewechsel von PSM zu ASM

In Anlehnung an die Ergebnisse der Trendanalyse sowie der Patent- und Publikationsanalyse wird im Rahmen der MAIA davon ausgegangen, dass es sich bei den Elektromotoren aller

³² Abiotischer Materialbedarf und THG-Emissionen von Fahrzeugen und Szenarien sowie der Bedarf von Szenarien an kritischen Materialien

xEV zunächst ausschließlich um PSM handelt. Allerdings wurde bereits in den Basisszenarien angenommen, dass ab 2030 neben dem PSM zusätzlich der Asynchronmotor (ASM) eine zunehmende Rolle als Motortechnologie spielen könnte (Marktanteil von ASM: 15 % ab 2030 und 25 % ab 2040).

In Abschnitt 6.8.2 wurde dennoch der berechnete Bedarf an Dysprosium für Seltenerdpermanentmagnete als kritisch eingestuft. Im Rahmen des optimierten Szenarios wird deshalb noch stärker der Tatsache Rechnung getragen, dass die Substitution auf Komponentenebene durch ASM zumindest eine technisch geeignete Möglichkeit darstellt, strategische Nachteile durch entsprechende Preisanstiege oder Lieferengpässe langfristig zu umgehen. Es wird deshalb im Alternativszenario von deutlich schneller ansteigenden Marktanteilen von ASM ausgegangen. Der Marktanteil von ASM wird dabei ab 2030 auf 50% der Neufahrzeuge festgesetzt und steigt im weiteren Verlauf auf 75% nach 2040.

Der beschleunigte Technologiewechsel zeigt bei den Ergebnissen der MAIA auf Fahrzeugebene nur geringe Veränderungen. Im Basisszenario sinkt der abiotische Materialbedarf der Systemkomponente E-Motor im Vergleich der Jahre 2010 - 2050 um ca. 384 kg (HEV) bis zu 2 209 kg (BEV). Im Alternativszenario ergeben sich Einsparungen von 391 kg (HEV) bis zu 2 220 kg (BEV). Die ermittelten Einsparungen im Laufe der Zeit sind auf die Gewichtsreduzierung der Systemkomponente und auch auf den Technologiewechsel zurückzuführen. Wenn auch ein *beschleunigter* Wechsel hin zu ASM sich nicht wesentlich in einer stärkeren Reduzierung des abiotischen Materialbedarfs zeigt. Gleiches gilt für die Reduzierung der THG.

Auch auf die Szenarioergebnisse hat der beschleunigte Technologiewechsel von PSM zu ASM demnach keine nennenswerten Auswirkungen: Abiotischer Materialbedarf und THG-Emissionen bleiben gegenüber den Basisszenarien nahezu unverändert. Dies gilt sowohl für die kumulierten Ergebnisse des gesamten Zeitraums als auch für die Gegenüberstellung von erster und letzter Dekade. Wegen der vernachlässigbar geringen Abweichungen von den Basisszenarien werden die entsprechenden Ergebnisse hier nicht zusätzlich abgebildet. Der beschleunigte Wechsel zu ASM ist aber in den Abbildungen in Abschnitt 6.9.2 mit berücksichtigt.

Hinsichtlich der Kritikalität kommt es bei den in den PSM eingesetzten Seltenerdmetallen zu Veränderungen. Die Einsatzmenge von Dysprosium würde sich für die betrachteten Szenarien auf ca. 3,3 kt für Deutschland (ca. 1 % der Reserven) bzw. 75,9 kt für den weltweiten Bedarf (ca. 24 % der Reserven) reduzieren. Damit liegt der Maximalbedarf zwar deutlich unterhalb der Ursprungsszenarien, die Werte erreichen jedoch noch immer eine kritische Größe.

6.9.2 Verstärkter Einsatz Erneuerbarer Energien für die Fahrzeugnutzung

In Unterkapitel 6.5 wurde bereits deutlich, dass der abiotische Materialbedarf und die THG-Emissionen der Nutzungsphase von xEV (und damit die vergleichenden Aussagen auf Fahrzeugebene) in hohem Maße von der Bereitstellung der Antriebsenergie abhängen. Ergänzend zur Berücksichtigung eines Strommixes mit steigenden Anteilen Erneuerbarer Energien wird deshalb hier über den gesamten Zeitraum von einer ausschließlichen Bereitstellung von Antriebsenergie aus (zusätzlich eingespeister) Windenergie ausgegangen.

Auf Ebene der Antriebskonzepte zeigt sich, dass die THG-Emissionen der xEV über alle Zeiträume hinweg z.T. deutlich geringer als die konventioneller Antriebskonzepte sind (siehe Abb. 6-51). Die Unterschiede eines verstärkten Einsatzes erneuerbarer Energien sind vor allem im Jahr 2010 bei den REEV (928 kg), FCEV (470 kg) und BEV (1 660 kg CO₂-Äquivalente) sichtbar. Im Jahr 2050 wirkt sich der verstärkte Einsatz erneuerbarer Energien nur gering aus. Beim abiotischen Materialbedarf zeigt sich ein anderes Bild. Hier sind die Unterschiede zwischen xEV und den konventionellen Antriebskonzepten nur gering. Innerhalb der xEV zeigen sich deutliche Einsparpotenziale durch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien (siehe Abb. 6-52). Im Vergleich der Jahre 2010 und 2050 zwischen dem Deutschland-Szenario und dem 100% EE-Strom-Szenario wird deutlich, dass der abiotische Materialbedarf durch die effizientere Stromproduktion (100% Windenergie) noch leicht, um weitere 1 bis 3 %, gesenkt werden kann. Die höchste zusätzliche Reduzierung des Materialbedarfs liegt beim BEV (3%): Im Jahr 2050 liegt der abiotische Materialbedarf eines BEV bei 330 kg pro Jahr (zum Vergleich: im Deutschland-Szenario sind es 533 kg pro Jahr). Die THG-Emissionen lassen sich um weitere 1 bis 12 % im Jahr 2050 senken, wobei sich auch hier das größte zusätzliche Einsparpotenzial in der Nutzungsphase des BEV zeigt: Zusätzlich können 12 % Senkung auf 41 kg CO₂-Äquivalente pro Jahr erreicht werden (im Deutschland-Szenario sind es 248 kg CO₂-Äquivalente pro Jahr in 2050). Im Vergleich der Antriebskonzepte ergeben sich zwar Unterschiede. Diese wirken sich aber eher in der Gegenwart aus und nicht zum Zeitpunkt hoher xEV-Anteile in der Zukunft.

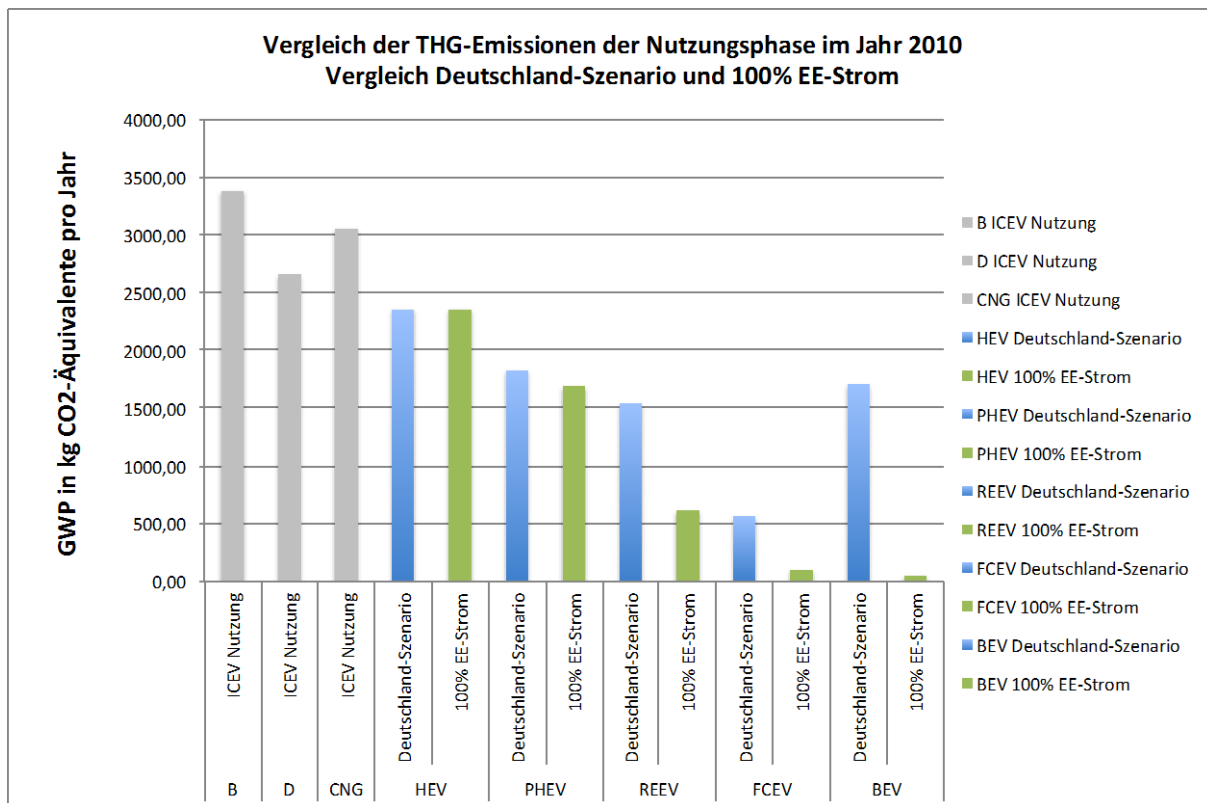


Abb. 6-51 Vergleich der Antriebskonzepte und THG-Emissionen der Nutzungsphase im Jahr 2010; Vergleich Deutschland-Szenario und 100% EE-Strom

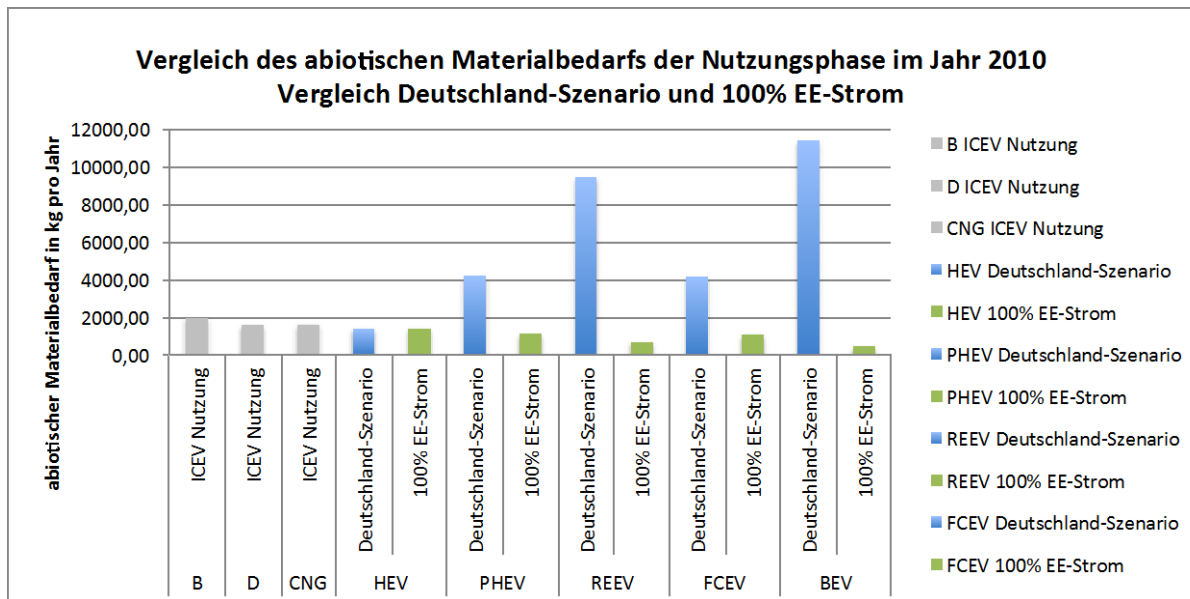


Abb. 6-52 Vergleich der Antriebskonzepte und des abiotischen Materialbedarfs der Nutzungsphase im Jahr 2010; Vergleich Deutschland-Szenario und 100% EE-Strom

Hinsichtlich der Verkehrsszenarien zeigt sich ebenso, dass bei ausschließlicher Nutzung von Windenergie über den gesamten Zeitraum nur eine geringfügige Reduktion des Beitrags der gesamten Nutzungsphase der STROM-Szenarien gegenüber der Referenz möglich wird. In dieser Variante kann etwa der kumulierte Materialbedarf der Nutzungsphase in STROM-Max von 2701 Mt auf 1878 Mt verringert werden und liegt damit um 19 % unterhalb des Materialbedarfs der Nutzung im Referenz-Szenario. Eine stärkere Reduktion des Materialbedarfs der Nutzung gegenüber den Szenarien in Unterkapitel 6.7 kann auch unter der Annahme der Bereitstellung von Traktionsenergie aus Windstrom mit besonders geringem spezifischem Materialbedarf (vgl. Wiesen et al. 2013, Wuppertal Institut 2014) nicht erreicht werden. Dies liegt einerseits daran, dass auch der zunächst berücksichtigte Strommix zum Zeitpunkt hoher Flottendurchdringung elektrischer Antriebe (nach 2020) bereits zu einem großen Anteil aus erneuerbaren Energien bereitgestellt wird. Andererseits entfällt z. B. in STROM-Max in Abschnitt 6.7.2 nur die Hälfte des Materialbedarfs der Nutzung auf elektrische Antriebe (1350 Mt), wovon wiederum ein Teil durch die Kraftstoffbereitstellung für Hybridfahrzeuge und nur etwa 826 Mt (61 %) durch den Strombezug verursacht werden. Nur dieser letztgenannte Anteil wird durch eine veränderte Strombereitstellung direkt beeinflusst, weshalb das Potenzial der zusätzlichen Windstrommengen zur weiteren Senkung des Materialbedarfs der Nutzungsphase begrenzt ist.

Abb. 6-53 zeigt beispielhaft für Deutschland die Auswirkungen der Strommix-Sensitivität auf den kumulierten abiotischen Materialbedarf der bereits in Unterkapitel 6.7 beschriebenen Szenarien. Auch die Annahmen zum beschleunigten Technologiewechsel von PSM zu ASM sind in der Abbildung berücksichtigt.

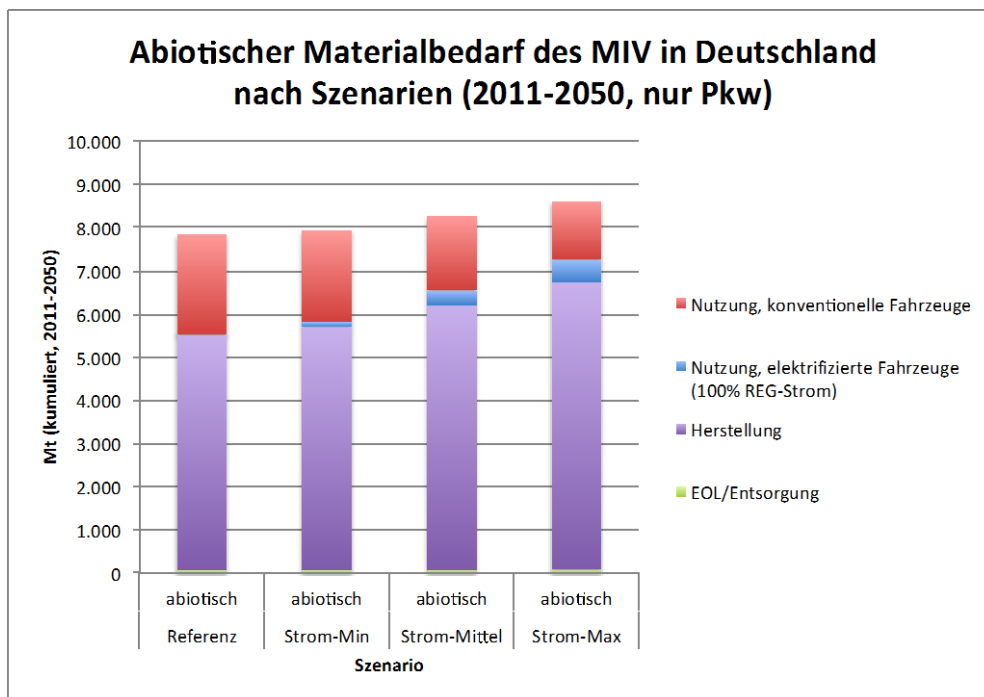


Abb. 6-53 Abiotischer Materialbedarf Deutschland: Sensitivität mit ausschließlich erneuerbarer elektrischer Traktionsenergie und beschleunigtem Technologiewechsel von PSM auf ASM

Die zuvor getroffenen Aussagen zum abiotischen Materialbedarf gelten in ähnlicher Weise auch für die Auswirkungen der ausschließlichen Nutzung von Windkraft als elektrische Traktionsenergie auf die kumulierten THG-Emissionen der Szenarien: Anfangs noch hohe Anteile fossiler Stromerzeugung in den Basisszenarien beeinflussen die Szenarien wegen der noch geringen Verbreitung elektrischer Antriebe kaum. Mit zunehmender Bedeutung elektrischer Antriebe in den Fahrzeugflotten sind dann auch bereits hohe Anteile Erneuerbarer Energien im Strommix erreicht, so dass sich nur geringfügige weitere Reduktionen der THG-Emissionen der Szenarien unter der Annahme einer 100%-Versorgung aus erneuerbaren Quellen ergeben. So können z. B. die kumulierten Emissionen des deutschen Pkw-Verkehrs im Betrachtungszeitraum in STROM-Max nur leicht von 4 Gt im Basisszenario auf etwa 3,8 Gt bei ausschließlicher Nutzung erneuerbaren Fahrstroms reduziert werden. Analog zur Abbildung des abiotischen Materialbedarfs werden auch für die kumulierten Treibhausgasemissionen der Deutschland-Szenarien aus Unterkapitel 6.7 die Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtung in Abb. 6-54 dargestellt, Die Annahmen zum beschleunigten Technologiewechsel von PSM zu ASM werden auch hier einbezogen.

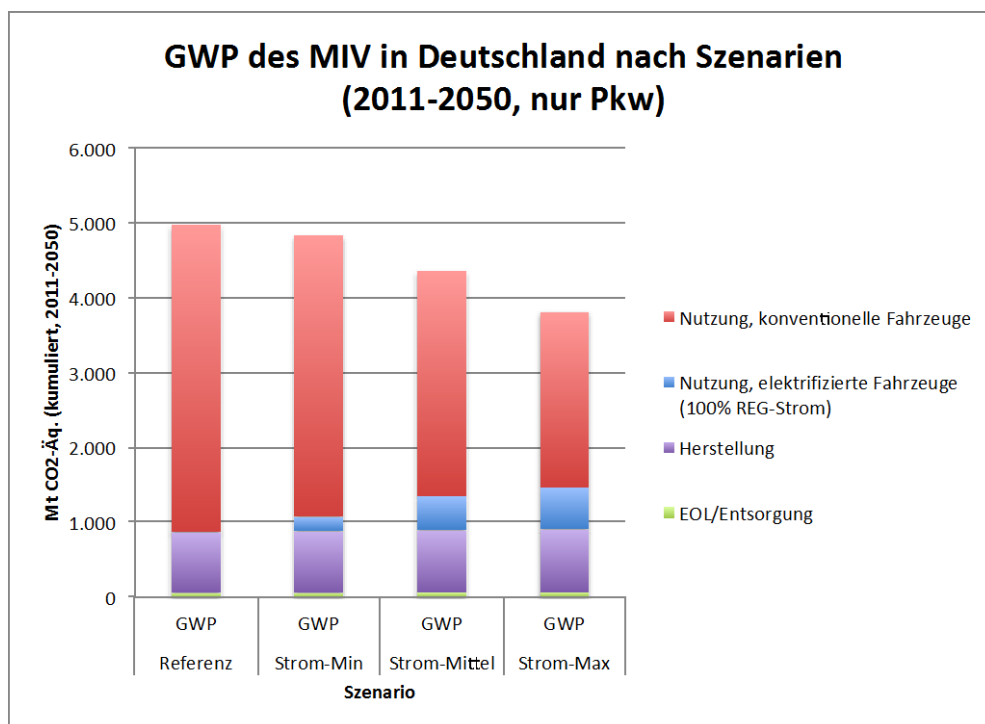


Abb. 6-54 Treibhausgaspotenzial Deutschland: Sensitivität mit ausschließlich erneuerbarer elektrischer Traktionsenergie und beschleunigtem Technologiewechsel von PSM auf ASM

Darüber hinaus wurde geprüft, wie sich die Bereitstellung von Wasserstoff für FCEV aus erneuerbaren Quellen ab 2030 auf die Ergebnisse der Szenarien auswirkt. Hier zeigt sich jedoch, dass der Bereitstellungspfad des Wasserstoffs auf die kumulierten Ergebnisse keine nennenswerten Auswirkungen hat. Dies kann einerseits auf einen eher geringen Anteil von FCEV an den Fahrzeugflotten der Szenarien, andererseits auf den nicht wesentlich geringeren abiotischen Materialbedarf der erneuerbaren im Vergleich zur konventionellen Wasserstoffherzeugung zurückgeführt werden.

Hinsichtlich der Bewertung der Kritikalität erweist sich der verstärkte Einsatz erneuerbarer Energien als unkritisch, da die spezifischen Einsatzmengen möglicher kritischer Rohstoffe pro kWh gering sind. Insbesondere muss beachtet werden, dass die Substitutionsmöglichkeiten für Seltenerdpermanentmagneten in Windkraftanlagen deutlich günstiger sind als in Elektromotoren für Kraftfahrzeuge. (vgl. hierzu auch Wuppertal Institut 2014)

6.9.3 Lithium-Recycling

In Abschnitt 6.8.3 wurde die Deckung des Lithium-Bedarfs aus den gegenwärtigen Reserven als grundsätzlich möglich, aber keineswegs gesichert bezeichnet. Es wird dort jedoch auch darauf hingewiesen, dass der Ausbau von Recyclingkapazitäten zukünftig zu einer Verringerung der Nachfrage nach primär gewonnenem Lithium beitragen wird. Mögliche Engpässe der Bereitstellung des kumulierten Bedarfs an Lithium könnten so durch umfassendes Recycling kompensiert werden.

Es wird deshalb überschlägig auch die Minimalnachfrage der hier betrachteten Verkehrsszenarien nach Primärlithium ermittelt, die sich im Fall einer vollständigen Kreislaufführung des Lithiums für Fahrzeugbatterien ergeben würde. Es wird dabei vereinfachend angenommen, dass diese Minimalnachfrage der Lithiummenge im weltweiten Fahrzeugbestand entspricht.

Ein Mehrbedarf durch den Zeitaufwand der Kreislaufführung (vom Ende der Lebensdauer bis zur erneuten Bereitstellung als Sekundärrohstoff) wird nicht separat berücksichtigt. Abb. 6-55 zeigt den Li-Bedarf des Bestandes in allen vier betrachteten Weltszenarien zu verschiedenen Zeitpunkten.

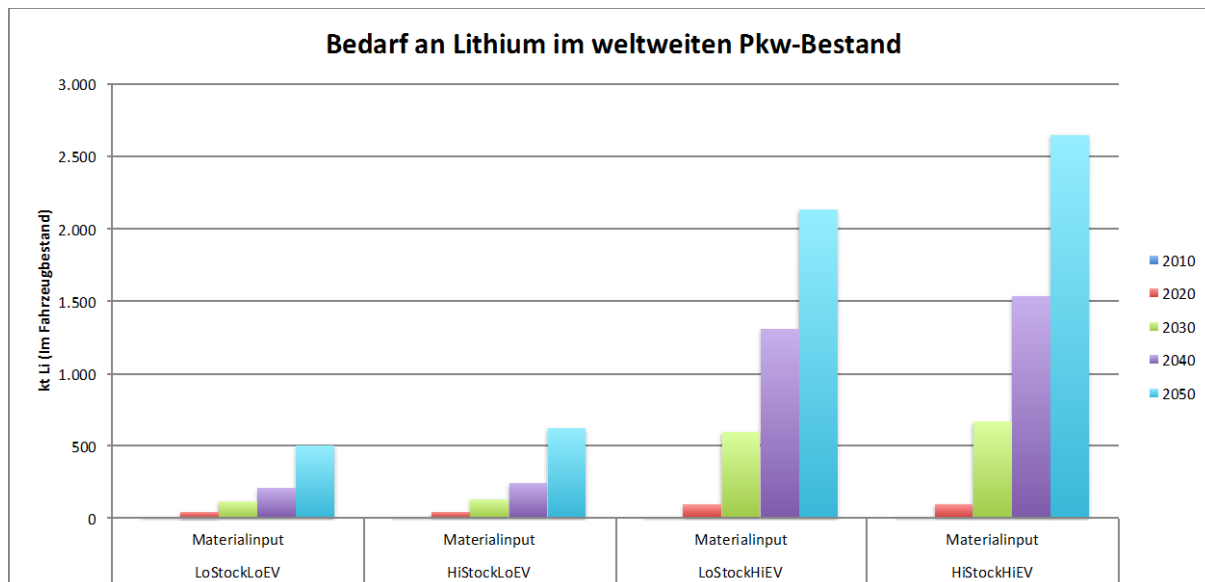


Abb. 6-55 Bedarf an Lithium im weltweiten Pkw-Bestand nach Szenarien und Jahren

Der Li-Bedarf der betrachteten Fahrzeugflotte steigt naturgemäß mit dem Ausbau der Elektromobilität im Zeitverlauf an. Im Welt-Szenario mit dem höchsten Anteil elektrifizierter Fahrzeuge (HiStockHiEV) erreicht er im Jahr 2050 ca. 2,6 Mt Li. Dies entspricht ca. 20 % der Lithiumreserven und ist immer noch kritisch hoch.

6.9.4 Fahrzeuglebensdauer

In Unterkapitel 6.6 wurde dargestellt, dass in dieser Studie aus Gründen der Vergleichbarkeit von Szenarioergebnissen für Deutschland und die Welt eine einheitliche Pkw-Lebensdauer von 10 Jahren für beide Regionen angenommen wird. Die Festlegung der Lebensdauer beruht dabei insbesondere auf den vereinfachenden Annahmen der (IEA 2012) zur Berechnung langfristiger weltweiter Fahrzeugverkäufe und -bestände

Bei Bewertung der Szenarioergebnisse zum Ressourcenbedarf ist jedoch Folgendes zu berücksichtigen: Der berechnete Materialaufwand sowie der Bedarf an kritischen Rohstoffen wird in erster Linie durch die Herstellung der Fahrzeuge verursacht. Die Annahme zur Lebensdauer ist demnach entscheidend für den erwarteten jährlichen Fahrzeugzubau und damit für den Materialbedarf. Eine von der hier berücksichtigten abweichende Annahme zur Lebensdauer ist daher aus zwei Gründen von Interesse:

- Die tatsächliche zukünftige Entwicklung der Fahrzeuglebensdauer ist unsicher. Sie ist z. B. abhängig von Wohlstandsentwicklung und -modellen in verschiedenen Weltregionen, von Nutzerpräferenzen, politischen Maßnahmen (z. B. „Umweltpremie“) sowie von der technischen Eignung von Fahrzeugen für Sekundärmärkte im Ausland.

- Neben der Absicherung der Studienergebnisse hinsichtlich bestehender Unsicherheiten der Eingangsparameter kann eine verlängerte Nutzungsdauer von Fahrzeugen auch als bewusste Maßnahme dienen, mögliche Kritikalitäten der für Pkw-Flotten benötigten Rohstoffe zu reduzieren.

Es wird deshalb ergänzend zu den Basisszenarien geprüft, welche Auswirkungen mit einer Fahrzeuglebensdauer von 15 statt 10 Jahren verbunden sind. Die Annahme einer längeren Lebensdauer führt in den Szenarien insbesondere zu einem reduzierten Bedarf an Rohstoffen für die Fahrzeugherstellung. Dies kann eine Neubewertung der genutzten Rohstoffe in Hinblick auf ihre Kritikalität erforderlich machen.³³

Hierzu wird in einer Überschlagsrechnung angenommen, dass sich der Bedarf an kritischen Materialien der Fahrzeugherstellung um etwa 33 % gegenüber den zuvor dargestellten Szenarien reduziert. Die reduzierten Materialmengen werden dann erneut auf ihre Kritikalität überprüft.

Die reduzierten Materialmengen verringern die Kritikalität der jeweiligen Rohstoffe entsprechend. Dennoch verbleiben insgesamt sehr hohe Dysprosiumverbräuche (ca. 25 % der Reserven) und Lithiumverbräuche (ca. 21 % der Reserven), die immer noch als kritisch anzusehen sind.

6.9.5 Ersatz von Tantal-Kondensatoren

In Abschnitt 6.8.10 wurde festgestellt, dass der berechnete Bedarf an Tantal aus Kondensatoren der Elektronikkomponenten eine kritische Größenordnung erreicht, hier jedoch eine Substitution durch andere Kondensatormaterialien (z. B. Al, Nb) möglich erscheint.

Es ist keine Quantifizierung der Auswirkungen einer solchen Maßnahme notwendig, weil die Tantalnachfrage durch den Ersatz der Kondensatoren vollständig eliminiert werden könnte und die geeigneten Substitute in dieser Studie nicht als kritisch angesehen werden.

Die Maßnahme wird deshalb ohne weiterführende Analysen als geeignet eingestuft, als Bestandteil eines optimierten Szenarios die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen zu reduzieren.

6.9.6 Bewertung des optimierten Szenarios

In der vergleichenden lebenszyklusweiten Bewertung einzelner Fahrzeugtypen wirkt sich gerade in den ersten betrachteten Dekaden die Annahme einer Vollversorgung mit Strom aus erneuerbaren Quellen deutlich zugunsten der elektrischen Fahrzeuge aus. Die Annahme einer elektrischen Maschine basierend auf ASM statt PSM hat dagegen keine nennenswerten Auswirkungen auf die Bewertung der Fahrzeuge – sie spielt demnach auch für die Ergebnisse der Szenariovergleiche keine Rolle.

³³ In begrenztem Umfang kann sich die veränderte Lebensdauer auch auf den Vergleich von Szenarien untereinander hinsichtlich ihres abiotischen Materialbedarfs oder der THG-Emissionen auswirken. So sind z. B. Auswirkungen auf die Klimawirkung denkbar, weil effizientere Antriebstechnologien erst mit größerer Verzögerung in die Fahrzeugflotten gelangen. Diese Aspekte werden hier nicht explizit betrachtet.

Für die Szenariovergleiche ist allerdings auch die Variation der Strombereitstellung weniger relevant – sie ermöglicht nur eine leichte Reduktion der Umweltwirkungen im Vergleich zu den Basisszenarien.

Die Auswirkungen einer verlängerten Lebensdauer, des Lithium-Recyclings sowie der Tantal-Substitution auf die Fahrzeug- und Szenariovergleiche (Materialbedarf und THG) wurden als gering eingeschätzt, wurden aber nicht im Detail geprüft. Insbesondere verlängerte Fahrzeuglebensdauern würden die absoluten Ergebnisse der Fahrzeuge und Szenarien reduzieren, hätten vermutlich aber geringen Einfluss auf die (relativen) Vergleiche.

Einige der im Rahmen dieses Kapitels beschriebenen Ansatzpunkte sind geeignet, die Abhängigkeiten von als kritisch eingestuften Materialien zu reduzieren. Sie ermöglichen prinzipiell eine vollständige Substitution des kritischen Tantals sowie eine Reduktion des Bedarfs an Lithium und Dysprosium auf ein weniger kritisches Maß. Es ist jedoch zu bedenken, dass die hierfür erforderlichen Recyclingkreisläufe (für Li) noch zu etablieren sind und insbesondere die Reduktion des Bedarfs an Permanentmagneten durch alternative Technologien in hohem Maße unsicher ist.

Relevante Zielkonflikte zwischen Maßnahmen zur Reduktion von Kritikalitäten einerseits und der Klimawirkung sowie des Materialbedarfs andererseits sind nicht ersichtlich.

6.10 Fazit der Materialintensitätsanalyse

O. Soukup (WI), M. Ritthoff (WI), K. Bienge (WI)

Im Rahmen der Materialintensitätsanalyse wurde eine vergleichende, lebenszyklusweite Umweltbewertung unterschiedlicher Antriebskonzepte (konventionell und elektrisch) aus dem mittleren Fahrzeugsegment hinsichtlich des abiotischen Materialbedarfs und der Klimawirkung durchgeführt.

Basierend auf einer Technologieauswahl und Auswertung vorhandener Lebenszyklusdaten wurden mittels Materialintensitätsanalyse verschiedene Antriebskonzepte (typisierte Fahrzeuge) auf Fahrzeugebene modelliert. Hierfür wurden Fahrzeuge mit fünf verschiedenen elektrischen und drei konventionellen Antriebssträngen berücksichtigt und mit Hilfe von technischen Parametern sowie Materialinventaren der Fahrzeugkomponenten (z. B. Glider, Elektromotor, Batterie) beschrieben.

