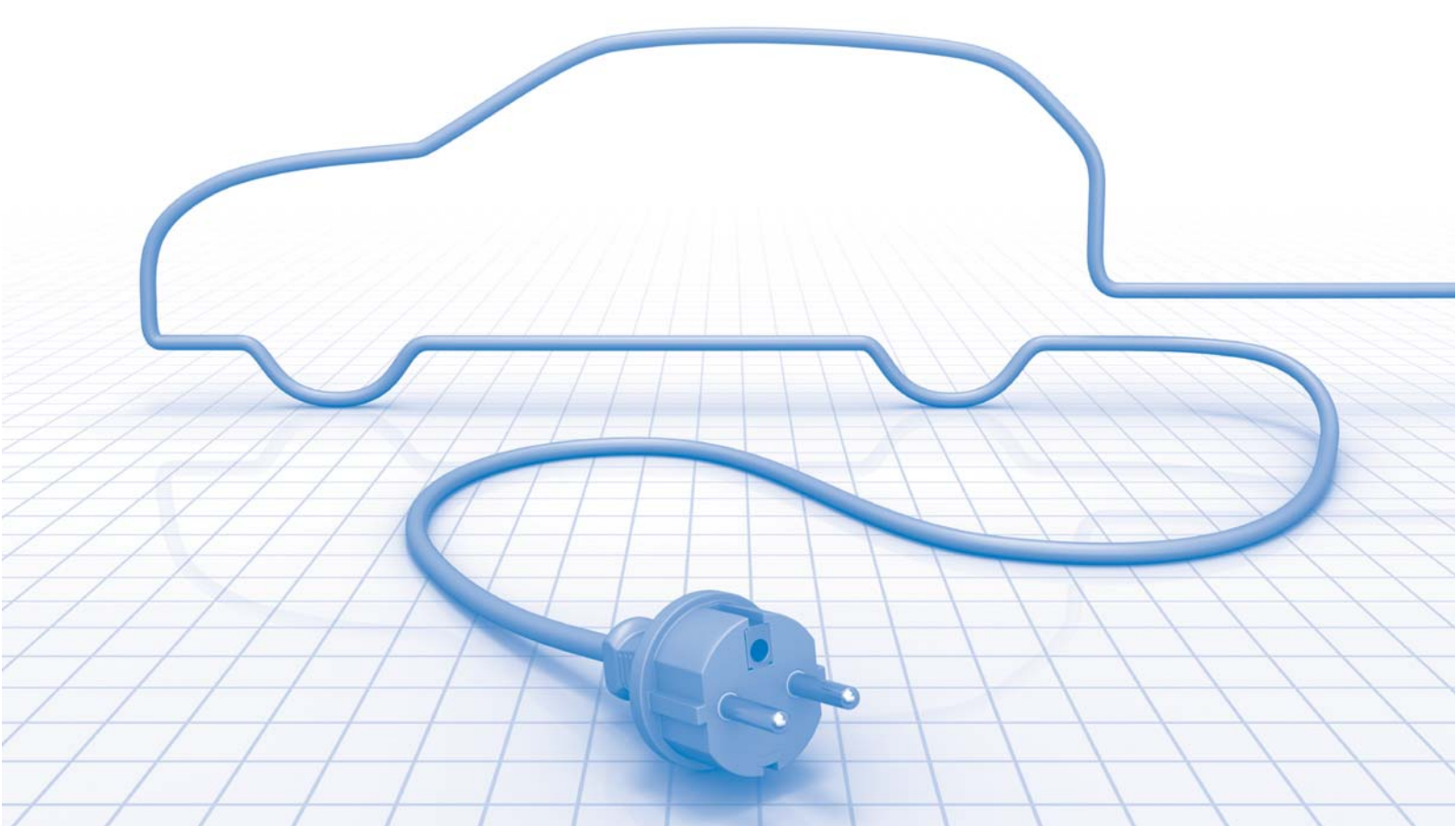


Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge

Entwicklung und Bewertung einer Ausbaustrategie auf Basis des Fahrverhaltens

Fabian Kley



Fraunhofer-Institut für
System- und Innovationsforschung ISI

ISI-Schriftenreihe »Innovationspotenziale«

Fabian Kley

Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge

Entwicklung und Bewertung einer Ausbaustrategie
auf Basis des Fahrverhaltens

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
Telefon 07 21 68 09-0
Telefax 07 21 68 91-52
E-Mail info@isi.fraunhofer.de
URL www.isi.fraunhofer.de

D90

Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2011

Umschlagbild: Mit freundlicher Genehmigung von iStockphoto

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

ISSN: 1612-7455

ISBN: 978-3-8396-0302-4

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2011

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-25 00
Telefax 07 11 9 70-25 08
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

LADEINFRASTRUKTUREN FÜR ELEKTROFAHRZEUGE

ENTWICKLUNG UND BEWERTUNG EINER
AUSBAUSTRATEGIE AUF BASIS DES FAHRVERHALTENS

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Wirtschaftswissenschaften

(Dr. rer. pol.)

von der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Wi.-Ing. Fabian Kley

Tag der Abgabe: 16. Juni 2011

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Juli 2011

Referent: apl. Prof. Dr. rer. pol. Martin Wietschel

Korreferent: Prof. Dr. rer. pol. Hagen Lindstädt

Für meine Familie

Danksagung

Das Anfertigen der vorliegenden Doktorarbeit wäre ohne die Hilfe einer Vielzahl an Personen nicht möglich gewesen.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Martin Wietschel für die aktive und kollegiale Betreuung meiner Doktorarbeit, die fachlichen Konversationen und die immer nach vorne gerichteten Verbesserungsvorschläge. Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr. Hagen Lindstädt für die Übernahme des Korreferats und meinem Prüfer Herrn Prof. Dr. Wolf Fichtner danken.

Die Doktorarbeit ist während meiner Zeit am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) in Karlsruhe entstanden und profitierte im Wesentlichen von den unzähligen und anregenden Diskussionen im Kollegenkreis. Meine Dankbarkeit gilt insbesondere David Dallinger für seine kritische Draufsicht und den damit verbundenen Ratschlägen, Dr. Patrick Plötz für seine analytische Schärfe, Dr. Elisabeth Dütschke, Dr. Anja Peters und Jana Hoffmann für die ergänzende Diskussion zu Kundenakzeptanzuntersuchungen sowie Katharina Mattes und Christian Lerch für die Hintergrunddiskussion zu Geschäftsmodellen. Des Weiteren möchte ich Dr. Anne Held, Dr. Claus Doll, Vicki Duscha, Fabio Genoese, Benjamin Pfluger, Jan Steinbach und weiteren Kollegen für die angenehme Arbeitsatmosphäre, Kollegialität und Freundschaft danken. Weiterer Dank gilt Janina Huschle, Roman Fricker, Till Gnann, Christoph Kölling, Sebastian Schraven und Jakob Zwick, die mit der Anfertigung ihrer Abschlussarbeit und den begleitenden Diskussionen ebenfalls zur Ergründung des Themas beigetragen haben.

Diese Arbeit entstand zu Teilen im Rahmen der Bearbeitung der Projekte „Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität“ und „Meregio Mobil“ mit den Förderkennzeichen 13N10599 bzw. 01-ME-09004. Dahingehend gilt mein Dank auch den Bundesministerien für Bildung und Forschung sowie für Wirtschaft und Technologie für die Förderung dieser beiden Projekte. Zudem danke ich meinem früheren und zukünftigen Arbeitgeber Booz & Company für die Freistellung und insbesondere Anja-Isabel Dotzenrath, Andreas Späne und Dr. Walter Wintersteller für die Förderung des Vorhabens. Des Weiteren möchte ich mich auch bei Dr. Malte Kuss und Robert Quandt für deren Interesse am Thema und die Einordnung in den Industriekontext sowie Andreas Deckert und Heiko Peters für den Ansporn zur Fertigstellung bedanken.

Ein großer Dank gilt zudem meiner Familie für die unentwegte Unterstützung. Zu guter Letzt möchte ich meiner Lebenspartnerin Sandra Schmitt für ihr Verständnis und ihre Geduld während der Erstellung dieser Arbeit danken.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vii
Abkürzungsverzeichnis	ix
Kurzfassung und Abstract	xv
1 Einleitung	1
1.1 Situation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Vorgehensweise	4
2 Gegenüberstellung und Bewertung möglicher Ladeinfrastrukturen	5
2.1 Ladeinfrastrukturtreiber und Überblick	5
2.2 Ausgestaltungsmöglichkeiten der Ladeinfrastruktur	7
2.2.1 Art der Versorgungseinrichtung	7
2.2.2 Art der Zugänglichkeit	14
2.2.3 Anschlussleistungen und Ladezeit	15
2.2.4 Anschlussart	18
2.2.5 Infrastrukturkomponenten	19
2.2.6 Anwendungsszenarien	21
2.3 Anforderungen an und Alternativen zur Ladeinfrastruktur	24
2.3.1 Kundenforderungen an Ladeinfrastruktur	24
2.3.2 Energiewirtschaftliche Anforderungen und Rollen	26
2.3.3 Alternativen zum Ausbau der Ladeinfrastruktur	27
2.3.4 Rahmenbedingungen der Ladeinfrastrukturbewertung	29
2.4 Ökonomische Bewertung der Ladeinfrastruktur	29
2.4.1 Detaillierte Infrastrukturszenarien	30
2.4.2 Anschaffungsausgaben und Betriebskosten	31
2.4.3 Infrastrukturauslastung	38
2.4.4 Gesamt- und Strommehrkosten	41
2.5 Referenzladeinfrastruktur	43

3	Einflussfaktoren auf die Ladeinfrastruktur	45
3.1	Überblick	45
3.2	Verkehrs- und Nutzerverhalten	47
3.2.1	Überblick und Segmentierung des Verkehrs	47
3.2.2	Erfassung des Verkehrs- und Nutzerverhaltens	48
3.2.3	Heutige Mobilität und Verkehrsentwicklung	52
3.3	Fahrzeuge und -konzepte	54
3.3.1	Aufbau und Technologie	55
3.3.2	Anschaffungsausgaben und Betriebskosten	57
3.3.3	Referenzfahrzeug	59
3.4	Batterien	61
3.4.1	Anforderungen und Kapazitiering	62
3.4.2	Batterietechnologien	63
3.4.3	Kostenentwicklungen	65
3.4.4	Alterung	66
3.4.5	Restwerte und Zweitnutzung	72
3.4.6	Referenzbatterie	74
3.5	Andere Faktoren	74
3.5.1	Thermische Vorkonditionierung	75
3.5.2	Systemdienstleistungen	78
3.5.3	Steuer- und Fördersysteme	80
4	Bestimmung optimaler Ladeprofile und der Gesamtkosten	85
4.1	Überblick über die Modellierung	85
4.2	Modellierung von Fahr- und Standprofilen	86
4.2.1	Zuordnung von Fahrern zu Fahrzeugen	87
4.2.2	Erzeugung von Wochenprofilen von Wegen und Standorten	88
4.2.3	Setzen der verfügbaren Beladeinfrastruktur	92
4.2.4	Erzeugung einzelner Fahrzeugprofile	92
4.2.5	Abgrenzung weiterer Einflüsse auf das Fahrverhalten	93
4.3	Ladeoptimierung	94
4.3.1	Nicht optimiertes Laden	94
4.3.2	Optimierungsproblem	95
4.3.3	Erweiterungen	97
4.3.4	Lösungsansätze und Methodenauswahl	99
4.3.5	Komplexität und Vereinfachung des Optimierungsproblems	101
4.3.6	Lösung mittels dynamischer Programmierung	103
4.4	Modellierung der Gesamtkosten	108
4.4.1	TCO-Ansatz	108
4.4.2	Betriebskosten	111
4.4.3	Anschaffungsausgaben	112

4.4.4	Gesamtkosten	112
5	Auswahl geeigneter Ladeinfrastruktur	115
5.1	Überblick über die Simulation	115
5.1.1	Simulationsgrößen	116
5.1.2	Ergebnisgrößen	120
5.1.3	Mögliche Segmentauswertungen	121
5.2	Rein elektromobile Nutzung	122
5.2.1	Anteil technisch möglicher Elektromobilitätsnutzung	122
5.2.2	Ökonomisch attraktiver Anteil	125
5.2.3	Benötigte Infrastruktur	131
5.3	Erweiterung um Plug-in-Hybride	132
5.3.1	Ökonomisch attraktiver Anteil von Plug-in-Hybriden	132
5.3.2	Effekte dichter Ladeinfrastruktur	133
5.3.3	Auswirkungen der Batteriealterung	135
5.4	Optimale Batteriedimensionierung	137
5.4.1	Batteriedimensionierung für vollelektrische Fahrzeuge	137
5.4.2	Batteriedimensionierung für Plug-in-Hybride	139
5.5	Zeitliche Entwicklung	140
5.5.1	Technologieweiterentwicklung	141
5.5.2	Fahrprofilentwicklung	142
5.6	Sensitivitäten	143
5.6.1	Betriebskostenänderung	144
5.6.2	Lebensdaueränderung	147
5.6.3	Zinssatzänderung	147
5.7	Einfluss von Steuern und Förderprogrammen	148
5.7.1	Wirkung von Förderprogrammen	149
5.7.2	Bewertung der monetären Förderprogramme	150
5.7.3	Gesamtkosteneinfluss der Förderung	154
5.8	Treiber der Kaufentscheidungen	158
5.8.1	Zahlungsbereitschaft	159
5.8.2	Reichweite und öffentliche Ladeinfrastruktur	161
5.8.3	Verständnis Fahrprofile und Kaufberatung	162
6	Neue Geschäftsmodelle zur Ladeinfrastruktur	165
6.1	Überblick	165
6.2	Begriffsdefinition und neue Geschäftsmodelle	166
6.3	Geschäftsmodelle der Mobilität	168
6.3.1	Beispiele für elektromobile Geschäftsmodelle	169
6.3.2	Identifizierung wesentlicher Stoßrichtungen	171
6.4	Der morphologische Kasten	172

6.4.1	Der morphologische Kasten zur Infrastruktur	173
6.4.2	Abhängigkeiten zwischen den Gestaltungsmöglichkeiten	174
6.5	Bewertung der Geschäftsmodelle zur Ladeinfrastruktur	177
7	Schlussfolgerungen, kritische Würdigung und Ausblick	181
7.1	Schlussfolgerungen	181
7.2	Kritische Würdigung und Ausblick	185
A	Annahmen und ergänzendes Material	187
B	Weitere Auswertungen	191
	Literaturverzeichnis	203

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der Arbeit.	4
2.1	Überblick über die Infrastrukturbetrachtungen.	7
2.2	Verschiedene Ladetechnologien im Überblick.	8
2.3	Verteilung der Parkstandorte auf Basis von Daten des Mobilitätspanels (2006).	16
2.4	Verteilung der zurückgelegten Strecke und die anschließend benötigte Ladezeit in Abhängigkeit der Anschlussleistung.	18
2.5	Ausbau öffentlicher Infrastruktur.	25
3.1	Überblick der verschiedenen Einflussfaktoren.	46
3.2	Entwicklung der Verkehrsträgerwahl im Mobilitätspanel zwischen 1994–2008.	52
3.3	Verteilung der Streckenlänge von Pkw-Wegen im Mobilitätspanel zwischen 1994–2008.	53
3.4	Verteilung der Jahreslaufleistung eines Pkws im Mobilitätspanel zwischen 1994–2008.	53
3.5	Fahrzeugkonzepte von der Energiebereitstellung über die -speicherung bis zum Antriebssystem.	55
3.6	Nutzungsbedingte Alterungseinflüsse der Batteriealterung.	68
3.7	Ereignisbasierte Batteriealterung mittels Wöhler-Kurve	71
4.1	Überblick über die Modellierungsschritte.	86
4.2	Beispiel eines Fahrprofils.	90
4.3	Verteilung der Fahrten.	91
4.4	Beispiel eines Standortprofils.	91
4.5	Illustration der Vor-/Rückwärtsrechnung.	104
5.1	Überblick über die Simulationsschritte.	116
5.2	Simulationsergebnis als Anteil an der Menge aller Fahrprofile.	120
5.3	Technische und ökonomische Anteile von EVs bei unterschiedlichen Batteriekapazitäten.	138
5.4	Verteilung der optimalen Batteriekapazität bei PHEVs zu unterschiedlichen Batteriekosten.	140
5.5	Entwicklung der ökonomisch attraktiven Anteile über die Jahre 2000–2007.	142
5.6	Einfluss der Parameter Treibstoff-, Stromkosten und Stromverbrauch auf den Marktanteil.	144

5.7	Einfluss zeitabhängiger Stromkosten auf Basis von Tag/Nacht-Spreads.	146
5.8	Einfluss der Parameter Batterie-, Fahrzeuglebensdauer und max. Fahrleistung auf den Marktanteil.	147
5.9	Einfluss des Zinssatzes auf den Marktanteil.	148
5.10	Gesamtkostenbetrachtung des Referenzfahrzeugs unter Betrachtung aller Steuern, Abgaben und Förderungen.	157
5.11	Einfluss der Zahlungsbereitschaft auf den Marktanteil.	161
6.1	Überblick über die Struktur der Geschäftsmodellbetrachtungen.	166
6.2	Übertragung der Typologie von Tukker auf Geschäftsmodelle für Mobilitätskonzepte.	168
6.3	Morphologischer Kasten zur Beladeinfrastruktur.	174
6.4	Abhängigkeiten zwischen den morphologischen Kästen für Fahrzeug/Batterie, Infrastruktur und Systemdienstleistungen.	176

Quellenangaben erfolgen an den Abbildungen oder entfallen, falls selbst verfasst.

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht der Stärken und Schwächen der verschiedenen Ladetechnologien.	13
2.2	Technisch sinnvolle Ladeinfrastrukturausprägungen.	23
2.3	Ladeinfrastrukturszenarien zur ökonomischen Bewertung.	30
2.4	Konduktive Ladeinfrastrukturkosten im Vergleich verschiedener Studien.	32
2.5	Kosten des konduktiven Ladesystems auf Basis von Einzelkomponenten.	33
2.6	Kosten des induktiven Ladesystems auf Infrastrukturseite (primär).	36
2.7	Kosten des induktiven Ladesystems auf Fahrzeugseite (sekundär).	38
2.8	Auslastung der öffentlichen Ladeinfrastruktur.	40
2.9	Gesamtüberblick der Ladeinfrastrukturkosten.	42
3.1	Kraftfahrzeugbestand nach Haltergruppe und Fahrzeugtyp.	48
3.2	Überblick über verschiedene nationale Verkehrsbefragungen.	50
3.3	Literaturüberblick Kostenangaben zu alternativen Antrieben.	58
3.4	Technische und ökonomische Parameter des Referenzfahrzeugs.	60
3.5	Anforderungen an Energie- und Leistungsdichten.	63
3.6	Technische Parameter verschiedener Batterietechnologien.	65
3.7	Klassifikation der Förderinstrumente.	82
3.8	Überblick der angewandten Förderinstrumente in Europa.	83
4.1	Kostenkategorien der TCO-Methode und Abbildung im Modell.	111
5.1	Soziodemografische Kriterien des Mobilitätspanels.	121
5.2	Technisch möglicher Anteil auf Basis verschiedener Beladeinfrastrukturszenarien.	123
5.3	Ökonomisch attraktiver Anteil auf Basis verschiedener Beladeinfrastrukturszenarien, Batteriekosten und -alterung.	126
5.4	Techno-ökonomische Parameter bei Wahl eines Elektrofahrzeugs.	129
5.5	Segmentbetrachtung des technisch und ökonomisch attraktiven Anteils nach Regionstypen, Haushaltstypen und -einkommen.	130
5.6	Ökonomisch attraktive Anteile für ICEs, PHEVs, EVs bei unterschiedlichen Batteriekosten.	133
5.7	Ökonomisch attraktive Anteile von PHEVs und EVs in unterschiedlichen Infrastrukturszenarien.	134
5.8	Ökonomisch attraktive Anteile, Kosten der gewählten Fahrzeuge und optimale Batteriekapazität von PHEVs unter Berücksichtigung der Batteriealterung.	136

5.9	Veränderung der ökonomisch attraktiven Anteile bei Technologieweiterentwicklung.	141
5.10	Qualitative Bewertung monetärer Förderprogramme für Elektromobilität.	153
5.11	Gesamtkosten verschiedener Fahrzeuge ohne Steuern und Abgaben.	155
6.1	Überblick verschiedener Vorschläge elektromobiler Geschäftsmodelle.	170

Quellenangaben erfolgen an den Tabellen oder entfallen, falls selbst verfasst.

Abkürzungsverzeichnis

Technische Akronyme

AC	Wechselstrom oder ‘ <u>alternating c</u> urrent’
CO ₂	Kohlendioxid
CHAdeMO	Japanischer Gleichstromladestandard
ΔDOD	Ladezustandsveränderung
DC	Gleichstrom oder ‘ <u>direct c</u> urrent’
DIN	<u>D</u> eutsches <u>I</u> nstitut für <u>N</u> ormung
DOD	Entladetiefe bzw. ‘ <u>depth of d</u> ischarge’
EOL	Gebrauchsende der Batterie oder ‘ <u>end of u</u> seful <u>l</u> ife’
EV	Elektrofahrzeug oder ‘ <u>electric v</u> ehicle’
FTP-75	‘ <u>F</u> ederal <u>t</u> est <u>p</u> rocedure’, US-amerikanischer Fahrzyklus mit einer Fahrstrecke von 75 Meilen
Fzg.	<u>F</u> ahrzeug
GBP	Währungseinheit des britischen Pfunds
GSM	<u>G</u> lobal <u>S</u> ystem for <u>M</u> obile <u>C</u> ommunications
HEV	Hybridfahrzeug oder ‘ <u>hybrid e</u> lectric <u>v</u> ehicle’
HH	<u>H</u> aushalt
ICE	Verbrennungsmotorfahrzeuge oder ‘ <u>i</u> nternal <u>c</u> ombustion <u>e</u> ngine vehicle’
IEC	<u>I</u> nternational <u>E</u> lectrotechnical <u>C</u> ommission bzw. Internationale Elektrotechnische Kommission
Kfz	<u>K</u> raftfahrzeug
KiD	Datensatz „ <u>K</u> raftfahrzeugverkehr in <u>D</u> eutschland“
LAN	<u>L</u> ocal <u>A</u> rea <u>N</u> etwork
LCC	Lebenszykluskostenrechnung oder ‘ <u>l</u> ife <u>c</u> ycle <u>c</u> osting’
Li-Ion	<u>L</u> ithium- <u>I</u> onen-Batterien
Lkw	<u>L</u> ast <u>k</u> raft <u>w</u> agen
MiD	Datensatz „ <u>M</u> obilität in <u>D</u> eutschland“
MOP	Datensatz „ <u>M</u> obilitätspanel“
MwSt	<u>M</u> ehrwert <u>s</u> teuer
NEFZ	<u>N</u> eu <u>e</u> r <u>e</u> uropäischer <u>F</u> ahrzyklus
NiCd	<u>N</u> ickel- <u>C</u> admium-Batterien
NiMH	<u>N</u> ickel- <u>M</u> etalhydrid-Batterien
NPE	<u>N</u> ationale <u>P</u> lattform <u>E</u> lektromobilität

OAT	Einzelne Veränderung der Parameter oder auch ‘ <u>one-at-a-time</u> ’
Pers.	<u>Person</u>
PHEV	Plug-in-Hybridfahrzeug oder ‘ <u>plug-in hybrid electric vehicle</u> ’
Pkw	<u>Personenkraftwagen</u>
PLC	<u>Power Line Communication</u>
RFID	<u>Radio-frequency Identification</u>
SAE	<u>Society of Automobile Engineers</u>
Schuko	<u>Schutzkontakt</u> bzw. synonym für die deutsche Haushaltssteckdose
SOC	Batterieladezustand bzw. ‘ <u>state of charge</u> ’
SOH	Zusammenfassung mehrerer Zustandsvariablen zur Bestimmung des Gebrauchsendes der Batterie oder ‘ <u>state of health</u> ’
TCO	Gesamtkosten oder <u>Total Cost of Ownership</u>
TEPCO	<u>Tokyo Electric Power Company</u>
UMTS	<u>Universal Mobile Telecommunications System</u>
US\$	Währungseinheit des US-amerikanischen Dollars
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., ursprünglich <u>Verband Deutscher Elektrotechniker</u>
WLAN	<u>Wireless Local Area Network</u>
ZEV	Nullemissionsfahrzeug oder ‘ <u>zero emission vehicle</u> ’
ÖPNV	<u>Öffentlicher Personennahverkehr</u> , wie z. B. Busse, S-Bahnen etc.

Allgemeine Abkürzungen

AT	Österreich
Aufl.	<u>Auflage</u>
Bd.	<u>Band</u>
BE	<u>Belgien</u>
bspw.	<u>beispielsweise</u>
bzw.	<u>beziehungsweise</u>
ca.	zirka
CH	Schweiz
d. h.	<u>das heißt</u>
DE	<u>Deutschland</u>
DK	<u>Dänemark</u>
e. V.	<u>eingetragener Verein</u>
engl.	<u>englisch</u>
ES	Spanien
et al.	<u>et alii</u> (und andere)
etc.	<u>et cetera</u>
EU	<u>Europäische Union</u>
evtl.	<u>eventuell</u>

f.	<u>f</u> olgende
ff.	<u>f</u> ort <u>f</u> olgende
FI	<u>F</u> innland
FR	<u>F</u> ranchreich
ggf.	gegebenen <u>f</u> alls
ggü.	gegen <u>ü</u> ber
GR	<u>G</u> riechenland
i. d. R.	in <u>d</u> er <u>R</u> egel
IE	Irland
inkl.	<u>i</u> nklusiv
insb.	<u>i</u> ns <u>b</u> esondere
IT	<u>I</u> talien
Jg.	<u>J</u> ahrgang
Kap.	<u>K</u> apitel
max.	<u>m</u> aximal
NL	<u>N</u> iederlande
NO	<u>N</u> orwegen
o. g.	<u>o</u> ben genannt
o. Ä.	<u>o</u> der <u>Ä</u> hnliches
PL	<u>P</u> olen
S.	<u>S</u> eite
SE	<u>S</u> chweden
sog.	<u>s</u> ogenannt
u.	<u>u</u> nd
u. a.	<u>u</u> nter <u>a</u> nderem
u. d. N.	<u>u</u> nter <u>d</u> er <u>N</u> ebenbedingung
UK	Vereinigtes Königreich
v. a.	<u>v</u> or <u>a</u> llem
vgl.	<u>v</u> ergleiche
z. B.	<u>z</u> um <u>B</u> eispiel
z. T.	<u>z</u> um <u>T</u> eil

Physikalische Einheiten

A	<u>A</u> mpere
a	Jahr
C	<u>C</u> elsius
cm	Zentimeter
h	Stunden
Hz	<u>H</u> ertz
kg	<u>K</u> ilogramm
km	<u>K</u> ilometer

km/h	Stundenkilometer
kW	<u>K</u> ilowatt
kWh	Kilowattstunden
l	<u>L</u> iter
m ²	Quadratmeter
min	<u>M</u> inute
V	<u>V</u> olt

Variablen und Formelzeichen

α	Parameter für die Batteriealterungsfunktion
$a^{100 \text{ km}}$	Gesamtkosten pro 100 km (in €/100 km)
a^{capex}	Annuierte Anschaffungsausgaben (in €/a)
a^{ges}	Jährliche Gesamtkosten (in €/a)
a^{opex}	Jährliche Betriebskosten (in €/a)
β	Parameter für die Batteriealterungsfunktion
$C_t(\cdot)$	Kostenfunktion der Batteriezustandsänderung in t
c_t^E	Strompreis in Zeitintervall t (in €/kWh)
c^F	Treibstoffkosten (in €/l)
c_t^I	Variabilisierte Infrastrukturkosten in Zeitintervall t (in €/kWh)
c^{In}	Jährliche Betriebskosten der primären Seite der Ladeinfrastruktur (in €/a)
c^{OM}	Wartungskosten (in €/a)
$c^{I,\text{hö}}$	Variable Infrastrukturkosten an halböffentlicher Ladeinfrastruktur (in €/kWh)
$c^{I,\text{pr}}$	Variable Infrastrukturkosten an privater Ladeinfrastruktur (in €/kWh)
$c^{I,\text{öf}}$	Variable Infrastrukturkosten an öffentlicher Ladeinfrastruktur (in €/kWh)
c^I	Infrastrukturkostenprofil (in €/kWh)
c_+^I	Strommehrkosten (in €/kWh)
c_{ges}	Gesamtkosten des Ladeprofiles (in €)
$c_{\text{ges}}^{\text{BA}}$	Batteriealterungskosten des optimalen Batteriezustandsprofils (in €)
$c_{\text{ges}}^{\text{SL}}$	Schnellladekosten des optimalen Batteriezustandsprofils (in €)
c_{ges}^E	Stromkosten des optimalen Batteriezustandsprofils (in €)
c_{ges}^F	Benzinkosten des optimalen Batteriezustandsprofils (in €)
c_{ges}^I	Infrastrukturkosten des optimalen Batteriezustandsprofils (in €)
D	Matrix der Fahrprofile über alle Fahrzeuge und Zeitintervalle
d	Fahrprofil eines Fahrzeugs aus der Fahrprofilmatrix D (in km)
d_t	Gefahrene Strecke in Zeitintervall t (in km)
ϵ	Anzahl der diskretisierten Entscheidungsausprägungen von E_t
η_{EV}	Wirkungsgrad des Elektromotors (in %)
η_{ICE}	Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors (in %)
η^{ch}	Ladeeffizienz (in %)
e_t	Entscheidungsvariable, ob in Zeitintervall t geladen werden soll oder nicht
$E_t(s_{t-1})$	Entscheidungsbereich der möglichen Entscheidungen, die e_t annehmen kann

F	Anzahl der möglichen Fahrzeuge pro Ladeinfrastruktur
f_t	Treibstoffverbrauch in Zeitintervall t (in kWh)
$g^{ökon}$	Ökonomische Alterung der Batterie (in %)
g^{kapa}	Kapazitative Alterung der Batterie (in %)
g_t	Batteriedegradation auf Basis der Zyklenalterung in Abhängigkeit der beiden Batterieladezustände s_{t-1} und s_t
$h(s_T)$	Kosten, die den Gesamtkosten \mathcal{K} des Ladeprofils l zuzurechnen sind, wenn $s_T < \bar{s}$ und $z^{NV} = 1$
i	Diskrete Batteriezustände
I^B	Anschaffungsausgaben für das Batteriesystem (in €/kWh)
I^{EM}	Anschaffungsausgaben für den Elektromotor (in €/kW)
I^{Hy}	Anschaffungsausgaben für den Hybridantriebsstrang (in €)
I^{ICE}	Anschaffungsausgaben für den Verbrennungsmotor (in €/kW)
$I^{In,pr}$	Anschaffungsausgaben für die primäre Seite der Ladeinfrastruktur (in €)
$I^{In,sek}$	Anschaffungsausgaben für die sekundäre Seite der Ladeinfrastruktur (in €)
I^{St}	Anschaffungsausgaben für den Starter (in €)
I^{Ta}	Anschaffungsausgaben für den Tank (in €)
I^V	Anschaffungsausgaben für das Chassis (in €)
κ	Batteriekapazität (in kWh)
k	Zinssatz (in %)
λ	Mittlere Ankunftsrate (in 1/min)
l	Ladeprofil über die Zeitintervalle t (in kWh)
$L^{hö}$	Binäre Variable, ob in Zeitintervall t am halböffentl. Standort geparkt wird
L^{pr}	Binäre Variable, ob in Zeitintervall t am privaten Standort geparkt wird
$L^{öf}$	Binäre Variable, ob in Zeitintervall t am öffentlichen Standort geparkt wird
l_t	Ladeenergiemenge in Zeitintervall t (in kWh)
μ	Mittlere Bedienrate (in 1/min)
M	Maximale Fahrzeugkilometer (in km)
m	Wochenlaufleistung (in km)
n_{Fahrer}	Anzahl der Fahrer eines Haushalts
n_{Pkw}	Anzahl der Fahrzeuge eines Haushalts
$n_{\text{pot. Fahrer}}$	Anzahl der potenziellen Fahrer eines Haushalts
O	Matrix der Standprofile über alle Fahrzeuge und Zeitintervalle
o	Standprofil eines Fahrzeugs aus der Standprofilmatrix O (codiert)
o_t	Standort des Fahrzeugs in Zeitintervall t (codiert)
P^{EM}	Leistung des Elektromotors (in kW)
P^{ICE}	Leistung des Verbrennungsmotors (in kW)
$P^{l,hö}$	Zur Verfügung stehende Anschlussleistung an halböffentl. Standorten (in kW)
$P^{l,pr}$	Zur Verfügung stehende Anschlussleistung an privaten Standorten (in kW)
$P^{l,öf}$	Zur Verfügung stehende Anschlussleistung an öffentlichen Standorten (in kW)

P^I	Anschlussleistungsprofil (in kW)
P_t^I	Verfügbare Anschlussleistung in Zeitintervall t (in kW)
ρ	Auslastung der Ladestation (in %)
R_{EOL}^B	Restwert der Batterie am Gebrauchsende (in €/kWh)
$\mathcal{S}_t(\cdot)$	Übergangsfunktion auf den Batteriezustand am Ende von Zeitintervall t
\bar{s}	Obere Grenze des Batterieladezustands s
σ	Anzahl der diskretisierten SOC-Schritte
\underline{s}	Untere Grenze des Batterieladezustands s
s	Batterieladezustandsprofil (in %)
S_t	Zustandsbereich der Zustände, die s_t annehmen kann
s_t	Batterieladezustand am Ende von Zeitintervall t (in %)
TCO^I	Gesamtkosten für die primäre und sekundäre Seite der Ladeinfrastruktur, bezogen auf ein Fahrzeug (in €)
TCO_{pr}^I	Gesamtkosten für die primäre Seite der Ladeinfrastruktur (in €)
$\text{TCO}_{\text{sek}}^I$	Gesamtkosten für die sekundäre Seite der Ladeinfrastruktur (in €)
τ_1	Menge der Zeitintervalle t , in denen geladen werden kann
τ_2	Menge der Zeitintervalle t , in denen gefahren wird
T	Letztes Zeitintervall des Wochenprofils
t	Zeitintervall im Wochenprofil mit $t = 1 \dots T$ (je 15 Minuten)
T^I	Lebensdauer der Ladeinfrastruktur (in Jahren)
T^B	Lebensdauer der Batterie (in Jahren)
T^V	Lebensdauer des Fahrzeugs (in Jahren)
t_a	Mittlere Ankunftszeit (in min)
t_b	Mittlere Bearbeitungs- bzw. Ladezeit (in min)
t_W	Wartezeit vor der Ladeinfrastruktur (in min)
\tilde{u}_t^E	Je Fahrzeug durchschnittlich konsumierte Strommenge (in kWh/a)
u^E	Stromverbrauch (in kWh/km)
u^F	Treibstoffverbrauch (in l/km)
$v(i, t)$	Kosten des Weges ausgehend von $t = 1$ zum Erreichen des Batteriezustands i in Zeitintervall t
$v_t^*(s_{t-1})$	Kosten der Teilpolitik (e_t^*, \dots, e_T^*) in Abhängigkeit des Batteriezustands s_{t-1}
$w(i, t)$	Pfad in der Batterie zur Erreichung des Batteriezustands i in Zeitintervall t
\mathcal{X}	Summe der Ladekosten des optimierten Ladeprofils innerhalb des betrachteten Wochenprofils (in €)
ξ	Unschärfe
z^{BA}	Binäre Variable, ob Batteriealterung berücksichtigt werden soll
z^{NV}	Binäre Variable, ob nicht vollgeladene Batterieprofile berücksichtigt werden sollen
z^{RE}	Binäre Variable, ob der Range Extender berücksichtigt werden soll
z^{SL}	Binäre Variable, ob Schnellladung berücksichtigt werden soll

Kurzfassung

Elektrofahrzeuge erfahren seit Kurzem vor dem Hintergrund steigender Ölpreise und der Bestrebungen, CO₂-Emissionen zu reduzieren, wieder vermehrt Aufmerksamkeit. Welche Ladeinfrastruktur für diese Fahrzeuge benötigt wird, ist aber vielfach noch unklar.

In der Literatur und in Studien findet die Ladeinfrastruktur bislang nur geringe Beachtung. Dabei werden meist die technische Ausgestaltung, verschiedene Standardisierungsanstrengungen oder die Forderungen nach einer dichten Infrastruktur thematisiert. Die Perspektive der Nutzer findet zum Teil Eingang über Umfragen im Rahmen von Akzeptanzstudien zur Elektromobilität. Eine Analyse des Ladeinfrastrukturbedarfs auf Basis des Fahrverhaltens wurde bisher nicht durchgeführt.

Die vorliegende Arbeit beschreibt deshalb die technischen Möglichkeiten zur Beladung eines Elektrofahrzeugs und bewertet die Ladeinfrastruktur mit wirtschaftlichen Kriterien unter Berücksichtigung des realen Fahrverhaltens. Für verschiedene Fahrprofile wird mittels dynamischer Programmierung ein optimales Ladeprofil bestimmt und dieses in eine Gesamtkostenbetrachtung überführt. Bei der Optimierung werden verschiedene Fahrzeugkonzepte und Ladeinfrastrukturen sowie die Batteriealterung berücksichtigt. Über alle Ladeprofile lassen sich ein kostenminimierendes Fahrzeugkonzept und eine optimale Batteriegröße bestimmen sowie eine dafür geeignete Ladeinfrastruktur ableiten.

Im Widerspruch zu der landläufigen Forderung nach einem Infrastrukturausbau im öffentlichen Raum konnte in der vorliegenden Arbeit gezeigt werden, dass sich Ladung insbesondere auf den privaten Bereich erstrecken sollte und die Ladung zu geringen Ladeleistungen erfolgen kann. Fernab vollelektrischer Fahrzeuge können sich Plug-in-Hybride in der frühen Marktphase besser durchsetzen und erlauben bei hohen elektrischen Fahranteilen und einer gesicherten Reichweite über den zusätzlichen Verbrennungsmotor, die Vorteile der Elektromobilität bereits zu nutzen.

Die Arbeit ist am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) in Karlsruhe unter Betreuung von apl. Prof. Dr. M. Wietschel des Instituts für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) entstanden und in deutscher Sprache verfasst.

Abstract

Recently, electric vehicles have once again been attracting increased attention against the backdrop of rising oil prices and the necessity to reduce CO₂-emissions. However, it is as yet still unclear which charging infrastructure will be required for these vehicles.

Charging infrastructure has not been a major topic in the literature and electric mobility studies up to now. The focus here tends to be on technical design, different standardization efforts, or the demands for a dense infrastructure. The users' perspective is reflected to some extent in surveys conducted in the scope of acceptance studies of electric mobility. However, so far, no analysis has been made of which charging infrastructure will be required based on driving behavior.

This thesis therefore describes the technical alternatives for charging an electric vehicle and assesses the charging infrastructure based on an economic assessment considering real driving behavior. An optimal charging profile is determined for each pattern of driving behavior using dynamic programming and entered into a total cost assessment. The optimization incorporates different vehicle concepts, charging infrastructures, as well as battery aging. A minimum cost vehicle concept and the optimal battery size can be determined for each charging profile helping to derive a suitable charging infrastructure.

In contrast to the widely held belief that a public charging infrastructure is indispensable, this thesis was able to show that charging should take place in the private domain at low charging power levels. Besides fully electric vehicles, plug-in hybrids are well suited for early market adoption and mean that people can benefit earlier from the advantages of electric mobility with a high all-electric driving share and a guaranteed driving range because of the additional combustion engine.

This thesis is based on my research conducted at the Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI) in Karlsruhe under the supervision of Professor M. Wietschel from the Institute for Industrial Production (IIP) at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) and is written in German.

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Situation und Problemstellung

Elektromobilität bezeichnet den Einsatz jener Fahrzeuge, die den Antrieb, anders als Verbrennungsmotoren, über eine Batterie und einen Elektromotor sicherstellen.¹ Dieses Konzept ist nicht vollkommen neu. Bereits 1834 entwickelt, erfreute es sich um die vorletzte Jahrhundertwende relativ hoher Beliebtheit mit Marktanteilen von bis zu einem Drittel des produzierten Gesamtvolumens von Fahrzeugen.² Zeitgleich entwickelte sich der Verbrennungsmotor jedoch schneller, ermöglichte bald längere Reichweiten und bot durch den Zugang zu neu erschlossenen Ölquellen die kostengünstigere Lösung. Dadurch verschwand das Elektrofahrzeug fast vollkommen und erst während der Ölkrise in den 1970er-Jahren und der damit einhergehenden Knappheit an Treibstoffen rückte die Idee des alternativen Antriebs in einigen Ländern kurzzeitig wieder in den Fokus. Nach beigelegter Krise ebte das Interesse jedoch wieder ab.³ Seitdem war das Elektrofahrzeug als Alternativkonzept wiederkehrend bei höheren Ölpreisen in der Diskussion, um durch den Wechsel auf einen anderen Energieträger weniger abhängig vom Öl zu werden. Das Konzept verfestigte sich jedoch nie, da sich die Ölmärkte jedes Mal wieder recht schnell entspannten. Seit 2000 erfährt die Elektromobilität erneut eine erhöhte Aufmerksamkeit. Diesmal aber zudem getrieben durch die Möglichkeit, die für den Klimawandel verantwortlichen anthropogenen CO₂-Emissionen⁴ beim Wechsel auf den Energieträger Strom und den Einsatz emissionsarmer Erzeugungstechnologien⁵ lokal vermeiden und global zumindest reduzieren zu können. Außerdem konnte die Batterietechnologie durch einen verstärkten Einsatz in anderen Bereichen, wie z. B. in der Unterhaltungselektronik, deutlich hinsichtlich der Energie- und Leistungsdichten sowie der Kosten weiterentwickelt werden.⁶ Somit erlaubt die Elektromobilität eine stärkere Unabhängigkeit vom Öl und damit eine erhöhte Versorgungssicherheit⁷ sowie eine Reduktion der gesamten CO₂-Emissionen. Dies kann zu Gesamtkosten erreicht werden, die langsam in den Bereich verbrennungsmotor-

¹ Dazu zählen sowohl vollelektrische Fahrzeuge als auch Hybride, vgl. u. a. auch Bundesregierung (2009).

² Vgl. Chan (2007).

³ Vgl. Rajashekara (1994).

⁴ Vgl. Stern (2007).

⁵ Wie etwa erneuerbare Energien, vgl. z. B. King (2007), Bandivadekar et al. (2008), Sovacool und Hirsh (2008), International Energy Agency (2009) oder Barkenbus (2009).

⁶ Siehe u. a. Kalhammer et al. (2007), Barkenbus (2009) und Bandivadekar et al. (2008).

⁷ Vgl. Kendall (2008).

basierter Fahrzeuge kommen. Einer schnellen Markteinführung von Elektrofahrzeugen stehen jedoch heute noch einige Hürden im Weg. Dazu zählen längere Ladezeiten, eine geringere Reichweite oder die derzeit noch höheren Gesamtkosten.⁸ Während die Elektromobilität volkswirtschaftliche Verbesserungen mit sich bringt (Versorgungssicherheit, Emissionsminderung), fallen die Nachteile eher auf Nutzerebene an (lange Ladezeit, geringe Reichweite, hohe Gesamtkosten). Um die volkswirtschaftlichen Vorteile nutzen zu können und die Nachteile für den Nutzer abzubauen, wird dem batterieelektrischen Fahrzeug in Wissenschaft, Politik und Wirtschaft vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt. So bezeichnet das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2010) Elektromobilität als eine der sechs Schlüsseltechnologien, um die „Herausforderungen der Zukunft [zu] bewältigen“.

Zur Realisierung der Elektromobilität ist die Zusammenarbeit und eventuelle Integration von drei heute getrennten Industrien erforderlich: Automobilhersteller, Batterieproduzenten und Energieversorger.⁹ Hinzu kommt, dass die Integration der Systeme, wie bspw. eine fahrzeugseitige Steuerung der Ladung, Lösungen aus dem Bereich der Informationstechnologie erfordert und damit eine vierte Branche zu beteiligen ist. Dabei konzentrieren sich die beiden ersten auf die technologische Weiterentwicklung des Fahrzeugs und der Batterie. In der Energiewirtschaft liegen die bisherigen Forschungsschwerpunkte im Bereich der Lastauswirkung¹⁰, der besseren Netzintegration¹¹ und der übergreifenden Emissionen¹².

Bisher weniger Beachtung geschenkt wurde jedoch der Infrastruktur, die zur Beladung der Fahrzeuge mit Strom aus dem Stromnetz nötig wird. Sie ist zugleich verbindendes Element der beteiligten Industrien und erfordert hinsichtlich der Ladeschnittstelle die Zusammenarbeit zwischen Automobilhersteller und Energieversorger gegebenenfalls unter Einbeziehung der Informationstechnologie. Es wurden zwar Standardisierungsanstrengungen im Bereich der Stecker und Ladeprotokolle vorgenommen¹³, jedoch existiert keine zusammenfassende Auseinandersetzung mit den möglichen Ladetechnologien.¹⁴ Zudem gibt es nur ein wagues Verständnis eines aus Nutzersicht sinnvollen Ladeinfrastrukturaufbaus. Häufiger findet man die in Umfragen ermittelte Erwartung der Nutzer, auf Ladeinfrastruktur ähnlich wie auf heutige Tankstellen zugreifen zu können. Damit einhergehend kommt es zur Forderung, den Ausbau einer solchen Ladeinfrastruktur staatlich zu fördern und zu finanzieren.¹⁵ Je nachdem wo und welche Ladeinfrastruktur aufgebaut wird, werden die Anforderungen möglicher Fahrzeugnutzer nur zum Teil erfüllt und verursachen stark unterschiedliche Kosten. Bisher werden aus Nutzersicht die Auswirkungen des Fahrverhaltens insbesondere auf Lastveränderung, Netzintegration, Batteriealterung oder Emissionen betrachtet, jedoch nicht auf den

⁸ Vgl. u. a. Chéron und Zins (1997), Nemry et al. (2009a) oder Brooker et al. (2010).

⁹ Vgl. Hensley et al. (2009).

¹⁰ Vgl. Scott et al. (2007).

¹¹ Siehe u. a. Kempton et al. (2001) oder Andersen et al. (2009).

¹² Vgl. z. B. Duvall et al. (2007a,b), James et al. (2007) oder Elgowainy et al. (2010) bzw. für die Ökobilanz des Fahrzeugkonzepts inkl. der Batterie bspw. Held (2011).

¹³ Vgl. u. a. VDE (2008), SAE International (2010).

¹⁴ Die vorgestellten Ansätze, wie u. a. in May und Mattila (2009) oder Morrow et al. (2008), betrachten nur einen Teil der verfügbaren Infrastrukturkonzepte.

¹⁵ Siehe Neenan et al. (2010) und Bundesregierung (2009).

Ladeinfrastrukturaufbau übertragen.¹⁶

1.2 Zielsetzung

Was in der Automobilindustrie hinsichtlich des Kaufs eines Fahrzeugs gilt, nämlich die Anforderungen des Kunden genau zu kennen und diese mit dem richtigen Angebot zu erfüllen¹⁷, soll auf die Bestimmung einer geeigneten Ladeinfrastruktur übertragen werden. Demnach muss eine bedarfsgerechte Ladeinfrastruktur vor allem die Marktentwicklung der Elektromobilität unterstützen.¹⁸ Sie sollte zum Nutzungs- bzw. Fahrverhalten möglicher Elektrofahrzeuge passen und darüber hinaus kosteneffizient aufgebaut werden können, damit sich die Elektromobilität als Alternativkonzept gegenüber den verbrennungsmotorbasierten Fahrzeugen auch ökonomisch durchsetzen kann. Die vorliegende Arbeit soll daher im Wesentlichen die Frage

„Welches Ladeinfrastruktursystem kann am kostengünstigsten unter Berücksichtigung des Fahrverhaltens, verschiedener Fahrzeuge und Batteriegrößen aufgebaut werden?“

beantworten.¹⁹ Dazu wird die Perspektive eines künftigen Fahrzeugnutzers und Käufers angenommen, der die alternativen Fahrzeugkonzepte anhand einer Technologiebewertung miteinander vergleicht und die dafür sinnvolle Ladeinfrastruktur bestimmt. Dieses Vorgehen legt im Wesentlichen den „Homo oeconomicus“ zugrunde – ein Konsument, der rational und eigeninteressiert seinen Nutzen maximiert, feste Präferenzen hat und über vollständige Informationen verfügt.²⁰ Die so gewonnenen Erkenntnisse über die aus Nutzersicht sinnvolle Ladeinfrastruktur sollen anschließend in einen geeigneten Ladeinfrastrukturaufbau überführt werden. So kann die Analyse Hilfestellung für die politische Entscheidungsbildung bieten.

Dabei hat dieses Vorgehen keinen Anspruch auf Vollständigkeit. So kann das eigentliche Nutzerverhalten bspw. begrenzt rational sein oder Entscheidungskriterien, u. a. ökologische Wertvorstellungen, in den Vordergrund rücken. Weitergehende Überlegungen, wie etwa eine optimale Verteilung der Ladeinfrastruktur im Raum²¹ oder städtebauliche Veränderungen, werden genauso wenig betrachtet wie die Bewertung der Emissionen und die Auswirkungen der Ladung auf die Netzlast.

Für die Bestimmung einer sinnvollen Ladeinfrastruktur werden zunächst die möglichen Ladeinfrastruktursysteme und die auf diese Entscheidung wirkenden Einflussfaktoren betrachtet. Über die Abbildung des Fahrverhaltens und eines dahingehenden kostenoptimalen Ladeprofiles ist die richtige Ladeinfrastruktur zu bestimmen und für hybride und vollelektrische Fahrzeugkonzepte zu analysieren. Für die optimale Ladeinfrastruktur werden abschließend mögliche Geschäftsmodelle diskutiert.

¹⁶ Siehe für die bisherige Anwendung des Fahrverhaltens Liaw und Dubarry (2007), Bashash et al. (2011), Nørgaard und Christensen (2009), Shiau et al. (2009) oder Moawad et al. (2009).

¹⁷ Vgl. Chojnacki (2000).

¹⁸ Vgl. auch Nationale Plattform Elektromobilität (2011).

¹⁹ Detailliertere Fragen werden zu Beginn der einzelnen Kapitel formuliert.

²⁰ Vgl. Franz (2004, S. 4) und für den Hintergrund zur Begriffsentwicklung Persky (1995).

²¹ Vgl. dazu z. B. Cheng et al. (2008) oder Wirges und Fulda (2010).

1.3 Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in fünf Hauptkapitel sowie Einleitung und Schluss. Ausgehend von der zentralen Frage der Arbeit sollen zunächst in *Kapitel 2* die verfügbaren Ladetechnologien vorgestellt und die Alternativen, die dem Endkunden zur Verfügung stehen, erörtert werden. Nach der Betrachtung der technischen Optionen folgt die ökonomische Bewertung der verfügbaren Ladeinfrastrukturen. Flankierend dazu werden in *Kapitel 3* die verschiedenen Einflüsse auf die Ladeinfrastruktur abgebildet. So beginnt die spätere Analyse beim Verkehrs- und Nutzerverhalten der heutigen Fahrzeuge, um darauf basierend die Einsatzmöglichkeiten von Elektrofahrzeugen abzuleiten. Es werden die möglichen Fahrzeugkonzepte und die Batterietechnologien vorgestellt und ökonomisch bewertet. Weitere Einflussfaktoren wie Vorkonditionierungskonzepte oder Systemdienstleistungen zur Beladungssteuerung oder Rückspeisung sind genauso wie die heutigen Steuer- und Fördersysteme mit zu berücksichtigen. Verschiedene Ladeinfrastrukturen und Einflussfaktoren finden Eingang in die Modellierung in *Kapitel 4*, in dem zunächst das Fahrverhalten abgebildet und ein kostenoptimales Ladeprofil erzeugt wird. Die anschließende Gesamtkostenbetrachtung erlaubt die Ermittlung einer kostenoptimalen Ladeinfrastruktur und eines attraktiven Fahrzeugkonzepts unter verschiedenen Ladeinfrastrukturen, Fahrzeugen, Batterieannahmen und Nutzergruppen. Das Modell wird daraufhin in *Kapitel 5* angewandt, um das Potenzial an Elektrofahrzeugen hinsichtlich technischer und ökonomischer Restriktionen zu bestimmen. Unterschiedliche Parametrisierungen des Modells überprüfen den Einfluss anderer Fahrzeugkonzepte, wie den eines Plug-in-Hybrids oder der optimalen Batteriegröße. Außerdem wird die Auswirkung von Steuer- und Fördersystemen überprüft. Abschließend werden in *Kapitel 6* mögliche Geschäftsmodelle für die Ladeinfrastruktur identifiziert und hinsichtlich der angebotenen Lösungen überprüft, ob dadurch mögliche Markteintrittsbarrieren abgebaut werden können. Ein Überblick über den Aufbau der Arbeit findet sich Abbildung 1.1.

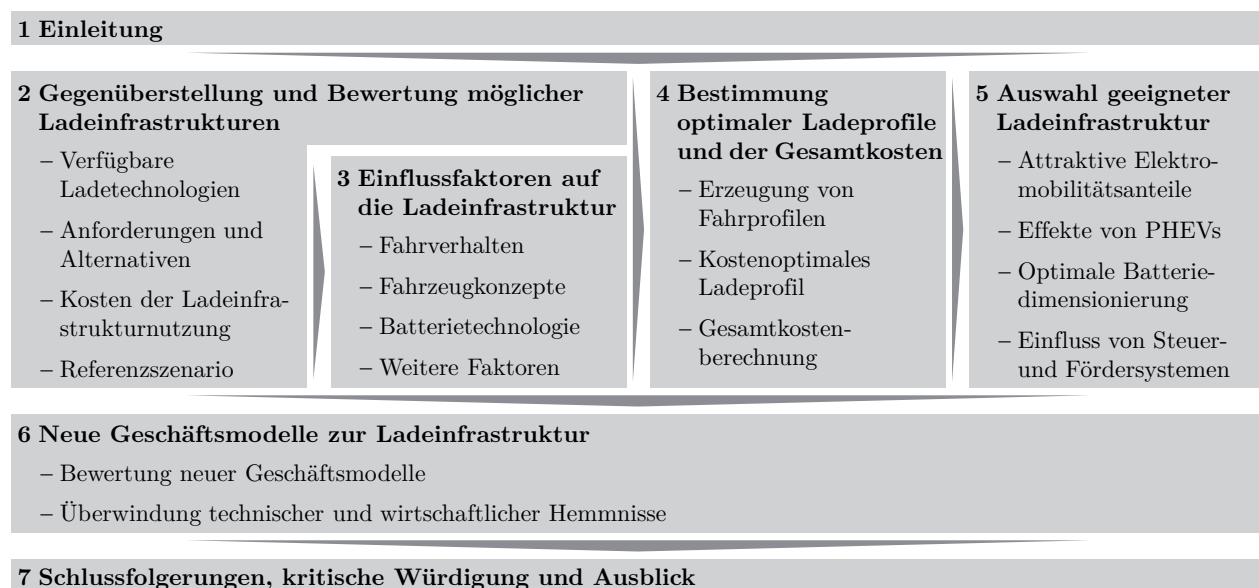


Abbildung 1.1 – Aufbau der Arbeit.

Kapitel 2

Gegenüberstellung und Bewertung möglicher Ladeinfrastrukturen

Forschungsfragen

- Welche Ladeinfrastrukturen kommen infrage?
- Welche Alternativen stehen dem Endkunden zur Verfügung?
- Was muss der Endkunde für diese Ladeinfrastruktur zahlen?

2.1 Ladeinfrastrukturtreiber und Überblick

Heute angedachte Elektrofahrzeuge nutzen Lithium-Ionen-Batterien, die jedoch vergleichsweise wenig Energie speichern²² und gleichzeitig zur Energieaufnahme deutlich länger als verbrennungsmotorbasierte Fahrzeuge brauchen.²³ Im Vergleich ist im Benzin, bezogen auf das Gewicht, etwa zwanzigmal mehr und, bezogen auf das Volumen, etwa siebenmal mehr Energie enthalten.²⁴ Der Nutzung einer größeren Batterie sind jedoch aufgrund der Gewichts- und Bauraumbeschränkungen sowie des daraus abzuleitenden höheren Eigenverbrauchs Grenzen gesetzt. Die Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge ist somit deutlich niedriger anzusetzen als die verbrennungsmotorbasierter. Daher wird für die angedachten Elektrofahrzeuge versucht, einen Kompromiss zwischen Gewicht und Reichweite zu finden. So ist das für künftige elektrische Kleinwagen anvisierte 24 kWh-Batterieaggregat etwa dreimal schwerer als das in

²² Für Lithium-Ionen-Batterien geben z. B. Linden und Reddy (2002, S. 14.1) eine gravimetrische Energiedichte von etwa 0,2 kWh/kg und eine volumetrische Energiedichte von etwa 0,4 kWh/l an.

²³ Abhängig von den zur Verfügung stehenden Anschlussleistungen der Ladeinfrastruktur, siehe hierzu auch Abschnitt 2.2.3.

²⁴ Bezogen auf die an der Achse zur Verfügung stehende Energie und bei den Wirkungsgraden der Motoren von $\eta_{ICE} = 30\%$ und $\eta_{EM} = 90\%$ ergeben sich die gravimetrische Energiedichte für Benzin zu $\frac{8,9 \text{ kWh/l}}{0,75 \text{ kg/l}} \cdot \eta_{ICE} = 3,56 \text{ kWh/kg}$ und die der Batterie zu $0,2 \text{ kWh/kg} \cdot \eta_{EM} = 0,18 \text{ kWh/kg}$ sowie die volumetrische Energiedichte für Benzin zu $8,9 \text{ kWh/l} \cdot \eta_{ICE} = 2,67 \text{ kWh/kg}$ und die der Batterie zu $0,4 \text{ kWh/l} \cdot \eta_{EM} = 0,36 \text{ kWh/l}$, sodass Benzin mit einem Faktor von 19,77 (gravimetrisch) bzw. 7,42 (volumetrisch) energiereicher ist als die Energiebereitstellung über die Batterie. Vgl. für eine detailliertere Betrachtung auch Fischer et al. (2009).

einem 50l-Tank befindliche Benzin und reduziert dabei die Reichweite von ca. 800 auf unter 150 km.²⁵

Vor diesem Hintergrund muss sich das Tank- bzw. Ladeverhalten der Verbraucher ändern. Werden verbrennungsmotorbetriebene Fahrzeuge (ICE)²⁶ heute im Durchschnitt alle drei Wochen betankt und benötigen für den Tankvorgang in etwa 3–5 min, so müssen Elektrofahrzeuge (EV)²⁷ bereits alle zwei bis drei Tage laden und benötigen für diesen Vorgang je nach Anschlussleistung bis zu acht Stunden.²⁸ Die häufigeren und längeren Ladungen haben damit nicht nur Auswirkungen auf eine nötige Änderung des Nutzerverhaltens, sondern erfordern eine andere Art der Infrastruktur. Für ICEs hat sich ein engmaschiges Tankstellennetz etabliert, das Tanken im deutschen Straßennetz im Durchschnitt alle 16 km möglich macht.²⁹ Aufgrund des kurzen Tankvorgangs können somit Tankstopps jederzeit in den Streckenverlauf eingeplant werden. Da Batterien aufgrund des längeren Ladevorgangs nicht mehr während kurzer Stopps, sondern eher während der Parkzeiten geladen werden, ist eine Beladeinfrastruktur somit eher an den Orten aufzubauen, an denen regelmäßig und länger geparkt wird. Somit muss der Kunde nicht mehr zur Tankstelle fahren, sondern kann bequem an den Parkstandorten laden. Da die Kaufentscheidung des Kunden zum einen von einer existierenden Ladeinfrastruktur und die Entscheidung des Infrastrukturausbaus zum anderen von der Nachfrage nach dieser Infrastruktur abhängig gemacht wird, wird zur Veranschaulichung des Zusammenhangs von Infrastrukturausbau und Marktdurchdringung alternativer Antriebe häufig das „Henne-Ei-Problem“ herangezogen.³⁰ Elektrofahrzeuge können generell jedoch überall dort aufladen, wo eine Steckdose vorhanden ist, womit kein klassisches „Henne-Ei-Problem“ auftritt, wie z. B. auch Romm (2006, S. 2612) beschreibt.³¹

So stellt sich jedoch die Frage, welche Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge zum einen technisch geeignet und zum anderen wirtschaftlich attraktiv ist. Daher werden zunächst die theoretisch zur Verfügung stehenden Ausgestaltungsmöglichkeiten beleuchtet, zu denen u. a. die verschiedenen Ladetechnologien, die regionalen Gegebenheiten, mögliche Anschlussleistungen sowie benötigte Komponenten gehören (siehe Abschnitt 2.2). Daraufhin werden die Forderungen an und die Alternativen zur Ladeinfrastruktur betrachtet (siehe Abschnitt 2.3). Nach beiden Abschnitten werden die technisch attraktiven Infrastrukturoptionen in eine öko-

²⁵ Bei zugrunde gelegtem Benzin- und Stromverbrauch von 6l/100 km bzw. 18 kWh/100 km (siehe auch Abschnitt 3.3.3). Des Weiteren kann die real mögliche Reichweite eines EVs schnell auf unter 100 km sinken, wenn weitere Faktoren, wie z. B. Kapazitätsverluste über die Lebensdauer oder erhöhte bzw. zusätzliche Verbräuche der Klimaanlage, Batteriekühlung etc. in starken Hitze- und Kälteperioden mit betrachtet werden.

²⁶ Für Englisch „internal combustion engine“, Verbrennungsmotor.

²⁷ Für Englisch „electric vehicle“, Elektrofahrzeug.

²⁸ Bei den oben getroffenen Annahmen und einer Jahreslaufleistung von 14.300 km/a. Des Weiteren vgl. Abschnitt 2.2.3 für die möglichen Anschlussleistungen.

²⁹ Bei einem Straßennetz von 231.000 km und 14.500 Tankstellen, vgl. Statistisches Bundesamt (2008).

³⁰ Siehe für eine Diskussion des „Henne-Ei-Problems“ zu Brennstoffzellenfahrzeugen z. B. Farrell et al. (2003) und Melaina (2003) oder für verschiedene andere alternative Antriebe Romm (2006). Für einen Überblick über die verschiedenen Infrastrukturherausforderungen bei alternativen Antrieben sei auch auf die beiden Studien European Expert Group on Future Transport Fuels (2011) und BMW AG et al. (2010) verwiesen.

³¹ Zumindest wenn keine Schnellladung oder Batteriewechsel unterstellt werden, siehe dazu auch Abschnitt 2.2.1.

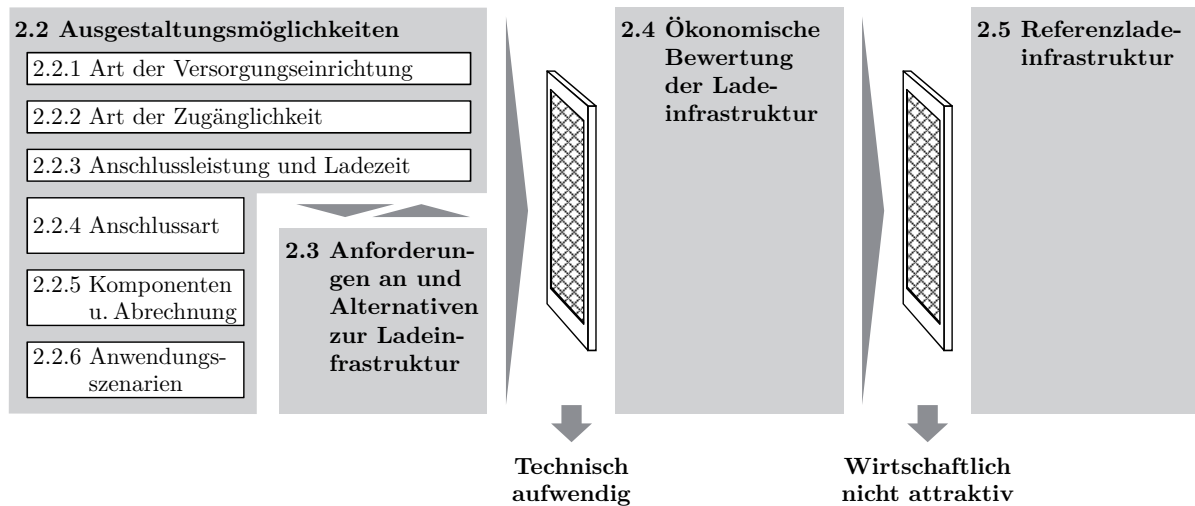


Abbildung 2.1 – Überblick über die Infrastrukturbetrachtungen.

nomische Bewertung überführt (siehe Abschnitt 2.4). In einem letzten Schritt werden die wirtschaftlich attraktiven Ladeinfrastrukturoptionen als Referenzinfrastrukturen definiert (siehe Abschnitt 2.5), die dann im Verlauf der Arbeit als Ausgangspunkt der Analyse dienen. Einen Überblick über Kapitel 2 zeigt Abbildung 2.1.

2.2 Ausgestaltungsmöglichkeiten der Ladeinfrastruktur

Die Beladung der Batterie kann sehr unterschiedlich erfolgen, was sich z. B. in den verschiedenen verfügbaren Ladetechnologien widerspiegelt. Welche Ausgestaltungsmöglichkeiten im Einzelnen bestehen und wie diese technisch³² zu bewerten sind, werden anhand der folgenden Faktoren und der damit einhergehenden Fragen näher betrachtet werden: die (i) *Art der Versorgungseinrichtung*, welche Technologien zum Laden der Batterie existieren und verwendet werden können, die (ii) *Art der Zugänglichkeit*, an welchen Standorten ein Elektrofahrzeug laden kann, (iii) *Anschlussleistungen und Ladezeit*, wie schnell ein Fahrzeug wieder vollständig geladen ist, die (iv) *Anschlussart*, wie der Anschluss der Ladeeinrichtung auszulegen ist, die (v) *Komponenten und Abrechnung*, welche Komponenten für die Ladeeinrichtung benötigt werden, sowie die (vi) *Anwendungsszenarien*, welche Konfiguration in der Praxis sinnvoll ist und wie diese in den energiewirtschaftlichen Rahmen eingeordnet werden kann.

2.2.1 Art der Versorgungseinrichtung

Batterien können über verschiedene Technologien geladen werden. In den meisten Konzepten verbleibt die Batterie im Fahrzeug und wird dort geladen. Dazu wird das Fahrzeug entweder kabelgebunden oder kabellos an eine externe Ladeeinheit (primäre Seite) angeschlossen. Im Fahrzeug (sekundäre Seite) muss die für das Ladekonzept passende Ladetechnik vorhan-

³² Zur technischen Bewertung werden die Verfügbarkeit der Technologie sowie die Komplexität des Systems zugrunde gelegt.

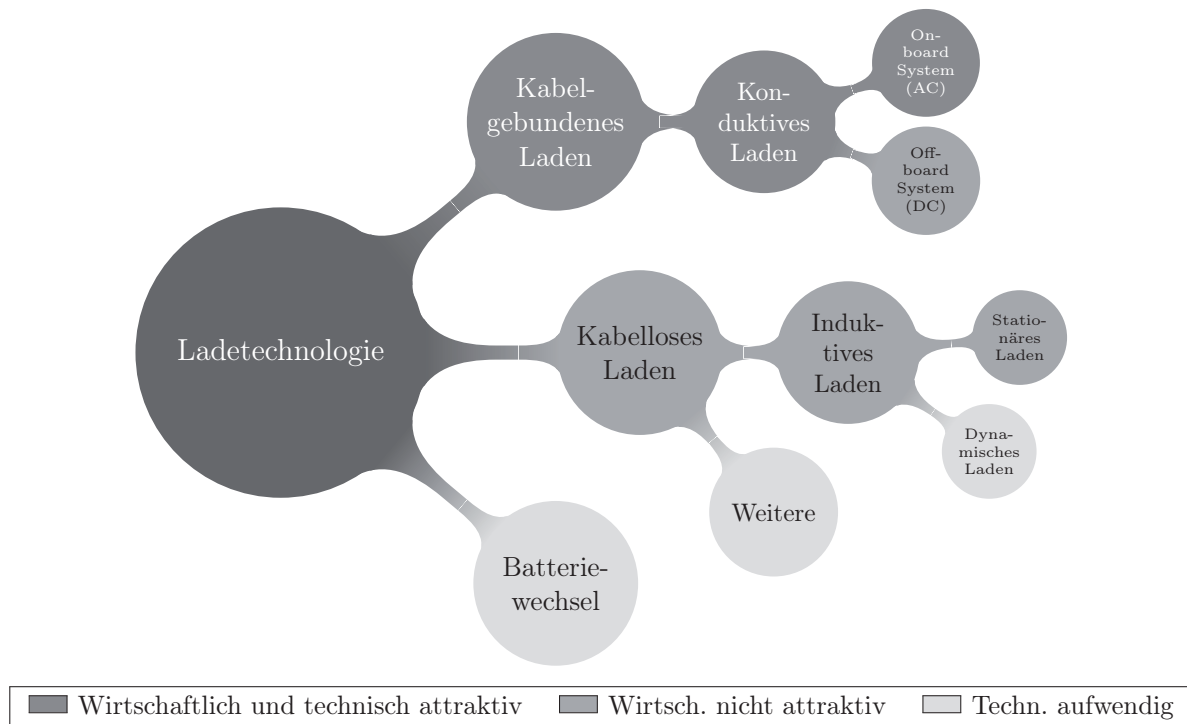


Abbildung 2.2 – Verschiedene Ladetechnologien im Überblick.

den sein. Die kabelgebundene Verbindung stellt einen elektrischen Kontakt physisch her und wird als *konduktives Laden* bezeichnet. Die kabellose Ladetechnik überträgt Energie ohne den physisch bestehenden elektrischen Kontakt. Theoretisch existieren verschiedene Möglichkeiten der kabellosen Energieübertragung, von denen jedoch nur die *induktive Ladung* eine für diese Anwendung praktikable Alternative darstellt.³³ Bei einer weiteren Option verbleibt die leere Batterie nicht im Fahrzeug, sondern wird aus diesem entnommen und mit einer vollständig geladenen Batterie getauscht. In diesem als *Batteriewechsel* bezeichneten Konzept wird anschließend die leere Batterie an einer entsprechenden Station aufgeladen und steht somit für den nächsten Einsatz wieder zur Verfügung. Im Folgenden werden die drei genannten Technologien kurz hinsichtlich des Funktionsprinzips und des technischen Entwicklungsstands näher betrachtet werden. Die verschiedenen Ladetechnologien sind in Abbildung 2.2 überblicksartig zusammengestellt; die verschiedenen Farben werden im Laufe des Kapitels näher beschrieben. Daran anschließend werden die Vor- und Nachteile der drei Technologien zusammenfassend gegenübergestellt.