Es wurde ein Systemvergleich für die Herstellungs- und Nutzungsphase sowie die Entsorgung der Fahrzeuge vorgenommen. Die Umweltwirkungen - abiotischer Materialbedarf und Treibhauspotenzial - wurden für die Jahre 2011 bis 2050 abgeschätzt.

Diese Ergebnisse wurden anhand von Verkehrsszenarien hochgerechnet, die Entwicklungen von Fahrzeugflotten in Deutschland und weltweit abbilden. Daneben wurden Versorgungsrissen, wie zum Beispiel geologische Verfügbarkeit, Substituierbarkeit und Liefersituation untersucht und kritische Materialien identifiziert.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Materialintensitäts-, THG- und Kritikalitätsanalyse wurden mögliche Ansatzpunkte zur Minderung der identifizierten Impacts untersucht.

6.10.1 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse auf Fahrzeugebene

Bei der Betrachtung des abiotischen Materialbedarfs zeigt sich, dass elektrifizierte Konzepte - durch zusätzlich erforderliche Komponenten und deren Materialbedarf (z. B. Batterie, E-Motor) - in der Herstellung in der Regel rohstoffintensiver im Vergleich zu verbrennungsmotorischen / konventionellen Konzepten (ICE-Konzepte) sind. Die konventionellen Antriebskonzepte sind untereinander in ihrer Herstellung vergleichbar. Nur durch den Erdgastank resultiert ein höherer Materialbedarf beim ICE-CNG. Über den betrachteten Zeitraum zeigt sich eine Annäherung des Materialbedarfs in der Herstellungsphase von ICEV und xEV.

Auf Ebene der Systemkomponenten dominiert der Glider bei den ICEV deutlich. Bei den xEV ist die Verteilung heterogener, die Batterie und die Leistungselektronik weisen neben dem Glider einen hohen Einfluss auf. Der hohe Materialbedarf wird hauptsächlich durch nicht-kritische Stoffe wie Stahl und Kupfer verursacht, es folgen mögliche kritische Stoffe wie Gold und Lithium bei BEV an dritter und vierter Stelle der rohstoffintensivsten Materialien.

Die Nutzungsphase entscheidet bei einer lebenszyklusübergreifenden Betrachtung über die Umweltbilanz der xEV: Während in 2010 die Nutzung der xEV deutlich dominiert, zeigt sich für das Jahr 2050 ein großes Reduktionspotenzial. Bei hohem Anteil regenerativer Stromerzeugung (80% in 2050) kann der Materialbedarf der Nutzung elektrifizierter Fahrzeuge deutlich reduziert werden. Die Herstellung eines Elektroautos ist dann in 2050 für den Materialbedarf die ausschlaggebende Lebenszyklusphase.

Über alle Lebenszyklusphasen ist eine deutliche Annäherung aller Antriebskonzepte über den Betrachtungszeitraum erkennbar, vor allem durch den verstärkten Einsatz von erneuerbaren Energien in der Nutzungsphase.

Beim Treibhauspotential zeigt sich, dass die Nutzungsphase die größte Klimawirkung zeigt. Über die Zeit ist eine deutliche THG-Reduktion erkennbar, die durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien bedingt ist. Die Herstellung aller Antriebskonzepte weist geringere Unterschiede bzgl. des GWP auf als beim Materialbedarf. Im Gegensatz zur Betrachtung des Materialbedarfs weist die Nutzungsphase der xEV beim GWP und damit lebenszyklusweit schon 2010 eine bessere Umweltwirkung als die der ICEV-Konzepte auf. Somit lassen sich generell auch im Rahmen dieser Studie vergleichbare Schlussfolgerungen bezüglich der lebenszyklusweiten Klimabilanz von konventionellen Antriebskonzepten gegenüber batterieelektrischen Konzepten ziehen, wie im Projekt UMBReLA (vgl. Helms et al. 2011). Insgesamt entscheidet die Art der Bereitstellung elektrischer Energie über das Treibhauspotential.

6.10.2 Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse auf Szenarioebene

Die Analyse ergibt, dass alle Elektromobilitätsszenarien für *Deutschland* gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektromobilität über den gesamten Betrachtungszeitraum einen erhöhten *abiotischen Materialbedarf* aufweisen – und zudem mit steigender Elektrifizierung der Flotte auch der kumulierte abiotische Materialbedarf ansteigt. Dies ist insbesondere auf die Herstellung zusätzlicher materialintensiver Komponenten für Elektrofahrzeuge zurückzuführen. Der Vergleich absoluter Zahlen zur Entwicklung des Materialbedarfs innerhalb der Szenarien im Zeitverlauf zeigt zwar, dass etwa durch verbesserte Fahrzeugeigenschaften in allen Szenarien eine Reduktion des Materialbedarfs einzelner Dekaden innerhalb des Betrachtungszeitraums erreicht wird. Mit zunehmendem Anteil elektrifizierter Fahrzeuge fällt

diese Reduktion des Materialbedarfs der letzten im Vergleich zur ersten Dekade jedoch zunehmend schwächer aus.

Die Elektrifizierung der Pkw-Flotten allein ist demnach nicht geeignet, den Materialbedarf des Pkw-Verkehrs in Deutschland gegenüber einer Flotte ohne elektrische Antriebe weiter zu senken. Um dieses Ziel zu erreichen, sind weitere Maßnahmen notwendig, wie z. B. Materialsubstitutionen in der Fahrzeugherstellung oder strukturelle Ansätze, die auf eine intelligentere Nutzung mit besserer Auslastung des Pkw-Verkehrs sowie auf verlängerte Nutzungsdauern der Fahrzeuge abzielen.

Bei der Interpretation des *weltweiten abiotischen Materialbedarfs* ist zu berücksichtigen, dass die verglichenen Szenarien abweichend von der konstanten Flottengröße der Deutschland-Szenarien von einem Wachstum der weltweiten Pkw-Flotten bis 2050 ausgehen. Die beiden Szenarien mit kleineren Fahrzeugflotten weisen im Vergleich zu den beiden Szenarien mit großen Fahrzeugflotten einen geringeren kumulierten Materialbedarf auf. Die Gegenüberstellung der Szenarien mit identischer Bestandsentwicklung zeigt, dass sich jeweils für das Szenario mit höherem Anteil elektrifizierter Antriebe auch der höhere kumulierte Materialbedarf ergibt. Im Gegensatz zu den Deutschland-Szenarien führt die Entwicklung des Pkw-Verkehrs weltweit in keinem der Szenarien zu einer Reduktion des Materialbedarfs einzelner Dekaden im Zeitverlauf. Angenommene zukünftige Verbesserungen von Fahrzeugeigenschaften werden durch ein starkes Flottenwachstum deutlich überkompensiert.

Keines der betrachteten Welt-Szenarien erweist sich damit als geeignet, den absoluten Materialbedarf des weltweiten Pkw-Verkehrs gegenüber der heutigen Situation zukünftig zu reduzieren. Es erscheint auch unwahrscheinlich, dass dieses Ziel durch technische Weiterentwicklungen zur Reduktion des Herstellungsaufwandes erreicht werden kann. Die absolute Senkung des Materialbedarfs scheint lediglich durch eine Begrenzung des weltweiten Flottenwachstums gegenüber den in den Szenarien geschilderten Annahmen möglich.

Die berechneten kumulierten *THG-Emissionen* für *Deutschland* liegen je nach Szenario zwischen 4 und 5 Gt CO₂-Äquivalenten. Im Gegensatz zum abiotischen Materialbedarf zeigt sich, dass alle Elektromobilitätsszenarien gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektromobilität über den gesamten Betrachtungszeitraum niedrigere THG-Emissionen aufweisen, wobei mit steigendem Anteil elektrifizierter Fahrzeuge jeweils auch ein weiterer Rückgang der Emissionen verbunden ist. Die ermittelten THG-Einsparungen der STROM-Szenarien sind auf die bessere THG-Bilanz der elektrifizierten Fahrzeuge durch die zunehmende CO₂-arme Bereitstellung von elektrischer Antriebsenergie aus erneuerbaren Quellen zurückzuführen.

Die Auswertung der Deutschland-Szenarien hinsichtlich der THG-Emissionen zeigt, dass die Elektrifizierung der Pkw-Flotten eine geeignete Maßnahme darstellt, um die THG-Emissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland zu reduzieren. Es kann dabei sowohl eine absolute Senkung der Emissionen im Zeitverlauf als auch eine Reduktion gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektrofahrzeuge erreicht werden.

Die Auswertung der Szenarien hinsichtlich der *weltweiten THG-Emissionen* zeigt, dass ein umfassender Technologiewechsel zu alternativen Antrieben erforderlich ist, um trotz stark wachsender Fahrzeugflotten eine Reduktion der THG-Emissionen zu erreichen. Nur durch eine umfassende Umstellung der Bereitstellung von Antriebsenergien von fossilen auf regenerative Quellen kann so einerseits eine absolute Senkung der Emissionen im Zeitverlauf als

auch eine Reduktion der kumulierten Emissionen gegenüber einer Referenzentwicklung mit reduziertem Anteil an Elektrofahrzeugen erreicht werden. Dennoch zeigt sich, dass die Emissionsreduktion auf Grund der Szenarioannahmen zum Flottenwachstum deutlich schwächer ausfällt als in den zuvor beschriebenen Deutschland-Szenarien.

6.10.3 Fazit abiotischer Materialbedarf und Treibhauspotenzial

Die Modellierung des Materialbedarfs und der Treibhauspotenziale der Elektromobilität zeigt, dass die Förderung der Elektromobilität aus Sicht der Klimawirkung sinnvoll sein kann und einen Beitrag zu den politischen Klimaschutzziele leisten kann, wenn der Ausbau der ressourcenleichteren erneuerbaren Energien damit einhergeht. Denn für das Treibhauspotenzial ist die Art der Energie-Bereitstellung (fossile Kraftstoffe, verschiedene Strommixe) in der Nutzungsphase entscheidender für den Vergleich elektrischer und konventioneller Antriebe als die Emissionen der Herstellung.

Hinsichtlich des induzierten Materialbedarfs (inklusive Energierohstoffe) der Elektromobilität ergibt sich ein deutlich anderes Bild: Die Herstellung eines Elektroautos ist für den Materialbedarf der ausschlaggebendere Faktor im Vergleich zur Nutzung. Durch die zusätzlichen Komponenten (z. B. Batterie, Elektromotor) hat ein Elektroauto einen deutlich höheren Materialbedarf. Möglichkeiten zur Reduktion des Materialbedarfs in der Herstellung bestehen z. B. in der Substitution besonders materialintensiver Werkstoffe, in der Reduktion des Verschnitts (auch aus Eigenantrieb der OEMs zur Kostensenkung), in der Förderung recyclinggerechter Produktion oder in längeren Nutzungsdauern. Der Materialbedarf in der Nutzung (durch Energie-Bereitstellung) kann durch den Ausbau der erneuerbaren Energien reduziert werden. Jedoch ist das Potenzial zur weiteren Senkung des Materialbedarfs der Nutzungsphase durch ausschließlich erneuerbaren Traktionsstrom begrenzt. Der grundsätzlich bestehende Zielkonflikt zwischen Ressourcen- und Klimaschonung lässt sich auf diesem Weg nur abschwächen, aber nicht beheben.

6.10.4 Ergebnisse zur Kritikalität/Verfügbarkeit von Rohstoffen für die Elektromobilität

Bei der Elektromobilität bestehen deutlich größere Abhängigkeiten von kritischen Rohstoffen als bei den Erneuerbaren Energien, wie sie im Forschungsprojekt KRESSE (vgl. Wuppertal Institut 2014) betrachtet wurden.

Die eingesetzten Elektromotoren nutzen häufig Permanentmagneten auf der Basis von Seltenen Erden, da hiermit, aufgrund der hohen Feldstärke, erhebliche Gewichtsvorteile erreicht werden können. Bei den Seltenen Erden gibt es deutliche Unterschiede hinsichtlich der Verfügbarkeit. Für Neodym und Praesodym erscheint die Verfügbarkeit unkritisch, wohingegen für Dysprosium und Terbium, das zur Erhöhung der Curie-Temperatur eingesetzt werden muss, die Nachfrage aus der Elektromobilität bezogen auf die betrachteten Szenarien eine kritische Größe erreicht. Ergänzend muss darauf hingewiesen werden, dass eine hohe Abhängigkeit von wenigen Lieferländern (insbesondere China, nachrangig USA, perspektivisch u. U. auch Grönland) besteht und Lieferbeschränkungen einzelner Länder erhebliche Auswirkungen auf die Versorgungslage haben können. Recycling kann kurzfristig kaum zu einer Entspannung der Versorgungslage beitragen, da einerseits der Anfall an Sekundärmaterial noch zu gering ist und andererseits einem hochwertigen Recycling von Seltenerdpermanentmagneten noch verfahrenstechnische Hürden im Wege stehen. Daneben zeigen sich

auch erhebliche Unterschiede hinsichtlich des TMR der Gewinnung von Seltenen Erden in Abhängigkeit von den Lagerstätten. Kurz- und mittelfristig ist jedoch nicht zu erwarten, dass die hinsichtlich des TMR ungünstigeren Lagerstätten in bedeutendem Maße genutzt werden.

Die meisten Batterien für Elektrofahrzeuge werden auf Lithium basieren. Aufgrund seiner Eigenschaften (leichtestes Metall und zugleich höchstes Normalpotenzial) gibt es kein besseres Element für Batterien. Die Nachfrage nach Lithium aus der Elektromobilität erreicht in den betrachteten Szenarien eine kritische Größe, bei der unklar ist, ob sie gedeckt werden kann. Wichtig ist hierbei, dass bereits ein einmaliger Bestandsaufbau einen erheblichen Teil der Lithiumreserven (ca. 21 %) benötigt. Auch unter der Annahme einer Etablierung von Recyclingsystemen für Lithium verbleibt daher ein kritisch hoher Bedarf nach Lithium aus der Elektromobilität. Daneben zeigt sich, dass bei einer steigenden Nachfrage nach Lithium mit steigenden Umweltbelastungen bei der Gewinnung und steigenden Gewinnungskosten zu rechnen ist. Ursache hierfür ist, dass nach der absehbaren Erschöpfung der geologisch günstigsten Salzlagerstätten andere Lagerstätten genutzt werden müssen, die eine aufwändigere Aufbereitung erfordern. Die derzeitigen Preise für Lithium sind jedoch bereits so hoch, dass auch einige der relativ aufwendig zu gewinnenden und aufzubereitenden Rohstoffe (insbesondere australische Pegmatitgesteine) wirtschaftlich gewonnen und aufbereitet werden können. Die ansonsten aber zu erwartenden Kostensenkungsmöglichkeiten bei steigenden Produktionsmengen werden sich jedoch möglicherweise nicht einstellen.

Der Bedarf der anderen betrachteten potenziell kritischen Stoffe (z. B. Silber, Germanium oder Tantal) erscheint insgesamt unkritisch, da die Verfügbarkeit entweder unkritisch ist oder geeignete unkritische Substitute verfügbar sind.

7 Synthese und integrierte Bewertung

M. Klötzke (DLR), K. Bienge (WI), B. Frieske (DLR), H. Hüging (WI), T. Koska (WI), M. Ritt-hoff (WI), O. Soukup (WI)

Die im Folgenden dargestellte Synthese dient der Zusammenführung und integrierten Bewertung der im Rahmen der STROM-Begleitforschung mittels unterschiedlicher methodischer Ansätze gewonnenen Erkenntnisse. Die Ergebnisse aus den einzelnen Kapiteln werden diskutiert und in Kombination abschließend beschrieben.

Dies beinhaltet insbesondere eine Analyse der nach dem vorliegenden Erkenntnisstand abzuschätzenden Situation Deutschlands im Bereich der Elektromobilität sowie eine Ableitung von Empfehlungen zum weiteren Umgang mit diesem Gegenstand, insbesondere im Bereich der Forschung.

Hierzu erfolgt zum einen eine quantitative Diskussion zu den Ergebnissen der Trendanalysen und des Technologiemonitorings im Hinblick auf die Forschungseffizienz (FuE-Aufwendungen vs. technologische Ergebnisse), zum anderen eine qualitative Betrachtung im Hinblick auf die Trends in der Verkehrs-, Mobilitäts- und Marktentwicklung.

Weiterhin wird aus Perspektive von Umweltwirkungen und Rohstoffkritikalitäten diskutiert, welche ökologischen Auswirkungen alternative Entwicklungspfade der Elektromobilität in Bezug auf verschiedene Fahrzeugtypen und Fahrzeugflotten haben. Hierbei liegt ein Fokus auf der Identifikation der zentralen kritischen Rohstoffe, ihrer Verfügbarkeit sowie der Entwicklung ihrer Umweltrelevanz.

7.1 Forschungseffizienz

B. Frieske (DLR), H. Hüging (WI), T. Koska (WI)

Die Forschungseffizienz beschreibt den Zusammenhang der Entwicklung monetärer Investitionen in FuE-Leistungen mit quantitativ messbaren Ergebnissen der eingesetzten Mittel. Diese Ergebnisse werden anhand von Leistungsindikatoren beschrieben und umfassen im Folgenden Anzahl und Qualität wissenschaftlicher Publikationen in den Technologiefeldern „Leistungselektronik“ und „Elektrische Maschinen“ sowie technischer Erfindungen, die deren State of the Art erweitern und im Rahmen von Patentschriften sichern. Des Weiteren besteht ein Zusammenhang von FuE-Investitionen auch zu konkret in den Markt eingeführten Produkten wie beispielsweise neue oder verbesserte Technologien und Komponenten sowie Fahrzeugsysteme und -konzepte. Förderprogramme wie STROM unterstützen dabei durch Bereitstellung öffentlicher Fördergelder in FuE-Projekte die zielorientierte Entwicklung neuer technologischer Lösungen auf nationaler Ebene.

7.1.1 Wissensbasis und technologische Basis im Vergleich

In Unterkapitel 4.2 wird mithilfe dezidierter bibliometrischer Patent- und Publikationsanalysen ein internationales Monitoring von Schlüsseltechnologien der Elektromobilität durchgeführt und dabei insbesondere diejenigen Technologien untersucht, die im Rahmen des STROM-Programms sowie von internationalen Experten als besonders relevant bewertet wurden,

nämlich elektrische Maschinen und die Leistungselektronik jeweils bezogen auf den Antriebsstrang elektrifizierter Fahrzeuge. Hierfür wurden detaillierte Patent- und Publikationsanalysen bis auf Komponenten- und Bauteilebene durchgeführt, um Forschungsschwerpunkte, Trendentwicklungen, Technologieführer sowie Innovationsnetzwerke und -dynamiken im internationalen Vergleich der Weltregionen Japan, USA, China, Indien und Europa mit speziellem Fokus auf Deutschland und Frankreich aufzuzeigen.

Damit Synthese und Integration im Sinne der Darstellung der Forschungseffizienz erfolgen können, sollen im Folgenden die Erkenntnisse zur Position der verschiedenen Weltregionen im Detail erläutert und im nachfolgenden Kapitel mit Aussagen zur Fördersituation kombiniert werden. Hierzu sollen die „Wissensbasis“ und die „Technologische Basis“ der jeweiligen Länder anhand einer Portfoliomatrix vergleichend dargestellt werden.

Die Wissensbasis bezieht sich dabei auf die in der jeweiligen Weltregion vorhandenen Publikationen und analysiert deren Dynamik über einen Zeitraum von ca. zehn Jahren im internationalen Vergleich. Sie kann als Indikator für eher langfristige, grundlagenorientierte und insbesondere von Universitäten und Forschungsinstitutionen betriebene Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten interpretiert werden.

Die Analyse der technologischen Basis folgt der gleichen Argumentation, bezieht sich aber nicht auf wissenschaftliche Publikationen, sondern Patente, die eher ökonomisch getrieben sind und dementsprechend von Industrieunternehmen forciert werden. Sie dient als Indikator für kurz- bis mittelfristig zu erwartende technische Entwicklungen, die möglicherweise in innovativen Produkten Einzug finden.

Bei der Analyse der Wissensbasis der untersuchten Weltregionen werden die Anteile wissenschaftlicher Publikationen eines Landes für das Jahr 2012 (x-Achse) dem Wachstum des Publikationsoutputs über einen Zeitraum von zehn Jahren (y-Achse) gegenübergestellt. Insgesamt konnten in den untersuchten Weltregionen 660 wissenschaftliche Publikationen im genannten Zeitraum identifiziert werden, die sich auf Themen im Bereich „Elektrische Maschine im Antriebsstrang elektrifizierter Fahrzeuge“ beziehen.

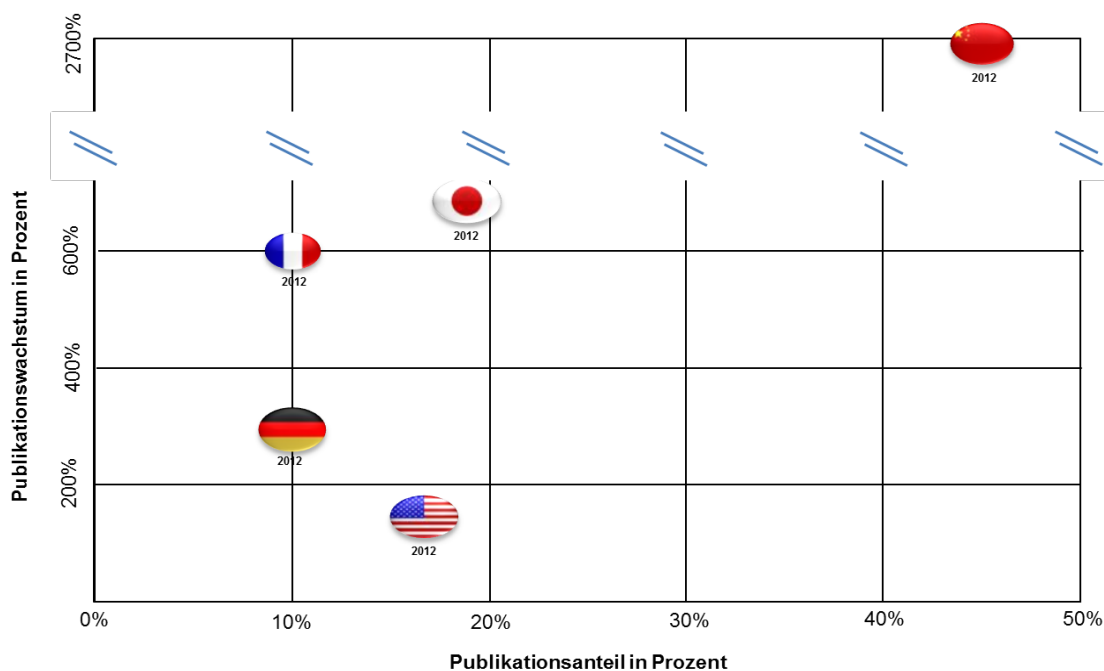


Abb. 7-1 Wissensbasis „Elektrische Maschinen“ im Ländervergleich, 2002–2012 kumuliert

China ist sowohl bei der Dynamik als auch beim Anteil an wissenschaftlich relevanten Publikationen mit Abstand führend (Abb. 7-1). Das Wachstum des Publikationsoutputs betrug dabei über die letzten zehn Jahre mehr als 2700 %, der Publikationsanteil konnte im gleichen Zeitraum von nur 9 % im Jahr 2002 auf über 45 % in 2012 gesteigert werden. Chinesische Forscher nehmen damit 2012 den ersten Rang im Ländervergleich ein und können bei der eher grundlagenorientierten Forschung zu E-Maschinen alle anderen betrachteten Nationen auf die weiteren Ränge verweisen.

Auf dem zweiten Rang folgt Japan, das mit ca. 18 % Publikationsanteil in 2012 und einem 2002–2012 bei 700 % liegenden Wachstum auch eine starke Publikationsrate und -dynamik vorweisen kann, jedoch bei Weitem nicht die Zahlen Chinas erreicht. Die im Vergleich mit den Weltregionen USA, Deutschland und Frankreich relativ hohe Dynamik resultiert dementsprechend auch in einer Steigerung des Publikationsanteils im Vergleich der Jahre 2002 und 2012: Japanische Forscher konnten insgesamt 5 % Publikationsanteil gewinnen und die USA vom zweiten Platz verdrängen.

Die USA folgen auf dem dritten Rang mit ca. 17 % Marktanteil im Jahr 2012. Bemerkenswert ist, dass die klar führende Position amerikanischer Forscher mit 2002 über 50 % aller Publikationen verloren und ihr Publikationsanteil um über 33 % insbesondere zugunsten Chinas zurückging. Dementsprechend weisen die USA mit nur 180 % Steigerung auch die geringste Dynamik des Publikationswachstums im Bereich eher grundlagenorientierter Forschung zu E-Maschinen auf.

Deutsche und französische Forscher liegen mit 11 % bzw. 10 % Publikationsanteil im Jahr 2012 auf einem ähnlichen Niveau und belegen die letzten Plätze des internationalen Vergleichs. Während Frankreich aber über den Zeitraum insgesamt noch ein relativ hohes Wachstum von 600 % zu verzeichnen hat, verliert Deutschland insgesamt und im Ländervergleich an Dynamik und kann hier nur eine Steigerung von ca. 320 % vorweisen.

Zur Analyse der Wissensbasis im Bereich „Leistungselektronik im Antriebsstrang elektrifizierter Fahrzeugkonzepte“ wurden 2002–2012 insgesamt 1099 wissenschaftliche Publikationen aus Japan, den USA, China, Deutschland und Frankreich identifiziert und ausgewertet (Abb. 7-2).

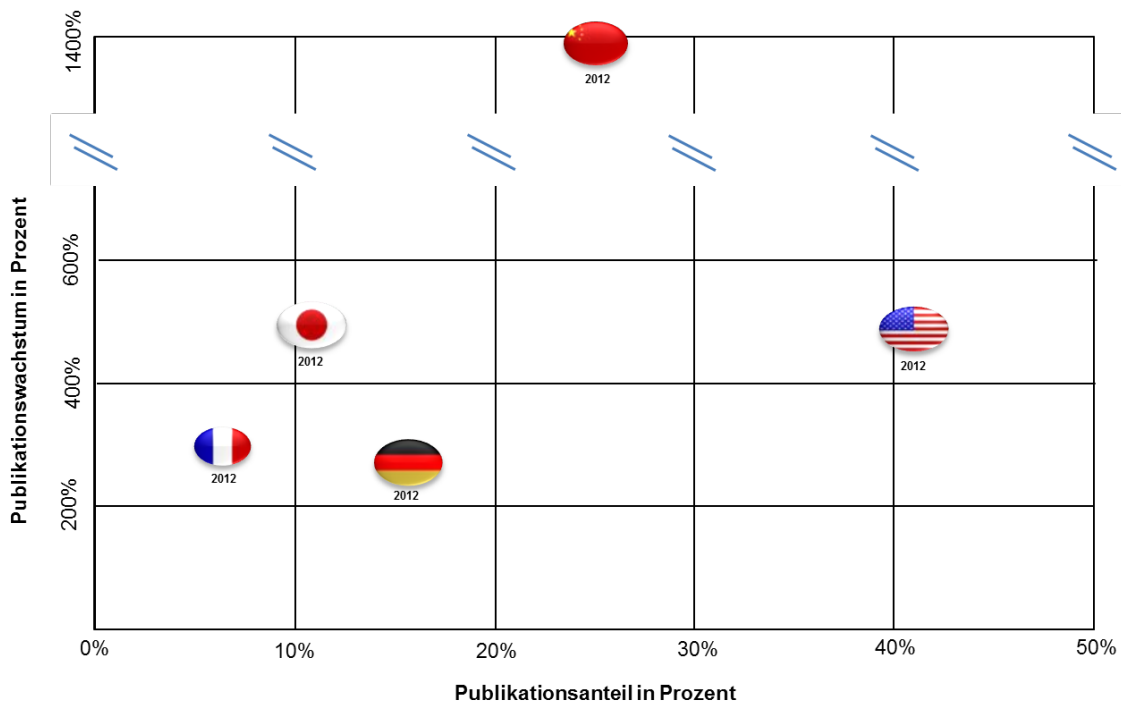


Abb. 7-2 Wissensbasis „Leistungselektronik“ im Ländervergleich, 2002–2012 kumuliert

China weist wie auch bei der Untersuchung zu elektrischen Maschinen die mit Abstand höchste Dynamik im Publikationswachstum auf, sodass auch in diesem Technologiefeld intensive Aktivitäten chinesischer Forscher zu identifizieren sind. Dementsprechend ist auch ein starker Anstieg des chinesischen Publikationsanteils über die Jahre erkennbar, der ausgehend von nur 9 % im Jahr 2002 über 24 % in 2012 erreicht. China schafft es damit, die eigene Wissensbasis über die Jahre kontinuierlich zu erweitern und sich innerhalb einer Dekade vom letzten auf den zweiten Rang vor Frankreich, Deutschland und Japan zu schieben. Das Wachstum des Publikationsoutputs betrug dabei mehr als 1400 %, während das Gesamtwachstum an Publikationen im Bereich Leistungselektronik über alle Weltregionen hinweg nur bei ca. 530 % lag. Bei gleichbleibenden Wachstumsraten ist zu erwarten, dass chinesische Forscher in Zukunft auch die USA überholen und vom ersten Platz verdrängen werden.

Bei den Publikationsanteilen im Jahr 2012 mit Abstand führend sind jedoch die USA, die für 42 % aller wissenschaftlich relevanten Veröffentlichungen im Bereich Leistungselektronik verantwortlich zeichnen. US-amerikanische Forschungsaktivitäten bleiben dabei über den gesamten Zeitraum auf einem hohen Level, verlieren aber kontinuierlich Anteile (2002: 45 %; 2007: 44 %; 2012: 42 %). Das Wachstum der Publikationsrate beträgt ca. 480 %, sodass der absolute Output von 15 im Jahr 2002 auf 73 in 2012 gesteigert werden konnte. Insgesamt konnten US-amerikanische Forscher 460 (ISI-)referierte wissenschaftliche Paper veröffentlichen.

Deutschland folgt auf dem dritten Rang mit ca. 16 % Marktanteil 2012. Bemerkenswert ist, dass über die untersuchte Zeitspanne mehr als die Hälfte des ursprünglich relativ hohen Anteils (ca. 33 % in 2002) verloren wurde, insbesondere zugunsten Chinas. Die Dynamik bei Publikationsschriften im Bereich der Leistungselektronik liegt dementsprechend im Ländervergleich bei nur ca. 250 % und damit hinter allen anderen betrachteten Weltregionen.

Japanische und französische Forscher liegen mit 11 % bzw. 7 % Publikationsanteil im Jahr 2012 auf den letzten Rängen. Während Japan über die Jahre auf niedrigem Niveau sehr konstante Anteile am Publikationsoutput hält, verliert Frankreich wie auch Deutschland über die Hälfte des eigenen Anteils innerhalb einer Dekade. Die Dynamik des Publikationswachstums befindet sich dementsprechend mit 300 % auf einem niedrigen Niveau, jedoch noch vor Deutschland. Japan dagegen kann ein Wachstum von ca. 500 % im selben Zeitraum vorweisen und befindet sich damit auf einem ähnlichen Niveau wie die USA.

Im nachfolgenden Vergleich der technologischen Basis der untersuchten Weltregionen werden die Anteile und das Wachstum der einzelnen internationalen Patentmärkte für den Bereich „Elektrische Maschinen im Antriebsstrang elektrifizierter Fahrzeuge“ gegenübergestellt.

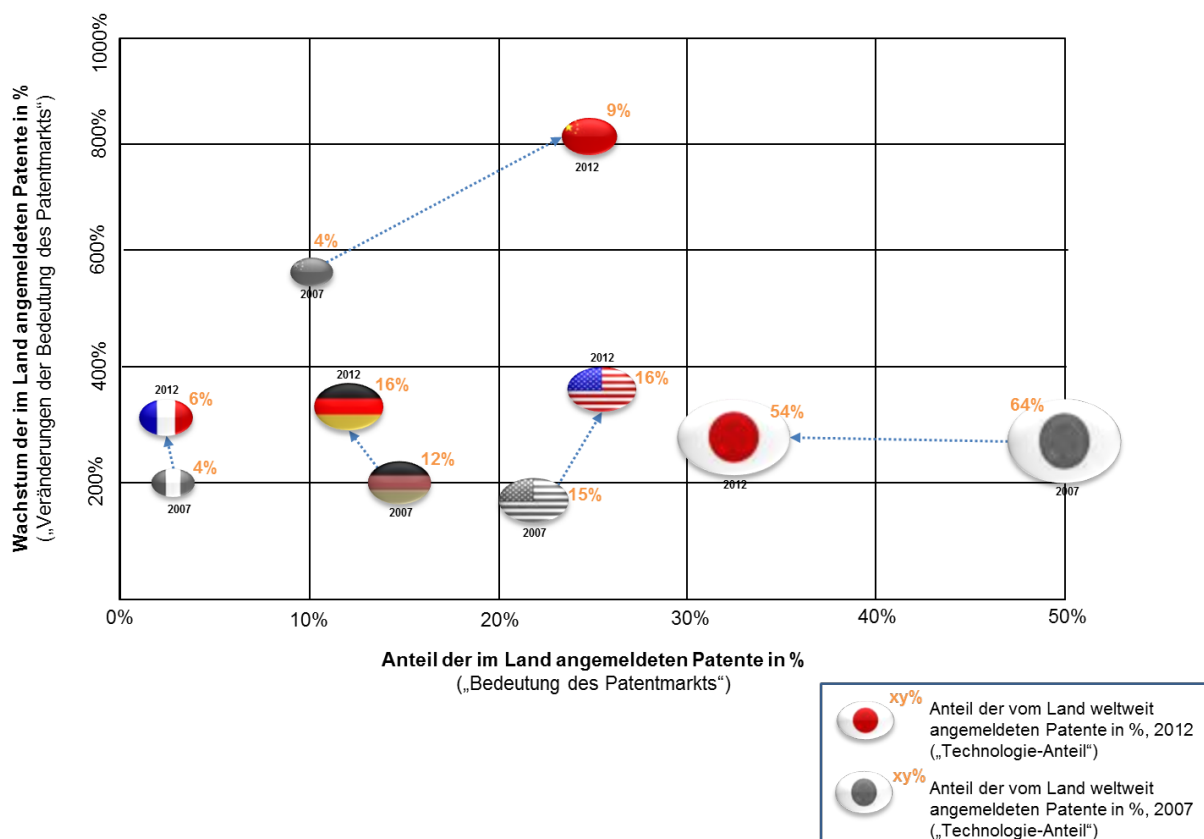


Abb. 7-3 Technologische Basis „Elektrische Maschinen“ im Ländervergleich, 2002–2012 kumuliert

Das „Wachstum des Patentmarkts“ auf der y-Achse zeigt die Steigerung der in Japan, den USA, China, Deutschland und Frankreich angemeldeten Patentschriften über einen Zeitraum von zehn Jahren. Der Fokus der Darstellung liegt auf den Jahren 2007 (mit Basis 2002) und 2012 (mit Basis 2007). Der „Anteil am Patentmarkt“ auf der x-Achse verdeutlicht, wie viel Prozent der Patente im jeweiligen Land angemeldet wurden, um dort das geistige Eigentum zu sichern, und ist dementsprechend ein Indikator für die Bedeutung des jeweiligen Landes

für international tätige Patentanmelder bzw. deren Erfindungen. Die Größe der Landesflaggen veranschaulicht zudem, wie intensiv das jeweilige Land selbst Technologieentwicklung betreibt, gemessen am prozentualen Anteil der in den Jahren 2007 und 2012 von Unternehmen mit dortigem Hauptsitz angemeldeten Patente („Technologie-Anteil“). Die obige Darstellung zeigt also Stand und Dynamik des Markts sowie der Technologie in Kombination.

Im Bereich der elektrischen Maschinen ist Japan sowohl bei den Patentmarktanteilen als auch bei der Technologie klar führend (Abb. 7-3), wobei 2007–2012 Verluste sowohl bei Markt- (x-Achse) als auch Technologieanteilen (Größe der Landesflagge) zu verzeichnen waren. Dennoch war Japan mit über 54 % Anteil an der technologischen Entwicklung auch 2012 Haupttreiber im Bereich Technologie über alle E-Maschinenbauformen hinweg, musste aber einen Rückgang um ca. 10 % im Vergleich zum Jahr 2007 verzeichnen. Dramatischer war der Rückgang der Bedeutung des japanischen Markts für internationale Patentanmelder: Während 2007 noch über 50 % aller Patente im Bereich E-Maschinen in Japan angemeldet wurden, waren es 2012 nur noch ca. 37 %. Japan ist dennoch insgesamt sowohl bei der Markt- als auch der Technologieanalyse führend. Das Marktwachstum blieb im Vergleich der letzten fünf bzw. zehn Jahre relativ konstant bei jeweils ca. 220 %.

Die USA konnten den Anteil ihres IP-Markts im Vergleich der Jahre 2007 und 2012 um ca. 5 % auf 27 % steigern, während das Wachstum der auf dem Markt angemeldeten Patente von 160 % auf über 370 % anstieg. Somit ist sowohl eine verstärkte Relevanz als auch Dynamik des US-Markts bei der Sicherung technologischer Entwicklungen im Bereich E-Maschine für elektrifizierte Pkw zu identifizieren. Der Anteil US-amerikanischer Institutionen an der Technologieentwicklung blieb dagegen über die Jahre auf einem relativ konstanten Level und stieg um nur 1 % von 15 % in 2007 auf 16 % in 2012.

Deutsche Unternehmen konnten den Patentanteil an der Technologieentwicklung von 12 % im Jahr 2007 um 4 % bis 2012 steigern, sodass Deutschland mit den USA auf der zweiten Position hinter Japan rangiert. Allerdings hat die Bedeutung des deutschen IP-Markts für Patentanmelder innerhalb dieses Zeitraums abgenommen, sodass nur noch knapp 13 % aller Patente auf dem deutschen Markt angemeldet wurden, ein Rückgang um ca. 3 %. Die Dynamik des Marktwachstums steigerte sich im untersuchten Zeitraum allerdings von ca. 200 % über die Jahre 2002 bis 2007 bis auf ca. 300 % im Zeitraum 2007 bis 2012.

Der französische Markt nimmt im Rahmen dieser Untersuchung und mit Fokus auf elektrischen Maschinen eine eher untergeordnete Rolle ein. Sowohl technologieseitig (4 % Anteil in 2007, 6 % in 2012) als auch bei der Marktrelevanz (konstant ca. 2 %) konnten nur relativ geringe Anteile erreicht werden.

Bemerkenswert ist die Entwicklung in China im Vergleich der Jahre 2007 und 2012: Der chinesische Markt für IP erreichte ausgehend von 10 % Marktanteil im Jahr 2007 über 26 % im Jahr 2012, eine Steigerung von mehr als 16 %. Gleichzeitig nahm die Dynamik im Marktwachstum über diesen Zeitraum weiter zu und erreichte ausgehend von der schon sehr hohen Basis von über 530 % im Jahr 2007 insgesamt 815 % Steigerung im Jahr 2012. Aber nicht nur marktseitig konnte China die Zahlen im Vergleich der Weltregionen steigern, auch technologisch erreichte das Land eine Erhöhung des Outputs der im eigenen Land entwickelten Patente um über 100 % (von 4 % in 2007 auf über 9 % in 2012), sodass China 2012 den dritten Platz hinter Japan, Deutschland und den USA einnahm.

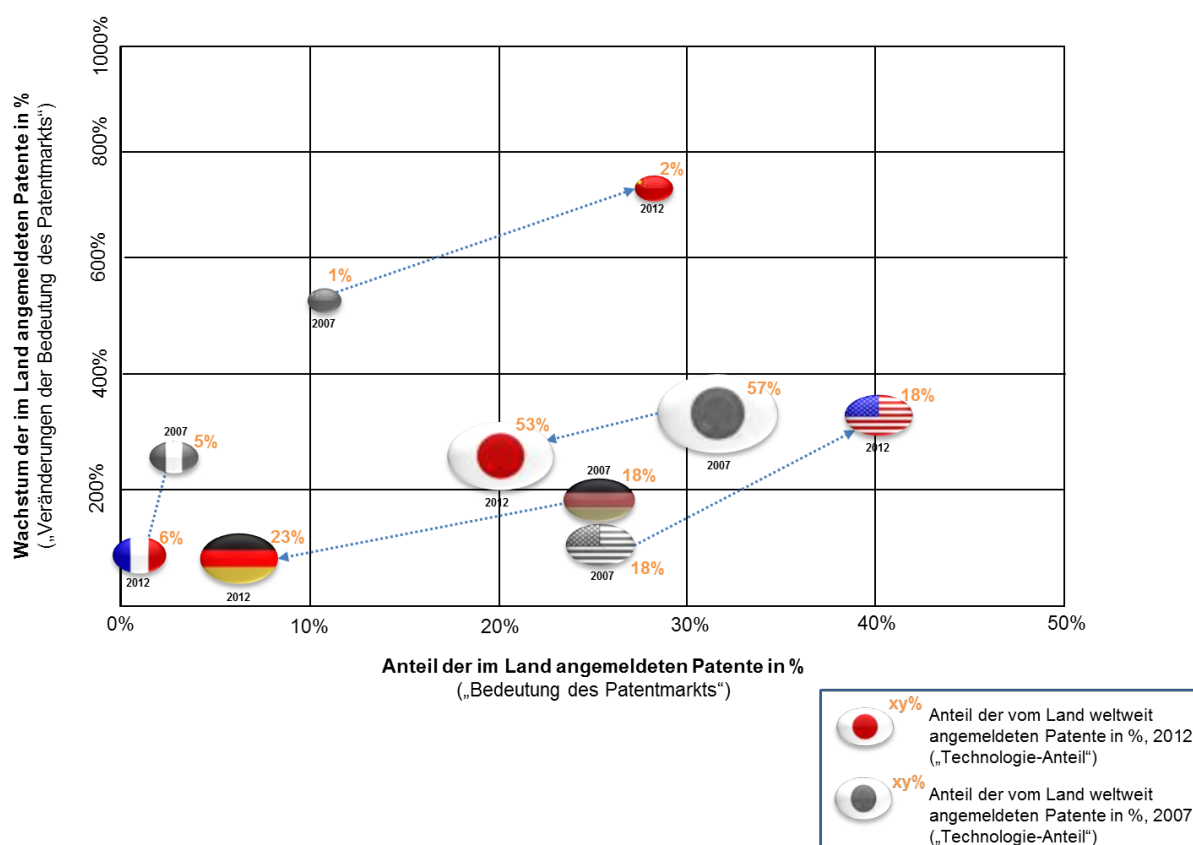


Abb. 7-4 Technologische Basis „Leistungselektronik“ im Ländervergleich, 2007–2012 kumuliert

Analog zur aufgezeigten Analyse bei elektrischen Maschinen sollen im Folgenden auch Patentmarktanteil, -wachstum und Technologieanteil im Bereich Leistungselektronik im Antriebsstrang elektrifizierter Fahrzeuge im internationalen Vergleich dargestellt werden.

Im Bereich der Leistungselektronik zeichnet sich ein etwas anderes Bild als bei den elektrischen Maschinen (Abb. 7-4). Japan ist zwar auch hier mit Abstand auf Rang 1 bei der technologischen Entwicklung einzuordnen und für die Entwicklung von über 53 % aller Patente im Jahr 2012 verantwortlich, verlor aber große Marktanteile 2007–2012, sodass nur noch 17 % aller Patente im Jahr 2012 auf dem japanischen Markt für IP angemeldet wurden. Auch die Dynamik des Marktwachstums sank im gleichen Zeitraum und 2012 konnten nur noch ca. 160 % Wachstum (auf Basis 2007) verzeichnet werden, ein Verlust von über 60 %.

Die USA konnten die technologische Basis über den Zeitraum der letzten fünf bzw. zehn Jahre konstant bei 18 % halten und befanden sich damit 2012 hinter Japan und Deutschland auf dem dritten Rang. Der Anteil der auf dem US-Markt angemeldeten Patente stieg dagegen signifikant und erreichte ausgehend von 30 % in 2007 fast 40 % 2012. Die Dynamik im Sinne des Marktwachstums stieg ebenfalls stark an und erreichte knapp 380 % in 2012, eine Erhöhung um insgesamt 210 %. Somit ist in den USA zwar eine stagnierende Situation bei technologischen Entwicklungsaktivitäten im Bereich Leistungselektronik festzustellen, jedoch konnten Bedeutung und Wachstum des US-amerikanischen Patentmarkts – insbesondere im Vergleich zum japanischen Markt – deutlich erhöht werden.

Deutsche Unternehmen konnten ihren Patentanteil von 18 % im Jahr 2007 auf über 23 % im Jahr 2012 steigern und damit die USA als Technologietreiber von Rang 2 verdrängen. Aller-

dings hat die Bedeutung des deutschen IP-Markts für Patentanmelder innerhalb dieses Zeitraums stark abgenommen, sodass nur noch knapp 7 % aller Patente auf dem deutschen Markt angemeldet wurden, ein Rückgang um ca. 17 %. Das Marktwachstum verlor im untersuchten Zeitraum ebenfalls an Dynamik und erreichte 2012 nur noch 73 %, während im Vergleich der Jahre 2002 und 2007 noch ca. 260 % Wachstum erzielt worden waren.

Der französische Markt nimmt im Rahmen dieser Untersuchung bei der Leistungselektronik sowohl markt- als auch technologieeitig eine eher untergeordnete Rolle ein. Während französische Unternehmen den Anteil an technologischen Entwicklungen leicht steigern konnten (5 % Anteil in 2007; 6 % in 2012), sank die Bedeutung des französischen Markts innerhalb desselben Zeitraums von 3 % auf nur noch 1,5 % Marktanteil. Gleichzeitig nahm auch das Wachstum der auf dem französischen IP-Markt angemeldeten Patente ab und erreichte ausgehend von 250 % in 2007 (mit Basis 2002) nur noch 130 % in 2012 (mit Basis 2007).

Bemerkenswert ist wie bei den elektrischen Maschinen die Entwicklung in China auch im Bereich Leistungselektronik im Vergleich der Jahre 2007 und 2012: Der chinesische Patentmarkt erreichte 2012 über 32 % Marktanteil und nahm damit bei der Bedeutung für internationale Patentanmelder den zweiten Rang hinter den USA ein. Im Zeitraum 2007 bis 2012 entspricht dies einer Steigerung um 21 %. Die Dynamik des Marktwachstums nahm dabei über die Jahre konstant zu und erreichte über 750 % Steigerung im Jahr 2012 im Vergleich zum Basisjahr 2007. Der Anteil an der technologischen Entwicklung im Bereich Leistungselektronik war in China dagegen vernachlässigbar, sodass im Jahr 2007 nur 1 % aller Patente von chinesischen Unternehmen angemeldet wurden. 2012 waren es 2 %.

7.1.2 Forschungsförderung im Vergleich

Die Regierungen der meisten betrachteten Länder haben in den vergangenen Jahren Strategiepapiere und Entwicklungspläne zur Förderung der Elektromobilität veröffentlicht. Eines der zentralen Ziele ist meist die technologische Weiterentwicklung der Elektromobilität, welche die heimische Wirtschaft im globalen Wettbewerb stärken soll. Die gezielte öffentliche Förderung von Forschung, Entwicklung und Demonstration soll zu dieser Technologieentwicklung beitragen. Neben der direkten finanziellen Unterstützung zielt die Politik meist auch auf eine Vernetzung der Forschungsaktivitäten zwischen Forschungseinrichtungen und Industrie. Während in einigen Ländern eigene Förderlinien für FuE zur Elektromobilität eingerichtet wurden, werden andernorts innovative bzw. emissionsmindernde Fahrzeugtechnologien insgesamt gefördert – was die Abgrenzung der Fördermittel für Elektromobilität schwierig macht.

Im Rahmen der Studie wurden zum Vergleich der internationalen Forschungsförderung diverse Quellen herangezogen. Differenzen in der thematischen Zuordnung der Förderprojekte, in der Abdeckung der Forschungsthemen sowie hinsichtlich der Zeithorizonte bringen Einschränkungen bei der Vergleichbarkeit mit sich. Studien, die die Forschungsförderung über verschiedene Länder hinweg mittels einheitlichen Methodiken vergleichen, lassen überregionale Vergleich und die Einordnung der Position Deutschlands im internationalen Vergleich zu.

In der Vergangenheit (2008 bis 2012) haben insbesondere die USA und China stark in die Entwicklung der Elektromobilität investiert und tätigten die höchsten öffentlichen Ausgaben in Forschung, Entwicklung und Demonstration (EVI 2013). Dabei entfällt in China ein Großteil

der Ausgaben auf die Umsetzung des zentralen Demonstrationsprojekts „10 cities/1000 vehicles“. In den anderen Ländern überwog die Förderung von FuE gegenüber der Bezuschussung von Demonstrationsprojekten. Die Gesamtausgaben Japans und Deutschlands waren 2008–2011 ähnlich, wobei Deutschland eine starke Steigerung der Investitionen aufwies, während Japan bereits 2008 eine relativ hohe Summe investierte (siehe Abschnitt 5.3.2).

Bezüglich der derzeit angekündigten bzw. laufenden FuE-Förderung bis 2016 investiert China am stärksten und hat bereits für den Zeitraum 2016 bis 2020 ein Budget von 1,2 Milliarden Euro vorgesehen (siehe Abschnitt 5.2.5).

Nachfolgend werden die Förderbudgets für FuE zu Elektrofahrzeugen und Komponenten der jeweiligen Hauptfördergeber in den Fokusländern gegenübergestellt und zum Teil auf jährliche Daten heruntergebrochen, um Vergleichbarkeit zu gewährleisten:

- In Deutschland standen dem BMBF als Hauptfördergeber im Bereich der technologischen Forschung für 2012 ca. 115 Mio. Euro zur Weiterentwicklung der Elektromobilität zur Verfügung. Neben der Förderung von FuE sind darin auch Ausgaben zur Aus- und Weiterbildung sowie für Demonstrationsvorhaben, wie im Rahmen der Schaufenster Elektromobilität, enthalten. Gleichzeitig wurden Forschung und Demonstration von Elektromobilität von anderen Ministerien (BMU, BMVBS, BMWi) mit ca. 105 Mio. Euro gefördert (BMF 2013).
- In den USA wurden 2012 vom Department of Energy als Hauptförderer der Forschung im Bereich Elektromobilität über 150 Mio. USD (ca. 116 Mio. Euro) für Forschung zu Elektrofahrzeugen ausgegeben (Regionalstudie USA).
- Im chinesischen Fünf-Jahres-Plan (2011 bis 2015) waren 364 Mio. Euro für die Forschung im Bereich Elektromobilität vorgesehen, was einer jährlichen Summe von ca. 73 Mio. Euro entspricht (CATARC 2013).
- In Japan stehen laut NEDO (2013) jährlich ca. 50 bis 60 Mio. Euro Forschungsbudget für Elektromobilität zur Verfügung (Regionalstudie Japan).
- Im indischen Fünf-Jahres-Plan (2012 bis 2017) sind ca. 89 Mio. Euro für die Forschung und Entwicklung von Elektrofahrzeugen und Hybriden vorgesehen, was einem jährlichen Budget von ca. 18 Mio. Euro entspricht (Regionalstudie Indien).
- In Frankreich wurden 2009 120 Mio. Euro über vier Jahre für FuE sowie Demonstrationsprojekte und Ladeinfrastruktur zur Verfügung gestellt (IEA-HEV 2013).
- In Großbritannien stehen 95 Mio. Euro für Forschung und Entwicklung zwischen 2012 und 2015 zur Verfügung (entspricht einem jährlichen Budget von ca. 24 Mio. Euro) (IEA-HEV 2013).

Europaweite Analysen (vgl. European Commission 2013b) zeigen Deutschland als stärksten Investor in FuE im Bereich Elektromobilität unter den europäischen Staaten. Zudem ist die Beteiligung deutscher Institutionen an europäischen Forschungsprojekten beispielsweise im Rahmen der Green-Cars-Initiative sehr umfangreich (siehe Abschnitt 5.2.2).

Insgesamt standen deutsche FuE-Investitionen zur Elektromobilität zunächst hinter den Förderungen in Japan oder den USA zurück, wurden nach der Verabschiedung des „Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität“ (Bundesregierung 2009) aber bedeutend gesteigert. Auf Basis derzeit laufender und angekündigter Förderprogramme steht Deutschland im internati-

onalen Vergleich sehr gut da und weist ein unter anderem auch höheres FuE Budget als Japan auf.

Diese Tendenzen bei der Entwicklung der FuE-Förderung spiegeln sich zum Teil auch in den Ergebnissen zur Patent- und Publikationsanalyse wider. China und die USA haben bereits seit den frühen 2000er Jahren die FuE-Förderung im Bereich Elektromobilität deutlich gesteigert. China konnte den Anteil an FuE-Aktivitäten bei Technologien im Bereich des Antriebsstrangs – insbesondere bei E-Maschinen – über die letzten Jahre signifikant steigern und hatte 2012 bei wissenschaftlichen Publikationen mit Abstand sowohl den größten Anteil als auch das dynamischste Wachstum. Zusätzlich hat China bei E-Maschinen auch in der anwendungsorientierten Forschung deutlich aufgeholt und nimmt nach Japan, Deutschland und den USA auch bei den Patentanteilen mittlerweile den dritten Rang ein, mit weiterhin im Ländervergleich sehr hohem Wachstum. Angesichts kontinuierlicher Steigerung des FuE-Budgets in China und der angekündigten Investitionen für den Zeitraum 2016 bis 2020 ist ein Rückgang des Wachstums der untersuchten FuE-Leistungsindikatoren in naher Zukunft nicht zu erwarten.

Die USA konnten sich bei der Leistungselektronik und bei E-Maschinen auf konstant hohem Level und unter den Top 3 der führenden Weltregionen halten. Bei Leistungselektroniktechnologien besitzen die USA trotz leichter Verluste weiterhin über 40 % Anteil an wissenschaftlichen Publikationen im Jahr 2012 und weisen eine konstant hohe Wachstumsdynamik auf, sind damit insgesamt allen anderen Ländern überlegen. Der Bereich Leistungselektronik ist weiterhin einer der drei Förderschwerpunkte des US Department of Energy (siehe Abschnitt 5.3.2).

Die technologische Basis Deutschlands – gemessen an den im Besitz deutscher Unternehmen befindlicher Patentanteile – ist im internationalen Vergleich bei Entwicklungen im Bereich E-Motoren und Leistungselektronik bereits auf relativ hohem Niveau und konnte 2007–2012 gesteigert werden, sodass Deutschland – jedoch mit großem Abstand – hinter Japan auf dem zweiten Rang und mit den USA auf ähnlichem Niveau eingeordnet werden kann. Die Anteile Deutschlands an wissenschaftlichen Publikationen liegen jedoch auf weit geringerem Niveau, sodass die eher grundlagenorientierte Forschung insbesondere im Bereich E-Maschine im internationalen Vergleich mit nur 10 % Anteil unterrepräsentiert ist. Bei Publikationsaktivitäten im Bereich Leistungselektronik befindet sich Deutschland hinter den USA und China auf dem dritten Rang wieder, weist jedoch das geringste Wachstum über die Jahre auf. Die nationalen Strategien zur Weiterentwicklung der Elektromobilität und die Steigerung der Investitionen in FuE zur Elektromobilität in Deutschland seit Beginn dieses Jahrzehnts schlagen sich somit bislang nur bedingt in der technologischen Basis und den wissenschaftlichen Publikationen nieder. Übliche Zeitspannen zwischen Aufnahme von Forschungstätigkeiten und der wissenschaftlichen Veröffentlichung der Ergebnisse bzw. Patentanmeldung berücksichtigend könnte von derzeitigen oder kürzlich abgeschlossenen Vorhaben eine zusätzliche Dynamik erwartet werden. Auffallend ist die zurückgehende Bedeutung des deutschen Patentmarkts für internationale Patentanmelder bei E-Maschinen und Leistungselektronik im Vergleich der Jahre 2007 und 2012, insbesondere zugunsten des chinesischen Patentmarkts.

In Japan ist das zur Verfügung gestellte Förderbudget seit 2007 auf mittlerem Level konstant geblieben, was sich letztlich in Verlusten bei den Patentanteilen – und damit Aktivitäten zur technologischen Weiterentwicklung – bei E-Maschinen und Leistungselektronik nieder-

schlägt. Trotzdem ist Japan bezüglich Antriebsstrangtechnologien nach wie vor mit Abstand führend.

Zu den zentralen Forschungsthemen gehört in allen Untersuchungsregionen die Batterieforschung, häufig sowohl zur Lithium-Ionen-Technologie als Post-Lithium-Batterien betreffend. Japan, Deutschland und die USA verfolgen beide Forschungsstränge, wobei Deutschland sich hinsichtlich der Lithium-Ionen-Technologie eher auf FuE im Bereich der Batterieproduktion sowie Sicherheitsaspekte konzentriert. Auch die USA versuchen durch Forschungsförderung und Industriekredite eine heimische Batterieproduktion aufzubauen. Experten sehen Japan in der Lithium-Ionen-Technologie führend, jedoch weniger stark aufgestellt in der Grundlagenforschung und Entwicklung innovativer Materialien. Daneben sind weitere Technologien im Bereich Antriebsstrang wie Leistungselektronik, E-Maschinen und Thermomanagement, aber auch der Leichtbau zentrale Forschungsthemen in allen Regionen. Auch zukünftig bedeutsame Themen wie die Reduktion des Seltenerdmetallbedarfs und Batterierecycling oder -weaternutzung sind z. B. in der japanischen Forschungsstrategie verankert, jedoch findet bislang nur wenig Forschung dazu statt (Regionalstudie Japan). Im Bereich Netzintegration wird in Deutschland sowohl zum netzverträglichen Laden geforscht als auch zur Rückspeisung („Vehicle-to-grid“). In Japan gibt es Regierungs- sowie Industrieaktivitäten insbesondere im Bereich Vehicle-to-grid bzw. zu dessen Vorstufe Vehicle-to-home. Hier steht allerdings nur ein geringes Forschungsförderbudget zur Verfügung (siehe Abschnitt 5.2.4).

Aufstrebende Nationen wie China und Indien sind weniger aktiv in der Grundlagenforschung und Entwicklung neuer Materialien und Technologie, sondern versuchen gezielt Kompetenzen hinsichtlich bestehender Technologien aufzubauen und diese an lokale Bedingungen und Einsatzzwecke anzupassen. Diese auf Anpassung und schrittweise evolutionäre Weiterentwicklung bezogene Technologiestrategie zeigt sich beispielsweise bei den FuE-Aktivitäten im Bereich der elektrischen Maschinen, wo China bereits signifikante Anteile besitzt. Beide Länder beabsichtigen, mittels Allianzen, Lizenzvergaben, Akquisitionen und Joint Ventures die Entwicklung von FuE-Kapazitäten voranzutreiben.

Neben der originären Forschungsförderung vergeben insbesondere die USA, China und Frankreich gezielt vergünstigte Industriekredite bzw. Zuschüsse zum Aufbau von FuE- und Herstellungskapazitäten in den Betrieben.

Anwendungsorientierte Forschung und Tests finden auch in Demonstrationsprojekten statt. Insbesondere China, Japan und Deutschland haben große nationale Programme zur Demonstration von Elektrofahrzeugen implementiert. Auch in Frankreich machen Demonstrationsprojekte einen bedeutenden Anteil der Investitionen in die Weiterentwicklung der Elektromobilität aus.

7.2 Fahrzeuge und Technologien

M. Klötzke (DLR), H. Hüging (WI), O. Soukup (WI)

Die ersten Elektrofahrzeuge gab es zwar schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts, doch die derzeitige Entwicklung nahm ihren Anfang zum Ende der 1990er Jahre. 1997 brachte Toyota mit dem Prius I das erste Großserienmodell mit hybridem Antriebsstrang heraus. Seitdem entwickeln weitere Hersteller Fahrzeuge mit elektrifizierten Antriebssträngen und bringen sie auf den Markt. Eine deutliche Zunahme vorgestellter Fahrzeuge (Konzept-, Forschungs- und Serienfahrzeuge) ist ab 2002 zu sehen. Neben neuen elektrifizierten Fahrzeugen werden auch dazugehörige Technologien für den automobilen Einsatz (weiter-)entwickelt.

7.2.1 Fahrzeuge

Gemessen an der Anzahl der entwickelten Konzeptfahrzeuge, der Prototypen und der angekündigten sowie eingeführten elektrischen Serienfahrzeuge in den Bereichen HEV, PHEV und BEV stammen die im Bereich der Elektromobilität aktivsten Automobilhersteller aus Japan (Toyota, Honda, Lexus, Nissan, Mitsubishi und Subaru), Deutschland (Volkswagen, Audi, Mercedes-Benz, BMW, Porsche), Frankreich (Peugeot, Citroën, Renault), Südkorea (Kia, Hyundai) und den USA (Ford, Opel, Chevrolet) (siehe Unterkapitel 4.1). Die führenden Hersteller kommen insgesamt vor allem aus traditionellen Standorten der Automobilindustrie. Jedoch wurde in diesen Ländern in der Vergangenheit auch stark in die FuE-Förderung im Bereich Elektrofahrzeuge investiert (siehe Abschnitt 5.3.2). Dabei setzen die meisten internationalen Automobilhersteller auf ein breites Portfolio mit unterschiedlichen Elektrifizierungsgraden. Auch chinesische Hersteller sind, häufig in Joint Ventures mit westlichen Herstellern, insbesondere im Bereich BEV aktiv, entwickeln ihre Fahrzeuge aber hauptsächlich für den heimischen Markt (vgl. Kapitel 5). Technologisch zeigen die elektrifizierten Fahrzeuge chinesischer Hersteller ein Defizit gegenüber denen internationaler OEM aus Japan, den USA oder Europa.

Insgesamt wurden zwischen 2006 und 2013 87 äußerst diversifizierte neue Serienfahrzeuge in den Bereichen BEV und PHEV vorgestellt. Aktivitäten verschiedener Hersteller sowie die Modellvielfalt werden von Experten als wichtiger Faktor für die Marktentwicklung eingeschätzt, da potenziellen Nutzern ein breites Fahrzeugangebot präsentiert und verdeutlicht werden kann, dass es sich bei der Elektrifizierung des Antriebsstrangs nicht um die Einzelstrategie weniger Hersteller handelt (Klötzke et al. 2014a).

Der Vergleich der Marktanteile der Fahrzeugneuzulassungen im Jahr 2013 zeigt, dass Modelle heimischer Hersteller in den meisten Fällen auch die heimischen Märkte dominieren. Gemessen am prozentualen Anteil des PEV-Gesamtabsatzes in Deutschland waren 2013 unter den fünf erfolgreichsten Modellen drei Modelle deutscher OEM (Smart Fortwo Electric Drive, BMW i3 und Opel Ampera). Insgesamt machten die Modelle deutscher Hersteller über 40 % der in Deutschland neuzugelassenen PEV aus. Das erfolgreichste PEV-Modell in Deutschland war der Smart Fortwo Electric Drive (22 %), in Frankreich der Renault Zoe (63 %). Gemeinsam mit dem französisch-italienischem Joint Venture Bolloré-Bluecar entfielen ca. 70 % der Verkäufe auf heimische Marken. Auch in den USA dominierten mit ca. 60 % der Verkäufe 2013 heimische Hersteller den PEV-Markt. Dabei war der Chevrolet Volt (24 %) das erfolgreichste Modell vor dem Nissan LEAF (23 %) und dem heimischen Tesla Model S

(20 %). In Japan ist die Dominanz heimischer Marken am deutlichsten: Bei 98 % der im Jahr 2013 verkauften PEV handelt es sich um Modelle von Nissan, Mitsubishi oder Toyota. Dabei ist der Nissan Leaf mit 44 % das erfolgreichste Modell. In Norwegen als Land ohne eigenen Hersteller von Elektroautos dominierte ebenfalls der Nissan Leaf (58 %). Wegen der spezifischen Rahmenbedingungen in China werden dort fast ausschließlich heimische Modelle abgesetzt. 2013 dominierte der günstige Kleinwagen Chery QQ3 (46 %) (siehe Abschnitt 5.3.3). Beim internationalen Vergleich der Marktanteile der Neuzulassungen lässt sich außerdem ermitteln, dass die erfolgreichsten Fahrzeugtypen auf den jeweiligen heimischen Märkten reine batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) sind. Die einzige Ausnahme bildet hier der Chevrolet Volt (REEV) in den USA.

In Europa liegt der Fokus bei der Entwicklung und Konzeption neuer elektrifizierter Fahrzeuge auf den Segmenten A, B und C, auf SUV und Geländewägen sowie insbesondere Sportwagen. In Amerika werden vor allem SUV und Geländewägen elektrifiziert, eine Fahrzeugkategorie, die sich in den USA großer Beliebtheit erfreut. Die übrigen Fahrzeuge verteilen sich recht gleichmäßig auf die kleinen und mittleren Segmente sowie die Sportwagen. In Asien zeigt sich ein ähnliches Bild wie in Europa. Auch hier werden viele Fahrzeuge aus den Segmenten A, B und C elektrifiziert sowie SUV und Geländewägen. Sportwagen machen hier allerdings keinen so großen Anteil aus wie in Europa.