2.2.1.1 Konduktives Laden

Für konduktives Laden müssen Fahrzeug und Netzanschluss physisch über elektrische Kontakte verbunden sein. Das California Air Resources Board (2001) nennt zwei Möglichkeiten

³³ Kapazitive und optische Übertragungstechnik sind aufgrund der Anforderungen an Fahrzeugmaße, der maximalen Übertragungstrecke und der möglichen Übertragungsleistung für die Ladung von Batterien in heutigen Fahrzeugkonzepten nicht denkbar, siehe für eine ausführlichere Darstellung z. B. Wiesspeiner (2005).

für konduktives Laden, die den Ort der Ladeinheit und der Leistungselektronik bestimmen: (i) On-board- und (ii) Off-board-Laden. *On-board-Systeme* benötigen dabei keine spezielle Verbindung zwischen Fahrzeug und Ladeinheit, sondern können an heutigen haushaltsüblichen Wechselstromanschlüssen³⁴ geladen werden, die Gleichrichtung des Ladestroms erfolgt anschließend im Fahrzeug. *Off-board-Systeme* bringen die Leistungselektronik in der Ladestation unter und übertragen mit speziell ausgelegten Kabeln Gleichstrom ins Fahrzeug. Für beide Systeme wurden bereits verschiedene Standards vorgeschlagen, die von Steckerdesign über die zu übertragende Leistung bis hin zu Kommunikationsprotokollen die Verbindung zwischen Fahrzeug und Ladestation definieren. In Deutschland zeichnet sich für die Ladesteckvorrichtung ein Standard auf Basis des Normentwurfs DIN IEC 61851-1 ab, der sich zurzeit allerdings noch in Abstimmung befindet.³⁵ Innerhalb Europas gibt es mit der französisch-italienischen EV Plug Alliance ein konkurrierendes Konzept.³⁶ Beide Standardisierungsvorschläge sehen ähnliche Anschlussleistungen vor und unterscheiden sich im Wesentlichen im Steckerdesign. Im amerikanischen und japanischen Raum werden auch die Möglichkeiten einer Gleichstromladung diskutiert.³⁷

Konduktives Laden kann aus Nutzersicht mit Komforteinschränkungen verbunden sein, da aufgrund der nötigen regelmäßigen Ladevorgänge – im Durchschnitt mindestens alle sechs Fahrten – das Fahrzeug mit der Ladestation verbunden werden muss. Nach Kiefer (2009) kann gerade das dazu führen, dass das Laden vergessen wird. Zudem müssen hohe Sicherheitsanforderungen erfüllt werden.³⁸ Nicht zuletzt lässt sich ein offen zugängliches Kabel nur schwer vor Vandalismus schützen.³⁹ Bisherige Kundenakzeptanzanalysen in den Modellregionen haben jedoch gezeigt, dass Steckerlösungen sehr gut akzeptiert werden.⁴⁰

2.2.1.2 Induktives Laden⁴¹

Eine Alternative zur konduktiven Ladung ist die kabellose Energieübertragung. Darunter wird eine Ladetechnik verstanden, bei der die Energie ohne elektrische Kontakte zwischen der La-

³⁴ In Deutschland entspricht das in der Regel einem 230 V-Anschluss mit einer Absicherung von 16 A.

³⁵ Vgl. VDE (2008).

³⁶ Vgl. Schneider Electric (2010).

³⁷ Die amerikanische Organisation SAE International (2010) sieht in ihrem Standardisierungsvorschlag SAE J1772 zwar im Wesentlichen ein AC-Konzept vor, bei dem Anschlussleistungen von 1,9 kW (einphasige 120 V und 16 A abgesichert) bis zu 19,2 kW (einphasige 240 V mit bis zu 80 A abgesichert) möglich sind. Jedoch soll der Standardisierungsvorschlag bald um eine DC-Ladung erweitert werden. Diese DC-Ladung wird dabei sehr wahrscheinlich auf dem von Tokyo Electric Power Company (TEPCO) entwickelten und als CHAdeMO bezeichneten Standardisierungsvorschlag aufsetzen. CHAdeMO besitzt einen Off-board-Lader und ermöglicht zunächst Anschlussleistungen von bis zu 62,5 kW bei 500 V DC und 125 A, siehe Aneqawa (2010).

³⁸ So müssen zum Schutz vor offenen elektrischen Kontakten und auftretenden Kriechströmen über Nässefilme Ladekabel, Ladestation und Ladebuchse am Fahrzeug resistent gegen Witterungseinflüsse ausgeführt werden, vgl. Wallerath (2004).

³⁹ Insbesondere während des Ladevorgangs, aber auch wenn das Kabel fest an der Ladestation angebracht ist.

⁴⁰ Vgl. Dütschke et al. (2011).

⁴¹ Dieser Abschnitt basiert im Wesentlichen auf der detaillierteren Ausarbeitung zur induktiven Ladung von Schraven, Kley und Wietschel (2011).

destination und dem elektrischen Verbraucher übertragen wird. Für die kabellose Ladung ist insbesondere die induktive Energieübertragung praktikabel, andere kabellose Energieübertragungstechnologien, wie z. B. die kapazitive oder optische, erfüllen aufgrund der Anforderungen an Fahrzeugmaße, der maximalen Übertragungsstrecke und der möglichen Übertragungsleistung nicht die Anforderungen für die Ladung von Batterien. Die induktive Energieübertragung basiert auf einem zeitlich veränderlichen Strom in der Primärspule (außerhalb des Fahrzeugs), der ein zeitlich veränderliches Magnetfeld erzeugt, das die in der Nähe befindliche Sekundärspule (Fahrzeugseite) z. T. durchsetzt.⁴² Dieses Magnetfeld erzeugt in der Sekundärspule eine Induktionsspannung sowie letztlich einen zeitlich veränderlichen Strom. Geringe Übertragungsfrequenzen um 50 Hz lassen allerdings keine Energieübertragung bei großen Luftspalten zu. Der Schlüssel zum breiten Einsatz der Technik ist die Transformation auf höhere Frequenzen im Bereich von 20–150 kHz.⁴³ Die Güte der magnetischen Kopplung der Spulen ist im Allgemeinen durch die Geometrie der Spulen gegeben. Je geringer das Verhältnis Luftspalt/Spulendurchmesser, desto besser ist die Kopplung. Praktisch ergibt sich die maximale Kopplung anhand zweier flächenmäßig möglichst deckungsgleicher Spulen mit geringem Luftspalt.⁴⁴ Für insgesamt relativ klein ausgeführte Systeme bedeutet eine Verringerung des Abstands ab einem Luftspalt in der Größenordnung des halben Spulendurchmessers allerdings keine signifikante Verbesserung der Kopplung mehr.⁴⁵

In der mobilen Fördertechnik und anderen Bereichen des Maschinenbaus haben sich induktive Systeme seit über 20 Jahren bewährt.⁴⁶ Auch im Bereich der Elektromobilität befinden sich bereits seit einigen Jahren induktive Systeme in Anwendung.⁴⁷ Interessant wird die induktive Energieübertragung für die Ladung von Elektrofahrzeugen insbesondere durch die Möglichkeit, die Fahrzeuge auch bei kurzen Stopps – ohne dass ein Nutzereingriff erforderlich ist – zu laden. Die Verlegung der primären Einheit unterhalb der Straßenoberfläche reduziert sowohl die Witterungseinflüsse auf die Komponenten als auch die Gefahr des Vandalismus. Da weder eine Kontaktbelastung zwischen primärer und sekundärer Einheit auftritt noch Kabelbrüche zu befürchten sind, ist ein geringer Verschleiß zu erwarten.⁴⁸ Jedoch ist die maximal übertragbare Leistung eines induktiven Energieübertragungssystems durch die zulässige Wicklungsdurchflutung, die primär- und sekundärseitige Spulengüte sowie durch die magnetische Kopplung begrenzt und wird daher im Regelfall auf bis zu 3,7 kW ausgelegt. Durch den Einsatz mehrerer Spulensysteme sind Anschlüsse bis zu 11 kW ebenfalls technisch realisierbar, stellen aber erhebliche Anforderungen an die leistungselektronischen Komponenten und bedürfen zusätzlich einer sorgfältigen Abschirmung der elektromagnetischen Felder. Der Übertragungswirkungsgrad reduziert sich bei einem Luftspalt von 10–20 cm auf etwa 95 %

⁴² Vgl. Hu (2009).

⁴³ Vgl. für eine detailliertere technische Betrachtung Wiesspeiner (2005).

⁴⁴ Vgl. Wiesspeiner (2005).

⁴⁵ D. h. Abstände von weniger als 15 cm bei einem Spulendurchmesser von 30 cm.

⁴⁶ Vgl. Schedler (2009).

⁴⁷ Ladung von Elektrobussen in Whakarewarewa (Neuseeland) seit 1996, in Genua und Turin seit 2003.

⁴⁸ Vgl. Kiefer (2009).

und lässt somit den Gesamtladewirkungsgrad auf unter 80% sinken. Eine Rückspeisung⁴⁹ der Energie vom Fahrzeug in das Stromnetz ist aufgrund der auf Fahrzeugseite nur existierenden Empfängerspule nicht möglich und würde bei Einbau eines Senders das Gewicht auf der Fahrzeugseite deutlich erhöhen. Außerdem ist eine Rückspeisung vor dem Hintergrund des niedrigen Gesamtwirkungsgrades nicht sinnvoll. Zu den weiteren Herausforderungen eines induktiven Ladesystems gehören u. a., dass beim Parken Primär- und Sekundärseite ideal zueinander ausgerichtet sowie Sicherheitsanforderungen sowohl im Luftspalt als auch an Randbereichen aufgrund der Störaussendung eingehalten werden müssen.⁵⁰

Für den Einsatz der induktiven Technik zur Ladung von Elektrofahrzeugen gibt es verschiedene Konzepte: (i) stationäres Laden an speziell dafür konstruierten Ladestationen und (ii) dynamische Ladung während der Fahrt. Für die *stationäre* Ladung gibt es zwei Optionen zur Verlegung der primären Einheit (in oder auf der Straße) sowie verschiedene Konzepte zur Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades, um den Abstand zwischen der primären und sekundären Einheit mithilfe einer mechanischen Konstruktion zu verringern. Ist bereits ein relativ geringer Abstand gegeben, bewirkt allerdings eine Verringerung des Abstands zwischen den Spulen nur eine kleine Verbesserung des Wirkungsgrades, da sich die Kopplung bis zur Hälfte des Durchmessers der kleineren Spule kaum noch ändert. Für die *dynamische* Ladung werden lange Linienleiter so in der Fahrbahn verlegt, dass darüber fahrende Fahrzeuge geladen werden können und damit die Reichweite von Elektrofahrzeugen erhöht wird.⁵¹ Dabei kann die dynamische, induktive Ladung nur als Zusatzsystem eingesetzt werden und benötigt für die nicht mit Linienleiter versehenen Straßen eine Lademöglichkeit am Standort. Die Reichweitenängste potenzieller Nutzer lassen sich nur dann beheben, wenn ausreichend Strecken – insbesondere der Hauptautobahnen – elektrifiziert werden. Ein Ausbau dieser häufiger befahrenen Strecken würde aber nacheinander erfolgen, wodurch gerade in der Anfangsphase ein solches System zur Reduzierung der Reichweitenängste nicht sinnvoll eingesetzt werden kann. Des Weiteren sind die übertragbaren Leistungen zu niedrig, als dass eine ausschließliche Versorgung über die dynamische, induktive Ladung ausreicht. Ansonsten müsste das Fahrzeug auf Geschwindigkeiten von etwa 20–60 km/h gedrosselt werden⁵², um genügend Energie für die Weiterfahrt aufnehmen zu können. Ein solches System hätte weitere technische Herausforderungen zu meistern, wie z. B. eine komplexe Abrechnung, den Hochspannungsanschluss der Fahrbahnen an das Stromnetz oder die Abschirmung der magnetischen Wechselfelder, wenn sich kein Fahrzeug über dem Abschnitt des Linienleiters befindet. Außerdem wären für die Versorgung mehrerer Fahrzeuge bei höheren Geschwindigkeiten Anschlussleistungen im Bereich mehrerer 100 kW/km und entsprechende Anschlüsse an das Stromnetz erforderlich.

⁴⁹ Siehe Abschnitt 3.5.2.

⁵⁰ Für eine detailliertere Darstellung der technischen Ausgestaltung sei auf Schraven et al. (2011) verwiesen.

⁵¹ Vgl. z. B. Pander (2010).

⁵² Bei einem Verbrauch von $u_E = 0,18 \text{ kWh/km}$ ergeben sich die folgenden maximal zurücklegbaren Strecken pro Stunde von $\frac{3,7 \text{ kW}}{0,18 \text{ kWh/km}} = 20,7 \text{ km/h}$ bis $\frac{11,1 \text{ kW}}{0,18 \text{ kWh/km}} = 61,7 \text{ km/h}$.

2.2.1.3 Batteriewechsel

Um Zwischenladungen auf längeren Strecken zu ermöglichen, ist der von Better Place konzipierte Batteriewechsel an öffentlichen Tauschstationen als weitere Alternative zu nennen.⁵³ Anstatt die leere Batterie zu laden, wird diese in einer Tauschstation gegen eine neue, vollständig geladene Batterie ausgetauscht. Dieser Vorgang kann nach Aussagen des Betreibers in etwa drei Minuten erfolgen und ermöglicht somit die schnelle Weiterfahrt auf längeren Strecken. Dabei kann die Reichweitenproblematik durch ein Netz an Wechselstationen entschärft werden, da Kunden mit einem kurzen Stopp an der Station eine neue, volle Batterie erhalten. Technisch ist der Batteriewechsel aufgrund der etwa 150 kg schweren Batterie⁵⁴ und den vorherrschenden hohen Spannungen jedoch relativ aufwendig. Die zu tauschende Batterie muss dabei einfach zugänglich sein und wird daher sehr wahrscheinlich im Unterboden des Fahrzeugs untergebracht werden, was u. a. Auswirkungen auf den Fahrzeugaufbau hat.⁵⁵ Je nach Fahrzeug sind die Batterieaggregate zusätzlich stark unterschiedlich, z. B. hinsichtlich der Leistung, auszulegen. Verschiedene Batterietypen und -größen treiben jedoch die Anzahl der an der Station insgesamt vorzuhaltenden Batterien und damit die Kapitalbindungskosten.⁵⁶ Zur Realisierung des Batterietauschs sind deutlich stärker standardisierte Batterieaggregate erforderlich, um die Anzahl der unterschiedlichen Batterietypen und damit das gebundene Kapital an der Wechselstation zu reduzieren, was Hatton et al. (2009) als „implizierte Batteriestandardisierung“ bezeichnen. Betrachtet man die Variantenvielfalt in der heutigen Automobilausstattung und die technischen Anforderungen, so ist nicht mit einem oder zwei Standardbatterieaggregaten zu rechnen. Zudem stellt die Batterie einen Großteil der Wertschöpfung des Fahrzeugs dar, die Automobilhersteller daher durch Differenzierung zu schützen versuchen werden. Zur Reduzierung der Reichweitenangst sind nach wie vor viele Wechselstationen nötig. Dies steht jedoch im Widerspruch, gerade in der Anfangsphase auf diese Stationen zurückgreifen zu können, wie die Royal Academy of Engineering (2010, S. 28) feststellt. Des Weiteren ist in einem Batterietauschkonzept die Nutzung der Batterie vom Besitz einer bestimmten Batterie zu trennen, da an der Station eine andere, fremde Batterie in das Fahrzeug getauscht wird. Aufgrund der Trennung von Nutzung und Besitz wird die Batterie nicht unbedingt sehr pfleglich behandelt, da man im Zweifelsfall wieder eine neue Batterie an der Wechselstation erhalten kann.⁵⁷ Des Weiteren kann die Batterie durch häufiges Tauschen geschädigt werden.⁵⁸ Beide Punkte tragen zu einem erhöhten Verschleiß der Batterie und damit der Steigerung der Gesamtkosten bei. Die unterschiedliche Batterienut-

⁵³ Vgl. z. B. Better Place (2009).

⁵⁴ Bei einer gravimetrischen Energiedichte wie vormals angegeben von 0,20 kWh/kg, einem 24 kWh-Batterieaggregat und einem weiterhin benötigten Batteriemanagementsystem.

⁵⁵ Zum einfachen Tausch sollte die Wechselbatterie ein zusammenhängendes Batteriesystem sein. Soll die Batterie nicht getauscht werden, können einzelne Module hingegen schwerpunkt- und bauraumoptimiert im Fahrzeug untergebracht werden. Zudem wird die konzeptionelle Gestaltung des Fahrzeugs, die man durch den elektrischen Antriebsstrang gewonnen hat, dadurch zum Teil wieder aufgehoben, wenn über definierte Zugangsorte Standardbatterieaggregate zu tauschen sind.

⁵⁶ Vgl. auch Hatton et al. (2009, S. 4).

⁵⁷ Siehe auch Royal Academy of Engineering (2010, S. 28).

⁵⁸ Vgl. Hatton et al. (2009, S. 4).

Technologie	Stärken	Schwächen
Konduktiv	<ul style="list-style-type: none"> + Einfaches System + Hohe Übertragungsleistung + Standards weitestgehend entwickelt + Kommunikation etc. über Kabel gut zu realisieren 	<ul style="list-style-type: none"> – Regelmäßiges Einstecken wird als Hürde wahrgenommen – Öffentlich zugängliche Ladestationen sind Witterungseinflüssen und Vandalismus ausgesetzt
Induktiv	<ul style="list-style-type: none"> + Wegfall des Kabels und damit kein Nutzereingriff erforderlich + Geringer Verschleiß, u. a. keine Witterungseinflüsse und kein Vandalismus + Berührungssicher und potenzialfrei 	<ul style="list-style-type: none"> – Nur niedrige Anschlussleistungen – Niedriger Übertragungswirkungsgrad – Positionierung der Spulen beim Parken kompliziert – Rückspeisung im anvisierten System nicht möglich
Batteriewechsel	<ul style="list-style-type: none"> + Ermöglicht kurze Stopps und schnelle Weiterfahrt + Adressiert Reichweitenangst 	<ul style="list-style-type: none"> – Batterietausch technisch durch Gewicht und wirkende Spannungen aufwendig – Fahrzeugaufbau zu ändern, da Batterie nur im Unterboden einsetzbar – Verschiedene Batteriegrößen treiben die Kapitalbindungskosten (implizite Batteriestandardisierung) – Viele Wechselstationen nötig zur Reduzierung der Reichweitenangst – Höherer Batterieverschleiß bei Nutzung fremder Batterien bzw. Beschädigungen beim Tausch

Tabelle 2.1 – Übersicht der Stärken und Schwächen der verschiedenen Ladetechnologien.

zung, der erhöhte Verschleiß und mögliche Fehler bei Unfällen können zudem zu rechtlichen und Haftungsproblemen führen.

2.2.1.4 Zusammenfassende Betrachtung der verschiedenen Ladetechnologien

Die beschriebenen Technologien und deren Stärken und Schwächen werden in Tabelle 2.1 abschließend gegenübergestellt. Technisch ist die konduktive Ladung besonders einfach zu realisieren und bietet ein breites Spektrum an möglichen Anschlussleistungen. Die Schwächen der konduktiven Ladungen liegen eher auf Seiten der Kundenakzeptanz⁵⁹, die jedoch auch vom Nutzungsszenario und derart der Zugänglichkeit abhängen. Diese werden im Folgenden Abschnitt näher beschrieben. Das induktive Laden bietet zwar den Vorteil, dass auf ein Kabel und regelmäßiges Einstecken verzichtet werden kann, jedoch ist aufgrund niedriger Anschlussleistungen und niedriger Übertragungswirkungsgrade die induktive Technologie

⁵⁹ Bisherige Kundenakzeptanzanalysen zeigen jedoch, dass die konduktive Ladung gut akzeptiert wird, vgl. Dütschke et al. (2011).

nicht so breit einzusetzen. Innerhalb der induktiven Ladung ist die stationäre Ladung zwar mit erhöhtem Aufwand, aber generell bereits heute realisierbar. Die dynamische Ladung hingegen ist aufgrund der Komplexität, das heutige Straßennetz mit Linienleitern zu versehen, dort die benötigten Anschlussleistungen zur Verfügung zu stellen und diese noch abrechnen zu können, technisch aufwendig. Der Batteriewechsel ermöglicht eine zu heutigem Tankverhalten ähnliche Ladung, ist aber aufgrund technischer Herausforderungen, der nötigen Änderungen des Fahrzeugaufbaus, einhergehend mit der Standardisierung der Batterie und Wertschöpfungsverschiebungen, den Kapitalbindungskosten sowie des Verschleißes der Batterie schwer zu realisieren. Aufgrund der technischen Umsetzbarkeit wird im Folgenden auf die konduktive und stationäre, induktive Ladetechnik fokussiert. Die technisch aufwendigen Ladetechnologien sind zur Orientierung in Abbildung 2.2 auf Seite 8 hellgrau eingefärbt und werden im Verlauf der Arbeit nicht näher betrachtet.

2.2.2 Art der Zugänglichkeit

Den technisch praktikablen Ladetechnologien ist zu eigen, dass die Fahrzeuge aufgrund der längeren Ladezeit an den Orten geladen werden müssen, an denen geparkt wird. Daher ist es neben der Betrachtung der unterschiedlichen Ladetechnologien nötig, die Auswirkung verschiedener Standorte auf die Gestaltung und Auslegung der Infrastruktur zu untersuchen. Es stellt sich somit die Frage, an welchen Standorten kann Ladeinfrastruktur besonders einfach ausgelegt werden bzw. an welchen Standorten müssen weitergehende Vorkehrungen getroffen werden, dass die dort aufgebaute Ladeinfrastruktur den Nutzungs- und Sicherheitsanforderungen genügt. In der Literatur wird daher zwischen Lademöglichkeiten daheim, am Arbeitsplatz sowie einer dritten Möglichkeit – einem öffentlichen Standort – unterschieden.⁶⁰ Für den dritten Fall werden diverse Konzepte genannt, wie Ladesäulen an der Straße oder Schnellladestationen.⁶¹ Als Differenziator hat sich die Art der Zugänglichkeit durchgesetzt, so wird in (i) private, (ii) halböffentliche und (iii) öffentliche Standorte unterschieden:⁶²

Privater Bereich – Der Besitzer eines Elektrofahrzeugs verfügt über einen Garagenstellplatz oder die Möglichkeit, das Fahrzeug zu Hause an den Strom anzuschließen. Diese Möglichkeit besteht insbesondere in ländlichen Regionen oder in städtischen Randgebieten. In geschlossenen städtischen Siedlungsgebieten werden Fahrzeuge hingegen häufig auf der Straße abgestellt, wo in der Regel keine direkte Anschlussmöglichkeit an das Stromnetz besteht. So haben 71 % der Pkw-Halter in ländlichen Bereichen und nur 43 % der Nutzer in Großstädten die Möglichkeit, ihr Fahrzeug in einer Garage abzustellen.⁶³ Können die Fahrzeuge in einer Garage oder an einem Stellplatz an den privaten Hausanschluss angeschlossen werden, so sind Ladung und Abrechnung über den vorhandenen Zähler verhältnismäßig einfach zu realisieren.

⁶⁰ Siehe z. B. Royal Academy of Engineering (2010, S. 31) oder Wiederer und Philip (2010, S. 14).

⁶¹ Vgl. auch Wiederer und Philip (2010, S. 14), die diesen Fall als „convenience“-Laden beschreiben.

⁶² Vgl. Wietschel et al. (2009), aber auch NPE (2010, S. 21) und Becker (2009, S. 11). Die folgende Darstellung basiert auf Wietschel et al. (2009, S. 36 ff.).

⁶³ Vgl. Biere et al. (2009).

Halböffentlicher Raum – Über den Tag werden die Fahrzeuge immer wieder an den gleichen Orten abgestellt, wie zum Beispiel beim Arbeitgeber oder an Sportstätten. Die an diesen Orten bestehende Parkinfrastruktur bietet häufig auch Stromanschlüsse, sodass Parkplätze vergleichsweise einfach mit Ladevorrichtungen ausgebaut werden können. Da das Parken auf diesen Plätzen in der Regel zugangsbeschränkt ist – es dürfen z. B. nur Arbeitnehmer, Kunden etc. dort parken – reicht es, die Ladung an der Steckdose zu ermöglichen und einfache, evtl. pauschale Abrechnungen vorzusehen. Aufgrund der relativ geringen Ladekosten⁶⁴ kann ggf. ganz auf die Abrechnung verzichtet und die freie Bereitstellung als Engagement des Arbeitgebers, Vereins etc. für emissionsarme Mobilität beworben werden. Durch eine einheitliche Kennzeichnung und Öffnung privater sowie halböffentlicher Lademöglichkeiten, wie in der Initiative „Park & Charge“⁶⁵, verschwimmt der Übergang zwischen den bisher erläuterten Lademöglichkeiten.

Öffentlicher Raum – Sowohl für den Rest des parkenden Verkehrs, z. B. in städtischen Wohnstraßen oder Siedlungen, als auch für Zwischenladungen auf längeren Fahrten wird der Aufbau öffentlicher Ladesäulen propagiert.⁶⁶ Diese Ladeinfrastruktur ähnelt im Prinzip den früheren Telefonzellen aus der Zeit, als es noch keine oder kaum Mobiltelefone gab. Dabei gleicht nicht nur die Verwendung, sondern auch die Architektur einer Ladesäule der einer Telefonzelle: Sie muss im öffentlichen Raum erkennbar, stabil gebaut, gegen Missbrauch geschützt und mit einem Abrechnungssystem ausgestattet sein. Dabei darf die abgerechnete Leistung nicht signifikant teurer als in den beiden zuvor genannten Ladeinfrastrukturen sein, da diese sonst vermutlich nicht genutzt und somit kaum ausgebaut würde. Um schnelle Ladungen zum Beispiel für Zwischenladungen auf längeren Strecken möglich zu machen, können Hochleistungsladestationen eingesetzt werden.

Dabei wird an den verschiedenen Standorten unterschiedlich häufig geparkt. Auf Basis des in Abschnitt 3.2 vorgestellten Verkehrsverhaltens lassen sich die Parkzeiten ermitteln, siehe hierzu Abbildung 2.3. So steht ein Fahrzeug vorwiegend am privaten Stellplatz, gefolgt vom halböffentlichen Raum. Das Fahrzeug steht nur selten und insb. kurz im öffentlichen Raum.

2.2.3 Anschlussleistungen und Ladezeit

Nicht an allen Standorten steht das Fahrzeug für einen längeren Zeitraum, wie etwa auf dem privaten Stellplatz über Nacht oder am Arbeitsplatz während der Arbeitszeit. Daher ist die benötigte Ladezeit und damit die an dieser Ladestation zur Verfügung stehende Anschlussleistung wichtig. Für den induktiven Fall sind zunächst die beiden Systeme Wechselstrom-

⁶⁴ Bei einer Jahresfahrleistung von 14.300 km, einem Verbrauch von 18 kWh/100 km und 0,20 €/kWh (siehe auch Abschnitt 3.3.3) ergeben sich monatliche Gesamtladekosten von 43 €, von denen nur ein Teil im halböffentlichen Raum anfallen würde. Firmen können des Weiteren durch Ausnutzung ihrer Großhandelskonditionen bzw. durch ein besseres Lastmanagement diesen Betrag reduzieren.

⁶⁵ Eine Initiative des „Bundesverband Solare Mobilität e. V.“ vgl. auch www.park-charge.de.

⁶⁶ Vgl. z. B. Bundesregierung (2009) für den im Rahmen des „Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität“ in Deutschland geforderten Ausbaus der Ladeinfrastruktur.

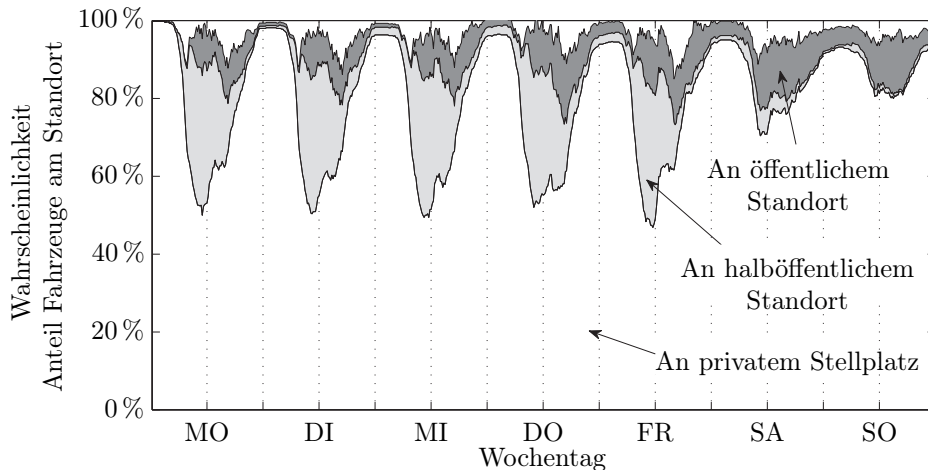


Abbildung 2.3 – Verteilung der Parkstandorte auf Basis von Daten des Mobilitätspanels (2006).

und Gleichstromladen zu unterscheiden. Die Wechselstromsysteme erlauben niedrigere Anschlussleistungen von etwa bis zu 50 kW;⁶⁷ Gleichstromsysteme werden hingegen mit deutlich höheren Anschlussleistungen geplant.⁶⁸ Im Amerikanischen sind die verschiedenen Anschlussleistungen je nach den gegebenen Spannungen und Absicherungen in drei Level eingeteilt.⁶⁹ Level I steht für einen einphasigen Wechselstromanschluss, der in Nordamerika bei 120 V liegt und mit 16 A abgesichert ist. Level II bezeichnet einen ein- oder dreiphasigen Wechselstromanschluss bei in Nordamerika höheren Spannungen von bis zu 240 V und Absicherungen von 80 A, wobei der Anschluss ggü. Level-I-Anschlüssen baulich getrennt und mit weiterer Sicherheitstechnik ausgestattet ist. Level III basiert auf Gleichstromanschlüssen von 300–500 V und Absicherungen von etwa 500 A. Ähnlich dazu definiert die IEC in ihrem auf kabelgebundene Ladesysteme ausgelegten Standardisierungsvorschlag IEC 62196-1 vier verschiedene Lademodi⁷⁰, vgl. z. B. van den Bossche (2010). Dabei ist Mode 1 für den einphasigen Haushaltsstrom bis 16 A ausgelegt, in Mode 2 sind ein- und dreiphasige Konfigurationen mit Absicherungen bis 32 A und bei Mode 3 Absicherungen von bis zu 250 A vorgesehen. Mode 2 und 3 funktionieren dabei auf derselben Steckverbindung und über ein Signal können die verschiedenen Lademodi unterschieden werden. Erst der vierte Lademodus (Mode 4) basiert auf Gleichstrom und einer Absicherung von bis zu 400 A.

Aufgrund der unterschiedlichen Netzarchitektur in den einzelnen Ländern, siehe z. B. Stolz (2009), sind insbesondere außerhalb Europas über den normalen Haushaltsanschluss nur geringe Anschlussleistungen darstellbar. So ist in den USA mit dem Standardisierungsvorschlag

⁶⁷ Theoretisch erlauben sowohl Wechselstrom- als auch Gleichstromsysteme dieselben Anschlussleistungen. Wechselstromsysteme benötigen jedoch Gleichrichter im Fahrzeug, die mit hohen Anschlussleistungen mehr Gewicht und Bauraum beanspruchen, und daher in der Regel nur bis zu 50 kW ausgelegt werden.

⁶⁸ Siehe z. B. Siemens (2009, S. 46), die Anschlussleistungen von bis zu 300 kW für gleichstrombasierte Ladestationen als realistisch erachten.

⁶⁹ Siehe z. B. Khan (1994, S. 105 ff.) oder Botsford und Szczepanek (2009, S. 2 ff.).

⁷⁰ Dieser Standardisierungsvorschlag erweitert die allgemeinen Anforderungen an konduktive Ladesysteme DIN IEC 61851-1 (siehe auch VDE, 2008, S. 12, „Ladebetriebsart“) und bezieht sich auf Steckverbindungen für Elektrofahrzeuge, wobei insbesondere Stecker, Steckdosen und Kabelkonfektionierung detailliert werden.

SAE J1772 nur Mode-1-Laden möglich, wobei in Europa theoretisch Mode 2 und 3 dargestellt werden können und damit hohe Anschlussleistungen auf Wechselstrombasis zur Verfügung stehen.⁷¹ Im Moment gibt es zwischen dem deutschen Standardisierungsvorschlag des VDE (2009) und dem französisch-italienischen Vorschlag um die EV Plug Alliance⁷² noch Diskussionen um die Verwendung einer im öffentlichen Raum nötigen Verschlusskappe vor dem Anschluss. Die außerhalb Europas über Wechselstrom niedrigen Anschlussleistungen versucht man durch den Ausbau des Netzes und den Aufbau von DC-Ladesäulen zu umgehen, die im Wesentlichen durch den japanischen Standardisierungsvorschlag CHAdeMO getrieben werden.⁷³

Der deutsche Standardisierungsvorschlag beruht auf der Weiterentwicklung des CEEplus-Drehstromsteckers durch die Firma Mennekes und wurde in der Anwendungsregel VDE-AR-E 2623-2-2 festgehalten.⁷⁴ Dieser Vorschlag sieht für induktives Laden im Wesentlichen die vier folgenden Anschlussleistungen vor und nutzt damit den zulässigen Mode-3-Bereich gemäß IEC 62196-1 nicht ganz aus:

1. Regulärer einphasiger Hausanschluss mit 230 V zu 16 A abgesichert und einer maximal möglichen Leistung von 3,7 kW,⁷⁵
2. dreiphasiger Anschluss mit 400 V zu 16 A abgesichert mit 11,1 kW,⁷⁶
3. dreiphasiger Anschluss mit 400 V zu 32 A abgesichert mit 22,2 kW und
4. dreiphasiger Anschluss mit 400 V zu 63 A abgesichert mit 43,6 kW.

Höhere Anschlussleistungen, zum Teil auf Gleichstrombasis, sind in Planung. Induktive Ladesysteme sind typischerweise auf eine Anschlussleistung von 3,7 kW ausgelegt und lassen maximal Anschlussleistungen von bis zu 11 kW zu. Die verschiedenen Anschlussleistungen stehen allerdings nicht an jedem Standort zur Verfügung. Am privaten Stellplatz kann typischerweise problemlos auf eine Anschlussleistung von 3,7 kW zugegriffen werden. Höhere Leistungen erfordern einen dreiphasigen Anschluss, der je nach bestehender Leitung nur durch einen zusätzlichen Hausanschluss bereitgestellt werden kann. Im halböffentlichen oder öffentlichen Raum können dagegen direkt höhere Anschlussleistungen angeboten werden, da in diesen Bereichen Anschlüsse sowieso neu zu legen sind.

Die verfügbare Anschlussleistung treibt dabei im Wesentlichen die benötigte Ladezeit. Ein leeres 24 kWh-Batterieaggregat benötigt an einem 3,7 kW-Anschluss in etwa 6 h, um wieder aufgeladen zu werden. Betrachtet man jedoch die zurückgelegten Strecken, sind deutlich kürzere Ladezeiten selbst an Anschlüssen mit niedriger Anschlussleistung zu erwarten. So

⁷¹ Vgl. z. B. NPE (2010).

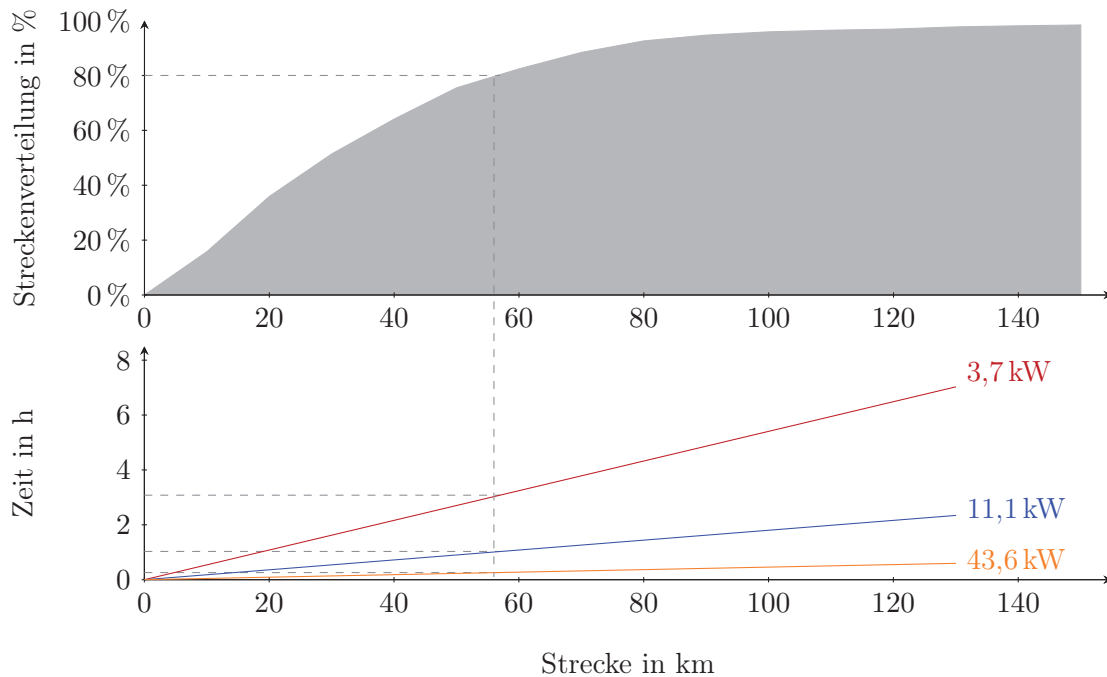
⁷² Vgl. Schneider Electric (2010).

⁷³ Vgl. Anegawa (2010).

⁷⁴ Vgl. VDE (2009).

⁷⁵ Theoretisch sind auch höher abgesicherte einphasige Anschlüsse denkbar. Für diese höheren Anschlussleistungen ist es in der Praxis jedoch häufig einfacher, mehrphasige Anschlüsse bereitzustellen.

⁷⁶ Die effektive Anschlussleistung eines dreiphasigen Drehstromanschlusses lässt sich wie folgt berechnen:
$$P = U_{\text{eff}} \cdot I = U \cdot \sqrt{3} \cdot I.$$



Anmerkung: Vgl. auch Wietschel et al. (2009, S. 35).

Abbildung 2.4 – Verteilung der zurückgelegten Strecke und die anschließend benötigte Ladezeit in Abhängigkeit der Anschlussleistung.

legt der heutige deutsche Durchschnittsfahrer in 80 % der Fälle nur Strecken unter 60 km zurück.⁷⁷ Besteht die Möglichkeit, nach den gefahrenen Strecken im Zielort zu laden, können Elektrofahrzeuge mit den heutigen Mobilitätsgewohnheiten in weniger als 3 h an einem 3,7 kW-Anschluss wieder vollständig geladen werden, siehe Abbildung 2.4. Mit höheren Anschlussleistungen reduziert sich diese Zeit an einem dreiphasigen Hausanschluss auf weniger als eine Stunde und bei Hochleistungsbelastungen auf weniger als eine Viertelstunde. Volle Ladezyklen dauern jedoch bei den vier zur Verfügung stehenden Anschlussleistungen relativ lange mit 30 min und bis zu 6,5 h. Lange Standzeiten zwischen den gefahrenen Strecken ermöglichen es jedoch, Elektrofahrzeuge selbst an Anschlüssen mit niedriger Leistung problemlos für die nächste Fahrt zu befüllen.⁷⁸

2.2.4 Anschlussart

Neben der Ladetechnologie und den Anschlussleistungen sind unterschiedliche Anschlussarten möglich. So spezifiziert der Standardisierungsvorschlag IEC 61851-1 drei verschiedene Möglichkeiten zum konduktiven Verbinden des Fahrzeugs mit der Ladeinfrastruktur, indem das Kabel (i) am Fahrzeug befestigt ist, (ii) das Kabel beidseitig gelöst werden kann oder (iii) das Kabel an der Ladestation befestigt ist. Des Weiteren wird ab Mode-2-Laden ein Pilotleiter vorgesehen, der den vorschriftsmäßigen Anschluss des Fahrzeugs sowie die Durchgängigkeit

⁷⁷ Auf Basis des Datensatzes „Mobilität in Deutschland“, siehe Follmer et al. (2003).

⁷⁸ Pkw stehen zu mehr als 95 % ihrer Zeit, vgl. Follmer et al. (2003).

des Schutzleiters prüfen und das System ein- und ausschalten kann. Über den Pilotleiter können außerdem die Ladestromstärke und die Steuerung des Stromflusses vorgenommen sowie die Steckvorrichtung gesperrt und freigegeben werden.⁷⁹

Das Protokoll ermöglicht damit sowohl das Lastmanagement, d. h. das zeitliche Steuern, wann und mit wie viel Leistung geladen werden soll, als auch Rückspeisung, also wann und mit wie viel Leistung aus der Fahrzeugbatterie ins Netz zurückgespeist werden soll.⁸⁰ Das Lastmanagement und die Rückspeisung können dabei so lange durchgeführt werden, bis die Sperrung der Steckvorrichtung ordnungsgemäß aufgehoben wurde. Die Laststeuerung beruht im Wesentlichen auf einem Informationsaustausch, woraufhin die Ladung in unterschiedliche Zeiten verlagert wird. Die Rückspeisung benötigt hingegen weitere elektrotechnische Komponenten auf Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturseite, wie z. B. Wechselrichter, um den Batteriegleichstrom wieder ins Netz einzuspeisen, oder zusätzliche Zähler, um die Abrechnung des zurückgespeisten Stroms vorzunehmen.

Für die induktive Ladung ist bisher noch kein Standardisierungsvorschlag erarbeitet worden. Die verschiedenen Anschlussarten eines induktiven Ladesystems sind dabei nicht von der Verankerung des Kabels oder der Auslegung der Steckvorrichtung getrieben, sondern werden insbesondere über das Übertragungs- und Informationsprotokoll definiert. Wie bereits zuvor erwähnt, ist die Rückspeisung über ein induktives System aufgrund der fahrzeugseitigen Gewichtsbeschränkungen und des niedrigen Gesamtwirkungsgrades nicht zu erwarten.

Für die Bewertung der Ladetechnologie hat nur die Rückspeisung einen erheblichen Einfluss auf die Auslegung von Infrastruktur und Fahrzeug. Aus diesem Grund werden weitere Ausgestaltungsformen der Anschlussart (Kabelverankerung, Übertragungsprotokoll) im Folgenden nicht weiter betrachtet.

2.2.5 Infrastrukturkomponenten

Die Ladeinfrastruktur setzt sich im Wesentlichen aus sechs verschiedenen Bereichen zusammen: der Infrastruktur-, Kommunikations- und Abrechnungshardware sowie der Leistungselektronik und dem Ladekabel bzw. im induktiven Fall dem Spulensystem. Im Folgenden werden diese einzeln beschrieben:⁸¹

Infrastrukturhardware – Unter der Infrastrukturhardware sind alle für die Ladung nötigen elektrotechnischen Komponenten und Installationen zu verstehen. Dazu gehören eine Steckdose und je nach Standardisierungsvorschlag ein Verschluss der Steckvorrichtung durch eine Klappe oder Verriegelung. Für den Anschluss ans Netz werden des Weiteren Leistungsschütze, Leistungsschutz- und Fehlerschutzschalter benötigt. Generell kann eine Ladung auch an einer regulären Steckdose vorgenommen werden. Soll die Ladeinfrastruktur jedoch in halböffentlichen oder öffentlichen Standorten installiert wer-

⁷⁹ Für den Abschnitt vgl. VDE (2008, S. 12 ff.). Die Stecker, Steckdosen und Kabelkonfektionierung werden in IEC 62196-1 bzw. der Erweiterung IEC 62196-2 definiert.

⁸⁰ Vgl. auch Abschnitt 3.5.2.

⁸¹ Vgl. für einzelne Komponenten u. a. auch Markel (2010).

den oder sollen höhere Anschlussleistungen vorgesehen werden, so ist die Infrastruktur baulich zu trennen und ggf. zu kennzeichnen. In diesem Fall wird zusätzlich ein Gehäuse benötigt, in dem die verschiedenen Komponenten untergebracht werden. Je nach Standort ist das Gehäuse als Wand-, Mast- oder Bodeninstallation ausgelegt. Außerdem muss die Installation weiteren technischen Anforderungen genügen, wie z. B. der Witterungsbeständigkeit oder dem Schutz gegen Vandalismus, wodurch die Komplexität und Dimensionierung des Gehäuses maßgeblich beeinflusst wird.

Kommunikationshardware – Sobald mehr als nur ein Anschluss bereitgestellt werden soll, muss die Ladeinfrastruktur einen aktiveren Teil übernehmen und zwischen Ladesäule, Fahrzeug und ggf. einem davon getrennten Datencenter kommunizieren.⁸² Die Gründe hierfür sind vielfältig. So sehen manche Standardisierungsvorschläge vor, dass sich das angeschlossene Fahrzeug als solches authentifizieren muss, aber auch die Ansteuerung des Ladevorgangs oder der Austausch über Ladestand und vermutlichem Energiebedarf erfordern einen Datenaustausch. Generell kann dabei die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladesäule, zwischen Kunde und Ladesäule und zwischen Ladesäule und einer davon getrennten dezentralen oder zentralen Recheneinheit stattfinden. Die Möglichkeiten, eine Kommunikation aufzusetzen, sind vielfältig und in kabelgebundene (z. B. PLC oder LAN) und in kabellose Technologien (wie z. B. GSM, UMTS oder WLAN) einzuteilen.⁸³ Der Einsatz der verschiedenen Kommunikationsdienste hängt stark vom Anwendungsfall und der sich daraus ergebenden Datenmenge und Übertragungsentfernung ab. Die Hardware für die Kommunikationsdienste setzt sich aus Sendern und Empfängern sowie einer Recheneinheit für die Interpretation und Verarbeitung der Signale zusammen und benötigt ggf. ein Netzteil für die Versorgung der Kommunikationseinheit. Für die Kommunikation zwischen Nutzer und Ladeinfrastruktur sind zudem Eingabeschnittstellen (z. B. Displays) und ggf. Anmeldesysteme (z. B. über RFID-Leser) nötig, die entweder direkt an der Ladesäule, aber auch über das Fahrzeug oder andere Geräte angesteuert werden können.

Abrechnungshardware – Je nach Standort ist die konsumierte Energiemenge einzeln abzurechnen. Dafür werden zunächst ein Zähler sowie eine Authentifizierungs- und Zahlungsschnittstelle benötigt. Je nachdem wie die Bezahlung erfolgen soll, muss der Kunde eine Eingabemöglichkeit haben und sich nach erfolgtem Zahlungsprozess einen Beleg ausdrucken lassen können. Findet eine zentrale Abrechnung statt, muss des Weiteren ein Zugriff über die Kommunikationshardware auf ein Rechenzentrum bestehen, das die anfallenden Energiemengen dort speichert und gebündelt abrechnet. Für die installierten Komponenten der Abrechnungshardware wird ggf. ein Netzteil benötigt.

Leistungselektronik – Für induktives Mode-4-Laden ist ein Gleichrichter in der Ladesäule

⁸² Eventuell ist auch eine direkte Kommunikation des Fahrzeugs zum Datencenter ohne Einbeziehung der Ladeinfrastruktur möglich. Die Kommunikationshardware ist dann kabellos und ausschließlich ins Fahrzeug einzubauen.

⁸³ Siehe Deconinck (2008, S. 901 ff.) oder Uphaus (2006, S. 24 ff.).

le unterzubringen, um den Wechselstrom aus dem Netz zum Fahrzeug gleichgerichtet übertragen zu können. Der dabei verwendete Gleichrichter ist gemäß der gewünschten Anschlussleistung auszulegen. In manchen Hochleistungsladesäulen werden außerdem Batterien zur Pufferung der Nachfrage eingebaut, damit die hohen Anschlussleistungen nicht zu einer im Niederspannungsnetz nicht deckbaren Spitzennachfrage führen, sondern die Batterie in der Ladesäule die Nachfrage glättet.⁸⁴ Für induktives Laden wird Leistungselektronik sowohl stationär als auch mobil im Fahrzeug benötigt. Damit kann die Spannung auf höhere Frequenzen transformiert, über das Spulensystem übertragen und später im Fahrzeug wieder heruntertransformiert und gleichgerichtet werden.

Ladekabel – Für die konduktive Beladung wird ein Kabel benötigt. Aufgrund der häufigen Ladung an Standorten, an denen regelmäßig geparkt wird, ist mit ungleich mehr Ladesäulen als Tankstellen zu rechnen.⁸⁵ Auch wenn das Steckerdesign beibehalten wird, sind Ladekabel für private und öffentliche Infrastruktur anders zu gestalten und somit in etwa so viele Kabel wie Ladepunkte vorzuhalten. Das Kabel kann dabei im weiteren Sinne der Ladeinfrastruktur zugerechnet werden, wenn auch die Frage der physischen Zuordnung und Befestigung des Kabels bisher nicht geklärt ist.

Spulensystem – Für die induktive Energieübertragung wird auf Seiten der Infrastruktur und des Fahrzeug ein Spulensystem benötigt, das die Energie nach dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion überträgt.

2.2.6 Anwendungsszenarien

Für den einzelnen Anwendungsfall ergeben sich aus den verschiedenen Ausgestaltungsmöglichkeiten technisch sinnvolle Ausprägungen, Ladeinfrastruktur aufzubauen. Aus der vormals erwähnten Einteilung in die Art der Zugänglichkeit (privat, halböffentlich, öffentlich) lassen sich verschiedene Anwendungsfälle entwickeln, für die sich eine technisch attraktive Infrastruktur beschreiben lässt. Dabei ist zunächst wichtig, den Standort des Fahrzeugs, also *wo* geladen wird, näher einzuschränken. Für private Ladeinfrastruktur ist der Zugang zu einem Garagen- oder einem Stellplatz wichtig; im halböffentlichen Bereich, der sich insbesondere durch die Zugangsbeschränktheit auszeichnet, kann am Arbeitsplatz oder aber auch in Parkgaragen geladen werden; für öffentliche Parkplätze sind der städtische Bereich oder Kurzstopps an Schnellstraßen wahrscheinlich.

Getrieben durch die Standortcharakteristika ergeben sich somit unterschiedliche Nutzungszeiten, also *wann* das Fahrzeug geladen werden kann. Auf dem privaten Stellplatz steht das

⁸⁴ Für die benötigte Leistungselektronik auf Fahrzeugseite, wenn über Wechselstrom geladen werden soll, sei auf Emadi et al. (2006, S. 569 ff.) verwiesen.

⁸⁵ Becker und Ledwon (2010) sowie Jeß (2011) geben für Deutschland einen Faktor von 1,2 Ladepunkten zu Fahrzeugen an. Wobei davon ausgegangen wird, dass annähernd jeder Zugang zu häuslicher Ladeinfrastruktur hat (ca. 0,9) und zusätzlich relativ viel halböffentliche und öffentliche Ladeinfrastruktur (ca. 0,3) aufgebaut wird.

Fahrzeug am längsten und dabei meistens über Nacht. An den anderen Standorten wird meistens nur tagsüber geparkt, wobei im halböffentlichen Bereich wesentlich längere Standzeiten zu erwarten sind und im öffentlichen Raum typischerweise nur kurze Stopps anfallen.

Für die Auslegung einer geeigneten Ladeinfrastruktur ist der Grund bzw. die Motivation, an diesem Standort zu laden, also das *Warum*, zu hinterfragen. Dabei zeigt sich, dass gerade der private und halböffentliche Bereich für reguläre Ladevorgänge geeignet ist, wobei im öffentlichen Raum eher Zwischenladungen stattfinden, um die ggf. knappe Reichweite des Elektrofahrzeugs zu verlängern und den Zielort noch erreichen zu können.

Aus dem genaueren Verständnis der Standortgegebenheiten, der dort zur Verfügung stehenden Stromanschlüsse sowie dem Anwendungsfall für die Ladung lässt sich der technologische Rahmen, also *wie* geladen werden kann, besser spezifizieren. Je nach Standort bieten sich verschiedene Ladetechnologien an, bzw. können manche auf Basis der technischen Restriktionen ausgeschlossen werden. Insbesondere im privaten, aber auch im halböffentlichen Bereich wird aufgrund der besseren Realisierbarkeit und der langen Standzeiten überwiegend konduktives Laden vorherrschen. Der Aufwand, das Fahrzeug mit dem Ladekabel an die Infrastruktur anzuschließen, relativiert sich über die in diesen Standorten langen Ladezeiten. Zudem ist die Installation induktiver Systeme darüber hinaus im privaten oder halböffentlichen Bereich relativ aufwendig. Dort stehen häufig bereits normale Haushaltssteckdosen zur Verfügung oder es lassen sich alternativ meistens relativ einfach dreiphasige Anschlüsse mit niedriger Anschlussleistung (bis zu 22,2 kW) in diesen Standorten verlegen. Im öffentlichen Raum sind aufgrund der kurzen Standzeiten höhere Anschlussleistungen gewünscht, die dort über höher abgesicherte dreiphasige Wechselstromanschlüsse bereitgestellt werden können. Rein technisch ist es des Weiteren möglich, Gleichstromladesäulen an diesen Standorten aufzubauen, die jedoch deutlich aufwendiger sind und aufgrund der typischerweise höher ausgelegten Anschlussleistung eine stärkere Auswirkung auf die Netzstabilität haben. Zur Erhöhung des Nutzerkomforts lassen sich alternativ auch induktive Systeme nutzen, so müsste während der kurzen Standzeiten nicht auch noch ein- und ausgesteckt werden. Allerdings stellen diese Systeme eine deutlich geringere Anschlussleistung zur Verfügung und widersprechen daher dem eigentlichen Gedanken, mit kurzen Zwischenladungen die Reichweite des Fahrzeugs zu verlängern. Der Batterietausch wird aufgrund der erwähnten Herausforderungen nicht als sinnvolle technische Lösung für Laden im öffentlichen Raum erachtet.

Auf Basis der verwendeten Ladetechnologie und den am jeweiligen Ort typischen Standzeiten ergeben sich unterschiedliche Ausgestaltungen der Anschlussart. So wird im privaten und halböffentlichen Bereich länger geparkt, wodurch die Möglichkeit zur Nutzung der Lastverlagerung, also der Verschiebung des Ladevorgangs in Zeiten niedrigerer Netzlast oder günstigerer Stromkosten, besser gegeben ist. Im öffentlichen Bereich müssen die kurzen Standzeiten genutzt werden, um genügend Energie für die Zwischenladung aufzunehmen, wodurch eine Lastverlagerung aus Kundensicht nicht sinnvoll ist. Ähnlich zur Lastverlagerung ist die Rückspeisung zu beurteilen, also die Einspeisung von der in der Batterie des Fahrzeugs gespeicherten Energie in das Stromnetz zur Glättung der Netzlast. So ist für die Rückspeisung ebenfalls

Ladeinfrastruktur	Wo wird geladen?	Wann wird geladen?	Warum wird geladen?	Wie kann geladen werden?		
				Ladetechnologie	Anschlussart	Abrechnung
Privat	<ul style="list-style-type: none"> – Daheim – Garage oder Stellplatz 	<ul style="list-style-type: none"> – Über Nacht 	<ul style="list-style-type: none"> – Reguläres Laden 	<ul style="list-style-type: none"> – Überwiegend induktiv – Haushaltssteckdose mit 3,7 kW – Dreiphasiger Anschluss bis 22,2 kW 	Gesteuert (auch Rückspeisung)	Nein
Halböffentlich	<ul style="list-style-type: none"> – Zugangsbeschränkt – Arbeitsplatz – Parkgarage 	<ul style="list-style-type: none"> – Lang am Tag 			Abhängig vom Anwendungsfall	
Öffentlich	<ul style="list-style-type: none"> – Städtischer Bereich – An Schnellstraßen 	<ul style="list-style-type: none"> – Kurz am Tag 	<ul style="list-style-type: none"> – Zwischenladung – Reichweitenverlängerung 	<ul style="list-style-type: none"> – Induktiv mit 3,7 kW 	Ungesteuert	Ja (evtl. nur Authentifizierung)

Tabelle 2.2 – Technisch sinnvolle Ladeinfrastrukturausprägungen.

eine lange Standzeit von Vorteil, damit Ladung und Rückspeisung so eingeplant werden können, dass am Ende der Parkzeit das Fahrzeug dennoch geladen ist. Außerdem sind aus einer Gesamtwirkungsgradbetrachtung der Ladung und anschließenden Rückspeisung hohe Wirkungsgrade sowohl der Beladung als auch der Rückspeisung gewünscht, was insbesondere bei Anschlüssen niedriger Leistung gegeben ist. Hohe Anschlussleistungen gehen typischerweise mit niedrigeren Wirkungsgraden einher und induktiv lässt sich die Rückspeisung nur sehr schwierig realisieren. Im halböffentlichen Raum hängt die verwendete Anschlussart stark vom Anwendungsfall ab.

Je nach Standort muss die konsumierte Energie zudem gesondert abgerechnet werden. Im häuslichen Bereich wird der Strom bereits über den Hausanschluss in Rechnung gestellt und muss daher nicht gesondert erfasst und abgerechnet werden. In einem zugangsbeschränkten Bereich, wie einem Parkhaus, fallen häufig bereits pauschale oder zeitabhängige Gebühren an und im Verhältnis zum konsumierten Strom sind diese deutlich teurer, wodurch eine detaillierte Abrechnung des Stroms nicht nötig wird bzw. wie im Falle von Betriebsparkplätzen aufgrund des geringen Betrags keine gesonderte Verrechnung stattfindet. Im öffentlichen Bereich muss jedoch generell der Zugang zur Ladeinfrastruktur oder der konsumierte Strom in Rechnung gestellt werden, da sich sonst der Aufbau dieser Infrastruktur nicht lohnen würde. Ob die Abrechnung pro Ladevorgang, nach Standzeit oder pro Kilowattstunde abgerechnet wird, ist abhängig von der Infrastruktur in einem betreffenden Geschäftsmodell zu detaillieren.⁸⁶ Alternativ ist zumindest zu prüfen, ob das Fahrzeug berechtigt ist, an dieser Ladesäule zu laden. Eine Zusammenfassung der sinnvollen technischen Ladeinfrastrukturausprägungen ist in Tabelle 2.2 zu finden.

Je nach regionalen Gegebenheiten und je nach Anwendungsfall werden die Ladeinfrastruktureinrichtungen unterschiedlich auszugestaltet sein. Insbesondere im öffentlichen Bereich

⁸⁶ Siehe auch Kapitel 6.

werden z. B. höhere Anforderungen an die Sicherheit und die Wetterbeständigkeit der Komponenten gestellt. Im halböffentlichen und öffentlichen Bereich können Ladesysteme außerdem so gebaut werden, dass verschiedene Komponenten mehrfach benutzt und damit das System technisch schlanker und ökonomisch effizienter gestaltet werden kann. So können an Ladesäulen mehrere sogenannte Ladepunkte, also Ansteckmöglichkeiten, geschaffen werden, womit das Gehäuse und teilweise die elektrotechnischen Komponenten eingespart werden können. Sind an einem Standort mehrere dieser Säulen aufgebaut, können z. B. auch Abrechnungskomponenten zentralisiert werden, sodass der Nutzer nur an bestimmten Säulen – ähnlich zu einem heutigen Parkscheinautomat – seine Abrechnung und Zahlung vornehmen kann. Ebenfalls können die Lastverlagerung und Rückspeisung sowie deren Einbindung in die heutigen Strom- und Regelenergiemärkte auf Basis mehrerer Fahrzeuge einfacher stattfinden.⁸⁷ In speziellen Einzelfällen kann des Weiteren aus technischer Sicht auch der Einsatz anderer Systeme, wie ein Batterietauschkonzept für einen lokal begrenzten, hinsichtlich der Fahrzeuge bereits standardisierten und hochausgelasteten Markt, z. B. Taxis, Sinn machen. Zahlreiche weitere Vorschläge, wie z. B. Hebesysteme zur Erhöhung des Wirkungsgrades induktiver Ladung, werden diskutiert, jedoch zielen sie meistens auf Einzelfälle ab. Daher werden die technisch gängigen und relativ gut umsetzbaren Ladeinfrastrukturen, wie in Tabelle 2.2 dargestellt, hinsichtlich des Einsatzes und ihrer Wirtschaftlichkeit im Weiteren betrachtet.

2.3 Anforderungen an und Alternativen zur Ladeinfrastruktur

Zur weiteren Bewertung der verschiedenen Ausgestaltungsmöglichkeiten und der sich daraus ergebenden technisch sinnvollen Anwendungsszenarien müssen die Rahmenbedingungen des Ladeinfrastrukturausbaus zunächst konkretisiert werden. Dazu gehören u. a. die Anforderungen der Kunden an die aufzubauende Ladeinfrastruktur, die Einbettung dieser Infrastruktur in den energiewirtschaftlichen Rahmen und die Beurteilung der zur Verfügung stehenden technologischen Alternativen.

2.3.1 Kundenforderungen an Ladeinfrastruktur

Der Großteil der heutigen Tankvorgänge findet in den ersten oder letzten Kilometern der zurückgelegten Strecke statt. Dabei wird meist regelmäßig an einer bekannten und nahe gelegenen Tankstelle getankt, wenn rund drei Viertel des Tankinhalts verbraucht sind.⁸⁸ Diese Bequemlichkeit und das relativ hohe Sicherheitsbedürfnis der Nutzer sind im Grundsatz auch auf

⁸⁷ Vgl. z. B. Guille und Gross (2009, S. 4382 ff.), die einen sog. Aggregator vorschlagen, der die Lasten zunächst untereinander ausgleicht und anschließend Überschuss- und Bedarfsmengen auf den Strom- und Regelenergiemärkten handelt. Im deutschen Regelenergiemarkt sind des Weiteren gewisse Zugangsvoraussetzungen zu erfüllen, die sich über einen Aggregator bzw. einen Fahrzeugpool einfacher erfüllen lassen, siehe hierzu auch Dallinger et al. (2011).

⁸⁸ Siehe z. B. Bunzeck et al. (2010, S. 70), Sperling und Kitamura (1986), Kitamura und Sperling (1987), Lombardo und Behrens (1987) und Greene (1985).

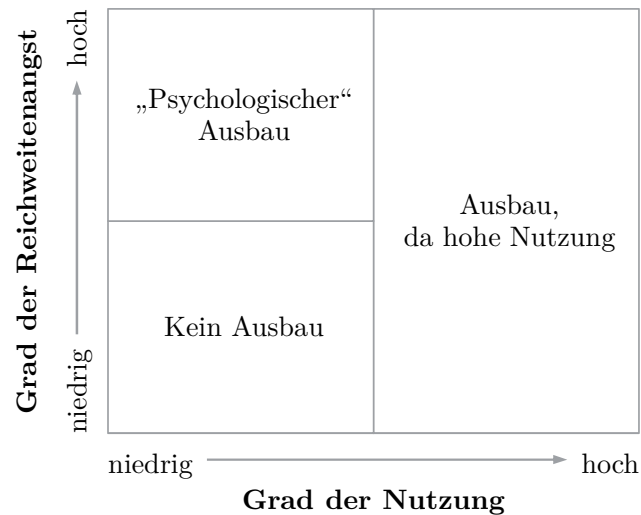


Abbildung 2.5 – Ausbau öffentlicher Infrastruktur nach Wiederer und Philip (2010).

die Elektromobilität zu übertragen. Die Strecke, die mit der im Tank des Verbrennungsmotorfahrzeugs enthaltenen Restmenge noch zurückgelegt werden kann entspricht in etwa 250 km.⁸⁹ Damit verglichen ist die Gesamtreichweite des Elektrofahrzeugs von etwa 150 km relativ klein und die Batterie lässt sich außerdem nicht schnell an regulärer Ladeinfrastruktur aufladen. Zwar ist das Laden eines Elektrofahrzeugs im Regelfall einfacher, da es in der Parkzeit vorgenommen werden kann und zudem im Wesentlichen auf den häuslichen Bereich entfällt und somit kein zusätzlicher Tankstellenbesuch einzuplanen ist.⁹⁰ Andererseits haben die Nutzer aufgrund der geringen Reichweite und der schlechten Zwischenlademöglichkeiten Angst, auf der Strecke liegen zu bleiben, was Tate et al. (2008, S. 3) mit dem Begriff „Range Anxiety“, also Reichweitenangst, beschreiben. Zum Abbau dieser Reichweitenangst wird von vielen daher der Ausbau einer dichten, öffentlichen Ladeinfrastruktur mit Schnelllademöglichkeit als nötig erachtet.⁹¹ In Japan konnte in Pilotversuchen gezeigt werden, dass Schnelllademöglichkeiten die Reichweitenangst der Nutzer reduzierten und nach Installation der Ladestationen deutlich längere Strecken außerhalb der direkten Umgebung zurückgelegt wurden, siehe z. B. Anegawa (2010). Dass es sich aber lediglich um eine unbegründete Angst der Nutzer handelt, zeigt die niedrige Auslastung der öffentlichen Ladestationen in den Pilotprojekten.⁹²

Während Kunden im privaten Bereich davon ausgehen, dass sie mit wenig zusätzlichem Aufwand an den bereits bestehenden Stromanschlüssen laden können, wie z. B. Peters und Dütschke (2010) ermitteln, werden an den öffentlichen Bereich weitergehende Forderungen gestellt. So werden von der hier zu errichtenden Ladeinfrastruktur insbesondere eine hohe Funktionalität, eine gute geografische Verteilung und Verfügbarkeit sowie ein hohes Maß an

⁸⁹ Bei einem 60l-Tank, der noch zu einem Viertel gefüllt ist, und bei einem Verbrauch von 6l/100 km.

⁹⁰ Siehe auch Kurani et al. (1996).

⁹¹ Vgl. z. B. Kurani et al. (1996, S. 139), Kalhammer et al. (2007, S. 139), King (2007, S. 40), May und Mattila (2009, S. 5) oder Botsford und Szczepanek (2009, S. 3).

⁹² Für den Einsatz der DC-Schnellladesäulen in Japan siehe z. B. Botsford und Szczepanek (2009, S. 7) sowie für andere Pilotprojekte z. B. in den 1990er-Jahren Eden et al. (1997) oder Meier-Eisenmann et al. (2001) und heute in London oder Berlin Hoffmann (2010).

Sicherheit erwartet. Wie Hatton et al. (2009, S. 8) beschreiben, gehören dazu schnelle Ladevorgänge, die Kompatibilität zwischen verschiedenen Systemen über definierte Standards, an den Ladesäulen bereitgestellte Ladekabel sowie Sicherheitstechnik, die erst bei angeschlossenem Fahrzeug den Strom schaltet und den Anschluss sichert, solange geladen wird. Dabei sollten die Lademöglichkeiten dort aufgebaut sein, wo gerade geladen werden muss. Im Vordergrund der Infrastruktur in diesen Bereichen steht die Einfachheit, an diesen Orten laden zu können und sich bequem für die nächste Strecke zu rüsten. Für einen zukünftigen Betreiber öffentlicher Infrastruktur ist vor allem deren Nutzungshäufigkeit wichtig. Je nachdem wie groß die Reichweitenangst ist, ergibt sich nach Wiederer und Philip (2010) vereinfachend eine Matrix, in der sich drei Ladeinfrastrukturausbauszenarien ergeben, siehe Abbildung 2.5. Ist die Reichweitenangst niedrig, so würden öffentliche Ladestationen kaum genutzt werden und ein Ausbau ist demnach nicht sinnvoll. Steigt jedoch die Reichweitenangst, so kann der Ausbau öffentlicher Infrastruktur helfen. Bleibt die Infrastrukturnutzung jedoch verhältnismäßig niedrig, wie Pilotprojekte indizieren, so ist ein Ausbau eher unter „psychologischen“ Gesichtspunkten nötig. Eine dünn ausgebaute, aber deutlich erkennbare öffentliche Ladeinfrastruktur zeigt dem Nutzer, im Notfall auf eine Lademöglichkeit zurückgreifen zu können. Diese wird jedoch aufgrund der niedrigen Nutzung nicht dichter ausgebaut. Wird eine häufigere Nutzung erwartet, so macht der Ausbau fernab der Reichweitenangst Sinn. Der Nachfrage nach der richtigen Ladeinfrastruktur an den verschiedenen Standorten wird im Laufe dieser Arbeit weiter Rechnung getragen.

2.3.2 Energiewirtschaftliche Anforderungen und Rollen

Im liberalisierten europäischen Strommarkt und mit der deutschen Umsetzung im Energiewirtschaftsgesetz wurden die Bereiche Erzeugung, Übertragung, Verteilung, Handel und Vertrieb von Strom voneinander getrennt und die einzelnen Funktionen in verschiedenen Rollen abgegrenzt. Die vom Endkunden sichtbaren, jedoch teilweise wieder in einem Vertrag gebündelten Rollen umfassen im Wesentlichen den Verteilnetzbetreiber, den Messstellenbetreiber und Messdienstleister sowie den Stromlieferanten oder Vertrieb. Der Kunde selbst kann dabei als Anschlussnehmer oder nur als Anschlussnutzer auftreten.

Ist die private Infrastruktur am häuslichen Netzanschluss angeschlossen, so wird neben anderen Geräten auch das Elektrofahrzeug an diesem Anschluss mit Strom versorgt. In diesem Fall ergeben sich keine neuen Vertragsverhältnisse und die energiewirtschaftlichen Rollen bleiben bestehen. Im halböffentlichen und öffentlichen Raum können sich jedoch bei der vertraglichen Ausgestaltung für die Ladung an diesem Anschluss neue Rollen ergeben. Wie Warweg et al. (2011) beschreiben, ist ein Ladestellenbetreiber für den Betrieb der halböffentlichen und öffentlichen Infrastruktur einzuführen. Für diesen beschreiben Warweg et al. weiter, dass die Umsetzung als Anschlussnehmer kompliziert ist, da der Fahrer des sich an die Ladestelle anschließenden Elektrofahrzeugs in diesem Fall Anschlussnutzer wäre und bei jedem Ladevorgang das Recht hätte, neue Verträge mit dem Netzbetreiber, dem Messstellenbetreiber und dem Stromlieferanten abzuschließen. Ist der Ladestellenbetreiber jedoch Anschlussnehmer, so

obliegt ihm die Aufgabe, die nötigen Verträge abzuschließen und der Fahrer des Fahrzeugs kann nur noch einen Vertrag mit dem Ladestellenbetreiber abschließen.⁹³

Soll eine Abrechnung erfolgen, ist des Weiteren eine Unterscheidung des Stromlieferanten in die Versorgung der Ladestation und des Fahrzeugs sinnvoll, wie z. B. Link et al. (2010b) beschreiben. Demnach kann in die physische Stromlieferung an der Ladesäule und die Abrechnung ggü. dem Fahrzeughalter differenziert werden. Stromlieferanten für die Ladestelle und das Fahrzeug können zwar ihre Leistungen untereinander verrechnen, treten jedoch ggü. dem Kunden einzeln auf. Dadurch ergeben sich verschiedene unterschiedliche Konstellationen hinsichtlich des Prozessablaufs und der Kommunikation zwischen den verschiedenen Rollen. Fallen Fahrstromlieferant und Ladestellenbetreiber zusammen, vereinfachen sich die Prozesse und in der neu zusammgelegten Rolle entsteht eine Art „Mobilitätsanbieter“. Fallen die beiden Rollen auseinander, so wird eine zentrale Datenbank oder Clearingstelle⁹⁴ benötigt.⁹⁵

Des Weiteren wird im öffentlichen Raum vor dem Hintergrund des freien und kompatiblen Zugangs die Verortung des Zählers und der Abrechnungslogik diskutiert, siehe z. B. Link et al. (2010b). So kann der Zähler in der Ladestation (stationär) oder im Fahrzeug (mobil) eingebaut werden. In einem *stationären* Zählerkonzept ist eine besonders einfach zu realisierende Lösung, die Rollen von Fahrstromlieferant und Ladestellenbetreiber zusammenzulegen, jedoch ist der Nutzer dadurch auf einen Anbieter festgelegt. Fallen Fahrstromlieferant und Ladestellenbetreiber auseinander, so wird für beide Zählervarianten eine Clearingstelle benötigt und der Prozess dadurch komplexer, aber damit auch eine vom Anbieter unabhängige Infrastruktur und eine getrennte Abrechnung des Fahrstroms möglich. In einem *mobilen* Zählerkonzept wird ohne Änderung an den energiewirtschaftlichen Rollen nach wie vor eine Clearingstelle benötigt. Der Prozess kann jedoch dadurch vereinfacht werden, dass die Ladestelle dem Verteilnetz zugeordnet wird und die Abrechnung ausschließlich über das Fahrzeug vorgenommen und daher keine Clearingstelle benötigt wird. Diese Option vernachlässigt jedoch die unterschiedliche Attraktivität von Ladeinfrastruktur an verschiedenen Standorten und die Komplexität einer verursachungsgerechten Zuordnung der Kosten der Ladeinfrastrukturnutzung.