In allen drei Regionen machen, ähnlich wie bei den abgesetzten Fahrzeugen, batterieelektrische Fahrzeuge den größten Anteil elektrifizierter Konzepte aus, gefolgt von Hybridfahrzeugen. In Asien liegen diese, gemessen am Anteil an den Fahrzeugkonzepten, nur knapp hinter den BEV. In Europa kommen dicht dahinter Plug-in-Hybride, die in Asien keinen so großen Anteil haben. In den USA sind die übrigen Fahrzeuge, die nicht rein batterieelektrisch angetrieben werden, gleichmäßig über die verschiedenen hybriden Ausprägungen verteilt.

Auch der Ansatz des Fahrzeugkonzepts variiert international. Während deutsche Hersteller ihren Schwerpunkt auf Fahrzeuge im Conversion Design, sprich bestehende Fahrzeuge mit einem elektrifizierten Antriebsstrang legen, folgen Fahrzeuge aus Frankreich, Japan und Korea deutlich häufiger dem Ansatz des Purpose Design, werden also von Anfang an als elektrifiziert konzipiert.

Japan ist einer der führenden Produktionsstandorte für elektrifizierte Fahrzeuge und zeigt seit 2009 ein starkes Wachstum in der Produktion. 2012 wurden dort insgesamt 1,3 Millionen elektrifizierte Fahrzeuge, überwiegend HEV, produziert, wobei BEV und PHEV mit jeweils 30 000 bzw. 35 000 produzierten Einheiten einen geringeren Teil ausmachen. Im Vergleich dazu ist die Produktion elektrifizierter Fahrzeuge mit 20 000 Fahrzeugen im Jahr 2012 in Deutschland unterentwickelt. Darunter waren nur ca. 300 BEV. Ein positiver Trend ist jedoch zu beobachten, denn 2013 wurden bereits ca. 33 000 elektrifizierte Fahrzeuge produziert, davon ca. 3000 BEV. Die geringen Produktionszahlen in Deutschland sind auch darauf zurückzuführen, dass einige elektrifizierte Modelle deutschen Hersteller im Ausland montiert werden. So wird der Smart fortwo electric drive in Frankreich hergestellt und der Opel Ampera in den USA. Japan hingegen profitiert auch von der Herstellung des Peugeot Ion und des Citroën C-Zero in den japanischen Mitsubishi-Werken. In China, wo nur heimische Elektrofahrzeuge Subventionen erhalten, wurden 2013 ca. 14 000 batterieelektrische Fahrzeuge produziert. In China sowie in den USA wird gezielt der Aufbau von Produktionskapazitäten für Fahrzeuge bzw. Komponenten von der Regierung gefördert.

Neben spezifischen Standortbedingungen, wie der Kopplung der Subventionen an die inländische Fertigung in China, scheint der Produktionsstandort elektrifizierter Modelle aufgrund bislang meist geringer Stückzahlen häufig durch bestehende Strukturen bestimmt zu werden. Wenige weltweit sehr erfolgreiche Modelle werden an verschiedenen Standorten produziert bzw. endmontiert. Beispielsweise wird der Nissan Leaf in Japan, den USA und England hergestellt, um den amerikanischen bzw. den europäischen Markt zu beliefern.

Wie die Auswertung der Fahrzeugdatenbank zeigt, gewinnen PHEV zunehmend an Bedeutung. Von 2008 bis 2012 konnte bei den jährlich neu vorgestellten Fahrzeugkonzepten eine deutliche Dominanz von BEV festgestellt werden. Zwar machen diese bei den einzelnen Antriebsstrangkonzepthen nach wie vor den größten Teil aus, jedoch geht ihre absolute Anzahl deutlich zurück, während Fahrzeuge mit hybriden Antriebssträngen zunehmen (siehe Unterkapitel 4.1). Am Beispiel des aktuell größten Produktionslands Japan lässt sich diese Tendenz verdeutlichen: Während 2009–2011 deutlich mehr BEV als PHEV produziert wurden, ging die BEV-Produktion 2012 gegenüber dem Vorjahr zurück, während sich die PHEV-Produktion vervierfachte (siehe Abschnitt 5.3.3). Die befragten japanischen Experten sehen zukünftig PHEV insbesondere im Bereich der größeren Fahrzeugklassen, während bei den Kleinwagen BEV weiterhin eine größere Rolle spielen werden. Wenn die Kombination aus Elektroantriebsstrangsystem und Verbrennungsmotoren kompakter gebaut würde, könnten Plug-in-Hybride auch eine Option für kleinere Fahrzeugklassen sein. Nutzerbefragungen zeigen heute meist eine Präferenz für PHEV gegenüber BEV. Die heutigen Zulassungszahlen von BEV und PHEV lassen kaum Rückschlüsse über die zukünftige Bedeutung der einzelnen Fahrzeugkonzepte zu. Derzeitige technologiespezifische Subventionen bzw. an Batteriegröße oder CO₂-Emissionen gebundene Anreize sowie die bislang begrenzte Modellverfügbarkeit können als überlagernde Einflussfaktoren für den derzeitigen Absatz an BEV und PHEV gesehen werden.

Einige der zuvor genannten Erkenntnisse zum Status quo elektrifizierter Fahrzeuge und möglicher zukünftiger Entwicklungen finden sich auch in den Annahmen der Materialintensitätsanalyse wieder:

Analog zum Schwerpunkt der deutschen Hersteller auf Elektrofahrzeuge im Conversion Design wird auch in der Modellierung angenommen, dass die konventionellen und elektrifizierten Fahrzeuge auf einer identischen Plattform aufbauen. Diese Annahme wird vereinfachend auch für die weltweiten Fahrzeugflotten übernommen, die Materialinventare von Fahrzeugen im Purpose Design werden nicht explizit berücksichtigt.

Des Weiteren wurde bereits festgestellt, dass BEV und PHEV zwar die wichtigsten Konzepte elektrifizierter Fahrzeuge der letzten Jahre sind, Rückschlüsse über die zukünftige Bedeutung verschiedener Konzepte können hieraus aber nicht unmittelbar abgeleitet werden. Um dieser Unsicherheit zu begegnen, wurden daher zukünftige Fahrzeugflotten unter Berücksichtigung fünf elektrischer Antriebskonzepte abgebildet.

Auch die Auswahl des mittleren Fahrzeugsegments (C/D) als Referenzsegment der MAIA harmoniert mit den zuvor bzw. in Abschnitt 4.1.3 geschilderten Ergebnissen: Zwar zeigt die Auswertung der DLR-Fahrzeugdatenbank, dass ein Schwerpunkt elektrifizierter Neufahrzeuge in Europa auf noch kleineren Fahrzeugen (A, B, C) liegt. Eine besonders große Diversifizierung der elektrischen Antriebskonzepte zeigt sich jedoch vor allem in den Segmenten C und D (

Abb. 4-4). Ein Großteil der in der MAIA berücksichtigten Antriebskonzepte ist in aktuellen Fahrzeugen dieser Segmente bereits vertreten. Auch die Einordnung in Gewichtsklassen zeigt, dass die meisten aktuellen Neufahrzeuge in die Klasse 1001–1500 kg Leergewicht fallen (Abb. 4-12). Dieser Klasse sind auch die Typfahrzeuge der MAIA mit einem Leergewicht zwischen 1290 und 1450 kg in 2010 zuzuordnen.

Die ebenfalls hinsichtlich elektrifizierter Neufahrzeuge in Europa relevanten Segmente F, J, M und S eignen sich aufgrund extremer Charakteristika (z. B. hinsichtlich Motorisierung und Gewicht) nicht, um gesamte Fahrzeugflotten und ihren Ressourcenbedarf vereinfacht abzubilden. Sie wurden deshalb bei der Definition von Typfahrzeugen im Rahmen der MAIA nicht berücksichtigt.

7.2.2 Technologien

Während zu Beginn des Booms bei Elektrofahrzeugen um das Jahr 2005 viele der vorgestellten Fahrzeuge mit Nickel-Metall-Hydrid-Batterien ausgestattet waren, konnten in den Folgejahren Lithium-Ionen-Batterien an Bedeutung gewinnen. Seit 2007 wird die Mehrheit der jährlich neu vorgestellten Fahrzeuge mit dieser Batterietechnologie ausgestattet. Jedoch hielten auch Fahrzeuge mit Nickel-Metall-Hydrid-Batterien lange Zeit einen konstanten Anteil. Seit 2010 geht dieser aber kontinuierlich zurück. Während verschiedene Ausprägungen von Blei-Batterien immer wieder vereinzelt in Fahrzeugkonzepten vorkommen, haben sonstige Energiespeicher, wie Schwungradspeicher, Super Caps oder Redox-Flow-Batterien, bisher einen flächendeckenden Zugang zu neuen Fahrzeugkonzepten, auch in Forschungs- oder Versuchsfahrzeugen, nicht gefunden. Mit steigendem Elektrifizierungsgrad zeigt sich ein noch deutlicheres Bild. Während bei Mild- und Voll-Hybriden noch ein signifikanter Anteil mit anderen Technologien als Lithium-Ionen-Batterien zu finden ist, spielen diese bei PHEV und BEV keine nennenswerte Rolle.

Der bei aktuellen Fahrzeugen zu beobachtende Trend zur Lithium-Ionen-Technologie spiegelt sich auch in den Annahmen der Materialintensitätsanalyse wider. Dort wird davon ausgegangen, dass alle batterieelektrischen Antriebskonzepte Batteriespeicher auf Lithium-Mangan-Oxid-Basis nutzen (siehe Abschnitt 6.3.4). Hinsichtlich der Batteriekapazität der Antriebskonzepte BEV, PHEV und HEV stimmen die Auswertungen der DLR-Fahrzeugdatenbank (Abschnitt 4.1.3) und die der MAIA zugrunde liegenden Annahmen in (Huss et al. 2013) überein. Weitere im Rahmen der Technologieauswahl als relevant eingestufte Batterietechnologien (Lithium-Schwefel und Lithium-Luft gemäß (Fan et al. 2013, Sauer & Thielmann 2013) konnten mangels Daten beziehungsweise Materialinventare nicht berücksichtigt werden. Hier zeigt sich, gerade vor dem Hintergrund der Lithiumverfügbarkeit, zusätzlicher Daten- und Forschungsbedarf.

Eine noch klarere Tendenz zeigt sich bei Technologien für elektrische Maschinen. Hier sind so gut wie alle Fahrzeuge mit elektrischer Maschine mit permanenterregten Synchron-Maschinen (PSM) ausgestattet. Lediglich bei batterieelektrischen Fahrzeugen konnten einige Konzepte gefunden werden, in denen andere elektrische Maschinen zum Einsatz kommen. Dies wird mit zwei Vorteilen der permanenterregten elektrischen Maschine erklärt. Zum einen weist dieser Maschinentyp eine höhere Effizienz als fremderregte Maschinen auf, zum anderen besitzt er in der Regel eine höhere Leistungsdichte. Auch die Untersuchung der Forschungsaktivitäten legt den Schluss nahe, dass sich dieser Trend in den nächsten Jahren

weiter fortsetzen wird. Die Patentanalysen, die ein Indiz für die Aktivitäten der Industrie und somit für die Technologien der nächsten und übernächsten Generation sein können, zeigen, dass ein Großteil der angemeldeten Patente permanenterregte Synchronmaschinen beinhaltet. Eine leichte Abkehr von dieser Entwicklung ist erst bei den Publikationsanalysen zu erkennen. Hier konnten verstärkte Aktivitäten in Richtung alternativer Bauweisen identifiziert werden.

Die zuvor beschriebene Dominanz von PSM, aber auch die Möglichkeit eines zukünftigen Anstiegs von ASM wird ebenfalls im Rahmen der MAIA für die Ermittlung des Ressourcenbedarfs der Szenarien berücksichtigt (siehe Kapitel 6). Dort wird angenommen, dass alle modellierten elektrischen Antriebe zunächst ausschließlich mit permanenterregtem Synchronmotor ausgestattet sind. Basierend auf den Expertenbefragungen in Abschnitt 4.1.3 wird davon ausgegangen, dass ab 2030 neben dem PSM der Asynchronmotor (ASM) eine zunehmende Rolle als Motortechnologie spielen wird. Seine Anteile steigen in den berücksichtigten Basisszenarien auf 25 % nach 2040. In einem Alternativszenario zum optimierten Umgang mit kritischen Ressourcen (siehe Unterkapitel 6.9) wird von einem deutlich schnelleren Anstieg des ASM-Anteils ausgegangen.

Die Skalierung der Systemkomponente elektrische Maschine bei der MAIA erfolgte über das Gewicht basierend auf den EU-Car-Parametern. Der Parameter Leistung der elektrischen Maschine konnte bei der MAIA nur wenig berücksichtigt werden. Notter et al. (2010) geben für das zugrunde liegende Materialinventar der PSM als Leistung 55 kW an (bei einem Gewicht von 60 kg). Die Bandbreite der Leistungsangaben aus (Huss et al. 2013) (z. B. PSM-Leistung, Peak variiert zwischen 24 und 90 kW) bzw. aus den Auswertungen aus der DLR-Fahrzeugdatenbank (Leistungen der E-Maschinen der Segmente C/D mit einer Fahrzeugmasse von ca. 1000 bis 1500 kg variieren zwischen ca. 25–150 kW) konnte im Rahmen dieser Studie nicht abgebildet werden.

Die elektrischen Maschinen bilden neben der Leistungselektronik die Hauptkomponenten mit hohem Bedarf an Seltenerdmetallen. Das Materialinventar des eingesetzten PSM umfasst einen Neodym-Eisen-Bor-Magnet, der Ferrite auf Neodymbasis aufweist. Aufgrund der Betriebstemperaturen des Elektromotors wird zur Steigerung der Temperaturstabilität in der Regel Dysprosium beigemischt. Durch den vermehrten Einsatz elektrisch erregter Asynchronmotoren ohne Permanentmagnete lässt sich dieser Bedarf senken.

Auswirkungen auf den Bedarf potenziell kritischer Rohstoffe, die sich aus den getroffenen Annahmen zum Einsatz von Li-Ion-Batterien und permanenterregten Maschinen in der MAIA ergeben, werden in Unterkapitel 7.4 zusammengefasst.

Auch im Bereich der Leistungselektronik wurde die Patent- und Publikationsanalyse (neben der Ableitung eines Länderrankings) genutzt, um technologische Schwerpunkte der Forschung und Entwicklung zu identifizieren. Dabei wurden Patentanmeldungen zu alternativen Halbleitermaterialien mit hoher Temperaturbeständigkeit durchgeführt. Mögliche Alternativen zur bisher verbreiteten Nutzung monokristallinen Siliziums stellen beispielsweise Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) dar. Es konnte gezeigt werden, dass zwischen 2000 und 2012 der Patentoutput im Bereich SiC um den Faktor 7 sowie im Bereich GaN insgesamt um den Faktor 8 gesteigert wurde (Abschnitt 4.2.1).

Dies kann als Indiz dafür gewertet werden, dass SiC und GaN als Halbleitermaterialien in der Leistungselektronik elektrifizierter Fahrzeuge zukünftig an Bedeutung gewinnen. Der Einsatz

beider Materialien wird daher auch in der Materialintensitätsanalyse berücksichtigt (siehe Kapitel 6). Dabei wird angenommen, dass SiC nicht nur in der Leistungselektronik, sondern auch als Teil des Separators der Li-Ionen-Batterien Verwendung findet (Notter et al. 2010). Hinsichtlich der Galliumhalbleiter-Technologie wurde festgestellt, dass die zur Bestimmung von Halbleiter-Materialinventaren hauptsächlich genutzte Quelle (Notter et al. 2010) im Vergleich zu anderen Literaturangaben einen vergleichsweise geringen Bedarf kritischer Rohstoffe ausweist. Um den zukünftigen Galliumbedarf der Leistungselektronik nicht zu unterschätzen, wurde alternativ ein höherer Ga-Bedarf nach Buchert et al. (2011) berücksichtigt.

Die Verfügbarkeit von SiC und GaN, die neben der Leistungselektronik auch in LEDs eingesetzt werden, wird hier als gesichert betrachtet: SiC ist eine wichtige technische Keramik, Feuerfestmaterial und Schleifmittel und wird in großen Mengen hergestellt. Die Herstellung des als Halbleiters eingesetzten SiC erfolgt mit anderen Verfahren (CVD-Verfahren) als die des keramischen SiC, die Rohstoffverfügbarkeit ist jedoch grundsätzlich unkritisch. GaN, das zum Teil auf SiC-Substraten eingesetzt wird, ist aufgrund des Ga-Anteils grundsätzlich kritischer zu bewerten, jedoch ist auch der erwartete Ga-Bedarf gut zu decken.

7.3 Marktentwicklung

T. Koska (WI), H. Hüging (WI), D. Kreyenberg (DLR), M. Klötzke (DLR)

7.3.1 Status quo der Marktentwicklung

Der globale Absatz von Elektrofahrzeugen ist in den letzten Jahren stark gestiegen. Während im Jahr 2009 weniger als 50 000 extern aufladbare Elektrofahrzeuge (PEV) verkauft wurden, lag der Absatz 2013 bei über 200 000 Fahrzeugen und hat sich 2011–2013 jährlich verdoppelt (siehe Abschnitt 5.3.4). Der größte Markt für PEV sind derzeit die USA, wo 2013 mit fast 100 000 Fahrzeugen fast jedes zweite PEV abgesetzt wurde. Die EU ist mit ca. 55 000 Fahrzeugen vor Japan (ca. 30 000 PEV) und China (ca. 20 000 PEV) der zweitgrößte Markt. Die einzelnen EU-Staaten stellen vergleichsweise kleine Märkte (unter 10 000 Fahrzeuge in 2013) dar. Die Niederlande mit über 20 000 neu zugelassenen PEV im Jahr 2013 bilden hier eine Ausnahme. Deutschland liegt mit 7500 PEV-Neuzulassungen deutlich hinter den Niederlanden, aber auch hinter Norwegen und Frankreich. Indien hat im Bereich der elektrifizierten Pkw bislang keinen ausgeprägten Markt; nur vereinzelt werden dort PEV abgesetzt.

Hinsichtlich Marktreife, gemessen am Anteil neu zugelassener PEV an den gesamten Pkw-Neuzulassungen, bestehen deutliche regionale Unterschiede. Norwegen und die Niederlande haben mit einem PEV-Marktanteil von über sieben Prozent bzw. über fünf Prozent einen deutlichen Vorsprung vor den anderen Regionen, in denen der Marktanteil im Jahr 2013 ausnahmslos unter einem Prozent lag. Mit einem Marktanteil von 0,25 Prozent liegt Deutschland hinsichtlich der Marktreife hinter den USA, Japan und Frankreich.

7.3.2 Marktperspektiven in Deutschland

Die Marktentwicklung für elektrifizierte Pkw in Deutschland wurde im Hinblick auf verschiedene Aspekte im vorliegenden Projekt berücksichtigt. Im Rahmen des Technologiemonitorings (Kapitel 4) wurde der Einfluss verschiedener technologischer Entwicklungen auf die Marktentwicklung mithilfe eines Neuwagenmarktmodells untersucht. Ziel war es, die Auswirkungen technologischer Entwicklungen auf den Fahrzeugabsatz und -bestand realistisch abzuschätzen. Damit trägt das Projekt zu einem erweiterten Verständnis der Einflussfaktoren und möglicher Marktperspektiven für Elektrofahrzeuge in Deutschland bei. Vorherige Studien haben bereits andere Einflussfaktoren, wie ausgeprägte Änderungen in regulatorischen oder wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, untersucht. Ein Überblick über die existierenden Szenarien zur Marktdurchdringung wurde im Rahmen der Regionalstudien in Kapitel 5 gegeben. Für die Materialintensitätsanalyse und die Bewertung von Knappheitsfragen (Kapitel 6) wurden maximale und minimale Elektromobilitätsszenarien genutzt, um darzustellen, welche Auswirkungen eine sehr niedrige oder eine sehr hohe Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen auf die Treibhausgasemissionen, den abiotischen Materialbedarf sowie die Nachfrage nach kritischen Rohstoffen hat.

Unterkapitel 4.4 betrachtete mithilfe eines Neuwagenmarktmodells die Auswirkungen verschiedener Änderungen der Rahmenbedingungen hinsichtlich der Entwicklung der Fahrzeugtechnologie auf den Neuwagenmarkt in Deutschland. Ein besonderer Fokus lag auf dem Absatz von Elektrofahrzeugen. Daraus resultierte mithilfe eines Bestandsmodells die Zahl

zugelassener elektrifizierter Fahrzeuge in Deutschland. Die in Unterkapitel 4.4 dargestellten Untersuchungsergebnisse legen nahe, dass erst deutlich nach 2020 Fahrzeuge mit der Option, die Batterie an der Steckdose aufzuladen, signifikant im Fahrzeugbestand zu finden sein werden. Bis Ende 2020 werden lediglich knapp über 290 000 solcher Fahrzeuge im deutschen Fahrzeugbestand prognostiziert (Abb. 7-5). Hybridfahrzeuge ohne Plug-in machen in den Ergebnissen allerdings schon im Jahr 2020 ca. 5 % des Fahrzeugbestands aus. Nach dem derzeitigen Stand werden diese für die Erreichung des Ziels, eine Millionen Elektrofahrzeuge bis 2020 auf der Straße zu haben, jedoch nicht berücksichtigt. Bis Ende des Jahres 2026 wird das Ziel von 1 Million Fahrzeugen erreicht. Bis 2030 kann diese Zahl dann jedoch deutlich gesteigert werden und es befinden sich schon mehr als zwei Millionen Elektrofahrzeuge im deutschen Pkw-Bestand. Zu diesem Zeitpunkt verfügt jeder vierte Pkw in Deutschland über einen elektrifizierten Antriebsstrang, der es erlaubt, zumindest kurze Strecken rein elektrisch und damit lokal emissionsfrei zu fahren (HEV). Bis 2040 trifft das auf über die Hälfte der Fahrzeuge zu, wobei ein Viertel der Fahrzeuge auch über die Option verfügt, die Batterie an einer Ladestation aufzuladen (PEV).

Alternativszenarien V21	Charakteristika
Alternativszenario 1 (STROM V21 A1)	Weltweit erfährt die Elektromobilität ein erhöhtes Wachstum, wodurch die Komponentenkosten schneller sinken und höhere Produktionskapazitäten für Elektrofahrzeuge zur Verfügung stehen.
Alternativszenario 2 (STROM V21 A2)	Weltweit wächst die Elektromobilität langsamer als im Basis-Szenario unterstellt, wodurch geringere Produktionskapazitäten zur Verfügung stehen und die Kosten für Komponenten - langsamer sinken.
Alternativszenario 3 (STROM V21 A3)	Gegenüber den Annahmen zur technologischen Entwicklung der Fahrzeuge im Basisszenario wird eine verdoppelte Effizienzsteigerung der elektrischen Komponenten des Antriebsstrangs unterstellt.

Tab. 7-1 Überblick über die STROM V21 Szenarien

Durch ein beschleunigtes globales Elektromobilitätswachstum – unterstellt wird, dass sich die Produktionskapazitäten für Elektrofahrzeuge schneller erhöhen und die Preise für z. B. Batterien und elektrische Maschinen schneller sinken – können höhere Bestandszahlen erreicht werden. Die Effekte aus dieser Änderung sind in den ersten Jahren kaum spürbar. Zwar kann die Anzahl der elektrifizierten Fahrzeuge bis 2020 um weitere 15 % gegenüber dem Basisszenario gesteigert werden allerdings machen hier Fahrzeuge ohne extern aufladbare Batterie den größten Anteil aus. Die Anzahl von PEV kann lediglich um 6 %, bis 2040 gegenüber dem Basisszenario um gut 12 % gesteigert werden. Unterstellt man hingegen eine langsamere Verbreitung von Elektrofahrzeugen weltweit, geht bis 2020 die Anzahl elektrifizierter Fahrzeuge gegenüber dem Basisszenario um 17 % zurück. Fahrzeuge mit Stecker erfahren einen Rückgang von 11 %.

Eine erhöhte Steigerung der Effizienz des elektrischen Antriebsstrangs gegenüber den Annahmen im Basisszenario kann zu einem größeren Marktanteil von PEV führen. Bis 2020 kann deren Anzahl um 10 % gegenüber dem Basisszenario gesteigert werden. Allerdings geht das auf Kosten der hybridelektrischen Fahrzeuge ohne externe Lademöglichkeit für die Batterie. Wird die Entwicklung auch über 2020 hinaus fortgeführt und die Effizienz der elektrischen Komponenten des Antriebsstrangs auch gegenüber dem Basisszenario weiter erhöht, können bis 2030 16 % mehr Plug-in-Fahrzeuge im Bestand vorhanden sein als zum selben Zeitpunkt im Basisszenario. Insbesondere können auch batterieelektrische Fahrzeuge von dieser Entwicklung profitieren und ihre Anzahl bis 2030 gegenüber dem Basisszenario um mehr als ein Viertel zunehmen, sodass in diesem Jahr mehr als eine Millionen batterieelektrische Fahrzeuge im Bestand zu finden sind. 2020 sind es selbst mit optimistischen Annahmen zur technischen Entwicklung und damit einer beschleunigten Steigerung der Antriebsstrangeffizienz lediglich knapp über 60 000 batterieelektrische Fahrzeuge auf deutschen Straßen.

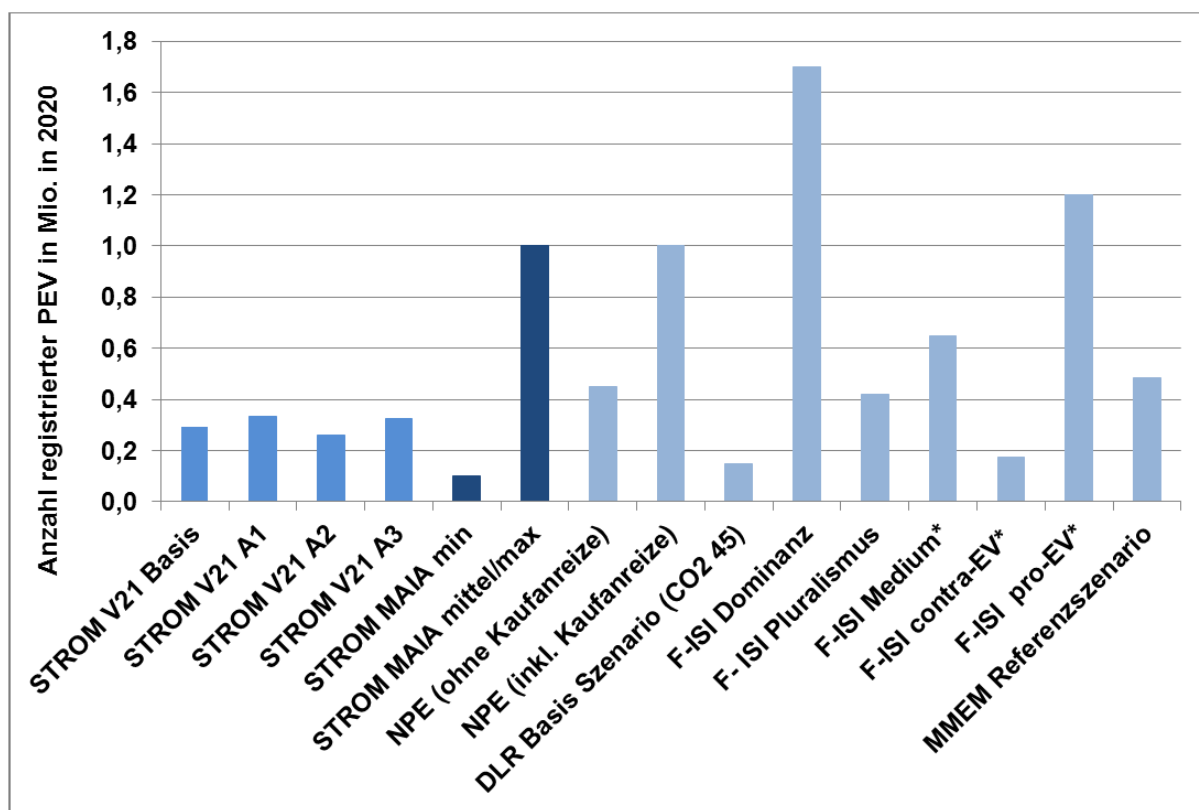


Abb. 7-5 Anzahl registrierter PEV in Deutschland in 2020 nach verschiedenen Studien und Szenarien

Quelle: eigene Darstellung nach Brokate et al. 2013, ESMT 2011, NPE 2011b, Shell 2009, Wietschel und Dalinger 2008, Plötz et al. 2013 (für ergänzende Informationen zu den Szenarien siehe Abschnitt 5.2.1)

Dass in Zukunft der Anteil elektrifizierter Fahrzeugkonzepte sowohl im Neuwagenmarkt wie auch im Fahrzeugbestand stetig steigen wird, prognostizieren alle STROM-Vektor21-Szenarien. Allerdings kann die Geschwindigkeit nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden. Während die verschiedenen Parameter der Fahrzeugtechnologieentwicklung mittel- und langfristig zu deutlichen Unterschieden in der Marktdurchdringung führen, haben sie kurzfristig (d. h. bis 2020) nur einen relativ geringen Einfluss auf den prognostizierten PEV-

Fahrzeugbestand (siehe Abb. 7-5). Studien, die starke Differenzen in ökonomischen und regulatorischen Rahmenbedingungen betrachten, zeigen auch bis 2020 deutliche Unterschiede im Bestand an Elektrofahrzeugen in der deutschen Flotte (siehe Abb. 7-5/Unterkapitel 5.3.4). Die Studien variieren in ihrer Methodik, Ausrichtung, ihren Annahmen und betrachteten Einflussfaktoren, sodass die Vergleichbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt ist. Hinsichtlich des PEV-Bestands kommen die meisten Studien zum Ergebnis, dass das Regierungsziel von einer Millionen PEV bis 2020 nicht erreicht wird bzw. nur durch Implementierung starker Anreize zu erreichen ist, wie beispielsweise im NPE-Szenario durch die Einführung zusätzlicher Kaufanreize (NPE 2011). Im F-ISI-pro-EV-Szenario wird das Ziel ohne zusätzliche Anreize, aber unter der Annahme deutlicher Mehrpreisbereitschaft, einer Senkung der Infrastrukturkosten und einer vorteilhaften Preisentwicklung für Batterien, Kraftstoffe und Strom erreicht (Plötz et al. 2013).

In Deutschland werden elektrifizierte Fahrzeuge in Zukunft zunehmend an Bedeutung gewinnen. Ohne zusätzliche Maßnahmen zur Kostensenkung dieser Fahrzeuge wird diese Entwicklung allerdings eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen – mit einer signifikanten Anzahl von Plug-in-Fahrzeugen im deutschen Pkw-Bestand ist dann erst nach 2020 zu rechnen.

Die zu erwartenden Auswirkungen einer zunehmenden Bedeutung von Elektrofahrzeugen in Deutschland auf den Ressourcenbedarf sowie die Treibhausgasemissionen werden in Unterkapitel 7.4 zusammengefasst.

7.3.3 Marktperspektiven international

In der Rückschau erreichte der deutsche Pkw-Markt mit 42 Mio. zugelassenen Pkw im Jahr 2010 nach den USA, Japan und China den viertgrößten Landesbestand in der Welt. Vom weltweiten Bestand von 842 Mio. Pkw im Jahr 2010 waren in der Bundesrepublik Deutschland jedoch nur 5 % zugelassen. Die Analysen der IEA zur weltweiten Pkw-Bestandsentwicklung bis zum Jahr 2050 ergab ein deutliches Wachstum für Indien und China, vor allem ausgelöst durch Bevölkerungswachstum und steigende Einkommen in diesen Ländern. Die Pkw-Bestände in Europa, den USA und Japan bleiben bis zum Jahr 2050 auf nahezu konstantem Niveau.

Gleichzeitig wird die voranschreitende Urbanisierung verkehrsbedingte Umweltwirkungen weiter verschärfen, sodass mit einem breiteren Angebot an alternativen Antrieben diese früher oder später auch einen Absatzmarkt finden werden (HWWI 2009).

Von der IEA entwickelte Szenarien untersuchen den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors und wurden für Analysen im Rahmen des Projekts zugrunde gelegt. Das IEA-2DS-Szenario basiert auf einer Reihe zusätzlicher Maßnahmen im Verkehrssektor, die eine mit dem 2-°C-Ziel konsistente CO₂-Reduktion sicherstellen sollen (Fulton 2014). Effizienten Fahrzeugen wie Elektrofahrzeugen wird dabei eine entscheidende Rolle zugeschrieben. Im IEA-2DS-Szenario erreichen PEV im Jahr 2020 global einen Marktanteil von ca. 6,8 % unter den Neuzulassungen (Abb. 7-6). Höhere Marktanteile (über 10 %) werden für Japan und China erwartet, während die USA und Indien unter dem globalen Durchschnitt liegen. EU-Länder wie Deutschland, Frankreich, UK und Italien liegen mit ca. 7,5 % leicht über dem globalen Durchschnitt. Eine deutliche Steigerung des globalen Absatzes

von Elektrofahrzeugen wird in dem Szenario bis 2030 mit dann ca. 30 % Marktanteil an den Neuzulassungen erreicht.