Ladeinfrastruktur muss somit insbesondere im öffentlichen Raum mit einer zentralen Datenhaltung und einer Clearingstelle ausgestattet sein, um kompatibel und für verschiedene Nutzer zugänglich zu sein und eine Abrechnung ohne Geldkarte etc. zu ermöglichen. Die energiewirtschaftliche Einordnung bleibt dabei noch zu klären.

2.3.3 Alternativen zum Ausbau der Ladeinfrastruktur

Zur Reduzierung der Reichweitenangst der Nutzer sind neben dem Ausbau öffentlicher Infrastruktur drei eher fahrzeugseitige Konzepte denkbar, die von einem zusätzlichen Verbrennungsmotor, einer besseren Routenplanung bis hin zu Wechselfahrzeugen reichen.

⁹³ Vgl. für den Abschnitt Warweg et al. (2011, S. 225).

⁹⁴ Eine Clearingstelle wird insbesondere dann benötigt, wenn Nutzer Ladestellen verschiedener Anbieter nutzen wollen/müssen. Sie ist ähnlich zu dem im internationalen Mobilfunkgeschäft verwendeten Begriff des „Roaming“.

⁹⁵ Vgl. für den Abschnitt Link et al. (2010b, S. 104 ff.).

2.3.3.1 Range Extender

In der Diskussion zur Reichweitenangst erwähnen bereits Tate et al. (2008) die Möglichkeit, anstatt eine dichte Schnellladeinfrastruktur aufzubauen, Hybridfahrzeuge einzusetzen, deren mitgeführter Verbrennungsmotor eine längere Reichweite ermöglicht und auf den zurückgegriffen werden kann, wenn man mit einem reinen Elektrofahrzeug und bei nicht verfügbarer Ladeinfrastruktur liegen geblieben wäre. Der Verbrennungsmotor in einem solchen Hybridfahrzeug wird als „Range Extender“ und das Fahrzeugkonzept als Plug-in-Hybridfahrzeug (PHEV) bezeichnet.⁹⁶ Während die oben diskutierten Infrastrukturmaßnahmen zum Teil schwer umzusetzen sind, sind die ersten PHEVs von einzelnen, größeren Automobilherstellern bereits kurzfristig erhältlich.⁹⁷ Aus Kundensicht vereinen PHEVs mehrere Vorteile: (i) auf Basis des internen Verbrennungsmotors können Nutzer längere Strecken zurücklegen und müssen nicht fürchten liegen zu bleiben, (ii) PHEVs können die ersten Kilometer vollelektrisch zurücklegen und erreichen somit hohe elektrische Fahranteile und (iii) lassen sich des Weiteren PHEVs mit vergleichsweise kleinen Batterien ausstatten, wodurch die häufigen, kurzen Strecken vollelektrisch und die seltenen, längeren Strecken dann mittels des Range Extenders zurückgelegt werden können. Jedoch sind PHEVs aufgrund der zwei Antriebe technisch aufwendiger und die Leistungsanforderungen insb. im Oberklassebereich vollelektrisch kaum zu erfüllen.

2.3.3.2 Routenplanung

Eine weitere Alternative zu einer dichten Ladeinfrastruktur ist, die zurückzulegende Strecke so zu planen, dass keine Zwischenladung benötigt wird. Dies ist zwar nur begrenzt möglich, da sich auch durch Planung deutlich längere Strecken nicht zurücklegen lassen, jedoch kann eine energiesparendere Route die Reichweite zusätzlich erhöhen.⁹⁸ So können z. B. energieintensive bergige Strecken umfahren oder Schnellstraßen gemieden werden. Gibt es nur wenige Lademöglichkeiten auf der Strecke, können diese in der Routenplanung mit berücksichtigt und so terminiert werden, dass die Strecke mit möglichst wenig Stopps und nutzerfreundlich zurückgelegt werden kann. Für diese Routenplanung sind neben den Informationen zu Start- und Zielort sowie gegebenen Strecken, Informationen über die topografischen Bedingungen auf der Route wie auch die zur Verfügung stehenden Ladeinfrastrukturen nötig. So ließen sich bestimmte Ladepunkte bereits vorab reservieren bzw. über eine Echtzeitanbindung der Routenplanung könnten Informationen über die Belegung der Ladeinfrastruktur in die Planung mit einfließen.

⁹⁶ Ein Plug-in-Hybridfahrzeug, oder englisch plug-in hybrid vehicle (PHEV), ist ein Hybridfahrzeug mit zwei Antriebssystemen aus Elektromotor/Batterie und Verbrennungsmotor, wobei die Batterie über das Stromnetz geladen werden kann und aufgrund des Fahrzeugaufbaus und der Batteriedimensionierung vollelektrische Fahrten zurückgelegt werden können. Ist die Batterie entladen, kann auf den Verbrennungsmotor, den sog. Range Extender, zurückgegriffen werden. Für eine detailliertere Beschreibung der verschiedenen Fahrzeugkonzepte sei auf Abschnitt 3.3 verwiesen.

⁹⁷ Vgl. z. B. Chevrolet Volt/Opel Ampera, Toyota Prius PHV oder VW Golf TwinDrive.

⁹⁸ Vgl. u. a. Gong et al. (2008).

2.3.3.3 Wechselfahrzeuge

Neben einer dichteren Ladeinfrastruktur, dem Einsatz eines PHEVs und verbesserter Routenplanung bietet ein Alternativfahrzeug eine weitere Möglichkeit, längere Strecken zurücklegen zu können.⁹⁹ Dies ist vor allem in Mehrfahrzeughalten oder Flotten möglich, in denen Elektrofahrzeuge und ICEs betrieben werden. Je nach Fahrt lässt sich das richtige Fahrzeug auswählen. Dabei können Elektrofahrzeuge aufgrund der niedrigen Betriebskosten für die häufigen kürzeren Strecken und ICEs für die seltenen, längeren Fahrten eingesetzt werden. Besteht keine Möglichkeit, auf ein verbrennungsmotorbetriebenes Flottenfahrzeug oder einen Zweitwagen zurückgreifen zu können, z. B. in einem Haushalt mit nur einem Fahrzeug, kann für die längere Strecke ein Mietwagen genutzt werden oder der Verkäufer des Elektrofahrzeugs für diesen Anlass ein Fahrzeug mit längerer Reichweite zur Verfügung stellen. Für das Wechselfahrzeugkonzept ist jedoch wichtig, eine hohe Auslastung des eigentlichen Fahrzeugs zu gewährleisten, das ohne die längeren Strecken auf eine niedrigere Gesamtjahreslaufleistung kommt.

2.3.4 Rahmenbedingungen der Ladeinfrastrukturbewertung

Die in diesem Kapitel vorgestellten technischen Möglichkeiten zur Ladung von Elektrofahrzeugen sind, wie gezeigt, nicht nur einzeln für sich zu bewerten, sondern müssen den Kundenanforderungen, den energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen und den möglichen Alternativen gegenüber gestellt werden. Aus Praktikabilität kann ein Großteil des Ladevorgangs zwar im häuslichen Bereich und ggf. beim Arbeitgeber durchgeführt werden¹⁰⁰, jedoch wünscht sich der Nutzer als Ergänzung ein dichtes Netz öffentlicher Ladeinfrastruktur mit Schnelllademöglichkeit, auf die er im Notfall zurückgreifen kann. Diese Infrastruktur wird auf Basis der bisherigen Erkenntnis aus den Pilotprojekten jedoch wenig genutzt, ist zudem energiewirtschaftlich kompliziert umzusetzen und über Alternativen, wie z. B. dem Einsatz von PHEVs, ebenfalls zu adressieren. Daher werden die in Tabelle 2.2 dargestellten attraktiven technologischen Ausgestaltungsmöglichkeiten der Ladeinfrastruktur im Folgenden ökonomisch bewertet, auf dessen Grundlage in Kapitel 4 und 5 zusammen mit dem Nutzerverhalten aus Kapitel 3 eine attraktive Ladeinfrastruktur bestimmt wird.

2.4 Ökonomische Bewertung der Ladeinfrastruktur

Jene Ladeinfrastrukturen, die sich als technisch attraktiv herausgebildet haben, werden nun einer ökonomischen Bewertung unterzogen. Dabei stellt sich zunächst die Frage, ob der Aufbau einer Ladeinfrastruktur vergleichbar zu anderen Infrastrukturinvestitionen, wie z. B. Autobahnen, Abwassersystemen oder Stromübertragungsnetzen, durch hohe Entwicklungskosten und lange Lebenszeiten (häufig 60–80 Jahre) gekennzeichnet ist. Aufgrund der dadurch entstehen-

⁹⁹ Außerdem ist die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel möglich, die jedoch nicht weiter betrachtet wird.

¹⁰⁰ Siehe auch Kurani et al. (1996).

Technologie	Standort	Anschlussleistung	Anschlussart	Abrechnung	Szenario
Konduktiv	Privat	3,7 kW	Ungesteuert	Nein	K 1
		11,1–22,2 kW			K 2
	Halböffentlich	11,1–22,2 kW	Gesteuert		K 3
		11,1–22,2 kW			K 4
	Öffentlich	11,1–22,2 kW	Ungesteuert	Ja	K 5
		43,6 kW			K 6
		100 kW (DC)			K 7
Induktiv	Privat	3,7 kW	Ungesteuert	Nein	I 1
		11,1 kW			I 2
	Halböffentlich	3,7 kW	Gesteuert		I 3
		11,1 kW			I 4
	Öffentlich	3,7 kW	Ungesteuert	Ja	I 5
		11,1 kW			I 6

Tabelle 2.3 – Ladeinfrastrukturszenarien zur ökonomischen Bewertung.

den langen Finanzierungszeiträume wird diese Form der Infrastruktur häufig durch den Staat finanziert und betrieben.¹⁰¹ Auch für den Aufbau der hier betrachteten Ladeinfrastruktur wird teils die Forderung nach einer öffentlichen Finanzierung und ggf. sogar des staatlichen Betriebs der Ladeinfrastruktur laut. Jedoch erfüllt die Ladeinfrastruktur die genannten Kriterien zur staatlichen Finanzierung nicht oder nur schwach, so ist der Aufbau von Ladeinfrastruktur, bezogen auf die einzelne Ladestation, nicht mit hohen Entwicklungskosten verbunden und die Lebensdauern der Infrastruktur im Zeitrahmen von Fahrzeugen mit 10–15 Jahren eher niedrig. Die Angst eines neu entstehenden Monopols öffentlicher Ladeinfrastruktur ist mit einheitlichen Standards und gegebenen Zugangsmöglichkeiten sowie im Zweifelsfall regulativ zu unterbinden. Dadurch reduziert sich das ökonomische Problem auf die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Ladestation. Dazu werden im Folgenden die Kosten der verschiedenen Ladeinfrastrukturkonzepte zusammengestellt und diese über die an den jeweiligen Ladesäulen zu erwartende Auslastung den einzelnen Fahrzeugen bzw. dem konsumierten Strom zugerechnet.

2.4.1 Detaillierte Infrastrukturszenarien

Die Bewertung der technisch zu betrachtenden Ladeinfrastrukturen geschieht anhand von Szenarien, die sich an den jeweiligen Standorten in ihrer technischen Konfiguration unterscheiden. So werden sowohl die konduktive als auch die induktive Technologie in den drei Standorten bewertet. Für die konduktive Technologie kann davon ausgegangen werden, dass

¹⁰¹ Vgl. auch Gramlich (1994, S. 1177 ff.), Buhr (2003, S. 9), Conrad und Seitz (1994, S. 304) oder Mackay-Fisher (2010).

im privaten Bereich der reguläre Hausanschluss mit 3,7 kW Anschlussleistung ohne Ladesteuerung und ohne Abrechnung vorherrschen wird (Szenario K 1), wobei in einem weiteren Szenario auch höhere Anschlussleistungen von bis zu 22,2 kW mit Anschlusssteuerung, aber nach wie vor ohne Abrechnung (K 2) möglich sind. Im halböffentlichen Raum ist eine mittlere Anschlussleistung von 11,1–22,2 kW realistisch, die aufgrund der längeren Standzeiten hier auch gesteuert erfolgen und entweder nicht abgerechnet (K 3) oder abgerechnet werden kann (K 4). Im öffentlichen Bereich ist aufgrund der kürzeren Standzeiten eine Ladesteuerung nicht sinnvoll. Die Beladung wird jedoch abgerechnet und unterscheidet sich im Wesentlichen durch das größere Spektrum der möglichen Anschlussleistungen mit 11,1–22,2 kW (K 5), einem Hochleistungswechselstromanschluss mit 43,6 kW (K 6) und einem Gleichstromhochleistungsanschluss von bis zu 100 kW (K 7). Das induktive Laden kann in jedem Standort mit 3,7 oder 11,1 kW vorgenommen werden. Im privaten Bereich erfolgt, wie im konduktiven Fall, keine Abrechnung, die reguläre Ladung bleibt ungesteuert (Szenario I 1), ist jedoch auch gesteuert denkbar (I 2). Die induktive Ladung im halböffentlichen Raum erfolgt aufgrund der längeren Standzeiten am Tag gesteuert und ist ohne (I 3) und mit Abrechnung (I 4) möglich. Im öffentlichen Raum wird, wie im konduktiven Fall, nicht gesteuert, jedoch abgerechnet und es lässt sich in die beiden Anschlussleistungen 3,7 kW (I 5) und 11,1 kW (I 6) unterscheiden. Die Szenarien sind noch einmal in Tabelle 2.3 zusammenfassend dargestellt.

2.4.2 Anschaffungsausgaben und Betriebskosten

Die Kostenbestimmung ist für diese Ladeinfrastrukturszenarien aufgrund des bisherigen Nischenmarkts und der geringen Volumina schwierig. Für die weitere Analyse ist eine Abschätzung der anfallenden Kosten jedoch ausreichend. Einige Hersteller bieten bereits Prototypen an und verschiedene Studien ermitteln des Weiteren mögliche Kostenbereiche für unterschiedliche Ladeinfrastruktur und Anwendungsbereiche. Daher werden die für die verschiedenen Einsatzgebiete veröffentlichten Kosten den oben vorgestellten Ladeinfrastrukturszenarien zugeordnet und anschließend durch eine komponentenbasierte Herangehensweise fundiert. Die meisten Studien geben dabei ausschließlich Anschaffungsausgaben an ggf. noch Inbetriebnahmekosten, jedoch meistens keine laufenden Kosten. Die Betriebskosten können jedoch über die Laufzeit ebenfalls einen deutlichen Anteil an den Gesamtkosten annehmen und sind daher nicht zu vernachlässigen. Für die Berechnung der Gesamtkosten werden neben den in Abschnitt 2.2.5 vorgestellten Komponenten, sowohl die Montage- und Baukosten als auch die Betriebskosten, wie eine etwaige Stellplatzmiete, Wartungskosten, Kommunikationskosten sowie die für die Messung entstehenden Kosten mit einbezogen. Für das induktive Ladesystem sind des Weiteren die Komponenten auf der Fahrzeugseite mit einzurechnen. Im Folgenden werden zunächst die Kosten für ein konduktives und anschließend für ein induktives.

Studien	Konduktive Infrastrukturkosten (in €) ^a					
	K 1	K 2	K 3	K 4	K 5 und K 6	K 7
Electric Power Research Inst. ^b	0–150	750	/	/	/	/
Element Energy ^c	60	/	2.900	/	2.900–6.400	50.000–90.000
McKinsey & Company ^d	0–500	/	1.600–2.700	2.200–4.500	3.300–5.500	> 65.000
Nat. Plattform Elektromobil. ^e	/	/	/	/	4.550–8.820	/
Plan NYC ^f	/	1.100–1.500	1.500–2.500	2.200–4.400	3.300–5.600	> 30.000
Transport for London ^g	0–1.100	/	1.500	4.000–8.200	9.000–11.000	/
U. S. Department of Energy ^h	150–600	400–1.500	1.100–1.800	/	/	/
Gesamtheitlich	0–1.100	400–1.500	1.100–2.900	2.200–8.200	2.900–11.000	30.000–90.000
Diese Arbeit	150–350	350–800	1.000–2.600	1.500–3.600	2.800–15.250 ⁱ	25.950–48.500

^a Umrechnungen in € auf Basis der folgenden Wechselkurse 1 US\$ = 0,74 € und 1 GBP = 1,15 €.

^b Vgl. Duvall (2002, S. 2-26).

^c Vgl. Slater et al. (2009, S. 62).

^d Vgl. Malorny und Krieger (2010, S. 28).

^e Vgl. NPE (2011).

^f Vgl. Mayor's Office of Long-Term Planning and Sustainability (2010, S. 15).

^g Vgl. Transport for London (2010a, S. 18).

^h Vgl. Morrow et al. (2008, S. 31).

ⁱ Breiterer Anschlussleistungsbereich, wodurch die obere Kostengrenze über den Angaben aus den Studien liegt.

Tabelle 2.4 – Konduktive Ladeinfrastrukturkosten im Vergleich verschiedener Studien.

2.4.2.1 Konduktive Systeme

Für konduktive Ladesysteme werden in verschiedenen Studien bereits Angaben zu möglichen Kosten gemacht oder können durch Herstellerangaben, wie z. B. von May und Mattila (2009, S. 17) zusammengefasst, unterlegt werden. Eine Herausforderung ist dabei jedoch, die verschiedenen Angaben mit der richtigen technischen Infrastrukturausgestaltung zu vergleichen und den oben gegebenen Ladeinfrastrukturszenarien zuzuordnen. Eine solche Aufstellung ist in Tabelle 2.4 dargestellt. Dabei stellt die vorletzte Zeile die Angaben aller Studien konsolidiert dar.

Um die Kosten der Infrastruktur im Detail zu bestimmen, sind die Anschaffungsausgaben $I^{\text{In.Pr}}$ – Infrastrukturhardware, Kommunikationshardware, Abrechnungshardware, Leistungselektronik, Ladekabel mit Stecker, Montage-/Baukosten – sowie die Betriebskosten c^{In} – Stellplatzmiete, Wartungskosten, Kommunikationskosten und Kosten für die Messung – genauer zu bestimmen. Eine zusammenfassende Darstellung ist in Tabelle 2.5 zu finden.

Infrastrukturhardware – Die Kosten für Infrastrukturhardware entstehen für die elektrotechnischen Komponenten, das Gehäuse samt baulicher Trennung und Kennzeichnung sowie einem etwaigen Schutz gegen Witterungseinflüsse und Vandalismus. Im privaten Bereich sind diese Kosten verhältnismäßig niedrig und fallen hauptsächlich für die elektrotechnischen Komponenten an, das Gehäuse kann entweder entfallen oder nur sehr einfach ausgeführt werden, da aufgrund des Aufbaus in der Garage oder am Stellplatz aufwendigere Sicherungsmaßnahmen nicht nötig sind. Im halböffentlichen Bereich

Komponenten		Konduktive Infrastrukturkosten (in € sowie €/a)						
		K 1	K 2	K 3	K 4	K 5	K 6	K 7
Anschaff.-ausg. $I_{In,pr}$	Infrastrukturhardware	50–100	100–300	500–1.000	500–1.000	1.000–4.000	2.000–8.000	8.000–16.000
	Kommunikationshardw.	/	50–100	200–1.000	200–1.000	200–1.000	200–1.000	200–1.000
	Abrechnungshardware	/	/	/	500–1.000 ^a	500–1.000	500–1.000	500–1.000
	Leistungselektronik	/	/	/	/	/	/	15.000–20.000
	Ladekabel mit Stecker	50	100	100	100	100–250	100–250	250–500
	Montage-/Baukosten ^b	50–200	100–300	200–500	200–500	1.000–5.000	1.000–5.000	2.000–10.000
Betriebsk. c_{In}	Stellplatzmiete	/	/	/	/	300–1.200	300–1.200	300–1.200
	Wartungskosten	5–15	13–50	40–210	65–310	90–625	140–1.025	1.198–3.850
	Kommunikationskosten	/	/ ^c	60–120	60–120	60–120	60–120	60–120
	Messung	/	/	/	250–500	250–500	250–500	250–500

^a Einrichtung für mehrere Ladepunkte; z. B. durch Aufrüstung von Parkscheinautomaten oder Aufbau einer neuen Abrechnungseinheit mit Bedienpanel und Belegdrucker.

^b Inkl. Anschluss zum Verteilnetz falls nötig sowie Ausweisung des Parkplatzes für ein Elektromobil.

^c Häuslich bereitgestellt.

Tabelle 2.5 – Kosten des konduktiven Ladesystems auf Basis von Einzelkomponenten.

werden einfache bauliche Abgrenzungen notwendig, die ggf. eine Mast- oder Bodeninstallation nötig machen. Im öffentlichen Bereich werden die Kosten zudem durch die Anforderungen an Witterungs- und Vandalismusbeständigkeit getrieben und es werden durch die höheren Anschlussleistungen weitere Sicherungsmaßnahmen nötig, die eine andere Dimensionierung der Säule und deren bauliche Kennzeichnung betreffen.

Kommunikationshardware – Die Kommunikationshardware ist im Wesentlichen für die Authentifizierung und den Datenaustausch über Ladestand und Energiebedarf nötig. Die Kosten entfallen dabei auf die Sender und Empfänger sowie die zur Verarbeitung nötige Recheneinheit. Im ungesteuerten privaten Fall kann die Kommunikationshardware entfallen. Soll im privaten Bereich gesteuert geladen werden, so ist dies im Wesentlichen durch die Kommunikation über den Smart Meter möglich; auf eine Authentifizierung und eine zentrale Datenverarbeitung kann hier verzichtet werden. Im halböffentlichen und öffentlichen Bereich ist die Kommunikationstechnologie ein wenig aufwendiger, um eine Authentifizierung sowie eine gesicherte Datenübertragung zu realisieren. Um ggf. eine Kommunikation mit einer zentralen Recheneinheit zu ermöglichen, ist der Anschluss über eine Datenanbindung nötig, die an diesen Standorten bisher häufig noch nicht existiert.

Abrechnungshardware – Abrechnungshardware wird nur in den Infrastrukturszenarien notwendig, in denen eine Abrechnung stattfinden soll (K 4–7). Im privaten Bereich und an einem nicht abgerechneten halböffentlichen Anschluss wird der konsumierte Strom über den dort zur Verfügung stehenden Anschluss abgerechnet und keine gezielte Ausweisung des für die Fahrzeugladung konsumierten Stroms vorgenommen. Soll im halböffentlichen Bereich oder im öffentlichen Raum eine Abrechnung stattfinden, so sind dazu

Zähler sowie eine Authentifizierungs- und Zahlungsschnittstelle notwendig. Je nach Umsetzung werden des Weiteren Bedienpanele und Belegdrucker benötigt. Darüber hinaus ist es denkbar, einen Teil der Hardware für mehrere Ladepunkte auszulegen oder bereits bestehende Hardware, wie z. B. Parkscheinautomaten, um eine weitere Funktion zu ergänzen.

Leistungselektronik – Bei Wechselstromanschlüssen ist die Leistungselektronik im Fahrzeug (On-board-Ladeinheit) untergebracht und meistens für mehrere Leistungsbereiche ausgelegt, sodass Anschlussleistungen von bis zu 22,2 kW kein Problem darstellen. Höhere Anschlussleistungen erfordern mehr Leistungselektronik im Fahrzeug, die Bauraum wegnimmt und zum Gesamtgewicht beiträgt. Etwaige Mehrkosten für einen 43,6 kW-Anschluss wurden nicht der Ladeinfrastruktur zugerechnet, dennoch sollte berücksichtigt werden, dass für diese Beladung auch eine dementsprechende Leistungselektronik auf Fahrzeugseite vorzuhalten ist. Für einen Gleichstromanschluss ist die Leistungselektronik in der Säule unterzubringen. Für Anschlussleistungen von 100 kW sind für Leistungselektronik etwa 15.000 bis 20.000 € anzusetzen.¹⁰² Auf die Einbeziehung ggf. weiterer benötigter Komponenten, wie z. B. Batterien zur nachfrageseitigen Lastglättung, wurde verzichtet.¹⁰³ Damit werden die Kosten für Szenario K 7 eher unterschätzt.

Ladekabel mit Stecker – Die Kosten für Ladekabel und Stecker hängen vom Standort und den zur Verfügung gestellten Anschlussleistungen ab. Dabei werden die Kosten durch den Kabelquerschnitt, die Anforderungen an die Steckersicherheit und die Ausführung des Steckers getrieben. Die Standardisierungsvorschläge fordern des Weiteren nicht nur ein gewisses Steckerdesign, sondern auch dass das Ladekabel und der Stecker gewissen Belastungen standhalten, wie z. B. das Überfahren mit dem Fahrzeug.¹⁰⁴ Daher sind die Stecker im öffentlichen Bereich aufwendiger auszugestalten, z. B. als aufwendige Keramikkugelsstecker.

Montage-/Baukosten – Die Montage- und Baukosten sind stark abhängig vom Standort, in dem die Ladeinfrastruktur aufgebaut werden soll. Im privaten und halböffentlichen Bereich müssen vielfach keine Anschlüsse mehr gelegt werden, wodurch sich auf den Aufbau der Steckereinheit und den Anschluss ans Stromnetz konzentriert werden kann. Im öffentlichen Bereich ist der mögliche Kostenbereich deutlich größer und es muss mit Mehrkosten durch Fundamentierung und Legen eines Anschlusses gerechnet werden. Wird z. B. auf dem Marktplatz eine Säule errichtet, so muss neben dem Legen eines Anschlusses der Platz wieder instand gesetzt werden.

Stellplatzmiete – Neben den einmaligen Kosten sind laufende Aufwände zu tragen. Im

¹⁰² Siehe Meinhardt et al. (2007, S. 81), die für die Kosten von Leistungselektronik eine Faustformel von 0,15–0,20 €/W angeben.

¹⁰³ Die an diesen Ladestationen benötigten Batterien müssten eine Mindestkapazität von etwa 50 kWh haben. Damit wären den Gesamtkosten nochmals deutlich mehr als 10.000 € hinzuzurechnen.

¹⁰⁴ Vgl. VDE (2008, S. 19 ff.).

öffentlichen Bereich ist so ggf. eine Stellplatzmiete abzuführen. Bei einem Normstellplatz¹⁰⁵ von 12,5 m² und Monatsmieten von 2–8 €/m² ergeben sich laufende jährliche Kosten von 300–1.200 €/a.

Wartungskosten – Die jährlichen Wartungskosten ergeben sich in Abhängigkeit der Hardwarekosten (Infrastrukturhardware, Kommunikationshardware, Abrechnungshardware, Leistungselektronik, Ladekabel mit Stecker) zu etwa 5–10 %.

Kommunikationskosten – Für die Kommunikation im halböffentlichen und öffentlichen Raum fallen laufende Kosten an, die sich monatlich auf 5–10 € belaufen können und sich auf 60–120 €/a summieren. Im privaten Bereich kann auf die im häuslichen Bereich existierende Kommunikationseinrichtung zurückgegriffen werden und damit ist mit keinen zusätzlichen Kosten zu rechnen.

Messung – Soll abgerechnet werden, sind für den Betrieb der Messstelle pro Jahr etwa 250–500 €/a abzuführen.

Mit zunehmend verkaufter Infrastruktur sind für manche Komponenten Kostenreduktionen zu erwarten. Da es sich jedoch nicht um eine neue Technologie handelt, sind die Reduktionshebel insbesondere durch Skalen und nicht durch technologischen Fortschritt gegeben. Des Weiteren sind manche Kosten, wie z. B. die Baukosten aufgrund des jeweiligen Einzelfalls am Standort, nicht deutlich zu reduzieren. Alternative Konzepte gehen daher stärker in die Richtung, Teile andere bereits bestehender Einrichtungen zu nutzen, wie beispielsweise die Integration der Abrechnung in den Parkscheinautomaten. Zur Reduktion der Kosten wird des Weiteren das Erschließen von Zusatzumsätzen, wie z. B. von Werbeflächen diskutiert. Einen Überblick über mögliche zusätzliche Einnahmequellen geben u. a. May und Mattila (2009, S. 9). Das Potenzial dieser Zusatzumsätze ist jedoch auf einzelne Standorte beschränkt und ggf. sogar mit weiterem Aufwand verbunden. Die Summe der Anschaffungsausgaben liegt im Bereich der Studienergebnisse, siehe die beiden vorletzten Zeilen aus Tabelle 2.4 auf Seite 32.

2.4.2.2 Induktive Systeme¹⁰⁶

Die Anschaffungsausgaben für ein stationäres induktives Übertragungssystem mit 3,7 kW Anschlussleistung inklusive Installation bewegen sich laut Herstellerangaben zwischen 3.500 € und 18.000 €. ¹⁰⁷ Aufgrund dieser Spanne werden, wie auch im konduktiven Fall, die Kosten für ein induktives Ladesystem auf Komponentenbasis entwickelt. Des Weiteren sind in die Bewertung der Ladeinfrastruktur und für den Vergleich zur konduktiven Ladung die zusätzlich benötigten Komponenten auf Fahrzeugseite miteinzubeziehen. Zunächst wird jedoch

¹⁰⁵ Siehe Forschungsgesellschaft für Straßen- u. Verkehrswesen (2005, S. 33).

¹⁰⁶ Die folgenden Betrachtungen gehen vom einfachsten Fall für ein induktives Ladesystem aus, der stationären Ladung ohne mechanische Nachführung. Dabei basiert der Abschnitt im Wesentlichen auf Schraven, Kley und Wietschel (2011).

¹⁰⁷ So nennen SEW 12.000–18.000 €, IAV etwa 12.000 € und Wampfler Kosten von 3.500–10.000 € für das induktive Übertragungssystem, vgl. auch Schraven, Kley und Wietschel (2011).

Komponenten		Induktive Infrastrukturkosten (primär, in € sowie €/a)					
		I1	I2	I3	I4	I5	I6
Anschaff.-ausg. $I^{\text{In,pr}}$	Infrastrukturhardware	50–100	50–100	500–1.000	500–1.000	500–1.000	500–1.000
	Kommunikationshardware	500–1.000	1.000–2.000	1.000–2.000	1.000–2.000	1.000–2.000	1.000–2.000
	Abrechnungshardware	/	/	/	500–1.000	500–1.000	500–1.000
	Leistungselektronik	1.000–1.500	1.500–2.000	1.000–1.500	1.500–2.000	1.000–1.500	1.500–2.000
	Spulensystem	500–1.000	1.000–1.500	500–1.000	1.000–1.500	500–1.000	1.000–1.500
	Montage-/Baukosten	200–1.000	200–1.000	1.500–2.000	1.500–2.000	1.500–2.000	1.500–2.000
Betriebsk. c^{In}	Stellplatzmiete	/	/	/	/	300–1.200	300–1.200
	Wartungskosten	103–360	178–560	150–550	225–750	175–650	225–750
	Kommunikationskosten	/	/	60–120	60–120	60–120	60–120
	Messung	/	/	/	250–500	250–500	250–500

Tabelle 2.6 – Kosten des induktiven Ladesystems auf Infrastrukturseite (primär).

das induktive Ladesystem über die benötigten Komponenten bewertet. Es sind die gleichen Kosteneinflüsse zu betrachten, die sich jedoch zum Teil aufgrund der unterschiedlichen technologischen und baulichen Ausprägung vom induktiven Ladesystem unterscheiden. Das bei der induktiven Ladung benötigte Ladekabel ist im induktiven Fall durch ein Spulensystem zu ersetzen, über das die Energieübertragung ermöglicht wird. Im Einzelnen sind die Anschaffungsausgaben $I^{\text{In,pr}}$ – Infrastrukturhardware, Kommunikationshardware, Abrechnungshardware, Leistungselektronik, Spulensystem und Montage-/Baukosten – zu betrachten. Die Betriebskosten c^{In} sind vergleichbar mit den Annahmen zum induktiven Ladesystem zu bewerten. Die Kostenannahmen zur induktiven Ladeinfrastruktur sind zusammenfassend in Tabelle 2.6 dargestellt.

Infrastrukturhardware – Wie bei der kabelgebundenen Ladung werden ebenfalls elektrotechnische Komponenten benötigt, jedoch ist kein Gehäuse zu installieren. Im privaten Bereich kann die induktive Ladung relativ einfach über eine auf den Boden aufgelegte Ladeplatte erfolgen, in der das Spulensystem untergebracht ist. Im halböffentlichen und öffentlichen Bereich ist das Spulensystem jedoch im Boden einzulassen und eine Kennzeichnung eines solchen Ladeplatzes notwendig, wodurch Mehrkosten entstehen. Im Vergleich zum induktiven Ladesystem kann der Kostenanstieg jedoch in Grenzen gehalten werden, da keine zusätzlichen Maßnahmen gegen Witterungseinflüsse und Vandalismus vorzunehmen sind.

Kommunikationshardware – Anders als im induktiven Fall kann nicht gänzlich auf eine Kommunikationshardware verzichtet werden, da der Ladevorgang nicht über das Einstecken an der Ladestation gestartet wird, sondern zunächst das Fahrzeug über dem Parkplatz erkannt werden muss und anschließend eine Ladung in den fahrzeugverträglichen Leistungsbereichen vorgenommen wird. Sowohl in den Szenarien, in denen eine Ladungssteuerung vorgenommen werden soll, als auch im öffentlichen Bereich ist eine aufwendigere Kommunikation für eine Authentifizierung und gesicherte Datenübertra-

gung nötig. Im privaten ungesteuerten Fall kann die Kommunikationshardware somit einfacher als bei den anderen Ladeszenarien ausfallen.

Abrechnungshardware – Für die Abrechnungshardware wurden vergleichbare Kosten wie im konduktiven Fall angenommen.

Leistungselektronik – Bei der induktiven Energieübertragung muss die Spannung auf höhere Frequenzen transformiert werden, wodurch Leistungselektronik benötigt wird. So wird die Netzspannung bei einer mittleren Frequenz von 50 Hz zuerst gleichgerichtet, die entstehende Gleichspannung anschließend in einem Wechselrichter auf eine höherfrequente (20–150 kHz) Wechselspannung transformiert und der primärseitigen Spule zugeführt. Hier muss des Weiteren eine Blindleistungskompensation mittels einer Schwingkreisordnung erfolgen. Die dabei benötigte Hardware ist gemäß unterschiedlicher Anschlussleistungen auszulegen. Für Anschlussleistungen von 3,7 kW können 1.000–1.500 € und für 11,1 kW 1.500–2.000 € angenommen werden.

Spulensystem – Zur Energieübertragung über den Luftspalt erzeugt das hochfrequent wechselnde Magnetfeld der Primärspule wiederum eine Spannung in der Sekundärspule. Die Anforderungen an Spulengröße und -dimensionierung hängen dabei im Wesentlichen von der Anschlussleistung ab, sodass für einen 3,7 kW-Anschluss Kosten von ca. 500–1.000 € entstehen und für die höhere Anschlussleistung von 11,1 kW Kosten von etwa 1.000–1.500 € anfallen.

Montage-/Baukosten – Die Montage- und Baukosten sind wie im konduktiven Fall abhängig vom Standort. Im privaten Bereich sind häufig keine neuen Anschlüsse mehr zu legen und außerdem kann die Ladeplatte auf den Boden aufgelegt werden, wodurch bauliche Veränderungen in der Garage oder am Stellplatz vermieden werden können. Im halböffentlichen und öffentlichen Bereich muss die Ladeplatte hingegen in den Boden eingelassen werden. Dabei ist an diesen Standorten ggf. ein neuer Anschluss zu legen. Damit fallen die Montage- und Baukosten durch die nicht benötigte Ladesäule und die damit nicht nötige Fundamentierung niedriger aus als in einem konduktiven Ladesystem.

Für ein induktives Ladesystem fallen nicht nur für die Ladestation (primäre Seite), sondern auch zusätzliche Kosten im Fahrzeug (sekundäre Seite) an. Zu den fahrzeugseitigen Anschaffungsausgaben $I^{\text{In,sek}}$ gehören insbesondere die Leistungselektronik, das sekundärseitige Spulensystem sowie Montage- und Baukosten, welche in Tabelle 2.7 dargestellt werden. Die Leistungselektronik muss die in der Spule durch das Magnetfeld induzierte Spannung hoher Frequenz in eine Spannung niedriger Frequenz transformieren. Die anschließende Gleichrichtung des Stroms fällt für induktive wie konduktive Systeme an und führt somit zu keiner weiteren Kostendifferenzierung. Aus diesem Grund wird sie hier nicht weiter betrachtet. Die benötigte Leistungselektronik ist mit der Anschlussleistung zu skalieren. Ein sekundäres Spulensystem

Komponenten		Induktive Infrastrukturkosten (sekundär, in €)					
		I1	I2	I3	I4	I5	I6
Anschaffungs- ausg. /h,sek	Leistungselektronik	800–1.200	1.000–1.700	800–1.200	1.000–1.700	800–1.200	1.000–1.700
	Spulensystem	400–1.000	500–1.500	400–1.000	500–1.500	400–1.000	500–1.500
	Montage-/Baukosten	200–300	200–300	200–300	200–300	200–300	200–300

Tabelle 2.7 – Kosten des induktiven Ladesystems auf Fahrzeugseite (sekundär).

ist ähnlich zum primären auch auf Fahrzeugseite nötig und kann aufgrund der reinen Empfängerfunktion kleiner ausgelegt werden, was sich auch in den Kosten niederschlägt. Zudem ist das Spulensystem im Fahrzeug gegen den Feldlinienaustritt in die Fahrgastzelle abzuschirmen. Für den Einbau ins Fahrzeug fallen zusätzliche Kosten an. Für die primäre und sekundäre Seite ergeben sich insgesamt Hardware- und Installationskosten von 3.650–13.000 €, die damit im Bereich der Herstellerangaben liegen.

2.4.3 Infrastrukturauslastung

Um die entstehenden Ladeinfrastrukturkosten auf ein Fahrzeug zuzuordnen, ist es nötig, die Auslastung der Ladeinfrastruktur zu betrachten. Ein durchschnittliches Elektrofahrzeug muss ungefähr alle zwei Tage geladen werden.¹⁰⁸ Je nach Standort ergeben sich dabei verschiedene Auslastungen der Infrastruktur.

Im *privaten* Bereich ist der Parkplatz meistens einem einzigen oder zumindest einem bestimmten Fahrzeug zugeordnet, wodurch die Infrastruktur auch nur von einem Fahrzeug genutzt wird. An den Tagen, an denen nicht geladen werden muss, blockiert das dort parkende Fahrzeug die Ladeinfrastruktur für ein anderes Fahrzeug.

An *halböffentlicher* Ladeinfrastruktur, wie am Arbeitsplatz, wird hauptsächlich am Tag geladen. Da im halböffentlichen Bereich mehrere Parkplätze zur Verfügung stehen, ist es möglich, nur an den Tagen, an denen geladen werden muss, auf die Parkplätze mit Ladeinfrastruktur zu fahren. Dadurch lässt sich die Auslastung dieser Ladeinfrastrukturen gegenüber der privaten Lademöglichkeit erhöhen. Jeden zweiten Tag muss jedoch das gleiche Fahrzeug an die Ladeinfrastruktur. Im halböffentlichen Bereich können somit im optimistischen Fall etwa zwei Fahrzeuge geladen werden. Die Fahrzeuge untertägig zu tauschen könnte die Auslastung der Ladeinfrastruktur weiter erhöhen, ist jedoch aus Praktikabilitätsgründen nur schwer umsetzbar. Für halböffentliche Anschlüsse, die in Parkgaragen etc. aufgebaut sind, ist eine höhere Frequentierung zu erwarten und es gelten die folgenden Betrachtungen für die öffentliche Infrastruktur.

Im *öffentlichen* Bereich stehen die Fahrzeuge kürzer und damit lässt sich die Infrastruktur von verschiedenen Fahrzeugen nutzen. Die Bestimmung der Auslastung für diese Ladesäulen

¹⁰⁸ Elektrofahrzeug mit einer 24kWh-Batterie, einem DOD-Hub von 60%, einem Verbrauch von 0,18kWh/km und einer durchschnittlichen Jahreslaufleistung von 14.300 km, muss alle 2,04 Tage aufladen.

ist schwieriger, da die Ankunft der Fahrzeuge nun stochastisch erfolgt und sich nicht mehr einfach durch die an diesen Orten übliche Standzeit ableiten lässt. Zur Berechnung der Auslastung wird ein Warteschlangensystem definiert. Dabei werden die Ankunft des Fahrzeugs an einer Ladestation und die Ladung an dieser durch eine Ankunfts- und Bearbeitungsrate dargestellt. Das System an Ladestationen ist jedoch bisher unbekannt, sowohl hinsichtlich der geografischen Verteilung als auch bezüglich der Anzahl der Ladestationen, wodurch die Ankunftsrate nicht als gegeben vorausgesetzt werden kann. Die Bearbeitungsrate ist über die verschiedenen möglichen Anschlussleistungen an einer bestimmten Ladesäule gegeben. Damit die Wartezeiten – bis der Ladevorgang gestartet werden kann – nicht zu groß werden, ist eine gewisse Mindestanzahl an Ladesäulen nötig bzw. muss die Ankunftsrate an einer bestimmten Ladesäule hinreichend klein sein, damit ein gefordertes Servicelevel gehalten werden kann. So ist eine Ankunftsrate zu bestimmen, die die tolerierte Wartezeit vor der Ladesäule zu einer gewissen Wahrscheinlichkeit nicht überschreitet. Ankunfts- (λ) und Bearbeitungsrate (μ) können vereinfachend als exponentialverteilte Prozesse angenommen werden. Für die Bearbeitung steht genau eine Station zur Verfügung und der Warteraum ist zudem beschränkt, sodass nur eine Wartemöglichkeit pro Station gegeben ist.¹⁰⁹ Somit ergibt sich ein Warteschlangensystem mit der Kendall-Notierung M|M|1|2, in dem die Ankunfts- und Bedienrate jeweils exponentialverteilt ist, genau eine Bearbeitungsstation existiert und sich insgesamt zwei Fahrzeuge im System aufhalten können: eines ladend, das andere wartend.¹¹⁰ Die mittlere Bedienrate μ ergibt sich aus der mittleren Ladezeit t_b , die sich wiederum aus der an dieser Ladestation zur Verfügung stehenden Anschlussleistung ergibt. Es wird davon ausgegangen, dass der Erwartungswert der benötigten Lademenge bei 80 % der verfügbaren Batteriekapazität liegt. Bei einem Fahrzeug mit 24 kWh-Batterieaggregat und einem DOD-Hub von 60 % liegt der Erwartungswert der benötigten Lademenge bei $l = 11,52$ kWh. Auf Basis der zur Verfügung stehenden Anschlussleistung (P^I) und des Ladewirkungsgrades ($\eta^{ch} = 0,84$) ergeben sich die mittlere Ladezeit $E(t_b^I) = l/P^I\eta^{ch}$ und die mittlere Bedienrate $\mu^I = 1/E(t_b^I)$ in Abhängigkeit der zugrunde gelegten Infrastruktur I . Für die verschiedenen Ladeinfrastrukturen wird eine tolerierte Wartezeit t_W von 5 min an Parkplätzen und eine geringere von 2 min an einer Schnellladesäule, an der nur kurz gehalten werden soll, angenommen. Wie u. a. Bhat (2008, S. 54) zeigt, gilt für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Kunde höchstens t_W Zeiteinheiten vor der Ladestation warten muss:

$$P(W \leq t_W) = 1 - \frac{\lambda\mu^2 - \lambda^2\mu}{\mu^3 - \lambda^3} e^{-\mu t_W}. \quad (2.1)$$

Unter der Annahme, dass mindestens 90 % der ankommenden Fahrzeuge nicht länger als t_W warten müssen, lässt sich nun numerisch eine Lösung für λ bestimmen. Dem Kehrwert von λ entspricht die mittlere Ankunftszeit t_a . Über die mittleren Ankunfts- und Bearbeitungsrate lässt sich die erwartete Auslastung der Ladestation $\rho = \lambda/\mu$ bestimmen.

¹⁰⁹ Es ist davon auszugehen, dass pro Parkplatz nur ein Fahrzeug wartet.

¹¹⁰ Die Notierung von Warteschlangensystemen geht auf Kendall (1953) zurück und wird in der Literatur, wie z. B. von Tijms (2003, S. 340 ff.) oder Bhat (2008), zur Klassifikation der Systeme genutzt.

Kenngrößen der Warteschlange			Anschlussleistung (in kW)				
			3,7	11,1	22,2	43,6	100
Mittlere Ladezeit	t_b	[min]	222	74	37	19	8
Mittlere Bedienrate	μ	[1/min]	0,0045	0,0135	0,0270	0,0530	0,1215
Tolerierte Wartezeit	t_W	[min]	5	5	5	5	2
Min. mittlere Ankunftsrate ^a	λ	[1/min]	0,0005	0,0016	0,0035	0,0079	0,0178
Min. mittlere Ankunftszeit	t_a	[min]	1952	619	287	126	56
Auslastung	ρ	[%]	11 %	12 %	13 %	15 %	15 %
Anzahl Fahrzeuge pro Station	F	[#]	0,7	2,3	5,0	11,4	25,6

^a Bei $P(W \leq t_W) = 90\%$.

Tabelle 2.8 – Auslastung der öffentlichen Ladeinfrastruktur.

Nun muss die mittlere Ankunftszeit noch auf die durchschnittliche Anzahl von Fahrzeugen pro Ladesäule überführt werden. Wie bereits oben beschrieben, muss ein Fahrzeug durchschnittlich alle zwei Tage an die Ladestation. Des Weiteren ist einschränkend davon auszugehen, dass die Ladestationen während dieser zwei Tage nicht die ganze Zeit geöffnet sind bzw. die Ladesäule während der Nacht nicht genutzt wird. Die möglichen Öffnungszeiten öffentlicher Ladesäulen werden vereinfachend mit 12 h pro Tag angenommen, was einer Betriebszeit über die zwei Tage von 24 h oder 1440 min entspricht. Teilt man nun die Betriebszeit der Ladesäule durch die mittlere Ankunftszeit t_a , so erhält man die Anzahl der im Durchschnitt an dieser Ladesäule einzusetzenden Fahrzeuge, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % innerhalb der tolerierten Wartezeit t_W bedient werden können. Je nach gegebener Anschlussleistung sind gemäß dieser Kalkulation pro Ladesäule bis zu 25 Fahrzeuge einzusetzen. Die verschiedenen Kenngrößen des Warteschlangensystems sind in Abhängigkeit der verschiedenen Anschlussleistungen nochmals in Tabelle 2.8 dargestellt.

Das Ergebnis für die Anzahl der Fahrzeuge F , die einer Infrastruktur zugeordnet werden können, ist intuitiv und kann über einfache Hochrechnungen und Praktikabilitätseinschränkungen ähnlich abgeschätzt werden. Die für die verschiedenen Infrastrukturszenarien verwendeten Auslastungsfaktoren sind nochmals in Tabelle 2.9 dargestellt. Generell sind für alle drei Standorte optimistische Abschätzungen getroffen worden, da (i) von einer optimalen Auslastung der Ladeinfrastruktur ausgegangen wurde, (ii) im halböffentlichen/öffentlichen Bereich ein kooperatives Verhalten des Nutzers zugrunde gelegt wurde, sodass nur an Ladeinfrastruktur geparkt wird, wenn geladen werden muss, oder das Fahrzeug an der öffentlichen Ladeinfrastruktur nicht länger als nötig stehen gelassen wird. (iii) Des Weiteren vernachlässigt die durchschnittliche Betrachtung gerade in den hochfrequentierten Infrastrukturen, dass in Randzeiten auch am Tag keine neuen Fahrzeuge an der Ladeinfrastruktur ankommen. Bei weiterer Verwendung des Auslastungsfaktors in der folgenden Kostenbewertung zeigt sich somit, dass eher eine untere Grenze der zu erwartenden Kosten bestimmt wird. Nichtsdestotrotz können im Einzelfall und an bestimmten Standorten höhere Auslastungen erreicht werden, sodass der Betrieb dieser Ladestationen auch profitabel sein kann.

2.4.4 Gesamt- und Strommehrkosten

Die in Abschnitt 2.4.2 beschriebenen Anschaffungsausgaben und Betriebskosten werden nun über die im vorherigen Abschnitt dargestellte Ladeinfrastrukturauslastung den Fahrzeugen und schließlich der konsumierten Strommenge zugerechnet. Dazu werden zunächst die Gesamtkosten der Ladeinfrastruktur bestimmt. Für die Infrastrukturseite (primäre Seite) ergeben sich der Gesamtbetrag der Anschaffungsausgaben zu $\sum_{m=1}^6 I_m^{\text{In,pr}}$ und die jährlichen Betriebskosten zu $\sum_{n=1}^4 c_n^{\text{In}}$. Die Betriebskosten fallen dabei über die Lebensdauer der Ladeinfrastruktur $T^I = 15$ Jahre an und sind zu diskontieren. Der Diskontierungszinssatz k ist abhängig vom Investor bzw. kann am Standort festgemacht werden. Im privaten Bereich wird ein Zinssatz von $k = 3\%$ angenommen, der im Wesentlichen den Refinanzierungskosten der privaten Haushalte entspricht. Im halböffentlichen Bereich muss ein Finanzierungszinssatz der Unternehmen angelegt werden, der in etwa bei $k = 8\%$ liegt. Im öffentlichen Bereich werden die Finanzierungs- und Kapitalverzinsungsansprüche der Energieversorgungsunternehmen angesetzt, die in etwa einen Zinssatz von $k = 15\%$ aufweisen. Damit lassen sich die Gesamtkosten für die primäre Seite der Ladeinfrastruktur TCO_{pr}^I folgendermaßen berechnen:

$$\text{TCO}_{\text{pr}}^I = \sum_{m=1}^6 I_m^{\text{In,pr}} + \sum_{n=1}^4 c_n^{\text{In}} \left(\frac{1 - \left(\frac{1}{1+k}\right)^{T^I}}{1 - \frac{1}{1+k}} - 1 \right). \quad (2.2)$$

Für die induktive Ladeinfrastruktur sind des Weiteren auch die Anschaffungsausgaben für die zusätzlichen Komponenten auf Fahrzeugseite (sekundäre Seite) zu betrachten. Die Gesamtkosten für die sekundäre Seite der Ladeinfrastruktur $\text{TCO}_{\text{sek}}^I$ ergeben sich zu:

$$\text{TCO}_{\text{sek}}^I = \sum_{\tilde{m}=1}^3 I_{\tilde{m}}^{\text{In,sek}}. \quad (2.3)$$

Aus den Gesamtkosten für die primär und sekundär benötigte Ladeinfrastruktur lassen sich die je Fahrzeug anfallenden Gesamtkosten der Ladeinfrastruktur TCO^I wie folgt berechnen:

$$\text{TCO}^I = \frac{1}{F} \text{TCO}_{\text{pr}}^I + \text{TCO}_{\text{sek}}^I. \quad (2.4)$$

Diese Gesamtkosten lassen sich über die je Fahrzeug durchschnittlich konsumierte Strommenge \tilde{u}_t^E auf einen zusätzlichen zu erhebenden Mehrpreis pro Kilowattstunde, die sogenannten Strommehrkosten c_+^I , umrechnen. Da der Konsum und damit auch der Zahlungseingang einer konsumierten Kilowattstunde über mehrere Zeitintervalle in der Zukunft erfolgt, muss zur richtigen Verteilung der Gesamtkosten gemäß dem Stromkonsum diskontiert werden. Dies kann am einfachsten durch die Diskontierung des Stromverbrauchs dargestellt werden.¹¹¹ Da-

¹¹¹ Es ist anzumerken, dass letztlich nur Geldmengen zu diskontieren sind. Durch diese Darstellung ist jedoch eine verursachungsgerechte Verteilung der Gesamtkosten erfolgt. Den Gesamtkosten sind eigentlich die zu erwartenden Umsätze aus dem Stromverkauf gegenüberzustellen, die zu diskontieren wären. Es müssen also mindestens Umsätze in Höhe der so diskontierten Gesamtkosten erzielt werden, dass die betriebene Ladeinfrastruktur wirtschaftlich ist.

		Ökonomische Parameter der Ladeinfrastruktur								
Szenarios		k	T^I	$\sum_{m=1}^6 I_m^{\text{In,Pr}}$	$\sum_{n=1}^4 c_n^{\text{In}}$	TCO_{Pr}	TCO_{sek}	F	$\sum_{t=1}^{T^I} \frac{\tilde{u}_t^E}{(1+k)^t}$	c^I
		[%]	[a]	[€]	[€/a]	[€]	[€]	[#]	[kWh]	[€/kWh]
Konduktive Ladung	K 1	3 %	15	150–350	5–15	206–519	/	1,0	29.076	0,01–0,02
	K 2		15	350–800	13–50	497–1.365	/	1,0		0,02–0,05
	K 3	8 %	15	1.000–2.600	100–330	1.824–5.321	/	2,0	21.221	0,04–0,13
	K 4		15	1.500–3.600	375–930	4.592–11.267	/	5,0		0,04–0,11
	K 5	15 %	15	2.800–11.250	700–2.445	6.807–25.246	/	5,0	14.735	0,09–0,34
	K 6		15	3.800–15.250	750–2.845	8.093–31.536	/	11,4		0,05–0,19
	K 7		15	25.950–48.500	1.808–5.670	36.300–80.958	/	25,6		0,10–0,21
Induktive Ladung	I 1	3 %	15	2.250–4.600	103–360	3.413–8.667	1.400–2.500	1,0	29.076	0,17–0,38
	I 2		15	3.750–6.600	178–560	5.761–12.926	1.700–3.500	1,0		0,26–0,56
	I 3	8 %	15	4.500–7.500	210–670	6.231–13.024	1.400–2.500	2,0	21.221	0,21–0,42
	I 4		15	6.000–9.500	535–1.370	10.411–20.795	1.700–3.500	2,3		0,29–0,59
	I 5	15 %	15	5.000–8.500	785–2.470	9.494–22.639	1.400–2.500	2,0	14.735	0,42–0,94
	I 6		15	6.000–9.500	835–2.570	10.780–24.212	1.700–3.500	2,3		0,43–0,95

Tabelle 2.9 – Gesamtüberblick der Ladeinfrastrukturkosten.

mit ergeben sich die Strommehrkosten c_+^I gemäß:

$$c_+^I = \text{TCO}^I \left(\sum_{t=1}^{T^I} \frac{\tilde{u}_t^E}{(1+k)^t} \right)^{-1}. \quad (2.5)$$

Alle ökonomischen Parameter der verschiedenen Ladeinfrastrukturszenarien sind zusammengefasst in Tabelle 2.9 dargestellt. Es zeigen sich Strommehrkosten von 0,01 bis zu 0,95 €/kWh. Über die vergleichbaren Strommehrkosten kann damit beurteilt werden, welche Ladeinfrastrukturen attraktiver sind als andere. Des Weiteren lassen sich die Strommehrkosten mit den Treibstoffkosten vergleichen. Aus der Lösung der folgenden Gleichung:¹¹²

$$u^F c^F \stackrel{!}{=} \frac{u^E}{\eta^{\text{ch}}} \left(\overline{c_+^I} + c^E \right) \Leftrightarrow \overline{c_+^I} = u^F c^F \frac{\eta^{\text{ch}}}{u^E} - c^E,$$

sind maximal mögliche Strommehrkosten von 0,19 €/kWh zu entnehmen. Liegen die infrastrukturbedingten Kosten darüber, ist für den Nutzer die Verwendung des heutigen Treibstoffs günstiger.

Für konduktive private Anschlüsse fallen recht niedrige Strommehrkosten von wenigen Cent pro Kilowattstunde an. Die Nutzung der halböffentlichen Ladeinfrastruktur ist aufgrund der höheren Anforderungen an Infrastrukturhardware und Kommunikation teurer mit Strom-

¹¹² Für einen Teil der genutzten Variablen sei auf die weiteren Annahmen in Tabelle 3.4 verwiesen.

mehrkosten von 0,04–0,13 €/kWh. Im öffentlichen Raum liegen die Gesamtkosten der Ladeinfrastruktur sowohl durch die Anforderung an Repräsentativität, Schutz gegen Beschädigung und Abrechnungssysteme als auch wegen erhöhter Baukosten oder etwaiger Stellplatzmieten deutlich höher. Selbst nach Berücksichtigung der relativ hohen Anzahl an Fahrzeugen, die an dieser Infrastruktur zu laden wären, sind die Strommehrkosten mit 0,05–0,34 €/kWh deutlich höher als jene im privaten und halböffentlichen Raum.¹¹³ Das induktive Laden liegt mit Strommehrkosten von 0,17–0,95 €/kWh fernab der Kosten des konduktiven Ladens. Dabei ist zu berücksichtigen, dass durch die eher vorsichtige Kostenschätzung und die optimistische Infrastrukturauslastung die Strommehrkosten in der Realität nochmals höher liegen können. Diese Unsicherheit zeigt sich vor allem in den relativ breiten Grenzen für die halböffentliche und öffentliche Infrastruktur.

Hochleistungsladestationen können durch eine schnelle Beladung und somit der Ermöglichung einer baldigen Weiterfahrt einen höheren Arbeitspreis für die bereitgestellte Energie verlangen. Da – wenn möglich – erst an den günstigeren privaten Anschlüssen geladen wird, birgt dies jedoch die Gefahr, durch ein geringeres Gesamtumsatzvolumen unausgelastet und damit nicht rentabel zu sein. Werden weitere, jedoch in dieser Arbeit nicht detaillierte Faktoren zur Bewertung der Hochleistungsladestationen herangezogen, sind vermutlich die oberen Grenzen der Strommehrkosten realistisch. Es wären in diesem Zusammenhang die schnellere Batteriealterung bei einer Hochleistungsladung oder die im Fahrzeug nicht eingerechnete Leistungselektronik bei Hochleistungswechselstromanschlüssen und zusätzliche Umsätze aus Ladesteuerung bzw. Systemdienstleistungen, die eventuell einen günstigeren Strompreis ermöglichen, zu berücksichtigen.

2.5 Referenzladeinfrastruktur

Die technisch attraktiven Ladeinfrastrukturmöglichkeiten wurden im vorherigen Abschnitt ökonomisch bewertet. Dazu wurden die Anschaffungsausgaben und Betriebskosten für die technisch möglichen Ladeinfrastrukturen ermittelt und über die Auslastung einzelnen Fahrzeugen und der konsumierten Strommenge zugerechnet. Über die Strommehrkosten können nun die einzelnen Ladeinfrastrukturen miteinander verglichen werden. Die konduktive Ladetechnologie ist in allen Standorten wirtschaftlich darstellbar, wenn auch mit stark unterschiedlichen Kosten – je nach dem an welchem Standort geladen wird. Die induktive Ladung hingegen ist wirtschaftlich kaum möglich. Innerhalb der konduktiven Technologie sind wechselstrombasierte Ladekonzepte günstiger umzusetzen. Gleichstromladen scheint an der Grenze gegenüber der Nutzung heutigen Treibstoffs nicht wirtschaftlich zu sein, was gerade für den Anwendungsfall einer schnellen Zwischenladung auch den Einsatz eines alternativen Konzeptes wie eines PHEVs ermöglicht. Vor allem vor dem Hintergrund der in diesem Kapitel nicht

¹¹³ Die Nationale Plattform Elektromobilität (2011) stellt dazu z. B. fest, dass „der Betrieb der öffentlichen Ladeinfrastruktur über den Stromverkauf allein nicht vollständig zu finanzieren“ ist und fordert daher „eine anteilige Förderung [..., bspw. ...] steuerliche und umlagebedingte Kostenbestandteile des Stroms“ zu reduzieren.

betrachteten weiteren Kosteneffekte, wie der Batteriealterung, wird im Folgenden nur von Wechselstromladekonzepten ausgegangen. Somit komplettiert sich der Überblick über die zur Verfügung stehenden Ladeinfrastrukturmöglichkeiten aus Abbildung 2.2 auf Seite 8 um eine wirtschaftliche Perspektive.

Für die weitere Betrachtung in dieser Arbeit wird der Frage nachgegangen, welche Ladeinfrastrukturen der Nutzung der Elektromobilität aus ökonomischen Gesichtspunkten genügen. Dazu ist insbesondere die Klassifizierung der Ladeinfrastruktur in die verschiedenen Standorte und die dort zur Verfügung stehenden Anschlussleistungen sinnvoll. Für die weitere Rechnung werden die drei Ladeinfrastrukturtypen mit unterschiedlichen Anschlussleistungen definiert:

- Privates Laden mit Anschlussleistungen von 3,7–22,2 kW und durchschnittlichen Kosten von 0,01 €/kWh,
- Laden im halböffentlichen Raum mit Anschlussleistungen von 11,1–22,2 kW und durchschnittlichen Kosten von 0,08 €/kWh,
- Öffentliches Laden mit Anschlussleistungen von 11,1–43,6 kW und durchschnittlichen Kosten von 0,17 €/kWh.

Zusammenfassung

- Für den Nutzer kommen im Wesentlichen kabelgebundene Ladeinfrastrukturen infrage, die insbesondere je nach Standort hinsichtlich Höhe der Anschlussleistung, Anschlussart und Abrechnung unterschiedlich auszugestaltet sind.
- Alternativ zu einer dicht ausgebauten Ladeinfrastruktur kann der Nutzer auf fahrzeugbasierte Konzepte wie auf einen zusätzlichen Verbrennungsmotor als „Range Extender“ zurückgreifen, um im Notfall damit seine Mobilität zu gewährleisten.
- Die Nutzungsentgelte der Infrastruktur können als Strommehrkosten dargestellt werden, vereinfachend zahlt der Nutzer für den Zugang im privaten Bereich 0,01 €/kWh, an halböffentlicher Ladeinfrastruktur etwa 0,08 €/kWh und im öffentlichen Raum ca. 0,17 €/kWh.

Kapitel 3

Einflussfaktoren auf die Ladeinfrastruktur

Forschungsfragen

- Welchen Einfluss auf die Infrastrukturwahl haben
 - Verkehrs- und Nutzerverhalten,
 - verschiedene Fahrzeugkonzepte sowie
 - Batterietechnologie, -kosten und -alterung?
- Inwiefern ändern sich die Anforderungen an und der Aufbau der Ladeinfrastruktur durch
 - Vorkonditionierungskonzepte,
 - Systemdienstleistungen zur Beladungssteuerung oder Rückspeisung?
- Welche Steuer- und Fördersysteme existieren heute und treiben damit die zukünftigen Entwicklungen?

3.1 Überblick

Nach der Detaillierung der möglichen Ladeinfrastrukturoptionen werden die weiteren Einflussfaktoren bei der Bewertung einer zukünftigen, sinnvollen Ladeinfrastruktur beleuchtet. Dazu muss die Ladeinfrastruktur im weiteren Kontext der Elektromobilität betrachtet werden. So muss die Ladeinfrastruktur zum einen zu den Bedarfen und dem Verhalten des Nutzers passen, zum anderen hängt die benötigte Ladeinfrastruktur aber auch von der technischen Ausgestaltung des Fahrzeugs und der Batterie ab. Darüber hinaus haben gegebenenfalls neue im Rahmen der Elektromobilität möglich oder nötig werdende Konzepte, wie das der Vorkonditionierung oder der Systemdienstleistungen, Einfluss auf die Art und Weise des Beladeinfrastrukturaufbaus. Des Weiteren nimmt der Staat Einfluss auf die Elektromobilitätsentwicklung und den Infrastrukturaufbau durch Steuer- und Fördersysteme.

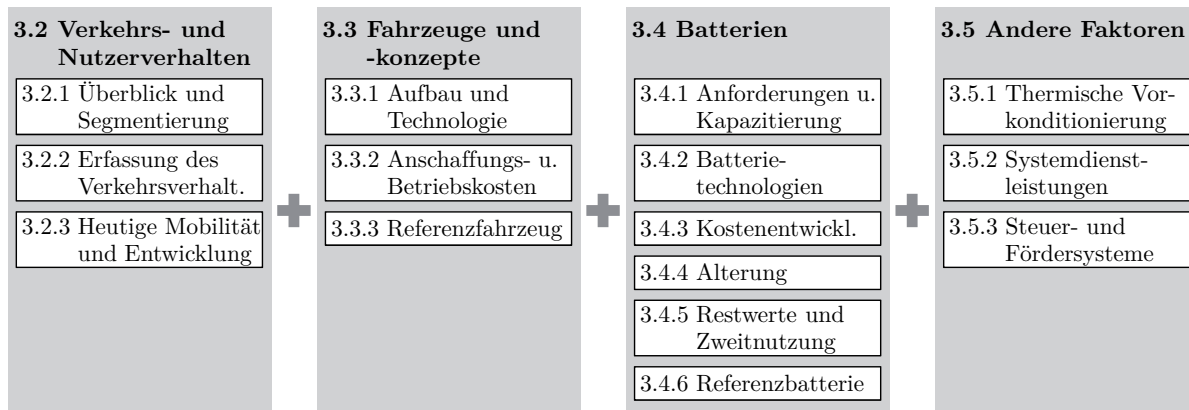


Abbildung 3.1 – Überblick der verschiedenen Einflussfaktoren.

Der Schwerpunkt der betrachteten Einflussfaktoren, liegt dabei auf dem Verkehrs- und Nutzerverhalten, den verschiedenen Fahrzeugkonzepten und der zur Verfügung stehenden Batterietechnologie. Für die Bewertung der Elektromobilität und damit der Ladeinfrastruktur ist das Verkehrsverhalten der Nutzer wichtig, da Streckenlängen und Standzeiten, im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren, Einfluss auf die Nutzbarkeit des Elektrofahrzeugs haben. Nur wenn die Mobilitätsanforderungen mit dem Fahrzeug und der verfügbaren Infrastruktur erfüllt werden können, wird der Nutzer die Elektromobilität im Allgemeinen, aber auch die Ladeinfrastruktur im Speziellen akzeptieren. Dazu wird das Verkehrs- und Nutzerverhalten in Abschnitt 3.2 anhand der verfügbaren Mobilitätsstudien beschrieben und der für die weitere Bewertung genutzte Datensatz detailliert. Welche Anforderungen an die Ladeinfrastruktur gestellt werden, ergibt sich zudem aus dem Fahrzeugaufbau. Werden z. B. Fahrzeuge mit einem zusätzlichen Verbrennungsmotor eingesetzt, muss die Ladeinfrastruktur nicht auf die Reichweitenängste¹¹⁴ der Nutzer ausgelegt werden. In Abschnitt 3.3 werden die verschiedenen Fahrzeugkonzepte detailliert, die für diese Fahrzeuge anfallenden Anschaffungsausgaben und Betriebskosten dargestellt sowie ein Referenzfahrzeug für die weiteren Analysen definiert. Als weiterer wesentlicher Einflussfaktor ist die Batterie zu nennen. Zum einen sind verschiedene Batterietechnologien möglich, zum anderen ist die Batterie abhängig vom gewählten Fahrzeugkonzept und der zur Verfügung stehenden Ladeinfrastruktur unterschiedlich zu dimensionieren. Zudem macht die Batterie auf dem heutigen Stand einen Großteil der Gesamtkosten der Elektromobilität aus. Daher sind die Batteriekosten und deren Entwicklung bei der Ermittlung der Gesamtkosten dieser Fahrzeugkonzepte von Bedeutung. Vor diesem Hintergrund sind ebenso die Batteriealterung, die zu erwartenden Restwerte und mögliche Zweitnutzungskonzepte zu beleuchten. In Abschnitt 3.4 werden die Batterien detailliert betrachtet und eine Referenzbatterie¹¹⁵ definiert, die in die folgenden Analysen eingeht. Abschließend werden in Abschnitt 3.5 weitere Einflussfaktoren, wie insbesondere die Vorkonditionierung, die Systemdienstleistungen und das Steuer- und Fördersystem kurz dargestellt. Ein Überblick über Kapitel 3 ist Abbildung 3.1 zu entnehmen.

¹¹⁴ Siehe hierzu auch Abschnitt 2.3.1.

¹¹⁵ Technische Weiterentwicklungen der Referenzbatterie werden nicht betrachtet.

3.2 Verkehrs- und Nutzerverhalten

Um die Einsetzbarkeit von Elektrofahrzeugen zu beurteilen, wird das Verkehrs- und Nutzerverhalten betrachtet. Dazu werden zunächst der Verkehr eingeordnet und segmentiert sowie im Anschluss daran die bisherige und nötige Erfassung des Verkehrsverhaltens dargestellt. Abschließend wird auf die heutige Mobilität eingegangen.

3.2.1 Überblick und Segmentierung des Verkehrs

Grundsätzlich kann Verkehr bodengebunden auf Straße und Schiene sowie zu Luft und zu Wasser erfolgen. Im Folgenden wird vor dem Hintergrund des Einsatzes der Elektromobilität auf den straßengebundenen Verkehr fokussiert.¹¹⁶ Der Straßenverkehr wird zum einen in verschiedene Fahrzeugtypen, wie bspw. Pkw, Krafträder, Lkw, Zugmaschinen und Busse eingeteilt. Zum anderen kann eine Einteilung in den Privat- und Wirtschaftsverkehr vorgenommen werden, wobei eine trennscharfe Eingrenzung nicht einheitlich definiert wird.¹¹⁷ So wird der Wirtschaftsverkehr häufig als Güterverkehr mit Lastkraftwagen beschrieben und vernachlässigt dabei den Personen- und sonstigen Wirtschaftsverkehr, der nicht mit dem Lkw bereitgestellt wird.¹¹⁸ Eine Abgrenzung zwischen Personenverkehr und gewerblichem Verkehr aus Güter-, Personen- und sonstigem Wirtschaftsverkehr wird daher anhand verschiedener Kriterien vorgenommen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Abgrenzung nach Zulassung. So wird das Fahrzeug auf einen privaten oder gewerblichen Halter zugelassen. Aber auch diese Einteilung ist insofern unpräzise, als dass die Zulassung, z. B. bei privat genutzten Dienstwagen oder geschäftlich genutzten Privatfahrzeugen, das Verkehrsaufkommen und -verhalten dem jeweiligen Segment nicht eindeutig zugeordnet werden kann. Eine weitere Möglichkeit ist die Einteilung nach Fahrtzweck, wobei zwischen privaten und dienstlich-geschäftlichen Fahrten unterschieden wird. Der Wirtschaftsverkehr kann somit nach Steinmeyer (2007, S. 115 f.) als „Verkehr in Ausübung des Berufes“ verstanden werden und umfasst neben dem Güterverkehr u. a. den Lieferverkehr, Handwerkerfahrten oder Kurierdienste.¹¹⁹ Gegenüber dem Privatverkehr ist der Wirtschaftsverkehr daher vielfältig, da er verschiedene Nutzungsarten umfasst.

Wendet man diese Einteilung in verschiedene Fahrzeugtypen und Haltergruppen an, so zeigt sich auf Basis der zugelassenen Fahrzeuge, dass der private Pkw den Großteil des Marktes abdeckt, siehe auch Tabelle 3.1. Von allen Fahrzeugtypen stellen die Pkw mit etwa 86 % das größte Fahrzeugsegment, das zudem mitunter am einfachsten auf Elektrofahrzeuge umgestellt werden kann.¹²⁰ Gemäß der Haltergruppen machen die privaten Halter mit etwa 86 % den größten Anteil aus, der sich bei Pkw sogar auf 90 % erhöht. Aufgrund der großen Ab-

¹¹⁶ Zudem stellt der Straßenverkehr einen Großteil des Verkehrsaufkommens. Jedoch sei darauf hingewiesen, dass der Einsatz batterieelektrischer Antriebssysteme nicht an den Straßenverkehr gebunden ist, auch in der See- und Binnenschifffahrt sind elektrische Antriebe in Prüfung.

¹¹⁷ Vgl. z. B. Janßen und Vollmer (2005, S. 13).

¹¹⁸ Vgl. Al-Daas (1995), Leifeld (1998) sowie Nobis und Luley (2007).

¹¹⁹ Vgl. auch Willeke (1992, S. 12).

¹²⁰ Vergleiche dazu auch Abschnitt 3.3.

Fahrzeugtyp	Kraftfahrzeugbestand nach Halter in '000		
	Privat	Gewerblich	Gesamt
Pkw	36.855	4.119	40.974
Krafträder	3.586	70	3.656
Lkw	821	1.524	2.346
Zugmaschinen	996	944	1.940
Sonstige	359	301	660
Gesamt	42.618	6.958	49.576

Tabelle 3.1 – Kraftfahrzeugbestand nach Haltergruppe und Fahrzeugtyp in Deutschland auf Basis der Daten des Kraftfahrtbundesamts (2009).

deckung am Gesamtfahrzeugbestand wird im Folgenden der Fokus auf den privaten Verkehr gelegt. Außerdem erfordert der Wirtschaftsverkehr eine spezifische Analyse, die bspw. die Standzeiten im Depot berücksichtigt. Nichtsdestotrotz sei an dieser Stelle angemerkt, dass der Wirtschaftsverkehr durchaus Potenzial zur Umstellung auf Fahrzeuge mit einem batterieelektrischen Antrieb hat. So können in größeren Flotten bspw. ein Teil der Fahrzeuge umgestellt und diese in der Tourenplanung auf geeigneten Strecken eingeplant werden.¹²¹

3.2.2 Erfassung des Verkehrs- und Nutzerverhaltens

3.2.2.1 Klassifikation der Verkehrserfassungen

Seit Jahren wird versucht, den Straßenverkehr durch Datenerhebungen und Befragungen besser zu analysieren.¹²² Dazu gibt es im Wesentlichen zwei Instrumente: (i) verkehrstechnische und (ii) verkehrsverhaltensbezogene Erhebungen.¹²³ Mit Ersteren bezeichnet man Zählungen und Stromerhebungen, die Verkehrsbelastungen auf einzelnen Straßen oder in Ballungsräumen aufnehmen und Eingang in die städtische und teils auch überregionale Verkehrswegeplanung finden. Verhaltensbezogene Analysen setzen den Fokus stärker auf den Verkehrsteilnehmer und befragen dazu einzelne Personen oder Haushalte. Im Vordergrund der Befragungen steht die Verkehrsentwicklung einzelner Verkehrsarten und im Privatverkehr insbesondere der Verkehrsträgerwechsel, auch Modal-Split¹²⁴ genannt. Im Güterverkehr konzentriert man sich stärker auf die Entwicklung des Fernverkehrs.¹²⁵ Der Personenwirtschaftsverkehr wird in den bisherigen Studien nur ergänzend betrachtet und meistens nicht systematisch erfasst.

¹²¹ Für die Integration von Elektrofahrzeugen in Firmenflotten, siehe z. B. Institute for Social-Ecological Research (2009).

¹²² Analysegegenstand ist der fließende und stehende Verkehr, der von Bestands- und Zulassungsstatistiken nicht abgedeckt wird.

¹²³ Vgl. Collin (1994).

¹²⁴ Siehe für eine Definition Kummer (2006, S. 99).

¹²⁵ Vgl. Nobis und Luley (2007, S. 131).

3.2.2.2 Benötigte Daten

Um die Einsatzmöglichkeiten zukünftiger Elektrofahrzeuge zu überprüfen, wird das heutige Verkehrsverhalten analysiert.¹²⁶ Anders als bei einem verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeug ist, wie bereits zuvor erwähnt, die Standzeit zum Aufladen der Batterie ein entscheidender Faktor. Zudem sollte aufgrund der geringeren Reichweite des Elektrofahrzeugs der Verbrauch bzw. die zurückgelegte Streckenlänge bekannt sein. Ist der Zielort mit dem Ladezustand der Batterie zu erreichen und steht im Zielort eine Ladeinfrastruktur zur Verfügung, an der auch länger geparkt wird, so ist diese und ggf. auch eine sich anschließende Strecke mit dem Elektrofahrzeug zu bewerkstelligen. Betrachtet man mehrere Fahrten und Standzeiten in Abfolge hintereinander, so erhält man ein genaueres Bild der Möglichkeiten, das heutige Fahrzeug durch ein batterieelektrisches zu ersetzen. Sollen die Aussagen nicht nur für ein Fahrzeug, sondern für einen Fuhrpark oder die generelle Einsatzmöglichkeit von Elektrofahrzeugen gelten, sind repräsentative Fahrverhalten zu untersuchen, die einen Rückschluss auf den regulären Fahrzeugeinsatz erlauben.

Zur Analyse sind insbesondere Angaben zur Fahrt und zum Stand des Fahrzeugs nötig. Hinsichtlich der Fahrt sind Informationen zu Streckenlänge, -führung, dem Verbrauch sowie Abfahrts- und Ankunftszeiten erwünscht. Steht das Fahrzeug, sollten der Standort, die dort verfügbare Anschlussmöglichkeit, -leistung sowie die Ankunfts- und nächste Abfahrtszeit bekannt sein. Aus diesen Daten kann das Fahrverhalten in derart abgebildet werden, dass eine Übertragung auf das Elektromobilitätspotenzial möglich wird. Dabei sind reale Strecken und Zeiten über mehrere Tage zu berücksichtigen, da nur so die Aussage über die Einsatzmöglichkeit eines Elektrofahrzeugs verlässlich ist. Werden durchschnittliche Strecken und Verteilungen betrachtet, so sind diese typischerweise alle mit einem Elektrofahrzeug zu bewerkstelligen. Einzelne längere Fahrten oder eine ungünstige Abfolge von mehreren, kleineren Strecken können hingegen den Einsatz eines Elektrofahrzeugs für diese Anwendung in der Realität verhindern. Je nachdem welche Infrastruktur zur Verfügung steht, ist auch die Angabe untertägiger Standzeiten nötig, da z. B. am Arbeitsplatz geladen werden kann. Um außergewöhnliche Fahrten mit zu berücksichtigen, erhöht eine längere Aufzeichnung des Fahrverhaltens die Verlässlichkeit der Analyse. Allgemein gilt, dass das individuelle Nutzungsverhalten sehr unterschiedlich sein kann, sodass Durchschnitte weitestgehend zu vermeiden sind.¹²⁷

3.2.2.3 Datenquellen, Repräsentativität und Auswahl

Für die weitere Analyse werden detaillierte Angaben zum Fahrverhalten gesucht, die die zurückgelegten Strecken und Zeiten über mehrere Tage aufzeichnen. Diese Angaben sind heute nur zum Teil verfügbar und dem Bereich der verkehrsverhaltensbezogenen Erhebungen zuzuordnen. Andere fahrzeugspezifische Verkehrsaufzeichnungen sind im Einzelfall nur in der Speditionswirtschaft gängig. Normfahrzyklen, wie z. B. der neue europäische Fahrzyklus (NEFZ) oder die in den USA übliche federal test procedure (FTP-75), versuchen, eine durchschnittliche

¹²⁶ Siehe für eine Überprüfung der Verkehrsentwicklung auch Abschnitt 5.5.2.

¹²⁷ Vgl. u. a. auch Lin und Niemeier (2003).

Datensatz	Land ^a	Umfang je Umfrage ^b	Durchführung ^c	Berichtsperiode	Fzg. zugeordn. ^d
Mobilitätspanel ^e	DE	1.000 HH	1996-2008	7 Tage	Nein
Mobilität in Deutschland ^f	DE	50.000 HH	2002, 2008	1 Tag	Ja
Kraftfahrzeugverkehr in Deutschl. ^g	DE	100.000 Fzg.	2002, 2010	1 Tag	Ja
Mikrozensus Verkehr ^h	CH	32.000 HH	2000, 2005	1 Tag	Nein
Henkilöliikennetutkimus ⁱ	FI	13.000 Pers.	1998, 2004	1 Tag	Nein
Enquête Nationale Transports ^j	FR	11.000 HH	2007	7 Tage	Ja ^k
Nasjonale Reisevaneundersøkelsen ^l	NO	10.000 Pers.	'98, '01, '05	1 Tag	Nein
RES nationella reseundersökningen ^m	SE	27.000 Pers.	'01, 2005–06	1 Tag	Nein
National Travel Survey ⁿ	UK	8.000 HH	1996-2009	7 Tage	Ja ^k
National Household Travel Survey ^o	US	26.000 HH	1995, 2001	1 Tag	Ja

^a Keine vollständige Auflistung aller durchgeführten Verkehrsbefragungen. Länderabkürzungen nach International Organization for Standardization (2010).

^b Die Befragungen wurden auf unterschiedlichen Ebenen durchgeführt, manche befragen Personen (Pers.), Haushalte (HH) oder ermitteln das Fahrverhalten direkt auf Ebene des Fahrzeugs (Fzg.).

^c Es wurden nur Umfragen ab dem Jahr 1995 berücksichtigt.

^d Manche Datensätze erlauben die eindeutige Zuordnung eines bestimmten Fahrzeugs zu den zurückgelegten Wegen, andere spezifizieren das verwendete Fahrzeug nicht.

^e Siehe Chlond und Kuhnimhof (2005), Mobilitätspanel (2006) und Zumkeller et al. (2010).

^f Siehe Follmer et al. (2003, 2004, 2010).

^g Siehe Wermuth et al. (2003).

^h Siehe Bundesamt für Statistik Schweiz und Bundesamt für Raumentwicklung (2007).

ⁱ Siehe Ministry of Transport and Communications Finland et al. (2010).

^j Siehe Institut national de la statistique et des études économiques (2010).

^k Verpflichtend ist die Abgabe eines Fahrtenbuchs für ein Fahrzeug im Haushalt, weitere Pkw Fahrten können dennoch mit anderen Fahrzeugen des Haushalts durchgeführt werden.

^l Siehe Denstadli et al. (2006).

^m Siehe Swedish Institute for Transport and Communications Analysis (2007).

ⁿ Siehe UK Department of Transport (2010).

^o Siehe U. S. Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics (2003).

Tabelle 3.2 – Überblick über verschiedene nationale Verkehrsbefragungen.

Nutzung des Fahrzeugs abzubilden und sind insbesondere auf die vergleichende Verbrauchsermittlung des Treibstoffs ausgelegt.¹²⁸ Diese Normfahrzyklen kennen zwar durchschnittliche Streckenprofile, jedoch keine Fahr- und Standzeiten. Im Bereich der verkehrsverhaltensbezogenen Erhebungen gibt es in vielen Ländern Verkehrsbefragungen, die jedoch sehr unterschiedlich ausgeführt werden, worüber Tabelle 3.2 Aufschluss gibt. Die Befragungen variieren zunächst in der Samplegröße und der Befragungsebene. So werden je nach Befragung Haushalte (HH), Personen (Pers.) oder Fahrzeuge (Fzg.) über das Nutzungsverhalten befragt und ermöglichen verschiedenartige Datenauswertungen. Werden *Haushalte* ausgewählt, können primär die soziodemografischen Faktoren des Haushalts und die verschiedenen zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel im Haushalt ausgewertet werden. Dabei wird die Verwendung der dem Haushalt zur Verfügung stehenden Fahrzeuge relativ vollständig erfasst.

¹²⁸ Zur Abbildung regionaler Unterschiede und verschiedener Anteile an städtischen und überregionalen Fahrten existiert eine Vielzahl an Fahrzyklen, siehe hierzu u. a. Barlow et al. (2009).

Fokussiert die Befragung stärker auf *Personen*, ist zwar gegenüber der haushalt-zentrischen Erhebung eine vollständigere Erfassung der Mobilität jener Personen gewährleistet, jedoch bleibt so die Mehrfachverwendung einzelner Verkehrsträger im Haushalt meist unberücksichtigt. Hier steht jedoch eher die Mobilität der Personen im Vordergrund. Die von diesen Personen mit dem Pkw zurückgelegten Fahrten werden jedoch keinem bestimmten Fahrzeug zugeordnet und können so nicht in Fahrprofile überführt werden. Bei der Aufzeichnung der einzelnen Wege, erlauben manche Datensätze die eindeutige Zuordnung eines bestimmten Fahrzeugs, andere spezifizieren das verwendete Fahrzeug nicht. Lassen sich den Wegen Fahrzeuge eindeutig zuordnen, ist die Überleitung auf Fahrprofile einfacher; wird diese Zuordnung nicht vorgenommen, sind die Wege den Fahrzeugen nachträglich zuzuordnen.

Fahrzeugspezifische Erhebungen zeichnen ähnlich einem Fahrtenbuch einen Datensatz auf, der jedoch kaum Rückschlüsse auf die Mobilitätsbedürfnisse sowie soziodemografische Faktoren der nutzenden Personen und Haushalte zulässt. Trotz allem eignet sich diese Aufzeichnung jedoch am ehesten für die Überprüfung des Fahrverhaltens auf das Elektromobilitätspotenzial.

Die meisten der verfügbaren Umfragen sind bereits mehrfach durchgeführt worden und so ausgelegt, dass die Mobilitätsentwicklung im Zeitablauf oder sogar über einzelne Jahre beobachtet werden kann. Ein wesentlicher Unterschied der Befragungen besteht in der betrachteten Berichtsperiode, meistens setzen die Umfragen nur einen Berichtstag an, wobei vereinzelt auch das Verkehrsverhalten bis zu sieben Tage am Stück aufgezeichnet wird. Vor dem Hintergrund der Ermittlung des Elektromobilitätspotenzials und der Übertragung der Wege in ein repräsentatives Fahrverhalten sind längere Aufzeichnungen zu bevorzugen, sodass zusammenhängende Wegeketten mit ihren unterschiedlichen und wiederkehrenden Abschnitten erfasst werden können. Zudem können so mehrtägige Wege und Fahrten mit Übernachtungen berücksichtigt werden.

In Deutschland existieren drei Verkehrsbefragungen parallel zueinander. Das „Mobilitätspanel“ (MOP) ist eine jährlich durchgeführte sog. Längsschnittbefragung seit 1994, an der etwa 1.000 Haushalte pro Jahr teilnehmen. Dazu werden personenbezogene Daten und sozioökonomische Parameter der Haushalte festgehalten sowie ein Wegetagebuch geführt.¹²⁹ Die Wege werden über den Verlauf einer Novemberwoche dokumentiert, die als repräsentativ für das jährliche Fahrverhalten gilt. Aus dem geführten Wegetagebuch lassen sich Wegeketten von mindestens fünf bis hin zu sieben zusammenhängenden Tagen abbilden. Bei der Erfassung der zurückgelegten Wege muss der Befragte das verwendete Verkehrsmittel, jedoch nicht ein spezifisches Fahrzeug angeben, sodass eine Zuordnung der Wege auf Fahrzeuge nur nachträglich erfolgen kann. Neben dem jährlich durchgeführten MOP wird die Befragung „Mobilität in Deutschland“ (MiD) im Abstand von mehreren Jahren und so zuletzt in 2008 durchgeführt. Mit einer größeren Samplegröße von 50.000 befragten Haushalten ist MiD deutlich größer als das MOP, jedoch ist nur ein Berichtstag auszufüllen. Dabei werden die berichteten Wege, sofern diese mit dem Pkw zurückgelegt werden, einem spezifischen Fahrzeug zugeordnet, wodurch sich ein eintägiges Fahrprofil erzeugen lässt. Ergänzend gibt es in Deutschland noch die

¹²⁹ Siehe Abschnitt 3.2.2.3.

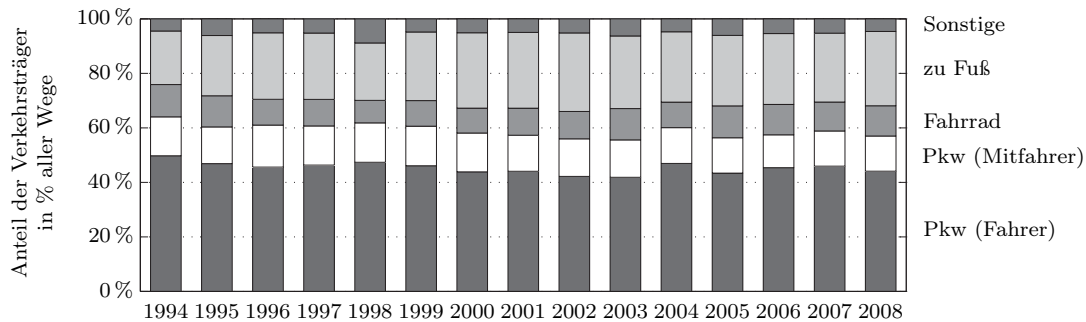


Abbildung 3.2 – Entwicklung der Verkehrsträgerwahl im Mobilitätspanel zwischen 1994–2008.

Befragung „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“ (KiD), die die Lücken in der Erfassung des Wirtschaftsverkehrs in den beiden vorangenannten Befragungen zu schließen versucht.¹³⁰ So werden 100.000 Fahrzeuge nach Fahrzeugtyp und Wirtschaftszweig zufällig aus dem zentralen Verkehrsregister des Kraftfahrtbundesamtes gezogen und die Fahrer gebeten, an einem Tag ein Wegetagebuch zu führen. Die Studie wurde zuletzt in 2010 durchgeführt. Die Ergebnisse liegen zurzeit noch nicht vor.

Im europäischen Ausland und in den USA werden ebenfalls Verkehrsbefragungen durchgeführt, die ähnlich aufgebaut sind und sich meist auf die Erhebung eines Wegetagebuchs stützen. Da beim Ausfüllen der Wegetagebücher jedoch vereinzelt Berichtsmüdigkeit zu entdecken ist¹³¹, wird bei den Verkehrserhebungen zunehmend der Einsatz von GPS-Aufzeichnungsgeräten pilotiert.¹³² In kleinerem Umfang und unter Ausschluss der Repräsentativität wurden bereits einzelne solcher GPS-basierten Fahrprofile hinsichtlich ihres Elektromobilitätspotenzials untersucht.¹³³

Für die weiteren Analysen werden aufgrund der mehrtägigen Längsschnittbetrachtung und der Nutzung durch mehrere Fahrer die Daten aus dem MOP herangezogen.

3.2.3 Heutige Mobilität und Verkehrsentwicklung

Die MOP-Daten liefern ein Verständnis über das heutige Fahrverhalten und können durch die mehrjährige Datenerfassung zusätzlich Aufschluss über die Entwicklung der Mobilität in den letzten 15 Jahren liefern. Bei der Veränderung der Mobilitätsbedürfnisse lassen sich insbesondere die Verkehrsträgerwahl sowie die Entwicklung von Streckenlängen und Jahreslaufleistungen betrachten. Die Verkehrsträgerwahl ist auf Basis der Daten des Mobilitätspanels zwischen 1994 und 2008 relativ konstant geblieben, siehe hierzu auch Abbildung 3.2. Es zeigt sich eine leichte Verschiebung von Wegen, die anstatt mit dem Pkw zu Fuß erledigt werden.

¹³⁰ Vgl. Wermuth et al. (2003).

¹³¹ Vgl. z. B. Chlond und Kuhnimhof (2005, S. 32 f.), die Berichtsmüdigkeit in zweierlei Hinsicht identifizieren: (i) dass Teilnehmer einzelne Wege weglassen (Fatigue-Effekt), oder (ii) dass zum Ende der Berichtswoche zunehmend aufgehört wird zu berichten (Attrition-Effekt), die beide mit dem Rückgang an berichteten Wegen einhergehen. Chlond und Kuhnimhof (2005) versuchen die Ermüdungserscheinungen über eine Gewichtung der Paneldaten zu berücksichtigen.

¹³² Siehe z. B. Anderson et al. (2009).

¹³³ Siehe hierzu z. B. Gonder et al. (2007).

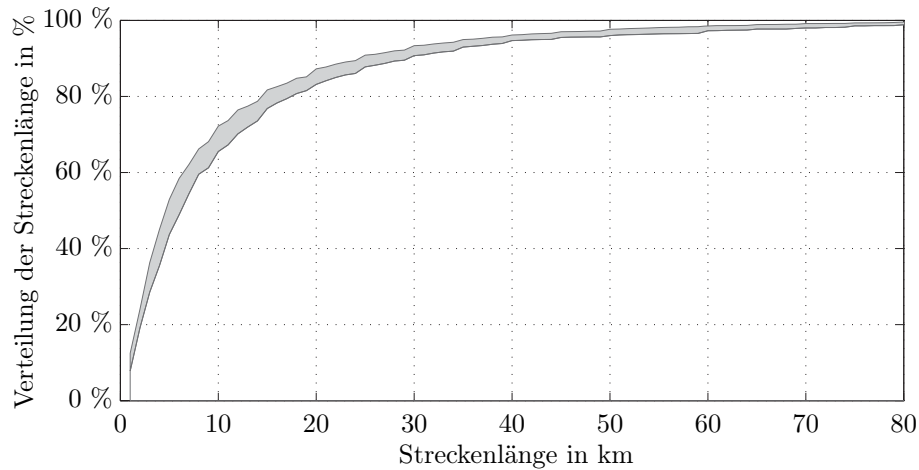


Abbildung 3.3 – Verteilung der Streckenlänge von Pkw-Wegen im Mobilitätspanel zwischen 1994–2008.

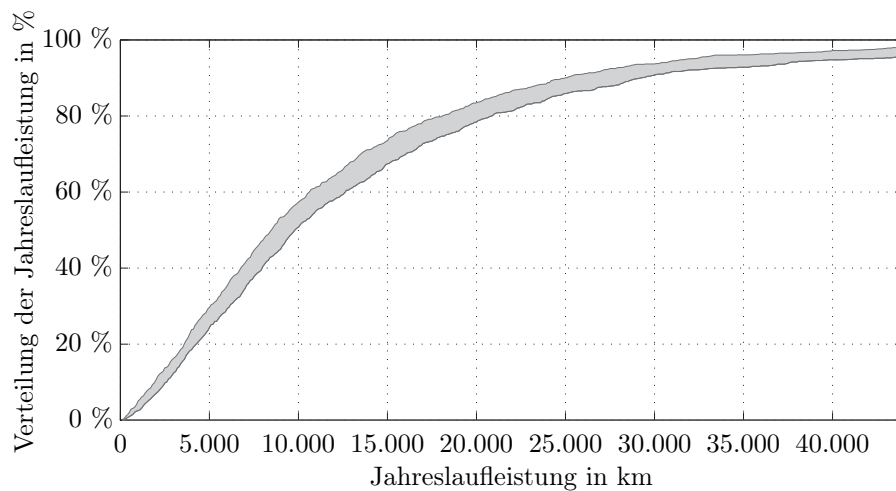


Abbildung 3.4 – Verteilung der Jahreslaufleistung eines Pkws im Mobilitätspanel zwischen 1994–2008.

Diese Verschiebung kann jedoch eher mit einer generellen Zunahme der Wege und somit einer stärkeren Verlässlichkeit des ausgefüllten Wegetagebuchs erklärt werden. Betrachtet man die Pkw-Wege näher und vergleicht sie mit den zurückgelegten Streckenlängen und der Gesamtjahreslaufleistung, so zeigt sich über die Jahre ein sehr ähnliches Fahrverhalten, siehe hierzu auch Abbildung 3.3 und 3.4. Die Verteilungskurven der einzelnen Jahre streuen dabei innerhalb des engen grauen Bereichs, zeigen zudem keinen Trend auf und sind deshalb mit einer Varianz im Sample zu erklären.

Bei Marktuntersuchungen über das Potenzial von Elektrofahrzeugen wird häufig ggf. variierender Fahrverhalten als möglicher Treiber hinter alternativen Antriebs- und Mobilitätskonzepten genannt.¹³⁴ Die Entwicklung des Verkehrsverhaltens der letzten Jahre zeigt jedoch

¹³⁴ Siehe u. a. Walther et al. (2010), aber auch Erklärungsansätze von Car-Sharing-Konzepten oder Jugendstudien, die mit sich veränderndem Verkehrsverhalten und -bedürfnissen ein möglicher Treiber neuer Verkehrskonzepte sein können.

eine hohe Konstanz. So wird für die weiteren Analysen zunächst von diesem Verkehrsverhalten ausgegangen und überprüft, inwieweit zukünftige Fahrzeugkonzepte heutige Verkehrsbedürfnisse erfüllen.¹³⁵ Zusätzlich ist bei der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Länder das jeweilige Mobilitätsverhalten zu berücksichtigen. Eine Vorstellung möglicher Änderungen gibt bspw. die Gegenüberstellung der Streckenlängenverteilung einzelner europäischer Länder in Bending et al. (2010, S. III-27). Hier sieht man bereits, dass Länder wie Großbritannien ein ähnliches Mobilitätsverhalten hinsichtlich der Streckenlängen und -verteilung haben, in Spanien und Irland hingegen deutlich weniger kurze und mehr lange Strecken zurückgelegt werden.

3.3 Fahrzeuge und -konzepte

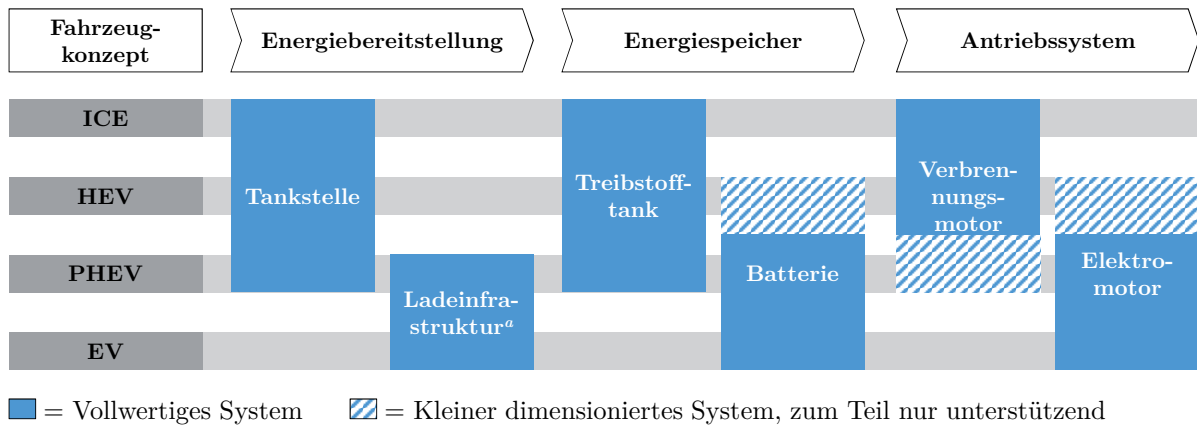
Im Allgemeinen bezeichnet Elektromobilität Fahrzeuge mit elektrischem Motor und Energiebereitstellung aus einer Batterie. Darüber hinaus existieren jedoch weitere alternative Antriebskonzepte für heutige Kraftfahrzeuge mit unterschiedlichen technischen Reifegraden. So beruht ein Teil dieser Konzepte weiterhin auf einem Verbrennungsmotor, bei dem im Wesentlichen der Treibstoff durch neuartige Kraftstoffe ausgetauscht wird, wie z. B. Erd-/Autogas, Ethanol, Wasserstoff oder auch Biokraftstoff. Die anderen Konzepte beruhen auf einem elektrischen Antrieb, für den die Energie in verschiedenen Speichern, wie bspw. Batterien oder Brennstoffzellen, vorliegen kann. Außerdem können sogenannte Hybridkonzepte durch Kombination verschiedener Energiespeicher und Antriebssysteme existieren.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich im Wesentlichen auf batterieelektrische Fahrzeuge sowie Hybride aus heutigem benzinbasierten Verbrennungsmotor und batterieelektrischem Antrieb. Andere Speicher und Antriebstechnologien werden in der folgenden Betrachtung nicht weiter verfolgt.

Des Weiteren lassen sich verschiedene Fahrzeugtypen auf einen elektrischen Antrieb umstellen. In Abwesenheit heute in Serie erhältlicher Pkw rücken zunehmend auch andere Fahrzeugtypen mit elektrischem Antrieb in den Vordergrund. So werden in den deutschen Pilotregionen bereits Elektroroller eingesetzt, aber auch Pedelecs¹³⁶, elektrische Lieferwagen oder die Elektrifizierung von Spezialfahrzeugen wird angedacht. Manche Fahrzeuge und ihr typischerweise zugrunde liegender Anwendungsfall können sich dabei sogar sehr gut für den elektromobilen Einsatz eignen. Nichtsdestotrotz ist aufgrund des Anteils an den heute betriebenen Fahrzeugen insbesondere die Einsatzmöglichkeit von Pkw für die Marktdurchdringung elektromobiler Konzepte wichtig zu verstehen. Daher konzentrieren sich die weiteren Betrachtungen auf Pkw, für die zunächst die verschiedenen Antriebstechnologien vorgestellt, die ökonomischen Parameter beschrieben und schließlich ein Referenzfahrzeug für die weiteren Analysen definiert wird.

¹³⁵ Diese Annahme wird in vergleichbaren Untersuchungen ebenfalls getroffen, siehe hierzu z. B. Offer et al. (2011, S. 1941).

¹³⁶ Mit „Pedelec“ wird ein Elektrofahrrad mit unterstützendem Elektromotor bezeichnet und steht für die Abkürzung ‘Pedal Electric Cycle’.



^a Ladeinfrastruktur kann dabei viele Formen annehmen, siehe auch Kapitel 2. Aufwendigere Ladeinfrastrukturmodelle, wie z. B. Hochleistungsladung oder Batterietausch, werden jedoch EVs vorbehalten sein, da PHEVs die dafür fahrzeugseitig benötigte Hardware vermutlich nicht installiert haben werden und vielmehr auf den Verbrennungsmotor als Range Extender zurückgreifen können.

Abbildung 3.5 – Fahrzeugkonzepte von der Energiebereitstellung über die -speicherung bis zum Antriebssystem.

3.3.1 Aufbau und Technologie

Vom heutigen verbrennungsmotorbasierten Fahrzeug kann der Übergang zu einem Elektrofahrzeug durch Kombination beider Konzepte fließend erfolgen. Im Folgenden werden neben dem heutigen benzinbasierten Verbrennungsmotor (ICE) drei Fahrzeugkonzepte hin zum voll-elektrischen Antrieb betrachtet: ein Hybridfahrzeug (HEV), ein Plug-in-Hybrid (PHEV) und das batterieelektrische Fahrzeug (EV).¹³⁷ Vor dem Hintergrund des geeigneten Ladeinfrastrukturaufbaus werden im Folgenden die Konzepte von der Energiebereitstellung über den Energiespeicher bis hin zum Antriebssystem betrachtet. Ein Überblick über die betrachteten Konzepte ist Abbildung 3.5 zu entnehmen.

Hybridfahrzeuge – HEVs sind Fahrzeuge, die neben dem Verbrennungsmotor durch einen kleinen elektrischen Motor unterstützt werden. Dabei nutzen HEVs die Batterie und den Elektromotor im Wesentlichen für eine effizientere Fahrweise. So kann der batterieelektrische Antrieb beim Anfahren unterstützen und diese Energie zum Teil beim Bremsen wieder zurückgewinnen. Die Energie wird dazu in einer recht kleinen Batterie von ein bis zwei Kilowattstunden zwischengespeichert. So erlaubt ein HEV gerade im Stadtverkehr, den Verbrauch zu reduzieren. Durch die Anfahrtsunterstützung kann der Verbrennungsmotor kleiner ausgelegt werden. Die Energiebereitstellung in einem HEV-Konzept erfolgt jedoch lediglich über die Kraftstoffaufnahme an der Tankstelle. Je nach Batteriegröße wird das HEV zusätzlich in verschiedene Stufen eingeteilt: (i) „micro“, (ii) „mild“ und (iii) „full“. Als „micro“ wird das hinsichtlich Batteriegröße und Funktionalität kleinste HEV bezeichnet. Dieses besitzt im Wesentlichen eine Start-/Stopp-Funktionalität und erlaubt rekuperatives Bremsen; der Elektromotor wird jedoch nur

¹³⁷ Siehe für eine detaillierte Vorstellung der verschiedenen Konzepte auch Chan (2007).

zum Starten und nicht zum Antrieb verwendet.¹³⁸ Der „mild“-Hybrid erlaubt in der Regel, parallel den Verbrennungsmotor zu unterstützen, jedoch ist ein ausschließlich elektrischer Antrieb nicht möglich. Erst der „full“-Hybrid erlaubt, kleine Strecken voll-elektrisch zurückzulegen. Der Elektromotor wirkt bei HEVs dabei meistens parallel zum Verbrennungsmotor auf den Antriebsstrang, wodurch im Idealfall beide Motoren kleiner konzipiert werden können.

Plug-in-Hybride – PHEVs haben wie HEVs zwei Antriebssysteme und unterscheiden sich im Wesentlichen durch eine größere Batterie und einen Netzanschluss, womit die Batterie nicht nur durch Energierückgewinnung oder einen vorgeschalteten Verbrennungsmotor geladen wird, sondern auch eine externe Stromzufuhr über den Ladeinfrastrukturananschluss möglich ist. Verbrennungsmotor und Elektromotor können unterschiedlich im Antriebsstrang zusammenwirken. Generell sind serielle, parallele und parallel-serielle Systeme zu unterscheiden, bei denen der Verbrennungsmotor entweder mit einem Generator vor den Elektromotor (seriell) gesetzt wird oder beide Motoren zusammen (parallel) auf das Differential wirken. Parallel-serielle Systeme verbinden beide Motoren bspw. über ein Planetengetriebe, wodurch ein serieller und ein paralleler Betrieb ermöglicht wird.¹³⁹ Abhängig von der Batteriegröße und der Anwendung des Fahrzeugs sind unterschiedliche Antriebsarchitekturen zu wählen. Für Pkws wird meistens eine serielle Konfiguration genutzt, wodurch der Verbrennungsmotor kleiner ausgelegt werden kann. Bei PHEVs unterscheidet man im Wesentlichen drei Betriebsmodi: (i) das vollelektrische Fahren bei Entladung der Batterie, (ii) den Antrieb auf Basis des Verbrennungsmotors, wobei die Batterie wie im HEV-Konzept genutzt wird und Bremsenergie aufnehmen und zusätzliche Energie beim Anfahren abgeben kann; (iii) ein vom Fahrstil und der Fahrstrecke abhängiger Einsatz der beiden vorher genannten Betriebsmodi.¹⁴⁰ Bei einer leeren Batterie übernimmt der Verbrennungsmotor die Versorgung des Elektromotors mit Strom und ermöglicht dadurch, längere Fahrten zurückzulegen, wodurch PHEVs auch als „Range extender“ bezeichnet werden.¹⁴¹ Zur Versorgung beider Systeme müssen PHEVs sowohl an der Tankstelle Kraftstoff als auch an der Ladeinfrastruktur Strom aufnehmen. Über die größere Batterie können längere Strecken vollelektrisch zurückgelegt werden, wobei der Anteil der elektrisch zurückgelegten Fahrten als „elektrischer Fahranteil“ bezeichnet wird.¹⁴² PHEVs reduzieren ggü. HEVs den Treibstoffverbrauch nochmals deutlich, da auf den elektrisch zurückgelegten Strecken kein Kraftstoff, sondern der extern zugeführte Strom verbraucht wird. Der Verbrauch hängt dabei unmittelbar

¹³⁸ Vgl. Biermann (2007, S. 69 ff.).

¹³⁹ Für eine Darstellung der verschiedenen Hybridantriebsarchitekturen sei auf Ehsani et al. (2007, S. 720 ff.) verwiesen. Parallel-serielle Systeme sind auch als „Power-Split“ Konfiguration bekannt.

¹⁴⁰ Im Englischen werden die drei Modi, (i) „charge depleting“, (ii) „charge sustaining“, (iii) „blended“ genannt, siehe z. B. Bradley und Frank (2009).

¹⁴¹ Darüber hinaus existieren weitere Bezeichnungen und Abkürzungen, wie die des „extended-range electric vehicle (E-REV)“, die zum Teil herstellerspezifisch vergeben sind, im Wesentlichen aber ein PHEV bezeichnen.

¹⁴² Im Englischen auch als „utility factor“ bezeichnet, siehe u. a. Bradley und Quinn (2010).

von den zurückgelegten Strecken und der verfügbaren Infrastruktur ab. Im Extremfall sind PHEVs, (a) wenn nie Ladeinfrastruktur zur Verfügung steht, ICEs und (b) wenn nie außerhalb der elektrischen Reichweite bei regelmäßigen Ladungen gefahren wird, Elektrofahrzeugen gleichzusetzen. Aufgrund der zwei Antriebssysteme, die beide den Antrieb sichern müssen, ist die Auslegung des PHEV technisch aufwendig.

Batterieelektrische Fahrzeuge – EVs werden ausschließlich über elektrischen Strom betrieben, der an der Ladeinfrastruktur aufgenommen wird und die Batterie lädt. Der Elektromotor wird von der Batterie versorgt und treibt das Fahrzeug an. Elektrofahrzeuge können aufgrund nur eines Antriebskonzepts einfacher aufgebaut werden, müssen jedoch Herausforderungen hinsichtlich Reichweite und Batteriegröße meistern.

Für die weitere Analyse einer geeigneten Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität wird auf PHEVs und EVs fokussiert und die heutigen ICEs werden als Ausgangsbasis der Analysen herangezogen. Wichtige technische Parameter für die Ausgestaltung dieser drei Fahrzeuge sind die Leistung der beiden Motoren, die Batteriekapazität, die Strom- und Treibstoffverbräuche, die Ladeeffizienz sowie lebensdauerbestimmende Faktoren, wie die maximal möglichen Fahrzeugkilometer und die kalendarische Lebensdauer von Fahrzeug und Batterie. ICE und PHEV besitzen einen Verbrennungsmotor, wobei das PHEV aufgrund der elektrischen Antriebsunterstützung mit einem kleineren Verbrennungsmotor ausgestattet ist. Zusätzlich besitzt das PHEV, wie ein EV, einen elektrischen Motor, der im PHEV ein wenig kleiner ausgelegt werden kann, da energieintensivere Fahrtabschnitte durch den Verbrennungsmotor unterstützt werden können. Die ebenfalls bei PHEVs und EVs benötigte Batterie kann wiederum bei PHEVs kleiner dimensioniert werden und hängt insbesondere von der elektrisch zurückzulegenden Strecke ab. Vereinfachend wird für die weiteren Analysen davon ausgegangen, dass die Batteriekapazität in einem bestimmten Bereich verändert werden kann, ohne Auswirkungen auf die Fahrzeugarchitektur zu bewirken. Während dem Nutzer der Treibstoffverbrauch bei der Befüllung des Tanks bekannt ist, werden die elektrischen Verbräuche häufig am Motor angegeben. Dahingehend muss der Verbrauch um zusätzliche Nebenaggregate, wie z. B. Klimaanlage, erhöht und die Ladeeffizienz mit berücksichtigt werden. Für PHEVs wird kein durchschnittlicher Verbrauch für Treibstoff oder Strom angenommen, vielmehr resultieren die Verbräuche aus dem Fahrverhalten.¹⁴³ Des Weiteren wird die Lebensdauer des Fahrzeugs zum einen auf eine maximale Laufleistung und zum anderen auf eine Mindestanforderung an Betriebsjahren ausgelegt. Diese technischen Parameter sind im Folgenden zum Teil ökonomisch zu hinterlegen, um sie im Anschluss in eine Gesamtkostenrechnung zu überführen.

3.3.2 Anschaffungsausgaben und Betriebskosten

Zur Bewertung der verschiedenen Fahrzeugkonzepte sind die Kosten der jeweiligen Technologie zu bestimmen. Verschiedene Studien beschäftigen sich mit den Kosten herkömmlicher

¹⁴³ Siehe hierzu z. B. Kang und Recker (2009, S. 550 f.), Moawad et al. (2009, S. 6) oder Bradley und Quinn (2010).

Studie/Veröffentlichung	ICE	HEV	PHEV	EV	Beschreibung ^a
– Duvall (2002, S. A-13 ff.)	✓	✓	✓		Kosten einzelner Komponenten
– Delucchi und Lipman (2001)	✓			✓	Vergleich zweier baugleicher Ford als ICE und EV
– Markel und Simpson (2006)	✓	✓	✓		Gesamtkosten, insb. der Motoren und Batterie sowie der Kosten für Energie
– Kromer und Heywood (2007, S. 117 ff.)		✓	✓	✓	Zusätzliche <u>Herstellungskosten</u> einzelner Komponenten
– Concauwe et al. (2008)	✓	✓			Kosten einzelner Komponenten
– Bandivadekar et al. (2008, S. 36)	✓	✓	✓	✓	Zusätzliche <u>Herstellungskosten</u> einzelner Komponenten
– Nemry et al. (2009a)	✓	✓	✓		Vergleich verschied. Kostenangaben US-amerikanischer und europäischer Studien
– Biere et al. (2009)	✓	✓	✓	✓	Mehrkosten und technische Ausgestaltung von vier Fahrzeugtypen
– Thiel et al. (2010)	✓		✓	✓	Kostenvergleich mit mehreren ICEs unter Berücksichtigung von Lernraten
– Offer et al. (2010, S. 26)	✓			✓	Gesamtkostenvergleich, insb. Kosten für Motor und Batterie
– Coalition Study ^b	✓		✓	✓	Gesamtkostenvergleich, insb. Kosten für Wasserstofffahrzeuge

^a Als Kosten werden, sofern nicht anders angegeben, die Kosten aus Kundensicht also Verkaufspreise aus Herstellersicht angegeben.

^b Vgl. BMW AG et al. (2010).

Anmerkung: ✓ = die Studie/Veröffentlichung behandelt dieses Fahrzeugkonzept.

Tabelle 3.3 – Literaturüberblick Kostenangaben zu alternativen Antrieben.

und zukünftiger Antriebe. Dabei werden die Kosten aus Kundensicht bzw. Verkaufspreise aus Herstellersicht angegeben. Eine Auswahl verschiedener Studien, die sich mit einer ökonomischen Bewertung elektromobiler Antriebskonzepte beschäftigen, zeigt Tabelle 3.3. Nur wenige Studien berücksichtigen dabei alle Fahrzeugkonzepte, sondern konzentrieren sich entweder auf Hybridfahrzeuge oder EVs. Mal werden die Mehrkosten gegenüber ICEs dargestellt, mal die Gesamtkosten. Die meisten Studien fokussieren auf Anschaffungsausgaben, andere berücksichtigen auch Betriebskosten und stellen die Gesamtkosten der jeweiligen Fahrzeugkonzepte gegenüber. Zur Ermittlung der gesamten Mehrkosten betrachten alle Studien einzelne Fahrzeugkomponenten. Die Begriffe sind jedoch nicht deckungsgleich und beziehen zum Teil angrenzende Bauteile mit ein, so beinhaltet der Antriebsstrang bspw. zum Teil den Motor.

Für die ökonomische Bewertung ist zwischen Anschaffungsausgaben und Betriebskosten zu unterscheiden. Die Anschaffungsausgaben können dabei auf einzelne Komponenten heruntergebrochen werden. Analog zu Concauwe et al. (2008) und Biere et al. (2009) wird auf folgende Einzelkomponenten fokussiert: Tank, Starter, Verbrennungsmotor, Elektromotor, Hybridantriebsstrang und das Batteriesystem. Der restliche, durch die vorherigen Komponenten nicht

abgedeckte Teil des Fahrzeugs wird hier als Chassis bezeichnet und kann ausgehend von einem bestimmten Fahrzeug durch Rückrechnung bestimmt werden. Das Chassis dient somit allen Fahrzeugkonzepten, egal ob ICE, PHEV oder EV als Ausgangsbasis. Tank, Starter und Verbrennungsmotor werden nur in einem ICE oder PHEV eingesetzt; Elektromotor und Batterie in einem PHEV und EV. Das PHEV benötigt darüber hinaus noch einen komplexeren Antriebsstrang, der den Verbrennungsmotor in Serie hinter die Batterie setzt und beide Kräfte zusammen auf die Achse überträgt. Die Dimensionierung von Motoren und Batterie ist gemäß den technischen Anforderungen vorzunehmen. Für die Kosten werden im Wesentlichen die Angaben aus Concauwe et al. (2008) benutzt, die für den Tank 125 €, für den Starter 300 €, für den Verbrennungsmotor 30 €/kW und für den elektrischen Motor 27 €/kW nennen.¹⁴⁴ Der Hybridantriebsstrang ist ausgehend von den Angaben zu HEVs auf PHEVs zu skalieren, wobei insb. die Motorsteuerung und der Starter herauszurechnen sind. Für eine Detaillierung der Batteriesystemkosten sei auf Abschnitt 3.4 verwiesen. Außerdem sind Betriebskosten zu berücksichtigen, zu denen insb. die Wartungskosten und die Kosten für Strom und Treibstoff zählen. Wartungskosten für den elektrischen Antriebsstrang werden von verschiedenen Studien als günstiger angegeben, da zum einen mechanische Verschleißteile wegfallen und zum anderen Wartungsschritte wie Ölwechsel etc. nicht durchzuführen sind.¹⁴⁵ Die günstigeren Wartungskosten können jedoch in der frühen Marktphase realisiert werden. Des Weiteren berücksichtigen die o. g. Studien häufig keine Wartungen des batterieelektrischen Systems oder reduzieren die Wartungskosten für noch vorhandene Komponenten, wie bspw. dass in den meisten EVs aus Sicherheitsgründen noch zusätzliche Bremscheiben existieren. So wird hier vereinfachend von gleichen Wartungskosten ausgegangen.¹⁴⁶

3.3.3 Referenzfahrzeug

Für die einheitliche weitere Analyse wird ein Vergleichsfahrzeug auf Basis eines Golf TSI 1.2l mit 77 kW definiert. Dieses entspricht in etwa den Leistungswerten des neueren ICE-Fahrzeugs aus Concauwe et al. (2008). Der PHEV kann mit einem kleineren Verbrennungsmotor ausgestattet werden (41 kW) und benötigt dafür jedoch einen Elektromotor in annähernd ursprünglicher Größe (68 kW). Ein EV benötigt ausschließlich einen Elektromotor, der jedoch die volle Leistung bereitstellen muss (75 kW).¹⁴⁷ PHEVs und EVs benötigen des Weiteren eine Batterie. PHEVs können dabei mit unterschiedlichen Batteriegrößen ausgelegt werden, wobei eine Mindestkapazität von 4 kWh zur Ermöglichung des ausschließlichen elektrischen Antriebs erforderlich ist und bis zu 30 kWh reichen kann. Ab dieser Batteriekapazität lässt sich ein vollelektrischer Betrieb ermöglichen.¹⁴⁸ Die minimale Batteriekapazität eines EVs mittlerer

¹⁴⁴ Alle Angaben beinhalten eventuelle Margen und Steuern.

¹⁴⁵ Vgl. Duvall (2004), Werber et al. (2009) oder Wietschel et al. (2010).

¹⁴⁶ Vgl. auch Scott et al. (2007).

¹⁴⁷ Für die verschiedenen Motorleistungen für PHEV und EV vergleiche Biere et al. (2009).

¹⁴⁸ Vergleiche auch Nemry et al. (2009a). Da die Funktionalität des PHEVs bei jeder Batteriegröße gewährleistet ist, ist aufgrund der hohen Batteriekosten in Abwägung des elektrischen Fahranteils aus ökonomischer Sicht eine optimale Batterieauslegung wünschenswert. Für eine dahingehende Analyse siehe auch Abschnitt 5.4 bzw. Karlsson (2009).

Fahrzeugcharakteristika				ICE	PHEV	EV
Technische Parameter	Leistung Verbrennungsmotor	[kW]	P^{ICE}	77 ^a	41 ^b	
	Leistung Elektromotor	[kW]	P^{EM}		68 ^b	75 ^b
	Batteriekapazität	[kWh]	κ		4–30 ^c	30 ^d
	Stromverbrauch	[kWh/km]	u^E			0,18 ^e
	Ladeeffizienz	[%]	η^{ch}			84% ^f
	Treibstoffverbrauch	[l/km]	u^F	0,06 ^g		
	Max. Fahrzeugkilometer	[km]	M		200.000 ^h	
	Lebenserwartung Fahrzeug	[a]	T^V		12 ⁱ	
Lebenserwartung Batterie	[a]	T^B			12 ⁱ	
Anschaffungs- ausgaben	Chassis	[€]	I^V		16.825 ^j	
	Tank	[€]	I^{Ta}	125 ^a		
	Starter	[€]	I^{St}	300 ^a		
	Verbrennungsmotor	[€/kW]	I^{ICE}	30 ^a		
	Elektromotor	[€/kW]	I^{EM}		27 ^a	
	Hybridantriebsstrang	[€]	I^{Hy}		1.500 ^k	
	Batteriesystem	[€/kWh]	I^B		150–750 ^l	
Betriebskosten	Wartungskosten	[€/a]	c^{OM}		300 ^m	
	Strom	[€/kWh]	c^E		0,20 ⁿ	
	Treibstoff	[€/l]	c^F	1,40 ⁿ		

^a Vgl. Concawe et al. (2008).

^b Vgl. Biere et al. (2009).

^c Vgl. Nemry et al. (2009a, S. 13), wonach eine minimale Batteriekapazität von 4 kWh benötigt wird, um einen PHEV-Betrieb zu ermöglichen; ab 30 kWh kann ein vollelektrischer Betrieb erfolgen.

^d Minimale Batteriekapazität, um bei einem DOD-Hub von 60 %, also einer nutzbaren Batteriekapazität von 18 kWh, eine Reichweite von 100 km zurücklegen zu können. Kleinere und Nischenfahrzeuge können davon ggf. abweichen. Im Folgenden wird alternativ auch von einer Batteriekapazität von 24 kWh für die ersten Elektrofahrzeuge ausgegangen.

^e Bisherige Studien geben für ein elektrisches Mittelklassefahrzeug einen Mindestverbrauch von 14 kWh/100 km an, je nach Strecke und den weiteren Nebenverbrauchern sind jedoch deutliche höhere Verbräuche von im Durchschnitt bis zu 20 kWh/100 km anzusetzen, siehe hierzu z. B. Helms und Hanusch (2010, S. 12).

^f Bei zugrunde gelegtem Ladewirkungsgradverlust von 5 %, Batterieselbstentladung von 7 % und Verlust im elektrischen Motor von 4 %, siehe hierzu z. B. Mazza und Hammerschlag (2005).

^g Siehe z. B. Bodek und Heywood (2008), die den Verbrauch von neuen, effizienten Fahrzeugen der Mittelklasse im Durchschnitt mit 6 l/100 km angeben.

^h Mindestens zu erreichende Laufleistung eines Fahrzeugs.

ⁱ Heutige Fahrzeuge haben eine Lebenserwartung von 10–15 Jahren, daher wurde die Lebenserwartung auf zwölf Jahre gesetzt. Für die kalendarische Alterung der Batterie siehe auch Abschnitt 3.4.

^j Restliche Kosten eines Fahrzeugs ohne die antriebssystemspezifischen Komponenten. Ausgehend von einem VW Golf TSI 1.21 mit 77 kW, der gemäß Preisliste 19.560 € kostet, sind 2.310 € für den Verbrennungsmotor sowie Tank und Starter abzuziehen, sodass für das Chassis Kosten von 16.825 € zu veranschlagen sind.

^k Siehe Biere et al. (2009), die abgeleitet von Concawe et al. (2008) die für HEVs angegebenen Kosten für den Hybridantriebsstrang auf PHEVs herunterskalieren. Dabei gibt Concawe et al. (2008) für HEV die Kosten inkl. Motorsteuerung und Starter an, was herausgerechnet wurde. Vgl. auch Kromer und Heywood (2007), die für den Hybridantriebsstrang von PHEVs Herstellkosten von 300 US\$ angeben.

^l Siehe hierzu Abschnitt 3.4.

^m Wartungskosten werden für EVs aufgrund weniger mechanischer Verschleißteile und wegfallender Ölwechsel häufig als geringer angegeben, siehe hierzu Duvall (2004), Werber et al. (2009) oder Wietschel et al. (2010). Die günstigeren Wartungskosten können in der frühen Marktphase vermutlich nicht realisiert werden. Des Weiteren berücksichtigen die o. g. Studien häufig keine Wartungen des batterieelektrischen Systems oder reduzieren die Wartungskosten für noch vorhandene Komponenten, wie z. B. in den meisten EVs aus Sicherheitsgründen noch zusätzlich existierender Bremscheiben. So wird hier vereinfachend von gleichen Wartungskosten ausgegangen, vgl. auch Scott et al. (2007).

ⁿ Heutige Endkundenpreise für Strom und Treibstoff.

Tabelle 3.4 – Technische und ökonomische Parameter des Referenzfahrzeugs.

Größe muss aufgrund des nutzbaren Bereichs und des elektrischen Verbrauchs auf mindestens 30 kWh ausgelegt sein. Für den elektrischen Antrieb wird aufgrund zusätzlicher Verbräuche der Nebenaggregate ein höherer Stromverbrauch von 18 kWh/100 km angenommen.¹⁴⁹ Der Treibstoffverbrauch eines neuen, effizienten Fahrzeugs wird, wie von Bodek und Heywood (2008) gezeigt, auf 6l/100 km festgelegt. Für die Beladung der Batterie ist zusätzlich die Ladeeffizienz zu berücksichtigen, die hier Ladewirkungsgrad (95 %), Batterieselbstentladung (93 %) sowie den Wirkungsgrad des elektrischen Motors (96 %) umfasst und insgesamt mit 84 % anzugeben ist.¹⁵⁰ Für die Lebenserwartung der Fahrzeuge wird eine Fahrleistung von maximal 200.000 km sowie eine Lebensdauer des Fahrzeugs und der Batterie von zwölf Jahren angenommen.¹⁵¹ Diese Parameter sind im oberen Teil von Tabelle 3.4 zusammengefasst.

Ausgehend vom Referenzfahrzeug und den genannten Kosten, ist das Chassis mit einem Preis von 16.825 € zu bestimmen.¹⁵² Tank, Starter und Motoren werden gemäß den Angaben aus Concauwe et al. (2008) verwendet. Für den Hybridantriebsstrang wurden der für HEVs gesetzte Wert gemäß Biere et al. (2009) auf die Leistungen der seriell hintereinander geschalteten Motoren skaliert sowie die von Concauwe et al. (2008) einbezogene Motorsteuerung und Starter herausgerechnet, womit der Hybridantriebsstrang mit 1.500 € kalkuliert wird. Die Kosten des Batteriesystems sind ein wesentlicher Bestandteil der Gesamtkosten und aufgrund der Unsicherheit in der weiteren Kostenentwicklung wird kein einzelner Wert angenommen, sondern im Folgenden mit verschiedenen Szenarien für Batteriesystemkosten zwischen 150 und 750 €/kWh gerechnet. Für die Betriebskosten werden Wartungskosten von 300 € angenommen und für Strom und Treibstoff die heutigen Endkundenpreise von 0,20 €/kWh bzw. 1,40 €/l herangezogen. Die Anschaffungsausgaben und Betriebskosten sind im unteren Teil von Tabelle 3.4 dargestellt. Alle Angaben beinhalten die Umsatzsteuer sowie Treibstoff- und Stromsteuern. Für das diskutierte Referenzfahrzeug sind in Anhangstabelle A.1 für die heutigen Werte neben den Bruttoangaben auch die Nettowerte dargestellt. Außerdem findet sich in dieser Tabelle eine weitere Anpassung auf Basis einer möglichen Kostenentwicklung einzelner Komponenten für ein zukünftiges Fahrzeug. Neben dem Referenzfahrzeug findet sich in Anhangstabelle A.2 ein Analyse für ein weiteres, kleineres Fahrzeug.

3.4 Batterien

Es stehen eine Vielzahl von Elektroenergiespeichern zur Verfügung, die in mechanische, elektrochemische und elektrische Speicher eingeteilt werden können.¹⁵³ Dabei sind für den Ein-

¹⁴⁹ Bisherige Studien geben für ein elektrisches Mittelklassefahrzeug einen Mindestverbrauch von 14 kWh/100 km an, je nach Strecke und den weiteren Nebenverbrauchern sind jedoch deutliche höhere Verbräuche von im Durchschnitt bis zu 20 kWh/100 km anzusetzen, siehe hierzu z. B. Helms und Hanusch (2010, S. 12).

¹⁵⁰ Vgl. Mazza und Hammerschlag (2005).

¹⁵¹ Heutige Lebenserwartungen der Fahrzeuge liegen zwischen 10–15 Jahren. Für die kalendarische Lebenserwartung der Batterie sei auf Abschnitt 3.4 verwiesen.

¹⁵² Gemäß Preisliste kostet das Referenzfahrzeug, ein Golf TSI 1,2l mit 77 kW Motor, 19.560 € inkl. Steuern, von dem der Tank mit 125 €, der Starter mit 300 € und der Motor mit 2.310 € abzuziehen sind.

¹⁵³ Vgl. z. B. Hannig et al. (2009, S. 12 ff.).

satz in Elektrofahrzeugen insbesondere elektrochemische Energiespeicher geeignet, wozu im Wesentlichen Akkumulatoren, Flussbatterien sowie Brennstoffzellen zählen. Akkumulatoren bezeichnen dabei wiederaufladbare, elektrochemische Speicher, die durch externe Stromzuführung (Aufladen) elektrische Energie wieder in chemische Energie umwandeln können. In Flussbatterien ist der Energieträger der Elektrolyt, der in gelöster Form vorliegt und außerhalb der Zelle in Tanks gespeichert wird, wodurch Energiemenge und Leistung unabhängig voneinander sind und damit eine schnelle Energiebereitstellung ermöglicht wird. Eine Brennstoffzelle wandelt die chemische Reaktionsenergie aus einem zugeführten Brennstoff, wie z. B. Wasserstoff, und eines Oxidationsmittels, wie z. B. Luft, in elektrische Energie um.¹⁵⁴ Für die weiteren Betrachtungen wird auf Energiebereitstellung aus einem Akkumulator fokussiert. Da im Sprachgebrauch für den Akkumulator häufig der Oberbegriff Batterie verwendet wird und das Englische ebenfalls im Wesentlichen das Wort „batteries“ nutzt¹⁵⁵, wird im Folgenden der Einfachheit halber von Batterien gesprochen.

Zunächst werden die verschiedenen Anforderungen an die Batterie für den Fahrzeugeinsatz betrachtet und dahingehend die verfügbaren Batterietechnologien vorgestellt sowie die Kostenentwicklung betrachtet. Anschließend werden die Alterungseinflüsse und die damit zusammenhängenden Restwerte und Zweitnutzungsmöglichkeiten beleuchtet. Abschließend wird für die weiteren Analysen eine Referenzbatterie definiert.

3.4.1 Anforderungen und Kapazitierung

Die Anforderungen an Batterien für Elektrofahrzeuge sind in fünf Kategorien einzuordnen: (i) Leistungs- und (ii) Energiedichte¹⁵⁶, (iii) Langlebigkeit, (iv) Sicherheit und (v) Kosten¹⁵⁷.

Eine hohe Spitzenleistung sowie eine hohe gravimetrische *Leistungsdichte* werden zur Beschleunigung des Fahrzeugs benötigt und hängen damit insbesondere auch von der Fahrzeugmasse ab. Mehr in der Batterie zu speichernde Energie bzw. eine höhere *Energiedichte* ermöglicht einen längeren Batteriebetrieb und damit eine längere elektrische Reichweite.

Für den Fahrzeugeinsatz ist des Weiteren eine hohe *Langlebigkeit* der Batterie erwünscht. Die alterungsbegünstigenden Faktoren werden später im Einzelnen betrachtet, es können jedoch bereits hier drei Anforderungskriterien hinsichtlich der Batterielanglebigkeit definiert werden: So setzt man (a) eine gewisse Lebensdauer in Jahren, (b) eine mögliche Mindestanzahl an Tiefentladungen, die bei PHEVs und EVs im vollelektrischen Betrieb anfallen, sowie (c) eine mögliche Anzahl an niedrigen Batterieent-/beladungen, die bei HEVs und PHEVs im Hybridmodus auftreten, voraus. Für die Alterung muss gemäß den Angaben von Pesaran et al. (2007, S. 9), Kromer und Heywood (2007, S. 30 ff.) und Duvall (2002, S. 2-5) eine Batterie eine kalendarische Alterung von mehr als zehn Jahren aufweisen und mindestens 1.000

¹⁵⁴ Siehe hierzu auch Larminie und Dicks (2003).

¹⁵⁵ Akkumulatoren werden im Englischen als „rechargeable batteries“ spezifiziert.

¹⁵⁶ Insbesondere sind die gravimetrischen Dichten, also bezogen auf das Gewicht des Batteriesystems, für den Fahrzeugeinsatz von Interesse. Im Folgenden wird auf den Zusatz „gravimetrisch“ jedoch verzichtet.

¹⁵⁷ Vgl. Axsen et al. (2010), der die Anforderungen der folgenden Studien zusammenstellt: Pesaran et al. (2007), Kromer und Heywood (2007) und Duvall (2002).

Technische Parameter		PHEV			EV
		kl.	mit.	gr.	
Batteriekapazität ^a	[kWh]	4	14	24	30
Leistung des el. Motors ^a	[kW]	50	60	68	75
Max. Gewicht des Batteriesystems ^b	[kg]	50	125	200	250
Min. Energiedichte	[Wh/kg]	80	112	120	120
Min. Leistungsdichte	[W/kg]	1.000	480	340	300

^a Vgl. Abschnitt 3.3.3, des Weiteren wurden verschiedene Größen eines PHEV angenommen.

^b Vgl. Axsen und Burke (2008, S. 7).

Tabelle 3.5 – Anforderungen an Energie- und Leistungsdichten.

Tiefentladungen sowie 200.000 Kurzentladungen zulassen.

Um die *Sicherheit* zu gewährleisten, sind Maßnahmen zu treffen, sodass das elektrochemische System zu jeder Zeit kontrollierbar ist und kein Kurzschluss mit eventuellem Entflammen stattfindet. So sind die Batterien zum einen mit einem Batteriemanagementsystem ausgestattet, das die kritischen Parameter überwacht und damit bspw. eine Kühlung einzelner Zellen vornehmen kann; zum anderen muss bei einem Unfall die Batterie in derart geschützt werden können, dass sich diese nicht spontan in Brand setzt oder eventuell giftige Chemikalien austreten. Des Weiteren unterscheiden sich die verschiedenen Batteriechemien in ihrem Reaktionsvermögen sowie hinsichtlich ihres Temperaturverhaltens. Für automobiler Anwendungen kommt deshalb nur ein Teil der zur Verfügung stehenden Batterien in Frage.

Als weiteres Kriterium werden die *Batteriekosten* genannt, die gegenüber den heutigen Kosten wesentlich gesenkt werden müssen, damit das Elektrofahrzeug vergleichbare Kosten zu anderen Antriebskonzepten aufweist. Die Batterie als teuerster Bestandteil im elektrischen Antrieb muss dahingehend auch einen wesentlichen Teil zur Kostensenkung beitragen.

Die Herausforderung ist es nun, eine geeignete Batterie so auszugestalten, dass die Anforderungen in allen fünf Kategorien vergleichbar erfüllt werden. Eine Batterie, die nur in Teilen die dargestellten Anforderungen erfüllt, ist für den Einsatz entweder aufgrund zu geringen Beschleunigungsvermögens, einer zu kleinen Reichweite, zu häufigen Austauschs, häufiger Sicherheitsprobleme oder zu hoher Kosten nicht geeignet. Für das oben definierte Referenzfahrzeug lassen sich die benötigten Energie- und Leistungsdichten ermitteln, siehe hierzu Tabelle 3.5. Für ein PHEV muss je nach Batteriegröße eine Energiedichte von mindestens 80–120 Wh/kg ermöglicht werden und eine Leistungsdichte von mindestens 340–1.000 W/kg. Ein EV benötigt eine Energiedichte von mindestens 120 Wh/kg und eine etwas geringere Leistungsdichte von mindestens 300 W/kg.

3.4.2 Batterietechnologien

Für den Einsatz im Fahrzeug sind heute im Wesentlichen drei Batterietechnologien verfügbar: Blei-Säure-, nickel-basierte und lithium-basierte Batterien¹⁵⁸, die kurz vorgestellt werden:

¹⁵⁸ Vgl. z. B. Axsen und Burke (2008, S. 12 ff.), Warrier et al. (2009, S. 55 ff.) und Hannig et al. (2009, S. 17 ff.).

Blei-Säure-Batterien können hohe Leistungen bereitstellen und erreichen dabei einen hohen Wirkungsgrad. Sie sind aufgrund der technischen Reife und des benötigten Bleis und Bleidioxids relativ günstig. Außerdem zeichnen sich die Blei-Säure-Batterien durch einen geringen Wartungsbedarf sowie ihre Zuverlässigkeit und Sicherheit aus. Jedoch besitzen diese Batterien eine niedrige Energiedichte und degradieren schnell bei wiederholter Tiefentladung. Aufgrund dieser Eigenschaften werden Blei-Säure-Batterien insb. als Starterbatterien in Fahrzeugen und in der Notstromversorgung eingesetzt.

Nickel-basierte Batterien werden mit Cadmium oder mit einem Metallhydrid kombiniert. Nickel-Cadmium (NiCd)-Batterien können relativ günstig hergestellt werden, sind zuverlässig und weisen aufgrund des breiten Temperatureinsatzbereichs lange Lebensdauern auf. Jedoch haben NiCd-Batterien eine geringe Energiedichte und eine hohe Selbstentladung, der auftretende Memory-Effekt¹⁵⁹ und das giftige Cadmium machen den Einsatz in Fahrzeugen unwahrscheinlich.

Nickel-Metallhydrid (NiMH)-Batterien haben zwar eine ähnlich hohe Selbstentladung, jedoch keinen Memory-Effekt. Aufgrund der eingesetzten Materialien sind NiMH-Batterien besonders robust und umweltfreundlich. Höhere Energiedichten im Vergleich zur Blei-Säure- und NiCd-Batterie ermöglichen den Einsatz in HEVs. Tiefentladungen verringern jedoch deutlich die Lebenserwartungen, sodass der Einsatz als Antriebsbatterie in einem PHEV als nicht sinnvoll zu erachten ist. Die Kosten der NiMH-Batterien sind vergleichsweise hoch und können durch den bereits weitverbreiteten Einsatz der Batterie nicht mehr signifikant reduziert werden.

Lithium-basierte Batterien können auf verschiedenen Elektrodenmaterialien beruhen, in denen sich Lithium-Ionen einlagern, die bei Ent-/Beladung zwischen den Elektroden wandern. Lithium-Ionen (Li-Ion)-Batterien weisen eine hohe Energiedichte, eine geringe Selbstentladung und keinen Memory-Effekt auf. Lithium zeigt jedoch mit Wasser oder Sauerstoff eine hohe Reaktivität, sodass versucht wird, durch verschiedene Elektrolyt- und Elektrodenmaterialien Li-Ionen-Batterien sicherer und stabiler zu machen. Um die Sicherheit im Fahrzeugeinsatz zu gewährleisten, muss ein Batteriemanagementsystem die Batterie in einem engen Toleranzbereich halten. Der Einsatz anderer Elektrodenmaterialien, wie Eisenphosphor oder Manganoxid, kann helfen, die Reaktivität zu reduzieren, jedoch nicht ohne die Energiedichte zu beeinflussen.¹⁶⁰ Aufgrund dieser Anforderungen und der teils teuren Materialien sind diese Batterien noch recht kostenintensiv. Die hohe Energiedichte lässt aber auch den Einsatz in PHEVs und EVs zu.

Neben den genannten existieren zudem Hochtemperaturbatterien, wie z. B. Natrium-Schwefel- oder Natrium-Nickelchlorid¹⁶¹-Batterien, die bei Betriebstemperaturen jenseits von 300 °C arbeiten. Diese Batterien zeichnen sich in dem Temperaturbereich durch hohe Leitfähigkeit

¹⁵⁹ Für eine Beschreibung des Memory-Effekts siehe Jossen et al. (2001).

¹⁶⁰ Vgl. u. a. Burke (2007). Ein Überblick über die verschiedenen Lithium-Ionen-Batteriechemien kann Axsen und Burke (2008, S. 18) entnommen werden.

¹⁶¹ Auch Zebra-Batterie genannt.

Technische Parameter		Batterien			
		Blei-Säure ^a	NiCd ^b	NiMH	Li-Ion
Energiedichte	[Wh/kg]	25	30–37	75	150
Leistungsdichte	[qualitativ]	Mittel-hoch	Hoch	Mittel-hoch	Mittel-hoch
Selbstentladung ^c	[%]	4–6	10	15–25	2
Kalendarische Alterung	[a]	6	3–10	2–5	nicht geg.
Tiefentladungen	[#]	1.500	500–2.000	300–600	1.000+

^a Batterie des Typs „traction“.

^b Batterie des Typs „vented sintered plate“.

^c Bei 20 °C über die Dauer eines Monats.

Quelle: Linden und Reddy (2002, S. 22.12 f.).

Tabelle 3.6 – Technische Parameter verschiedener Batterietechnologien.

und kaum auftretende Nebenreaktionen aus. Kühlt die Batterie jedoch ab, tritt eine starke Degradation ein.¹⁶² Daher eignen sich diese Batterien für den stationären jedoch weniger für den Einsatz in einem Elektrofahrzeug.

Vergleicht man die vorgestellten Batterien anhand ihrer Parameter: Energie- und Leistungsdichte, Selbstentladung, kalendarische Alterung und mögliche Tiefentladezyklen, siehe Tabelle 3.6, mit den in Tabelle 3.5 detaillierten Fahrzeuganforderungen, so sind insb. lithium-basierte Batterien hinsichtlich der Energie- und Leistungsdichten für den Einsatz in PHEVs und EVs geeignet.¹⁶³ Jedoch reagieren lithium-basierte Batterien im Vergleich zu NiMH-Batterien schneller und müssen daher mittels des Batteriemanagementsystems überwacht werden, sodass Langlebigkeit und Sicherheit gewährleistet werden können.¹⁶⁴

3.4.3 Kostenentwicklungen

Um die Kosten von Batterien im Allgemeinen und Li-Ionen-Batterien im Speziellen zu beleuchten, ist zum einen der Aufbau der Batterie in Zellen, Module und der Batterie als Ganzes zu berücksichtigen und zum anderen in die einzelnen Materialien, die Montage und weitere Kostenbestandteile zu differenzieren.¹⁶⁵ Insbesondere ist beim Kostenvergleich darauf zu achten, dass die Kosten für die gleiche Aufbaustufe verglichen werden. Für die Bewertung im Rahmen der Elektromobilität sind insbesondere die Gesamtkosten der Batterie von Interesse, die aus mehreren Batteriemodulen besteht und sich wiederum aus mehreren Zellen, sowie den elektrischen Verbindungen, den Halterungen und dem Batteriemanagementsystem zusammensetzt. Verglichen zu den Zellkosten ist mit einem Aufpreis von etwa 25 % zu rechnen, wie Anderson (2009) angibt. Den größten Anteil der Batteriekosten machen die Rohmaterialien aus, die etwa 85 % des Wertes auf Zellebene und 75 % des Wertes auf Batterieebene

¹⁶² Vgl. auch Hannig et al. (2009, S. 19).

¹⁶³ Vgl. hierzu auch die von Kalhammer et al. (2007, S. 25) genutzten Ragone-Diagramme, die Energie- und Leistungsdichten von Batterien gegeneinander auftragen und typische Batteriechemien darin gegenüberstellen.

¹⁶⁴ Vgl. insb. Kalhammer et al. (2007).