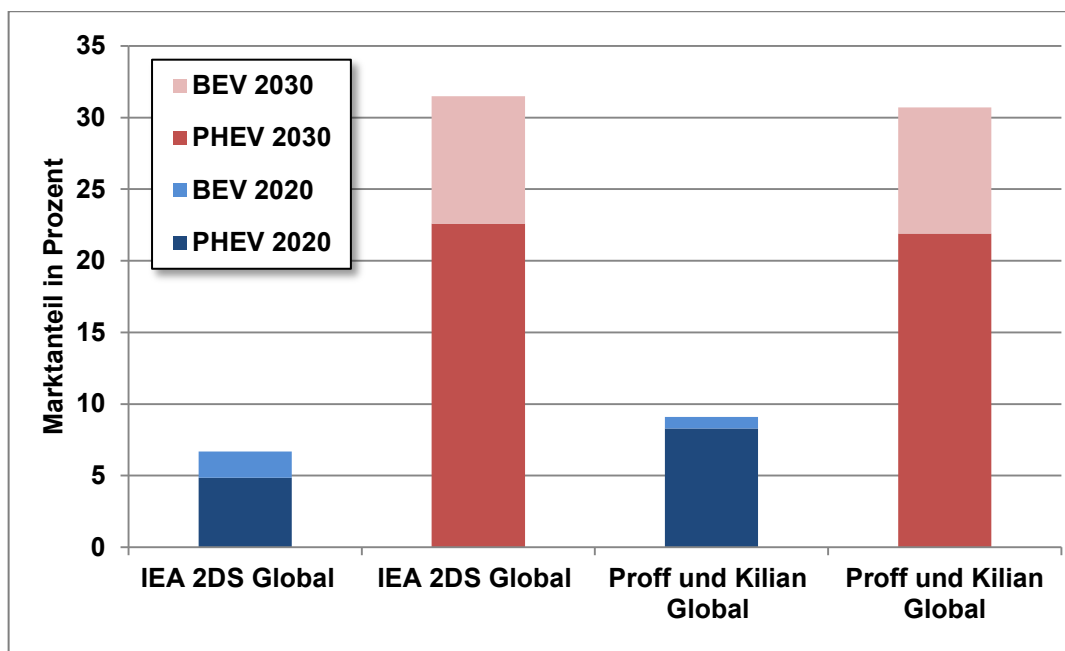


Abb. 7-6 Prognostizierter Marktanteil von BEV und PHEV (inkl. REEV) in 2020 und 2030 verschiedener Studien in Prozent

Quelle: eigene Darstellung nach Proff, Kilian 2012 – Base Case Szenario, Fulton 2014 – IEA-2DS-Szenario

Wie schnell sich welche Antriebe an welchen Märkten durchsetzen werden, ist derzeit bis zum Jahr 2050 nur schwierig vorherzusehen. In dieser Arbeit wurden deshalb die zwei Pkw-Bestandsszenarien aus der IEA Energy Technology Perspectives 2012 (IEA 2012:443) um zwei weitere Szenarien ergänzt, um eine breitere Sicht auf die möglichen Folgen der Motorisierungsoptionen für die Ressourcenverfügbarkeit zu bekommen (siehe Abschnitt 6.5.5). Die vier Szenarien gehen dabei analog der IEA von einem Pkw-Bestand von 1,8 bzw. 2,3 Milliarden Pkw in 2050 aus. Für beide Pkw-Bestände wird dann ein hoher Anteil (60 %) von PHEV, REEV, BEV und FCEV und ein niedriger Anteil (9 %) bis zum Jahr 2050 angenommen.

Unterkapitel 7.4 fasst die zu erwartenden Auswirkungen dieser Verkehrsszenarien auf den verursachten Ressourcenbedarf und die Emissionen von Treibhausgasen zusammen.

7.3.4 Einflussfaktoren auf die Marktentwicklung

Finanzielle Anreize und Marktentwicklung

Der hohe Preis von Elektrofahrzeugen ist eines der wesentlichen Hemmnisse für eine größere Nutzerakzeptanz und damit eine stärkere Marktentwicklung (Sierzchula et al. 2014). Zugleich verhindert ein ausbleibendes Marktwachstum, dass aufgrund der Massenfertigung die Komponenten- und Fahrzeugpreise sinken. Um die Entwicklung eines Massenmarkts zu fördern, hat die Mehrzahl der betrachteten Länder Steuernachlässe oder direkte Subventionen für den Kauf von Elektrofahrzeugen eingeführt. Deren Höhe wird je nach Land unterschiedlich bemessen: In den USA liegt sie abhängig von der Batteriekapazität bei max. 5400 Euro, in Japan werden zwei Drittel der Preisdifferenz zu konventionellen Pkw, aber maximal

6300 Euro gezahlt. Ein ähnlich hoher Zuschuss wird in Großbritannien (gekoppelt an den Fahrzeugpreis) sowie in Frankreich (gestaffelt nach CO₂-Emission, de facto nach BEV und PHEV/REEV) gewährt. Sehr hohe Subventionen je Fahrzeug werden in Norwegen gewährt. Der Nachlass auf die extrem hohe Kfz-Zulassungssteuer beträgt bereits bei kleinen BEV mehr als 10 000 €, hochmotorisierte größere BEV profitieren noch deutlicher. Insgesamt weisen BEV in Norwegen günstigere Gesamtkosten (TCO) als vergleichbare konventionelle Fahrzeuge auf. Eine solche Überkompensation der Mehrkosten gelingt ansonsten nur in Dänemark für BEV und in den Niederlanden für PHEV, während in anderen Ländern die Kostendifferenz nur mehr oder weniger stark verringert, aber nicht aufgehoben wird.

Die vergleichende Analyse der Regionalstudien hat ebenso wie andere Untersuchungen (ICCT 2014, Sierzchula et al. 2014) eine deutliche Korrelation zwischen der Höhe von Kaufanreizen und dem Marktanteil von xEV an den gesamten Neuzulassungen eines Landes belegt. Abb. 7-7 zeigt den Zusammenhang zwischen Marktanteil und Höhe der Förderung: Insbesondere in Norwegen und den Niederlanden, wo BEV bzw. PHEV günstiger als konventionelle Vergleichsfahrzeuge sind, entwickelt sich der Markt rapide. Andererseits wird deutlich, dass der Preis nicht der einzige Einflussfaktor ist: Trotz relativ hoher Subventionen in Großbritannien bleibt ein Marktwachstum dort vorerst aus.

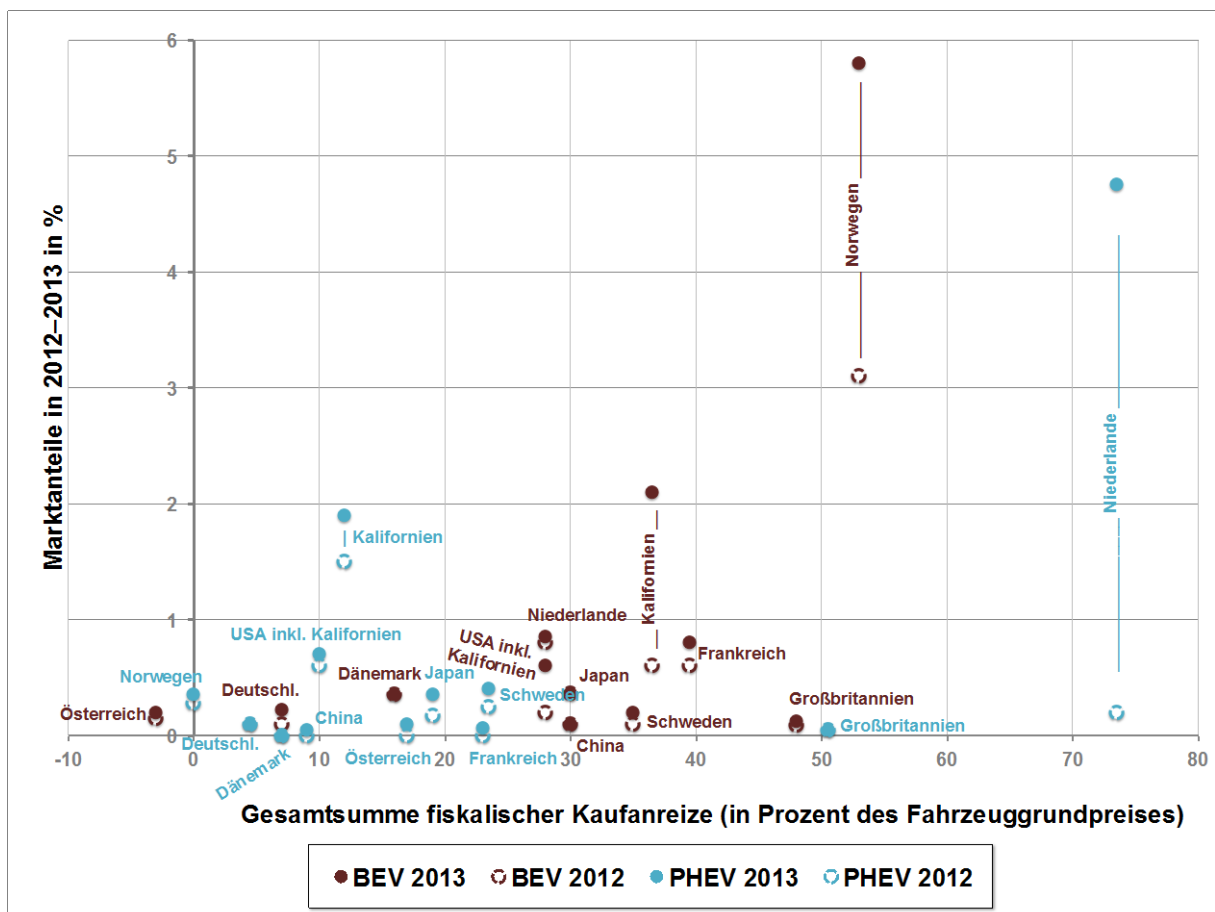


Abb. 7-7 Kaufanreize (als Anteil des Fahrzeuggrundpreises) für BEV und PHEV im Vergleich zu Marktanteilen 2012 und 2013 für ausgewählte Länder

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von ICCT 2014

Infrastrukturverfügbarkeit

Aufgrund ihrer beschränkten Reichweite sind die Nutzungsmöglichkeiten von Elektrofahrzeugen limitiert. Ein dichtes und verlässlich verfügbares Ladeinfrastrukturnetz kann dazu beitragen, das Problem der begrenzten Reichweite zu kompensieren.

Die öffentlich geförderte Entwicklung der Infrastruktur erfolgte in den meisten betrachteten Ländern parallel zur FuE-Förderung sowie Gewährung von Kaufanreizen für xEV. Dabei wird der Aufbau von Stationen zum einen in räumlich begrenzten Gebieten im Rahmen von Modellprojekten oder Demonstrationsvorhaben gefördert, insbesondere in Deutschland, Japan, China oder Großbritannien. Zum anderen werden Subventionen für den Aufbau öffentlicher, z. T. auch privater Infrastruktur vergeben, etwa in den USA, Japan, Großbritannien oder Norwegen. Betrachtet man den Zusammenhang zwischen der Dichte der Ladeinfrastruktur und dem Marktanteil von Elektrofahrzeugen, fällt Norwegen mit einer (bezogen auf die Einwohner, nicht auf die Fläche) sehr hohen Netzdichte und einem sehr hohen Marktanteil auf. Für die anderen Länder sind allerdings keine klaren Korrelationen erkennbar. Entscheidender als die Dichte der Ladeinfrastruktur dürften Struktur des Infrastrukturnetzes sowie Zugänglichkeit der Stationen verschiedener Anbieter zur Entstehung eines verlässlichen Ladernetzes beitragen.

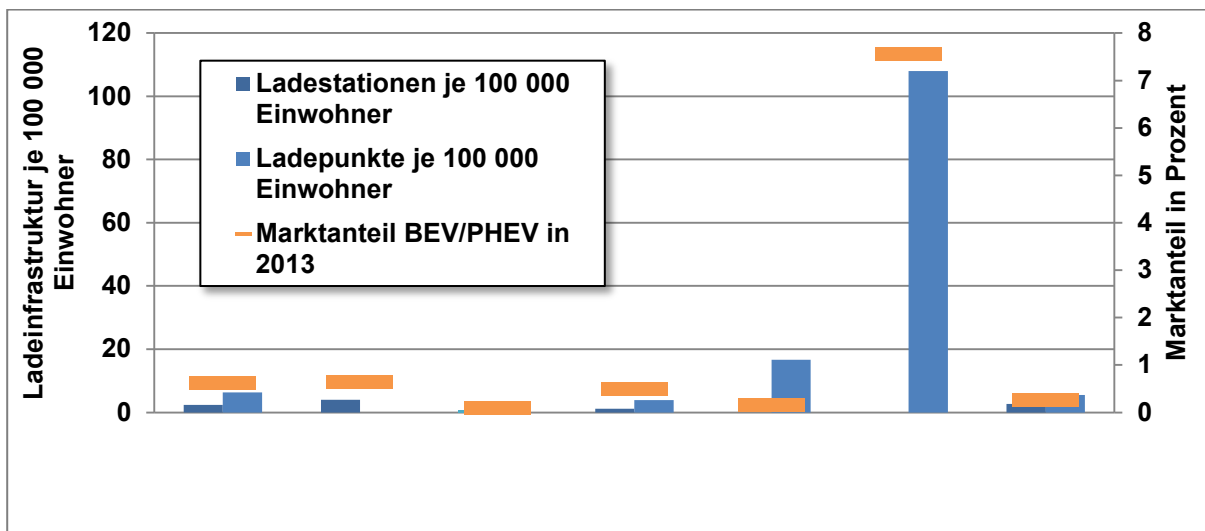


Abb. 7-8 Ladeinfrastruktur und Marktanteile

Quelle: eigene Darstellung nach AFDC 2014, BDEW 2014, IA-HEV 2013, NEV 2014

Modellvielfalt

Einige im Rahmen der STROM-Begleitforschung interviewte Experten sehen die Modellvielfalt als wichtigen Faktor bei der Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen. Aktivitäten renommierter Hersteller schaffen zum einen größeres Kundenvertrauen in die Zukunftsfähigkeit der Technologie, zum anderen können potenzielle Kunden Fahrzeuge wählen, die hinsichtlich Größe, Preis, Marke und weiterer Faktoren ihren Präferenzen entsprechen.

Stellt man die globalen Verkäufe den verfügbaren Serienmodellen gegenüber (Abb. 7-9), zeigen sich parallele Entwicklungen. Hier liegt eine Interdependenz beider Faktoren nahe: Einerseits begünstigt die größere Modellpalette eine positive Marktentwicklung, andererseits steigt durch den wachsenden Markt der Anreiz, elektrifizierte Modelle zu entwickeln.

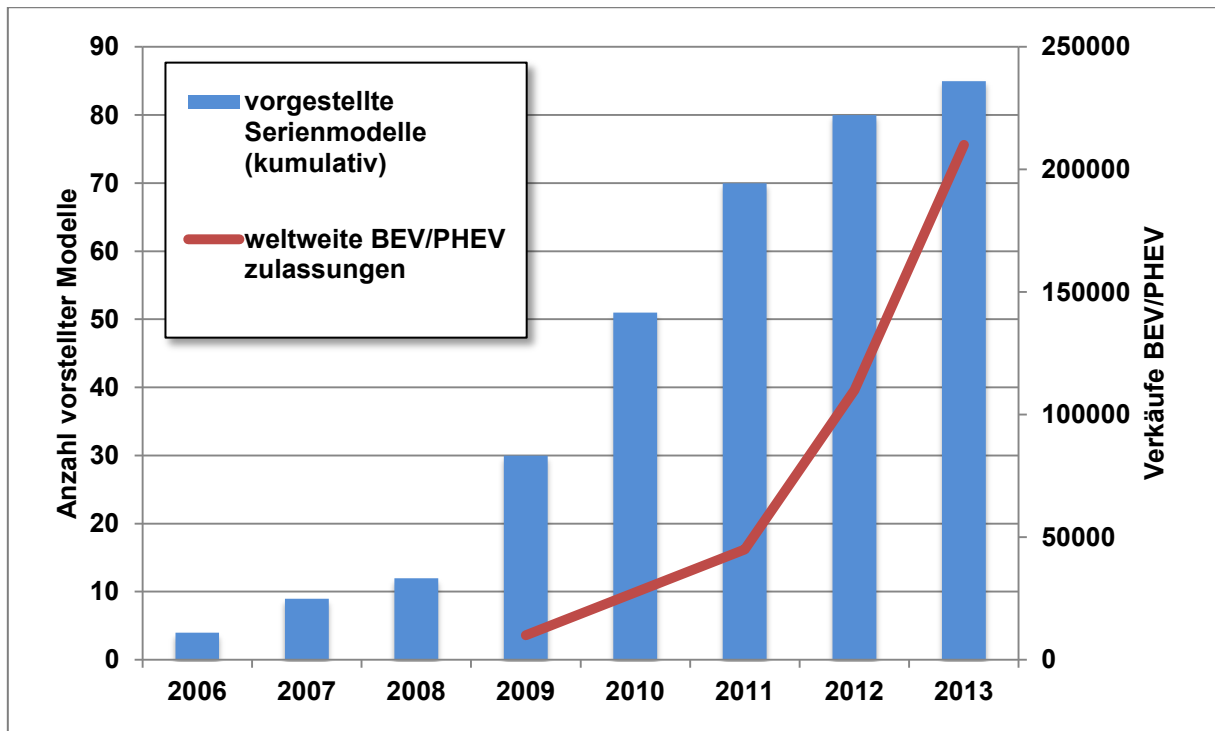


Abb. 7-9 BEV/PHEV-Serienmodelle (kumulativ über die Jahre) und weltweite Verkäufe

Quelle: Fahrzeugdatenbank DLR (Serienmodelle), ICCT 2014 (weltweite Verkäufe)

Kleinräumig ließ sich diese Entwicklung sehr deutlich in Norwegen beobachten, wo trotz vorhandener Anreize ein starkes Marktwachstum zunächst lange ausblieb. Mit der Einführung ausländischer Elektrofahrzeuge auf den norwegischen Markt seit 2010 ging ein starkes Marktwachstum einher, das überwiegend durch Neuzulassungen von Fahrzeugen ausländischer Hersteller getrieben wurde (vgl. Abschnitt 5.2.2)

Nutzerakzeptanz

Die Marktentwicklung für Elektrofahrzeuge wird aktuell noch deutlich durch die geringe Kundenakzeptanz gehemmt. Wesentliche hemmende Faktoren sind Mehrpreis, begrenzte Reichweite sowie limitierte Infrastrukturverfügbarkeit, wobei diese Faktoren regional zum Teil unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Beispielsweise wird in Norwegen durch die Steuerbegünstigungen für Elektrofahrzeuge der Mehrpreis ausgeglichen und weitere finanzielle Vorteile wie eine Mautbefreiung können zu einem Gesamtkostenvorteil von Elektrofahrzeugen gegenüber konventionell angetriebenen führen. Im Gegensatz dazu ist für preissensitive Käufer der Mehrpreis ein besonders starker Hemmfaktor. Laut den befragten Experten ist zwar eine sukzessive Preisreduktion bei Elektrofahrzeugen, preisliche Wettbewerbsfähigkeit aber erst in zehn bis fünfzehn Jahren zu erwarten. Mittelfristig wird ohne ausgleichende finanzielle Anreize der Mehrpreis ein wichtiger Hemmfaktor bleiben.

Auch hinsichtlich der insbesondere für reine batterieelektrische Fahrzeuge relevanten begrenzten Reichweite ist in naher Zukunft keine technologische Lösung zu erwarten. Zwar können graduelle Verbesserungen bei der Lithium-Ionen-Batterie, aber wesentliche Reichweitenverbesserungen erst mithilfe von Post-Lithium-Ionen-Batterien, laut Experten erst nach 2020, erreicht werden. In Regionen bzw. bei Nutzergruppen mit einer hohen Rate an Zweit- und Drittwagen kann die Reichweitenbegrenzung durch die Kombination mit konventionellen

Fahrzeugen eine geringere Bedeutung haben. Sowohl in Norwegen als auch in Kalifornien stehen den meisten Nutzern von Elektrofahrzeugen auch konventionelle Fahrzeuge zur Verfügung. In Japan hingegen besitzen die meisten Haushalte nur ein Auto.

Die Ladeinfrastruktur ist regional unterschiedlich stark entwickelt (siehe Abschnitt 5.3.1). Unabhängig vom Entwicklungsstand der Infrastruktur bekunden die Nutzer ein ausgeprägtes Interesse an einem weiteren Ausbau: Selbst in Regionen, in denen bereits eine große Anzahl Ladestationen installiert ist (wie beispielsweise in Norwegen oder Japan), wünschen die Nutzer weitere öffentliche Ladestationen und Schnellladestationen. Gleichzeitig wurde in verschiedenen Regionen festgestellt, dass die Fahrzeuge meist an Heimpladestationen oder semiöffentlichen Stationen geladen werden. Weniger dicht besiedelte Regionen profitieren hier von einem höheren Anteil an Heimplademöglichkeiten; oft sind private Abstellflächen oder Garagen mit Zugang zum Stromnetz verfügbar (beispielsweise in Norwegen oder Kalifornien). In den Großstädten Chinas oder Indiens sind Heimpladestationen weitaus schwieriger zu installieren. Auch weitere technologische, finanzielle und institutionelle Faktoren behindern einen Infrastrukturausbau. So wurden als zusätzliche Hemmfaktoren in China und Indien fehlendes Bewusstsein und Kenntnis von Elektrofahrzeugen identifiziert.

Neben Vorteilen durch regulatorische Rahmenbedingungen werden häufig Umweltfreundlichkeit und Innovativität positiv mit Elektrofahrzeugen assoziiert und spielen zum Teil auch als Kaufkriterium eine wichtige Rolle. Auch hier zeigen sich leichte regionale Unterschiede in der Bedeutung dieser Faktoren. Die Überprüfung und Quantifizierung der (empfundener) Umweltfreundlichkeit der Elektromobilität ist Gegenstand des folgenden Unterkapitels.

7.4 Umweltwirkung und Rohstoffkritikalität

O. Soukup (WI), T. Koska (WI)

Im Rahmen der Beschreibung der nationalen und internationalen Marktperspektiven wurde in Unterkapitel 7.3 bereits festgestellt, dass zukünftig mit steigenden Anteilen elektrifizierter Fahrzeuge am Pkw-Verkehr zu rechnen ist. Im Anschluss an einen Überblick über ökologische Aspekte politischer Förderstrategien wird im Folgenden zusammengefasst, welche Umwelteffekte mit den angenommenen Ausbauszenarien der Elektromobilität verbunden sind. Der Fokus liegt dabei auf der Bewertung von Ressourcenbedarf und Treibhausgasemissionen.

7.4.1 Politische Motive und Strategien

In allen betrachteten Regierungsstrategien wird als Ziel der Förderung von Elektromobilität angegeben, die CO₂-Emissionen (und zum Teil weitere Schadstoffemissionen) senken zu wollen und die Abhängigkeit von fossilen Kraftstoffen zu verringern. In einigen Ländern wird die Zielsetzung der Emissionsminderung besonders stark betont und ist zum Teil namensgebend für Regierungsstrategien und Institutionen, etwa in Großbritannien mit dem „Office of Low Emission Vehicles“ (OLEV), in Norwegen mit der Initiative „Grønn Bil“ (Grünes Auto), in Kalifornien mit dem Gesetz zu „Zero Emission Vehicles“ oder in Japan mit den Förderprogrammen für „Low Emission Vehicles“ und „Clean Energy Vehicles“.

Auch die Senkung des Materialbedarfs durch Substitution Seltener Erden und durch Recycling wurde in verschiedenen Regierungsstrategien zur Elektromobilität thematisiert. Während

China und Indien das Thema nur am Rande adressieren, enthalten etwa die Strategien Deutschlands und Japans detaillierte Ausführungen hierzu. Die Ergebnisse der MAIA dieser Studie zeigen, dass Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen zur Klima- und Ressourcenschonung zukünftig im Rahmen integrierter Strategien stärker zu berücksichtigen sind.

7.4.2 Einbindung der Elektromobilität ins Energiesystem

Wenn Elektromobilität nicht nur zur Reduzierung lokaler Schadstoffemissionen, sondern auch zur CO₂-Minderung beitragen soll, ist die Zusammensetzung des jeweiligen Strommixes und damit die CO₂-Intensität der Stromerzeugung entscheidend. Hier unterscheiden sich die betrachteten Länder signifikant. China und Indien weisen mit einem hohen Kohlestromanteil sehr hohe CO₂-Emissionen je erzeugter kWh Strom auf, wie Abb. 7-10 zeigt. Solange der Strommix sich nicht signifikant ändert, können Elektrofahrzeuge hier keinen Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten. Dagegen ist die CO₂-Intensität in Norwegen (aufgrund eines hohen Wasserkraftanteils) und Frankreich (aufgrund der Bedeutung von Atomstrom) besonders niedrig; hier hat der Einsatz von Elektrofahrzeugen ein relativ hohes CO₂-Reduktionspotenzial.

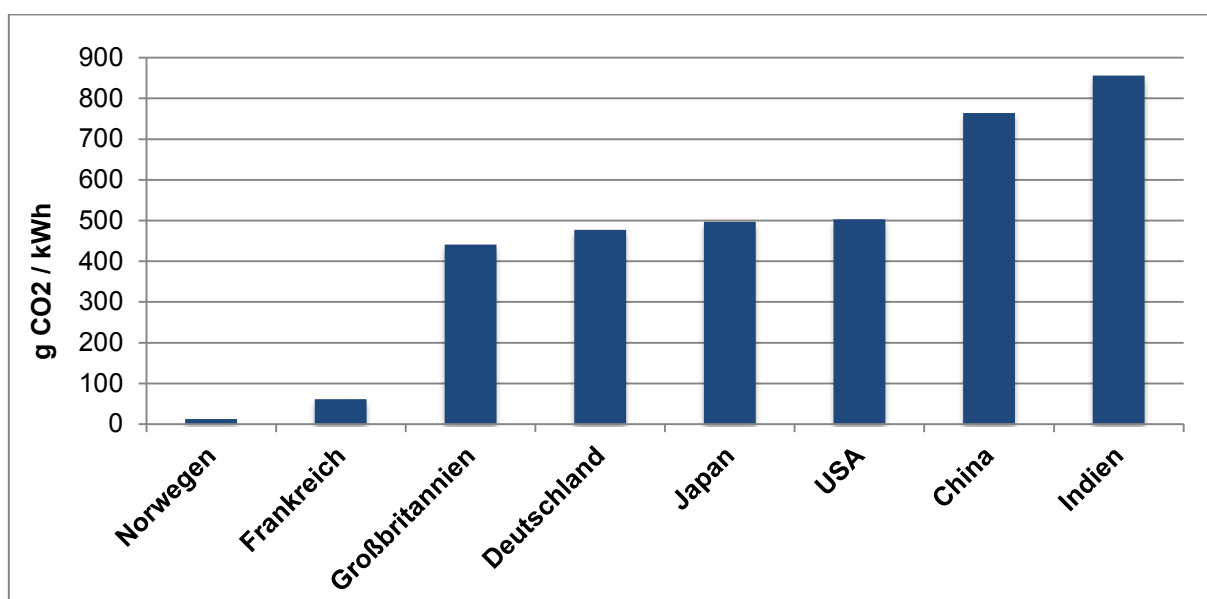


Abb. 7-10 CO₂-Emissionen der Stromerzeugung in g/kWh

Quelle: (IEA 2013), Daten von 2011

Alle betrachteten Länder streben, wenngleich mit unterschiedlicher Intensität, den weiteren Ausbau erneuerbarer Energien in den kommenden Jahrzehnten an – mit direkter Auswirkung auf die CO₂-Einsparung durch Elektrofahrzeuge.

Ein starker Anstieg der Anteile Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung wird daher sowohl in den Szenariovergleichen für Deutschland als auch für die Welt berücksichtigt. Die Berechnungen zu lebenszyklusweiten THG-Emissionen der jeweiligen Fahrzeugflotten zeigen auch, wie sich die zunehmende erneuerbare Erzeugung auf die Emissionen der jeweiligen Szenarien auswirkt.

7.4.3 Materialbedarf und Treibhauspotenzial der Elektromobilität

Im Rahmen der Materialintensitätsanalyse (siehe Kapitel 6) wurde eine vergleichende, lebenszyklusweite Umweltbewertung acht unterschiedlicher Antriebskonzepte (konventionell und elektrisch) aus dem mittleren Fahrzeugsegment hinsichtlich des abiotischen Materialbedarfs und der Klimawirkung durchgeführt. Die Ergebnisse der Fahrzeugbewertungen wurden anhand von Verkehrsszenarien hochgerechnet, die Entwicklungen von Fahrzeugflotten in Deutschland und weltweit bis zum Jahr 2050 abbilden. Daneben wurden Versorgungsrisiken, wie zum Beispiel geologische Verfügbarkeit, Substituierbarkeit und Liefersituation untersucht und kritische Materialien identifiziert. Abschließend wurden mögliche Ansatzpunkte zur Minderung der identifizierten Impacts untersucht.

Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse auf Fahrzeugebene

Bei der Betrachtung des *abiotischen Materialbedarfs* zeigt sich, dass elektrifizierte Konzepte - durch zusätzlich erforderliche Komponenten und deren Materialbedarf (z. B. Batterie, E-Motor) - in der Herstellung in der Regel rohstoffintensiver als verbrennungsmotorische (konventionelle) Konzepte sind. Die konventionellen Antriebskonzepte sind untereinander in ihrer Herstellung weitgehend vergleichbar. Nur durch den Erdgastank resultiert ein etwas höherer Materialbedarf bei Erdgasfahrzeugen. Über den betrachteten Zeitraum (bis 2050) zeigt sich eine Annäherung des Materialbedarfs in der Herstellungsphase von konventionellen und elektrifizierten Fahrzeugen. Der Materialbedarf der Herstellung wird bei allen Fahrzeugtypen zu einem großen Teil durch den Glider verursacht. Bei elektrifizierten Fahrzeugen wird er zudem mit steigender Speicherkapazität auch zunehmend durch die Herstellung der Batterie beeinflusst. Der Materialbedarf aller Fahrzeuge ist hauptsächlich auf nicht-kritische Stoffe wie Stahl und Kupfer zurückzuführen. Auch die Bereitstellungsvorketten möglicherweise kritischer Stoffe können aber einen erheblichen Beitrag zum Materialbedarf leisten: So entfällt z. B. der dritt- und viertgrößte Anteil des Materialbedarfs von batterieelektrischen Fahrzeugen auf den Einsatz von Gold und Lithium.

Die Nutzungsphase ist für den lebenszyklusweiten Materialbedarf konventioneller Fahrzeuge grundsätzlich im Vergleich zur Herstellung von untergeordneter Bedeutung. Für elektrifizierte Fahrzeuge gilt diese Aussage nur dann, wenn die Bereitstellung des Traktionsstroms überwiegend aus erneuerbaren Quellen erfolgt. Bei hohen Anteilen materialintensiver fossiler Brennstoffe am Strommix kann die Nutzungsphase dagegen den Materialbedarf von Elektrofahrzeugen entscheidend beeinflussen und ihn gegenüber konventionellen Fahrzeugen (über den Lebenszyklus betrachtet) mehr als verdoppeln.

Weil im Laufe des Betrachtungszeitraums von veränderten Fahrzeugparametern (Energiebedarf, Fahrzeugmasse) und insbesondere von einem verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien in der Nutzungsphase ausgegangen wird, ist ein Rückgang des gesamten Materialbedarfs aller Fahrzeuge im Zeitverlauf erkennbar - verbunden mit einer Annäherung der Konzepte untereinander. Dennoch verbleibt auch im Zieljahr der Analyse (2050) eine abiotische Rohmaterialmenge von rund 40 t für den Lebenszyklus von Benzin- und Dieselfahrzeugen sowie rund 50 t für Erdgas- und alle untersuchten Elektrofahrzeuge. Pkw bleiben demnach auch langfristig und insbesondere mit elektrifiziertem Antrieb materialintensive Güter, deren Gebrauch ein Vielfaches ihres Eigengewichts in Form von Materialentnahmen aus der natürlichen Umwelt verursacht.