¹⁶⁵ Vgl. z. B. Anderson (2009, S. 16 ff.), der die Angaben von Anderman et al. (2000) und Kalhammer et al. (2007) um Herstellerangaben auf Interviewbasis erweitert. Dennoch merkt auch er an, dass die Hersteller relativ verschlossen sind und kaum Informationen zu Materialkosten und Entwicklungen angeben.

entsprechen. Bei den Rohmaterialien dominieren die Kathoden- (ca. 30 %) und die Anodenmaterialien (ca. 8 %). Dazu kommt bei heutigen Produktionsprozessen ein großer Anteil an Qualitätsausschuss, der mit etwa 40 % angegeben wird. Auf Basis dieses Kostenaufwisses in verschiedene Aufbaustufen und Kostenbestandteile kann eine detaillierte Analyse des möglichen Kostenentwicklungspotenzials erfolgen. Anderson (2009, S. 23) entwickelt daraus heutige Kosten von 500–900 US\$/kWh und erwartet im besten Fall eine mögliche Reduktion auf bis zu 250 US\$/kWh im Jahre 2030. Einen ähnlichen Kostenaufwris geben auch Anderman et al. (2000, S. 59 f.) für Module an und sehen für diese „in der nächsten Zeit“ keine Modulkosten von unter 300 US\$/kWh. Diese Einschätzung bestätigt eine aktuelle Stellungnahme von Anderman (2010) nochmals, in der ein Kostenziel von 500–700 US\$/kWh für 2015 und eines von 375–500 US\$/kWh für 2020 als möglich erachtet wird. Ebenso nimmt die Nationale Plattform Elektromobilität (2011) ein Kostenziel von 280 € für 2020 an. Mögliche Kostenreduktionen identifizieren u. a. Wery und Derriennic (2010) durch Skaleneffekte, Materialverbesserungen, Standardisierung sowie effizienten Einkauf.¹⁶⁶ Um die Kosten aus Kundensicht anzugeben, ist ferner die Vertriebsstruktur der Batterien entscheidend. Übernehmen Zwischenhändler oder dritte Anbieter die Vertriebsfunktion, so fällt eine zusätzliche Marge für die Geschäftstätigkeit dieser Unternehmen an, die Gaines und Cuenca (2000, S. 34 f.) mit Zuschlägen von 15–25 % angeben. Des Weiteren geben Ritchie und Howard (2006) an, dass unterschiedliche Batteriechemien einen Einfluss auf die Batteriekosten haben. Günstigere Batteriechemien erfüllen jedoch nicht zwangsläufig die oben genannten Anforderungskriterien zum Einsatz im Fahrzeug. Aufgrund der breiten Entwicklungsmöglichkeiten der Batteriekosten und der Vielzahl unterschiedlicher Treiber und Einflüsse wird für die weitere Analyse eine Bandbreite an Batteriekosten von 750 bis zu 150 €/kWh angenommen, wobei die heutigen Kosten noch im oberen Bereich von 600–750 €/kWh und Kostenziele für 2020 bei etwa 250–300 €/kWh liegen.¹⁶⁷

3.4.4 Alterung

Aufgrund der hohen Batteriekosten sind ein Austausch der Batterie zu vermeiden sowie die verfügbare Kapazität und die Funktionalität für den Einsatz im Fahrzeug zu gewährleisten. Daher ist die Berücksichtigung von Abnutzungs- und Alterungseffekten, sofern diese die Einsatzmöglichkeiten der Batterie einschränken können, essenziell. Da eine Batterie nicht den binären Zustand einsetzbar oder nicht funktionsfähig annimmt, ist zunächst das Gebrauchsende zu definieren. Dahingehend werden die Alterungsfaktoren betrachtet und Modellierungsansätze der Alterung vorgestellt, sodass deren Auswirkungen antizipiert werden können. Anschlie-

¹⁶⁶ Siehe hierzu Wery und Derriennic (2010, S. 11), die bis 2020 für die Zelle Kostenreduktionen von 25 % durch Skaleneffekte und Qualitätsverbesserungen, 15 % durch Erhöhung der Energiedichte, 10 % durch die Standardisierung der Zellgröße und nochmals 15 % durch Verbesserungen im Einkauf und der Lieferkette angeben. Dadurch sinken die heutigen Kosten von 640 auf 225 US\$/kWh. Für die zusätzlichen Kosten auf Batterieebene, die heute bei etwa 160 US\$/kWh liegen, können 20 % durch eine optimierte Produktion, 5 % durch Materialverbesserungen, 10 % durch Standardisierung und 5 % durch einen effizienten Einkauf eingespart werden, wodurch sich die Kosten auf 100 US\$/kWh reduzieren lassen. Die Batteriekosten könnten somit von insgesamt 800 US\$/kWh bis 2020 auf 325 US\$/kWh sinken.

¹⁶⁷ Umrechnung in € auf Basis des folgenden Wechselkurses: 1 US\$ = 0,74 €.

ßend werden die Zyklen-, die temperaturbedingte und kalendarische Alterung betrachtet und der kapazitive Alterungsbegriff der ökonomischen Auswirkung gegenübergestellt.

3.4.4.1 Definition: Gebrauchsende der Batterie

Das Gebrauchsende der Batterie, oder im Englischen „end of useful life“ (EOL), wird häufig in Abhängigkeit der Batteriekapazität gegeben. So wird, wie u. a. von Wenzl (2010) beschrieben, das Gebrauchsende der Batterie in einer messbaren Größe bei einer noch zur Verfügung stehenden Batteriekapazität von 80 % definiert.¹⁶⁸ In speziellen Anwendungen können jedoch auch niedrigere Batteriekapazitäten von z. B. 60 % als Gebrauchsende sinnvoll sein. Jedoch geht man davon aus, wie Wenzl darstellt, dass die Rate des Kapazitätsverfalls sehr schnell ansteigt, sobald eine niedrige Kapazität erreicht wurde. Bei der Konzentration auf einen einzigen Wert ist jedoch zu beachten, dass auch andere Faktoren den Einsatz der Batterie im Fahrzeug verhindern können. So kann die Alterung der Batterie unterschiedliche Bereiche betreffen. Damit einhergehend definiert USABC (1996), dass 80 % der ursprünglichen Spitzenleistung zur Verfügung stehen müssen. Generell ist die Batterie für den Einsatz im Fahrzeug nicht mehr verwendbar, wenn eines der oben definierten Kriterien betroffen ist, wie z. B. dass sich die Reaktivität der Batterie deutlich verschlechtert.¹⁶⁹ Die weiteren Betrachtungen zielen zum einen darauf, die Batteriealterung zu erkennen, zum anderen jedoch auch darauf, die Lebensdauer der Batterie vorauszusagen. Die von Wenzl et al. (2005) als Lebensdauervorhersage oder im Englischen als „lifetime prediction“ bezeichnete Analyse setzt sich zum Ziel, die Betriebsbedingungen der Batterie und die wirkenden Faktoren auf die Lebensdauer zu untersuchen sowie aus den parallel wirkenden Ursachen ggf. einzelne zu isolieren.

3.4.4.2 Alterungsfaktoren

Für die Bestimmung des Gebrauchsendes der Batterie müssen die Alterungseinflüsse hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Batteriekapazität betrachtet werden. Vetter et al. (2005) untersuchen so verschiedene Gründe der Alterung auf ihren Effekt auf den Kapazitätsverlust. Dazu geben sie an, welche Umgebungsfaktoren diese Entwicklung unterstützen und welche den Effekt abschwächen. Als Beispiel nennen sie die Zersetzung des Bindemittels, das zum Verlust von Lithium und mechanischer Instabilität führt, was wiederum einen Kapazitätsverlust verursacht. Besser geeignete Bindemittel können diesen Effekt abschwächen, hohe Temperaturen und hohe Batterieladestände verstärken jedoch diese Entwicklung. Einen Schritt weiter gehen Wenzl et al. (2005) bei der Untersuchung von Alterungsfaktoren für Blei-Säure-Batterien, indem sie die Umgebungsvariablen von der Schädigung in der Batterie trennen. Die externen Einflüsse benennen Wenzl et al. als „stress factors“, zu denen u. a. die durchgeleitete

¹⁶⁸ Bei den Kapazitätsverlusten unterscheidet man generell in umkehrbare und nicht wiederherstellbare Verluste, von denen nur die nicht wiederherstellbaren Verluste als Batteriealterung betrachtet werden.

¹⁶⁹ Aus diesem Grund fordert Wenzl (2010), die Bestimmung des Gebrauchsendes der Batterie auch als multidimensionales Problem aufzufassen. Dazu können bspw. verschiedene Einflüsse in einem Wert, im Englischen „state of health“ (SOH), zusammengefasst werden. Jedoch räumt Wenzl ein, dass der Einfachheit halber das Kapazitätskriterium verwendet werden kann.

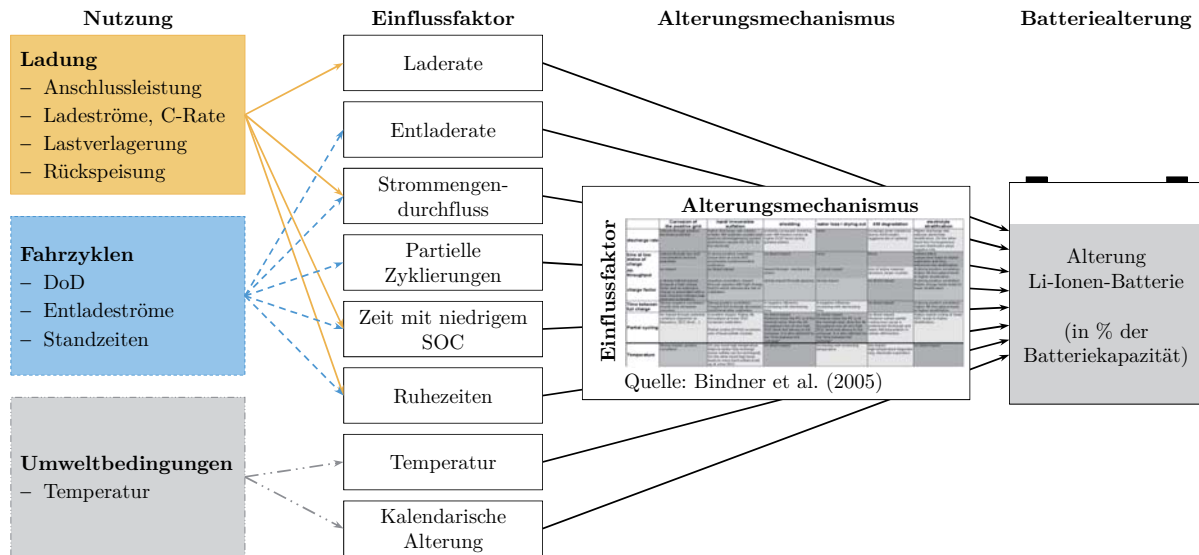


Abbildung 3.6 – Nutzungsbedingte Alterungseinflüsse der Batteriealterung.

Energiemenge, die Zeit niedriger Ladestände, die Ladeleistung oder die Temperatur zählen. Diese „stress factors“ können anschließend hinsichtlich ihrer Schädigungsauswirkungen in der Batterie abgebildet werden, wobei einzelne Faktoren die Batterie in unterschiedlicher Art schädigen können. Für die Bewertung der Alterungseinflüsse im Elektrofahrzeug ist die Nutzung bestimmten Einflussfaktoren zuzuordnen, die über Alterungsauswirkungen die Batteriekapazität reduzieren, siehe hierzu auch Abbildung 3.6. Zu den wesentlichen Einflussfaktoren gehören der Ladezustand der Batterie (engl. auch „state of charge“, SOC), die Entladetiefe (engl. auch „depth of discharge“, DOD)¹⁷⁰, die Temperatur, die Ent-/Laderate¹⁷¹ sowie die Verfestigung des Elektrolyts und Ablagerungen an den Elektroden.¹⁷²

3.4.4.3 Batteriemodelle und Alterungsbestimmung

Im Wesentlichen können gemäß Bindner et al. (2005, S. 12 ff.) drei Batteriemodelltypen unterschieden werden, die (i) die Batteriefunktionen, (ii) die Spannung und (iii) die Lebensdauer modellieren. Modelle der beiden ersten Typen werden zur Bestimmung von Zustandsvariablen wie dem SOC, der Temperatur oder der Ausgangsspannung herangezogen und finden z. B. eine weitere Verarbeitung im Batteriemanagementsystem. Zur Bestimmung der Alterung existieren drei Untertypen von Lebensdauermodellen: (a) physikalisch-chemisch-, (b) Energiemengensowie (c) ereignisbasierte Alterungsmodelle.¹⁷³ Erstere simulieren die Batteriefunktionen un-

¹⁷⁰ DOD ist in Abhängigkeit vom Batterieladezustand SOC mit $DOD = 1 - SOC$ definiert. Eine Ladezustandsveränderung wird dabei als ΔDOD angegeben, sodass ein Entladevorgang, der den Batterieladezustand von 80 % auf 60 % reduziert, einer Ladezustandsveränderung von $\Delta DOD=20\%$ entspricht, wobei eine Entladetiefe von 40 % erreicht wurde.

¹⁷¹ Häufig auch als C-Rate angegeben, die die geladene Energiemenge ins Verhältnis zur Nominalkapazität der Batterie setzt. Eine C-Rate von 1 gibt an, dass eine Batterie in einer Stunde voll geladen werden kann; eine C-Rate von 2 erfordert die doppelte Ladeleistung, damit schon nach einer halben Stunde die Batterie voll geladen ist, etc.

¹⁷² Vgl. für eine Definition der verschiedenen Batteriezustände Jossen und Weydanz (2006, S. 206 f.).

¹⁷³ Vgl. Sauer und Wenzl (2008, S. 535).

ter Einbeziehung der realen Veränderung in der Batterie mittels physikalisch-chemischer Zusammenhänge.¹⁷⁴ Solche Simulationen sind aufwendig, jedoch relativ genau. Im Gegensatz dazu betrachten Energiemengen- und ereignisbasierte Alterungsmodelle einzelne einfach zu messende Parameter, wie bspw. die durchgeleitete Energiemenge oder die Zyklenzahl, und bestimmen auf Basis empirischer Erkenntnisse zum Batterieverhalten das Gebrauchsende.¹⁷⁵ Dabei gibt das Energiemengenalterungsmodell an, nach welcher durchgeleiteten Energiemenge die Batterie ihr EOL erreicht hat.¹⁷⁶ Die ereignisbasierte Alterung hingegen summiert die Ereignisse, die zur Alterung führen. Diese werden typischerweise als Wöhler- oder SN-Kurve dargestellt. Eine erste Variante stellt die möglichen Entladezyklen bis zum Gebrauchsende in Abhängigkeit der Entladetiefe dar, eine zweite zeigt die Lebensdauer unter der Ladespannung oder Temperatur an.¹⁷⁷ Energiemengen- und ereignisbasierte Alterungsmodelle fokussieren dabei auf den Batteriebetrieb, also die Abbildung der durchlaufenen Zyklen, und berücksichtigen daher im Wesentlichen den SOC und den DOD. Die anderen Einflussfaktoren sowie die einflussunabhängige kalendarische Alterung bleiben in diesen Modellen meistens unberücksichtigt. Dennoch liefern diese Modelle eine gute Indikation für das Alterungsverhalten und zeichnen sich durch eine geringe Modellkomplexität und eine schnelle Berechnung aus. So werden zunächst die wichtige Zyklenalterung modelliert und anschließend die Einflüsse der temperaturbedingten und kalendarischen Alterung betrachtet.

3.4.4.4 Zyklenalterung

Bei der Zyklenalterung wird der Zusammenhang zwischen Alterung und Batterienutzung in der Anzahl der bis zum EOL zu durchlaufenden Vollzyklen angegeben. Dabei versteht man unter einem Vollzyklus die komplette Ent- und Beladung einer Batterie.¹⁷⁸ Unter Teilzyklen werden analog Teilent- und -beladungen verstanden.¹⁷⁹ Für die Zyklenalterung ist die Nutzung der Batterie, d. h. bei Fahrzeugen das Fahrverhalten, entscheidender Einflussfaktor. Auf Basis des aktuellen Batterieladezustands können die nächste zurückzulegende Strecke in eine

¹⁷⁴ Existierende Modelle sind vielfältig und reichen von Differentialgleichungen über Ersatzschaltbilder, analytische Modelle bis hin zu neuronalen Netzwerken zur Simulation des Batteriehaltens, siehe Wenzl et al. (2005, S. 381 f.). Zur Rückkopplung der Zustandsvariablen in die physikalisch-chemischen Alterungsmodelle kann keine Ex-post-Analyse vorgenommen werden, sondern der Zustand der Batterie muss Eingang in das Modell finden. Dazu bietet z. B. die Impedanzspektroskopie eine Analyse der Zustandsvariablen, ohne die Batterie zu beschädigen, indem die Spektren der Widerstandsmessung bzgl. der Alterungseinflüsse untersucht werden, siehe hierzu z. B. Li et al. (2001) oder Gerschler et al. (2006).

¹⁷⁵ Vgl. Wenzl et al. (2005, S. 380).

¹⁷⁶ Eine Erweiterung des Modells gewichtet die durchgeleitete Energiemenge je nach Umgebungsvariablen und Konditionen zur Zeit der Energieentnahme. Es zeigt sich, dass eine Energieentnahme z. B. bei hohen Umgebungstemperaturen die Batteriealterung stärker belastet als bei niedrigen Temperaturen.

¹⁷⁷ Vgl. Sauer und Wenzl (2008, S. 541). Voraussetzung für die Anwendung von Wöhler-Kurven ist, dass die Lebensdaueränderung pro Ereignis sehr klein ist, die Reihenfolge der Ereignisse keine Rolle spielt und keine Abhängigkeit von der bisher erreichten Degradation besteht.

¹⁷⁸ Im technisch möglichen SOC-Fenster entspricht das dem Betrag der Energiemenge $2(\bar{s} - \underline{s})$.

¹⁷⁹ Die innerhalb eines Zeitfensters verarbeitete Energiemenge kann zur besseren Vorstellung auf Vollzyklen umgerechnet werden, indem die während dieses Zeitfensters prozessierte Energiemenge durch die Energiemenge eines Vollzyklus geteilt wird. Die erhaltene Anzahl der Vollzyklen ist damit unabhängig vom durchlaufenen Ladeprofil der Batterie.

Entladung mit ΔDOD überführt und ein neuer Batterieladezustand mit $\text{SOC} - \Delta\text{DOD}$ berechnet werden. Je nachdem in welcher Granularität die Daten vorliegen, ist das Fahrverhalten zunächst zu vereinfachen, sodass nur ganze Entladevorgänge bis zur nächsten Beladung berücksichtigt werden. Dieser Anteil des Zyklus wird als Halbzyklus¹⁸⁰ bezeichnet und kann z. B. über die Methode des „rainflow counting“ ermittelt werden.¹⁸¹ Eine Übertragung der Methode des „rainflow counting“ auf das Fahrprofil ist in Anhangsabbildung A.1 dargestellt. Die so ermittelten Entladezyklen können anschließend in die Zyklenalterungsmodelle einfließen.¹⁸²

Ein ereignisorientiertes Modell zur Darstellung der Entladezyklen bis zum Gebrauchsende in Abhängigkeit der Entladetiefe lässt sich über die Herstellerangaben ableiten. Ein solcher Zusammenhang findet sich z. B. in Drouilhet und Johnson (1997) und wurde für Li-Ionen Batterien u. a. von Rosenkranz et al. (2007) angewendet sowie in Kalhammer et al. (2007, S. 30) aufgegriffen. Die Angabe der maximalen Zyklenanzahl bis zum Gebrauchsende der Batterie, N_{\max} , kann auf Basis der gegebenen Herstellerdaten exponentiell genähert mit $\alpha\text{DOD}^\beta = \alpha(1 - \text{SOC})^\beta$ angegeben werden.¹⁸³ Für die Alterung pro Halbzyklus gilt somit:

$$g = \frac{1}{N_{\max}} = \frac{1}{\alpha}\text{DOD}^{-\beta} = \frac{1}{\alpha}(1 - \text{SOC})^{-\beta}. \quad (3.1)$$

Hier gilt allerdings noch die Einschränkung, dass zu Beginn der Entladung die Batterie vollständig geladen ist. Ist die Batterie nicht vollständig geladen, so ergibt sich die Alterung in Abhängigkeit des Batterieladezustands SOC_{t-1} des vorherigen Zeitintervalls $t - 1$ zu:¹⁸⁴

$$g_t(\text{SOC}_{t-1}, \text{SOC}_t) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha} \left[(1 - \text{SOC}_t)^{-\beta} - (1 - \text{SOC}_{t-1})^{-\beta} \right], & \text{SOC}_t < \text{SOC}_{t-1}, \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (3.2)$$

Für die Batteriealterungsfunktion heutiger Li-Ionen-Batterien erhalten Wietschel et al. (2008, S. 120) für $\alpha = 1331$ und $\beta = -1,825$; siehe Abbildung 3.7. Dieser Zusammenhang zeigt insbesondere bei sehr kleinen Zyklierungen bei voller Batterie eine hohe Alterung. Die Untersuchungen von Peterson et al. (2010a,b) widersprechen diesem starken Anstieg und legen einen abgeflachteren Zusammenhang im Bereich geringer Entladezyklen bei voller Batterie nahe, beziehen jedoch zur Parametrisierung des Energiemengenmodells Entladeraten mit ein. Das im Folgenden zu nutzende Batteriealterungsmodell soll jedoch keine typischerweise im Hybridbetrieb entstehenden geringen Ent-/Ladezyklen, sondern die tieferen Entladungen während des Antriebs von PHEVs und EVs abbilden, sodass die oben vorgestellte Zyklenalterung verwendet werden kann.

¹⁸⁰ Ein Halbzyklus umfasst somit nur die Entladung der Batterie und unterscheidet sich von den Teilzyklen, die eine ganze Ent- und Beladung, jedoch nur in einem Teil der Batterie umfassen.

¹⁸¹ Siehe hierzu Downing und Socie (1982).

¹⁸² Je nachdem welche weiteren Umgebungsdaten vorliegen, können weitere Angaben mit in die Beurteilung der Batteriealterung einbezogen werden, bspw. bei Informationen zur Entladeleistung und zu Verbräuchen wie bei Liaw und Dubarry (2007) oder das Ladeprotokoll wie in Zhang (2006) beschrieben.

¹⁸³ Siehe auch Magnor et al. (2009, S. 3130).

¹⁸⁴ Siehe hierzu auch Link et al. (2010a, S. 18).

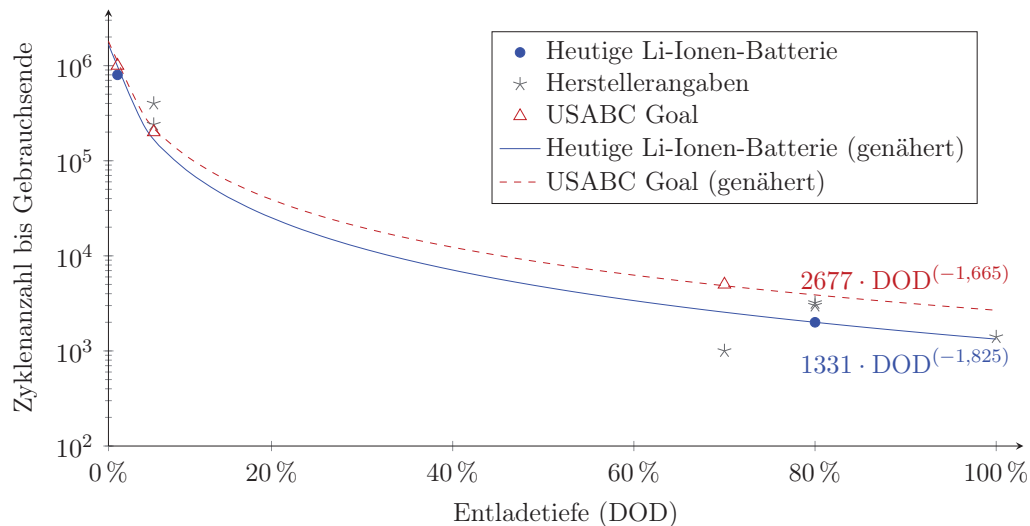


Abbildung 3.7 – Ereignisbasierte Batteriealterung mittels Wöhler-Kurve nach Rosenkranz et al. (2007) auf Basis einer Datenauswertung von Wietschel et al. (2008, S. 120) und Link et al. (2010a, S. 16).

3.4.4.5 Temperaturbedingte und kalendarische Alterung

Neben der Zyklenalterung kann die Batterie aufgrund äußerer Einflüsse und hier insbesondere der Temperatur altern. Des Weiteren ist eine kalendarische Alterung der elektrochemischen Systeme bekannt, die weitgehend unabhängig von der Nutzung ist. Temperaturbedingte und kalendarische Alterung hängen jedoch insofern zusammen, als dass Temperaturen während der Lagerung der Batterie die kalendarische Alterung beeinflussen.¹⁸⁵ Für die temperaturbedingte Alterung sind drei Temperaturbereiche zu unterscheiden:

Unter 0 °C sinkt die Leistungsfähigkeit der Batterie aufgrund geringerer Reaktionsfähigkeit ab und es kann jenseits von -20 °C zur langfristigen Schädigung der Batterie kommen,¹⁸⁶

über 80 °C kann es zu unerwünschten Nebenreaktionen zwischen Elektroden und Elektrolyt sowie bei Gasaustritt und Funkenschlag zur Entzündung kommen, die die Batterie irreversibel schädigen,¹⁸⁷

zwischen 0 und 80 °C nimmt die Alterung der Batterie mit höheren Temperaturen exponentiell zu.¹⁸⁸ Der Hersteller Saft (2010) bspw. erachtet bei Umgebungstemperaturen von 20 °C den Eintritt des EOL nach 20 Jahren für möglich. Dieser reduziert sich schon bei Temperaturen von 40 °C auf zehn Jahre.¹⁸⁹ Bei 60 °C geben Jossen und Weydanz (2006, S. 141) einen irreversiblen Kapazitätsverlust von 0,5–5 % pro Monat an, was einer Lebenserwartung von 1–4 Jahren entspricht.

¹⁸⁵ Vgl. Broussely et al. (2005).

¹⁸⁶ Vgl. Linden und Reddy (2002).

¹⁸⁷ Vgl. Broussely et al. (2001) und Kalhammer et al. (2007).

¹⁸⁸ Vgl. Kümpers (2009).

¹⁸⁹ Vgl. Schuh (2007).

Es ist daher sinnvoll, die Batterie in etwa in einem Temperaturbereich von -20 °C bis 30 °C zur Lagerung und von 0 °C bis 30 °C für den Fahrzeugbetrieb zu halten.¹⁹⁰

Die darüber hinausgehende kalendarische Alterung hat mit der Zersetzung der Kathoden- und Anodenmaterialien im Zeitverlauf zu tun, für die je nach Quelle 10–15 Jahre angegeben werden.¹⁹¹ Ein Hauptproblem bei der Feststellung der kalendarischen Alterungsprozesse sind die langfristigen Tests, da der kalendarische Alterungseffekt nur bedingt im Zeitraffer beobachtet werden kann, siehe hierzu auch Bloom et al. (2001) oder Jungst et al. (2003).

3.4.4.6 Kapazitive und ökonomische Alterung

Wie zuvor vorgestellt, bezieht sich der hier verwendete Alterungsbegriff auf den Kapazitätsverlust der Batterie. Für die ökonomische Bewertung ist der kapazitiven Alterung der ökonomische Effekt der Alterung gegenüberzustellen. Definitionsgemäß ist die Batterie am Gebrauchsende nicht mehr in der ursprünglichen Funktion einzusetzen und auszutauschen. Gibt es auch keinen anderen Einsatzbereich für die gealterte Batterie, so hat die Batterie am EOL keinen Wert mehr. Die ökonomische Alterung, $g^{\text{ökon}}$, entspricht dann einem Vielfachen der kapazitiven Alterung, g^{kapa} .¹⁹² Besitzt die Batterie am Gebrauchsende noch einen Restwert¹⁹³, $R_{\text{EOL}}^{\text{B}}$, so schwächt sich der ökonomische Wertverlust ab, mit:

$$g^{\text{ökon}} = \left(\frac{I^{\text{B}} - R_{\text{EOL}}^{\text{B}}}{I^{\text{B}}} \right) \left(\frac{1}{100\% - \text{EOL}} \right) g^{\text{kapa}}. \quad (3.3)$$

Steht bei einem EV definitionsgemäß ein Batterieaustausch bei einem kapazitiven Wertverlust in Höhe des oben definierten EOL, kann bei PHEVs aufgrund des zusätzlichen Antriebssystems notfalls noch mit dem Verbrennungsmotor weitergefahren werden. Dies ist insb. dann sinnvoll, wenn die Batteriealterung kurz vor dem Lebensende des Fahrzeugs ihr definiertes EOL erreicht. Bei EVs würde das EOL der Batterie auch die Funktion und insb. die Reichweite des Fahrzeugs erheblich einschränken, bei PHEVs reduziert sich der elektrische Fahranteil und verursacht somit höhere Treibstoffkosten. In Abwägung mit dem Austausch der Batterie ist ein höherer Kraftstoffkonsum gegen Ende des Fahrzeuglebens eventuell zu akzeptieren¹⁹⁴ und damit die Alterung der Batterie bei PHEVs weniger kritisch.

3.4.5 Restwerte und Zweitnutzung

Unter dem Titel „4R“ gaben Nissan und Sumitomo im Jahr 2009 ein Joint Venture mit Zielsetzung der Entwicklung des Zweitnutzungsmarktes gebrauchter Batterien bekannt.¹⁹⁵ Dabei

¹⁹⁰ Vgl. auch Jossen und Weydanz (2006, S. 140). Die ggf. nötigen Temperierungsbedarfe werden näher in Abschnitt 3.5.1 betrachtet.

¹⁹¹ Vgl. u. a. Wallentowitz und Reif (2006), Suzuki et al. (2003).

¹⁹² Wenn die Batterie 1% ihrer ursprünglichen Kapazität verliert, so sinkt nach der oben getroffenen Festlegung (EOL = 80%) der ökonomische Wert um 5%.

¹⁹³ Die Diskussion des Restwertes und einer möglichen Weiterverwendung wird im nächsten Abschnitt eingehender betrachtet.

¹⁹⁴ Siehe hierzu auch Wood et al. (2011).

¹⁹⁵ Vgl. Nissan (2009).

stehen die vier „R“ für die mögliche weitere Wertschöpfung der im Fahrzeug nicht mehr zu verwendenden Batterie: reuse, resell, refabricate und recycle. „Reuse“ bezeichnet den weiteren Einsatz der Batterie in einer anderen Anwendung, die mit der gealterten Batterie noch eine Zeit betrieben werden kann. Mit „resell“ wird der Verkauf der Batterie für den weiteren Einsatz bezeichnet, der die hohen Anschaffungsausgaben der Batterie zum Teil kompensieren kann, solange eine Zweitnutzung profitabel ist. „Refabricate“, also das Überholen und Aufarbeiten für den weiteren Einsatz, wird zum Teil nötig, damit die Anforderung der weiteren Anwendung, wie z. B. kleinere Batterieaggregate, erfüllt bzw. auch Sicherheitsbedingungen eingehalten werden.¹⁹⁶ Diese drei Vorgänge beschreiben die einzelnen Schritte zur Wiederverwendung der Batterie. Sollte eine weitere Verwendung der Batterie sowohl technisch als auch ökonomisch nicht mehr sinnvoll sein, so ist die Batterie am Lebensende dem „recycling“ zuzuführen, bei dem die zum Teil teuren Rohstoffe ausgelöst und dem Kreislauf wieder zugeführt werden können. Auch beim Recycling kann ggf. ein Teil der hohen Anschaffungsausgaben über die ausgelösten Rohstoffe kompensiert werden.

Für die Wiederverwendung der Batterie sind generell drei verschiedene Einsatzgebiete zu benennen: (i) der Einsatz in anderen Fahrzeugen, (ii) die Nutzung als Netzspeicher oder (iii) für Notstrom- und Inselnetzanwendungen. Bei Ersterem kann die Batterie zwar für den Gebrauch im ursprünglichen Fahrzeug am definitionsgemäßen Gebrauchsende angelangt sein, in anderen Fahrzeugen jedoch z. B. aufgrund geringerer Energiedichteanforderungen noch eingesetzt werden. Dies ist beispielsweise bei Lieferwagen wegen des größeren Raumangebots oder bei stark regional eingesetzten Fahrzeugen mit beschränkten Reichweitenanforderungen der Fall. Des Weiteren ist die Nutzung der Batterien als Speicher im Stromnetz in unterschiedlichen Anwendungen denkbar.¹⁹⁷ Dazu gehören bspw. die Frequenzhaltung oder der Ausgleich von Lastschwankungen durch die fluktuierende Einspeisung erneuerbarer Energien. Die stationären Energiespeicher können entweder lokal einen Lastausgleich zur Verfügung stellen oder an den Regelenenergiemärkten teilnehmen und werden für die Bereitstellung von Ausgleichsenergie vergütet.¹⁹⁸ Je nach Anwendungsfall kann das Batteriesystem als Ganzes in der Zweitverwertung eingesetzt werden. Dies ist insbesondere im lokalen Bereich zu erwarten oder es wird vorher auseinandergelöst und für die weitere Nutzung in größeren Energiespeichern in ein neues Systemgefüge zusammengebracht. Die dritte Möglichkeit sind Notstrom- und Inselnetzanwendungen. Hier wird die gealterte Batterie ähnlich zu der Verwendung in Netzspeichern eingesetzt, nur dass der Anwendungsfall die Energiebereitstellung als Reserve für den Notfall vorgehalten wird. Dies ist insbesondere in Inselnetzen notwendig, da aufgrund der schlechten Anbindung an das nationale Netz eine netzinterne Stabilisierung stattfinden muss. Der Weiterverwendung der Batterie stehen jedoch auch Herausforderungen gegenüber, die, wie Cready et al. (2003, S. 67) beschreiben, in technische und ökonomische Hemmnisse eingeteilt werden können. Zu den technischen gehören bspw., dass wenige Informationen

¹⁹⁶ Vgl. Burke (2009, S. 17f.), der z. B. schließt „it could defray part of the high initial cost of the batteries to the original vehicle owner“.

¹⁹⁷ Siehe hierzu auch Cready et al. (2003, S. 31).

¹⁹⁸ Vgl. hierzu auch Abschnitt 3.5.2.

über die weitere Lebensdauer und Leistung der Batterie verfügbar sind oder dass sowohl unterschiedlich dimensionierte und ausgelegte Batteriemodule als auch auf diese Module abgestimmte Leistungselektronik die Weiterverwendung in anderen Systemen fast unmöglich machen. Auf der ökonomischen Seite entstehen hohe Kosten, um die gealterten Batteriemodule auszubauen, zu überholen und in ein neues System einzubauen. Demgegenüber existieren zum Teil günstige Alternativsysteme, wie bspw. Blei-Säure-Batterien als Notstromversorgung. Zudem sind Garantie- und Gewährleistungsansprüche bei der Weiterverwendung häufig nicht mehr gegeben, sodass Kunden der Zweitnutzung und dem Wert kritisch gegenüberstehen. Der Weiternutzungswert hat zudem eine Vorlaufzeit von mehreren Jahren. Bis die heute im Elektrofahrzeug eingesetzte Batterie in anderen Anwendungen eingesetzt wird, lässt sich der Wert der weiterverwendeten Batterie nur schwer zu Beginn der Nutzung beziffern. Am Ende ihrer Weiterverwendungsmöglichkeiten ist die Batterie aufgrund der wertvollen Rohstoffe zu recyceln, siehe hierzu auch Angerer et al. (2009). Zum einen besteht eine Verpflichtung zum Recyceln, damit Elektrofahrzeuge nicht nur aufgrund der lokal vermiedenen CO₂-Emissionen als umweltfreundlich gelten, sondern auch die Rohstoffe in der Batterie einem Produktionskreislauf zurückgeführt werden. Zum anderen kann aufgrund der teuren Rohstoffe, wie u. a. Nickel, Kupfer, Kobalt und Lithium, Recycling ggf. sogar ökonomisch attraktiv sein.¹⁹⁹ Die Kosten für das Recyceln von Batterien können die Rohstoffausbeute jedoch übersteigen. Daher ist aufgrund der hohen Unsicherheit sowohl der Zweitverwertung der Batterie als auch des Recyclings ein Restwert der Batterie zum Gebrauchsende im Fahrzeug mit Null anzunehmen.

3.4.6 Referenzbatterie

Aufgrund der Anforderung des oben definierten Fahrzeugs werden sowohl PHEVs als auch EVs eine Lithium-Ionen-Batterie einsetzen, die eine Energiedichte des Systems in Höhe von 100 Wh/kg besitzt. Ein solches Batteriesystem kostet heute in etwa 600–750 €/kWh und kann im besten Fall ein Kostenniveau von bis zu 150 €/kWh erreichen. Während des Einsatzes altert die Batterie gemäß der Ent-/Ladezyklen und hält bei regulärer Nutzung $T^B = 12$ Jahre. Um die Batterie darüber hinaus nicht zu schädigen, ist ein Temperaturbereich von -20 bis +30 °C einzuhalten. Diese Referenzbatterie wird in den folgenden Kapitel als Grundlage der Analysen verwendet.

3.5 Andere Faktoren

Neben den oben beschriebenen wesentlichen Einflussfaktoren auf die Elektromobilität und den Infrastrukturaufbau sind des Weiteren neue Konzepte zu berücksichtigen und es ist zu prüfen, inwieweit diese die Anforderungen an das Infrastruktursystem verändern. Dazu zählt zum einen die Temperierung des Fahrzeugs vor Fahrtantritt zur Reduzierung des Verbrauchs während der Fahrt und der Batteriealterung. Zum anderen können Elektrofahrzeuge in das

¹⁹⁹ Siehe auch Jossen und Weydanz (2006, S. 160).

Stromnetz besser integriert werden, um den fahrzeuginternen Batteriespeicher zur Ladung in Schwachlastzeiten und eventuell sogar zur Energiebereitstellung in Spitzenlastzeiten zu nutzen und damit die Stromnachfrage zu glätten. Zur Bewertung der Einflüsse auf die Ladeinfrastruktur sind die Notwendigkeit und die Attraktivität der beiden Konzepte zu bewerten und die Auswirkungen auf das Infrastruktursystem sowie auf einzelne Komponenten, wie den Netzanschluss oder die Steuerungselektronik, zu beurteilen. Abschließend wird die staatliche Einflussnahme durch unterschiedliche Steuersysteme, Förderung einzelner Technologien oder die Gewährung direkter Subventionen innerhalb Europas betrachtet.

3.5.1 Thermische Vorkonditionierung²⁰⁰

Unter thermischer Vorkonditionierung versteht man die Temperierung des Elektrofahrzeugs – insbesondere der Fahrgastzelle und der Batterie – vor Fahrtantritt. Dabei soll die thermische Vorkonditionierung im Wesentlichen drei Ziele erfüllen: (i) die Reduzierung des Verbrauchs während der Fahrt und somit eine Einsparung der in der Batterie gespeicherten Energie, die ansonsten die Reichweite des Elektrofahrzeugs weiter reduzieren würde; (ii) die Temperierung der Batterie zum schonenden Betrieb und der Vermeidung einer starken Batteriealterung; (iii) den Komfort für den Insassen zu erhöhen, indem vor Fahrtantritt die Fahrgastzelle je nach Jahreszeit gekühlt oder geheizt und somit eine angenehme Temperatur geschaffen wird. Inwieweit Vorkonditionierung bzw. die Verfolgung dieser Ziele notwendig ist, um die Gesamtwirtschaftlichkeit der Elektromobilität zu erhöhen, sowie dahingehend andere Anforderungen an den Ladeinfrastrukturbedarf und -ausbau gestellt werden, ist im Folgenden näher zu betrachten. Dazu werden zunächst die technischen Lösungsansätze kurz vorgestellt und nachfolgend Auswirkungen auf den Ladeinfrastrukturbedarf abgeleitet.

3.5.1.1 Bewertung der Vorkonditionierung

Die Temperierung der Fahrgastzelle und der Batterie können im Wesentlichen unabhängig voneinander betrachtet werden und es wirken verschiedene Einflussfaktoren auf die Temperaturentwicklung. Die Temperatur der *Fahrgastzelle* hängt dabei im Wesentlichen von der Außentemperatur, der Sonneneinstrahlung, Wärmeverlusten und Personenwärme ab.²⁰¹ Basierend auf dem in Abschnitt 3.2 vorgestellten Verkehrsverhalten und den Klimaverhältnissen in Deutschland²⁰² lassen sich die Temperierungsbedarfe der Fahrzeuge bestimmen. Zur einmaligen Erwärmung oder Kühlung der Fahrgastzelle benötigt man bei Innenraumtemperaturen von -15 °C (ohne Sonneneinstrahlung) oder 40 °C Außentemperaturen und solarer Aufheizung mit bis zu 75 °C in der Fahrgastzelle in etwa $0,6\text{ kWh}$.²⁰³ Dieser Energiebedarf entspricht ungefähr einer Fahrstrecke von $3,5\text{ km}$. Bei durchschnittlichen Fahrstrecken von

²⁰⁰ Dieser Abschnitt basiert auf der detaillierteren Ausarbeitung zur thermischen Vorkonditionierung von Gnann, Kley und Wietschel (2010).

²⁰¹ Vgl. Großmann (2005).

²⁰² Verfügbar z. B. unter Deutscher Wetterdienst (2010).

²⁰³ Bei Verwendung eines Heiz- bzw. Kühlaggregats mit etwa 3 kW Leistung und einer benötigten Kühldauer von etwa $10\text{--}15\text{ min}$. Siehe auch Gnann (2010, S. 54) und Großmann (2005).

ca. 30 km ergibt sich dadurch ein Mehrverbrauch von etwa 10 %; bei längeren Strecken fällt die Vorkonditionierung noch weniger ins Gewicht. Nur bei deutlich kürzeren Strecken stellt der Energiebedarf zur Fahrgastzellentemperierung einen wesentlichen Anteil dar, der jedoch aufgrund der Streckenlänge nicht reichweitenkritisch ist, da meistens am nächsten Standort geladen werden kann. Somit ist die Reichweitenverbesserung durch Vorkonditionierung vernachlässigbar. Demgegenüber liegt der Energieverbrauch zur Temperierung während der Fahrt bei den oben gegebenen Umgebungsbedingungen jedoch bei etwa 0,10 kWh/km, wodurch sich der spezifische Verbrauch eines Elektrofahrzeugs deutlich (+55 %) erhöht.²⁰⁴ Insbesondere der Kältebedarf im Sommer wird durch keinen der oben genannten Einflussfaktoren kompensiert. Im Winter hingegen kann die Temperatur, sobald ein gewisses Niveau in der Fahrzeugzelle erreicht ist, durch externe Einflussfaktoren, wie die Sonneneinstrahlung und die Körperwärme der Insassen, ggf. gut gehalten werden. Um eine ähnliche Reichweite des Elektrofahrzeugs im Sommer zu ermöglichen, ist der zusätzliche Verbrauch für die saisonal nötige Temperierung zu senken; eine Vorkonditionierung der Fahrgastzelle hat jedoch kaum Einfluss.

Die Temperatur der *Batterie* hängt im Wesentlichen von den Einflussfaktoren Außentemperatur, Sonneneinstrahlung, Wärmeverlust und Eigenwärme ab. Anders als in der Fahrgastzelle fällt am Innenwiderstand der Batterie zusätzlich eine Eigenwärme ab.²⁰⁵ Die im vorherigen Abschnitt erwähnten Temperatureinflüsse auf die Batteriealterung lassen sich wiederum anhand des Verkehrsverhaltens und der Klimaverhältnisse bewerten. Es besteht kein Sicherheitsrisiko der Batterie, durch äußere Temperatureinflüsse ein unkontrolliertes Verhalten bis zum Inbrandsetzen („thermal runaway“) zu entwickeln. Des Weiteren sind Batterieinnentemperaturen unterhalb des Gefrierpunkts, die die Batteriekapazität unwiderruflich reduzieren, nur sehr selten zu beobachten (<1 %). Diese niedrigen Temperaturen in der Batterie können außerdem durch die während speziell geplanter Ladevorgänge entstehende Eigenwärme vermieden werden, allerdings muss abgewogen werden, wie eine derartige Ladestrategie anderen Zielen der Beladung, wie das Laden zu kostengünstigeren Zeiten, entgegenwirkt. Die Batteriealterung begünstigende Temperaturen von über 30 °C sind jedoch erheblich häufiger (etwa 10 %) vertreten. Hier ist die Frage, inwieweit Vorkonditionierung eine mögliche Batteriealterung vermeiden kann. Die Energie kann aus einer externen Energiequelle oder intern, wie z. B. mittels einer größeren Batterie oder eines kleinen Kraftstofftanks, bereitgestellt werden. Alternativ lässt sich die Wärmeentwicklung der Batterie durch Latentwärmespeicher in einem bestimmten Temperaturbereich halten, siehe hierzu auch Al-Hallaj et al. (2005). Die externe Energiebereitstellung ist mittels Strom am einfachsten und kann über die Ladeinfrastruktur erfolgen, falls diese am Standort zur Verfügung steht. Ein elektrischer Lüfter zur Temperierung mit Luft oder eine Luft-Wasser-Wärmepumpe zur Wassertemperierung wandeln die elektrische Energie in Wärme um. Vergleicht man den Effekt der temperaturbedingten Batteriealterung ohne und mit Vorkonditionierung, so stellt sich über die Fahrzeuglebensdauer von $T^V = 12$ Jahren ein Kapazitätsverlust der Batterie von 6,9 % bzw. 6,3 % ein, d. h. Vorkondi-

²⁰⁴ Der zusätzliche Energieverbrauch fällt im Wesentlichen für die Temperierung der Fahrgastzelle an. Vgl. auch Gnann (2010, S. 54).

²⁰⁵ Der Batteriewirkungsgrad kann mit 95 % angenommen werden, wodurch 5 % als Eigenwärme abfallen.

tionierung hat einen relativ geringen Effekt und kann einen Verlust der Batteriekapazität in Höhe von 0,6 % verhindern.²⁰⁶ Diesem kleinen Effekt stehen jedoch in der Marktanfangsphase und bei teuren Batterien Kosten von 300–500 € gegenüber.²⁰⁷ Zusammen mit den verhältnismäßig geringen Gesamtkosten für die Batterietemperierung stellt sich für den Nutzer ein leicht positiver Gesamteffekt ein, die Batterie mit Latentspeichermaterialien zu isolieren und ggf. aktiv zu kühlen.

3.5.1.2 Auswirkungen auf die Ladeinfrastruktur

Der oben erwähnte erhöhte Energieverbrauch für die Temperierung der Fahrgastzelle fällt im Wesentlichen während der Fahrt an und kann durch Vorkonditionierung nur begrenzt gesenkt werden. Die Wärme- und Kältebedarfe während der Fahrt lassen sich jedoch durch verbrauchsärmere Temperierungssysteme, wie den Einsatz von Wärmepumpen oder Sitzheizung, sowie der Einbeziehung weiterer Energiequellen, wie beispielsweise Solardächer, batterieschonender umsetzen. Darüber hinaus sind weitere Verbrauchsreduktionen durch neuartige Fahrzeuginnenraumkonzepte denkbar, wie die ausschließliche Temperierung des Fahrerbereichs.²⁰⁸ Der Energiebedarf zur Temperierung der Batterie lässt sich insbesondere durch den Einsatz von Latentspeichermaterialien deutlich verringern und kann je nach Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur um eine aktive Batteriekühlung erweitert werden. Neben der Verbrauchssenkung und der Reduzierung der Batteriealterung lässt sich die Vorkonditionierung zur Erhöhung des Insassenkomforts nutzen.

Ein Ausbau der Ladeinfrastruktur ist aber aus keinem der drei Vorkonditionierungsziele abzuleiten. Eine Verbrauchssenkung hängt vielmehr vom Einsatz energieeffizienter Temperierungskonzepte ab als von der externen Energiebereitstellung vor Fahrtantritt. Die Batteriealterung ist über Latentspeichermaterialien zu reduzieren und wird insbesondere von den Batteriekosten determiniert. Mit sinkenden Batteriekosten ist die Einhaltung eines bestimmten Temperaturbereichs nicht mehr essenziell. Wenn das Fahrzeug an der Ladeinfrastruktur angeschlossen ist, kann eine Temperierung der Batterie erfolgen. Ein Ausbau der halböffentlichen und öffentlichen Ladeinfrastruktur, um das Fahrzeug und die Batterie an jedem Standort temperieren zu können, übersteigt jedoch die Kosten für Latentspeichermaterialien und energieeffiziente Temperierungskonzepte und ist für dieses Konzept nicht nötig. Dient die Vorkonditionierung der Fahrgastzelle dem zusätzlichen Komfort der Insassen, kann im Einzelfall eine Vorkonditionierung als Zusatzoption an den Kunden verkauft werden.

²⁰⁶ Vgl. auch Gnann (2010, S. 75).

²⁰⁷ Der ökonomische Verlust ist im Verhältnis zum genutzten SOH anzugeben. Wird eine Batterie bei einer definierten Grenze von 80 % ihrer ursprünglichen Kapazität für den Einsatz in einem Elektrofahrzeug als nicht mehr tauglich angesehen, so ist der Kapazitätsverlust auf jene 20 %, die die Batterie im Laufe ihres Einsatzes im Fahrzeug altern kann, zu beziehen. Somit entsprechen 0,6 % kapazitiver Alterung einem ökonomischen Gegenwert von 3 %. Bei höheren Batteriekosten von 400–750 €/kWh und einem 24 kWh-Batterieaggregat entspricht das einem Wert von 300–500 €, der durch Vorkonditionierung eingespart werden kann.

²⁰⁸ Vgl. u. a. Zhang et al. (2007).

3.5.2 Systemdienstleistungen

Mit Systemdienstleistungen – im Englischen „ancillary services“ – werden die Aktivitäten bezeichnet, die zur verlässlichen Übertragung des Stroms vom Erzeuger zum Endkunden nötig sind, um ein Gleichgewicht zwischen dem sich ändernden Stromverbrauch und der -erzeugung in den Bilanz- und Regelkreisen herzustellen.²⁰⁹ Dabei versteht man unter Systemdienstleistungen vor allem die kurzfristige Sicherung des Angebot-/Nachfragegleichgewichts; längerfristige Maßnahmen sind über die System- und Betriebsplanung sowie die Fahrplanerstellung zu erreichen. Mit zunehmendem Anteil der erneuerbaren Energien an der Erzeugungskapazität²¹⁰ hängt die benötigte Energie vermehrt von meteorologischen und damit sich ggf. schnell ändernden Bedingungen ab. Diese erhöhte Variabilität der Stromerzeugung kann durch Systemdienstleistungen zunächst angebotsseitig ausgeglichen werden, z. B. dass im Fall einer kurzfristigen Unterdeckung der Stromnachfrage zusätzliche Erzeugungskapazitäten ans Netz gehen oder im Fall einer Überdeckung Erzeugungskapazitäten vom Netz genommen werden. Dieser angebotsseitige Lastausgleich wird über die Regelenenergimärkte gehandelt.²¹¹ Auf diesen Märkten können – zumindest für größere Abnehmer – auch nachfrageseitige Anpassungen angeboten werden, sodass ein Hersteller mit energieintensiver Produktion anstatt des Strombezugs die vertraglich gesicherte Menge bei unterdeckter Stromnachfrage an den Regelenenergimärkten verkauft und bei einer Überdeckung zusätzlichen Strom konsumiert. Mittels Informationstechnologie (sog. „smart grids“ und „smart meter“) können auch die kleineren Nachfrager in die Lage versetzt werden, ihre Lasten zu verlagern.²¹² Die Steuerung der Lastverlagerung erfolgt entweder indirekt, wie z. B. durch Anreizsignale oder Preise, kann aber vom Netzbetreiber auch direkt vorgenommen werden.²¹³ Für die Elektromobilität stellt sich die Frage, inwieweit Systemdienstleistungen nötig sind bzw. diese eine Auswirkung auf den Ladeinfrastrukturaufbau haben.

Dazu wurde in der Literatur zunächst der Effekt von Elektrofahrzeugen auf die Netzlast eingehend untersucht.²¹⁴ Allen Untersuchungen ist zu eigen, dass aus Erzeugersicht bereits heute eine erhebliche Anzahl von Elektrofahrzeugen umgestellt werden kann und die dafür erforderliche Strommenge verglichen zur Bruttostromerzeugung verhältnismäßig klein ist. Erfolgt das Laden jedoch ungesteuert, ist durch die zusätzliche Energiemenge und das eventuell ähnliche Ladeverhalten mit Lastspitzen zu rechnen, die die Netzstabilität beeinflussen können. Daher ist mit zunehmender Marktdurchdringung eine gesteuerte Ladung notwendig. Das von der Bundesregierung (2009) anvisierte Ziel, bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge zu

²⁰⁹ Siehe z. B. Kirsch und Singh (1995).

²¹⁰ Wie u. a. von Nitsch (2007) in den Szenarien zum Ausbau der erneuerbaren Energien vorgesehen.

²¹¹ Mit einer zunehmenden Entflechtung gemäß dem Energiewirtschaftsgesetz ist eine Institutionalisierung der Regel- und Ausgleichsenergie erforderlich, wie Nailis und Ritzau (2006) oder auch Kirby et al. (1995) beschreiben.

²¹² Im Englischen auch als „demand side management“ bekannt, siehe hierzu z. B. Gellings (1985).

²¹³ Für eine Übersicht der verschiedenen Ausgestaltungsmöglichkeiten des Lastmanagements sei auf Klobasa (2007, S. 97 ff.) verwiesen. Eine Akzeptanzuntersuchung von Paetz und Dütschke (2011) zeigt jedoch, dass einfache Mechanismen aufzubauen sind, da „Kunden [...] Komplexität scheuen“.

²¹⁴ Siehe hierzu z. B. für den US-Markt Webster (1999), Kintner-Meyer et al. (2007) oder Farmer et al. (2010) sowie für die Auswirkungen auf das deutsche Energiesystem u. a. Birnbaum et al. (2009) oder Frey (2009).

erreichen, ließe sich jedoch bei einer flächendeckenden Verteilung ohne Steuerung und Netzengpässe umsetzen. Bei einer stark regionalen Nachfrage wie bspw. abends in Wohnbereichen mit einem überproportional hohen Anteil an Elektrofahrzeugen ist dies jedoch anders, hier könnte es nach Kaschub et al. (2010) durchaus zu Engpässen kommen. Nichtsdestotrotz lassen die bisherigen Erkenntnisse die Schlussfolgerung zu, dass Ladeinfrastruktur schrittweise und parallel zur zunehmenden Marktdurchdringung der Elektrofahrzeuge um Steuerungsfunktionalität erweitert werden kann.

Für die Netzintegration des Elektrofahrzeugs unterscheidet man Lastverschiebung und Rückspeisung. Bei der *Lastverschiebung* wird das Fahrzeug nicht sofort bei Anschluss an das Stromnetz geladen, sondern die Ladung der aufzunehmenden Energiemenge zu einem späteren Zeitpunkt vorgenommen. Unter Ausnutzung der langen Parkzeiten und der Berücksichtigung von Nebenbedingungen, wie dem gewünschten nächsten Abfahrtszeitpunkt, lässt sich die Ladung über die Standzeit in Zeiträume mit niedriger Last verteilen.²¹⁵ Des Weiteren kann ein Beladungsvorgang bei hoher Netzlast kurzfristig auch wieder unterbrochen werden, um somit Lastspitzen abzuflachen. Die *Rückspeisung* oder von Kempton et al. (2001) mit dem Begriff „vehicle to grid“ bezeichnet, sieht außerdem die Bereitstellung von Energie aus der Batterie in Zeiträumen hoher Last vor, sodass die Batteriespeicher der angeschlossenen Fahrzeuge zur Glättung von Lastspitzen herangezogen werden können. Generell kann die Einbindung beider Konzepte auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen: Es können, (i) wie bereits oben beschrieben, Systemdienstleistungen auf Bilanz- oder Regelkreisebene angeboten werden, (ii) die Lastverschiebung und Rückspeisung den Betrieb eines Inselnetzes ermöglichen oder (iii) sogar eine weitestgehend autarke Stromversorgung ermöglicht werden, wobei der dezentral erzeugte Strom in die Batterie des Fahrzeugs eingespeist und die Stromnachfrage zeitversetzt aus der Batterie gedeckt werden. Dabei ist die Netzintegration des Elektrofahrzeugs auch aus ökologischer Sicht interessant, da sich so die fluktuierende Einspeisung der erneuerbaren Energien mit der netzstabilisierenden Funktion des Batteriespeichers zusammenbringen lassen.²¹⁶ Ökonomische Untersuchungen der beiden Konzepte sind zahlreich, beruhen jedoch meistens auf spezifischen Marktbedingungen.²¹⁷ Generell zeigt sich, dass durch Lastverschiebung Lastspitzen vermieden werden können, dafür jedoch Kosten für die Laststeuerung entstehen. Außerdem sind lange Standzeiten über Nacht nötig, damit die Ladung auch in den Zeiträumen niedriger Last vorgenommen werden kann. Die benötigten Infrastrukturkomponenten gehen über einen „smart meter“ nicht hinaus und können unter gegebenen Nebenbedingungen, wie bspw. der Abfahrtszeit, in vertretbarem Rechenaufwand bestimmt werden, vergleiche z. B. Link et al. (2010a) und Clement-Nyns et al. (2010). Für eine direkte ökonomische Entgeltung der Rückspeisung ist eine Partizipation an den Regelenergiemärkten nötig; in Inselnetzen oder für den Einsatz im lokalen Bereich ist eine ökonomische Bewertung aufwendiger, da die Nutzung des Batteriespeichers nur indirekt zu Einsparungen führt, wie z. B. geringeren

²¹⁵ Vgl. auch Clement et al. (2009).

²¹⁶ Vgl. u. a. Pehnt et al. (2007), Turton und Moura (2008), Jorgensen (2008), Andersen et al. (2009).

²¹⁷ Vgl. z. B. Kempton und Tomić (2005), Tomić und Kempton (2007), Scott et al. (2007), Guille und Gross (2009), Jochem et al. (2010) oder Dallinger et al. (2011).

Investitionen ins Netz oder einem erhöhten Anteil der Eigennutzung erneuerbarer Energien, der teilweise gefördert wird.²¹⁸ Für die Teilnahme an den Regelenenergiemärkten erfüllt ein einzelnes Elektrofahrzeug nicht die Präqualifikationskriterien, weshalb z. B. Guille und Gross (2009) die Einführung eines Aggregators, der z. B. Betreiber eines Fahrzeugpools oder Parkhauses sein kann, vorschlagen. Für die deutschen Regelenenergiemärkte zeigen z. B. Dallinger et al. (2011), dass pro Fahrzeug nur geringe Umsätze möglich sind, denen zudem weitere Anschaffungsausgaben zur Ermöglichung der Rückspeisungsfunktionalität sowie eine erhöhte Batteriealterung entgegenstehen. Auch wird für den heutigen Regelenenergiemarkt nur eine geringe Anzahl an teilnehmenden Fahrzeugen benötigt. Des Weiteren steigt eventuell der Regelenenergiebedarf nicht proportional zum Ausbau der erneuerbaren Energien, da sowohl mit einer möglichen Verbesserung der Einspeiseprognose als auch einem Ausbau der Netze der fluktuierende Charakter der erneuerbaren Energien besser ausgeglichen werden kann. Somit bleibt die Partizipation an den Regelenenergiemärkten nur wenigen Fahrzeugen vorbehalten bzw. sinken die Erträge, bis die Grenzkosten für die Marktpartizipation (weitere Komponenten, Kompensation für Batteriealterung) erreicht sind. Darüber hinaus ist die Kundenakzeptanz für den nötigen technischen Eingriff in Systemdienstleistungskonzepte wahrscheinlich nicht gegeben, wie Sovacool und Hirsh (2008) beschreiben.

Aus der Notwendigkeit, ab einer gewissen Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen die Ladung zu steuern, lässt sich für den Infrastrukturaufbau zunächst ableiten, dass Lastverlagerung im Wesentlichen während langer Standzeiten über Nacht eingesetzt werden kann, Ladeinfrastruktur stufenweise um Steuerfunktionalität zu erweitern ist und kein zusätzlicher Infrastrukturaufbau erfolgen muss. Ladung am Tag, während kurzer Standzeiten und mit Hochleistungsfunktionalität bietet keine bzw. eine zeitlich nur sehr eingeschränkte Möglichkeit für eine Lastverlagerung. Im privaten Bereich kann des Weiteren die eventuell bereits bestehende Steuerungsfunktionalität des Haushalts („smart home“) mit genutzt werden. Die Herausforderungen der Lastverlagerung liegen fernab der benötigten Steuerungskomponenten bei der Entwicklung geeigneter Steuerungssignale, deren Interpretation und, im Fall einer indirekten Steuerung, bei der Analyse der Kundenreaktion auf diese Signale. Für Rückspeisung ist heute und sehr wahrscheinlich auch zukünftig das Marktpotenzial beschränkt und aufgrund der zusätzlichen Kosten nicht mit einer breiten Anwendung zu rechnen. Auch für die Rückspeisung sind lange Standzeiten, diesmal jedoch während der Lastspitzen am Tag sinnvoll, weshalb für Einzelfälle der Einsatz der Rückspeisung am Arbeitsplatz in Erwägung zu ziehen ist.

3.5.3 Steuer- und Fördersysteme²¹⁹

In der Literatur werden verschiedene Ansätze vorgeschlagen, die Förderung technischer Weiterentwicklungen und Innovationen sowie deren Verbreitung zu beleuchten. Dabei kann zum

²¹⁸ Vgl. § 33(2) EEG, der die Eigennutzung des dezentral erzeugten Solarstroms regelt.

²¹⁹ Dieser Abschnitt basiert auf der detaillierteren Ausarbeitung zu Steuer- und Förderschemata von Kley et al. (2012, in Druck).

einen das Innovationssystem als Ganzes, von der Verankerung und Steuerung der Förderung des technologischen Wandels im Staat und dessen Institutionen betrachtet werden, was z. B. Carlsson und Stankiewicz (1991) als „innovation system“ bezeichnen. Zum anderen kann untersucht werden, wie die Auswirkungen einzelner Förderpolitiken auf den technologischen Wandel wirken, siehe z. B. Kemp (1997). Letztere genannten Förderpolitiken werden nun für die Elektromobilität betrachtet und anhand des von Rentz et al. (2001) vorgeschlagenen Schemas klassifiziert.

In den letzten Jahren haben die meisten europäischen Länder politisch motiviert bereits nationale Entwicklungspläne für die Elektromobilität veröffentlicht, in denen Ziele für die Zulassungszahlen an Elektrofahrzeugen, den Ausbau der Ladeinfrastruktur oder bestimmter Produktionskapazitäten, beispielsweise der Batterien, formuliert wurden. Dabei unterscheiden sich die Ziele zum Teil jedoch erheblich. So ist der gewünschte Bestand an Elektrofahrzeugen sowohl nach den genannten Zieljahren als auch ob Neuzulassungen oder Bestandszahlen angegeben werden, zu unterscheiden. Dabei wird in Europa im Durchschnitt ein Marktanteil im Fahrzeugbestand von 2 % (wie in Deutschland) bis zu etwa 10 % (wie in Irland und Norwegen) anvisiert.²²⁰ Um dieses Ziel zu erreichen, wurden bereits verschiedene Förderinstrumente in Europa eingeführt oder sind zumindest in Planung. Die Bandbreite dieser Förderinstrumente reicht von der Definition von Produktionsstandards bis hin zur Verfügungstellung freier Parkplätze für EV. Dabei teilen Rentz et al. (2001) die Instrumente in vier Kategorien ein: ordnungsrechtliche, ökonomische, suasorische und organisatorisch-strukturelle Instrumente.

Ordnungsrechtliche Instrumente erlegen einzelnen Marktteilnehmern Forderungen auf. Diese Ge- oder Verbote können als Input-, Produktions- oder Outputauflagen erfolgen.²²¹ Inputauflagen schreiben den Produzenten die Verwendung bestimmter Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe vor. Produktionsnormen fordern die Anwendung spezieller Produktionsprozesse und Verarbeitungsstandards. Outputauflagen stellen gewisse Anforderungen an das hergestellte Produkt oder limitieren die abzusetzende Menge. Während ordnungsrechtliche Instrumente in der Umweltpolitik verstärkt eingesetzt werden, ist die Förderung der Elektromobilität bisher nur von geltenden Standards in der Produktion und den in der EU definierten verpflichtenden Emissionszielen für das durchschnittliche Flottenfahrzeug der in einem Jahr verkauften Neuwagen eines Automobilherstellers betroffen.²²²

Ökonomische Instrumente verfolgen eine indirekte Beeinflussung des natürlichen Marktverhaltens durch eine Änderung der verfügbaren Menge oder des zu zahlenden Preises. Mengenorientierte Instrumente definieren das gehandelte Volumen entweder durch die Begrenzung der Abgabemenge (Maximalmengenansatz) oder durch die zu erbringende Mindestmenge (Mi-

²²⁰ Im Einzelnen verfolgen die europäischen Länder folgende Ziele, wobei das anvisierte Zieljahr in Klammern angegeben ist: Deutschland 1 Million (2020), Frankreich 2 Millionen (2020), Irland 10 % (2020), Norwegen 10 % (2020), Spanien 1 Million inklusive Hybridfahrzeuge (2014), Vereinigtes Königreich 100.000 (sobald wie möglich). Siehe hierzu u. a. Boehm (2009), Bundesregierung (2009), Irish Department for Transport (2008), Doggett (2008), Mayor of London (2009) und Tippelt (2009).

²²¹ Vgl. z. B. auch Michaelis (1996, S. 21 f.).

²²² Für 2012 werden nach dem EU-Emissionsgesetz 120 g CO₂/km spezifischer Emissionen des durchschnittlichen Flottenfahrzeugs eines Automobilherstellers anvisiert.

Klassifikation		Im Rahmen der EV-Förderung eingesetzte Instrumente
Ordnungsrechtliche Instrumente	Inputauflagen	/
	Produktionsauflagen	– Produktionsstandards
	Outputauflagen	– Verpflichtende Emissionsanforderungen
Ökonomische Instrumente	Mengenansätze	– CO ₂ -Zertifikate – Quotenregelung (Zero-emission vehicle mandate)
	Preisansätze	– Verringerung von Steuern beim Einkauf – Verringerung von Steuern nach dem Einkauf – Direkte Subvention – Abwrackprämie – Feebate-System/CO ₂ -basierte Steuern – Verringerung der jährlichen Kfz-Steuer – Erhöhte Treibstoff- vs. Strombesteuerung – Erlass von Maut- und Parkgebühren – Öffentlicher Erwerb von Elektrofahrzeugen
Suasorische Instrumente	Informatorische	– Spezielle Kennzeichnung/Labels – Informationskampagnen
	Administrative	– Entwicklung von Standards, z. B. des Steckers
Organisatorisch- strukturelle Instrumente	Infrastrukturnutzung	– Aufbau Ladeinfrastruktur – Zusätzliche Fahrspuren – Zusätzliche Parkplätze
	Marktstruktur	/
	Aufsichtsorgane	/

■ = Fokus der weiteren Betrachtungen.

Tabelle 3.7 – Klassifikation der Förderinstrumente basierend auf dem Schema von Rentz et al. (2001).

nimalmengenansatz). Einen Maximalmengenansatz stellen z. B. CO₂-Zertifikate dar, da diese das zulässige Volumen der im Transportbereich ausgestoßenen CO₂-Emissionen beschränken. Quotenregelungen wie z. B. das ZEV-Mandat²²³ in Kalifornien entsprechen einem Minimalmengenansatz, der die Fahrzeughersteller dazu verpflichtet, eine Mindestquote an emissionsarmen Fahrzeugen zu produzieren. Preisorientierte Instrumente versuchen, die Gesamtkosten des EV zu reduzieren bzw. die Kosten des ICE zu erhöhen, um die beiden Fahrzeugkonzepte in ihren Kosten anzugleichen. Die hier zur Verfügung stehenden Instrumente sind vielzählig und können im Wesentlichen auf die Anpassungen von Steuern und Abgaben sowie die Gewährung von Subventionen zusammengefasst werden. Im Detail zeigen sich acht im Rahmen der Elektromobilitätsförderung eingesetzte Instrumente: (i) Verringerung von Steuern beim Einkauf, (ii) Verringerung von Steuern nach dem Einkauf, (iii) direkte Subvention, (iv) Abwrackprämie, (v) Feebate-System/CO₂-basierte Steuern, (vi) Verringerung der jährlichen Kfz-Steuer,

²²³ „Zero emission vehicle mandate“, siehe hierzu z. B. Collantes und Sperling (2008) oder Shaheen et al. (2002).

Förderinstrumente	Anwendung in Europa ^a															
	AT	BE	CH	DE	DK	ES	FI	FR	GR	IE	IT	NL	NO	PL	SE	UK
Verringerung von Steuern beim Einkauf	✓	o	✓	✗	✓	o	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✗
Verringer. von Steuern nach dem Einkauf	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Direkte Subvention	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓
Abwrackprämie	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Feebate-System/CO ₂ -basierte Steuern	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Verringerung der jährlichen Kfz-Steuer	✓	o	✓	✓	✓	o	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✓	o
Erhöhte Treibstoff- vs. Strombesteuerung	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Erlass von Maut- und Parkgebühren ^b	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓

^a Stand August 2010.

^b Erlassene Mautgebühren in Mailand, Oslo und London.

Legende: ✓ = Förderinstrument wird eingesetzt, o = EV mit Vorteil im heutigen System, ✗ = momentan keine Förderung mit diesem Instrument.

Tabelle 3.8 – Überblick der angewandten Förderinstrumente in Europa.

(vii) erhöhte Treibstoff- vs. Strombesteuerung und (viii) Erlass von Maut- und Parkgebühren. Des Weiteren ist es neben Steueranpassungen möglich, Preiseffekte zu setzen, indem durch öffentlichen Erwerb von Elektrofahrzeugen kritische Skalengrößen erreicht werden, woraufhin die Kosten der Fahrzeuge sinken können.

Suasorische Instrumente versuchen, Kunden und andere Marktteilnehmer durch die Bereitstellung von Informationen, wie z. B. einer speziellen Kennzeichnung (Label) und Informationskampagnen oder der Schaffung von Standards in der Entscheidung zu beeinflussen.

Organisatorisch-strukturelle Instrumente haben das Ziel, Hürden abzubauen, die Marktzugangsbedingungen zu vereinfachen und diese notfalls mit Aufsichtsorganen zu gewährleisten. Die einzelnen Förderinstrumente sind in Tabelle 3.7 gemäß dem Schema von Rentz et al. (2001) eingeteilt und dargestellt.

In den frühen Marktphasen stellen die höheren Anschaffungsausgaben der EVs gegenüber denen der ICEs eine erhebliche Hürde für die schnelle Marktdurchdringung dar.²²⁴ Diese Kostendifferenz kann über die niedrigeren Betriebskosten von EVs meistens nicht mehr kompensiert werden.²²⁵ Daher sind die ökonomischen Instrumente in der Marktanfangsphase maßgeblich für den Erfolg der EVs. So werden im Folgenden die Auswirkungen der in Tabelle 3.7 grau hinterlegten Preisinstrumente auf die Elektromobilität und den Infrastrukturaufbau betrachtet. Die anderen in Tabelle 3.7 dargestellten Instrumente, wie z. B. die spezielle Kennzeichnung oder zusätzliche Parkplätze, können ebenfalls einen Effekt auf die Marktdurchdringung haben, der jedoch aufgrund der hohen Kostendifferenz der beiden Fahrzeugkonzepte zunächst zu vernachlässigen ist.

Um eine schnellere kundengetriebene Marktentwicklung zu erzeugen, setzen bereits einige europäische Länder auf den Einsatz preisorientierter Förderinstrumente. Für die Regulierer ist dabei besonders interessant, in welcher Form und zu welchem Volumen die Preisinstru-

²²⁴ Siehe z. B. Brooker et al. (2010), Chéron und Zins (1997) oder Nemry et al. (2009a).

²²⁵ Vgl. u. a. Delucchi und Lipman (2001) und Thiel et al. (2010).

mente angewandt werden sollen. In Tabelle 3.8 sind daher die in den 16 größten europäischen Ländern²²⁶ eingesetzten Förderinstrumente dargestellt. Dabei ist erkennbar, dass sich die bisher eingesetzten Förderinstrumente in Europa stark unterscheiden. Manche Länder wählen einen breiten Fördereinsatz mit bis zu drei Instrumenten und insgesamt hohen Fördervolumina, andere haben bisher noch keine Förderinstrumente geplant. Es scheint bisher noch kein bevorzugtes Förderinstrument zu geben, obwohl fast die Hälfte der Länder eine reduzierte Steuer beim Einkauf und eine Verringerung der jährlichen Kfz-Steuer vornimmt. Dabei werden EVs zum Teil direkt in der Steuer- und Gebührenbemessung adressiert oder in dem bereits bestehenden System unterschiedlich besteuert, wie z. B. bei der CO₂-basierten jährlichen Kfz-Steuer oder der unterschiedlichen Besteuerung von Kraftstoff und Strom.

Zusammenfassung

- Die Infrastrukturwahl sollte folgende Faktoren berücksichtigen:
 - das Verkehrs- und Nutzerverhalten, insb. privater Pkw, auf Basis mehrtägiger Wegetagebücher mit Angaben zu Streckenlängen und Zeiten,
 - neue Fahrzeugkonzepte, im speziellen PHEVs und EVs auf Basis eines heutigen VW Golfs,
 - Lithium-Ionen-Batterien aufgrund der Energie- und Leistungsanforderungen, jedoch mit Unsicherheit bei Kosten und Alterung.
- Zur Infrastrukturbewertung sind nicht direkt zu betrachten
 - die Vorkonditionierung, jedoch können die Fahrgastzelle aus Komfortgründen und die Batterie zum Alterungsschutz aktiv gekühlt werden, falls Ladeinfrastruktur verfügbar ist, sowie
 - Systemdienstleistungen, da Lastverschiebung über Nacht am privaten Stellplatz erfolgen kann und Rückspeisung zunächst einem kleinen Nutzerkreis vorbehalten bleibt.
- Bei der Bewertung des Marktaufbaus sind des Weiteren preisorientierte, ökonomische Förderinstrumente zu berücksichtigen, die bisher in Europa stark unterschiedlich eingesetzt werden.

²²⁶ Gemessen am Bruttoinlandsprodukt der EU-27-Staaten.

Kapitel 4

Bestimmung optimaler Ladeprofile und der Gesamtkosten

Forschungsfragen

- Wie können mehrtägige, reale Fahrprofile erzeugt werden?
- Wie ist ein kostenminimales Ladeprofil zu bestimmen?
- Wie sind die Gesamtkosten zu ermitteln?

4.1 Überblick über die Modellierung

Aufbauend auf den Erkenntnissen des vorherigen Kapitels haben viele Faktoren eine Auswirkung auf die wirtschaftlich optimale Wahl sowohl der Beladeinfrastruktur als auch des Fahrzeugs. Aus diesem Grund werden im Folgenden die wichtigsten Einflussfaktoren modelliert, die die Möglichkeit, ein Elektromobil zu fahren, einschränken. Dabei ist das Nutzungsverhalten, wie z. B. die Anzahl und Länge der Fahrten, der anschließend ausgewählte Parkplatz sowie die dort zur Verfügung stehende Ladeinfrastruktur – anders als beim heutigen verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeug – von entscheidender Bedeutung. Ob an einem Standort und zu welchen Kosten geladen werden kann, wird von der verfügbaren Ladeinfrastruktur bestimmt. Ziel der Modellierung ist es, eine gesamtkostenminimierende Infrastruktur zu identifizieren.

Ein Überblick über die einzelnen Optimierungsschritte und damit über das Vorgehen in Kapitel 4 wird in Abbildung 4.1 dargestellt. Auf Basis der in Abschnitt 3.2.2.3 beschriebenen Wegetagebücher sowie Fahrer- und Haushaltsdaten des Mobilitätspanels werden in Abschnitt 4.2 zunächst die Fahrprofile auf Wochenbasis erzeugt. Zusammen mit Annahmen zur verfügbaren Infrastruktur lassen sich damit Profile zu den Fahrten, Standorten und dort verfügbaren Anschlussleistungen fahrzeugspezifisch ermitteln. In Abschnitt 4.3 wird zu den so gewonnenen Fahr- und Standortprofilen unter verschiedenen Infrastrukturannahmen eine Optimierung des Ladeprofiles durchgeführt. Dazu greift der Algorithmus sowohl auf weitere Eingangsgrößen, wie physikalische Parameter (Verbrauch, Ladeeffizienz, ...), als auch auf Annah-

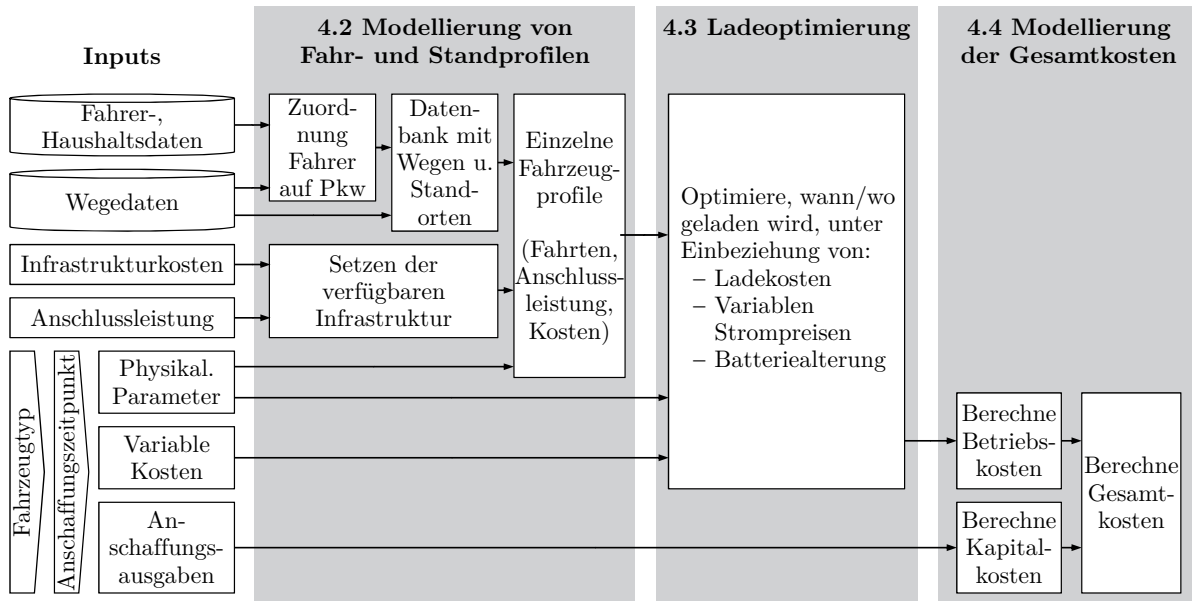


Abbildung 4.1 – Überblick über die Modellierungsschritte.

men zu den Betriebskosten zurück. Das kostenminimierte Ladeprofil geht in Abschnitt 4.4 in die Gesamtkostenrechnung ein. Verschiedene Infrastrukturen oder Fahrzeugkonzepte können so auf Gesamtkostenebene miteinander verglichen werden und erlauben den Vergleich von Infrastrukturkonzepten (dichte und öffentliche Ladeinfrastruktur) mit Fahrzeugkonzepten (vollelektrische Fahrzeuge, Plug-in-Hybride und Range Extender).

Da die Optimierung auf ein bereits existierendes Fahrprofil aufsetzt, hilft das vorgestellte Modell nicht bei der Entscheidung, ob und wann das gerade abgestellte Fahrzeug geladen werden soll. Für diese situative Entscheidungsunterstützung müsste das weitere Fahr- und Standverhalten bereits bekannt sein (perfekte Vorausschau). Vielmehr kann die Ex-post-Optimierung jedoch genutzt werden, um auf Basis des heutigen Fahrverhaltens eine Aussage über den kostenoptimalen Infrastrukturaufbau zu treffen. Dabei versucht das Modell, die heutige Mobilitätsnachfrage zu decken und eine kostenminimierende Infrastruktur zu finden.

4.2 Modellierung von Fahr- und Standprofilen

Wie in Abschnitt 3.2.2.3 beschrieben, wird das Mobilitätspanel für die Modellierung von Fahr- und Standprofilen herangezogen. Die berichteten Wege und Fahrten sind im Mobilitätspanel den Personen und nicht den Verkehrsträgern zugeordnet. Da jedoch nur dieser Datensatz das Verkehrsverhalten einer großen Teilnehmerzahl über einen längeren Zeitraum und über mehr als einen Tag aufzeichnet, sind den berichteten Wegen für die weitere Auswertung einzelne Fahrzeuge zuzuordnen (4.2.1). Die so den Fahrzeugen zugeschriebenen Wege können dann im Wochenverlauf aggregiert werden (4.2.2) und mit den definierten Infrastrukturszenarien (4.2.3) erhält man anschließend Fahrzeugprofile, die über die Woche zeitlich aufgelöst das Fahrverhalten, die zur Verfügung stehende Infrastruktur mit Anschlussleistung wie auch

Kosten beinhalten (4.2.4).

4.2.1 Zuordnung von Fahrern zu Fahrzeugen

Neben den als Pkw-Fahrer zurückgelegten Strecken sind im Wegetagebuch auch Pkw-Fahrten als Mitfahrer, Wege mit dem Motorrad²²⁷, dem Fahrrad und öffentlichen Verkehrsträgern²²⁸ sowie Fußwege enthalten. Für die Modellierung des heutigen Pkw-Fahrverhaltens sind lediglich Wege zu betrachten, die als Fahrer und mittels Pkw zurückgelegt wurden. So können alle Personen, die im Haushalt keinen Zugriff auf einen Pkw haben, jünger als 18 Jahre alt sind oder keine Pkw-Wege in der Berichtswoche angeben, aus der Stichprobe entfernt werden. Darüber hinaus können jene Personen, die angeben, an weniger als vier Tagen der Berichtswoche Wege zurückgelegt zu haben, aus Berichtsqualitätsgründen vernachlässigt werden. Kölling (2010) gibt für eine Überprüfung des 2006er Datensatzes des Mobilitätspanels zum Beispiel an, dass sich in diesem Jahr die Stichprobe auf diese Weise von insgesamt 1.555 Befragten auf 1.093 Personen reduziert.²²⁹

Im Datensatz des Mobilitätspanels sind die Fahrzeuge den Haushalten zugeordnet, die Wege aber Personen. Um alle Wege, die ein Fahrzeug in der betrachteten Periode zurücklegt, zu ermitteln und in ein Fahrprofil zu überführen, müssen die Wege der Pkw-fahrenden Personen zunächst einzelnen Fahrzeugen zugeordnet werden. Für diese Zuordnung lassen sich über die Anzahl der Fahrzeuge (n_{Pkw}), die Anzahl der Fahrer (n_{Fahrer}) und über weitere potenzielle Fahrer ($n_{\text{pot. Fahrer}}$)²³⁰, die aus den personenbezogenen Daten ermittelt werden können, fünf Fälle unterscheiden:

Fall	Beschreibung	Zuordnung
1.	$n_{\text{Pkw}} = 1$	
2.	$n_{\text{Pkw}} > 1$ $n_{\text{Pkw}} = n_{\text{Fahrer}}$	möglich
3.	$n_{\text{Pkw}} = n_{\text{Fahrer}} + n_{\text{pot. Fahrer}}$	
4.	$n_{\text{Pkw}} > n_{\text{Fahrer}} + n_{\text{pot. Fahrer}}$	
5.	$n_{\text{Pkw}} < n_{\text{Fahrer}} + n_{\text{pot. Fahrer}}$	nicht möglich

Im ersten Fall werden allen zurückgelegten Pkw-Fahrten der Personen in einem Haushalt dem einzigen Fahrzeug des Haushalts zugeordnet. In den weiteren Fällen ist die Zuordnung

²²⁷ Zu den Motorrädern zählen unter anderem auch Mofas und Mopeds.

²²⁸ Unter „öffentlichen Verkehrsträgern“ sind weiter aufgeschlüsselt Bus, Straßenbahn, U-/S-Bahn, Zug und Flugzeug zu verstehen.

²²⁹ Die Differenz von 462 Personen entspricht einem Anteil von 29,7%, der in der Woche nicht als Pkw-Fahrer in Frage kommt. Davon entfallen 179 (11,5%) auf Personen, die keinen Zugriff auf einen Pkw haben, weitere 114 (7,3%) sind jünger als 18 Jahre und weitere 160 (10,3%) der verbleibenden Personen berichten in der betrachteten Woche über keine Wege mit dem Pkw. Nur neun Personen (0,6%) sind aufgrund der Berichtsqualität zu entfernen.

²³⁰ Potenzielle Fahrer werden als Personen definiert, die Zugang zu einem Pkw im Haushalt haben, zwischen 18 und 70 Jahren alt sowie nicht mobilitätseingeschränkt sind, jedoch über keine Wege berichten.

schwieriger, da mehrere Fahrzeuge im Haushalt genutzt werden. Stimmt die Zahl der Fahrzeuge mit der Zahl der Fahrer überein (Fall 2), so werden die Wege eines Fahrers einem Fahrzeug zugeordnet. Des Weiteren können in einem Haushalt weitere Personen als Fahrer in Frage kommen (sogenannte potenzielle Fahrer), die jedoch in der Woche keine Pkw-Wege zurückgelegt haben. Stimmt die Zahl der Fahrer und potenziellen Fahrer mit der Anzahl der Pkw im Haushalt überein (Fall 3), kann jedem Fahrer ebenfalls ein Fahrzeug zugeordnet werden. Die gleiche Logik ist anwendbar, wenn es mehr Fahrzeuge als Fahrer und potenzielle Fahrer gibt. In diesem Fall kann angenommen werden, dass in der größeren Fahrzeugflotte des Haushalts entweder Spezialfahrzeuge oder zum Beispiel Sportwagen vorgehalten, jedoch für die regelmäßigen Fahrten nicht genutzt werden (Fall 4) – auch in diesem Fall lässt sich jedem Fahrer ein Fahrzeug zuordnen. Ist die Anzahl der Pkw in einem Haushalt jedoch kleiner als die Anzahl der Fahrer und potenziellen Fahrer²³¹, ist eine Zuordnung der zurückgelegten Wege auf Fahrzeuge nicht direkt möglich. Kölling (2010) ermittelt für den fünften Fall auf Basis des 2006er Mobilitätspanels einen Anteil von 5,8%.²³² Da sich Streckenlängen und -zeiten der zurückgelegten Wege nicht von der restlichen Stichprobe unterscheiden, können diese Wege für die weitere Auswertung verworfen werden. Die erhaltene Restmenge kann ebenfalls als repräsentativ angenommen werden, weil das Mobilitätspanel eine repräsentative Abbildung des deutschen Mobilitätsverhaltens darstellt – siehe Chlond und Kuhnimhof (2005) –, die verworfene Menge klein ist und ein ähnliches Mobilitätsverhalten zeigt. Die Zuordnung der Pkw kann für die Restmenge also eindeutig erfolgen. Dazu lässt sich eine Zuordnungstabelle derart erstellen, dass jeder Person ein Haushalt sowie ein Fahrzeug aus diesem Haushalt zugeordnet werden:

Haushalt			Person			Fahrzeug
ID	# Pkw	...	ID	Pkw-Fahrer	...	ID
210001	1	...	2100011	✓	...	21000110
			2100012	✓	...	
...

Die zurückgelegten Pkw-Wege der Personen können aggregiert und über den Wochenverlauf zu einem Fahrprofil zusammengefügt werden.

4.2.2 Erzeugung von Wochenprofilen von Wegen und Standorten

Über die oben durchgeführte Zuordnung von Personen zu Fahrzeugen können nun alle Wege, die eine Person als Pkw-Fahrer zurückgelegt hat, einem Fahrzeug zugeordnet werden. Für die

²³¹ Beispiel: Im einem Haushalt gibt es zwei Fahrzeuge und drei Personen, die Wege als Pkw-Fahrer zurücklegen. Eine Zuordnung der zurückgelegten Wege auf die Fahrzeuge ist nur dann möglich, wenn bekannt ist, welches Fahrzeug geteilt wird bzw. wie mit welchen Fahrzeugen die Wege zurückgelegt wurden.

²³² Das entspricht 63 Personen aus der reduzierten Stichprobe von 1.093 Personen.

Algorithmus 4.1 Erstellen von Fahrprofilen.

```

1: durchlaufe alle FahrzeugIDs
2:   initialisiere das Fahrprofil eines Fahrzeugs  $d$  mit 0 für alle  $t \in \{1 \dots T\}$ 
3:   durchlaufe alle PersonenIDs
4:     initialisiere das Personenfahrprofil mit 0 für alle  $t \in \{1 \dots T\}$ 
5:     durchlaufe alle Pkw-Wege
6:       wenn PersonenID aus Pkw-Wegen und Durchlauf übereinstimmt
7:         berechne fahrtanfangIntervall =  $\lfloor 96 (\text{berichtstag} - 1) + 4 \cdot \text{std.} + \text{min.} / 15 \rfloor$ 
8:         berechne fahrtendeIntervall =  $\lceil 96 (\text{berichtstag} - 1) + 4 \cdot \text{std.} + \text{min.} / 15 \rceil$ 
9:         berechne fahrzeitIntervalle = fahrtendeIntervall - fahrtanfangIntervall
10:        berechne fahrstreckeJeIntervall = fahrstrecke / fahrzeitIntervalle
11:        durchlaufe alle  $t \in \{\text{fahrtanfangIntervall} \dots \text{fahrtendeIntervall}\}$ 
12:          Personenfahrprofil $_t$  = Personenfahrprofil $_t$  + fahrstreckeJeIntervall
13:        ende
14:      ende
15:    ende
16:    Personenfahrprofil für PersonenID erstellt
17:  ende
18:   $d$  = Summe aller Fahrprofile der Personen, die der FahrzeugID zugeordnet sind
19: ende

```

Bewältigung des Weges lässt das Mobilitätspanel bis zu fünf verschiedene aufeinanderfolgende Verkehrsmittel zu.²³³ Eine Aufteilung der Wegstrecken auf die einzelnen Verkehrsträger wird im Mobilitätspanel nicht vorgenommen. Damit die Fahrt als Pkw-Weg gilt, werden nur Strecken herangezogen, bei denen der Pkw als Hauptverkehrsmittel genutzt wird. Dies gilt insbesondere für den Fall, dass ausschließlich der Pkw oder vor bzw. nach Pkw-Nutzung zu Fuß gegangen oder das Fahrrad genutzt wird. In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass die Wegstrecke größtenteils mit dem Pkw absolviert wird und die zu Fuß oder mit dem Fahrrad zurückgelegte Strecke kurz ist. Bei der Verwendung anderer Verkehrsmittel kann die Strecke dem Pkw nicht mehr ausschließlich zugeordnet werden.²³⁴ Die so verkleinerte Wegedatenbank kann nun auf Personen im Wochenverlauf aggregiert werden.

Alle **von einer Person** zurückgelegten Wege, werden über ihre An- und Abfahrtszeiten in ein Wochenprofil überführt. In den Paneldaten werden die An- und Abfahrtszeiten minuten genau angegeben. Für die weiteren Analysen, insbesondere bezüglich der energiewirtschaftlichen Auswertung, sind 15-Minuten-Intervalle jedoch ausreichend. Für eine Woche entspricht dieses Vorgehen 672 Zeitintervallen mit $t = 1 \dots T$ und $T = 672$. Die in der Fahrzeit zurück-

²³³ So ist es zum Beispiel möglich, einen Weg mit dem Fahrrad anzutreten, am Bahnhof auf die S-Bahn umzusteigen und von dort weiter zu Fuß zum Ziel zu laufen.

²³⁴ Für 2006 werden von den insgesamt 38.246 berichteten Wegen 17.655 (46,2%) mit dem Pkw zurückgelegt. In 17.513 (45,8%) Fällen stellt der Pkw das Hauptverkehrsmittel dar. Bei den restlichen 142 Wegen (0,8% der mit dem Pkw zurückgelegten Wege) werden außerdem weitere Verkehrsmittel eingesetzt, die es nicht möglich machen, den Fahrstreckenanteil des Pkws zu identifizieren. Bei diesen Wegen wird insbesondere die Bahn als zusätzliches Verkehrsmittel genutzt und daher ist davon auszugehen, dass der Hauptteil der Strecke mit der Bahn zurückgelegt wird. Zusammen mit der geringen Anzahl der verworfenen Pkw-Wege wird dadurch die gesamtheitlich zurückgelegte Pkw-Strecke in den Fahrprofilen auf Wochensicht nur minimal unterschätzt.

gelegte Strecke wird auf die überspannten Zeitperioden gleichverteilt.²³⁵ Bei Überschneidung zweier Wege in den überspannten Zeitperioden werden die zugewiesenen Strecken innerhalb der überschrittenen Intervalle addiert. Überspannt eine Fahrt mehrere Zeitintervalle, so ist die zurückgelegte Strecke die Summe unter der Kurve bzw. die Multiplikation von pro Zeitintervall zurückgelegter Strecke und überspannten Zeitintervallen. Als Ergebnis erhält man ein Fahrprofil der Pkw-Fahrten einer Person. Nutzt nur eine Person das Fahrzeug, entspricht das Fahrprofil der Person gleichzeitig dem Fahrprofil des Fahrzeugs.

Nutzen **mehrere Personen ein Fahrzeug**²³⁶, können die Pkw-Fahrprofile einzelner Personen durch Summation aller einem Fahrzeug zugeordneten Personen auf Fahrzeugebene zusammengeführt werden. Die so pro Fahrzeug zurückgelegte Strecke im Zeitintervall t wird mit d_t (in km) angegeben. Die Erstellung der Fahrprofile kann dem Algorithmus 4.1 entnommen werden. Die zurückgelegten Strecken aller Fahrzeuge über alle Zeitintervalle werden in Matrix D erfasst. Ein Beispiel eines Fahrprofils ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Dieses beispielhafte

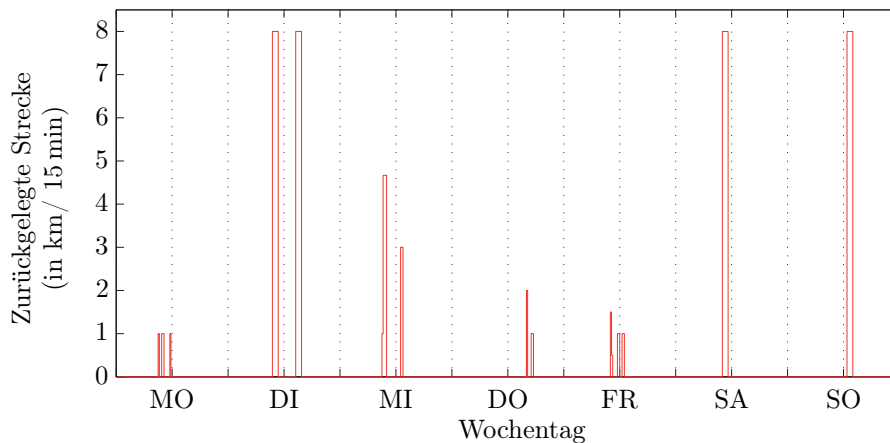


Abbildung 4.2 – Beispiel eines Fahrprofils.

Fahrverhalten zeigt im Tages- wie auch im Wochenverlauf wenig Regelmäßigkeit und in der Einzelbetrachtung sind die jeweiligen Fahrprofile stark unterschiedlich.²³⁷ In der Aggregation aller Fahrprofile lässt sich jedoch ein ähnliches Verhalten der Flotte im Tages- wie auch im Wochenverlauf nachweisen, siehe Abbildung 4.3. Da das individuelle Fahrverhalten jedoch große Unterschiedlichkeiten über den hier betrachteten Zeitraum einer Woche aufweist, wird es direkt als Eingangsgröße in die Simulation einbezogen.

Ausgehend vom Fahrprofil lässt sich ein Standortprofil ableiten. Dazu kann aus dem im Mobilitätspanel verknüpften Wegzweck²³⁸ der Standort nach Abschluss der Fahrt abgeleitet

²³⁵ Wird eine Strecke von 30 km zwischen 9¹⁰ und 9⁴² Uhr zurückgelegt, so werden drei Viertelstundenintervalle (9⁰⁰–9¹⁵, 9¹⁵–9³⁰, 9³⁰–9⁴⁵ Uhr) überspannt und jedem dieser Intervalle eine zurückgelegte Strecke von 10 km zugewiesen.

²³⁶ Gemäß der Zuordnung in Abschnitt 4.2.1.

²³⁷ Siehe hierzu auch Zumkeller et al. (1998) und Schad et al. (2001).

²³⁸ Insgesamt werden elf Codes von Wegzwecken angegeben: (1) Arbeitsweg, Weg zur Arbeitsstätte; (2) dienstlicher Weg, z. B. Dienstreise, Handwerker fährt von einem Kunden zum nächsten, Tour eines Briefträgers; (3) Ausbildungsweg, Weg zur Ausbildungsstätte; (4) Einkaufsweg; (5) Freizeitweg; (6) Serviceweg

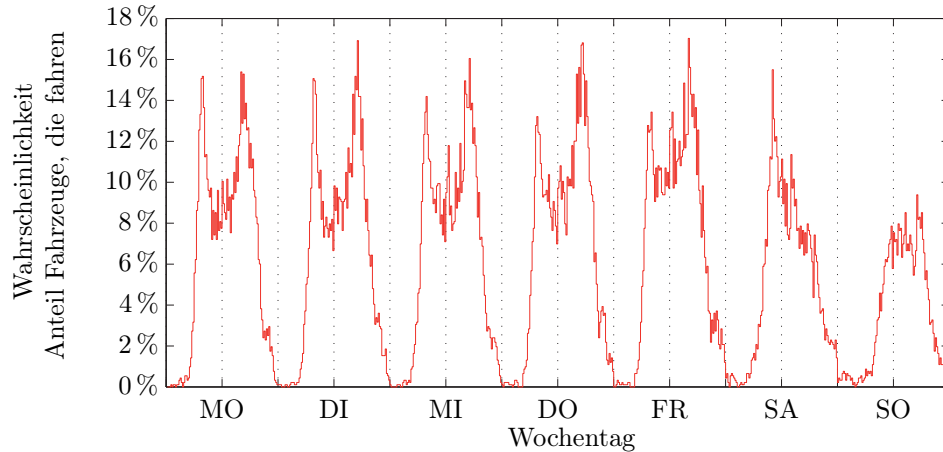


Abbildung 4.3 – Verteilung der Fahrten.

werden. Wird in einem Zeitintervall gefahren, wird ein zusätzlicher Code (‘0’ = fahrend) vergeben. In den restlichen Intervallen wird aus dem Fahrtzweck der letzten Fahrt, der Zielort als aktueller Standort gesetzt, solange bis eine neue Fahrt begonnen wird, siehe Abbildung 4.4 für ein Beispiel des Standortprofils. Wird im ersten Intervall gefahren, so wird der erste Standort des Fahrzeugs im Anschluss an die Fahrt vergeben; steht das Fahrzeug jedoch bereits in $t = 1$, so kann kein Standort aus dem Fahrzweck abgeleitet werden und es wird vereinfachend angenommen, dass das Fahrzeug zuhause (Wegzweck ‘7’) steht. Der Standort des Fahrzeugs in Zeitintervall t wird mit o_t beschrieben. Die Standorte aller Fahrzeuge über alle Zeitintervalle sind in Matrix O erfasst.

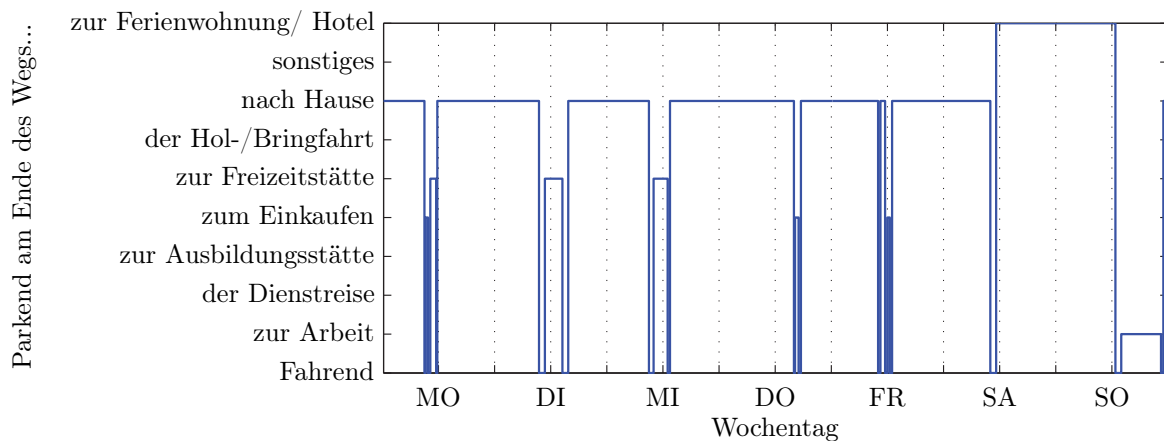


Abbildung 4.4 – Beispiel eines Standortprofils.

Durch die Überführung in Zeitintervalle, können sich die Fahrtzwecke zweier aufeinanderfolgender Fahrten, die ggf. sogar zu einer Summation der Strecken in einem Zeitintervall geführt haben, überschneiden; hier ist dann der letzte Fahrtzweck heranzuziehen. Dadurch

bzw. jemandem etwas bringen oder holen; (7) Heimweg; (8) sonstiger Weg oder Fehler; (9) Weg nach außer Haus, z. B. Ferienwohnung oder Hotel; (10) Weg zum zweiten Wohnsitz; (77) Weg geht von Zuhause nach Zuhause, „Rundkurs“ oder Spazierweg, Geschwindigkeit meistens gering, Verkehrsmittel sind zu Fuß oder Fahrrad, in seltenen Fällen auch Pkw möglich wie z. B. kleine Spritztour, Probefahrt o. Ä.

wird es möglich, dass kurze Standzeiten nicht im Standprofil abgebildet werden. Durch die geringen Übertragungsleistungen, den nötigen Kommunikationsaufbau zwischen Beladeinfrastruktur und Fahrzeug sowie den Nutzereingriff, um das Fahrzeug ein- und auszustecken, können diese kurzen Standzeiten jedoch bewusst vernachlässigt werden.

4.2.3 Setzen der verfügbaren Beladeinfrastruktur

Zur Anwendung der in Abschnitt 2.5 definierten Infrastrukturszenarien lassen sich die Fahrzwecke und damit Standorte am Ende der zurückgelegten Strecke wie folgt klassieren:

Fahrzweck/Standorte ²³⁹	Klassierter Standort
(7) Heimweg	
(10) Weg zum zweiten Wohnsitz	
(77) Weg geht von Zuhause nach Zuhause, „Rundkurs“ oder Spazierweg, Geschwindigkeit meistens gering, Verkehrsmittel sind zu Fuß oder Fahrrad, in seltenen Fällen auch Pkw möglich wie z. B. kleine Spritztour, Probefahrt o. Ä.	privat
(1) Arbeitsweg, Weg zur Arbeitsstätte	
(3) Ausbildungsweg, Weg zur Ausbildungsstätte	halböffentlich
(2) dienstlicher Weg, z. B. Dienstreise, Handwerker fährt von einem Kunden zum nächsten, Tour eines Briefträgers	
(4) Einkaufsweg	öffentlich
(5) Freizeitweg	
(8) sonstiger Weg oder Fehler	
(6) Serviceweg bzw. jemanden etwas bringen oder holen	sonstiges/ nicht zuzuordnen
(9) Weg nach außer Haus, z. B. Ferienwohnung oder Hotel	

Je nach gewähltem Infrastrukturausbauszenario können so zu jedem Zeitintervall, an dem nicht gefahren wird, über die klassierten Standorte die zur Verfügung stehende Anschlussleistung ($P^{I,pr}$, $P^{I,hö}$, $P^{I,öf}$ in kW) sowie die damit verbundenen variablen Infrastrukturkosten zur Deckung der installierten Beladeinfrastruktur ($c^{I,pr}$, $c^{I,hö}$, $c^{I,öf}$ in €/kWh) zugeordnet werden.

4.2.4 Erzeugung einzelner Fahrzeugprofile

Aus der Fahr- (D) und Standprofilmatrix (O) über alle Fahrzeuge und Zeitintervalle sowie den im vorherigen Abschnitt gesetzten Infrastrukturrahmenbedingungen zu Anschlussleistung (P^I) und Kosten (c^I) lassen sich nun für jedes Fahrzeug Einzelprofile extrahieren, die dann zusammen mit den weiteren physikalischen und ökonomischen Eigenschaften zur Optimierung der Ladung in Abschnitt 4.3 herangezogen werden können. Für die weitere Verarbeitung sind dabei insbesondere die folgenden Profile und Daten wichtig:

²³⁹ Codiert nach Chlond und Kuhnimhof (2005).

- Fahrprofil d eines Fahrzeugs aus $D(i, j | i = \text{PKW})$,
- Anschlussleistungsprofil P^I ,
- Infrastrukturkostenprofil c^I ,
- Wochenlaufleistung m .

Über das Standprofil o eines Fahrzeugs aus $O(i, j | i = \text{PKW})$ kann der klassierte Standort abgeleitet werden. Die binären Variablen L^{pr} , $L^{\text{hö}}$, $L^{\text{öf}}$ beschreiben dabei, wann ein Fahrzeug an privater, halböffentlicher oder öffentlicher Infrastruktur geparkt wird, mit:

$$L_t^{\text{pr}} = \begin{cases} 1, & o_t \in \{7, 10, 77\} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}, \quad L_t^{\text{hö}} = \begin{cases} 1, & o_t \in \{1, 3\} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}, \quad L_t^{\text{öf}} = \begin{cases} 1, & o_t \in \{2, 4, 5\} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}. \quad (4.1)$$

Das Anschlussleistungsprofil P^I setzt sich aus den verfügbaren Anschlussleitungen P_t^I in Zeitintervall t zusammen, die sich wie folgt berechnen:

$$P_t^I = L_t^{\text{pr}} P^{I,\text{pr}} + L_t^{\text{hö}} P^{I,\text{hö}} + L_t^{\text{öf}} P^{I,\text{öf}}. \quad (4.2)$$

Das damit verbundene Infrastrukturkostenprofil c^I setzt sich aus den im Zeitintervall t bei Ladung anfallenden Infrastrukturkosten c_t^I zusammen, die sich wie folgt berechnen:

$$c_t^I = L_t^{\text{pr}} c^{I,\text{pr}} + L_t^{\text{hö}} c^{I,\text{hö}} + L_t^{\text{öf}} c^{I,\text{öf}}. \quad (4.3)$$

Die Wochenlaufleistung lässt sich mit $m = \sum_{\forall t} d_t$ (in km) berechnen.

4.2.5 Abgrenzung weiterer Einflüsse auf das Fahrverhalten

Die so gewonnenen fahrzeugspezifischen Profile gehen in die Ladeoptimierung ein. Da das Fahrverhalten mehrerer Fahrzeuge im Tages- und Wochenverlauf einen ähnlichen Verlauf aufweist, die einzelnen Fahrzeugprofile jedoch stark durch das individuelle Nutzerverhalten getrieben sind, wird die Simulation auf Basis vorhandener, realer Fahrzeugprofile durchgeführt und es werden keine neuen Fahrprofile aus den statistischen Parametern der Grundgesamtheit generiert. Die Simulation wird mit den im Mobilitätspanel erfassten und repräsentativen Fahrverhalten der Jahre 1994–2007 durchgeführt. Dadurch wird es zum Teil möglich, Mobilitätsentwicklungen im betrachteten Zeitraum von 14 Jahren zu identifizieren bzw. hinsichtlich der Einsetzbarkeit von Elektrofahrzeugen zu bewerten. Die Betrachtung eines möglichen zukünftigen Fahrverhaltens oder der weiteren Verbreitung alternativer Verkehrskonzepte, wie Car Sharing, werden bei der Simulation vernachlässigt. Zudem wird die Flexibilität der Nutzer, z. B. bei steigenden Mobilitätskosten auf andere Verkehrsträger zu wechseln oder mehrere integrativ zu nutzen („modal switch“) nicht in die Betrachtungen zum Fahrverhalten einbezogen.

4.3 Ladeoptimierung

4.3.1 Nicht optimiertes Laden

Bei nicht optimiertem Laden wird der Ladevorgang zeitlich nicht gesteuert. Vielmehr erfolgt eine sofortige Ladung bei Anschluss des Fahrzeugs an die Ladeinfrastruktur solange, bis entweder die Batterie vollständig geladen ist oder das Fahrzeug von der Infrastruktur getrennt wird. Der Batterieladezustand s_t (in %, engl. auch state of charge, SOC) am Ende des Zeitintervalls t kann über die Zeit als Batterieladezustandsprofil s bzw. in die Ladeenergiemenge l_t im Zeitintervall t (in kWh) und das Ladeprofil l überführt werden. Der Batterieladezustand s_t kann dabei eine Unter- und Obergrenze erreichen. Diese werden als \underline{s} und \bar{s} bezeichnet.²⁴⁰ Der Bereich $[\underline{s}, \bar{s}]$ wird Betriebs- oder auch SOC-Fenster genannt.

Der Batterieladezustand hängt von vier Fällen ab:

1. Steht das Fahrzeug an der Ladeinfrastruktur, wird solange geladen, bis die Obergrenze des Batterieladezustands \bar{s} noch nicht erreicht ist. Dabei hängt der neue Ladezustand (s_t) vom vorausgehenden Ladezustand (s_{t-1}) der Batterie ab. Bei Ladung muss zusätzlich die Ladeeffizienz η^{ch} berücksichtigt werden.
2. Steht das Fahrzeug, aber nicht an der Ladestation, bleibt der Batterieladezustand der Vorperiode erhalten.
3. Fährt das Fahrzeug und der Batterieladezustand genügt für die zurückzulegende Strecke, wird die Batterie solange entladen, wie das Fahrzeug fährt. Die Entladung hängt dabei von der zurückgelegten Strecke d_t und dem Verbrauch u^E ab.
4. Wird gefahren, aber die Energiemenge in der Batterie reicht nicht aus, wird der Batterieladezustand auf 0 ($\hat{=}$ ungültig) gesetzt.

Damit lässt sich der Ladezustand der Batterie wie folgt beschreiben:

$$s_t = \begin{cases} \min \left(s_{t-1} + \frac{P_t^I}{\kappa} \eta^{\text{ch}}, \bar{s} \right), & \underbrace{d_t = 0}_{\text{Fahrzeug steht ...}} \wedge \underbrace{P_t^I > 0}_{\text{... an Infrastruktur}}, \\ s_{t-1}, & \underbrace{d_t = 0}_{\text{... kann nicht laden}} \wedge \underbrace{P_t^I = 0}_{\text{... kann nicht laden}}, \\ s_{t-1} - \frac{d_t u^E}{\kappa}, & \underbrace{d_t > 0}_{\text{Es wird gefahren}} \wedge \underbrace{s_{t-1} - \frac{d_t u^E}{\kappa} \geq \underline{s}}_{\text{Ladezustand genügt}}, \\ 0, & \underbrace{d_t > 0}_{\text{Ladezustand reicht nicht}} \wedge \underbrace{s_{t-1} - \frac{d_t u^E}{\kappa} < \underline{s}}_{\text{Ladezustand reicht nicht}}, \end{cases} \quad \forall t = 1 \dots T. \quad (4.4)$$

²⁴⁰ Aus Batteriealterungsgründen werden diese Grenzen häufig auf $\underline{s} = 20\%$ und $\bar{s} = 80\%$ der Batteriekapazität κ (in kWh) gesetzt. Siehe z. B. auch Markel und Simpson (2006), Shidore et al. (2009) und Anderson (2009).

Dabei wird angenommen, dass die Batterie zu Beginn des Wochenprofils vollständig geladen ist ($s_0 = \bar{s}$). Wird am Ende des Wochenprofils ($s_T \neq 0$) ein gültiger Zustand erreicht, so kann das Fahrzeug in der gesetzten Ladeinfrastruktur betrieben werden. Wird kein gültiger Zustand erreicht, so reicht die Batterie aufgrund zu langer Fahrstrecken oder selten verfügbarer Infrastruktur nicht aus, um dieses Fahrzeug durch ein batterieelektrisches Fahrzeug auszutauschen.

Die anliegende Ladeenergiemenge l_t im Zeitintervall t ergibt sich aus der Veränderung des Batterieladezustands ($s_t - s_{t-1}$). Wenn diese Veränderung positiv ist, wird geladen und die Energiemenge ergibt sich zu:

$$l_t = \begin{cases} (s_t - s_{t-1}) \kappa \frac{1}{\eta^{\text{ch}}}, & (s_t - s_{t-1}) > 0, \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases} \quad \forall t = 1 \dots T. \quad (4.5)$$

4.3.2 Optimierungsproblem

Im Referenzszenario des nicht optimierten Ladens, wird das Fahrzeug dort geladen, wo es angeschlossen ist. Je nach Standort und Infrastrukturausbauszenario kann damit jedoch eine teure Infrastruktur und somit teures Laden verbunden sein.²⁴¹ Welche Ladeinfrastruktur genutzt wird, hat wiederum einen Einfluss auf die Gesamtkosten des Fahrzeugs. Das Referenzszenario erlaubt daher im Wesentlichen eine Aussage, ob ein Fahrzeug mit gegebenem Fahrverhalten in einem bestimmten Infrastrukturausbauszenario betrieben werden kann bzw. aufgrund zu hoher Lauffleistung oder zu geringer Infrastruktur innerhalb des Wochenprofils stehen bleiben würde. Zielsetzung ist es zum einen, einen möglichst hohen Anteil der repräsentativen Fahrzeugflotte auf Elektrofahrzeuge umzustellen, zum anderen, die dafür benötigte Infrastruktur auch kosteneffizient aufzubauen. Um eine Aussage über einen kostenoptimalen Infrastrukturausbau zu treffen, ist die Infrastruktur mit den verursachten Kosten zu bewerten. Diese Bewertung kann an den verschiedenen klassierten Standorten erfolgen und ermöglicht somit die Auswahl von Beladeinfrastruktur unter Berücksichtigung der dabei entstehenden Kosten. Darüber lässt sich damit der reale Bedarf an Ladeinfrastruktur in den einzelnen Standortklassen bestimmen.

Dazu wird ein kostenminimales Batterieladeprofil bestimmt, welches unter Einbeziehung aller Kosteneinflüsse die optimalen Ladezeitpunkte determiniert. Neben den zeitabhängigen Profilen der zurückgelegten Strecken (d) und der verfügbaren Anschlussleistung (P^I) sind weitere zeitabhängige Variablen zu berücksichtigen:

- Stromkosten c_t^E (in €/kWh),
- Variabilisierte Ladeinfrastrukturkosten c_t^I (in €/kWh).

Damit kann eine Bewertung der Ladung l_t in Zeitintervall t vorgenommen werden und es lässt sich ein Minimierungsproblem mit der Veränderlichen l_t beschreiben, das ein kostenoptimales Ladeprofil l bestimmt. Das Optimierungsproblem beschreibt dabei das Bestreben

²⁴¹ Siehe Abschnitt 2.4.

der Konsumenten, eine kostengünstige Ladestrategie zu finden. Die Kosten der Ladung für Strombereitstellung und Infrastrukturnutzung sind durch \mathcal{X} gegeben:

$$\mathcal{X} = \min_{l_t} \underbrace{\sum_{t \in \tau_1} (c_t^E + c_t^I) l_t}_{\text{Ladekosten}}, \quad (4.6)$$

mit $\tau_1 = \{t \mid P_t^I > 0 \quad \forall t\}$, also jener Zeit, in der geladen werden kann. Als Nebenbedingungen sei der Ladezustand s_t der Batterie vom vorherigen Ladezustand s_{t-1} , dem Verbrauch ($d_t u^E / \kappa$) und der Ladung ($l_t \eta^{\text{ch}} / \kappa$) abhängig (NB 1); die Lademenge l_t kleiner als die über die Anschlussleistung P_t^I und Zeit $\Delta t = 0,25$ (für die 15 Minuten Zeitintervalle) zur Verfügung stehende Energiemenge und nie negativ (NB 2); der Ladezustand s_t der Batterie nie außerhalb des SOC-Fensters $[\underline{s}, \bar{s}]$ von 20 % bis 80 % (NB 3) sowie der Anfangs- und Endladezustand, s_0 und s_T , der Batterie bei \bar{s} (NB 4 und 5):

$$\text{NB 1:} \quad s_t = s_{t-1} - \frac{d_t u^E}{\kappa} + \frac{l_t \eta^{\text{ch}}}{\kappa} \quad \forall t = 1 \dots T, \quad (4.7)$$

$$\text{NB 2:} \quad 0 \leq l_t \leq P_t^I \Delta t \quad \forall t = 1 \dots T, \quad (4.8)$$

$$\text{NB 3:} \quad 0,2 = \underline{s} \leq s_t \leq \bar{s} = 0,8 \quad \forall t = 1 \dots T, \quad (4.9)$$

$$\text{NB 4:} \quad s_0 = \bar{s}, \quad (4.10)$$

$$\text{NB 5:} \quad s_T = \bar{s}. \quad (4.11)$$

Für den Fall, dass das Fahrzeug im letzten Zeitintervall nicht an einer Ladeinfrastruktur steht, ist s_T zwangsläufig kleiner als \bar{s} . Ein gültiges Ladeprofil ist dann gegebenenfalls dennoch gegeben, wenn $s_T \geq \underline{s}$, und erfordert die Relaxation von NB 5. Um dieses Ladeprofil jedoch mit den anderen zu vergleichen, sind die Kosten der auf \bar{s} fehlenden Restlademenge \mathcal{X} zuzurechnen. Dabei handelt es sich um eine reine Kostenabbildung; weder der Batterieladezustand s noch das Ladeprofil l werden angepasst. Da es in T keine Ladeinfrastruktur gibt, werden die anfallenden Infrastrukturkosten c_T^I auf die günstigsten Infrastrukturkosten im Wochenablauf gesetzt ($c_T^I = \min \{c_t^I \mid c_t^I > 0 \quad \forall t\}$). Die Stromkosten können auf dieses Zeitintervall bezogen werden, mit c_T^E . Die binäre Variable z^{NV} gibt an, ob nicht vollständig geladene Batterieprofile mit berücksichtigt werden sollen ($z^{\text{NV}} = 1$) oder nicht ($z^{\text{NV}} = 0$). Damit ist dem Minimierungsproblem der folgende Term hinzuzufügen:

$$h(s_T) = \begin{cases} (\bar{s} - s_T) (c_T^E + c_T^I), & z^{\text{NV}} = 1 \wedge \underline{s} \leq s_T < \bar{s}, \\ 0, & z^{\text{NV}} = 0. \end{cases} \quad (4.12)$$

Als neues Minimierungsproblem ergibt sich daher:

$$\mathcal{X} = \min_{l_t} \underbrace{\left[\sum_{t \in \tau_1} (c_t^E + c_t^I) l_t \right]}_{\text{Ladekosten}} + h(s_T). \quad (4.13)$$

Des Weiteren führt die Relaxation der NB 5 zu der spezifizierten Version:

$$\text{NB 5: } s_T = \bar{s} \quad \text{wenn } z^{\text{NV}} = 0. \quad (4.14)$$

4.3.3 Erweiterungen

Das Grundgerüst des obigen Minimierungsproblems wird im Folgenden um drei zusätzliche Einflussfaktoren erweitert:

- Kostenseitige Abbildung der Batteriealterung,
- Möglichkeit zur Schnellladung/Batteriewechsel während der Fahrt,
- Einsatz eines Plug-in-Hybridfahrzeugs.

4.3.3.1 Batteriealterung

Zur Abbildung der Batteriealterung wird die Zyklenalterung herangezogen.²⁴² Unter der Annahme, dass im Wesentlichen die Entladetiefe die Alterung bestimmt, wird die Abnutzung g_t der Batterie in Abhängigkeit von den beiden Batterieladezuständen s_{t-1} und s_t wie folgt beschrieben:²⁴³

$$g_t(s_{t-1}, s_t) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha} \left[(1 - s_t)^{-\beta} - (1 - s_{t-1})^{-\beta} \right], & s_t < s_{t-1}, \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases} \quad \forall t = 1 \dots T. \quad (4.15)$$

Über NB 1 ist damit g_t auch von l_t abhängig und geht in die Minimierung daher mit $g_t(s_{t-1}, l_t)$ ein, mit den in Abschnitt 3.4.4.4 bestimmten Parametern $\alpha = 1331$ und $\beta = -1,8284$. Die Abnutzung der Batterie lässt sich mit $g_t I^B \kappa$ als Alterungskosten darstellen. Die binäre Variable z^{BA} gibt zudem an, ob Batteriealterung mit berücksichtigt werden soll ($z^{\text{BA}} = 1$) oder nicht ($z^{\text{BA}} = 0$). Die Minimierungsfunktion ist um die Batteriealterung zu erweitern, der funktionale Zusammenhang der Batteriealterung wird der Zyklenalterung entnommen. Als neues Minimierungsproblem ergibt sich daher:

$$\mathcal{X} = \min_{l_t} \left[\underbrace{\sum_{t \in \tau_1} (c_t^E + c_t^I) l_t}_{\text{Ladekosten}} + h(s_T) + \underbrace{z^{\text{BA}} \sum_{t \in \tau_2} g_t(s_{t-1}, l_t) I^B \kappa}_{\text{Batteriealterungskosten}} \right], \quad (4.16)$$

mit $\tau_2 = \{t \mid d_t > 0 \quad \forall t\}$, also der Zeit, in der gefahren wird. Die Nebenbedingungen sind nicht weiter anzupassen.

²⁴² Vgl. Abschnitt 3.4.4.4.

²⁴³ Siehe hierzu Abschnitt 3.4.4.4 bzw. auch Link et al. (2010a, S. 18).

Die Batteriealterung ist jedoch nur dann zu berücksichtigen, wenn die zyklenalterungsbedingungen, kapazitiven Alterungseffekte über die Lebensdauer in Summe größer sind als 20 % der Batteriekapazität und damit die Batterie vor Ablauf der Lebensdauer (T^B) eine minimale akzeptable Kapazitätsuntergrenze von 80 % erreicht.²⁴⁴ Der mit dem optimalen Ladeprofil l in der Woche verursachte Degradationseffekt kann vereinfacht auf die Lebensdauer der Batterie hochgerechnet werden. Ist dieser Degradationseffekt kleiner als 20 %, ist die Batteriealterung nicht zu berücksichtigen. In diesem Fall ist die Minimierung erneut durchzuführen, mit:

$$z^{\text{BA}} = \begin{cases} 0, & 52 T^B \sum_{t \in \tau_2} g_t < 0,2, \\ z^{\text{BA}}, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.17)$$

4.3.3.2 Schnellladung

Schnellladung oder Batterietausch ermöglichen, das Fahrzeug während der Fahrt zu laden.²⁴⁵ Die Schnellladung ist anders als die anderen Ladevorgänge während der Fahrt als eine Art Tankstopp möglich. Ladung (l_t) und Entladung (d_t) können somit in einem Zeitintervall stattfinden. Vereinfachend kann angenommen werden, dass die Lademenge nicht beschränkt ist, da durch hohe Anschlussleistungen an der Schnellladesäule oder sogar durch Batterietausch schnell die benötigte Energie bereitgestellt werden kann. Sowohl Schnelllade- als auch Batteriewechseltechnologie erfordern jedoch hohe Anschaffungsausgaben und verursachen damit hohe variable Infrastrukturkosten c_t^I .²⁴⁶ Die binäre Variable z^{SL} gibt dabei an, ob Schnellladung bei der Optimierung mit berücksichtigt werden soll ($z^{\text{SL}} = 1$) oder nicht ($z^{\text{SL}} = 0$). So ergibt sich folgendes neues Minimierungsproblem:

$$\mathcal{X} = \min_{l_t} \left[\underbrace{\sum_{t \in \tau_1} (c_t^E + c_t^I) l_t}_{\text{Ladekosten}} + h(s_T) + \underbrace{z^{\text{BA}} \sum_{t \in \tau_2} g_t(s_{t-1}, l_t) I^B \kappa}_{\text{Batteriealterungskosten}} + \underbrace{z^{\text{SL}} \sum_{t \in \tau_2} (c_t^E + c_t^I) l_t}_{\text{Schnellladekosten}} \right]. \quad (4.18)$$

Die Nebenbedingungen sind dabei nicht weiter anzupassen.

4.3.3.3 Plug-in-Hybride

Fahrzeuge können zudem auch mit einem Range Extender ausgestattet sein und bei leerem Batterieladestand auf den Verbrennungsmotor umstellen.²⁴⁷ Der Treibstoffverbrauch f_t (in kWh) fällt in Zeitintervall t an und berechnet sich aus dem Energiebedarf $d_t u^E$ in t abzüglich der eventuell vorhandenen verfügbaren Restenergiemenge der Batterie $\kappa(s_{t-1} - \underline{s})$. Der Treibstoffverbrauch lässt sich über den spezifischen Verbrauch u^F (in l/km), den Stromverbrauch u^E und die spezifischen Treibstoffkosten c^F (in €/l) in die in t anfallenden Treibstoffkosten

²⁴⁴ Siehe Abschnitt 3.4.4.1.

²⁴⁵ Vgl. Abschnitt 2.2.1.

²⁴⁶ Vgl. Abschnitt 2.4.

²⁴⁷ Vgl. Abschnitt 3.3.1.

umrechnen. Die binäre Variable z^{RE} gibt an, ob ein Range Extender berücksichtigt werden soll ($z^{\text{RE}} = 1$) oder nicht ($z^{\text{RE}} = 0$). Die Treibstoffkosten sind dabei nicht direkt von l_t abhängig, ermöglichen aber erst ein gültiges Ladeprofil, da ansonsten das Fahrzeug aufgrund der leeren Batterie liegen bleiben würde. Als neues Minimierungsproblem ergibt sich somit:

$$\mathcal{X} = \min_{l_t} \left[\underbrace{\sum_{t \in \tau_1} (c_t^E + c_t^I) l_t}_{\text{Ladekosten}} + h(s_T) + \underbrace{z^{\text{BA}} \sum_{t \in \tau_2} g_t(s_{t-1}, l_t) I^{\text{B}} \kappa}_{\text{Batteriealterungskosten}} + \dots \underbrace{z^{\text{SL}} \sum_{t \in \tau_2} (c_t^E + c_t^I) l_t}_{\text{Schnellladekosten}} + \underbrace{z^{\text{RE}} \sum_{t \in \tau_2} c^F \frac{u^F}{u^E} f_t}_{\text{Treibstoffkosten}} \right] \quad (4.19)$$

Zusätzlich muss eine weitere Nebenbedingung berücksichtigt werden:

$$\text{NB 6: } f_t = \begin{cases} 0, & s_{t-1} - d_t u^E / \kappa > \underline{s}, \\ d_t u^E - \kappa(s_{t-1} - \underline{s}), & \text{sonst,} \end{cases} \quad \forall t = 1 \dots T. \quad (4.20)$$

4.3.4 Lösungsansätze und Methodenauswahl

Das Minimierungsproblem aus Gleichung (4.19) ist ein sequenzielles Entscheidungsproblem für aufeinanderfolgende Zeitabschnitte und wird nach Neumann und Morlock (1993, S. 27) als dynamisches Optimierungsproblem bezeichnet, da es sich in der verallgemeinerten Form

$$\begin{aligned} \text{Min. } & \sum_{t=1}^T \mathcal{C}_t(s_{t-1}, d_t, l_t, \dots) + h(s_T), \\ \text{u. d. N. } & s_t = \mathcal{S}_t(s_{t-1}, d_t, l_t, \dots) \quad \forall t = 1, \dots, T, \\ & s_0, s_t, d_t, l_t \text{ ist „zulässig“} \quad \forall t = 1, \dots, T. \end{aligned} \quad (4.21)$$

darstellen lässt. $\mathcal{S}_t(\cdot)$ bezeichnet die Übergangsfunktion von einem Batteriezustand zum nächsten und $\mathcal{C}_t(\cdot)$ die Kostenfunktion für diese Zustandsänderung. Die Zulässigkeit der Variablen s_0, s_t, d_t, l_t wird dabei durch weitere Nebenbedingungen beschrieben.

Neumann und Morlock (1993) nennen insbesondere drei Beispiele, die mittels dynamischer Optimierung gelöst werden können:

Lagerhaltungsproblem – bei dem ein Gut in einem endlichen Planungszeitraum (n Perioden) in das Lager gebracht und aus dem Lager entnommen wird. Dynamisiert wird das Problem vor allem durch die dynamische Nebenbedingung der Lagerbilanzgleichung.

Erneuerungsproblem – bei dem man die jeweils günstigsten Zeitpunkte für den Austausch von Maschinen ermittelt. Der Austausch hängt dabei wiederum von den Aktionen in

den vorhergehenden Perioden ab. Im Vergleich zum Lagerhaltungsproblem ist das Erneuerungsproblem ein binäres Problem. Durch die Einteilung in unterschiedliche Entscheidungsperioden spricht man auch von einer künstlichen Dynamisierung.

Rucksackproblem – bei dem möglichst viel „Sinnvolles“ im Rucksack mitgenommen werden soll, ohne die Gewichtsbeschränkung des Rucksacks zu verletzen. Die künstliche Dynamisierung besteht nun darin, die Gegenstände, die in den Rucksack eingepackt werden sollen, als Stufe des Optimierungsproblems darzustellen und dieses stufenweise zu lösen.

Das in Gleichung (4.19) formulierte und in Gleichung (4.21) verallgemeinerte dynamische Optimierungsproblem ähnelt dabei am meisten dem Lagerhaltungsproblem, bei dem die Batterie dem Lager, die Verbräuche den Entnahmen und die Ladung den Zugängen entsprechen. So ist Gleichung (4.7) der Lagerbilanzgleichung sehr ähnlich, wobei die Entnahmen bzw. der Verbrauch d_t vorgegeben sind. Die Variable s_t aus Gleichung (4.21) wird nach Neumann und Morlock (1993, S. 597 ff.) als Zustandsvariable bezeichnet und beschreibt den Batterieladezustand am Ende von Zeitintervall t . Die Variablen d_t, l_t, \dots können gedanklich in einer Variable e_t aggregiert werden, die als Entscheidungsvariable bezeichnet wird. Die möglichen Zustände, die s_t annehmen kann, lassen sich durch einen sogenannten Zustandsbereich S_t beschreiben und die in t möglichen Entscheidungen mittels des nicht leeren Entscheidungsbereichs $E_t(s_{t-1})$, der vom Zustand s_{t-1} abhängt. In dem oben vorgestellten Minimierungsproblem sind S_t und $E_t(s_{t-1})$ abgeschlossene Intervalle auf \mathbb{R} . Eine über die Zeitintervalle berechnete Folge von (s_0, s_1, \dots, s_T) heißt Zustandsfolge und entspricht dem gesuchten Batterieprofil, die Folge von Entscheidungen (e_1, \dots, e_T) wird Politik genannt und entspricht für d dem Fahr- und für l dem Ladeprofil.

Wie in Bertsekas (2005, S. 18) beschrieben, hängt das optimale Ladeprofil bzw. die Folge optimaler Entscheidungen $(e_1^*, \dots, e_t^*, \dots, e_T^*)$ des in Gleichung (4.21) verallgemeinerten Optimierungsproblems vom Anfangszustand s_0 der Batterie ab und definiert darüber ein optimales Batteriezustandsprofil $(s_1^*, \dots, s_t^*, \dots, s_T^*)$. Nach dem Optimalitätsprinzip von Bellman (1957) ist die Lösung des Subproblems mit den Stufen (t, \dots, T) mit $t \in 1 \dots T$ von s_t^* abhängig und somit ist die Lösung des Teilproblems bei gegebenem Zustand s_t^* unabhängig von den Entscheidungen in $(1, \dots, t-1)$. Die Kosten der Teilpolitik können mit $v_t^*(s_{t-1})$ bezeichnet werden. Unter einer vorwärts gerichteten Rekursion, also der Berechnung des ersten Zustands und erneutem Aufruf der Funktion im nächsten Intervall, kann das Optimierungsproblem aus Gleichung (4.21) wie folgt formuliert werden:

$$v_t^*(s_{t-1}) = \min_{e_t \in E_t(s_{t-1})} \{ \mathcal{C}_t(s_{t-1}, e_t) + v_{t+1}^*[\mathcal{S}_t(s_{t-1}, e_t)] \} \quad \forall s_t \in S_t \wedge t = 1 \dots T. \quad (4.22)$$

Nach Bellman (1957) lassen sich solche Optimierungsprobleme stufenweise rückwärts (startend von $t = T$) lösen, wobei $v_{T+1}^*(s_T)$ auf 0 zu setzen ist. Der in Gleichung (4.22) beschriebene Ansatz heißt „rückwärts gerichtete dynamische Programmierung“.

Unter der gegebenen Symmetrie des Optimierungsproblems²⁴⁸ lässt sich auch eine rück-

²⁴⁸ Siehe Hillier und Lieberman (2005) und Bradley et al. (1977, S. 330 f.).

wärts gerichtete Rekursion, also eine Berechnung des letzten Zustands und erneuertem Aufruf der Funktion des vorherigen Intervalls, beschreiben. Dazu sind die Übertragungs- und Kostenfunktion wie auch die von s_t zu erreichenden Entscheidungen nach dem vorherigen Intervall aufzulösen. Diese Funktionen werden mit $\tilde{\mathcal{C}}_t$, $\tilde{\mathcal{S}}_t$ und $\tilde{E}_t(s_t)$ bezeichnet. Die Kosten einer optimalen Teilpolitik (e_1^*, \dots, e_t^*) können mit $\tilde{v}_t^*(s_t)$ bezeichnet werden und ergeben sich unter einer rückwärtsgerichteten Rekursion zu

$$\tilde{v}_t^*(s_t) = \min_{e_t \in \tilde{E}_t(s_t)} \left\{ \tilde{\mathcal{C}}_t(s_t, e_t) + \tilde{v}_{t-1}^* \left[\tilde{\mathcal{S}}_t(s_t, e_t) \right] \right\} \quad \forall s_t \in S_t \wedge t=T \dots 1, \quad (4.23)$$

mit $v_0^*(s_0) = 0$. Dieses Problem lässt sich ebenfalls stufenweise, jedoch vorwärts (startend von $t = 1$) lösen. Der in Gleichung (4.23) beschriebene Ansatz heißt „vorwärts gerichtete dynamische Programmierung“. Generell sind beide Ansätze zur Lösung geeignet, da ein endliches, deterministisches Problem vorliegt.²⁴⁹ Wie Hillier und Lieberman (2005) beschreiben, kann es jedoch auf Basis des zugrunde liegenden Anwendungsfalls des Optimierungsproblems sinnvoll sein, den einen oder anderen Ansatz auszuwählen. Wobei die rückwärts gerichtete dynamische Programmierung die optimalen Politiken von einem gegebenen Endpunkt berechnet, löst die vorwärts gerichtete dynamische Programmierung ein Optimierungsproblem ausgehend vom Startpunkt und berechnet von da die verbleibenden Intervalle. Da der Batterieanfangszustand s_0 gegeben ist und das Wochenprofil vorher abgebrochen werden kann, wird zur Lösung des in Gleichung (4.19) gegebenen Optimierungsproblems eine vorwärts gerichtete dynamische Programmierung verwendet.

4.3.5 Komplexität und Vereinfachung des Optimierungsproblems

Für die Bestimmung eines kostenminimalen Zustands- oder Ladeprofiles ergibt sich ein Optimierungsbereich von $\mathbb{R} \times \mathbb{N}$. Wie Denardo (1982) zeigt, wächst der Rechenaufwand eines dynamischen Optimierungsmodells exponentiell mit der Dimension des Zustands- und Entscheidungsbereichs. Daher ist es wünschenswert, sowohl den Zustands- und Entscheidungsreich, die Laufzeit als auch das Optimierungsproblem zu vereinfachen. Die Lösung des Optimierungsproblems ist daher nicht durch eine vollständige Berechnung des Optionenraums möglich, der insbesondere durch die vielzähligen Lademöglichkeiten schnell sehr groß wird. Im Einzelnen sind die genannten Teile wie folgt zu bewerten und zu vereinfachen:

Zustandsbereich \tilde{S}_t – beschreibt die möglichen Zustände, die die Batterie annehmen kann.

Dabei ist der Batteriezustand mit s_t in % der Batteriekapazität κ , auch SOC genannt, angegeben. Eine volle Batterie hat einen SOC von 100 % bzw. 1 und eine leere von 0. Damit kann der Batteriezustand einen stetigen Wert mit $\tilde{S}_t = \{s_t \in \mathbb{R} \mid 0 \leq s_t \leq 1\}$ annehmen. Die Berechnung der Kosten in diesen Zuständen ist jedoch sehr aufwendig, da sich eine Vielzahl verschiedener, aber nur unwesentlich differenzierender Zustände ergeben, für die die Berechnung erneut durchgeführt werden muss. Daher ist es sinnvoll, S_t

²⁴⁹ Siehe Bertsekas (2005, S. 66).

zu diskretisieren. Dazu werden $\sigma = 1.000$ mögliche SOC-Schritte eingeführt.²⁵⁰ Eine volle Batterie mit SOC 100 % erhält den Zustand 1, eine leere Batterie mit SOC 0 % erhält den Zustand $\sigma + 1 = 1.001$. Damit ergibt sich $\tilde{S}'_t = \{[\sigma + 1 - \sigma s_t] \mid s_t \in \mathbb{R} \wedge 0 \leq s_t \leq 1\}$. Die diskreten Werte, die s_t annehmen kann, werden mit s'_t angegeben. Durch die Aufrundung sind alle möglichen Zustände von s'_t in \tilde{S}'_t enthalten.

Entscheidungsbereich $\tilde{E}_t(s_{t-1})$ – beschreibt die von s_{t-1} erreichbaren Batterieladezustände. Dabei kann die Entscheidung e_t zum einen durch die Ladung l_t und zum anderen durch den Verbrauch d_t beeinflusst werden. Der Verbrauch d_t fällt dabei deterministisch an und stellt keine Entscheidung im klassischen Sinne dar. Die Ladung l_t kann hingegen, wenn an Ladeinfrastruktur geparkt wird, mit unterschiedlichen Anschlussleistungen erfolgen. Dies ermöglicht damit innerhalb des Zeitintervalls, verschiedene Energiemengen aufzunehmen mit $l_t \in \{\mathbb{R} \mid 0 \leq l_t \leq P_t^I \Delta t\}$.²⁵¹ Wie beim Zustandsbereich kann die Berechnung aller möglichen Lademengen jedoch sehr aufwendig werden. Da zum einen die in einem Zeitintervall zu übertragende Energiemenge in der Regel klein ist²⁵² und zum anderen davon auszugehen ist, dass die zu übertragende Energiemenge stets ausgeschöpft wird, wenn die Ladung zu dieser Zeit besonders günstig ist, kann vereinfachend angenommen werden, dass solange die Batterie noch nicht voll ist, mit der zur Verfügung stehenden Anschlussleistung geladen oder auf Ladung verzichtet wird. Unter der Beschränkung, dass der Batteriezustand keine Werte über \bar{s} annehmen kann, kann die Lademenge über die Gleichungen (4.7) – (4.9) zwei Werte annehmen mit $l'_t = \left\{ 0; \min \left[P_t^I \Delta t; \frac{1}{\eta^{\text{ch}}} (\kappa \bar{s} - \kappa s_{t-1} + d_t u^E) \right] \right\}$.

Laufzeit t – die vorliegenden minutengenau aufgezeichneten Fahrten werden auf Viertelstundenintervalle aggregiert.²⁵³ Viertelstundenintervalle sind energiewirtschaftlich relevant, da wesentliche Daten wie die Fahrplananmeldung, aber auch das Netting von Angebot und Nachfrage auf 15-Minuten-Intervallen eingeplant werden.²⁵⁴ Mittels dieser Intervalllänge kann die Intervallanzahl im Wochenlauf von 10.080 Minutenintervallen auf 672 Viertelstundenintervalle reduziert werden. Diese sollen zunächst auch nicht weiter reduziert werden. t nimmt somit Werte von $t = 1, \dots, 672$ an.

Optimierungsproblem – der Rechenaufwand ist ansonsten von der Komplexität der Kostenfunktion in Gleichung (4.13) abhängig, die ebenfalls wie die Bewertungsfunktion des Lagerhaltungsproblems linear ist. Durch die Erweiterungen von Abschnitt 4.3.3.1

²⁵⁰ Die Schrittweite σ bestimmt die Genauigkeit der Berechnung und muss dabei minimale Veränderungen in der Batterie in dem betrachteten Zeitintervall von einer Viertelstunde abbilden können. Bei Ladung an einem 3,7 kW-Anschluss wird die Batterie mit 0,93 kWh/15 min geladen; bei der Entladung während einer langsamen Fahrt mit 7 km/h werden 0,32 kWh/15 min verbraucht. Diese minimalen Veränderungen in der Batterie erfordern bei vorausgesetzter Genauigkeit von maximal 10 % Abweichung und einer 30 kWh-Batterie eine Schrittweite von mindestens $\sigma = 937$. Betrachtet man leistungsstärkere Ladungen oder schnellere Fahrten, ist die Berechnung genauer.

²⁵¹ Vgl. Gleichung (4.8).

²⁵² Bei häuslicher Anschlussleistung < 1 kWh.

²⁵³ Vgl. Abschnitt 4.2.2.

²⁵⁴ Siehe Bundesministerium der Justiz (2005, § 5).

bis 4.3.3.3 steigt jedoch die Komplexität dieser Funktion, insbesondere was die Batteriedegradation in Gleichung (4.15) angeht, exponentiell, was den Rechenaufwand der Optimierung weiter vergrößert. Die Komplexität der Kostenfunktion wird wiederum durch die in Abschnitt 4.3.3 vorgestellten Erweiterungen modularisiert und kann im Basisszenario daher Rechenaufwand einsparen.

Der Gesamtaufwand der Rechnungen ist auf insgesamt $\sigma = 1.000$ Zustandsbereiche, zwei Entscheidungsausprägungen ($\epsilon = 2$) und eine Laufzeit von $T = 672$ Zeitintervallen eingedämmt. Was für die Berechnung eines optimalen Ladeprofiles nach der O-Notation aus Narkiewicz (2000) in etwa noch $O(\sigma\epsilon T) \approx 1,3$ Millionen Rechnungen entspricht. Werden z. B. die möglichen Entscheidungen nicht eingeschränkt, ist der Rechenaufwand mit $O(\sigma^2 T) = 672$ Millionen Rechnungen deutlich höher.

4.3.6 Lösung mittels dynamischer Programmierung

Das Minimierungsproblem aus Gleichung (4.19) soll aufgrund der Mehrperiodigkeit und der Abhängigkeit des Ergebnisses einer Periode von dem der Vorperiode, wie in Abschnitt 4.3.4 beschrieben, mittels dynamischer Programmierung gelöst werden.²⁵⁵ Kann zu einem Zeitpunkt t ein Batteriezustand s_t von mehreren Vorgängerzuständen erreicht werden, würde das in Gleichung (4.23) rekursiv dargestellte Optimierungsproblem das in s_t startende Subproblem mehrmals aufrufen. Über die Dimensionierung des Zustands- und Entscheidungsbereichs wie auch der Zeitintervalle ist es möglich, dass es viele solcher Mehrfachaufrufe gibt, was eine erhebliche Steigerung des Rechenaufwands bedeuten würde. Damit die bereits berechneten Werte wieder benutzt werden können und damit den Rechenaufwand begrenzen, werden zwei Matrizen definiert:

$v(i, t)$ gibt die Kosten des Weges an, die ausgehend von $t = 1$ zur Erreichung des Batteriezustands i am Ende des Zeitintervalls t entstanden sind. Wird der Batteriezustand i in einem Zeitintervall von mehreren vorherigen Batteriezuständen aus erreicht, werden die geringsten Kosten zur Erreichung dieses Batteriezustands in t festgehalten.

$w(i, t)$ beschreiben den günstigsten Pfad im Batterieprofil. Wird in t der Batteriezustand i vom vorherigen Batteriezustand \hat{i} in $t - 1$ am kostengünstigsten erreicht, so beschreibt $w(i, t)$ die Veränderung im Batterieprofil ($i - \hat{i}$). Dabei sind die Veränderungen auf \tilde{S} definiert. „Fahren“ bzw. ein positives d_t entspricht einem positiven $w(i, t)$, wobei „Laden“ bzw. ein positives l_t einem negativen $w(i, t)$ entspricht.

Die Laufvariable i gibt dabei den SOC an und ist auf \tilde{S} definiert. Die Laufvariable t entspricht den zuvor besprochenen Zeitintervallen. Zunächst sind die beiden Matrizen zu initialisieren. Da $v(i, t)$ die günstigsten Kosten festhält, wird $v(i, t) = \infty$ für alle (i, t) gesetzt; $w(i, t)$ kann mit 0 initialisiert werden. Wie Abbildung 4.5 zeigt, werden nun in einer vorwärtsgerichteten Rekursion zuerst die gültigen Batteriezustände berechnet (schwarze Pfeile).