Im Gegensatz zum Materialbedarf entfällt für die meisten Antriebskonzepte ein Großteil der *Klimawirkung* nicht auf die Herstellung, sondern auf die Nutzungsphase. Die (weniger relevanten) Emissionen der Herstellung weisen zwischen den Konzepten eine geringere Bandbreite auf als der zuvor geschilderte Materialbedarf. Sie sind zudem über den Betrachtungszeitraum weitgehend konstant. Die Treibhausgasemissionen der Nutzung unterscheiden sich dagegen je nach Konzept sehr stark: Durch ihre geringeren Nutzungsemissionen weisen hier Elektrofahrzeuge schon im Basisjahr 2010 im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen auch in Hinblick auf den gesamte Lebenszyklus geringere Treibhausgasemissionen auf. Im Zeitverlauf können unter der Annahme steigender Anteile erneuerbarer Energien im Strommix und der Wasserstoff-Bereitstellung weitere Reduktionspotenziale der Treibhausgasemissionen genutzt werden: Während die lebenszyklusweiten Emissionen von batterieelektrischen und Brennstoffzellenfahrzeugen zukünftig auf rund 7,5 t CO₂-Äquivalente reduziert werden können, verbleiben für die konventionellen Fahrzeuge Emissionen von etwa 26 t CO₂-Äquivalenten. Unter Berücksichtigung des gesamten Lebensweges eines Kraftfahrzeugs von der Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgung zeigt sich demnach, dass elektrifizierte Fahrzeuge (je nach getroffenen Annahmen) bereits bei heutigem deutschem Strommix hinsichtlich der Klimawirkung Vorteile gegenüber konventionellen Antrieben aufweisen, die mit steigendem Anteil Erneuerbarer Energien in der Nutzung weiter ausgebaut werden können.

Ergebnisse der Materialintensitätsanalyse auf Szenarioebene

Die Analyse ergibt, dass alle Elektromobilitätsszenarien für *Deutschland* gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektromobilität über den gesamten Betrachtungszeitraum einen erhöhten *abiotischen Materialbedarf* aufweisen – und zudem mit steigender Elektrifizierung der Flotte auch der kumulierte abiotische Materialbedarf ansteigt. Dies ist insbesondere auf die Herstellung zusätzlicher materialintensiver Komponenten für Elektrofahrzeuge zurückzuführen. Der Vergleich absoluter Zahlen zur Entwicklung des Materialbedarfs innerhalb der Szenarien im Zeitverlauf zeigt zwar, dass etwa durch verbesserte Fahrzeugeigenschaften in allen Szenarien eine Reduktion des Materialbedarfs einzelner Dekaden innerhalb des Betrachtungszeitraums erreicht wird. Mit zunehmendem Anteil elektrifizierter Fahrzeuge fällt diese Reduktion des Materialbedarfs der letzten im Vergleich zur ersten Dekade jedoch zunehmend schwächer aus.

Die Elektrifizierung der Pkw-Flotten allein ist demnach nicht geeignet, den Materialbedarf des Pkw-Verkehrs in Deutschland gegenüber einer Flotte ohne elektrische Antriebe weiter zu senken. Um dieses Ziel zu erreichen, sind weitere Maßnahmen notwendig, wie z. B. Materialsubstitutionen in der Fahrzeugherstellung oder strukturelle Ansätze, die auf eine intelligentere Nutzung mit besserer Auslastung des Pkw-Verkehrs sowie auf verlängerte Nutzungsdauern der Fahrzeuge abzielen.

Bei der Interpretation des *weltweiten abiotischen Materialbedarfs* ist zu berücksichtigen, dass die verglichenen Szenarien abweichend von der konstanten Flottengröße der Deutschland-Szenarien von einem Wachstum der weltweiten Pkw-Flotten bis 2050 ausgehen. Die beiden Szenarien mit kleineren Fahrzeugflotten weisen im Vergleich zu den beiden Szenarien mit großen Fahrzeugflotten einen geringeren kumulierten Materialbedarf auf. Die Gegenüberstellung der Szenarien mit identischer Bestandsentwicklung zeigt, dass sich jeweils für das Szenario mit höherem Anteil elektrifizierter Antriebe auch der höhere kumulierte Materialbedarf ergibt. Im Gegensatz zu den Deutschland-Szenarien führt die Entwicklung des Pkw-Verkehrs weltweit in keinem der Szenarien zu einer Reduktion des Materialbedarfs einzelner Dekaden

im Zeitverlauf. Angenommene zukünftige Verbesserungen von Fahrzeugeigenschaften werden durch ein starkes Flottenwachstum deutlich überkompensiert.

Keines der betrachteten Welt-Szenarien erweist sich damit als geeignet, den absoluten Materialbedarf des weltweiten Pkw-Verkehrs gegenüber der heutigen Situation zukünftig zu reduzieren. Es erscheint auch unwahrscheinlich, dass dieses Ziel durch technische Weiterentwicklungen zur Reduktion des Herstellungsaufwandes erreicht werden kann. Die absolute Senkung des Materialbedarfs scheint lediglich durch eine Begrenzung des weltweiten Flottenwachstums gegenüber den in den Szenarien geschilderten Annahmen möglich.

Die berechneten kumulierten *THG-Emissionen* für *Deutschland* liegen je nach Szenario zwischen 4 und 5 Gt CO₂-Äquivalenten. Im Gegensatz zum abiotischen Materialbedarf zeigt sich, dass alle Elektromobilitätsszenarien gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektromobilität über den gesamten Betrachtungszeitraum niedrigere THG-Emissionen aufweisen, wobei mit steigendem Anteil elektrifizierter Fahrzeuge jeweils auch ein weiterer Rückgang der Emissionen verbunden ist. Die ermittelten THG-Einsparungen der STROM-Szenarien sind auf die bessere THG-Bilanz der elektrifizierten Fahrzeuge durch die zunehmende CO₂-arme Bereitstellung von elektrischer Antriebsenergie aus erneuerbaren Quellen zurückzuführen.

Die Auswertung der Deutschland-Szenarien hinsichtlich der THG-Emissionen zeigt, dass die Elektrifizierung der Pkw-Flotten eine geeignete Maßnahme darstellt, um die THG-Emissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland zu reduzieren. Es kann dabei sowohl eine absolute Senkung der Emissionen im Zeitverlauf als auch eine Reduktion gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektrofahrzeuge erreicht werden.

Die Auswertung der Szenarien hinsichtlich der *weltweiten THG-Emissionen* zeigt, dass ein umfassender Technologiewechsel zu alternativen Antrieben erforderlich ist, um trotz stark wachsender Fahrzeugflotten eine Reduktion der THG-Emissionen zu erreichen. Nur durch eine umfassende Umstellung der Bereitstellung von Antriebsenergien von fossilen auf regenerative Quellen kann so einerseits eine absolute Senkung der Emissionen im Zeitverlauf als auch eine Reduktion der kumulierten Emissionen gegenüber einer Referenzentwicklung mit reduziertem Anteil an Elektrofahrzeugen erreicht werden. Dennoch zeigt sich, dass die Emissionsreduktion auf Grund der Szenarioannahmen zum Flottenwachstum deutlich schwächer ausfällt als in den zuvor beschriebenen Deutschland-Szenarien.

Fazit abiotischer Materialbedarf und Treibhauspotenzial

Die Modellierung des Materialbedarfs und der Treibhauspotenziale der Elektromobilität zeigt, dass die Förderung der Elektromobilität aus Sicht der Klimawirkung sinnvoll sein kann und einen Beitrag zu den politischen Klimaschutzziele leisten kann, wenn der Ausbau der ressourcenleichteren erneuerbaren Energien damit einhergeht. Denn für das Treibhauspotenzial ist die Art der Energie-Bereitstellung (fossile Kraftstoffe, verschiedene Strommixe) in der Nutzungsphase entscheidender für den Vergleich elektrischer und konventioneller Antriebe als die Emissionen der Herstellung.

Hinsichtlich des induzierten Materialbedarfs (inklusive Energierohstoffe) der Elektromobilität ergibt sich ein deutlich anderes Bild: Die Herstellung eines Elektroautos ist für den Materialbedarf der ausschlaggebendere Faktor im Vergleich zur Nutzung. Durch die zusätzlichen Komponenten (z. B. Batterie, Elektromotor) hat ein Elektroauto einen deutlich höheren Materialbedarf. Der Materialbedarf in der Nutzung (durch Energie-Bereitstellung) kann durch den

Ausbau der erneuerbaren Energien reduziert werden. Jedoch ist das Potenzial zur weiteren Senkung des Materialbedarfs der Nutzungsphase durch ausschließlich erneuerbaren Traktionsstrom begrenzt. Der grundsätzlich bestehende Zielkonflikt zwischen Ressourcen- und Klimaschutz lässt sich auf diesem Weg nur abschwächen, aber nicht beheben.

Kritikalität und Verfügbarkeit von Rohstoffen

Bei der Elektromobilität bestehen deutlich größere Abhängigkeiten von kritischen Rohstoffen als bei den Erneuerbaren Energien, wie sie im Forschungsprojekt KRESSE (Wuppertal Institut 2014) betrachtet wurden.

Die eingesetzten Elektromotoren nutzen häufig Permanentmagneten auf der Basis von Seltenen Erden, da hiermit, aufgrund der hohen Feldstärke, erhebliche Gewichtsvorteile erreicht werden können. Bei den Seltenen Erden gibt es deutliche Unterschiede hinsichtlich der Verfügbarkeit. Für Neodym und Praesodym erscheint die Verfügbarkeit unkritisch, wohingegen für Dysprosium und Terbium, das zur Erhöhung der Curie-Temperatur eingesetzt werden muss, die Nachfrage aus der Elektromobilität bezogen auf die betrachteten Szenarien eine kritische Größe erreicht. Ergänzend muss darauf hingewiesen werden, dass eine hohe Abhängigkeit von wenigen Lieferländern (insbesondere China, nachrangig USA, perspektivisch u. U. auch Grönland) besteht und Lieferbeschränkungen einzelner Länder erhebliche Auswirkungen auf die Versorgungslage haben können. Recycling kann kurzfristig kaum zu einer Entspannung der Versorgungslage beitragen, da einerseits der Anfall an Sekundärmaterial noch zu gering ist und andererseits einem hochwertigen Recycling von Seltenerdpermanentmagneten noch verfahrenstechnische Hürden im Wege stehen. Daneben zeigen sich auch erhebliche Unterschiede hinsichtlich des TMR der Gewinnung von Seltenen Erden in Abhängigkeit von den Lagerstätten. Kurz- und mittelfristig ist jedoch nicht zu erwarten, dass die hinsichtlich des TMR ungünstigeren Lagerstätten in bedeutendem Maße genutzt werden.

Die meisten Batterien für Elektrofahrzeuge werden auf Lithium basieren. Aufgrund seiner Eigenschaften (leichtestes Metall und zugleich höchstes Normalpotenzial) gibt es kein besseres Element für Batterien. Die Nachfrage nach Lithium aus der Elektromobilität erreicht in den betrachteten Szenarien eine kritische Größe, bei der unklar ist, ob sie gedeckt werden kann. Wichtig ist hierbei, dass bereits ein einmaliger Bestandsaufbau einen erheblichen Teil der Lithiumreserven (ca. 21 %) benötigt. Auch unter der Annahme einer Etablierung von Recyclingsystemen für Lithium verbleibt daher ein kritisch hoher Bedarf nach Lithium aus der Elektromobilität. Daneben zeigt sich, dass bei einer steigenden Nachfrage nach Lithium mit steigenden Umweltbelastungen bei der Gewinnung und steigenden Gewinnungskosten zu rechnen ist. Ursache hierfür ist, dass nach der absehbaren Erschöpfung der geologisch günstigsten Salzlagerstätten andere Lagerstätten genutzt werden müssen, die eine aufwändigere Aufbereitung erfordern. Die derzeitigen Preise für Lithium sind jedoch bereits so hoch, dass auch einige der relativ aufwendig zu gewinnenden und aufzubereitenden Rohstoffe (insbesondere australische Pegmatitgesteine) wirtschaftlich gewonnen und aufbereitet werden können. Die ansonsten aber zu erwartenden Kostensenkungsmöglichkeiten bei steigenden Produktionsmengen werden sich jedoch möglicherweise nicht einstellen.

Der Bedarf der anderen betrachteten potenziell kritischen Stoffe (z. B. Silber, Germanium oder Tantal) erscheint insgesamt unkritisch, da die Verfügbarkeit entweder unkritisch ist oder geeignete unkritische Substitute verfügbar sind.

8 Handlungsempfehlungen

Die Untersuchungen im Rahmen der STROMbegleitung haben Forschungs- und Handlungsbedarf identifiziert.

Die weitere Forschungsförderung von Schlüsseltechnologien der Elektromobilität sollte gezielt die zuvor geschilderten umweltpolitischen Synergien und Zielkonflikte einbeziehen und die Erforschung ressourcen- und klimaschonender Mobilität fördern.

Heutige Elektrofahrzeuge verwenden zu einem überwiegenden Anteil elektrische Maschinen mit einer permanenten Erregung. Auch die Analyse der globalen Forschungslandschaft offenbart einen Schwerpunkt bei diesem Maschinentyp, der zum jetzigen Zeitpunkt signifikante Mengen von Seltenerdmetallen benötigt. Unter der Annahme, dass auch in zukünftigen elektrifizierten Fahrzeugen ein ähnlicher Anteil mit permanenterregten elektrischen Maschinen ausgestattet ist und sich der Anteil dieser Fahrzeuge am globalen Fahrzeugmarkt signifikant erhöht, ist mit Engpässen bei der Versorgung mit Seltenerdmetallen, insbesondere bei Dysprosium, zu rechnen.

Dieser Entwicklung kann durch verschiedene Maßnahmen entgegengewirkt werden, die deshalb in der zukünftigen Forschungsausrichtung stärker berücksichtigt werden sollten: vermehrte Nutzung alternativer Maschinentypen wie Asynchronmaschinen und fremderregter Synchronmaschinen, Weiterentwicklung von Substitutionsmaterialien und Entwicklung von Recyclingverfahren, die eine Rückgewinnung von Seltenerdmetallen wie Neodym oder Dysprosium aus Permanentmagneten in großem Maßstab ermöglichen.

Ein sehr hoher Anteil heutiger Elektrofahrzeuge ist zudem mit Lithium-Ionen-Batterien ausgestattet. Ein signifikanter Anstieg des Absatzes von Elektrofahrzeugen kann somit perspektivisch zu sehr hohen Stoffströmen führen, die ohne Intervention kritische Versorgungssituationen hervorrufen können. Mögliche Handlungsoptionen zur Sicherung des Lithiumbedarfs sind die Weiterentwicklung und der großflächige Einsatz gezielter Recyclingverfahren wie auch der Einsatz alternativer Batterietechnologien und Energieträger.

Insgesamt weisen Komponenten elektrifizierter Fahrzeuge wie Elektromotoren und Batterien derzeit einen hohen abiotischen Materialbedarf auf. Damit die angestrebte Reduktion von Treibhausgasen durch die Elektromobilität nicht zu massiven Rohstoffentnahmen aus den natürlichen Lagerstätten führt, sollte bereits in Forschung und Entwicklung auf eine Minimierung des Einsatzes materialintensiver Komponenten geachtet werden.

Während in Deutschland zum Teil ein technologischer Rückstand bei der Erforschung und Entwicklung von Schlüsseltechnologien der Elektromobilität, insbesondere im Bereich der Leistungselektronik auf Bauteil- (Halbleiter) und Materialebene (Halbleitermaterialien) besteht, bescheinigen internationale Experten der deutschen Industrie Stärken bei der Aufbau- und Verbindungstechnik sowie der Systemintegration. Um die Vorteile von Wide-Bandgap-Halbleitermaterialien (WBG) zu nutzen und dem Vorsprung Japans und damit der Abhängigkeit von japanischen Zulieferern entgegenzuwirken, sollten WBG-Materialien eine zentrale Rolle in der deutschen Forschungsförderung einnehmen. Als technologische Enabler der Hochintegration besitzen diese Materialien hohe Relevanz für die Ausgestaltung des Antriebsstrangs zukünftiger elektrifizierter Fahrzeuge. Für die Anforderungen im Automotivebereich sollte die Förderung neben Siliziumcarbid (SiC) insbesondere auf Galliumnitrid

(GaN) fokussiert sein. Weiterhin wird empfohlen, „technologieoffen“ auch Potenziale alternativer WBG-Materialien wie Galliumarsenid (GaAs) zu erforschen und die dadurch zusätzlich veränderten Anforderungen an und Möglichkeiten für die Aufbau- und Verbindungstechnik zu untersuchen.

Forschungsaktivitäten betreffend ist neben den USA vor allem Japan bei der Leistungselektronik Treiber der Technologieentwicklung und kann zusätzlich insbesondere in den letzten fünf Jahren hohe Steigerungsraten im Forschungs- und Entwicklungsoutput verzeichnen. Dennoch wird das deutsche Forschungs- und Fördersystem im internationalen Vergleich als vorbildlich eingestuft. Besonders wertvoll sind die ausgeprägten Kooperationsaktivitäten von Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen mit konkreter Anwendungsorientierung über alle Wertschöpfungsstufen hinweg. Die enge Zusammenarbeit von Forschungsinstitutionen, OEM und KMU sollte deshalb weiter gestärkt und gefördert und zudem geprüft werden, inwiefern strategische Kooperationen im Bereich der Leistungselektronik intensiviert und Vernetzungsmöglichkeiten insbesondere bei Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu aktiven Bauelementen und bei innovativen Materialien auf europäischer sowie internationaler Ebene zu verstärken sind.

Um den Markt für Elektrofahrzeuge in Deutschland zu stärken, kann auf die Erfahrungen aus verschiedenen Regionen im globalen Umfeld der Elektromobilität zurückgegriffen werden. Einen positiven Effekt auf die Nutzerakzeptanz und somit den Absatz von Elektrofahrzeugen können nicht monetäre Anreize entfalten – etwa der Zugang zu Stellplätzen oder bestimmten Fahrspuren. Diese Maßnahmen müssen jedoch so gesteuert werden, dass andere Nutzer keine Nachteile erfahren. In der Umsetzung von Anreizsystemen hat Deutschland im Vergleich zu den weiterentwickelten Märkten für Elektromobilität noch Ausbaupotenzial.

Als wirkungsvoll wird auch die Förderung des Einsatzes von Elektrofahrzeugen in Flotten eingeschätzt, da sie ihre Vorteile dort durch hohe Laufleistungen und die Nutzung für spezifische Einsatzbereiche besonders gut ausspielen können. Demonstrationsprojekte können einen wichtigen Beitrag zur Erforschung der Alltagstauglichkeit von Fahrzeugen, Ladesystemen und Mobilitätsangeboten liefern. Hierfür ist es notwendig, die Rolle der Forschung im Rahmen von Demonstrationsprojekten zu stärken. Demonstrationsprojekte fördern insofern aber auch die Marktentwicklung, als potenzielle Kunden an Elektrofahrzeuge herangeführt werden, was wiederum positiven Einfluss auf zukünftige Kaufentscheidungen haben kann.

Allgemeine finanzielle Kaufanreize für Elektrofahrzeuge können kurz- und mittelfristig zu einer schnelleren Marktentwicklung beitragen, sofern sie die Preisdifferenz zu konventionellen Fahrzeugen hinreichend ausgleichen. Für einen dauerhaft stabilen und von Subventionen unabhängigen Markt leisten sie jedoch nur einen geringen Beitrag, weshalb ihre Einführung gegenüber längerfristig wirksamen Investitionen abgewogen werden sollte.

Zudem konnte gezeigt werden, dass es aus Kundensicht sinnvoll ist, primär die Kosten elektrischer Komponenten und somit der Fahrzeuge zu reduzieren, um dann auch einen Fokus auf die Verbesserung der Antriebsstrangeffizienz zu legen. Der direkte Einfluss des Fahrzeugkaufpreises auf die für den Nutzer relevanten Gesamtkosten ist bei elektrifizierten Fahrzeugen insgesamt höher als die durch eine erhöhte Effizienz erreichten Einsparungen bei den Betriebskosten. Dennoch ist die Verbesserung kundenrelevanter Leistungseigenschaften von Schlüsseltechnologien der Elektromobilität von essenzieller Bedeutung, um so zum Beispiel ausreichende Reichweiten zu ermöglichen.

Für Fahrzeughersteller ist derzeit zu empfehlen, auf Märkten mit finanziellen Kaufanreizen aktiv zu sein, um auch kurzfristig einen angemessenen Fahrzeugabsatz sicherzustellen. Dabei hat die Steigerung der Vielfalt elektrifizierter Fahrzeugmodelle und -varianten einen positiven Einfluss auf die Akzeptanz und Marktentwicklung auf internationalen Märkten. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Nutzererwartungen weltweit immer noch stark an den Eigenschaften konventioneller Fahrzeuge orientieren. Um Geschäftsmodelle und Marketingstrategien entwickeln zu können, die die Akzeptanz und Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen stärken, ist weitere Forschung zu Kundenerwartungen und Potenzialen verschiedener Geschäftsmodelle notwendig.

9 Literaturverzeichnis

- ABN AMRO Bank; VM Group. (2012). *The silver book*.
- ACEA. (2013). *The Automobile Industrie Pocket Guide*.
- ACEA. (2014). *Consolidated Registrations by Country*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.acea.be/statistics/tag/category/by-country-registrations>
- Adriaanse, A., Bringezu, S., Hammond, A., Moriguchi, Y., Rodenburg, E., Rogich, D., et al. (1997). *Resource Flows: The material basis of industrial economics*. Washington DC: World Resources Institut.
- AFDC. (2014). *DOE - Alternative fuels data center*. Abgerufen am 12.09.2014 von <http://www.afdc.energy.gov/data/>
- AGEB. (2014). *Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2013 nach Energieträgern, Stand: 7. Februar 2014*. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen.
- AK Prof. Dr. Martin Winter, WWU Münster. (2011). *LIB2014 BMBF Innovationsallianz*. Abgerufen am 2014 von <http://www.lib2015.de>
- André, M. (2004). *Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions - Part A: The ARTEMIS European driving cycles*. Institut National de Recherche sur les Transport et leur Securite.
- Angerer, G., Erdmann, L., Marscheider-Weidemann, F., Scharp, M., Lüllmann, A., Handke, V., et al. (2009). *Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe: Fraunhofer IRB Verlag.
- Aral. (2011). *Trends beim Autokauf 2011*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://www.bp-dateiserver.de/aral/pdf/aral_studie_trends_beim_autokauf_2011.pdf
- Arnold, K., Dienst, C. & Lechtenböhrer, S. (2010). Integrierte Treibhausgasbewertung der Prozessketten von Erdgas und industriellem Biomethan in Deutschland. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 22(2), S. 135–152.
- ATZextra. (2013). *IAA 2013 - Premieren, Innovationen, Visionen*. Springer Automotive Media.
- ATZextra. (2014). *Forschungsprojekt VISIO.M*. Springer Automotive Media.
- Avere-France. (2014). *Baromètre Avere-France des ventes de véhicules électriques et hybrides - bilan 2013*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.france-mobilite-electrique.org/les-ventes-de-voitures-electriques-en-france,291.html?lang=fr>
- BAFA. (2009). *Richtlinie zur Förderung des Absatzes von Personenkraftwagen*.
- BAFA. (2014). *Amtliche Mineralölstatistiken - ausgewählte Statistiken*. Abgerufen am 02.02.2015 von http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel_rohoel/ausgewaehlte_statistiken/index.html
- BAST. (2002). *Fahrleistungserhebung*.
- Baumann, U. (2014). *Ein-Liter-Auto mit 5 Sitzen*. Abgerufen am 03.02.2015 von www.Auto-Motor-Sport.de: <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/renault-eolab-auf-dem-autosalon-paris-ein-liter-auto-mit-5-sitzen-8613426.html>
- BDEW. (2014). *Branche treibt den Ausbau von Ladesäulen voran. Pressemitteilung vom 15.04.2014*. Berlin/Brüssel.

- BEM. (2014). *Bundesverband Emobilität (BEM)-Stellungnahme zum Entwurf eines Gesetzes zur Bevorrechtigung der Verwendung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (EmoG)*. Berlin.
- Bernhardt, W. (2014). Lithium-Ion Batteries Advances and Applications. In G. Pistoia, *The Lithium-Ion Battery Value Chain - Status, Trends and Implications*. Elviesier.
- Berylls Strategy Advisors. (2014). *Zulieferstudie*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://www.berylls.com/media/wissen/veroeffentlichungen/140926_automobil-industrie_verlustfrei_3rd-global-top-automotive-suppliers-2013.pdf.
- BGBI. (2012). *Anlage VIII (§ 29 Absatz 1 bis 4, 7, 9, 11 und 13) Untersuchung der Fahrzeuge*.
- BMBF. (2010). *Bekanntmachung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) von Richtlinien über die Förderung zum Themenfeld "Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)"*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.bmbf.de/foerderungen/14611.php>
- BMBF. (2012). *Elektromobilität – das Auto neu denken. Handreichung zum Statusseminar Elektromobilität 2012 in Bonn*.
- BMF. (2013). *Bericht des Bundesministeriums der Finanzen über die Tätigkeit des EKF 2012 und über die 2013 zu erwartende Einnahmen- und Ausgabenentwicklung. April 2013*.
- BMVBS. (2000). *Verkehr in Zahlen 2000*. DIW Berlin.
- BMVBS. (2011). Abgerufen am 10.12.2014 von BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur): https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/VerkehrUndMobilitaet/elektromobilitaet-deutschland-als-leitmarkt-und-leitanbieter.pdf?__blob=publicationFile
- BMVBS. (2013). *Verkehr in Zahlen 2012/2013*. DIW Berlin.
- BMVI. (2014a). *BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur)*. Abgerufen am 10.12.2014 von <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2014/093-dobrindt-elektromobilitaetsgesetz.html>
- BMVI. (2014b). *Kabinettsverabschiedet Elektromobilitätsgesetz*. Abgerufen am 02.10.2014 von [www.BMVI.de: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2014/093-dobrindt-elektromobilitaetsgesetz.html](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2014/093-dobrindt-elektromobilitaetsgesetz.html)
- BMVI. (2014). *Modellregionen Elektromobilität. Internetpräsenz*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/UI/modellregionen-elektromobilitaet.html?nn=36210>
- BMWI. (2014). *Projekt "SLAM - Schnellladenetze für Achsen und Metropolen" in Hannover gestartet. Internetpräsenz*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.bmwi.de/DE/Themen/industrie,did=634248.html>
- BMWI, BMVBS, BMU, BMBF. (2011). *Richtlinien zur Förderung von Forschung und Entwicklung „Schaufenster Elektromobilität“*.
- Bozem, K., Nagel, A., Rath, V. & Haubrock, A. (2013). *Elektromobilität: Kundensicht, Strategien, Geschäftsmodelle. Ergebnisse der repräsentativen Marktstudie FUTURE MOBILITY*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Braess, H.-H. & Seiffert, U. (2011). *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (Bd. 6. Auflage). Vieweg+Teubner.
- Braune, G. (2013). *Handelsblatt*. Abgerufen am 13. Mai 2014 von <http://www.handelsblatt.com/politik/international/wahlsiegerin-kuendigt-kurswende-an-groenland-bohrt-gigantischen-rohstoffschatz-an/7921916.html>

- Bringezu, S., Schütz, H. & Moll, S. (2003). Rationale for and Interpretation of Economy-Wide Materials Flow Analysis and Derived Indicators. *Journal of Industrial Ecology* (7), S. 43-63.
- British Columbia. (2013). *Transportation Rebates and Incentives. The Clean Energy Vehicle (CEV) Program - Rebates and Incentives*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.livesmartbc.ca/incentives/transportation/CEV-rebates.html>
- British Geological Survey. (2011). *BGS*. Abgerufen am 13. Mai 2014 von <https://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=1638>
- Brokate, J., Özdemir, E. & Kugler, U. (2013). *Der Pkw-Markt bis 2040: Was das Auto von morgen antreibt*. Stuttgart: DLR.
- Bryon Capital Markets. (2010). *Electric Metals Green Book - Lithium: the next strategic material*.
- Buchert, M., Jenseit, W., Dittrich, S., Hacker, F., Schüler-Hainsch, E., Ruhland, K., et al. (2011). *Ressourceneffizienz und Ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität - Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotentiale von Elektrofahrzeugen*. Darmstadt: Öko-Institut.
- Buchert, M., Jenseit, W., Merz, C. & Schüler, D. (2011). *Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec)*. Öko-Institut, Darmstadt.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2008). *BGR*. Abgerufen am 10.12.2014 von www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Projekte/Lagerstättenforschung-abgeschlossen/Indium.html.
- Bundesregierung. (2007). *Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm*. Abgerufen am 28. November 2014 von <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/eckpunkt-fuer-ein-integriertes-energie-und-klimaprogramm,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
- Bundesregierung. (2009). *Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung*. Berlin.
- Bundesregierung. (2011). *Regierungsprogramm Elektromobilität*. Abgerufen am 01.08.2014 von <http://www.foerderinfo.bund.de/elektromobilitaet>
- Bundesregierung. (2014). *Elektroautos attraktiver machen*. Abgerufen am 17.06.2014 von [www.Bundesregierung.de: http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2014/03/2014-03-27-elektromobilitaet-hauptstadtkonferenz.html](http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2014/03/2014-03-27-elektromobilitaet-hauptstadtkonferenz.html)
- Burnham, A. (2012). *Updated Vehicle Specifications in the GREET Vehicle-Cycle Model*. Argonne National Laboratory, Center for Transportation Research. Argonne: Argonne National Laboratory.
- Burnham, A., Wang, M. & Wu, Y. (2006). *Development and Applications of GREET 2.7 — The Transportation Vehicle-Cycle Model*. Argonne National Laboratory, Energy Systems Division. Argonne: Argonne National Laboratory.
- Castor, S. & Hedrick, J. (2006). Rare Earth Elements. In *Industrial Minerals* (S. 769-792). Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- CATARC. (2013). *Information on CATARC (China Automotive Technology and Research Centre)*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://www.catarc.ac.cn/ac_en/index.htm
- CCFA. (2014). *Tableau de bord automobile – Année 2013 CCFA, Paris*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://www.cdfa.fr/IMG/pdf/tdb37_annee_2013b.pdf
- Chang, S.-B. (2012). Using patent analysis to establish technological position: Two different strategic approaches. *Technological Forecasting and Social Change*, S. 3-15.

- China Association of Automobile Manufacturers. (2013). *Sales and production of new energy vehicles*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.caam.org.cn/AutomotivesStatistics/20140113/1065112305.html>
- Cho, S., Eom, S.-B. & Shin, J.-S. (2012). *Korean government status report: The first automotive policy master plans (2012-2016)*. Korean Automobile Testing and Research Institute, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea.
- City, Mobility & Transport Laboratory. (2013). *Information from expert interview*.
- Classen, M., Althaus, H.-J., Blaser, S., Scharnhorst, W., Tuchschnid, M., Jungbluth, N., et al. (2009). *Life Cycle Inventories of Metals*.ecoinvent 2.1, Dübendorf.
- CleanVehicleEurope. (2012). 'Clean Vehicle Portal provided by the European Commission, Info per Member State'. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.cleanvehicle.eu/info-per-country-and-eu-policy/member-states/france/national-level>
- Costa, E. (2013). *Rio de Janeiro takes the first step towards the development of sustainable development. Electric Cars Report*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://electriccarsreport.com/2013/06/rio-de-janeiro-takes-the-first-step-towards-the-development-of-sustainable-mobility/>
- Daimler. (2011). *Nachhaltigkeitsbericht*. Abgerufen am 14.06.2014 von <http://nachhaltigkeit.daimler.com/reports/daimler/annual/2012/nb/German/3560/volkswirtschaftliche-bedeutung-der-automobilindustrie.html?printDoc=2>
- Dane, A. (2013). *Electric Avenue: Are South Africa's Cars Going Electric? Think Africa Press*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://thinkafricapress.com/south-africa/shifting-mobility-electric-cars>
- DAT. (2013). *DAT-Report*. Autohaus.
- DAT. (2013). *E10-Verträglichkeit von Kraftfahrzeugen*. Abgerufen am 02.02.2015 von <http://www.dat.de/e10liste/e10vertraeglichkeit.pdf>
- DDI. (2014). *Schaufenster Elektromobilität*. (D. D. Institut, Produzent) Abgerufen am 19.09.2014 von <http://schaufenster-elektromobilitaet.org>
- Deloitte. (2011). *Gaining traction: Will consumers ride the electric vehicle wave? India results, Deloitte, August 2011*.
- Deloitte. (2012). *Deloitte Announces Results of Consumer Attitude Survey on Electric Vehicles and Next Generation Vehicles. Deloitte Tohmatsu Consulting*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://www.tohmatsu.com/assets/Dcom-Japan/Local%20Assets/Documents/Press/Release/EN/jp_p_press120905_en_090113.pdf
- Department of Heavy Industries. (2012). *National Electric Mobility Mission Plan 2020*. New Dehli.
- DIW. (2010). *Elektromobilität: Kurzfristigen Aktionismus vermeiden, langfristige Chancen nutzen*. Abgerufen am 25.01.2015 von http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.358259.de/10-27-1.pdf
- DLR. (2012). *Marktperspektiven zukünftiger Fahrzeugkonzepte: Wettbewerb technischer Lösungen, der Kunde und die Rahmenbedingungen, Präsentation 7. März 2012 DLR Energiespeichersymposium Stuttgart, Dr. Stephan A. Schmid*. Abgerufen am 15.09.2013
- DLR. (2013). *Der PKW-Markt bis 2040: Was das Auto von morgen antreibt*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Fahrzeugkonzepte. Berlin: Mineralölwirtschaftsverband.