²⁵⁵ Vgl. auch Maly und Swan (1995), die ebenfalls eine dynamische Programmierung für eine optimale Ladestrategie für Batterien beschreiben.

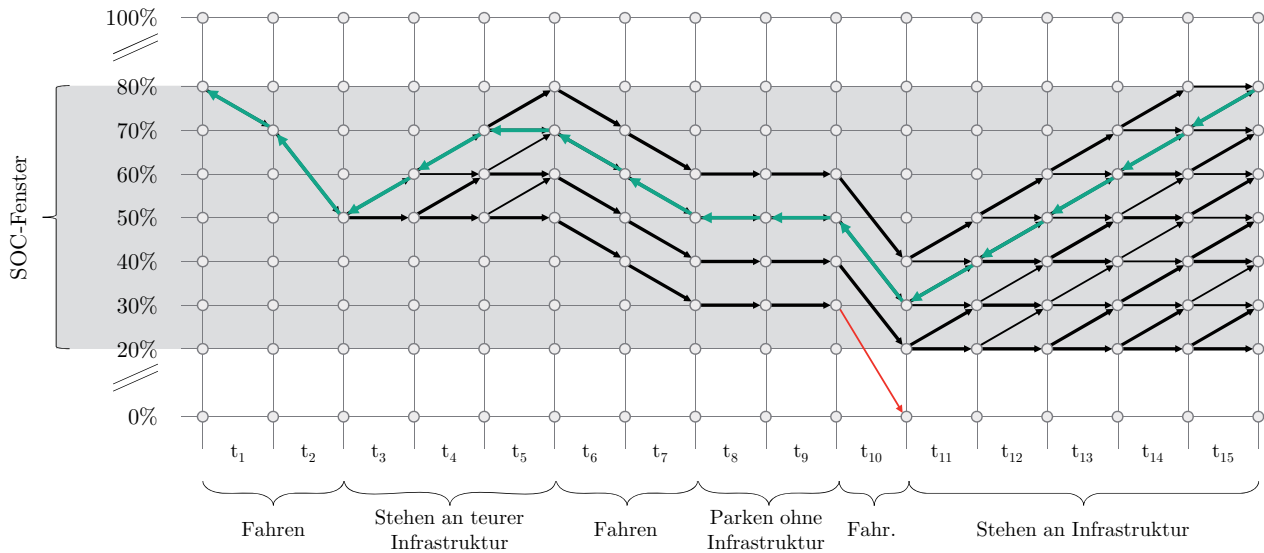


Abbildung 4.5 – Illustration der Vor-/Rückwärtsrechnung.

Kann ein Batteriezustand von mehreren Batteriezuständen erreicht werden, so wird der günstigste gewählt (dicke schwarze Pfeile) und die restlichen werden verworfen (dünne schwarze Pfeile). In den nachfolgenden Perioden wird von den gültigen Batteriezuständen der Vorperiode ausgehend berechnet, welche neuen Zustände erreicht werden können, und anschließend werden wiederum die günstigsten ausgewählt. Gültige Batteriezustände müssen die Nebenbedingungen in Gleichung (4.7) und (4.8) erfüllen, innerhalb des SOC-Fensters liegen (Gleichung 4.9 bzw. grauer Bereich in der Abbildung) sowie von \bar{s} starten (Gleichung 4.10) und enden (Gleichung 4.14). Werden nicht gültige Batteriezustände erreicht, werden diese verworfen und im Folgenden nicht weiter betrachtet (roter Pfeil). Im Zeitablauf können drei verschiedene Situationen eintreten:

1. **Es wird gefahren:** Dann verbraucht das Fahrzeug einen Teil der in der Batterie gespeicherten Energie gemäß der zurückgelegten Strecke. Ist Schnellladung vorgesehen ($z^{\text{SL}} = 1$), so kann zusätzlich durch kurze Stopps, Energie aufgenommen werden. Sollte die verbrauchte Energiemenge die Batterie unter die definierte Untergrenze (\underline{s}) entladen, so bleibt das Fahrzeug stehen. Ist ein PHEV vorgesehen ($z^{\text{RE}} = 1$), liefert der „Range Extender“ Energie und verursacht daher Benzinkosten; der Batteriezustand wird auf \underline{s} gesetzt. Die Entladung der Batterie führt außerdem zu Batteriealterungskosten, abhängig vom Batteriezustand in $t - 1$ und dem elektrischen Verbrauch, der zu einem niedrigeren Batteriezustand in t führt.
2. Fahrzeug **steht**, jedoch **nicht an Ladeinfrastruktur:** Dann verändert sich der Batteriezustand nicht.
3. Fahrzeug **steht an Ladeinfrastruktur:** Dann kann geladen werden und es werden Strom- und Infrastrukturkosten verursacht. Da die Kosten für die Beladeinfrastruktur von den gesetzten Standortklassen abhängen (siehe Abschnitt 4.2.3) und auch die

Stromkosten zeitlich variieren, kann die Ladung, wenn möglich, zu den günstigsten Zeitpunkten durchgeführt werden. So wird zum Beispiel in Abbildung 4.5 die Batterie in den letzten Intervallen, in denen günstige Ladeinfrastruktur zur Verfügung steht, aufgeladen; wobei in den Intervallen, in denen nur teure Infrastruktur verfügbar ist ($t_3 - t_5$), nicht durchgehend geladen wird.

In den einzelnen Fällen können unterschiedliche Zustandsveränderungen erreicht werden. Dadurch werden die Kosten $v(i + \text{Verbrauch}_t - \text{Ladungsmenge}_t, t)$ verursacht, diese hängen von den Kosten im vorherigen Zeitintervall $v(i, t - 1)$ sowie von den von $t - 1$ zu t anfallenden Kosten ab. Sind diese Kosten niedriger als die durch andere Zustandsveränderungen hervorgerufenen Kosten in diesem Batteriezustand und zu diesem Zeitpunkt, so werden die niedrigeren Kosten festgehalten. Durch die Diskretisierung des Optimierungsproblems sind kleine Rundungsfehler bei der Berechnung der Zustandsveränderungen und Kosten zu berücksichtigen. Damit der Vergleich der Kosten und das Zuweisen der günstigeren Batteriezustandsveränderungen durch diese Rundungsfehler nicht zum Überschreiben bereits optimaler Batteriepolicies führen, wird beim Kostenvergleich eine Unschärfe ξ eingeführt, die in Abhängigkeit der Schrittweite des diskretisierten Batteriezustands auf $\xi = 5/\sigma$ gesetzt wird.²⁵⁶ Ist ein günstigerer Batteriezustandsübergang gefunden, wird die Batteriezustandsveränderung von $t - 1$ zu t mit $w(i + \text{Verbrauch}_t - \text{Ladungsmenge}_t, t) = \text{Verbrauch} - \text{Ladung}$ beschrieben. Algorithmus 4.2 beschreibt die durchzuführende Hinrechnung des Optimierungsproblems:

Algorithmus 4.2 Hinrechnung der Beladeoptimierung.

```

1: default := 999999
2: initialisiere  $v(\cdot) := \text{default}$  und  $w(\cdot) := 0$ , sowie  $v_0(\cdot) := \text{default}$  und  $v_0(\text{oberes SOC Limit}) = 0$ 
3: durchlaufe alle  $t \in \{1 \dots T\}$ 
4:   wenn gefahren wird
5:     berechne  $\text{Verbrauch}_t$ 
6:     durchlaufe die gültigen Batteriezustände  $i$  ( $v(i, t - 1) \neq \text{default}$ )
7:       wenn Schnellladung erlaubt
8:         wenn Batteriealterung betrachten werden soll
9:           berechne Batteriealterung $_t$  auf Basis  $\text{Verbrauch}_t$ 
10:        ende
11:        berechne mögliche Schnelllademenge $_t$  und -kosten $_t$ 
12:         $v_1 := v(i, t - 1) + \text{Batteriealterungskosten}_t + \text{Schnellladekosten}_t$ 
13:         $v_2 := v(i, t - 1) + \text{Batteriealterungskosten}_t$ 
14:        wenn  $v_1 + \xi < v(i + \text{Verbrauch}_t - \text{Schnelllademenge}_t, t)$ 
15:           $v(i + \text{Verbrauch}_t - \text{Schnelllademenge}_t, t) := v_1$ 
16:           $w(i + \text{Verbrauch}_t - \text{Schnelllademenge}_t, t) := \text{Verbrauch}_t - \text{Schnelllademenge}_t$ 
17:        ende
18:        wenn  $[(i + \text{Verbrauch}_t) \geq \text{unteres SOC-Limit}] \wedge [v_2 + \xi < v(i + \text{Verbrauch}_t, t)]$ 
19:           $v(i + \text{Verbrauch}_t, t) := v_2$ 
20:           $w(i + \text{Verbrauch}_t, t) := \text{Verbrauch}_t$ 
21:        ende

```

²⁵⁶ Das entspricht in etwa einer zu den Stromkosten bewerteten Intervalllänge, d. h., wenn die Kosten um diese Unschärfe unterschritten werden, kann das Intervall günstiger erreicht werden als eventuell der angrenzende Batteriezustand.

```

22:      sonst keine Schnellladung, aber noch genügend Energie in Batterie
23:          wenn Batteriealterung zu betrachten ist
24:              berechne Batteriealterungt auf Basis Verbraucht
25:          ende
26:           $v_1 := v(i, t - 1) + \text{Batteriealterungskosten}_t$ 
27:          wenn  $v_1 + \xi < v(i + \text{Verbrauch}_t, t)$ 
28:               $v(i + \text{Verbrauch}_t, t) := v_1$ 
29:               $w(i + \text{Verbrauch}_t, t) := \text{Verbrauch}_t$ 
30:          ende
31:      sonst nicht mehr genügend Energie in Batterie, aber Verbrenner an Board
32:          berechne Benzinverbrauch für Reststrecke
33:          wenn Batteriealterung zu betrachten ist
34:              berechne Batteriealterungt auf Basis des elek. Verbraucht
35:          ende
36:           $v_1 := v(i, t - 1) + \text{Batteriealterungskosten}_t + \text{Benzinkosten}_t$ 
37:          wenn  $v_1 + \xi < v(\text{unteres SOC-Limit}, t)$ 
38:               $v(\text{unteres SOC-Limit}, t) := v_1$ 
39:               $w(\text{unteres SOC-Limit}, t) := \text{elek. Verbrauch}_t$ 
40:          ende
41:      ende
42:      ende /*durchlaufe i*/
43:      sonst wird nicht gefahren und nicht an Ladeinfrastruktur gestanden
44:          durchlaufe die gültigen Batteriezustände  $i$  ( $v(i, t - 1) \neq \text{default}$ )
45:               $v(i, t) := v(i, t - 1)$ 
46:               $w(i, t) := 0$ 
47:          ende /*durchlaufe i*/
48:      sonst wird an Ladeinfrastruktur gestanden
49:          durchlaufe die gültigen Batteriezustände  $i$  ( $v(i, t - 1) \neq \text{default}$ )
50:              berechne mögliche Lademenget
51:               $v_1 := v(i, t - 1) + (\text{Strompreis}_t + \text{Infrastrukturkosten}_t) \cdot \text{Lademenge}_t / \text{Ladeeffizienz}$ 
52:               $v_2 := v(i, t - 1)$ 
53:              wenn  $v_1 + \xi < v(i - \text{Ladung}_t, t)$ 
54:                   $v(i - \text{Ladung}_t, t) := v_1$ 
55:                   $w(i - \text{Ladung}_t, t) := -\text{Ladung}_t$ 
56:              ende
57:              wenn  $v_2 + \xi < v(i, t)$ 
58:                   $v(i, t) := v_2$ 
59:                   $w(i, t) := 0$ 
60:              ende
61:               $v(i, t) := v(i, t - 1)$ 
62:               $w(i, t) := 0$ 
63:          ende /*durchlaufe i*/
64:      ende
65:      ende /*durchlaufe t*/

```

Nun soll, wie in Abbildung 4.5 durch die grünen Pfeile illustriert, durch Rückrechnung ein optimales Batteriezustandsprofil $s^*(\cdot)$ gefunden werden. Dazu ist zunächst zu überprüfen, ob im letzten Zeitintervall T die Nebenbedingung (4.11) erfüllt wird, also die Batterie in T den Batteriezustand \bar{s} erreicht. Wenn die Batterie nicht vollständig geladen sein muss ($z^{\text{NV}} = 1$), wird die Nebenbedingung (4.11) zu (4.14) relaxiert und in T muss nur ein gültiger

Batteriezustand erreicht werden, d. h. ein Batteriezustand derart, dass $\underline{s} \leq s_T \leq \bar{s}$ gilt. Als Ausgangspunkt für die Rückrechnung s_T^* wird dann der oberste erreichbare Batteriezustand definiert. Das optimale Batteriezustandsprofil $s^*(\cdot)$ kann dann in einer Rückrechnung von $(T \dots 1)$ bestimmt werden, dazu werden die Ladezustandsveränderung $w(s^*(t), t)$ bestimmt und darüber der vorherige Ladezustand $s^*(t-1) = s^*(t) - w(s^*(t), t)$ berechnet.

Zur Bestimmung der Kosten werden zunächst die unterschiedlich anfallenden Kostenarten Strom- (c_{ges}^E), Infrastruktur- (c_{ges}^I), Batteriealterungs- ($c_{\text{ges}}^{\text{BA}}$), Schnelllade- ($c_{\text{ges}}^{\text{SL}}$), Benzinkosten (c_{ges}^F) mit 0 initialisiert. Zur Berechnung der einzelnen Kosten müssen zwei Fälle differenziert werden:

1. **Es wird gefahren:** Dann fallen Benzinkosten an, wenn ein Range Extender eingesetzt wird und die Batterie entladen ist. Wird die Schnellladung genutzt, so sind die mit der Schnellladung zusammenhängenden Infrastrukturkosten der Schnellladung zuzurechnen und es fallen Stromkosten an. Wird außerdem die Batteriealterung betrachtet, so wird diese auf Basis des elektrischen Verbrauchs berechnet und hinzuaddiert.
2. **Es wird geladen:** Dann fallen die zu diesem Zeitpunkt gesetzten Infrastruktur- und Stromkosten an.

Algorithmus 4.3 beschreibt die durchzuführende Rückrechnung des Optimierungsproblems:

Algorithmus 4.3 Rückrechnung der Beladeoptimierung.

- 1: initialisiere $s^*(\cdot) := 0$ sowie $s_0^* := 0$
- 2: **wenn** $v(\text{oberes SOC-Limit}, T) < \text{default}$
- 3: $s^*(T) = \text{oberes SOC-Limit}$
- 4: **sonst**
- 5: suche vollsten Ladestand
- 6: $s^*(T) = \text{vollster Ladestand}$
- 7: **ende**
- 8: initialisiere Strom-, Infrastruktur-, Batteriealterungs-, Schnelllade-, Benzinkosten mit 0
- 9: **wenn** ($s^*(T) \geq \text{unteres SOC-Limit}$) oder Fahrzeugtyp ist ein ICE oder HEV
- 10: **durchlaufe** das Ladeprofil in t rückwärts von $(T \dots 1)$
- 11: berechne die Ladezustandsveränderung $w(s^*(t), t)$
- 12: berechne den vorherigen Ladezustand $s^*(t-1) = s^*(t) - w(s^*(t), t)$
- 13: **wenn** gefahren wird
- 14: ermittle den Verbrauch t auf Basis des Fahrprofils
- 15: **wenn** Verbrauch $t >$ Ladezustandsveränderung t
- 16: **wenn** Fahrzeugtyp einen Verbrennungsmotor besitzt
- 17: addiere die anfallenden Benzinkosten t
- 18: **sonst** Schnellladung erlaubt
- 19: addiere die anfallenden Infrastrukturkosten t zu den Schnellladekosten t
- 20: addiere die anfallenden Stromkosten t
- 21: **ende**
- 22: **ende**
- 23: **wenn** Batteriealterung berücksichtigt werden soll
- 24: addiere Batteriealterungskosten t auf Basis des elek. Verbrauchs t
- 25: **ende**
- 26: **sonst** wird geladen

```

27:         addiere die anfallenden Infrastrukturkostent
28:         addiere die anfallenden Stromkostent
29:     ende
30: ende /*durchlaufe t*/
31: wenn (s*(T) < oberes SOC-Limit) und Ladeprofil mit nicht voller Batterie gültig
32:     ermittle benötigte LaderestmengeT
33:     ermittle günstigste Infrastrukturkosten∇t
34:     addiere Infrastrukturkosten für LaderestmengeT
35:     addiere StromkostenT für LaderestmengeT
36: ende
37: wenn Batteriealterung berücksichtigt werden soll
38:     wenn Batteriealterungskosten > nutzungszeitbedingte Abnutzung
39:         subtrahiere nutzungszeitbedingte Kosten von Batteriealterungskosten
40:     sonst
41:         setze Batteriealterungskosten auf 0
42:     ende
43: ende
44:     berechne die Gesamtkosten als Summe der Einzelkosten
45: sonst /* kein gültiges Batterieprofil */
46:     setze alle Kosten auf default
47: ende

```

Wird ein optimales Batteriezustandsprofil nicht ausgehend von s_T^* bestimmt, so müssen zum Vergleich der Kosten zweier verschiedener Ladeprofile die mit der Ladung verbundenen Kosten der fehlenden Energiemenge ($\bar{s} - s_T$) den Gesamtkosten zugerechnet werden. Abschließend sind die Batteriealterungskosten um die nutzungszeitbedingten Kosten zu berichtigen. Sind die alterungsbedingten Kosten kleiner als die nutzungszeitbedingten, so werden die Batteriealterungskosten auf 0 gesetzt. Die Gesamtkosten des Ladeprofils ergeben sich als Summe der einzelnen Kosten $c_{\text{ges}} = c_{\text{ges}}^E + c_{\text{ges}}^I + c_{\text{ges}}^{\text{BA}} + c_{\text{ges}}^{\text{SL}} + c_{\text{ges}}^F$. Wird kein gültiges Profil erreicht, werden alle Kosten auf „default“ gesetzt. Die Kosten des Ladeprofils können nun in die Gesamtkostenbewertung in Abschnitt 4.4 eingehen.

Das optimale Ladeprofil (l_1^*, \dots, l_T^*) lässt sich aus dem optimalen Batteriezustandsprofil (s_1^*, \dots, s_T^*) ableiten mit $l_t^* \stackrel{\forall t}{=} \min \{0; s_t^* - s_{t-1}^* - d_t\}$ und $s_0^* = \bar{s}$.

4.4 Modellierung der Gesamtkosten

Die Kosten, die während einer Woche lade- und fahrtbedingt anfallen, gehen nun in die Gesamtkostenbewertung ein. Zunächst wird dabei der „Total Cost of Ownership“ (TCO)-Ansatz vorgestellt. Die Gesamtkosten werden anschließend nach ihren Betriebskosten und Anschaffungsausgaben modelliert und für die weitere Bewertung aggregiert.

4.4.1 TCO-Ansatz

Erste Ideen, die dem TCO-Ansatz zugrunde liegen, gehen auf Harriman (1928) zurück, der im Rahmen der Professionalisierung und Bewertung des Einkaufsprozesses vorschlägt, neben den

Anschaffungsausgaben eine längerfristige Sicht einzunehmen, weitere Kosten wie Ersatzbeschaffungen miteinzubeziehen und die reine Mengenkostensicht durch Kriterien wie Qualität und Nutzen zu ergänzen.²⁵⁷ Dabei ist das Konzept sehr ähnlich zum Ansatz der Lebenszykluskostenrechnung oder des „life cycle costing“ (LCC, vgl. zum Beispiel auch Jackson und Ostrom, 1980), wobei hier der Fokus eher auf Investitionsgütern liegt und aus Praktikabilitätsgründen Kostenarten wie Transaktionskosten typischerweise vernachlässigt werden. Im IT-Bereich waren aber gerade auch Transaktionskosten ein wesentlicher Treiber der Gesamtkosten und so führte die Gartner Group im Jahr 1987 den Begriff der „Total Cost of Ownership“ ein²⁵⁸, der eine weitergefasste Definition aller einzubeziehenden Kosten darstellt. Anfang der 1990er-Jahre haben sich im Wesentlichen Ellram und Siferd (1993) mit TCO beschäftigt. Als Kernaufgabe der Anwendung von TCO wurde die Identifizierung aller wichtigen Kosteneinflüsse definiert und so entwickelte Ellram (1993) Vorgehensmodelle, die einer strukturierten Erhebung der Gesamtkosten dienen sollen. Dabei versteht Ellram (1995, S. 4) TCO im Wesentlichen als eine Philosophie, die versucht, die wahren Kosten des Kaufs eines Produkts abzubilden. Andere beschreiben formale Modelle, die die verschiedenen Einflussfaktoren untereinander bewerten.²⁵⁹ Götze und Weber (2008, S. 251) zeigen dazu verschiedene Differenzierungsgrade des TCO-Ansatzes auf und definieren neben dem unterschiedlichen Konkretisierungsgrad des TCO-Konzepts verschiedene Kriterien wie die Zielgruppe (Käufer, Hersteller), den Betrachtungsgegenstand (von der Beschaffung bis zur Produktgestaltung), die Methodik (statische und dynamische Modelle sowie kostengeprägte oder wertbasierte Ansätze) und die Art und den Umfang der Zielgrößen (Zahlungs- oder Erfolgsgrößen und Anschaffungs-, Nutzungszeit oder vorgelagerte Zeiträume).

Unabhängig von diesen Ausprägungen ist eine akkurate Messung der entstehenden Kosten, wie u. a. Milligan (1999) zeigt, häufig sehr schwierig. Neben der Problematik, Kosten ex-ante konkret beziffern zu können, fehlt es häufig auch an Informationen, welche Kostentreiber einzubeziehen sind und welche gleichartige Berechnungsmethode zugrunde zu legen ist, um die ermittelten Kosten untereinander vergleichen zu können. Auch wenn mehrere Modelle zur Berechnung der TCO vorgeschlagen wurden, siehe dazu u. a. Geißdörfer (2009, S. 115), ist die Auswahl der einzubeziehenden Kostenfaktoren doch stark vom Einzelfall abhängig. Kostentreiber, die bisher in TCO-Analysen einbezogen wurden, erheben beispielsweise Ferrin und Plank (2002, S. 25) in einer empirischen Studie auf Basis 146 befragte, Industrieunternehmen, die TCO bereits anwenden. Neben der Berücksichtigung von Kostenfaktoren wird u. a. von Wynstra und Hurkens (2005) oder Denkena et al. (2009) vorgeschlagen, den TCO-Ansatz um wertbasierte Faktoren zu erweitern, um so bspw. „Service Level“ etc. mit in der Bewertung abbilden zu können.

Dem Gedanken der vorherigen Abschnitte folgend, wird nun analog zu Götze und Weber (2008) ein Vorgehen für die Gesamtkostenbestimmung entwickelt, um die Bewertung der mit Fahrzeug und Ladung zusammenhängenden Gesamtkosten zu bestimmen. Die einzelnen

²⁵⁷ Siehe auch Leenders und Fearon (2008, S. 22).

²⁵⁸ Siehe auch Wild und Herges (2000).

²⁵⁹ Vgl. z. B. Degraeve und Roodhooft (1999).

Differenzierungskriterien können dabei wie folgt definiert werden:

Zielgruppe soll, wie in Abschnitt 1.2 gefordert, der (private) Käufer eines Fahrzeugs sein.

Die einzunehmende Kundensicht muss sich daher sowohl in den Preisen widerspiegeln als auch deren Mobilitätsanforderungen erfüllen.

Betrachtungsgegenstand ist der Kauf eines Pkws zur Deckung der (privaten) Mobilitätsbedürfnisse, wobei die verschiedenen zur Verfügung stehenden Alternativtechnologien herangezogen werden sollen.

Methodik soll ein statisches, kostenbasiertes Modell sein, d. h. die betrachteten Parameter verändern sich nicht im Zeitverlauf. Dynamische Modelle haben zwar den Vorteil, dass Rückkopplungen berücksichtigt werden können. Aufgrund der Anwendung des Modells zur Ableitung von Marktdurchdringungen und der optimalen Technologiewahl von Infrastruktur und Fahrzeug kann jedoch auf eine Modellierung späterer Abhängigkeiten verzichtet werden. Die Kostenentwicklung einzelner Komponenten im Zeitablauf kann über verschiedene Parameter eingestellt werden und muss nicht zwangsläufig zur Dynamisierung des Modellansatzes führen. Des Weiteren soll das Modell in erster Linie die anfallenden Kosten und nicht wertbasierte Komponenten einbeziehen. Jedoch kann über die Modellierung des Fahrverhaltens eine Einsetzbarkeit einer bestimmten Technologie überprüft werden, wodurch zumindest die Funktionalität der Alternativtechnologie überprüft werden kann. Auf eine Bewertung weicher Kriterien, wie z. B. das Ansehen der neuen Technologie, wird bewusst verzichtet.

Art und Umfang der Zielgrößen sollen im Wesentlichen Zahlungsgrößen beinhalten und die über den Nutzungszeitraum wesentlichen Kosten umfassen.

Im Folgenden werden nach Ellram (1993) zunächst die einzelnen Kostentreiber identifiziert und zur Bewertung der Gesamtmobilitätskosten herangezogen, wie in Tabelle 4.1 dargestellt. Mögliche weitere Einflussfaktoren, wie die Verfügbarkeit der Fahrzeuge, Kundenakzeptanz oder Umwelteffekte, sollen nicht monetär abgebildet werden, da diese schwer ökonomisch zu fassen sind. Die ausgewählten Kostentreiber erlauben einen ökonomischen Vergleich der Alternativtechnologien. Inwieweit sich die erhaltenen Ergebnisse durch weitere Faktoren beeinflussen lassen, ist anschließend kritisch zu beleuchten. Insbesondere ist eine Sensitivitätsbetrachtung der Analysen anzuschließen, da nicht nur weitere Einflussfaktoren wirken können, sondern auch eine akkurate Bestimmung der langfristig anzulegenden Kosten nicht möglich ist.

Da selbst in Einkaufsorganisationen die TCO-Methode nicht durchgehend eingesetzt wird²⁶⁰, ist von Endkunden kaum zu erwarten, dass der Fahrzeugkauf auf Basis einer solchen Bewertung durchgeführt wird. Dazu benötigt der Endkunde insbesondere Transparenz über die anfallenden Kosten, die ihm heute nicht unbedingt beim Fahrzeugkauf vorliegen, was z. B. über Informationskampagnen gezielt erreicht werden könnte.

²⁶⁰ Ferrin und Plank (2002, S. 22) ermitteln z. B., dass in etwa einem Drittel der Einkaufsentscheidungen TCO eingesetzt werden.

Kostenkategorie ²⁶¹	Gesamtkostentreiber	Anwendung im Modell	Modellabbildung
Betrieb	– Effizienz – Betriebsausgaben	– Beladewirkungsgrad – Strom, Benzin, Infrastruktur	Betriebskosten
Wartung	– Wartungskosten	– Wartungskosten	
Qualität	– Haltbarkeit – Ersatz	– Batteriealterung – Neubeschaffung der Batterie	
Anschaffung	– Anschaffungs- ausgaben – Preisentwicklung	– Anschaffung einzelner Fahrzeugkomponenten – Batterieentwicklung	Kapitalkosten
Lebenszyklus	– Lebensdauer	– Lebensdauer von Fahrzeug und Batterie	
Opportunitätskosten	– Geldbeschaffungsk.	– Zinssatz	
Technologischer Fortschritt	– Einsetzbarkeit	– Simulation des Fahrver- haltens und Überprüfung der Nutzungsmögl. der Alternativtechnologie	Szenarienbasierte Erfassung (siehe Kap. 5)
Weitere	– Steuern/Registrie- rungsgebühr	– Abbildung netto/brutto – Staatl. Förderungen	

Tabelle 4.1 – Kostenkategorien der TCO-Methode nach Ellram (1993) und deren Abbildung im Modell.

4.4.2 Betriebskosten

Die Betriebskosten setzen sich im Wesentlichen aus den in Abschnitt 4.3 entwickelten Kosten für das Fahr- und Ladeprofil einer Woche zusammen. Da die gegebenen Wochenprofile das Verkehrsverhalten repräsentativ beschreiben, können die Kosten des wöchentlichen Profils auf das Jahr hochgerechnet werden. Seltene Ereignisse wie Urlaubsfahrten sind über den repräsentativen Schnitt des zugrunde gelegten Mobilitätspanels in der Grundgesamtheit enthalten. Auf Einzelsicht können diese seltenen Ereignisse jedoch unterschätzt werden.²⁶² Des Weiteren sind den Betriebskosten die Wartungsausgaben c^{OM} zuzurechnen. Damit ergeben sich die jährlichen Betriebskosten zu

$$a^{\text{opex}} = 52c_{\text{ges}} + c^{\text{OM}}. \quad (4.24)$$

²⁶¹ Nach Ferrin und Plank (2002), wobei die Kostenkategorien Logistik, Lieferantenzuverlässigkeit/-tauglichkeit, Lagerhaltung, transaktionsbedingte und kundenabhängige Kosten nicht mit einbezogen werden.

²⁶² Einmalige, sehr lange Fahrten werden jedoch in den nächsten Jahren aufgrund der Reichweitenbeschränkung nicht mit vollelektrischen Fahrzeugen zurückgelegt werden können und erfordern daher die Akzeptanz und den Einsatz alternativer Technologien, wie z. B. von Fernzügen, um diese Langstrecken zu bewältigen. Werden häufig Langstrecken zurückgelegt, so ist davon auszugehen, dass diese auch im betrachteten Wochenprofil wiederspiegelt sind und damit ein vollelektrisches Fahrzeug für dieses Profil nicht in Frage kommt. Daher ist eine Sensitivitätsbetrachtung unabdingbar.

4.4.3 Anschaffungsausgaben

Die annuisierten Kapitalkosten lassen sich über die anfallenden Anschaffungsausgaben, siehe Tabelle 3.4, die Lebensdauer des Fahrzeugs und der Batterie sowie des Zinssatzes k berechnen. Dabei wird angenommen, dass ein Fahrzeug so lange eingesetzt werden kann, solange es noch nicht die Lebensdauer oder die maximal möglichen Fahrzeugkilometer überschritten hat. Die Einsetzbarkeit und Lebensdauer einer Batterie wird über ihren Alterungszustand definiert. So gilt eine Batterie gemeinhin als nicht mehr für den Fahrzeugeinsatz tauglich, wenn ein Alterungszustand von 80 % der Kapazität erreicht wird.²⁶³ Wird dieser Zustand vor Ende des Fahrzeuglebens erreicht, so muss eine neue Batterie angeschafft werden. Eine kürzere Lebensdauer des Fahrzeugs als die der Batterie ist nicht zu erwarten und wäre aufgrund der begrenzten Möglichkeit zur Weiterverwendung oder Zweitnutzung auch nur eingeschränkt möglich.²⁶⁴ Damit ergeben sich die angepassten und voneinander abhängigen Lebensdauern zu:

$$\hat{T}^V = \min \left\{ T^V; \frac{M}{52 \sum_{vt} d_t} \right\} \quad \text{und} \quad \hat{T}^B = \min \left\{ T^B; \hat{T}^V \right\}. \quad (4.25)$$

Die annuisierten Anschaffungsausgaben für Fahrzeug und Batterie werden mit dem Annuitätenfaktor auf Basis der jeweiligen Lebensdauern berechnet.²⁶⁵ Die Anschaffungsausgaben für die Batterie werden auf Basis der Batterielebensdauer berechnet. Über die Batteriealterung, die über die zeitbedingte Alterung hinausgeht, wird eine anteilige Neubeschaffung der Batterie abgedeckt.²⁶⁶ Damit ergeben sich die annuisierten Anschaffungsausgaben zu

$$\begin{aligned} a^{\text{capex}} &= [I^V + I^{\text{Ta}} + I^{\text{St}} + I^{\text{ICE}} P^{\text{ICE}} + I^{\text{EM}} P^{\text{EM}} + I^{\text{Hy}}] \frac{(1+k)^{\hat{T}^V} k}{(1+k)^{\hat{T}^V} - 1} + \dots \\ &\dots I^B \kappa \frac{(1+k)^{\hat{T}^B} k}{(1+k)^{\hat{T}^B} - 1}. \end{aligned} \quad (4.26)$$

4.4.4 Gesamtkosten

Die jährlichen Gesamtkosten setzen sich aus den jährlichen Betriebskosten und den annuisierten Anschaffungsausgaben zusammen und berechnen sich zu

$$a^{\text{ges}} = a^{\text{opex}} + a^{\text{capex}}. \quad (4.27)$$

Eine greifbarere Interpretation der Gesamtkosten beschreibt die Möglichkeit, diese auf Kilometer umzurechnen, wie z. B. in:

²⁶³ Vgl. Abschnitt 3.4.4.

²⁶⁴ Siehe Abschnitt 3.4.5.

²⁶⁵ Vgl. u. a. Dhillon (2009, S. 19).

²⁶⁶ Vgl. Abschnitt 4.3.3.1, Restwerte für Fahrzeug oder Batterie werden nicht betrachtet.

$$a^{100 \text{ km}} = 100 \frac{a^{\text{ges}}}{52 \sum_t d_t}. \quad (4.28)$$

Um die beste Fahrzeugtechnologie auszuwählen, können nun die Gesamtkosten für die einzelnen Fahrprofile berechnet werden. Die Technologie mit den günstigsten Gesamtkosten setzt sich dabei durch. Der Anteil der Fahrprofile, die sich dabei durchsetzen, gibt Aufschluss über mögliche Marktdurchdringungen. Da die Kostenberechnung sowohl von den technischen und physikalischen Parametern als auch von der angenommenen Beladeinfrastruktur abhängt, lassen sich über Variation dieser Parameter Aussagen über die Marktdurchdringung von Fahrzeug und Infrastruktur ableiten.

Entwickeln sich neben den Anschaffungsausgaben ebenfalls die Betriebskosten über den Zeitablauf, so sind diese ggf. zu periodisieren und die Gesamtkosten berechnen sich zu:

$$a^{\text{ges}} = a^{\text{capex}} + \frac{(1+k)^{\hat{T}^V} k}{(1+k)^{\hat{T}^V} - 1} \sum_{t=1}^{\hat{T}^V} \frac{a_t^{\text{opex}}}{(1+k)^t}. \quad (4.29)$$

Für jedes a_t^{opex} ist unter den im Zeitverlauf entwickelten Kostenannahmen die Optimierung aus Gleichung (4.19) durchzuführen.

Zusammenfassung

- Mehrtägige Fahr- und Standprofile lassen sich auf Basis der Daten des Mobilitätspanels durch die Auswertung von Einzelwegen auf Fahrzeugebene aggregieren.
- Mittels dynamischer Programmierung und mit Annahmen zur verfügbaren Ladeinfrastruktur kann ein kostenminimales Ladeprofil bestimmt werden, das Batteriealterung, Schnellladung und Plug-in-Hybride berücksichtigt.
- Das Ladeprofil kann zusammen mit den Anschaffungsausgaben des Fahrzeugs auf Basis einer TCO-Analyse in Gesamtkosten des Fahrzeugkonzepts überführt und somit vergleichbar gemacht werden.

Kapitel 5

Auswahl geeigneter Ladeinfrastruktur

Forschungsfragen

- Wie viele Fahrzeuge können elektrisch betrieben werden hinsichtlich technischer, ökonomischer Restriktionen und welche Beladeinfrastruktur wird dazu benötigt?
- Wie verändert sich der Infrastrukturbedarf, wenn andere Fahrzeuge wie zum Beispiel Plug-in-Hybride gewählt werden können?
- Gibt es optimale Batteriegrößen für die verschiedenen Fahrzeug- und Infrastrukturkonzepte?
- Welche Diffusion von Beladeinfrastruktur ist zu erwarten?
- Welche Sensitivitäten sind zu berücksichtigen?
- Welchen Einfluss haben heutige und zukünftige Steuer- und Fördersysteme?
- Welche Faktoren treiben Kaufentscheidungen?

5.1 Überblick über die Simulation

Aufbauend auf den Fahrprofilen und der Beladeoptimierung in Kapitel 4 werden nun alle Fahrprofile des Mobilitätspanels simuliert, um so eine Aussage zur Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen und zum Aufbau von Beladeinfrastruktur zu erlauben. Zunächst wird auf reine Elektrofahrzeuge fokussiert (siehe Abschnitt 5.2) unter Variation der Beladeinfrastruktur und Batteriekosten. In einem nächsten Schritt wird die Simulation um alternative Antriebskonzepte erweitert (siehe Abschnitt 5.3), wodurch die Nutzung von Hybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeugen möglich wird. Auf diese Weise kann das kostenoptimale Fahrzeug bestimmt und hinsichtlich der benötigten Infrastruktur bewertet werden. Diese Plug-in-Hybridfahrzeuge müssen aufgrund des zweiten Antriebssystems nicht ausschließlich elektrisch betrieben werden

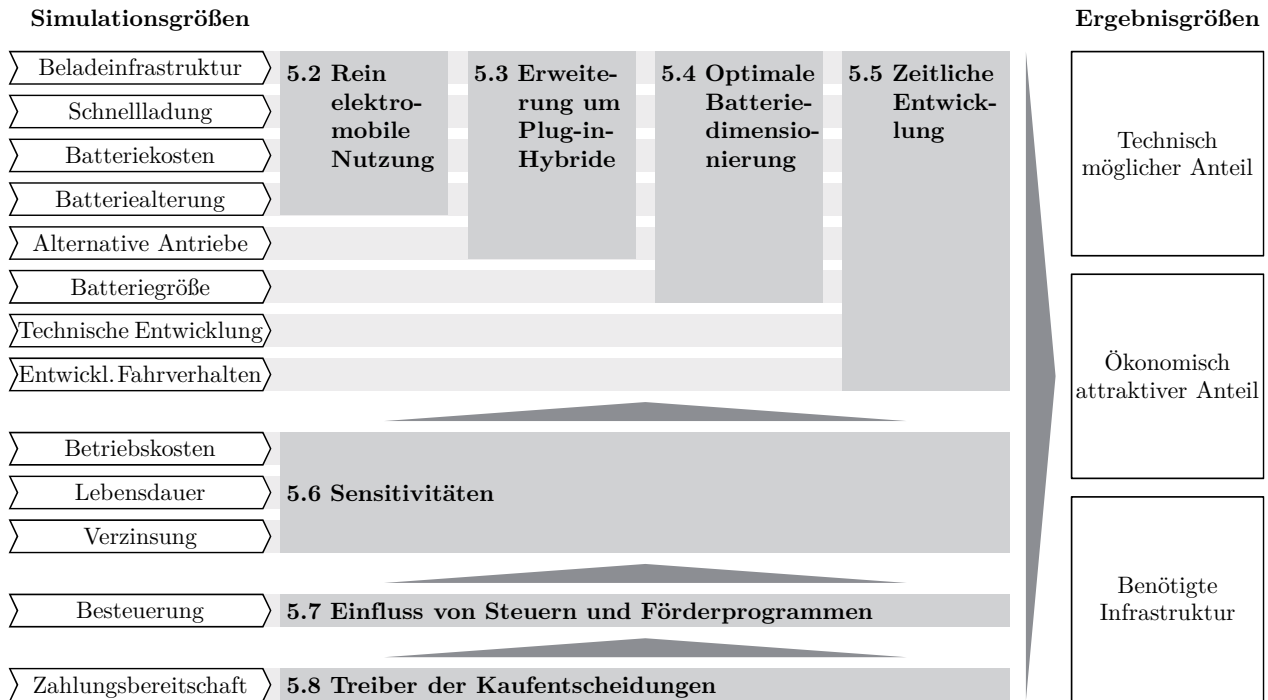


Abbildung 5.1 – Überblick über die Simulationsschritte.

und können somit mit kleineren Batterien ausgestattet werden. Darauf aufbauend stellt sich die Frage einer kostenoptimalen Dimensionierung der Batterie (siehe Abschnitt 5.4), um so die Gesamtkosten reduzieren zu können. Über die verschiedenen berichteten Fahrprofile des Mobilitätspanels können die Ergebnisse über das Mobilitätsverhalten mehrerer Jahre überprüft werden. Zusammen mit der Kostenentwicklung der einzelnen Bauteile wird die Auswertung in Abschnitt 5.5 um eine zeitliche Komponente erweitert. All diese Auswertungen werden in Abschnitt 5.6 hinsichtlich ihrer Sensitivitäten untersucht, ob zum Beispiel Benzinpreis-, Strompreis- oder Verbrauchsänderungen das Ergebnis signifikant verändern. Abschließend werden der Einfluss der Besteuerung (siehe Abschnitt 5.7) und der Zahlungsbereitschaft untersucht (siehe Abschnitt 5.8). Ein Überblick über die durchzuführenden Simulationen ist in Abbildung 5.1 zu finden.

Die Simulation beruht dabei auf Eingangs- oder Simulationsgrößen, also Parametern, die im Simulationsmodell verändert und hinsichtlich der Auswirkungen in den Ergebnisgrößen überprüft werden. Die Simulations- und Ergebnisgrößen werden im Folgenden beschrieben.

5.1.1 Simulationsgrößen

Als Simulationsgrößen werden hier die Parameter bezeichnet, die als Veränderliche in die Simulation und Optimierung der einzelnen Beladeprofile eingehen. Es werden insgesamt 13 Simulationsgrößen betrachtet, die im Folgenden ausführlicher beschrieben werden:

Beladeinfrastruktur – Um den Aufbau einer geeigneten Beladeinfrastruktur zu bestimmen, werden verschiedene Beladeinfrastrukturen betrachtet. Wichtig sind dabei vor allem die Art der Zugänglichkeit, die zur Verfügung stehende Anschlussleistung und die damit

verbundenen Kosten für die Ladung.²⁶⁷ Dabei können insbesondere unterschiedliche Anschlussleistungen an den verschiedenen Standorten zur Verfügung stehen.

Schnellladung – Zusätzlich zu den verschiedenen Belademöglichkeiten ist es eventuell möglich, Elektrofahrzeuge bei kurzen Stopps, ähnlich zum heutigen Tankvorgang, an Hochleistungsladesäulen zu beladen. Um schnelle Beladungsvorgänge zu ermöglichen, basieren diese Ladesäulen typischerweise auf einer kabelgebundenen Gleichstromübertragung mit Anschlussleistungen von über 100 kW. Diese verursachen jedoch auch hohe Ladekosten.

Batteriekosten – Die Gesamtkosten werden vor allem stark durch die spezifischen Anschaffungsausgaben der Batterie, im Folgenden vereinfacht Batteriekosten genannt, getrieben. Da die Batteriekosten jedoch mit einer hohen Unsicherheit über Höhe und mögliche Kostensenkungen verbunden sind²⁶⁸, werden in allen Simulationen die Auswirkungen unterschiedlicher Batteriekosten auf Marktdurchdringung und Beladeinfrastrukturaufbau bewertet.

Batteriealterung – Zusätzlich zu den Batteriekosten kann die Batteriealterung einen erheblichen Einfluss auf die Lebenserwartung, Ersatzinvestitionen und damit die Gesamtkosten haben.²⁶⁹

Alternative Antriebe – Zunächst werden nur reine Elektrofahrzeuge den Verbrennungsmotoren gegenübergestellt. Da diese jedoch mit vergleichsweise großen Batterien ausgestattet werden müssen, um die Reichweitenanforderungen zu erfüllen, sind reine Elektrofahrzeuge anfangs in einer Gesamtbetrachtung deutlich teurer. Daher sind andere alternative Antriebe, wie hier insbesondere Plug-in-Hybride zu berücksichtigen.

Batteriegröße – Da Plug-in-Hybride aufgrund des Verbrennungsmotors auch Strecken außerhalb der elektrischen Reichweite zurücklegen können, muss die Batterie nicht auf die Reichweitenanforderung ausgelegt werden. Deshalb kann eine kleinere Batterie, als in einem reinen Elektrofahrzeug notwendig wäre, eingebaut werden. Auf diese Weise lassen sich die Anschaffungsausgaben deutlich reduzieren. Für Plug-in-Hybride kann eine optimale Auslegung der Batteriegröße auf die Bedürfnisse des Fahrers gemäß seines Fahrprofils gefunden werden, welche die Gesamtkosten minimiert. D. h. es wird eine möglichst kleine Batterie gewählt (Reduzierung der Anschaffungsausgaben), die jedoch einen möglichst hohen elektrischen Fahranteil ermöglicht (Reduzierung der Betriebskosten, da Strom günstiger ist als Treibstoff). In Abwägung der beiden Kostentreiber lässt sich somit eine optimale Batteriegröße finden.

Technische Entwicklung – Ähnlich zu den Batteriekosten unterliegen auch andere Komponenten technischen Weiterentwicklungen und Skaleneffekten, sodass auch hier im Zeit-

²⁶⁷ Vgl. Kapitel 2.

²⁶⁸ Siehe Abschnitt 3.4.3.

²⁶⁹ Siehe Abschnitt 3.4.4.

verlauf unterschiedliche Kosten für die Bauteile anzunehmen sind. Aus der Betrachtung werden zunächst jedoch betriebskostenrelevante Einflussgrößen, wie etwa Treibstoff- und Stromkosten, Verbrauch etc., außen vor gelassen. Da diese, wie sich zeigen wird, jedoch einen großen Einfluss auf das Simulationsergebnis haben, werden sie in der späteren Sensitivitätsanalyse ebenfalls untersucht.

Entwicklung des Fahrverhaltens – Ein zweiter Einflussfaktor bei der Analyse der zeitlichen Entwicklung des Simulationsergebnisses ist die Entwicklung des Fahrverhaltens. Die Simulation basiert auf dem repräsentativen Fahrverhalten des Mobilitätspanels. Um den Zeitbedarf beim Durchlauf der Simulation zu begrenzen, werden die Fahrprofile des letztmalig berichteten Jahres 2007 herangezogen. Eine mögliche Entwicklung des Fahrverhaltens und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse können über die Panelaufzeichnungen der Jahre 1994–2006 erweitert werden. So kann untersucht werden, ob die Fahrprofile konstant bleiben oder sich verändern und damit ein Übergang auf elektromobile Antriebe vereinfacht oder erschwert wird. Allerdings wird sich ausschließlich auf die berichteten Fahrprofile des Mobilitätspanels bezogen, wodurch eine zukünftige Änderung des Fahr- und Nutzerverhaltens nicht antizipiert werden kann. Eine wesentliche Annahme bei der Simulation ist daher, dass die heutigen Mobilitätsbedürfnisse zu adressieren sind.

Betriebskosten – Verschiedene Betriebskosten können einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtkosten haben, dazu zählen insbesondere Treibstoffkosten, Stromkosten und der Verbrauch. Die *Treibstoffkosten* beeinflussen die Gesamtkosten der verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeuge und Hybride und hängen dabei im Wesentlichen von der Entwicklung der Rohölpreise und der Besteuerung ab. Als Simulationsgröße finden die Treibstoffkosten Eingang in die Sensitivitätsanalyse, um so mögliche Kipppunkte in der Marktentwicklung zu identifizieren. Analog zu den Treibstoffkosten beeinflussen die *Stromkosten* die Betriebskosten der Elektrofahrzeuge und Plug-in-Hybride. Dabei sind die Stromkosten nicht unabhängig von der Entwicklung der Treibstoffkosten, da fossile Treibstoffkosten wesentliche Kostentreiber im heutigen Strommix darstellen. Erst bei Verwendung erneuerbarer Energien wäre Strom nicht nur annähernd CO₂-emissionsfrei, sondern auch unabhängig von der Treibstoffkostenentwicklung. Ein weiterer Treiber der Betriebskosten ist der angenommene *Verbrauch*, sowohl für den Verbrennungsmotor als auch für den elektrischen Antrieb. Der Strombedarf des elektrischen Antriebs verhält sich anders als der Verbrauch des Verbrennungsmotors und hängt weniger stark vom Fahrverhalten ab, schwankt jedoch stärker jahreszeitabhängig. Das Fahrverhalten wird bei den Verbrennungsmotoren durch verschiedene aus der Praxis entwickelte Fahrzyklen abzudecken versucht.²⁷⁰ Bei elektrischem Antrieb kann dies jedoch stärker vernachlässigt werden, da ein effizienter Betrieb des Elektromotors in allen Geschwindigkeitsbereichen gewährleistet ist. Beim Verbrennungsmotor resultieren die Verbrauchsschwankungen vor

²⁷⁰ Siehe z. B. Barlow et al. (2009).

allem aus den unterschiedlichen Einsatzgebieten, z. B. ob im städtischen Bereich oder auf der Autobahn gefahren wird. Bezüglich des Stromverbrauchs der Elektrofahrzeuge sind die Nebenaggregate (z. B. die Klimaanlage) mit zu berücksichtigen, da diese den Gesamtstromverbrauch erhöhen und deren Strombedarf nicht wie im Falle des Verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeugs durch die Lichtmaschine bereitgestellt wird. Daher kann der Verbrauch im Winter und Sommer stark vom angegebenen antriebsbedingten Verbrauch abweichen und schwankt somit insbesondere saisonal.²⁷¹

Lebensdauer – Die kalendarische Lebenserwartung der Batterie und des Fahrzeugs bestimmen die nutzbare Zeit, die das Fahrzeug in Betrieb steht, und treiben damit wesentlich die Gesamtkosten.²⁷² Die kalendarische Lebensdauer der Batterie ist dabei unabhängig von der Batteriealterung, die gesondert in die Simulation eingeht.

Verzinsung – Bei der Berechnung der Gesamtkosten wird ein Zinssatz k zur Diskontierung unterstellt.²⁷³ Dieser kann sich je nach den Verzinsungsansprüchen des Investors ändern und ist damit ein wesentlicher Treiber der Gesamtkosten. Da Elektrofahrzeuge im Vergleich zu ICEs hohe Anschaffungsausgaben und niedrigere Betriebskosten aufweisen, bevorzugt ein hoher Verzinsungsanspruch eher Verbrennungsmotorbetriebene Fahrzeuge.

Besteuerung – Die verschiedenen Kostenkomponenten werden durch unterschiedliche Steuerarten und -sätze belastet. So fallen in Deutschland z. B. für Benzin die Energiesteuer, für Strom hingegen die Stromsteuer an. Dadurch wird der Energieträger Strom, bezogen auf die gefahrene Strecke, mit nur etwa 10 % der Steuerlast eines Verbrennungsmotors belegt.²⁷⁴ Im Fall der Elektrofahrzeuge fallen durch das größere Volumen der Anschaffungsausgaben jedoch höhere Mehrwertsteuerbelastungen an. Aber auch für die Zulassung und weitere Gebühren und Abgaben wirken bereits heute unterschiedliche Berechnungsgrundlagen. Daher wird zum einen eine Netto-Betrachtung der Simulation durchgeführt, um den Steuer- und Abgabeneffekt zu isolieren. Zum anderen wird die Sensitivität des Ergebnisses bei Anpassung der Steuersätze oder möglicher Förderung der Elektrofahrzeuge betrachtet.

Zahlungsbereitschaft – Abschließend wird die Änderung des Ergebnisses unter Berücksichtigung höherer Zahlungsbereitschaften betrachtet. Darunter ist sowohl eine höhere

²⁷¹ Siehe u. a. Abschnitt 3.5.1.

²⁷² Inwiefern die beiden Lebenserwartungen in die Lebensdauer des Gesamtsystems Fahrzeug und Batterie umzurechnen sind, wird in Gleichung (4.25) detailliert.

²⁷³ Siehe Abschnitt 4.4.3.

²⁷⁴ Benzin wird gemäß Bundesministerium der Finanzen (2010b) mit 0,6545 €/l besteuert, das entspricht in etwa 0,0667 €/kWh. Strom wird gemäß Bundesministerium der Finanzen (2010a) mit 0,0205 €/kWh besteuert. Das entspricht, bezogen auf die konsumierte Kilowattstunde, einer 70 % niedrigeren Steuerlast des Energieträgers Strom. Rechnet man die Effizienzverluste bei der lokalen Verbrennung des Benzins im Verbrennungsmotor dazu, so wird zusätzlich ungleich mehr Energie konsumiert und somit auch versteuert. Gemäß der Verbrauchsannahmen aus Tabelle 3.4 fallen damit pro 100 km bei Benzin 3,93 € und bei Strom 0,37 € Steuern an. Auf die Fahrstrecke hat der Energieträger Strom somit in etwa eine 90 % niedrigere Steuerlast zu tragen.

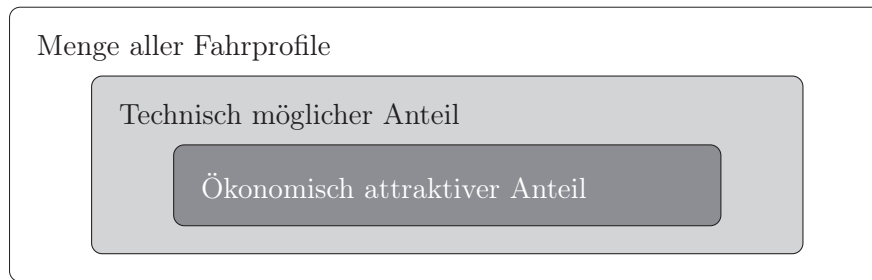


Abbildung 5.2 – Simulationsergebnis als Anteil an der Menge aller Fahrprofile.

Zahlungsbereitschaft für die Anschaffung eines Elektro- oder Hybridfahrzeugs gegenüber einem verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeug zu verstehen als auch für den Komfort und die einfache Nutzung bestimmter Beladeinfrastrukturen.

5.1.2 Ergebnisgrößen

Als Ergebnisgrößen werden die Ergebnisse der Simulation bezeichnet, die zur Bewertung der Simulation unter den veränderten Simulationsgrößen herangezogen werden. Insbesondere werden drei Ergebnisgrößen betrachtet, die im Folgenden ausführlicher beschrieben werden:

Technisch möglicher Anteil – Der technisch mögliche Anteil der Elektromobilität ist der Teil der gesamten Fahrzeugflotte, der aufgrund seines Fahrverhaltens potenziell auf ein Elektrofahrzeug umgestellt werden kann. Zum einen heißt das, dass die durchgeführten Fahrten mit der Reichweitenrestriktion des Fahrzeugs vereinbar sind. Zum anderen sollten zwischen den Fahrten ausreichend viele Möglichkeiten bestehen, die Batterie wieder zu beladen. Reichen im Verlauf des betrachteten Fahrprofils die Batteriekapazität und die zur Verfügung stehende Beladeinfrastruktur aus, das zugrunde gelegte Fahrzeug elektrisch zu betreiben, so kann für dieses Fahrprofil ein Elektrofahrzeug eingesetzt werden. Über die repräsentative Menge aller Fahrprofile wird somit geschlussfolgert, dass die zugrunde gelegten Fahrprofile die Mobilitätsanforderungen an die private Fahrzeugflotte bestimmen. Die Fahrprofile, die im Verhältnis zur Gesamtheit aller betrachteten Fahrprofile mittels eines Elektrofahrzeugs bedient werden können, ergeben somit den technisch möglichen Anteil der Elektromobilität. Die technisch möglichen Fahrprofile sind damit eine Teilmenge der Menge aller betrachteten Fahrprofile, siehe Abbildung 5.2. Dieser Anteil stellt jedoch nur den aufgrund des Nutzerverhaltens umzustellenden Teil dar. Ein hoher technischer Anteil bedeutet zunächst nur, dass Elektrofahrzeuge generell gut für die Mobilitätsanforderungen einsetzbar sind.

Ökonomisch attraktiver Anteil – Der ökonomisch attraktive Anteil der Elektromobilität bestimmt den Anteil der Fahrprofile, der kostengünstiger mit einem Elektromobil als mit einem verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeug betrieben werden kann. Aufgrund der höheren Anschaffungsausgaben und niedrigeren Betriebskosten eines Elektrofahrzeugs muss dieses vergleichsweise gut ausgelastet werden, damit ein solches Fahrzeug

Haushaltsmerkmale	Personenmerkmale
– Raum-/Regionstyp	– Geschlecht
– Haushaltstyp/-größe	– Alter
– Haushaltseinkommen	– Bildung, Schulabschluss, Beruf
– Verfügbarkeit von ÖPNV, Cafes, Theater in der Nachbarschaft	– Lage, Erreichbarkeit, Parkplatzsituation am Arbeitsplatz
– Pkw-Eigentums- und -Nutzungsverhältnis	– Krankheit, Urlaub, weitere Besonderheiten in der berichteten Woche
– Garagenverfügbarkeit	

■ = Fokus der weiteren Segmentanalyse.

Tabelle 5.1 – Soziodemografische Kriterien des Mobilitätspanels.

gegenüber einem verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeug ökonomisch vorteilhafter ist. Die ökonomisch attraktiven Fahrprofile sind dabei Teilmenge der technisch möglichen Profile, da vorausgesetzt werden muss, dass ein Fahrprofil überhaupt mittels eines Elektrofahrzeugs bedient werden kann, siehe Abbildung 5.2. Somit müssen mit einem Elektrofahrzeug ökonomisch sinnvoll bedienbare Fahrprofile zunächst die technischen Restriktionen (Weglänge und hinreichende Ladeinfrastruktur) erfüllen und zusätzlich mit diesen Fahrprofilen eine entsprechend hohe Auslastung des Elektrofahrzeugs erreichen. Beide Bedingungen schränken den Einsatz eines vollelektrischen Fahrzeugs deutlich ein.

Benötigte Infrastruktur – Als drittes Simulationsergebnis wird die gewählte Ladeinfrastruktur betrachtet. Im Simulationsdurchlauf über verschiedene Ladeinfrastrukturen werden die zuvor beschriebenen Ergebnisvariablen in Abhängigkeit der angenommenen Ladeinfrastruktur bewertet. In Abwägung zu den erreichten technischen und ökonomischen Anteilen wird die benötigte Ladeinfrastruktur bewertet und der Aufbau einer geeigneten Beladeinfrastruktur abgeleitet.

Neben den oben beschriebenen Ergebnisgrößen, die zur Bewertung des Simulationsergebnisses herangezogen werden, lassen sich weitere Parameter auswerten, um die gewählten Fahrzeuge und die benötigte Beladeinfrastruktur besser zu verstehen. Dazu gehört z. B. der elektrische Fahranteil. Dieser gibt den Streckenanteil des betrachteten Fahrprofils an, der vollelektrisch zurückgelegt werden kann, und trifft damit eine Aussage über das Reduktionspotenzial lokaler CO₂-Emissionen. Weitere Parameter wie die Verteilung der kostenoptimalen Batteriegröße sind für die einzelnen Simulationserweiterungen nötig und werden dort eingeführt.

5.1.3 Mögliche Segmentauswertungen

Mit den berichteten Fahrprofilen des Mobilitätspanels werden weitere Daten erfasst, die eine detailliertere Betrachtung der Ergebnisse nach soziodemografischen Kriterien erlauben. Diese Informationen werden sowohl auf Haushalts- als auch auf Personenebene festgehalten und sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Mittels der in Abschnitt 4.2.1 näher beschriebenen Zuordnung

von Personenfahrprofilen auf Fahrzeuge ist eine Auswertung nach Personenmerkmalen jedoch nur für jenen Anteil der Fahrzeuge möglich, die nur von einer Person genutzt werden. Weiterhin ist das Mobilitätspanel, wie in Zumkeller et al. (2010) beschrieben, zwar für das deutsche Fahrverhalten repräsentativ, jedoch sind nicht alle soziodemografischen Ausprägungen repräsentativ erfasst. So wurden diese teils mit Hochrechnungsfaktoren versehen, damit die Daten den Bevölkerungsschnitt wieder treffen. Aus diesem Grund sind Segmentanalysen vorsichtig einzusetzen. Für die Auswertung wird grundlegend auf die Haushaltsmerkmale und dabei insbesondere auf Regionstyp²⁷⁵, Haushaltstyp²⁷⁶ und Haushaltseinkommen²⁷⁷ fokussiert (in der Tabelle grau hinterlegt).

5.2 Rein elektromobile Nutzung

Zur Simulation der rein elektromobilen Nutzung werden nun die Simulationsgrößen Beladeinfrastruktur, Schnellladung, Batteriekosten und -alterung verändert und mittels der definierten Ergebnisgrößen bewertet. Diese werden im Folgenden einzeln dargestellt.

5.2.1 Anteil technisch möglicher Elektromobilitätsnutzung

Für die Beurteilung des technisch möglichen Anteils der Elektrofahrzeuge sind unterschiedliche Beladeinfrastrukturszenarien einzubeziehen. Die Batteriekosten und -alterung sind für die Beurteilung des technisch möglichen Anteils nicht notwendig. Die Simulation kann nun auf Basis der in Abschnitt 2.5 definierten Referenzinfrastrukturszenarien durchgeführt werden. Dabei werden aus den im Jahr 2007 berichteten Fahrten zunächst Fahr- und Standprofile erzeugt sowie daraus ein Ladeprofil auf Basis der in Abschnitt 3.3.3 definierten technischen Parameter abgeleitet. Als Batteriekapazität κ für Elektrofahrzeuge wurde aus Reichweitenanforderungen²⁷⁸ eine 30 kWh-Batterie definiert. Da jedoch die ersten auf den Markt gebrachten Elektrofahrzeuge mit kleineren Batterien von im Durchschnitt 24 kWh ausgestattet sind, wird die folgende Analyse des Marktdurchdringungspotenzials auf Basis dieser kleineren Batterie durchgeführt. Für spätere Marktphasen ist jedoch eine größere Batterie nötig, um insbesondere die Kundenanforderung an eine minimale Reichweite von 100 km zu erfüllen.

²⁷⁵ Regionstypen nach BBSR (2010): (1) Hochverdichtete Agglomerationsräume, (2) Agglomerationsräume mit herausragenden Zentren, (3) Verstädterte Räume höherer Dichte, (4) Verstädterte Räume mittlerer Dichte mit großen Oberzentren, (5) Verstädterte Räume mittlerer Dichte ohne große Oberzentren, (6) Ländliche Räume höherer Dichte, (7) Ländliche Räume geringerer Dichte.

²⁷⁶ Haushaltstyp auf Basis der Haushaltsgröße: (1) ein bis zwei Personen, von denen mindestens einer berufstätig ist, (2) ein bis zwei Personen, von denen keiner berufstätig ist, (3) Haushalt mit Kindern unter 18 Jahren, (4) Haushalt ohne Kinder und mit drei oder mehr Erwachsenen.

²⁷⁷ Monatliches Nettoeinkommen des Haushalts, das wie folgt klassiert wird: (1) bis unter 500 €, (2) 500–1.000 €, (3) 1.000–1.500 €, (4) 1.500–2.000 €, (5) 2.000–2.500 €, (6) 2.500–3.000 €, (7) 3.000–3.500 €, (8) 3.500 € und mehr, (9) keine Angabe.

²⁷⁸ Bei einem SOC-Fenster von 20–80 % können 60 % der Batterie genutzt werden und bei einem Verbrauch von 0,18 kWh/km benötigt ein Elektrofahrzeug für eine Reichweitenanforderung von 100 km bereits eine 30 kWh-Batterie.

Beladeinfrastruktur-szenario	Anschlussleistung (in kW)				Technisch mögl. Anteil	
	Privat	Halb-öffentlich	Öffentlich	Anderorts	(a) bei geg. Infrastruktur	(b) privat, nur wenn Garage verf.
1	3,7				62,1 %	52,6 %
2	11,1	0	0	0	63,0 %	53,4 %
3	22,2				63,4 %	53,8 %
4		11,1			67,2 %	56,4 %
5	3,7	22,2	0	0	67,2 %	56,4 %
6			11,1		79,0 %	66,2 %
7	3,7	11,1	22,2	0	79,4 %	66,5 %
8			43,6		79,5 %	66,6 %
Schnellladung	3,7	+ während der Fahrt (100 kW)			100,0 %	100,0 %

Anmerkung: Auf Basis der technischen Parameter in Tabelle 3.4 und einer Batteriekapazität von 24 kWh.

Tabelle 5.2 – Technisch möglicher Anteil auf Basis verschiedener Beladeinfrastrukturszenarien bei (a) angenommener privater Anschlussleistung und (b) mit Berücksichtigung, ob am privaten Stellplatz eine Garage zur Verfügung steht.

Das Ladeprofil wird über den in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Algorithmus zur Ermittlung eines nicht optimierten Ladeprofiles untersucht, da nur die technischen Rahmenbedingungen überprüft werden sollen, ob dieses Fahrverhalten über ein Elektrofahrzeug überhaupt abgedeckt werden kann. Eine ökonomische Bewertung und insbesondere ein kostengünstiges Ladeprofil wird zu diesem Zeitpunkt zunächst vernachlässigt. Kann ein gültiges Ladeprofil erzeugt werden, also eines, das einen gültigen Batteriezustand in allen Zeiten t und insbesondere auch im letzten Zeitintervall T besitzt, so kann das zugrunde gelegte Fahrprofil auch mittels eines Elektrofahrzeugs bedient werden. Werden bei der Erzeugung eines nicht optimierten Ladeprofiles die Nebenbedingungen im Zeitintervall t verletzt, so werden die Batterieladestände $s_{t...T} = 0$ gesetzt. Der Anteil der gemäß der verschiedenen Beladeinfrastrukturszenarien gültigen Fahrprofile im Verhältnis zur Gesamtheit aller Fahrprofile ergibt den technisch möglichen Anteil, der in Tabelle 5.2, Spalte (a) dargestellt ist.

Über alle acht betrachteten Beladeinfrastrukturszenarien ist der technisch mögliche Anteil an der gesamten Fahrzeugflotte mit über 60 % relativ hoch, erfährt jedoch selbst in recht dichten Beladeinfrastrukturen mit Lademöglichkeiten im halböffentlichen und öffentlichen Raum eine Sättigung bei etwa 80 %. Dieser Anteil kann nur noch über eine größere, energiedichtere Batterie erhöht werden.²⁷⁹

Aussage 1. *Rein technisch kann auf Basis des heutigen Fahrverhaltens und der Mobilitätsbedürfnisse ein Großteil (60–80 %) der Fahrzeuge auf ein Elektrofahrzeug umgestellt werden. Ein Teil der Fahrzeugflotte (20 %) kann jedoch, unabhängig von der eingesetzten Infrastruktur, mit den anvisierten Elektrofahrzeugen nicht betrieben werden.*

²⁷⁹ Eine diesbezügliche Auswertung ist in Abschnitt 5.4 zu finden.

Der Ausbau einer zusätzlichen Ladeinfrastruktur im halböffentlichen Bereich, also der Übergang von den Beladeinfrastrukturszenarien 1–3 auf 4–5, erhöht den technisch möglichen Anteil von Elektrofahrzeugen um 4–5 %. Ein weiterer Ausbau im öffentlichen Raum (Szenarien 6–8) unter Beibehaltung der privaten und halböffentlichen Infrastruktur erhöht den Anteil nochmals um etwa 12 % bzw. 16 % gegenüber der rein privaten Beladeinfrastruktur.

Aussage 2. *Das Elektromobilitätspotenzial hängt vom Zugang zu Ladeinfrastruktur ab. Dazu ist zunächst der private Bereich wichtig. Ein zusätzlicher Ausbau der halböffentlichen Infrastruktur erhöht diesen Anteil nur minimal. Ein weiterer Zubau von öffentlicher Infrastruktur würde den Anteil nochmals erhöhen.*

Betrachtet man die Variation der verschiedenen Anschlussleistungen innerhalb der privaten (Szenarien 1–3), der halböffentlichen (4–5) und öffentlichen (6–8) Ladeinfrastrukturausbautufen, so lässt sich erkennen, dass höhere Anschlussleistungen von 11,1 bis zu 43,6 kW nur geringen Einfluss auf den technisch möglichen Anteil haben. Der größte Effekt tritt dabei im privaten Bereich beim Übergang recht niedriger Anschlussleistungen der normalen Schuko-Steckdose von max. 3,7 kW auf Drehstromanschlüsse von bis zu 22 kW auf, was sich insbesondere durch häufiges Parken zu Hause erklären lässt. Der Zuwachs des technisch möglichen Anteils ist mit etwa 2 % jedoch eher vernachlässigbar. Im halböffentlichen Bereich zeigt eine doppelt so hohe Anschlussleistung keinen Effekt, was u. a. durch die langen Standzeiten erklärt werden kann, da Vollladungen auch schon bei 11,1 kW nach etwa 2–3 h möglich sind. Im öffentlichen Bereich ist der Effekt einer Verdopplung und Vervierfachung der Anschlussleistung mit bis zu 0,5 % minimal. Dahingegen hat die Existenz der öffentlichen Ladeinfrastruktur mit den o. g. 12 % einen deutlich größeren Effekt. So lässt sich ableiten, dass die Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur in unterschiedlichen Bereichen wichtiger ist als das Angebot einer hohen Anschlussleistung.

Erst wesentlich höhere Anschlussleistungen im Bereich von mehr als 100 kW erlauben, große Energiemengen (wie z. B. 80 % der Batteriekapazität) in weniger als einer Viertelstunde aufzunehmen. Aufgrund der einfachen Installation und langer Standzeiten im privaten Bereich kann die Schnellladeinfrastruktur gut mit der privaten Beladeinfrastruktur kombiniert werden. So könnten die o. g. 60 % auf Basis privater Ladeinfrastruktur umgestellt werden und die fehlenden 40 % könnten anteilig die Schnellladeinfrastruktur nutzen. Über Schnellladeinfrastruktur lassen sich somit rein technisch alle Fahrzeuge auf Elektromobile umstellen.

Aussage 3. *Höhere Anschlussleistungen erhöhen das Elektromobilitätspotenzial kaum. Erst wenn Hochleistungsbeladung jenseits der 100 kW ermöglicht wird, ließe sich die heutige Fahrzeugflotte vollständig auf Elektroautos umstellen.*

Je nach Wohngegend und Parkplatzgegebenheiten ist das Laden in Wohnungsnähe jedoch nicht einfach zu realisieren, wie bspw. im städtischen Bereich oder in Siedlungen, sodass nicht davon ausgegangen werden kann, dass ein Parkplatz mit Möglichkeit zur Beladung zur Verfügung steht. Auf Basis der im Mobilitätspanel angegebenen Anzahl im Haushalt verfügbarer Parkplätze wird die Simulation nochmals durchlaufen und das gültige Batterieprofil

nur dann gewertet, wenn ein Parkplatz vorhanden ist. Wenn mehrere Fahrzeuge in einem Haushalt betrieben werden, so wird nur für so viele Fahrzeuge die heimische Ladung zugelassen wie Parkplätze zur Verfügung stehen. Dabei wird aufgrund der ggf. hohen Standzeiten vernachlässigt, dass unterschiedliche Fahrzeuge auf den Parkplätzen geparkt werden können. Das Ergebnis ist Spalte (b) der Tabelle 5.2 zu entnehmen. Es zeigt sich, dass der technisch mögliche Anteil für alle Infrastrukturszenarien um ca. 10 % herabzusetzen ist. Interessanterweise können die Fahrzeuge, denen aufgrund der fehlenden Garage keine Beladeinfrastruktur im privaten Bereich zur Verfügung steht, nicht von der öffentlichen Infrastruktur profitieren. Vielmehr liegt hier der technische Anteil mit 13 % sogar unter dem Wert, welcher sich ohne Einbeziehung der Garagenstandplätze ergibt. Dies lässt vermuten, dass diese Fahrzeuge eine höhere Laufleistung haben und sowohl die private als auch öffentliche Infrastruktur benötigen, um als Elektrofahrzeug betrieben werden zu können.

Auf Basis der von Tate et al. (2008) erwähnten Reichweitenangst²⁸⁰ wird oftmals, wie z. B. in May und Mattila (2009, S. 5) oder Neenan et al. (2010, S. 3-1), der flächendeckende Ausbau öffentlicher Ladeinfrastruktur gefordert. Slater et al. (2009, S. 9) formulieren diese Forderung jedoch schon deutlich vorsichtiger und bringen eher psychologische Gründe an, wodurch gerade in der Marktbildungsphase mögliche Kunden von Elektrofahrzeugen durch eine erkennbare öffentliche Ladeinfrastruktur ihre Ängste abstreifen und flexibler mit Elektrofahrzeugen umgehen können.