- DLR, Fraunhofer IWES & IFNE. (2012). *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland mit Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global*.
- DOE. (2014). *Electric Vehicle Charging Station Locations*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://www.afdc.energy.gov/fuels/electricity_locations.html
- Du, X. & Graedel, T. (2011). Global Rare Earth In-Use Stocks in NdFeB Permanent Magnets. *Journal of Industrial Ecology*, 15(6), S. 836–843.
- Dudenhöffer, K. (2013). *Akzeptanz von Elektroautos in Deutschland und China. Eine Untersuchung von Nutzungsintegrationen im Anfangsstadium der Innovationsdiffusion. Dissertation Universität Duisburg-Essen*.
- Dünnebeil, F., Lambrecht, U., Goletz, M., Zittel, W., Schmidt, P., Müller-Langer, F., et al. (2013). *Analyse aktueller Szenarien zur Entwicklung des Verkehrs in Deutschland und dessen Umweltwirkungen*. BMVBS.
- EDTA. (2014). *Electric Drive Sales Dashboard*. Abgerufen am 2014 09 von <http://electricdrive.org/index.php?ht=d%2Fsp%2Fi%2F20952%2Fpid%2F20952>
- EEA. (2014). *Monitoring CO2 emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2013, EEA, Kopenhagen*.
- EEO. (2014). *European Electro-Mobility Observatory*. Abgerufen am 08. Januar 2015 von <http://ev-observatory.eu/category/resources/>
- EGVI. (2013). *Presentation*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.egvi.eu/about-the-egvi-ppp/presentation>
- Eichseder, H. & Klell, M. (2012). *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- ESMT. (2011). *Marktmodell Elektromobilität*. Abgerufen am 19.09.2014 von www.mmem.eu
- ETN. (2015). *Elektromobilität NRW - Kompetenzzentren*. Abgerufen am 15.01.2015 von <http://www.elektromobilitaet.nrw.de/kompetenzzentren.html>
- EU. (2000). *RICHTLINIE 2000/53/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge*. Brüssel.
- Euro NCAP. (2014). *Results released in 2014*. Abgerufen am 02.02.2015 von <http://www.euroncap.com/results/2014.aspx>
- Eurocities. (2010). *Case study: Public charging points for electric vehicles, Warsaw*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.eurocities.eu/eurocities/documents/Case-study-Public-charging-points-for-electric-vehicles-Warsaw-WSPO-8PM4ZT>
- Europäische Kommission. (2002). *Kraftfahrzeugvertrieb und -kundendienst in der Europäischen Union. Verordnung (EG) Nr. 1400/2002*.
- European Commission. (1999). *Case No COMP/M.1406 - HYUNDAI / KIA. REGULATION (EEC) No 4064/89 MERGER PROCEDURE*. Abgerufen am 02.02.2015 von http://ec.europa.eu/competition/mergers/cases/decisions/m1406_en.pdf
- European Commission. (2013a). *Horizon 2020. Work Programme 2014-2015. Smart, green and integrated transport. European Commission Decision C (2013)8613 of 10 December 2013*.
- European Commission. (2013). *Paving the way to electrified road transport. Publicly funded research, development and demonstration projects on electric and plug-in vehicles in Europe. JRC, Luxemburg, Publication Office of the European Union*.

- European Commission. (2014). *Reducing CO2 emissions from passenger cars*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm
- European Green Cars Initiative. (2014). *Project Portfolio. European Green Cars Initiative PPP. Calls 2010-2013*. Abgerufen am 19.09.2014 von [http://www.egci.eu/uploads/Modules/Publications/project-portfolio-egci-\(june2014\).pdf](http://www.egci.eu/uploads/Modules/Publications/project-portfolio-egci-(june2014).pdf)
- European Parliament. (2011). *Future Metal Demand from Photovoltaic Cells and Wind Turbines Investigating the Potential Risk of Disabling a Shift to Renewable Energy Systems*. Abgerufen am 13.05.2014 von http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2011/471604/IPOL-JOIN_ET%282011%29471604_EN.pdf
- eurostat. (2010). *Europa in Zahlen*.
- Eurostat. (2014). *EU Vehicles in use*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/transport/data/main_tables#
- EV Norway. (2014). *Norway's EV future*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.evnorway.no/#/future>
- EV Sales. (2014). *Japan December 2013 - Nissan Edition*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://ev-sales.blogspot.de/2014/01/japan-december-2013.html>
- EVI. (2013). *Global EV Outlook*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://www.iea.org/topics/transport/subtopics/electricvehiclesinitiative/EVI_GEO_2013_FullReport.pdf
- EVObsession. (2014). *World Electrified Vehicle Sales - 2013 Report*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://evobsession.com/world-electrified-vehicle-sales-2013/>
- Fan, C., Gnann, T., Hettesheimer, T., Marscheider-Weidemann, F., Reiß, T., Sauer, A., et al. (2013). *Elf Thesen zur Entwicklung von Energiespeichern für die Elektromobilität in Deutschland. Strategiebericht im Rahmen des Begleitforschungsprojektes Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR)*. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- Fernholz, G. (2014). *Strategien und Maßnahmen der BMBF-Forschungsförderung in der Elektromobilität*. Berlin.
- FfE. (2009). *Energiezukunft 2050: Teil II - Szenarien*. Abgerufen am 27.01.2015 von http://www.ffe.de/download/berichte/Endbericht_Energiezukunft_2050_Teil_II.pdf
- Finpro. (2013). *Electric Mobility in India 2013*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://de.scribd.com/doc/202761422/Finpro-Electric-Mobility-in-India-2013>
- Flamberg, S., Rose, S. & Stephens, D. (2010). *Analysis of Published Hydrogen Vehicle Safety Research*. National Highway Traffic Safety Administration.
- Fortis Bank. (2009). *The Yellow Book*.
- Fraunhofer ISI. (2013). *Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität EMOTOR*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/t/projekte/emotor.php>
- Fraunhofer ISI. (2013). *Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge*. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI.
- Fraunhofer-Gesellschaft. (2014). *Institute und Einrichtungen*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.fraunhofer.de/>
- Frieske, B., Klötzke, M., Koska, T. & Hüging, H. (2013). *Arbeitspapier der STROMbegleitung - Ergebnisse der Forschungsreise Japan*. DLR & Wuppertal Institut.

- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., et al. (2005). The ecoinvent database: Overview and methodological framework. *International Journal of Life Cycle Assessment*(10), S. 3-9.
- Fulton, L. (2014). *Scenarios for the IEA Energy Technology Perspectives 2012, unpublished data*.
- Fulton, L., Lah, O. & Cuenot, F. (2013). Transport Pathways for Light Duty Vehicles: Towards a 2 Degree Scenario. *Sustainability*, 2013/5 S. 1863-1874.
- Gaines, L. & Nelson, P. (2010). Lithium Ion Batteries: Examining material demand and recycling issues. *Argonne National Laboratory*.
- GML. (2012). *Greenland Minerals and Energy Ltd*. Abgerufen am 13. Mai 2014 von <http://www.ggg.gl/projects/kvanefjeld-rees-uranium-zinc/history/>
- Gnann, T., P., P., F., Z., & M., W. (2012). *Elektromobilität im Personenverkehrsverkehr-eine Potenzialanalyse*. Fraunhofer ISI.
- Green Car Congress. (2014). Abgerufen am 20. Oktober 2014 von <http://www.greencarcongress.com/2014/08/20140814-doe.html>
- Green Car Congress. (2015). *Green Car Congress*. Abgerufen am 16.01.2015 von Production and sales of plug-ins boomed in China in 2014: <http://www.greencarcongress.com/2015/01/production-and-sales-of-plug-ins-boomed-in-china-in-2014.html>
- Green car reports. (2014). *China Buys More Cars, But U.S. Trounces It In Plug-In Cars*. Abgerufen am 30. 10 2014 von http://www.greencarreports.com/news/1090439_china-buys-more-cars-but-u-s-trounces-it-in-green-cars
- Green Car Reports. (2014). *China Buys More Cars, But U.S. Trounces It In Plug-In Cars* . Abgerufen am 30. 10 2014 von http://www.greencarreports.com/news/1090439_china-buys-more-cars-but-u-s-trounces-it-in-green-cars
- Grønn Bil. (2013). *Informationen aus Experteninterview*.
- Grønn Bil. (2014). *Over 20.000 ladbare biler på norske veier*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.gronnbil.no/nyheter/over-20-000-ladbare-biler-paa-norske-veier-article366-239.html>
- Hacker, F., Harthan, R., Matthes, F. & Zimmer, W. (2009). *Environmental impacts and impact on the electricity market of a large scale introduction of electric cars in Europe*. Abgerufen am 26.01.2015 von http://acm.eionet.europa.eu/docs/ETCACC_TP_2009_4_electromobility.pdf
- Hannisdahl, O., Malvik, H. & Wensaas, G. (2013). *The future is electric! The EV revolution in Norway – explanations and lessons learned*. *EVS 27 Conference Proceedings , Barcelona*.
- Haugneland, P. & Kvisle, H. (2013). *Norwegian electric car user experiences*. *EVS27 Conference Proceedings, Barcelona*.
- Helms, H., Jöhrens, J., Hanusch, J., Höpfner, U., Lambrecht, U. & Pehnt, M. (2011). *UMBRéLA - Grundlagenbericht*.
- Helms, H., Lambrecht, U., Jöhrens, J., Pehnt, M., Liebich, A., Weiß, U., et al. (2013). *Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität "Twin Drive"*.
- Hettesheimer, T., Hummen, T., Marscheider-Weidemann, F., Schröter, M., Lerch, C., Stahlberger, M., et al. (2013). *Energiespeicher Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR) - Bericht zur Produktion und Ökobilanzierung*. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- Hofmann, P. (2010). *Hybridfahrzeuge*. SpringerWienNewYork.

- Hülsebusch, D., Ungethüm, J., Braig, T. & Dittus, H. (Oktober 2009). Multidisziplinäre Simulation von Fahrzeugen. *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*.
- Huss, A., Maas, H. & Hass, H. (2013). *Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and power trains in the European context: TANK-TO-WHEELS (TTW). Report Version 4*. Joint Research Centre European Commission. Luxembourg: European Commission.
- HWWI. (2009). *Mobilität - Strategie 2030*. Hamburg: Berenberg Bank.
- Hybridcars.com. (2014). *Dashboard – Plug-in Electric Cars Sales Numbers*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.hybridcars.com/december-2013-dashboard/>
- IA-HEV. (2012). *The Implementing Agreement for cooperation on Hybrid and Electric Vehicle Technologies and Programmes (IA-HEV), IA-HEV Member Countries*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.ieahev.org/by-country>
- IA-HEV. (2013). *Hybrid and Electric Vehicles. The electric drive gains traction*. The Implementing Agreement for cooperation on Hybrid and Electric Vehicle Technologies and Programmes (IA-HEV)
- ICCT. (2014). *Driving Electrification. A global comparison of fiscal incentive policy for electric vehicles. ICCT, Washington*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EV-fiscal-incentives_20140506.pdf
- ICCT. (2014). *European Vehicle Market Statistics*. International Council on Clean Transportation. Berlin: ICCT.
- ICRA. (2011). *Indian Passenger Vehicle Industry: Growth Momentum to Continue*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.icra.in/Files/ticker/PV-Industry-201103.pdf>
- IEA. (2012a). *Energy Technology Perspectives 2012*. International Energy Agency
- IEA. (2012b). *World Energy Outlook 2012*. International Energy Agency
- IEA. (2013). *IEA Statistics: CO2 emissions from fuel combustion*. Abgerufen am 01.09.2014 von <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/co2emissionsfromfuelcombustionhighlights2013.pdf>
- IFA. (2014). *France's sectors of excellence – Automotive industry*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.invest-in-france.org/Medias/Publications/225/AutomotiveIndustry.pdf>
- infas, & DLR. (2008). *Mobilität in Deutschland 2008*.
- InsideEVs. (2014). *Monthly Plug-In Sales Scorecard*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://insideevs.com/monthly-plug-in-sales-scorecard/>
- IVT. (2004). *Anhang Fahrleistungserhebung 2002* (Bd. 1).
- Jackson, W. D., & Christiansen, G. (1993). *International Strategic Minerals Inventory Summary Report - Rare Earth Oxides*. U. S. Geological Survey. USGS.
- Jaskula, B. W. (2010). *Gallium*. U.S. Geological Survey. USGS.
- KBA. (2011). *Neuzulassungen und Besitzumschreibungen von Kraftfahrzeugen nach Segmenten, Modellreihen, CO2-Emissionen und Kraftstoffverbrauch*. Kraftfahrt-Bundesamt
- KBA. (2012). *Bestand an Personenkraftwagen am 1. Januar 2012 gegenüber 1. Januar 2011 nach Segmenten und Modellreihen (Zulassungen ab 1990)*. Kraftfahrt-Bundesamt
- KBA. (2013a). *Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern Monatsergebnisse*. Kraftfahrt-Bundesamt

- KBA. (2013b). *Neuzulassungen*. Abgerufen am 12.07.2013 von http://www.kba.de/nn_125398/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/neuzulassungen__node.html?__nnn=true
- KBA. (2014c). *Neuzulassungen von Personenkraftwagen im Dezember 2013 nach Marken und Modellreihen*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2013_monatlich/FZ10/fz10_2013_12_pdf.pdf;jsessionid=8807B726B7AB1921EF45032CC1D32A1C.live1042?__blob=publicationFile&v=6
- KBA. (2014d). *Neuzulassungen von Personenkraftwagen in den Jahren 2004 bis 2013 nach Segmenten*. Abgerufen am 26.08.2014
- KBA. (2014b). *Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Segmenten und Modellreihen im Dezember 2013*. Kraftfahrt-Bundesamt
- KBA. (2014a). *Fahrzeugstatistiken*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://www.KBA.de/cln_031/nn_124584/DE/Statistik/Fahrzeuge/fahrzeuge__node.html?__nnn=true
- KIT. (2012). *Deutsches Mobilitätspanel (MOP)*. Bericht 2011/2012, Institut für Verkehrswesen.
- Klink, J. (2012). *Elektromobilität in China – Förderpolitik und Modellregionen*. In: *mobilität morgen 2012(4): 24-27*. Online verfügbar: http://www.mobilitaet.biz/fileadmin/Dateien/IMG/mobilitaet_morgen/Magazin_Mobilitaet_Morgen_2.2012.pdf.
- Klötzke, M., Höttl, A. & Trommer, S. (2013a). *Arbeitspapier der STROMbegleitung - Ergebnisse der Forschungsreise Nordamerika*. DLR.
- Klötzke, M., Hüging, H., Koska, T., Trommer, S., Frieske, B., Höttl, A., et al. (2014a). *Arbeitspapier der STROMbegleitung - Ergebnisse der Forschungsreisen*. DLR & Wuppertal Institut.
- Klötzke, M., Trommer, S. & Hillebrand, P. (2014b). *Arbeitspapier der STROMbegleitung - Ergebnisse der Forschungsreise China*. DLR & Wuppertal Institut.
- Klötzke, M., Veitengruber, J., Hüging, H. & Koska, T. (2013b). *Arbeitspapier der STROMbegleitung - Ergebnisse der Forschungsreise Indien*. DLR & Wuppertal Institut.
- Koch, J., & Meisinger, C. (2011). *E-Mobility-Patentindex*. Patentanwälte Grünecker, Kinkeldey, Stockmair & Schanhäusser. München.
- Konietzko, S. & Gernuks, M. (2011). *Ressourcenverfügbarkeit von sekundären Rohstoffen: Potenzialanalyse für Lithium und Kobalt, Abschlussbericht, Oktober 2011, Umbrella-Arbeitsgruppe Ressourcenverfügbarkeit im Rahmen der BMU-geförderten Projekte LithoRec und LiBRi*.
- Korthauer, R. (2014). *Handbuch Elektromobilität*. EW Medien und Kongresse.
- Kreyenberg, D., Lischke, A., Berg, F., Duennebeil, F., C., H., Knörr, W., et al. (2014). *Erneuerbare Energien im Verkehr - Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- Kunz, C. (2013). *Studienvergleich: Entwicklung der Volllaststunden von Kraftwerken in Deutschland*. Agentur für Erneuerbare Energien.
- Liedtke, C., Bienge, K., Wiesen, K., Teubler, J., Greiff, K., Lettenmeier, M., et al. (24. August 2014). *Resource Use in the Production and Consumption System - The MIPS Approach*. *Resources*(3), S. 544-574.

- Liedtke, M. & Elsner, H. (2009). Seltene Erden. *Commodity Top News*(31).
- Long, K. R., van Gosen, B. S., Foley, N. K. & Cordier, D. (2010). *The Principal Rare Earth Elements Deposits of the United States - A Summary of Domestic Deposits and Global Perspective*. U. S. Geological Society. USGS.
- MarkLines. (2014). *Plans for Green Vehicles*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://www.marklines.com/en/green_vehicles/
- McKinsey & Company. (2010). *Beitrag der Elektromobilität zu langfristigen Klimaschutzziele und Implikationen für die Automobilindustrie, Überblick erste Ergebnisse und Überlegungen*. McKinsey & Company im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin.
- McKinsey. (2010). *A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis*. McKinsey & Company, Brussels.
- Meissner, H.-R. (2014). *Die Bedeutung der Automobilindustrie für die deutsche und europäische Wirtschaft*. In: *Blick Log Notizen über Wirtschaft, Finanzen, Management und mehr*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.blicklog.com/2013/10/31/die-bedeutung-der-automobilindustrie-fr-die-deutsche-und-europaeische-wirtschaft/>
- METI. (2010). *Next Generation Vehicle Strategy*. Abgerufen am 01.12.2012 von <http://www.env.go.jp/air/report/h21-01/>
- Ministry of Transportation Ontario. (2013). *Electric Vehicle Incentive Program*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.mto.gov.on.ca/english/dandv/vehicle/electric/electric-vehicles.shtml>
- Mock, P. (2010). *Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21)*. Stuttgart: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR).
- Mock, P., German, J., Bandivadekar, A., Riemersma, I., Ligterink, N. & Lambrecht, U. (2013). *From Laboratory to Road: A comparison of official and "real-world" fuel consumption and CO₂ values for cars in Europe and the United States*. International Council on Clean Transportation, Washington DC.
- MOEJ, METI, MLIT. (2012). *Low Emission Vehicles Guidebook 2012 (in Japanisch)*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://www.env.go.jp/air/car/vehicles2012/LEV_chapter3.pdf
- MoHIPE. (2006). *Automotive Mission Plan 2006-2016*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://dhi.nic.in/Final_AMP_Report.pdf
- MoHIPE. (2012). *Report of the Working Group on Automotive Sector for the 12th Five Year Plan (2012-2017)*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://planningcommission.nic.in/aboutus/committee/wrkgrp12/wg_auto1704.pdf
- Molycorp. (2012). *Molycorp*. Abgerufen am 13. Mai 2014 von www.molycorp.com/about-us/our-facilities/molycorp-mountain-pass
- Moss, R., Tzimas, E., Willis, P., Arendorf, J. & Espinoza, L. (2013). *Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies*. Abgerufen am 29.11.2013 von <http://setis.ec.europa.eu/system/files/Critical%20Metals%20Decarbonisation.pdf>
- Mudd, G. M. (2009). *The Sustainability of Mining in Australia : Key Production Trends and Their Environmental Implications for the Future. Research Report No. RR5*. Monash University and Mineral Policy Institute, Department of Civil Engineering.

- Müller, S., Vogel, J. & Molter, U. (2013). *Flexible Carsharingsysteme / E-Carsharing Übersicht zu Kommunen, Anbietern und Rahmenbedingungen*. Ivm GmbH. Abgerufen am 19.09.2014 von http://www.ivm-rheinmain.de/wp-content/uploads/2013/11/ivm_Carsharing_Handreichung_Ergaenzung_Nov2013.pdf
- Neary, C. R. & Highley, D. E. (1984). The economic importance of the rare earth elements. In P. Henderson, *Rare earth element geochemistry*. New York, Amsterdam: Elsevier.
- Nemry, F. & Brons, M. (2010). *Plug-in Hybrid and Battery Electric Vehicles. Market penetration scenarios of electric drive vehicles*. JRC Technical Notes, Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- NEV. (2013). *EV & PHV Town Concept Report in Japan 2013*, NeV, Tokio.
- NEV. (2014). *CEV*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://cev-pc.or.jp/tokei/koufu3.html>
- Niederschlag, E. & Stelter, M. (2008). 145 Jahre Indium - Ein Metall mit Zukunft? *Erzmetall*, 62, S. 17-22.
- Nitsch, J., Pregger, T., Naegler, T., Heide, D., Luca de Tena, D., Trieb, F., et al. (2012). *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global - Schlussbericht*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Kassel / Stuttgart / Teltow.
- Nobis, C. & Luley, T. (2005). *Bedeutung und gegenwärtiger Stand von Verkehrsdaten in Deutschland*. DLR.
- Noel, F. (1989). Indium and Indium compounds. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim.
- Notter, D. A., Gauch, M., Widmer, R., Wäger, P., Stamp, A., Zah, R., et al. (2010). Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 44(17), S. 6550-6556.
- NPE. (2011). *Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität – Anhang*. Bonn: BMVBS.
- NPE. (2012). *Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (Dritter Bericht)*. Herausgegeben von der gemeinsamen Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO). Berlin.
- OICA. (2012). *2012 production statistics*. Abgerufen am 19.09.2014 von [http://www.oica.net/category/production-statistics/](http://www.oica.net/category/production-statistics/2012-statistics/)
- OICA. (2014). *OICA Sales Statistics*. Abgerufen am 01.07.2014 von <http://www.oica.net/category/sales-statistics/>
- Okadene Hollins. (2010). *Lanthanide Resources and Alternatives. A report for the Department of Transport and Department for Business, innovation and Skills*. Okadene Hollins Research & Consulting.
- OLEV. (2013). *Driving the Future Today – A strategy for ultra low emission vehicles in the UK*. OLEV, London.
- Paternoga, S., Pieper, N., Wisetschläger, D., Beuscher, G. & Wachalsik, T. (2013). *Akzeptanz von Elektrofahrzeugen - Aussichtsloses Unterfangen oder große Chance*. Wolfsburg, Braunschweig.
- Pehnt, M. (2001). *Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik*. Institut für Technische Thermodynamik Deutsches Zentrum für Luft- und

Raumfahrt (DLR) und Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieverwendung
Universität Stuttgart.

- Peters, A. & Hoffmann, J. (2011). *Nutzerakzeptanz von Elektromobilität. Eine empirische Studie zu attraktiven Nutzungsvarianten, Fahrzeugkonzepten und Geschäftsmodellen aus Sicht potentieller Nutzer*. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Peters, A., Doll, C., Kley, F., Möckel, M., Plötz, M., Sauer, A., et al. (2012). *Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt*. TAB Büro für Technikfolgenabschätzung beim deutschen Bundestag.
- Pienkos, J. T. (2005). *The Patent Guidebook*. Chicago: American Bar Association.
- Plötz, P., Gnann, T., Kühn, A. & Witschel, M. (2013). *Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge, Studie im Auftrag der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE)*. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Pohl, W. L. (2005). *Mineralische und Energie-Rohstoffe. Eine Einführung zur Entstehung und nachhaltigen Nutzung von Lagerstätten*. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- POLITO / IFEU / DLR. (2008). *Final report on technical data, costs and life cycle inventories of fuel cells. Deliverable n° 9.2 - RS 1a. NEEDS New Energy Externalities Developments for Sustainability. Edited by: Raffaella GERBONI (PEMFC), Martin PEHNT (MCFC), Peter VIEBAHN (SOFC), Evasio LAVAGNO*. POLITO / IFEU / DLR.
- Polk. (2011). *Electric Vehicle Demand. Global forecast through 2030*.
- Pötz, P. & Eichhammer, W. (2011). *Zukunftsmarkt effiziente Elektromotoren*. Abgerufen am 16.01.2015 von http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/Fallstudie_Elektromotoren.pdf
- Proff, H. & Kilian, D. (2012). *Competitiveness of the EU Automotive Industry in Electric Vehicles*. Duisburg: Universität Duisburg-Essen.
- Propfe, B., Kreyenberg, D., Wind, J. & Schmid, S. (2013). Market penetration analysis of electric vehicles in the German passenger car market towards 2030. *Internation Journal of Hydrogen Energy*.
- Pusenius, K., Lettenmeier, M. & Saari, A. (2005). *Luonnonvarojen kulutus Suomen tieliikenteessä (TieMIPS). [Natural resource consumption by Finland's road transport (TieMIPS), in Finnish.]*. Ministry of Transport and Communications (Finland). Helsinki: Edita Publishing Oy.
- Québec EV. (2013). *Purchase or Lease Rebate*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/english/particuliers/rabais-montants.asp>
- Redelbach, M. (2012). *Analyse der Fahrleistung und Flottenzusammensetzung im deutschen PKW-Markt*.
- Renault. (2011). *Fluence and Fluence Z.E. - Life Cycle Assessment*.
- Renault. (2011). *Fluence and Fluence Z.E.: Life Cycle Assessment*. Technical Report, Renault Group; Practicionners: Barat, A; Dang, V; Querini, F; Morel, S.
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2013). *Special:Analyse over 2013*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.rvo.nl/sites/default/files/2014/01/Special%20elektrisch%20vervoer%20analyse%20over%202013.pdf>
- Ritthoff, M. (2011). *Gallium In: MaRess - AS 2.1 Umweltrelevante metallische Rohstoffe*. Wuppertal Institut, Wuppertal.

- Roland Berger & fka. (2014). *E-mobility index for Q1 2014*. München/Aachen: Roland Berger Strategy Consultants - Automotive Competitive Center & Forschungsgesellschaft Kraftfahrzeugwesen mbH.
- Roland Berger und fka. (September 2014). Index Elektromobilität 3. Quartal 2014. Roland Berger.
- Ruegg, R. & Jordan, G. (2007). *Overview of Evaluation Methods for R&D Programs*.
- Samus, T., Lang, B. & Rohn, H. (Oktober 2013). Assessing the natural resource use and the resource efficiency potential of the Desertec concept. *Solar Energy*, 87, S. 176-183.
- Sauer, A. & Thielmann, A. (2013). *Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR) - Trendbericht*. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- Saurat, M. & Ritthoff, M. (2013). Calculating MIPS 2.0. *Resources(2)*, S. 581-607.
- Schlick, T., Hertel, G., Hagemann, B., Maiser, E. & Kramer, M. (2011). *Zukunftsfeld Elektromobilität. Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen und Anlagenbau*. Roland Berger / VDMA.
- Schmidt-Bleek, F., Bringezu, S., Hinterberger, F., Liedtke, C., Spangenberg, J., Stiller, H., et al. (1998). *MAIA: Einführung in die Material-Intensitäts-Analyse nach dem MIPS-Konzept*. Berlin, Deutschland: Birkhäuser.
- Schweimer, G. W. & Levin, M. (2000). *Sachbilanz des Golf A4*. Forschung Umwelt und Verkehr, Volkswagen AG und Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Gesamthochschule Kassel, Wolfsburg / Kassel.
- Sévin, D. (2014). *Elektromobilität in Deutschland – Das BMVI-Förderprogramm „Modellregionen Elektromobilität. Präsentation im Rahmen der Veranstaltung „Elektromobilität – Utopie oder Realität?“*.
- Shell. (2009). *Shell Pkw Szenarien bis 2030. Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Mobilität*. Shell, Hamburg.
- Shen, S., & Jourdan, A. (2014). *Reuters*. (Reuters, Produzent) Abgerufen am 08.01.2015 von China plans to extend green vehicle subsidies until 2020: <http://www.reuters.com/article/2014/12/30/us-china-autos-environment-idUSKBN0K806B20141230>
- Sierzchula, W., Bakker, S., Maat, K. & van Wee, B. (2014). The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption. *Energy Policy*, S. 183-194.
- SMMT. (2014). *Motor industry facts 2014*. Society of motor manufacturers and traders. London: SMMT.
- Southafrica.info. (2013). *South Africa's electric vehicle plan. New business development*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.southafrica.info/business/trends/newbusiness/automotive-030513.htm#.UdKANOVvJw%23ixzz2Xs3FMxTQ>
- Spath, P. L. & Mann, M. K. (2001). *Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming*.
- Statistisches Bundesamt. (2013). *Verkehr auf einen Blick*. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt. (2014b). *Umfrage Automobilindustrie*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/30703/umfrage/beschaefigtetenzahl-in-der-automobilindustrie/>

- Statistisches Bundesamt. (2014a). *Umfrage Elektromobilität*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/160479/umfrage/umsatz-der-deutschen-automobilindustrie/>
- Süddeutsche Zeitung. (2013). *Süddeutsche Zeitung*. Abgerufen am 13. Mai 2014 von <http://www.sueddeutsche.de/politik/eisenerz-und-uran-groenland-beschliesst-rohstoffausbeutung-1.1804194>
- Tagscherer, U. (2012). *Electric mobility in China – A policy review*. In: *Fraunhofer ISI Discussion Papers Innovation Systems and Policy Analysis No. 30*, Online verfügbar: http://isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/p/de/diskpap_innosysteme_policyanalyse/discussionpaper_30_2012.pdf.
- Technology Strategy Board. (2014). *Technology Strategy Board grant funded projects database*. Abgerufen am 19.09.2014 von <https://connect.innovateuk.org/publicdata/>
- Teske, S., Pregger, T., Simon, S., Naegler, T., O'Sullivan, M., Schmid, S., et al. (2012). *Energy [R]evolution - a sustainable world energy outlook - 4th edition 2012 world energy scenario*. Greenpeace International, European Renewable Energy Council (EREC), Global Wind Energy Council (GWEC), Amsterdam / Brüssel.
- The Silver Institut; Thomson Reuters GFMS. (2014). *World Silver Survey - A Summary*. Washington.
- Tolcin, A. (2014). *Minerals Yearbook 2012: Indium*. U.S. Geological Survey.
- Transnova. (2013). *Information from expert interview*.
- Transnova. (2014). *About Transnova*. Abgerufen am 19.09.2014 von <http://www.transnova.no/english/>
- Trechow, P. (2012). *Das Getriebe hat auch in Elektrofahrzeugen Zukunft*. Abgerufen am 14.05.2014 von [www.ingenieur.de](http://www.ingenieur.de/Fachbereiche/Antriebstechnik/Das-Getriebe-in-Elektrofahrzeugen-Zukunft): <http://www.ingenieur.de/Fachbereiche/Antriebstechnik/Das-Getriebe-in-Elektrofahrzeugen-Zukunft>
- TRL. (2013). *Assessing the role of the Plug-in Car Grant and Plugged-in Places scheme in electric vehicle take-up*. Abgerufen am 19.09.2014 von https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/236749/research-exec-summary.pdf
- U. S. Geological Survey. (1996-2013c). *Mineral Commodity Summaries: Indium*. USGS.
- U. S. Geological Survey. (1996-2013b). *Mineral Commodity Summaries: Lithium*. USGS.
- U. S. Geological Survey. (1996-2013a). *Mineral Commodity Summaries: Rare Earths*. USGS.
- U. S. Geological Survey. (1996-2014a). *Mineral Commodity Summaries: Germanium*. USGS.
- U. S. Geological Survey. (1996-2014b). *Mineral Commodity Summaries: Platinum group metals*. USGS.
- U. S. Geological Survey. (1996-2014d). *Mineral Commodity Summaries: Silver*. USGS.
- U. S. Geological Survey. (1996-2014c). *Mineral Commodity Summaries: Tantalum*. USGS.
- U. S. Geological Survey. (1997-2014). *Mineral Commodity Summaries: Gold*. USGS.
- U. S. Geological Survey. (2001). *Mineral Commodity Surveys: Gallium*.
- U. S. Geological Survey. (2013a). *Mineral Commodity Summary: Lithium*. USGS.
- U. S. Geological Survey. (2013b). *Mineral Commodity Summary: Rare Earths*. USGS.
- U. S. Geological Survey. (2014d). *Mineral Commodity Summaries: Tantalum*.
- U. S. Geological Survey. (2014b). *Mineral Commodity Summary: Platinum group metals*. USGS.

- U. S. Geological Survey. (2014a). *Mineral Commodity Summary: Silver*. USGS.
- U. S. Geological Survey. (2014c). *Mineral Commodity Summary: Gallium*.
- U.S. Department of Transportation. (2010). *Analysis of Published Hydrogen Vehicle Safety Research*. Abgerufen am 27.01.2015 von <http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NVS/Crashworthiness/Alternative%20Energy%20Vehicle%20Systems%20Safety%20Research/811267.pdf>
- UKERC - UK Energy Research Centre. (2013). *Energy Materials Availability Handbook*. Abgerufen am 19.09.2014 von UKERC: <http://www.ukerc.ac.uk/asset/B658BAA0%2DF7DA%2D496B%2DA27896608CBBA65A/>
- Ullmann, F. (2007). *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*. Weinheim: Wiley-VCH.
- UN/ECE. (2010). *Regelung Nr. 101 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE)*.
- UN/ECE. (2014). *New Passenger Car Registrations During the Year by Country, Fuel Type and Time*. Abgerufen am 19.09.2014 von http://w3.unece.org/pxweb/dialog/varval.asp?ma=ZZZ_TRRoadNewPasVh_r&path=../database/STAT/40-TRTRANS/02-TRRoadFleet/&lang=1&ti=New+Passenger+Car+Registrations+During+the+Year+by+Country%2C+Fuel+Type+and+Time
- VDA. (2014). *Daten zur Automobilwirtschaft – Ausgabe 2014*. Berlin: Verband der Automobilindustrie (VDA).
- Viebahn, P. & Wiesen, K. (2014). *Resources for the Energiewende – examples on the German level and need for policy action & research*. Berlin.
- Wiesen, K. (2010). *Ermittlung von Ressourceneffizienzpotenzialen der regenerativen Stromerzeugung durch Windenergie und Biomasse in Deutschland. Erweiterte Fassung der Masterarbeit*. . HAWK Göttingen.
- Wiesen, K., Saurat, M. & Lettenmeier, M. (2014). Calculating the Material Input per Service Unit using the Ecoinvent database. *Int. J. Perform. Eng.*(10), S. 357-366.
- Wiesen, K., Teubler, J. & Rohn, H. (2013). Resource use of two wind farms in the German North Sea - The examples of Alpha Ventus and Bard Offshore I. *Resources*.
- Wietschel, M. & Dallinger, D. (2008). Quo vadis Elektromobilität? *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 58, 2008, 12, S. 8-15.
- Wuppertal Institut. (2014). *KRESSE - Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. unter Mitarbeit von Karin Arnold, Jonas Friege, Christine Krüger, Arjuna Nebel, Michael Ritthoff, Sascha Samadi, Ole Soukup, Jens Teubler, Peter Viebahn, Klaus Wiesen*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal.
- Wuppertal Institute; SERI; gws. (2008). *Comparing coefficient and input-output approach to calculate Total Material Consumption (TMC)*. *Workpackage 1.2*. Wien.
- Wurzelmann, S. (2011). *U.S. Department of Energy's Recovery Act - Spending*. PEW Center.
- WVI, IVT, DLR & KBA. (2012). *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010*.
- ZIV. (2013). *Zahlen, Daten, Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland*. Von http://ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PK_2013-ZIV_Praesentation_20-03-2013_oT.pdf abgerufen

Anhang A Auflistung der in der Fahrzeugkonzeptdatenbank erfassten Fahrzeuge

Hersteller	Modell
Acura	RLX Sport Hybrid
AEV	Kurrent
Aixam-Mega	e-City
AMP Electric Vehicles	E-Cherokee
Artega	SE
Audi	A1 E-Tron
Audi	A1 Sportsback
Audi	A2
Audi	A3 E-Tron
Audi	A3 e-tron Sportback
Audi	A6 Hybrid
Audi	A6 L E-Tron
Audi	A8 Hybrid
Audi	A8 Hybrid 2010
Audi	Allroad Shooting Brake
Audi	Crosslane
Audi	Duo Hybrid
Audi	E-Tron 2009
Audi	E-Tron 2010
Audi	E-Tron Spyder
Audi	Metroproject Quattro
Audi	Q5
Audi	Q7 Hybrid
Audi	R18 E-Tron Quattro
Audi	R8 E-Tron
Audi	Sport Quattro Concept
Audi	TT Crossover Concept
Audi	Urban Concept
BAIC	C30DB
BAIC	E150 EV
Baoya	BY5000EV-1A
Baoya	BY-E-CAR-02
Baoya	BY-E-CAR-03
Baoya	Yate
batScap	Bluecar
BDNT	Denza

Hersteller	Modell
BDNT Denza	EV
Bentley	Bentley Hybrid Concept
BMW	5er Active Hybrid
BMW	Active Hybrid 3
BMW	Active Hybrid 5
BMW	Active Hybrid 7
BMW	Active Tourer Concept
BMW	ActiveE
BMW	City
BMW	Concept 7 Series Active Hybrid
BMW	Concept X5 eDrive
BMW	i3
BMW	i8
BMW	i8 Concept
BMW	i8 Concept Spyder
BMW	Vision EfficientDynamics
BMW	X3 Efficient Dynamics
BMW	X5 Efficient Dynamics
BMW	X5 Vision Efficient Dynamics
BMW	X6 Active Hybrid
BMW	X6 Active Hybrid Concept
BRABUS	4WD Full Electric
BRABUS	Project Hybrid
BRABUS	ULTIMATE electric drive
BRABUS	Ultimate High Voltage
Brilliance	EV
Brilliance	EV Concept
BYD	e6-Eco
BYD	F3DM
BYD	S6DM

Hersteller	Modell
Cadillac	Converj
Cadillac	ELR
Cadillac	Escalade Hybrid
Cadillac	Provoq
Centric	ThoRR
Changan	Green-i EV
Chery	QQ3 EV
Chery Riich	M1 EV
Chevrolet	Miray
Chevrolet	Silverado Hybrid
Chevrolet	Silverado Hybrid
Chevrolet	Spark EV
Chevrolet	Tahoe Hybrid
Chevrolet	Volt
Chevrolet	Volt Concept
Chrysler	200C EV
Chrysler	Town and Country EV
Citroen	Berlingo Electrique
Citroen	C4 HDI Hybrid
Citroen	C5 Aircscape
Citroen	Cactus
Citroen	C-Cactus
Citroen	C-Métisse
Citroen	C-ZERO
Citroen	DS3 Electrum
Citroen	DS5 Hybrid 4
Citroen	DS9
Citroen	Hypnos
Citroen	REVOLTe
Citroen	Survolt
Citroen	Tubik
Citroen	Wild Rubis
Citysax	Citysax
Coda Automotive	Coda
Daihatsu	HVS
Daihatsu	UFE-III
Detroit Electric	SP:01
Dezhou Fuxing	FULAIWO-C1
DFM	EJ 02
Ditroit Electric	e46
Ditroit Electric	e63
Dodge	ZEO Concept
Dok-Ing	XD
Dynasty	Sedan
ElbilNorge AS	Buddy

Hersteller	Modell
Electric Car Corporation	C1 ev'ie
Energetique	evMe
Estrima	Biro
EVC	E36
EVC	F3
EVC	R7
E-Wolf	Alpha-R
E-Wolf	Delta-2
E-Wolf	E1
E-Wolf	E2
Exagon Motors	Andros Car 02
Exagon Motors	Furtive-eGT
FAW	091 F EV
Ferrari	599 Hybrid
Ferrari	LaFerrari
Fiat	500 EV
Fisker	Atlantic
Fisker	Karma
Fisker	Karma Sunset
Fisker	Surf
Flybo	XFD 6000
Flybo	YM-E10
Ford	C-Max
Ford	Edge HySeries
Ford	E-Ka
Ford	Escape
Ford	EVOS Concept
Ford	Fiesta
Ford	Focus Electric
Ford	Fusion Gen.1
Ford	Fusion Gen.2
Ford	Transit Connect Electric
GAC	Trumpchi GS5-BEV
Geely	GE Emgrand
Geely Emgrand	GT
General Motors	EN-V
Genovation	G2
German E Cars	Stromos
German-e-Cars	Cetos
GETRAG	Hybrid Democar
Giugiaro	Namir
GM Saturn	EV1
GMC	Sierra Hybrid
GMC	Yukon Hybrid
Great Wall	Volex C20EV

Hersteller	Modell
Hasco	Q-Concept
Heinkel	Kabine RWE-E-Mobil
Hiriko	Hiriko
Honda	Accord Plug-in
Honda	AC-X
Honda	Civic Hybrid
Honda	Civic IMA
Honda	Concept B
Honda	CR-Z
Honda	CR-Z
Honda	EV Concept
Honda	EV-ster
Honda	Insight IMA
Honda	Insight IMA
Honda	Jazz Hybrid
Honda	Micro Commuter
Honda	NSX Concept
Honda	Small Hybrid Sports
Honda	Urban SUV Concept
Hummer	HX
Hyundai	Elantra LPI
Hyundai	i10 Electric
Hyundai	i-Flow
Hyundai	ix35 Hybrid
Hyundai	NHD-4 Blue Will
Hyundai	Sonata Hybrid
IED Abarth	Scorp-Ion
Indikar	Trabant nT
Infiniti	EMERG-E
Infiniti	Essence
Infiniti	LE
Infiniti	M35h
Infiniti	Q50h
Innovative Mobility Automobile GmbH	Colibri
Innovech	My Car
Irmscher	i-Selectra
JAC	J3 iev
Jaguar	C-X16
Jaguar	C-X75
Jaguar	XJ Limo-Green
Jaguar	XJ-e
Jeep	Patriot EV
Jetcar	Jetcar Elektro
Johnson Controls	ie:3
Johnson Controls	re3

Hersteller	Modell
KAIST	Armadillo-T
Kamoo	500-220i Elektra
Kamoo	Smile
Kamoo	Twingo Elektra
Kando	KD 5010
Karabag	500 Electro
Karabag	E Käfer
Karabag	new 500E
Karmann	E3
Kia	Cee'd
Kia	Forte LPI
Kia	Naimo
Kia	Niro
Kia	Optima Hybrid
Kia	POP
Kia	provo
Kia	Ray EV
Kia	Ray PHEV
Kia	Rio Hybrid
Kia	Sorento Hybrid
Kia	Soul EV
Kia	Soul Hybrid
Kia	Venga EV
Königsegg	Quant
Land Rover	ERAD
Land Rover	Land_e
Land Rover	LRX
Land Rover	Range Rover Hybrid
Land Rover	Range Rover Hybrid LWB
Lexus	CT 200h
Lexus	ES 300h
Lexus	GS 300h
Lexus	GS 450h 3.Gen.
Lexus	GS 450h 4.Gen.
Lexus	HS 250h
Lexus	IS 300h
Lexus	LF-Ch
Lexus	LF-Gh
Lexus	LF-LC
Lexus	LF-Xh
Lexus	LS 600h
Lexus	NX 300h
Lexus	RC 300h
Lexus	RX 400h
Lexus	RX 450h
Lifan	620 EV

Hersteller	Modell
Ligier	M.GO electric
Li-ion	Flach
Li-Ion	Inizio
Li-ion	Wave
Li-Ion	Wave 2
Loremo	EV
Lotus	Ethos City Car
Luis	4U green
Luis	4U green
Lumeneo	Neoma
Lumeneo	Smera
Magna Steyr	HySUV
Magna Steyr	Mila Alpin
Magna Steyr	Mila EV
Mahindra	XUV500
Mahindra Reva	E2O
Mahindra Reva	Halo
Mahindra Reva	Maximo EV
Mahindra Reva	Verito Electric
Mazda	Tribute
McLaren	P1
Mercedes-Benz	A-Klasse E-Cell
Mercedes-Benz	BlueZERO E-CELL
Mercedes-Benz	B-Klasse E-CELL Plus
Mercedes-Benz	B-Klasse Electric Drive
Mercedes-Benz	BlueZERO E-CELL Plus
Mercedes-Benz	C-Klasse T-Modell
Mercedes-Benz	E300 BlueTEC Hybrid
Mercedes-Benz	F500 Mind
Mercedes-Benz	F700 Diesotto
Mercedes-Benz	F800 Style
Mercedes-Benz	GLK Bluetec
Mercedes-Benz	ML 450 Hybrid
Mercedes-Benz	S300 Blue Tec
Mercedes-Benz	S350 Direct Hybrid
Mercedes-Benz	S400 BlueHybrid
Mercedes-Benz	S500 PHEV
Mercedes-Benz	S500 Plug-In Hybrid
Mercedes-Benz	SLS AMG
Mercedes-Benz	SLS AMG E-Cell
Mercedes-Benz	SLS AMG Electric Drive
Mercedes-Benz	Vito E-Cell

Hersteller	Modell
Mercury	Milan
Mia Electric	Mia
Micro-Vett	500E
Mileworks	E-Rod
Mindset	Mindset Range
Mini	E
MINI	Mini Superleggera Vision
Mitsubishi	GC-PHEV
Mitsubishi	i-EV
Mitsubishi	i-MiEV
Mitsubishi	Lancer MIEV
Mitsubishi	Outlander PHEV
Mitsubishi	PX-MiEV
Mitsubishi	PX-MiEV 2
Mitsubishi	XR-PHEV
MK-Group	CARe 500
Movitron	Teener
ngwq	EVL050V
Nissan	Altima Hybrid
Nissan	Bladeglider
Nissan	Esflow
Nissan	EV
Nissan	HEV
Nissan	Hi-Cross Concept
Nissan	Leaf
Nissan	Leaf Nismo RC
Nissan	Mixim
Nissan	Nuvu
Nissan	NV200-EV
Nissan	Pathfinder Hybrid
Nissan	Pivo 3
Nissan	Pivo II
Nissan	Resonance
Nissan	Townpod
Opel	Ampera
Opel	Ampera
Opel	Astra GTC Hybrid
Opel	Corsa Hybrid
Opel	Flextreme
Opel	Flextreme GT/E
Opel	Monza
Opel	RAK-e
Opel	Vivaro eConcept
Optimal Energy	Joule
Peugeot	5
Peugeot	106e

Hersteller	Modell
Peugeot	208 Hybrid FE
Peugeot	3008 HYbrid4
Peugeot	3008 Hybrid4
Peugeot	307 Hdi Hybrid
Peugeot	308 Hybrid Hdi
Peugeot	508 RXH
Peugeot	908 HYbrid4
Peugeot	908 HYmotion2
Peugeot	BB1
Peugeot	DS High Rider
Peugeot	EX1
Peugeot	HR1
Peugeot	HX1
Peugeot	iOn
Peugeot	iOn Cargo
Peugeot	Onyx
Peugeot	Partner Electric
Peugeot	Prologue HYmotion 4
Peugeot	RC Hymotion 4
Peugeot	RCZ HYbrid4
Peugeot	SR1
Peugeot	SxC
PG	Elektrus
Pininfarina	Cambiano
Pininfarina	Nido EV
Pininfarina Bolloré	B0
Porsche	911 GT3 R Hybrid
Porsche	918 RSR
Porsche	918 Spyder
Porsche	918 Spyder Concept
Porsche	Boxster E
Porsche	Cayenne Hybrid
Porsche	Cayenne S Hybrid
Porsche	Panamera Hybrid
Porsche	Panamera S E-Hybrid
Porsche	Panamera S Hybrid
Proton	Emas Hybrid
Protoscar	LAMPO
Protoscar	LAMPO2
Protoscar	LAMPO3
Protoscar	LAMPO3 GT
Quicc!	DiVa
Renault	DeZir Z.E.
Renault	Fluence Z.E.
Renault	Fluence Z.E.

Hersteller	Modell
Renault	FRENDZY
Renault	Kangoo BeBop Z.E.
Renault	Kangoo Maxi Z.E.
Renault	Kangoo Z.E.
Renault	Twizy
Renault	Twizy Z.E.
Renault	ZOE
Renault	Zoe Z.E.
Reva	L-ion
Reva	NXG
Riich	X1 EV
Rimac	Concept One
Rinspeed	Bamboo
Rinspeed	iChange
Rinspeed	microMAX
Rinspeed	sQuba
Rinspeed	UC?
Roewe	E1
Rolls-Royce	102 EX
Ronart	Lightning GT
Ruf	eRuf
Ruf	Greenster
Ruf	Stromster
RWITH Aachen University	Deliver
Saab	9-3 True Electric
Saab	BioPower
Saab	ePower
SAIC Roewe	E50
Saturn	Aura Greenline
Saturn	Vue 2Mode
Saturn	Vue Greenline
Seat	IBE
Seat	IBL Concept
Seat	IBX
Seat	Leon TwinDrive
Shandong Huoyun	HY-B22120
Shanghai-GM	Springo EV
Silex Power	Chreos
Sim-Drive	Sim-Cel
Sim-Drive	Sim-Lei
Sim-Drive	Sim-Will
Skoda	E-Citigo
Skoda	Oktavia Green E Lina
Smart	forspeed
Smart	Fortwo electric drive

Hersteller	Modell
Smart	for-us
Smart	forvision
Smart	Fourjoy
Smiles AG	CityEL
Spark-Renault	SRT_01E
Stevens	Electric Car
Subaru	B5-TPH
Subaru	G4e
Subaru	Hybrid Tourer
Subaru	R1e
Subaru	Stella EV
Subaru	Viziv
Subaru	XV Crossteck Hybrid
Suzuki	Kizashi EcoCharge Concept
Suzuki	Q-Concept
Suzuki	Swift
Suzuki	Twin Hybrid
Tango	T600
Tara	Tiny EV
TATA	eMO
Tata	Indica Vista
Tata	Magic Iris
Tata	Nano
Tazzari	Zero
Tesla	Model S
Tesla	Model X
Tesla	Roadster
Tesla	Roadster S
TGS	Xtreme Buggy EV
Think	City
TommyKaira	ZZ EV
Toyota	1/X
Toyota	A-Bat
Toyota	Aqua G Sports
Toyota	Auris HSD
Toyota	Auris Hybrid
Toyota	Camry
Toyota	Camry Hybrid
Toyota	Crown Hybrid
Toyota	Estima Hybrid
Toyota	FT-Bh Concept
Toyota	FT-CH
Toyota	FT-EV II
Toyota	FT-HS Concept
Toyota	GRMN Sports Hybrid

Hersteller	Modell
Toyota	Hybrid X
Toyota	iQ EV
Toyota	NS4
Toyota	Prius +
Toyota	Prius 1
Toyota	Prius 1
Toyota	Prius 2
Toyota	Prius 3
Toyota	Prius 3
Toyota	Prius C Concept
Toyota	Prius Plug-In
Toyota	RAV4 EV
Toyota	RAV4 EV
Toyota	SAI
Toyota	TMG EV P001
Toyota	TS030
Toyota	Voxy/Noah
Toyota	Yaris Hybrid
Toyota	Yaris Hybrid R
TU Dresden	InEco
TUM	Mute
UNIQUECO	eFroog
Venturi	America
Venturi	Fetish
Venturi	Volage
Via Motors	VTRUX
Volkswagen	Bulli
Volkswagen	Cross Coupé
Volkswagen	Cross-Blue
Volkswagen	E-Bugster
Volkswagen	e-Co-Motion
Volkswagen	e-Golf
Volkswagen	eT!
Volkswagen	E-Up
Volkswagen	e-up!
Volkswagen	Go!
Volkswagen	Golf Blue E-Motion
Volkswagen	Golf Diesel Hybrid
Volkswagen	Golf Eco Power
Volkswagen	Golf Plug-in Hybrid
Volkswagen	Golf TwinDrive
Volkswagen	Jetta Hybrid
Volkswagen	L1
Volkswagen	Lavida Blue-E-Motion
Volkswagen	Load up!
Volkswagen	Milano Taxi

Hersteller	Modell
Volkswagen	New Compact Coupe
Volkswagen	Nils
Volkswagen	Space Up! Blue
Volkswagen	Tex
Volkswagen	Touareg Hybrid
Volkswagen	Touran EcoPower II
Volkswagen	Touran Hybrid
Volkswagen	Twin-up
Volkswagen	Up Lite
Volkswagen	XL1
Volteis	X4 VS2
Volvo	C30
Volvo	Concept Coupé
Volvo	ECC Hybrid

Hersteller	Modell
Volvo	ReCharge Concept
Volvo	S60L Petrol Plug-in
Volvo	V60
Volvo	V60 Plug-in Hybrid
Volvo	V70
Volvo	XC60
Vromos	Kiwi
VW	E-Bugster
Wellboom	Compact E City Car
Wheego	LiFe
Yamaha	MOTIV-e
Zenn	Zenn
Zinoro	1E
Zotye	TD100 EV

Anhang B Erläuterung zu nicht berücksichtigten Studien der Materialintensitätsanalyse im Rahmen der Analyse bestehender Lebenszyklusanalysen

Studie „GREET: Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation“

Burnham et al. (2006, 2012) haben im Rahmen des *Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation* (GREET)-Modells ein lebenszyklusweites Fahrzeugmodell entwickelt, mit dem der Energieverbrauch und die Emissionen der Fahrzeugherstellung und -verwertung berücksichtigt werden können und so ein ökobilanzieller Vergleich unterschiedlicher Antriebskonzepte ermöglicht wird. In das GREET-Modell von 2006 waren sechs unterschiedliche Fahrzeuge des Mittelklassesegments implementiert, wobei drei verschiedene Motorisierungen (Verbrennungsmotor, Verbrennungsmotor mit Hybridkonfiguration und Brennstoffzelle) mit jeweils zwei Materialkonzepten (konventionell und Leichtbau) kombiniert wurden. In der Version von 2012 wurde das Mittelklassesegment um das SUV- und Pickup-Segment erweitert und es wurden vier Antriebskonzepte (ICE, HEV, BEV und FCEV) verfügbar gemacht.

Die Studie gibt für alle Antriebskonzepte eine detaillierte Aufteilung in Systemkomponenten an. Abgesehen von der Batterie sind die Materialinventare der Komponenten teilweise sehr unspezifisch bzw. undifferenziert. So wurden beispielsweise keine Seltenen Erden aufgeführt. Da dieser Aspekt für die STROM-Modellierung und die anschließende Bewertung kritischer Rohstoffe von entscheidender Bedeutung ist, finden die Materialinventare des Modells keine Anwendung.

Studie „UMBRaLA: Umweltbilanzen Elektromobilität“

Helms et al. (2011) bilanzieren und bewerten im *Wissenschaftlichen Grundlagenbericht* des Forschungsprojektes UMBReLA („Umweltbilanzen Elektromobilität“) verschiedene Umweltaspekte der Elektromobilität. Es werden konventionelle Antriebskonzepte (Diesel-, Ottomotor) mit batterieelektrischen Fahrzeugen (auch mit Range Extender) und brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen nach einem ökobilanziellen Ansatz verglichen. Dabei wird neben dem Stand der Technik (2010) auch die Situation im Jahr 2030 anhand von Szenarien untersucht. Mit Hilfe des entwickelten Ökobilanzmodells eLCAr (Electric Car LCA) konnten dabei die Umweltwirkungen der Lebenswegbereiche Fahrzeugherstellung, Energiebereitstellung (Strom und Kraftstoffe) und Fahrzeugnutzung ermittelt werden. Die Datengrundlage bildete in den meisten Fällen die Ecoinvent-Datenbank-Version 2.2.

Als Umweltwirkungen wurden die Klimawirkung (GWP 100), der Kumulierte Energieaufwand (fossil, nuklear und erneuerbar), die Versauerung, die Eutrophierung (terrestrisch), der Sommersmog (POCP) und die Feinstaubemissionen (PM10) untersucht.

Helms et al. (2011) geben grobe Materialzusammensetzungen der Fahrzeuge oder deren Komponenten an, die zudem Geheimhaltungsvereinbarungen unterliegen. Aus diesem Grund konnten im Rahmen der STROM-Modellierung keine Materialinventare verwendet werden.

Studie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“

Angerer et al. (2009) untersuchen in der Studie *Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage* die Impulse verschiedener Zukunftstechnologien und des daraus resultierenden branchenspezifischen Rohstoffbedarfs auf die globale Rohstoffnachfrage. Dabei wird eine umfassende Technologieauswahl analysiert, so u.a. die Informations- und Kommunikationstechnik sowie die Energie- und Umwelttechnik. Im Mobilitätsbereich wird der Rohstoffbedarf folgender Fahrzeugkomponenten untersucht: Elektromotoren, Karosserie auf Leichtbaubasis, Batterien und Brennstoffzellen.

Da die Materialdaten nur einige Metalle der jeweiligen Komponenten enthalten, diente diese Studie als Vergleich und es wurden keine Materialinventare verwendet. Die Studie wird als weniger relevant für die STROM-Begleitforschung eingeschätzt.

Anhang C Herleitung der Materialinventare von Systemkomponenten (Skalierungsfaktoren, Materialinventare)

Antriebskonzept	Masse Glider			Skalierungsfaktoren		
	2010 kg	2020 kg	2030 kg	2010 -	2020 -	2030 -
ICE-B	988	902	833	1,26	1,15	1,06
ICE-D	1024	929	854	1,31	1,19	1,09
ICE-CNG	984	889	800	1,26	1,14	1,02
HEV	988	901	819	1,26	1,15	1,05
PHEV	988	899	813	1,26	1,15	1,04
REEV	987	901	814	1,26	1,15	1,04
BEV	984	899	815	1,26	1,15	1,04
FCEV	984	899	808	1,26	1,15	1,03

Tab. 10-1 Masse des Gliders nach Huss et al. (2013) und die resultierenden Skalierungsfaktoren der jeweiligen Antriebskonzepte für den Zeitraum 2010 bis 2030

Quelle: Huss et al. (2013), eigene Berechnung

Antriebskonzept	Masse Verbrennungsmotor			Skalierungsfaktor		
	2010 kg	2020 kg	2030 kg	2010 -	2020 -	2030 -
ICE-B	145	135	126	1,02	0,95	0,89
ICE-D	165	165	165	1,16	1,16	1,16
ICE-CNG	135	135	126	0,95	0,95	0,89
HEV	145	135	126	1,02	0,95	0,89
PHEV	145	135	126	1,02	0,95	0,89
REEV	135	130	125	0,95	0,92	0,88

Tab. 10-2 Masse des Verbrennungsmotors nach Huss et al. (2013) und die resultierenden Skalierungsfaktoren der jeweiligen Antriebskonzepte für den Zeitraum 2010 bis 2030

Quelle: Huss et al. (2013), eigene Berechnung

Antriebskonzept	Masse restlicher Antriebsstrang			Skalierungsfaktor gesamter Zeitraum
	2010	2020	2030	
	kg	kg	kg	-
ICE-B	50	50	50	0,43
ICE-D	50	50	50	0,43
ICE-CNG	50	50	50	0,43
HEV	80	80	80	4,21
PHEV	80	80	80	4,21
REEV	80	80	80	4,21
BEV	10	10	10	0,53
FCEV	10	10	10	0,53

Tab. 10-3 Masse des Restantriebsstrangs nach Huss et al. (2013) und die resultierenden Skalierungsfaktoren der jeweiligen Antriebskonzepte für den Zeitraum 2010 bis 2030

Quelle: Huss et al. (2013), eigene Berechnung

Antriebskonzept	Tankmasse		
	2010	2020	2030
	kg	kg	kg
ICE-B	15	15	15
ICE-D	15	15	15
ICE-CNG (Erdgas)	160	60	60
HEV (Benzin)	15	15	15
PHEV (Benzin)	15	15	15
REEV (Benzin)	15	15	15
FCEV (H ₂)	92	80	70

Tab. 10-4 Tankmasse der jeweiligen Antriebskonzepte für den Zeitraum 2010 bis 2030

Quelle: Huss et al. (2013)

Antriebskonzept	Masse Elektromotor			Skalierungsfaktor		
	2010	2020	2030	2010	2020	2030
	kg	kg	kg	-	-	-
HEV	24	20	17	0,40	0,34	0,28
PHEV	36	30	25	0,60	0,50	0,42
REEV	68	50	37	1,14	0,84	0,62
BEV	68	43	27	1,14	0,72	0,45
FCEV	64	47	35	1,07	0,79	0,59

Tab. 10-5 Masse des Elektromotors nach Huss et al. (2013) und die resultierenden Skalierungsfaktoren der jeweiligen Antriebskonzepte für den Zeitraum 2010 bis 2030

Quelle: Huss et al. (2013), eigene Berechnung

Ecoinvent-Prozess	Materialzusammensetzung	
	2030	
	kg	
PSM	17	
aluminium, production mix, cast alloy, at plant	4,16	
boron carbide, at plant	0,00	
copper, at regional storage	2,85	
(dysprosium) neodymium oxide, at plant	0,02	
ethylene glycol, at plant	0,60	
ferrite, at plant	0,34	
neodymium oxide, at plant	0,09	
polyethylene, HDPE, granulate, at plant	0,17	
polyphenylene sulfide, at plant	0,66	
reinforcing steel, at plant	0,26	
steel, low-alloyed, at plant	7,69	
synthetic rubber, at plant	0,17	
ASM	17	
aluminium, production mix, cast alloy, at plant	0,17	
cast iron, at plant	2,55	
chromium steel 18/8, at plant	1,70	
copper, at regional storage	2,55	
polyvinylchloride, at regional storage	0,68	
steel, low-alloyed, at plant	9,35	

Tab. 10-6 Materialinventar eines PSM und ASM, skaliert für HEV und den Zeitraum 2030

Quelle: Notter et al. (2010), Huss et al. (2013), Wuppertal Institut 2014, eigene Berechnung

Antriebskonzept	Masse Generator			Skalierungsfaktor		
	2010	2020	2030	2010	2020	2030
	kg	kg	kg	-	-	-
REEV	42	35	29	0,70	0,59	0,49

Tab. 10-7 Masse des Generators nach Huss et al. (2013) und die resultierenden Skalierungsfaktoren des Antriebskonzeptes für den Zeitraum 2010 bis 2030

Quelle: Huss et al. (2013), eigene Berechnung

Antriebskonzept	Masse Leitungssatz			Skalierungsfaktor
	2010	2020	2030	gesamter Zeitraum
	kg	kg	kg	-
HEV	11	11	11	3,53
PHEV	15	15	15	4,81
REEV	20	20	20	6,41
BEV	20	20	20	6,41
FCEV	20	20	20	6,41

Tab. 10-8 Masse des Leitungssatzes nach Huss et al. (2013) und die resultierenden Skalierungsfaktoren der jeweiligen Antriebskonzepte für den Zeitraum 2010 bis 2030

Quelle: Huss et al. (2013), eigene Berechnung

Antriebskonzept	Masse Batterie		
	2010	2020	2030
	kg	kg	kg
HEV	34	26	20
PHEV	80	59	44
REEV	165	95	55
BEV	200	175	153
FCEV	34	26	20

Tab. 10-9 Masse der Batterie der jeweiligen Antriebskonzepte für den Zeitraum 2010 bis 2030

Quelle: Huss et al. (2013)

Antriebskonzept	Masse Brennstoffzelle			Skalierungsfaktor		
	2010	2020	2030	2010	2020	2030
	kg	kg	kg	-	-	-
FCEV	167	109	71	3,06	2,00	1,30

Tab. 10-10 Masse der Brennstoffzelle nach Huss et al. (2013) und die resultierenden Skalierungsfaktoren des Antriebskonzeptes für den Zeitraum 2010 bis 2030

Quelle: Huss et al. (2013), eigene Berechnung

Ecoinvent-Prozess	abiotischer Materialbedarf für FCEV		
	2010	2020	2030
	kg/Brennstoffzelle		
aluminium, primary, at plant	1,132	0,739	0,481
aluminium, secondary, from old scrap, at plant	4,527	2,955	1,925
carbon black, at plant	0,767	0,501	0,326
cast iron, at plant	2,447	1,597	1,040
chromium steel 18/8, at plant	70,970	46,322	30,173
glass fibre, at plant	0,306	0,200	0,130
graphite, at plant	13,766	8,985	5,852
platinum, at regional storage	0,004	0,003	0,002
polyethylene, HDPE, granulate, at plant	7,342	4,792	3,121
polypropylene, granulate, at plant	0,765	0,499	0,325
polystyrene, general purpose, GPPS, at plant	0,918	0,599	0,390
polyvinylidenchloride, granulate, at plant	3,365	2,196	1,431
steel, low-alloyed, at plant	60,263	39,333	25,621
tetrafluoroethylene, at plant	0,214	0,140	0,091
titanium dioxide, production mix, at plant	0,214	0,140	0,091

Tab. 10-11 Materialzusammensetzung für eine PEM-Brennstoffzelle

Quelle: *POLITO et al. 2008, eigene Berechnung*

Erzeugungsart	Ecoinvent-Prozess
Kernkraft	nuclear, at power plant
Braunkohle	lignite, at power plant
Steinkohle	hard coal, at power plant
Gas	natural gas, at power plant
Öl	oil, at power plant
Wasserkraft	hydropower, at power plant
Windkraft	at wind power plant
Photovoltaik	production mix photovoltaic, at plant (DE)
Biogas	at cogen with biogas engine, allocation exergy
Biofeststoffe	at cogen ORC 1400kWth, wood, allocation exergy

Tab. 10-12 Ecoinventprozesse zur Stromproduktion (electricity, production mix)

Quelle: *Frischknecht et al. 2005, eigene Annahmen*