Aussage 4. *Für ein hohes Elektromobilitätspotenzial ist die Elektrifizierung des privaten Stellplatzes bzw. der Zugang zu Lademöglichkeiten in Wohnungsnähe wichtig. Halböffentliche und öffentliche Ladeinfrastruktur erweitert dieses Potenzial und kann aus psychologischer Sicht insbesondere in der Marktbildungsphase die Kaufentscheidung für ein Elektrofahrzeug begünstigen.*

5.2.2 Ökonomisch attraktiver Anteil

Nun werden aus den technisch möglichen Fahrprofilen die ökonomisch attraktiven potenziellen Elektrofahrzeuge im Vergleich zu den heutigen verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeugen bestimmt. Der Vergleich der zwei Fahrzeugkonzepte erfolgt auf Gesamtkostenebene unter Einbeziehung der kostenoptimierten Ladeprofile.²⁸¹ Als Batteriekapazität κ wird wieder eine kleinere Batterie mit 24 kWh herangezogen, um insbesondere die in den frühen Marktphasen erscheinenden Elektrofahrzeuge besser abbilden zu können. Für spätere Marktphasen wird jedoch, wie bereits beschrieben, eine größere Batterie nötig. Die Entwicklung der technischen und ökonomischen Parameter aufgrund von Weiterentwicklungen oder externen Einflüssen werden in den späteren Abschnitten dieses Kapitels betrachtet. Für die verschiedenen Belademöglichkeiten werden, wie bei der Bestimmung des technisch möglichen Anteils, die acht Infrastrukturszenarien zugrunde gelegt. Für die Gesamtkostenbewertung wird der Diskontierungszinssatz $k = 0\%$ gesetzt.

²⁸⁰ Engl. „range anxiety“, vgl. auch Abschnitt 2.3.1.

²⁸¹ Für die technischen und ökonomischen Parameter siehe Abschnitt 3.3.3.

		Ökonomisch attraktiver Anteil in %									
<i>Batteriealterung:</i>		(a) Ohne Batteriealterung					(b) Reduzierung durch Alterung				
<i>Batteriekosten^a:</i>		750	400	250	200	150	750	400	250	200	150
Beladeinfrastruktur- szenarien	1	0 %	0 %	11 %	19 %	30 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	2	0 %	0 %	12 %	20 %	31 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	3	0 %	0 %	12 %	20 %	32 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	4	0 %	0 %	15 %	23 %	35 %	0 %	0 %	-2,1 %	-0,8 %	0 %
	5	0 %	0 %	15 %	23 %	35 %	0 %	0 %	-2,1 %	-0,8 %	0 %
	6	0 %	0 %	21 %	32 %	45 %	0 %	0 %	-5,2 %	-1,6 %	-0,1 %
	7	0 %	0 %	21 %	31 %	45 %	0 %	0 %	-5,4 %	-1,9 %	-0,1 %
	8	0 %	0 %	20 %	31 %	45 %	0 %	0 %	-5,5 %	-2,4 %	-0,1 %
Schnellladung		0 %	0 %	15 %	28 %	44 %	0 %	0 %	-2,4 %	-3,3 %	-1,5 %

^a Die Batteriekosten werden in €/kWh angegeben. Heute sind die Batteriekosten in etwa bei 750 €/kWh einzuordnen. Wie in Abschnitt 3.4.3 gezeigt und in mehreren Studien, wie z. B. bei Kalhammer et al. (2007) oder Delucchi und Lipman (2001) beschrieben, können durch Skaleneffekte die Batteriekosten auf bis zu 150 €/kWh sinken.

Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4 und einer Batteriekapazität von 24 kWh. Für die Beladeinfrastrukturszenarien siehe Tabelle 5.2.

Tabelle 5.3 – Ökonomisch attraktiver Anteil auf Basis verschiedener Beladeinfrastrukturszenarien, Batteriekosten und -alterung; (a) ohne Betrachtung der Batteriealterung, (b) Anteilsverluste unter Einbeziehung der Batteriealterung.

Die Simulation durchläuft wiederum die verschiedenen Fahrprofile, ermittelt für jedes Fahrprofil ein kostenoptimales Ladeprofil, gemäß des in Abschnitt 4.3.6 definierten Algorithmus, und berechnet anschließend die Gesamtkosten, wie in Abschnitt 4.4 modelliert. Der ökonomisch attraktive Anteil wird für die verschiedenen Infrastrukturszenarien sowie für verschiedene Batteriekosten (I^B) und unter Berücksichtigung der Batteriealterung bestimmt. Das Simulationsergebnis ist in Tabelle 5.3 dargestellt. Dabei sind größere ökonomisch attraktive Anteile von hellgrau ($\geq 20\%$) über grau ($\geq 30\%$) bis dunkelgrau ($\geq 40\%$) eingefärbt. Die aufgrund der Batteriealterung reduzierten ökonomischen Anteile sind in hellgrau ($\geq 1\%$) und grau ($\geq 5\%$) eingefärbt.

Aus dem zuvor betrachteten technisch möglichen Anteil werden mittels der Kostenbewertung die ökonomisch attraktiven Fahrprofile identifiziert. Dabei fällt zunächst auf, dass der ökonomisch attraktive Anteil stark von den Batteriekosten abhängt. So ist mit heutigen Batteriekosten keine ökonomisch attraktive Elektromobilitätsnutzung möglich. Erst mit deutlich sinkenden Batteriekosten, wie hier z. B. bei ca. 250 €/kWh, kann ein Anteil der heutigen Fahrzeuge profitabel umgestellt werden. Mit weiter sinkenden Batteriekosten können zunehmend mehr Fahrzeuge elektrisch betrieben werden. Durch die begrenzten Kostendegressionspotenziale der Batterie lässt sich jedoch nur ein Teil profitabel umstellen, der fernab der installierten Beladeinfrastruktur bis zu maximal 45 % betragen kann. Wie bei der Ermittlung der technisch möglichen Anteile zeigt sich hinsichtlich der angelegten Beladeinfrastruktur, dass nicht

die verschiedenen Anschlussleistungen, sondern die Verfügbarkeit erweiterter Ladeinfrastruktur im halböffentlichen und öffentlichen Bereich den ökonomisch attraktiven Anteil erhöht. Dabei trägt eine zusätzlich nutzbare halböffentliche Ladeinfrastruktur unabhängig von der Batteriekostenentwicklung zu einer Erhöhung des ökonomisch attraktiven Anteils zwischen 3–5 % bei. Für eine zusätzlich öffentliche Ladeinfrastruktur werden zunächst weitere 4–5 % ($I^B = 250 \text{ €/kWh}$) ökonomisch erschlossen und mit sinkenden Batteriekosten ist eine Erhöhung von bis zu 10 % zu erwarten. Diese erhöhten Anteile sind unter der Annahme der Verfügbarkeit der jeweiligen Beladeinfrastruktur profitabel, d. h. die Mehrkosten einer öffentlichen Ladesäule sind bereits enthalten und rechnen sich gegenüber dem zugrunde gelegten verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeug. Jedoch ist – anders als bei der privaten Ladeinfrastruktur, bei der die Verfügbarkeit im Wesentlichen von der Existenz einer Garage oder eines Stellplatzes und der darin installierten Steckdose abhängt – bei der Infrastruktur im öffentlichen Raum die Verfügbarkeit nicht zwangsläufig gegeben und der Fahrzeugnutzer auch nicht unbedingt willens, einen Umweg in Kauf zu nehmen oder einen weiter entfernten Parkplatz aufzusuchen. Diese Problematik beim Aufbau öffentlicher Ladeinfrastruktur kann daher den Anteil ökonomisch attraktiver Elektromobilitätsnutzung wieder herabsetzen.²⁸²

Betrachtet man den in Spalte (b) der Tabelle 5.3 dargestellten Einfluss der Batteriealterung, zeigt sich, dass der ökonomisch attraktive Anteil insbesondere bei höheren Batteriekosten ($I^B = 250 \text{ €/kWh}$) und bei dichterem Ladeinfrastruktur um bis zu 5 % sinkt. Mit sinkenden Batteriekosten kann die Batteriealterung zunehmend vernachlässigt werden. Bei höheren Batteriekosten tritt der Alterungseffekt insbesondere bei dichteren Ladeinfrastrukturen auf. Gemäß der in Gleichung (4.15) beschriebenen Batteriealterung sind dafür nicht die häufigeren und damit flacheren Beladungen verantwortlich, sondern vielmehr die aufgrund der höheren Laufleistung stärkere Batteriebeanspruchung der ohne Betrachtung der Batteriealterung ökonomisch noch attraktiven Fahrzeuge. Im anfänglichen Elektromobilitätsmarkt ist der ökonomisch attraktive Anteil nahezu unabhängig von der aufgebauten Beladeinfrastruktur zu bestimmen. Mit sinkenden Batteriekosten kann insbesondere öffentliche Ladeinfrastruktur das Elektromobilitätspotenzial erhöhen, welche jedoch aufgrund der Anforderung an Dichte und flächendeckenden Aufbau mit Unsicherheit in den Kosten behaftet ist. Alternativ erreicht die Schnellladung ähnlich hohe Anteile wie die zusätzliche öffentliche Ladeinfrastruktur. Durch die Möglichkeit einer Beladung während kurzer Stopps auf einer Fahrt ist ggf. eine weniger dicht aufgebaute Schnellladeinfrastruktur ausreichend, um einen zusätzlichen Marktanteil für Elektrofahrzeuge zu erschließen.

Aussage 5. *Erst mit sinkenden Batteriekosten (ab ca. 250 €/kWh) kann ein Teil der heutigen Fahrzeuge ökonomisch attraktiv auf Elektrofahrzeuge umgestellt werden. In dieser Marktphase ist eine private Beladeinfrastruktur mit niedriger Anschlussleistung u. a. aufgrund der nicht zu vernachlässigenden Batteriealterung ökonomisch sinnvoll. Mit sinkenden Batteriekosten erhöht sich das Elektromobilitätspotenzial, das durch den zusätzlichen Ausbau einer stationären,*

²⁸² Mit einer optimalen topografische Verteilung von Ladeinfrastruktur beschäftigen sich u. a. Wirges und Fulda (2010) oder Cheng et al. (2008), diese Betrachtung wird jedoch im Weiteren außen vor gelassen.

öffentlichen Beladeinfrastruktur oder einer Schnellladeinfrastruktur nochmals erweitert werden kann, letztendlich jedoch auf ca. 45 % beschränkt ist.

Die Aussagen 1–5 sind ebenfalls für eine größere Batterie zutreffend. Die Simulationsergebnisse für den technischen und ökonomisch attraktiven Anteil eines Elektrofahrzeugs mit einer 30 kWh-Batterie sind in den Anhangstabellen B.1 und B.2 dargestellt. So erhöht sich der technisch mögliche Anteil unter Einbeziehung der Batteriealterung generell um etwa 4–6 % insbesondere in privater und halböffentlicher Beladeinfrastruktur, da längere Strecken mit einer größeren Batterie zurückgelegt werden können. Der technisch mögliche Anteil bleibt auf 85 % beschränkt. Der ökonomisch attraktive Anteil reduziert sich aufgrund der teureren Batterien im Durchschnitt um 2–4 %, wobei hier insbesondere der Anteil der öffentlichen Ladeinfrastruktur stärker abnimmt, da bei größeren Batterien eine weniger dicht verfügbare Beladeinfrastruktur ausreicht, um die Strecken ohne öffentliches Laden zurückzulegen. Aufgrund der wenigen, besser ausgelasteten Fahrzeuge und der dadurch häufiger und tiefer entladene Batterie steigt auch die Batteriealterung. Über den zusätzlichen Ausbau von Beladeinfrastruktur erhöht sich das Elektromobilitätspotenzial nicht. Erst mit sinkenden Batteriekosten können auch hier zusätzliche Fahrzeuge aufgrund einer dichteren Ladeinfrastruktur umgestellt werden, jedoch bleibt der Anteil auf 40 % beschränkt.

Auf Basis der Simulation der verschiedenen Fahrprofile wurde der technisch und ökonomisch attraktive Anteil an Elektrofahrzeugen gegenüber einem Verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeug betrachtet. Für mögliche Elektromobilitätskunden stellt sich nun, gegebenenfalls ohne Kenntnis ihres Fahrprofils, die Frage, ob sich ein Elektrofahrzeug ökonomisch für sie lohnt. Ob sich das Mobilitätsbedürfnis (rein technisch) überhaupt auf ein Elektrofahrzeug umstellen lässt, kann über die Anforderungen an Reichweite und die zur Verfügung stehende Beladeinfrastruktur abgeschätzt werden. Für die Überprüfung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit können die zu erwartenden Durchschnittskosten und die antizipierte Laufleistung herangezogen werden. Diese Parameter sind in Tabelle 5.4 dargestellt, wobei die Werte in den Quartilen unterschiedlich eingefärbt wurden: die des ersten Quartils in Dunkelgrau, des zweiten in Grau, des dritten in Hellgrau und des letzten Quartils in Weiß.

In der frühen Marktphase bzw. bei höheren Batteriekosten (ca. 250 €/kWh) müssen die durchschnittlichen Kosten eines Elektrofahrzeugs $\left(a_{EV}^{100 \text{ km}}\right)$ kleiner als 21 €/100 km sein, damit sich Elektrofahrzeuge gegenüber Verbrennungsmotoren durchsetzen, siehe Spalte (a). Mit sinkenden Batteriekosten können die durchschnittlichen Kosten zum Betrieb eines Elektrofahrzeugs sogar bis zu ca. 27 €/100 km betragen und setzen sich dann noch immer gegenüber einem Verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeug durch. Dies impliziert, dass Elektrofahrzeuge zu Beginn vergleichsweise hoch ausgelastet werden müssen, damit diese den Betriebskostenvorteil nutzen und die höheren Anschaffungsausgaben rechtfertigen können. Müssen in der frühen Marktphase noch Laufleistungen von mehr als 15.000 km/a erbracht werden, sind später etwa 11.000 km/a ausreichend, um ein Elektrofahrzeug gegenüber einem Verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeug wirtschaftlich einzusetzen, siehe Spalte (c). Ähnliches gilt für die Infrastruktur: Je dichter und damit teurer die Infrastruktur ist, desto höher muss das Elek-

		(a) $a_{EV}^{100 \text{ km}}$			(b) $a_{\Delta(ICE-EV)}^{100 \text{ km}}$			(c) $\bar{O} m_{\text{Jahr}}$		
		250	200	150	250	200	150	250	200	150
Batteriekosten:	1	21,16	23,34	26,78	0,68	0,99	1,36	15.187	13.091	10.948
	2	21,01	23,16	26,55	0,68	1,01	1,38	15.732	13.399	11.203
	3	20,93	23,05	26,42	0,69	1,02	1,40	15.874	13.537	11.322
Beladeinfrastruktur-szenarien	4	20,76	22,51	25,67	0,58	0,96	1,39	16.361	14.708	12.533
	5	20,76	22,51	25,67	0,59	0,96	1,39	16.361	14.708	12.533
	6	20,55	21,93	24,52	0,55	0,87	1,33	16.660	15.785	13.908
	7	20,50	21,96	24,52	0,55	0,87	1,31	16.715	15.645	13.949
	8	20,52	21,98	24,52	0,54	0,86	1,28	16.693	15.610	13.997
Schnellladung		20,79	22,39	24,72	0,60	0,87	1,21	15.821	14.540	13.403

Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4 und einer Batteriekapazität von 24 kWh. Für die Beladeinfrastrukturszenarien siehe Tabelle 5.2.

Tabelle 5.4 – Techno-ökonomische Parameter bei Wahl eines Elektrofahrzeugs: (a) durchschnittliche Kosten eines EVs in €/100 km, (b) durchschnittliche Kostendifferenz eines nicht gewählten ICEs zu einem gewählten EV in €/100 km, (c) durchschnittliche Laufleistung eines gewählten EVs in km/a.

trofahrzeug ausgelastet werden, um sich zu rechnen. Weniger ausgelastete Fahrzeuge können daher nur über ausschließliche Nutzung einer privaten/häuslichen Ladeinfrastruktur profitabel betrieben werden. Besser ausgelastete Fahrzeuge rechnen sich selbst dann, wenn weitere Belademöglichkeiten genutzt werden, und müssen diese sogar nutzen, um die hohen Auslastungen realisieren zu können. Somit bedingen sich Infrastrukturnutzung und Fahrzeugauslastung gegenseitig. Es bleibt noch zu erwähnen, dass die Kostendifferenz eines ökonomisch attraktiven Elektrofahrzeugs zu einem verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeug mit sinkenden Batteriekosten zunimmt, siehe Spalte (b). Damit besteht bei geringeren Batteriekosten eher die Möglichkeit, aufgrund von Kostenunsicherheiten nicht das kostenminimale Fahrzeug zu wählen.

Aussage 6. *Um ein Elektrofahrzeug wirtschaftlich zu betreiben, muss dieses vergleichsweise hoch ausgelastet werden. Mit sinkenden Batteriekosten lassen sich auch weniger stark frequentierte Fahrzeuge umstellen, für welche die private Ladung am besten geeignet ist. Erst stärker ausgelastete Fahrzeuge brauchen bzw. können den Zugang zu weiterer Beladeinfrastruktur wirtschaftlich nutzen.*

Abschließend werden die bisherigen Ergebnisse hinsichtlich der in Abschnitt 5.1.3 beschriebenen Segmente betrachtet. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind zusammengefasst in Tabelle 5.5 dargestellt.²⁸³ Dabei ergeben sich keine großen Verschiebungen, sondern vielmehr bestätigen sich im Datensatz landläufige Meinungen. So ist das Elektrofahrzeug rein technisch

²⁸³ Eine detaillierte Auswertung und die Ergebnisse der Simulation sind für die verschiedenen Regionstypen in den Anhangstabellen B.3-B.5, für die Haushaltstypen in B.6-B.8 und für die verschiedenen Haushaltseinkommen in B.9-B.11 aufgeführt.

	Relative Verbesserung in den verschiedenen Segmenten		
	Techn. mögl. Anteil	Garagenrestriktion	Ökonom. attr. Anteil
Regions- typ	▲ in Agglomerationsräumen ▼ im verstärkten und ländl. Raum	▲ im verstärkten und ländl. Raum ▼ in Agglomerationsräumen	uneinheitlich
Haushalts- typ	uneinheitlich	▲ in größeren HH des Typs 3 u. 4 ▼ 1–2 Pers.-Haushalten	▲ in HH mit Berufstätigen (Typ 1 u. 3) ▼ HH ggf. ohne Berufstätige (Typ 2)
Haushalts- einkommen	uneinheitlich	▲ Monatl. Nettoeinkommen > 2.000 € ▼ Monatl. Nettoeinkommen < 2.000 €	▲ Monatl. Nettoeinkommen > 3.000 € ▼ Monatl. Nettoeinkommen < 2.000 €

▲ für eine relative Verbesserung und ▼ für eine relative Verschlechterung

Tabelle 5.5 – Segmentbetrachtung des technisch und ökonomisch attraktiven Anteils nach Regionstypen, Haushaltstypen und -einkommen.

im städtischen Raum am besten nutzbar, ist ebendort aber durch eine geringe Auslastung und fehlende Stellplätze in seinem Potenzial eingeschränkt. Umgekehrt verhält es sich in verstärkten und ländlichen Räumen, dort sind Elektrofahrzeuge schlechter einsetzbar, jedoch kann einfacher am heimischen Stellplatz geladen werden. Ökonomisch zeigen sich aber keine Unterschiede im städtischen und ländlichen Raum. Betrachtet man die Haushaltsgröße, so ist bei größeren Haushalten im Vergleich eher ein Stellplatz verfügbar. Für den wirtschaftlichen Betrieb spielt weniger die Haushaltsgröße eine Rolle, als dass Berufstätige im Haushalt leben. In Haushalten ohne Berufstätige verschlechtert sich das Potenzial, ein Elektrofahrzeug wirtschaftlich einzusetzen, deutlich. Das Haushaltseinkommen hat sowohl einen Einfluss auf die verfügbaren Garagenstellplätze als auch auf den wirtschaftlich attraktiven Anteil. Haushalte mit einem monatlichen Nettoeinkommen von weniger als 2.000 € haben einen negativen Effekt auf beide Anteile, Einkommen darüber erhöhen die Garagennutzbarkeit und Einkommen über 3.000 € haben einen positiven Effekt auf den wirtschaftlich nutzbaren Anteil.²⁸⁴

Aussage 7. *Elektromobilitätsnutzung ist tendenziell leichter realisierbar in größeren Haushalten, in denen Berufstätige leben und in denen auf ein monatliches Nettoeinkommen von mehr als 3.000 € zugegriffen werden kann.*

²⁸⁴ Als Grund für die Einkommensabhängigkeit nennen Offer et al. (2011, S. 1940) bspw. die Veränderung der Fahrprofile bei Einkommensänderung: “changes in income level and car availability of an individual are bound to change his or her travel behaviour”.

5.2.3 Benötigte Infrastruktur

Aus den bisherigen Analysen zeigt sich, dass zu Beginn sowohl für eine technisch als auch ökonomisch attraktive Umstellung auf Elektrofahrzeuge die Nutzung der bestehenden Stromanschlüsse in der häuslichen Garage oder des privaten Stellplatzes vorrangig ist oder eine Elektrifizierung derselbigen notwendig wird. Eine Ausweitung der Ladeinfrastruktur auf den halböffentlichen oder öffentlichen Bereich und die Nutzung hoher Anschlussleistungen ist auf Basis des Fahrverhaltens vorerst nicht notwendig, sondern adressiert eher die von Slater et al. (2009) erwähnten psychologischen Faktoren, die mit in die Kaufentscheidung einbezogen werden.

Des Weiteren wird der Ausbau öffentlicher Ladeinfrastruktur oftmals mit dem Argument gefordert, dass sonst gerade in städtischen Bereichen kein Zugang zu Lademöglichkeiten bestehen würde.²⁸⁵ Für diese Fahrzeugnutzer, die im Umfeld der Wohnung keine Garage oder keinen Stellplatz zur Verfügung haben und daher als „Laternenparker“ bezeichnet werden, müssen – so die Forderung – andere Lademöglichkeiten geschaffen werden. Eine Auswertung der für die in Deutschland repräsentativen Fahrprofile des Mobilitätspanels zeigt jedoch, dass der Zugang zu Stellplätzen gegeben ist. So parken 88 % der Nutzer in einer privaten Garage oder Stellplatz, 55 % am Arbeitsplatz und 95 % im öffentlichen Raum. Betrachtet man, wer ausschließlich im öffentlichen Raum oder an der „Laterne“ parkt, so trifft das nur für 5 % aller Fahrprofile zu.²⁸⁶ Diese 5 % der Nutzer fahren jedoch auch vergleichsweise weniger (9.353 km/a) als der Durchschnitt (13.716 km/a). Aufgrund der gegenüber den ICEs höheren Anschaffungsausgaben aber niedrigeren Betriebskosten ist insbesondere eine verhältnismäßig hohe Auslastung nötig, um eine wirtschaftliche Nutzung der Elektrofahrzeuge zu gewährleisten. Daher ist es ökonomisch nicht sinnvoll, nur für diese relativ kleine Anzahl an Fahrzeugen eine öffentliche Ladeinfrastruktur auszubauen. Vielmehr kann die öffentliche Ladeinfrastruktur als Ergänzung zu den sonstigen Zugangspunkten aufgebaut werden, da etwa 95 % der Flotte auch regelmäßig an öffentlichen Orten stehen. Wie die bisherigen Analysen zeigen, ist die private Ladeinfrastruktur mit niedrigen Anschlussleistungen jedoch vollkommen ausreichend, um einen relevanten Teil der Flotte auf Elektromobilität umzustellen.²⁸⁷

Aussage 8. *Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen wird sich der Aufbau von Beladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge auf die Nutzung bzw. Elektrifizierung privater Stellplätze fokussieren. Nutzer, die ausschließlich im öffentlichen Raum parken, sind selten und fahren insgesamt wenig, wodurch der Aufbau öffentlicher Infrastruktur zunächst nicht lohnenswert ist.*

²⁸⁵ Siehe u. a. Royal Academy of Engineering (2010); Sandmeier und Felsenstein (2010); Hatton et al. (2009); Mayor's Office of Long-Term Planning and Sustainability (2010); Electrification Coalition (2010).

²⁸⁶ D. h. es kann sowohl daheim als auch am Zielort nur öffentlich geladen werden, all diejenigen, die im Umfeld der Wohnung keine Garage haben, haben zumindest am Arbeitsplatz einen halböffentlichen Parkplatz zur Verfügung.

²⁸⁷ Damit zeigt sich ein anderer Infrastrukturbedarf als bspw. von der Nationale Plattform Elektromobilität (2011, S. 37) gefordert, mit einem hohen Anteil an halböffentlicher/öffentlicher Ladeinfrastruktur in der Marktanzugphase.

5.3 Erweiterung um Plug-in-Hybride

Alternativ zu vollelektrischen Fahrzeugen lassen sich auch die in Abschnitt 3.3 beschriebenen Plug-in-Hybridfahrzeuge einsetzen. Diese Fahrzeuge können aufgrund des zusätzlichen Verbrennungsmotors auch dann weiterfahren, wenn die Batterie leer und keine Beladeinfrastruktur verfügbar ist. Somit müssen Nutzer dieser Fahrzeuge nicht fürchten liegen zu bleiben. Des Weiteren muss die Batterie nicht auf Mindestanforderungen hinsichtlich ihrer Reichweite ausgelegt werden, sondern kann kleiner dimensioniert sein, sodass der größte Teil noch elektrisch zurückgelegt werden kann und bei längeren Fahrten der Verbrennungsmotor genutzt wird. PHEVs können daher ggf. für den Nutzer interessanter sein als ein vollelektrisches Fahrzeug. Dieses Fahrzeugkonzept ist jedoch auch technisch komplizierter und der Antriebsstrang daher teurer. Daher werden im Folgenden PHEVs näher analysiert. Die Simulation durchläuft wieder alle Fahrprofile und bestimmt nun unter Hinzunahme eines weiteren Fahrzeugtyps ein kostenoptimales Ladeprofil. Hinsichtlich der Ergebnisgrößen der Simulation sind insbesondere der ökonomische Anteil und die Effekte einer dichteren Ladeinfrastruktur von Interesse und werden im Folgenden betrachtet. Der technisch mögliche Anteil beträgt bei PHEVs definitionsgemäß 100 %, da der Verbrennungsmotor auf den längeren Strecken einspringt.

5.3.1 Ökonomisch attraktiver Anteil von Plug-in-Hybriden

Um die ökonomisch attraktiven Anteile der verschiedenen Fahrzeugkonzepte zu bestimmen, werden die optimalen Beladeprofile und anschließend die Gesamtkosten für die drei Fahrzeugtypen berechnet und miteinander verglichen. Dabei werden wieder die in Abschnitt 3.3 definierten technischen und ökonomischen Parameter zugrunde gelegt. Für PHEVs werden die Gesamtkosten jedes Fahrprofils mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten bestimmt. Die Auswertung, welche Batteriekapazitäten für den Einsatz von PHEVs optimal sind, findet sich in Abschnitt 5.4.2 wieder. Die folgenden Ergebnisse hinsichtlich ökonomisch attraktiver Anteile und durchschnittlicher Kosten berücksichtigen, dass verschiedene Batteriekapazitäten in PHEVs eingesetzt werden können, betrachten zunächst jedoch nur, welches der drei Fahrzeugkonzepte sich durchsetzt. Aufgrund der Reichweitenanforderungen werden diesmal EVs mit größeren Batterien in Höhe von 30 kWh angenommen. Für die private Ladeinfrastruktur (Szenario 1) sind die ökonomisch attraktiven Anteile bei Veränderung der Batteriekosten in Tabelle 5.6 dargestellt.

Es lässt sich erkennen, dass Plug-in-Hybride früher (in Bezug auf die sinkenden Batteriekosten) als EVs in den Markt treten und so lange einen höheren Marktanteil haben werden, bis Batteriekosten von etwa 200 €/kWh erreicht werden können. Bei weiter sinkenden Batteriekosten können sich EVs dann vermehrt durchsetzen (Tabelle 5.6, Zeile a). Das liegt im Wesentlichen daran, dass es bei niedrigen Batteriekosten günstiger ist, eine größere Batterie als einen hybriden Antriebsstrang zu verbauen. Daher sind PHEVs ein idealer Marktbereiber für elektromobiles Fahren, da sie sowohl kostengünstiger sind, als auch gerade in der Marktübergangsphase aufgrund des notfalls nutzbaren Verbrennungsmotors eine höhere Kun-

			Ökonomisch attraktive Anteile				
			750	400	250	200	150
<i>Batteriekosten:</i>							
(a)	Verschiedene Fahrzeugkonzepte	ICE	100 %	98 %	83 %	76 %	61 %
		PHEV	0 %	2 %	11 %	12 %	13 %
		EV	0 %	0 %	6 %	13 %	26 %
(b)	Nur PHEVs zusätzlich	ICE	100 %	98 %	86 %	77 %	66 %
		PHEV	0 %	2 %	14 %	23 %	34 %
(c)	Nur EVs zusätzlich	ICE	100 %	100 %	90 %	83 %	72 %
		EV	0 %	0 %	10 %	17 %	28 %

Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4 und einer Batteriekapazität für EVs von 30 kWh und für PHEVs kostenminimiert zwischen 1–24 kWh. Beladeinfrastrukturszenario 1, siehe Tabelle 5.2.

Tabelle 5.6 – Ökonomisch attraktive Anteile für ICEs, PHEVs, EVs bei unterschiedlichen Batteriekosten wenn (a) alle Fahrzeugkonzepte verglichen werden, (b) nur PHEVs und (c) nur EVs zusätzlich eingesetzt werden.

denakzeptanz erfahren. Vergleicht man die Durchsetzungsfähigkeit von PHEVs (Tabelle 5.6, Zeile b) und EVs (Tabelle 5.6, Zeile c) gegenüber ICEs alleine, so können sich PHEVs nicht nur früher, sondern auch im Markt durchgängig besser behaupten. Zusammen haben beide jedoch bezogen auf das Substitutionspotenzial von ICEs den größten Effekt. Zusätzlich erlauben PHEVs, trotz der kleineren Batterie im Vergleich zu vollelektrischen Fahrzeugen, hohe elektrische Fahranteile von 80–85 % bei Nutzung der privaten Ladeinfrastruktur und sind relativ unabhängig von den Batteriekosten.²⁸⁸ Dies liegt darin begründet, dass PHEVs, um ökonomisch attraktiver als ICEs zu sein, zwar relativ gut ausgelastet sein müssen, jedoch aufgrund der durchschnittlich kurzen Fahrten mit kleineren Batterien als im vollelektrischen Fahrzeug auskommen. PHEVs können somit gegenüber dem ICE von günstigeren Betriebskosten (Strom) und gegenüber dem EV von geringeren Anschaffungsausgaben (kleinere Batterie, jedoch hybrider Antriebsstrang) profitieren.

Aussage 9. *PHEVs sind ein idealer Marktbereiter, da sie sich früher und besser gegenüber ICEs durchsetzen als EVs und auch ohne Reichweiteneinschränkung eine höhere Kundenakzeptanz erfahren. Mit sinkenden Batteriekosten verliert ihr Markteinfluss an Bedeutung, hilft jedoch weiterhin, einen gegenüber ICEs höheren Elektromobilitätsanteil bei hohen elektrischen Fahranteilen zuzulassen.*

5.3.2 Effekte dichter Ladeinfrastruktur

Um nun zu überprüfen, inwieweit verschiedene Beladeinfrastrukturen dieses Ergebnis verändern können, wird die oben beschriebene Simulation auf die vorher betrachteten Beladeinfrastrukturszenarien erweitert. Die Simulation durchläuft erneut alle Fahrzeugprofile und berechnet die Gesamtkosten der drei alternativen Fahrzeugkonzepte, wobei PHEVs wieder mit

²⁸⁸ Siehe auch Anhangstabelle B.12.

		Ökonomisch attraktive Anteile									
		(a) PHEVs				(b) EVs			(c) PHEVs + EVs		
<i>Bat.-kosten:</i>		400	250	200	150	250	200	150	250	200	150
Belade- infra- struktur- szenarien	1	2 %	11 %	12 %	13 %	6 %	13 %	26 %	17 %	24 %	39 %
	2	2 %	12 %	13 %	14 %	5 %	13 %	27 %	17 %	25 %	41 %
	3	2 %	12 %	13 %	14 %	6 %	13 %	27 %	17 %	26 %	41 %
	4	8 %	19 %	17 %	14 %	6 %	13 %	29 %	24 %	30 %	43 %
	5	8 %	19 %	17 %	14 %	5 %	13 %	29 %	24 %	30 %	43 %
	6	7 %	18 %	14 %	9 %	7 %	18 %	37 %	25 %	32 %	46 %
	7	7 %	18 %	15 %	9 %	7 %	17 %	37 %	25 %	32 %	46 %
	8	7 %	18 %	15 %	9 %	6 %	16 %	36 %	24 %	31 %	45 %
Schnelllad.		1 %	9 %	8 %	5 %	6 %	17 %	35 %	15 %	25 %	40 %

■ = deutliche Verbesserung ggü. privater Ladeinfrastruktur.

Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, einer Batteriekapazität für EVs von 30kWh und für PHEVs kostenminimiert zwischen 1–24kWh und ohne Berücksichtigung der Batteriealterung. Für die Beladeinfrastrukturszenarien siehe Tabelle 5.2.

Tabelle 5.7 – Ökonomisch attraktive Anteile von (a) PHEVs, (b) EVs und (c) der gesamte Elektromobilitätsanteil in unterschiedlichen Infrastrukturszenarien und bei verschiedenen Batteriekosten.

unterschiedlichen Batteriekapazitäten ausgestattet werden können und das günstigste Fahrzeugkonzept gewählt wird. Das Simulationsergebnis für die verschiedenen Beladeinfrastrukturszenarien ist in Tabelle 5.7 dargestellt. Die grau eingefärbten Bereiche heben die Beladeinfrastrukturszenarien hervor, die zu bestimmten Batteriekostenentwicklungsstufen den ökonomisch attraktiven Anteil gegenüber der privaten Beladeinfrastruktur deutlich verbessern. Wie im vorherigen Abschnitt bereits für die private Ladeinfrastruktur gezeigt, setzen sich Plug-in-Hybride auch in den anderen Beladeinfrastrukturszenarien früher, d. h. bei höheren Batteriekosten, gegenüber ICEs durch. Bei weiter sinkenden Batteriekosten – ab 200 €/kWh – können sich dann auch EVs sowohl gegenüber PHEVs als auch ICEs durchsetzen. Wie bereits in Abschnitt 5.2.2 bei ausschließlichem Einsatz vollelektrischer Fahrzeuge gezeigt, können EVs in der frühen Marktphase nicht von dichterem Beladeinfrastruktur profitieren. Vielmehr sind PHEVs Nutznießer einer dichteren Infrastruktur, indem sie den Kostenvorteil von halböffentlichen oder öffentlichen Infrastrukturen wahrnehmen, anstatt Benzin zu tanken. Insbesondere können PHEVs von halböffentlicher Ladeinfrastruktur profitieren. Das lässt sich über die kostengünstigere Ladeinfrastruktur im halböffentlichen Bereich erklären, da hier die Kostendifferenz zwischen Strombezug und Benzin noch größer ist als im öffentlichen Bereich. Die Nutzung der halböffentlichen Ladeinfrastruktur ist aus Kundensicht zudem besser zu rechtfertigen, da an diesen Standorten sowieso geparkt wird. PHEVs nutzen daher, anders als EVs, eine dichtere Infrastruktur nicht aus dem Grund einer Reichweitenverlängerung, sondern aus rein ökonomischen Gesichtspunkten. Die Kostenersparnis pro Ladevorgang ist jedoch recht klein und wird den Kunden vermutlich nicht dazu veranlassen, das Fahrzeug an öffentlichen

Standorten an die Ladesäule anzustecken. Vielmehr wird er ab und zu lieber herkömmlich tanken. Da im halböffentlichen Bereich sowieso geparkt wird, sind die Standzeiten höher und die Nutzung deshalb vermutlich besser.

Darüber hinaus erlauben PHEVs in dichterem Beladeinfrastruktur einen höheren elektrischen Fahranteil von bis zu 97 % (siehe Anhangstabelle B.13) und das sogar bei Reduzierung der durchschnittlichen Batteriekapazität von ca. 10 kWh bei Batteriekosten von 250 €/kWh auf ca. 8 kWh (siehe Anhangstabelle B.12). D. h. in dichterem Beladeinfrastruktur können PHEVs kleinere und damit kostengünstigere Batterieaggregate einsetzen und erreichen dennoch einen höheren elektrischen Fahranteil, der damit günstigere Betriebskosten erlaubt.

Bei sinkenden Batteriekosten können sich EVs gegenüber PHEVs, wie bereits vormals gezeigt, besser durchsetzen. Dieser Effekt verstärkt sich mit dichterem Ladeinfrastruktur, da dann auch der Vorteil eines zusätzlichen Verbrennungsmotors nicht mehr so wichtig ist. Mit sinkenden Batteriekosten bleibt der Anteil der in der privaten Ladeinfrastruktur einsetzbaren Plug-in-Hybride konstant. In dichterem Ladeinfrastruktur werden nun sogar weniger PHEVs eingesetzt als bei privater Ladung; diesen Markt können dann EVs günstiger besetzen. Die psychologische Komponente der Kundennutzung, sich im Zweifelsfall auf den Verbrennungsmotor verlassen zu können, ist in der ökonomischen Betrachtung jedoch nicht widerspiegelt.

Betrachtet man den gesamten Elektromobilitätsanteil, wenn also entweder ein PHEV oder ein EV genutzt wird, so zeigt sich, dass sich die Verschiebungen zwischen PHEVs und EVs bei sinkenden Batteriekosten wie auch bei Anwendung verschiedener Ladeinfrastrukturen zum größten Teil aufheben. Dichtere Beladeinfrastruktur erschließt fernab der Technologiewahl ein zusätzliches Elektromobilitätspotenzial von 4–6 %. Vor dem Hintergrund einer unsicheren öffentlichen Infrastrukturauslastung ist dieses zusätzliche Potenzial eher vorsichtig zu bewerten.

Aussage 10. *PHEVs als Marktbereiter können in der Marktanfangsphase insbesondere durch halböffentliche Infrastruktur besser Fuß fassen, stagnieren jedoch mit sinkenden Batteriekosten und verlieren insbesondere in öffentlichen Beladeinfrastrukturszenarien Marktanteile an EVs. Fernab der Technologiewahl heben sich jedoch die Effekte durch dichtere Ladeinfrastruktur annähernd auf.*

5.3.3 Auswirkungen der Batteriealterung

Bisher wurde die Batteriealterung in den Analysen zu attraktiven Marktanteilen von PHEVs und deren Durchsetzungsfähigkeit gegenüber EVs nicht mitberücksichtigt. Als letzter Einflussfaktor wird nun auch dieser Effekt quantifiziert. Dazu wird die Simulation erneut durchlaufen, es werden kostenoptimale Beladeprofile für die drei betrachteten Fahrzeugtypen bei Anwendung des Beladeinfrastrukturszenarios 1 (häusliche Infrastruktur) bestimmt und die Gesamtkosten berechnet. Zur Beurteilung der Veränderung sind in Tabelle 5.8 die ökonomisch attraktiven Anteile von PHEVs und EVs, die durchschnittlichen Gesamtkosten ($a^{100 \text{ km}}$) der attraktiven Fahrzeuge und die gewählte Batteriekapazität des PHEVs (κ_{PHEV}) über verschiedene Batteriekosten dargestellt. Spalte (a) zeigt die Werte ohne Batteriealterung und

		(a) ohne Batteriealterung				(b) Veränderung bei Bat.-alt.			
		400	250	200	150	400	250	200	150
<i>Batteriekosten:</i>									
Anteil _{PHEV}	(in %)	2 %	11 %	12 %	13 %	-2 %	-11 %	-11 %	-8 %
Anteil _{EV}		0 %	6 %	13 %	26 %	+0 %	+3 %	+4 %	+2 %
$a_{PHEV}^{100 \text{ km}}$	(in €/100 km)	21,32	22,06	23,00	22,77	+1,66	+0,98	+0,68	+0,42
$a_{EV}^{100 \text{ km}}$		/	19,31	20,11	22,90	/	+0,17	+0,07	+0,02
κ_{PHEV}	(in kWh)	7,29	10,02	10,63	14,04	-7,29	-10,02	+4,04	+4,56

Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, einer Batteriekapazität für EVs von 30 kWh und für PHEVs kostenminimiert zwischen 1–24 kWh bei Beladeinfrastrukturszenario 1, siehe Tabelle 5.2.

Tabelle 5.8 – Ökonomisch attraktive Anteile, Kosten der gewählten Fahrzeuge und optimale Batteriekapazität von PHEVs (a) ohne und (b) mit berücksichtigter Batteriealterung.

Spalte (b) die Veränderung der Parameter bei Berücksichtigung der Batteriealterung. Unter Einbeziehung der Batteriealterung verteuern sich die Gesamtkosten beider Fahrzeugarten, wobei die Kosten von PHEVs mit bis zu ca. 1,60 €/100 km deutlich stärker ansteigen als jene der EVs mit bis zu ca. 0,20 €/100 km. Erklären lässt sich der ungleiche Kostenanstieg durch die kleinere Batterie des PHEVs. Bei gleichem Nutzungsverhalten wird die Batterie häufiger und tiefer entladen, damit werden mehr Vollzyklen durchlebt und sie altert somit schneller. Infolgedessen reduziert sich der Anteil der ökonomisch umstellbaren PHEVs.²⁸⁹ Teilweise wird dieser Rückgang durch EVs abgefangen; insgesamt reduziert sich aber der Elektromobilitätsanteil. Die Auswirkung der Batteriealterung ist insbesondere in den frühen Marktphasen mit hohen Batteriekosten vorrangig und verhindert hier die elektromobile Marktpenetration, solange nicht Batteriekosten von weniger als ca. 250 €/kWh erreicht werden können. Mit sinkenden Batteriekosten wird dieser Effekt kleiner, bleibt jedoch hinsichtlich der Perspektive von PHEVs schlecht. Unter Berücksichtigung der Batteriealterung nutzen kostengünstige PHEVs des Weiteren größere Batterien, um so den in kleinen Batterien ungleich höheren Batteriealterungseffekt abzufedern. Ökonomisch lassen sich diese mit einer größeren Batterie ausgestatteten Plug-in-Hybride aber erst bei Batteriekosten von unter 200 €/kWh in den Markt bringen. Dennoch sind die durchschnittlichen Kosten der Plug-in-Hybride in den frühen Marktphasen mit ca. 23 €/100 km unter Berücksichtigung der Batteriealterung in etwa gleichauf mit jenen der ICEs ohne Batteriealterung, die durch PHEVs ersetzt wurden.²⁹⁰ Mit fortschreitender Batterieentwicklung ist davon auszugehen, dass die Batteriealterungseinflüsse und die Unsicherheit bezüglich der Höhe der Batteriealterungskosten kleiner werden. Vor

²⁸⁹ Jedoch weisen u. a. Wood et al. (2011) darauf hin, dass die Batteriealterung gerade bei PHEVs, zumindest aus technischer Sicht und in Grenzen, relativ vernachlässigbar ist, da durch das alternative Antriebssystem die Reichweite gewährleistet ist und sich mit der Batteriealterung der elektrische Fahranteil nur leicht verringert. Bei EVs führt die Batteriealterung jedoch eventuell zu einer inakzeptablen Reichweitenverkürzung.

²⁹⁰ Bei Batteriekosten von 250 €/kWh und ohne Betrachtung der Batteriealterung betragen die durchschnittlichen Kosten der durch PHEVs ersetzten ICEs 22,51 €/100 km. Die durchschnittlichen Kosten eines PHEVs mit Batteriealterung betragen 23,04 €/100 km. Die Differenz entspricht einem Jahresbeitrag von 79 € oder einem Betrag von 951 € über die Fahrzeuglebensdauer von zwölf Jahren.

diesem Hintergrund und der Möglichkeit, auf längeren Strecken den Verbrennungsmotor einzusetzen, muss die Bereitschaft der Kunden, bestimmte überschaubare Mehrkosten bewusst in Kauf zu nehmen, analysiert werden. Abschnitt 5.8.1 betrachtet deshalb abschließend für dieses Kapitel den Einfluss individueller Zahlungsbereitschaften.

Aussage 11. *Die Berücksichtigung der Batteriealterung in den Gesamtkosten verteuert die Fahrzeuge mit kleineren Batterien, wovon insbesondere PHEVs betroffen sind, wodurch aber auch das gesamte Elektromobilitätspotenzial reduziert wird. Inwieweit Batteriealterung mit fortschreitender Batterieentwicklung adressiert und zumindest vermindert werden kann, bleibt Thema der Batterieforschung.*

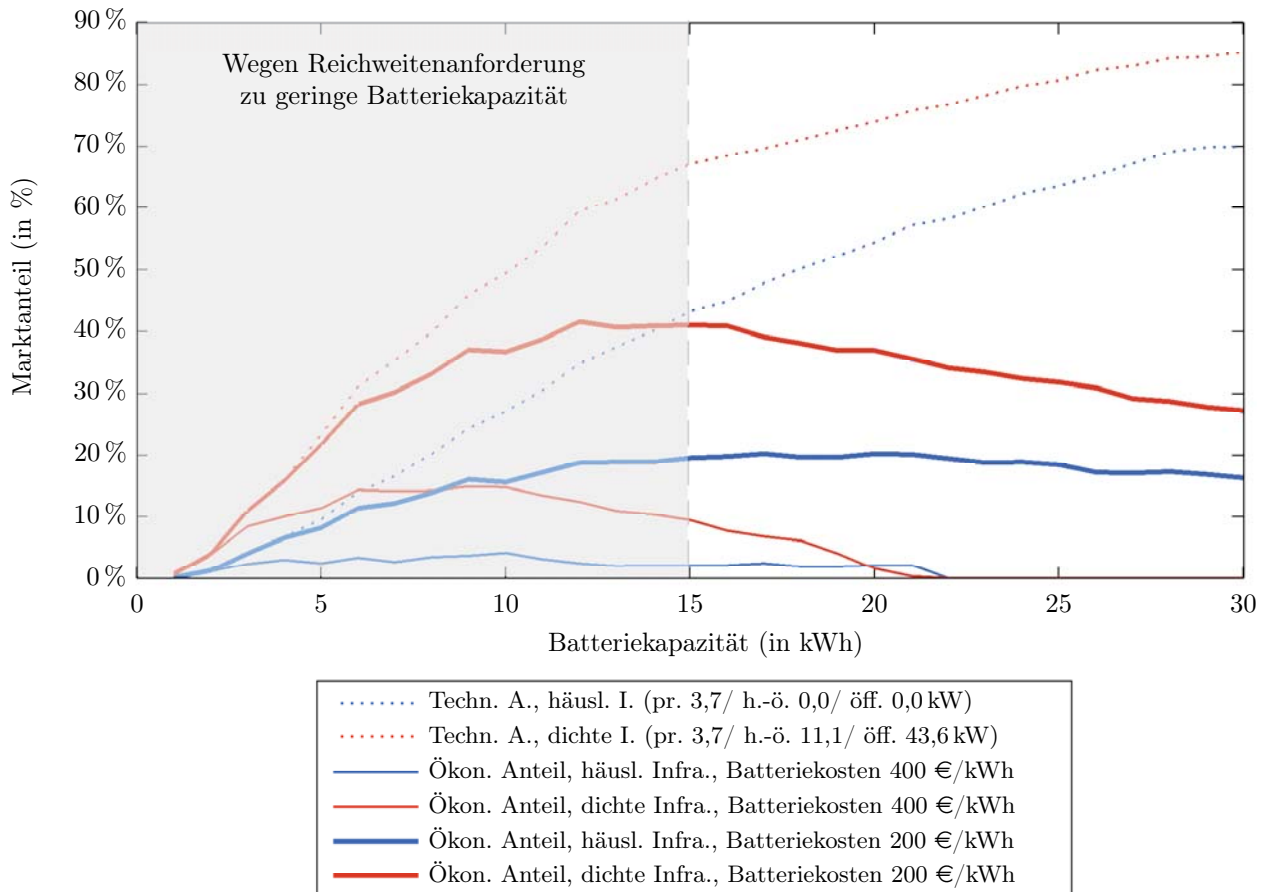
5.4 Optimale Batteriedimensionierung

Bei der Analyse der Einsetzbarkeit von PHEVs wurden bereits die Gesamtkosten dieser Fahrzeuge bei unterschiedlichen Batterieausstattungen betrachtet. Da die Batteriekosten dabei offensichtlich einen großen Einfluss auf die Marktdurchdringungen haben, ist die Anpassung bzw. Optimierung der Batteriekapazität ebenfalls eine weitere Möglichkeit, um die Gesamtkosten der Batterie zu reduzieren. Deshalb wird in diesem Abschnitt der Einsatz verschiedener Batteriegrößen zunächst für EVs und dann für PHEVs analysiert. In dieser Analyse soll nach wie vor der Einfluss verschiedener zugrunde gelegter Ladeinfrastrukturen und Batteriekosten mit berücksichtigt werden. Für die Bewertung werden erneut die technischen und ökonomisch attraktiven Anteile sowie der Einfluss der Beladeinfrastruktur betrachtet.

5.4.1 Batteriedimensionierung für vollelektrische Fahrzeuge

Für vollelektrische Fahrzeuge wird die Simulation erneut mit unterschiedlichen Batteriegrößen durchlaufen. Der technisch mögliche und ökonomisch attraktive Anteil ist in Abbildung 5.3 für die beiden extremen Beladeinfrastrukturszenarien 1 (ausschließlich privates Laden mit 3,7 kW) und 8 (Nutzung überall verfügbarer Beladeinfrastruktur mit 3,7 im häuslichen, 11,1 im halböffentlichen und 43,6 kW im öffentlichen Raum) dargestellt und für den ökonomischen Anteil nochmals untergliedert in unterschiedliche Batteriekosten von 200 und 400 €/kWh. In der Simulation werden Batteriegrößen zwischen 1 und 30 kWh durchlaufen. Auch wenn es technisch möglich und ökonomisch attraktiv ist, ein Fahrprofil mit einem EV und sehr kleiner Batteriekapazität zu betreiben, ist davon auszugehen, dass für weitere Fahrten eine gewisse Mindestreichweite ermöglicht werden muss, damit ein EV als sinnvolle Alternative wahrgenommen wird. So muss selbst unter optimistischen Annahmen hinsichtlich Verbrauch und Nutzung ein EV mit einer Batteriekapazität von mindestens 15 kWh ausgestattet werden.²⁹¹ Fahrzeuge mit kleinerer Batterie sind nur im Einzelfall sinnvoll einsetzbar. Die technisch

²⁹¹ Bei einer maximalen Reichweitenanforderung von 80 km, einem SOC-Fenster von 80% und einem Verbrauch von 0,15 kWh/km muss noch immer eine Batterie mit einer Kapazität von mindestens 15 kWh verbaut werden.



Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, ohne Berücksichtigung der Batteriealterung. Häusliche Infrastruktur (Szenario 1), dichte Infrastruktur (Szenario 8), siehe Tabelle 5.2.

Abbildung 5.3 – Technische und ökonomische Anteile von EVs bei unterschiedlichen Batteriekapazitäten.

möglichen Anteile sind in Abbildung 5.3 gestrichelt dargestellt. Diese Anteile nehmen mit steigender Batteriekapazität zu, flachen jedoch bei sehr großen Batterieaggregaten zunehmend ab. In häuslicher Ladeinfrastruktur werden technisch mögliche Anteile von 40–70 % je nach angenommener Batteriegröße erzielt. In dichter Ladeinfrastruktur lässt sich dieser Anteil auf 65–85 % erhöhen. Fahrzeuge mit kleinerer Batterie profitieren dabei überproportional stärker von dichter Ladeinfrastruktur. Nichtsdestotrotz sind selbst bei großen Batterieaggregaten von 30 kWh und dichter Ladeinfrastruktur nicht alle Fahrzeuge auf ein Elektrofahrzeug umzustellen. Für die ökonomischen Anteile – in Abbildung 5.3 mit durchgezogenen Linien dargestellt – sind zusätzlich die Batteriekosten mit zu betrachten.

In der Marktanfangsphase, hier durch Batteriekosten von 400 €/kWh (dünne Linien) repräsentiert, zeigen sich unabhängig von der gewählten Batteriegröße bei häuslicher Infrastruktur keine ökonomisch attraktiven Anteile von mehr als 5 %. Bei dichter Ladeinfrastruktur können Anteile von bis zu 15 % erreicht werden, diese setzen jedoch Batteriekapazitäten von 5–10 kWh voraus. Wird die Mindestreichweitenanforderung beachtet, so lassen sich für Fahrzeuge mit kleinen Batteriegrößen noch Anteile von 10 % erreichen. Für die vormals angelegten

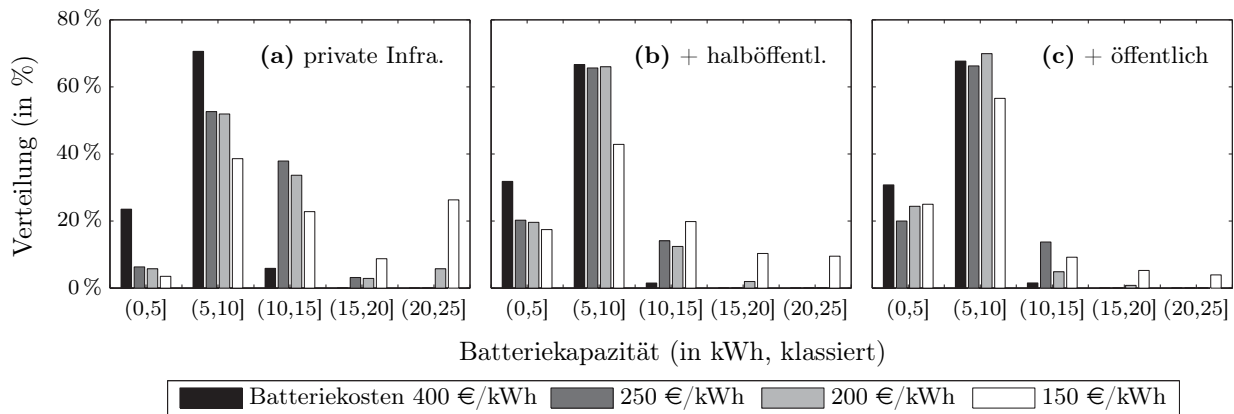
Batteriegrößen von 24 bzw. 30 kWh stellen sich noch keine ökonomisch attraktiven Fahrzeuge ein. Zwar könnten kleine Batteriegrößen und dichtere Ladeinfrastruktur helfen, Elektromobilität auch schon zu höheren Batteriekosten wirtschaftlich zu machen, jedoch sind beide Bedingungen gerade in dieser Phase schwer und eher in Nischenbereichen zu erfüllen. Denn mit kleinen Batterien ausgestattete Elektrofahrzeuge sind unflexibel im Einsatz und eine dichte Ladeinfrastruktur kann gerade am Anfang nicht flächendeckend ausgebaut werden.

Für sinkende Batteriekosten verlagern sich die Kurven des ökonomisch attraktiven Anteils (dickere Linien). So werden durchgängig höhere Anteile erzielt, die ihr Maximum bei größeren Batterien erreichen. Auch hier verläuft die Kurve bei zugrunde gelegter häuslicher Ladeinfrastruktur recht flach und erreicht ihr Maximum bei Batteriegrößen von 15–25 kWh mit Anteilen von bis zu 20 %. Bei dichterem Ladeinfrastruktur liegt das erreichte Maximum zwischen Batteriekapazitäten von 10–15 kWh und damit noch außerhalb der Mindestreichweitenanforderung. Werden mindestens Batteriegrößen von 15 kWh vorausgesetzt, so ist ein ökonomisch attraktiver Anteil von bis zu 40 % erzielbar, der mit noch größeren Aggregaten auf bis zu 28 % sinkt. Die Differenz dieser beiden Anteile, die zwar mit einer kleinen, aber nicht mit einer größeren Batterie ökonomisch attraktiv betrieben werden können, ist hinsichtlich der Reichweite noch immer stark eingeschränkt und deswegen evtl. besser für den Einsatz von Plug-in-Hybriden geeignet.

Aussage 12. *Im häuslichen Bereich verändert sich der ökonomisch attraktive Anteil, der auf EVs umgestellt werden kann, bei Anwendung verschiedener Batteriekapazitäten kaum. Vielmehr sind, abhängig von den Batteriekosten, unterschiedliche Plateaus erreichbar. Bei dichterem Beladeinfrastruktur werden EVs mit kleineren Batterien bevorzugt, von denen jedoch ein Teil aufgrund von Mindestreichweitenanforderungen ausgeschlossen werden muss.*

5.4.2 Batteriedimensionierung für Plug-in-Hybride

Bei der Berechnung der Kosten für Plug-in-Hybride in Abschnitt 5.3 wurde bereits die gesamt-kostenminimierende Batteriegröße für jedes Fahrprofil bestimmt. Die genutzten Batteriegrößen in den sich gegenüber ICEs und EVs durchsetzenden PHEVs sollen nun hinsichtlich ihrer Verteilung bei Anwendung unterschiedlicher Batteriekosten und Beladeinfrastrukturszenarien untersucht werden. Für die drei Beladeinfrastrukturszenarien: privat (Szenario 1), halböffentlich (4) und öffentlich (6) sowie Batteriekosten von 150 bis 400 €/kWh ist die Verteilung der kostenminimierenden Batteriekapazitäten in Abbildung 5.4 dargestellt. In der Marktanzugsphase bzw. bei hohen Batteriekosten werden fernab der zur Verfügung stehenden Beladeinfrastruktur etwa ein Drittel der Fahrzeuge mit sehr kleinen Batterien bis zu 5 kWh und etwa zwei Drittel mit leicht größeren Batterien von 5–10 kWh eingesetzt. Der Einsatz größerer Batterien ist in dieser Marktphase kaum zu beobachten. Mit Batteriekosten von 200–250 €/kWh werden insbesondere in privater Ladeinfrastruktur (Szenario 1) größere Batterien von bis zu 15 kWh gewählt und sehr kleine Batterien von bis zu 5 kWh weitestgehend vermieden. Dieser Effekt tritt in den dichteren Beladeinfrastrukturen (hier Szenarien 4 und 6) deutlich schwächer auf.



Anmerkung: Ausgewählte PHEVs ökonomisch vorteilhaft auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, einer kostenminimierten Batteriekapazität zwischen 1–24 kWh und ohne Berücksichtigung der Batteriealterung. Private Infrastruktur (Szenario 1), halböffentliche Infrastruktur (Szenario 4), öffentliche Infrastruktur (Szenario 6), siehe Tabelle 5.2.

Abbildung 5.4 – Verteilung der optimalen Batteriekapazität bei PHEVs zu unterschiedlichen Batteriekosten in (a) privater, (b) zusätzlich halböffentlicher und (c) zusätzlich öffentlicher Ladeinfrastruktur.

Bei noch weiter sinkenden Batteriekosten von bis zu 150 €/kWh verteilt sich die optimale Batteriegröße in privater Infrastruktur breit über Batteriekapazitäten von 5–25 kWh. Sehr große Batterien werden hier bei etwa einem Viertel aller dann gewählten PHEVs verbaut. Sind zusätzliche Belademöglichkeiten im halböffentlichen Raum gegeben, werden sowohl sehr kleine als auch sehr große Batterien eingesetzt, wobei der Großteil im Bereich von 5–10 kWh liegt. In öffentlicher Ladeinfrastruktur werden große Batterien kaum benötigt und der Großteil der gewählten PHEVs besitzt entweder ein 5–10 kWh- (etwa 60%) oder 1–5 kWh- (etwa 20%) Aggregat. So werden am Anfang kleine Batterien und mit fallenden Batteriekosten, je nach verfügbarer Beladeinfrastruktur und persönlichem Fahrverhalten, PHEVs mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten eingesetzt. Das bedeutet für die Automobilhersteller, dass Fahrzeuge mit unterschiedlichen Batteriegrößen anzubieten sind.

Aussage 13. *Anfangs werden zur Gesamtkostenminimierung in PHEVs kleine Batterien unabhängig von der Infrastruktur eingesetzt, mit weiter sinkenden Batteriekosten sind diese stärker von der zur Verfügung stehenden Infrastruktur und dem persönlichen Fahrverhalten abhängig.*

5.5 Zeitliche Entwicklung

Unter der zeitlichen Entwicklung ist zum einen die Weiterentwicklung der Technologie und damit eine mögliche Kostenreduktion und zum anderen die Entwicklung des Fahrverhaltens im Zeitablauf zu verstehen. Zunächst soll auf mögliche Änderungen in den Anschaffungsausgaben eingegangen werden. Anschließend werden dann die Fahrprofile der verschiedenen Jahre des Mobilitätsprofils ausgewertet und miteinander verglichen.

Entwicklungs- stand	Infrastruktur- szenario	Ökonom. attraktiver Anteil		
		ICE	PHEV	EV
(a) heute	1	76 %	12 %	13 %
	8	69 %	15 %	16 %
(b) zukünftig	1	57 %	35 %	8 %
	8	51 %	38 %	12 %

Anmerkung: Auf Basis der zukünftigen Kostenannahmen in Anhangstabelle A.1, bei denen sich insb. die Anschaffungsausgaben für den Elektromotor und den Hybridantriebsstrang ändern. Batteriekosten bei 200 €/kWh und ohne Berücksichtigung der Batteriealterung. Für die Infrastrukturszenarien siehe Tabelle 5.2.

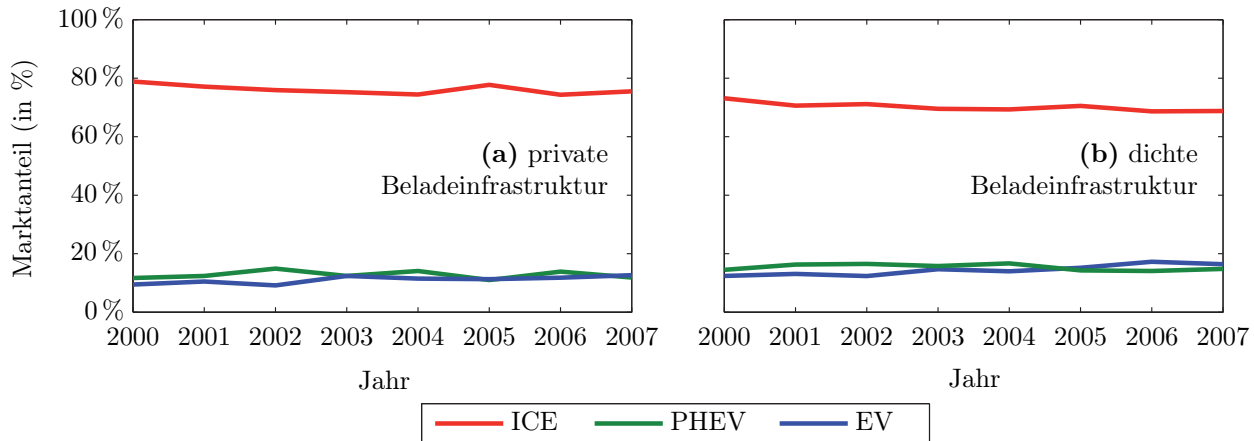
Tabelle 5.9 – Veränderung der ökonomisch attraktiven Anteile bei Technologieweiterentwicklung von (a) heutigen auf (b) zukünftige Entwicklungsstände.

5.5.1 Technologieweiterentwicklung

Bisher wurden in diesem Kapitel verschiedene Batteriekosten als Einflussfaktor der Technologieweiterentwicklung und veränderter Anschaffungsausgaben analysiert.²⁹² Des Weiteren kann auch davon ausgegangen werden, dass sich die Wartungskosten mit einer größeren Anzahl an eingesetzten Elektrofahrzeugen reduzieren lassen. Um dem Effekt der Technologieweiterentwicklung Rechnung zu tragen, werden die Gesamtkosten der verschiedenen Fahrzeugkonzepte nun einmal bei heutigen und zukünftig möglichen Anschaffungsausgaben und Wartungskosten berechnet. Die Simulation wird erneut durchlaufen für Batteriekosten von 200 €/kWh und ohne Einbeziehung der Batteriealterung bei zugrunde gelegter privater (Szenario 1) und dichter (Szenario 8) Beladeinfrastruktur. Die Ergebnisse für die ökonomisch attraktiven Anteile sind in Tabelle 5.9 dargestellt. Insgesamt ist erkennbar, dass sich das Elektromobilitätspotenzial durch Weiterentwicklung der verschiedenen Fahrzeugkomponenten ausbauen lässt und dabei ein größeres Entwicklungspotenzial darstellt als der Aufbau einer dichteren Beladeinfrastruktur. Betrachtet man die verschiedenen Fahrzeugkonzepte einzeln, so kann der PHEV überproportional stärker von den technologischen Weiterentwicklungen profitieren und erreicht hier bei Batteriekosten von 200 €/kWh ökonomisch attraktive Anteile von bis zu 38 %. Das Elektrofahrzeug hingegen kann sich mit den reduzierten Anschaffungsausgaben gegenüber dem PHEV nicht mehr so gut durchsetzen und verliert Anteile von bis zu 5 %. Insgesamt kann sich bei technologischen Weiterentwicklungen der Elektromobilitätsanteil erhöhen, erreicht jedoch max. 50 % des Marktes, d. h. selbst bei niedrigen Anschaffungsausgaben, Batteriekosten und dichter Beladeinfrastruktur ist für einen Großteil des Pkw-Marktes die Nutzung eines Verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeugs ökonomisch attraktiver.

Aussage 14. *Mit sinkenden Anschaffungsausgaben und Wartungskosten aufgrund technologischer Weiterentwicklungen lässt sich das Elektromobilitätspotenzial und insbesondere das*

²⁹² Die Kosten der anderen Fahrzeugkomponenten wurden bereits in Kapitel 3 aufgeschlüsselt und hinsichtlich ihrer heutigen und möglicherweise zukünftig erreichbaren Kosten beschrieben. Dazu gehören insbesondere die Anschaffungsausgaben für Chassis, Tank, Starter, hybrider Antriebsstrang sowie Elektro- und Verbrennungsmotoren.



Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, bei Batteriekosten von 200 €/kWh und ohne Berücksichtigung der Batteriealterung. Private Infrastruktur (Szenario 1), dichte Infrastruktur (Szenario 8), siehe Tabelle 5.2.

Abbildung 5.5 – Entwicklung der ökonomisch attraktiven Anteile über die Jahre 2000–2007 des Mobilitätspanels bei (a) privater und (b) dichter Beladeinfrastruktur.

der PHEVs weiter erhöhen. Dabei können Technologieweiterentwicklungen insgesamt einen größeren Effekt als eine dichtere Beladeinfrastruktur haben.

5.5.2 Fahrprofilentwicklung

Die zweite Komponente der möglichen zeitlichen Veränderung ist die Weiterentwicklung des heutigen Fahrverhaltens. Da die Simulation und insbesondere die Optimierung des Ladeprofiles Kenntnis über ein zeitlich und regional aufgelöstes Fahrverhalten voraussetzt, kann das Fahrverhalten nicht sinnvoll verändert oder parametrisiert werden. Wie eingangs beschrieben, stützt sich diese Arbeit daher auf bekanntes Fahrverhalten und trifft unter der Annahme ähnlicher Mobilitätsbedürfnisse in der Zukunft Aussagen über die Attraktivität verschiedener heutiger und zukünftiger Fahrzeugkonzepte. Um die dargestellten Analysen dennoch hinsichtlich zeitlicher Veränderungen zu überprüfen, wird im Folgenden die Entwicklung der Fahrprofile des Mobilitätspanels und dahingehender Ergebnisänderungen betrachtet. Dazu wird die Simulation auf Basis verschiedener Jahrgänge des Mobilitätspanels gestartet und für Batteriekosten von 200 €/kWh, ohne Einbeziehung der Batteriealterung bei zugrunde gelegter privater (Szenario 1) und dichter (Szenario 8) Beladeinfrastruktur, durchlaufen. Für die Jahre 2000–2007 sind die ökonomisch attraktiven Anteile der drei Fahrzeugkonzepte in Abbildung 5.5 dargestellt. In beiden Beladeinfrastrukturszenarien ist erkennbar, dass die bisherigen Ergebnisse Gültigkeit für verschiedene Jahre besitzen. Dabei schwanken die Ergebnisse über die Jahre jedoch nur in sehr geringem Ausmaß, was insbesondere über die unterschiedliche Zusammensetzung der Fahrprofile des Mobilitätspanels erklärt werden kann. So ist die Standardabweichung für keinen der verschiedenen Fahrzeuganteile größer als 1,5% und damit hinsichtlich der zuvor getroffenen Interpretation des Ergebnisses vertretbar. Trends sind kaum erkennbar, so nimmt bei linearer Regression sowohl in privater als auch dichter Infra-

struktur der ökonomisch attraktive Anteil des ICEs mit etwa -0,5 % ab und im Gegenzug der Anteil des EVs mit etwa +0,5 % pro Jahr zu. Dieser Sachverhalt ist aber im Wesentlichen der Entwicklung der Jahreslaufleistung geschuldet, die im betrachteten Zeitraum von etwa 12.500 auf etwa 13.500 km/a ansteigt. Inwieweit beide Trends fortzuschreiben sind, ist unklar, jedoch würden beide Effekte eine leichte Erhöhung des Elektromobilitätspotenzials bedeuten.

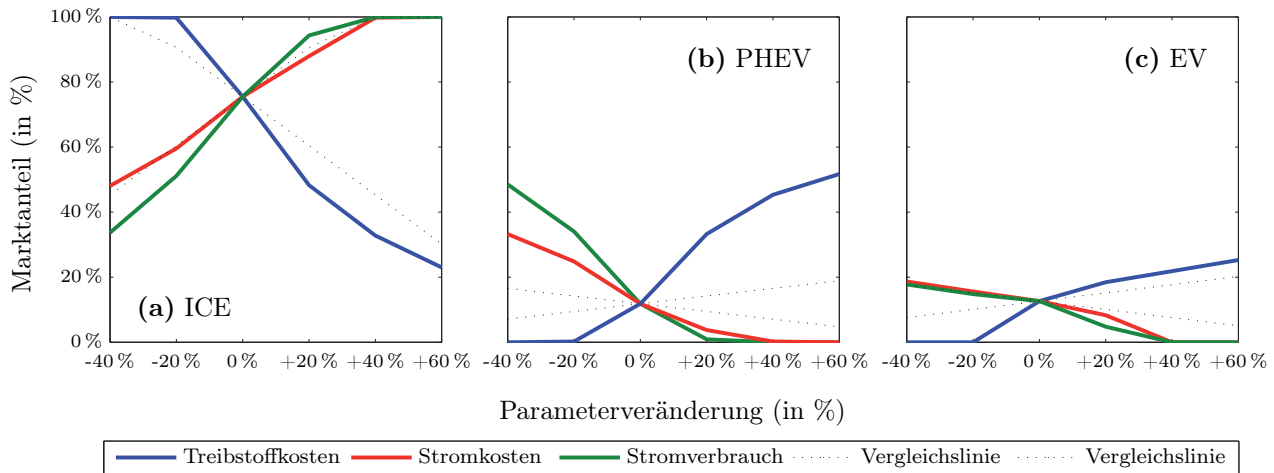
Aussage 15. *Fahrprofile früherer Jahre lassen die gleichen Schlussfolgerungen zu. Auf Basis der Annahme sich nicht wesentlich verändernder Mobilitätsbedürfnisse können die Ergebnisse auch für zukünftige Jahre herangezogen werden.*

5.6 Sensitivitäten

Die durchgeführten Analysen werden nun noch hinsichtlich der Sensitivitäten bei Änderung einzelner Parameter betrachtet. In den vorherigen Abschnitten wurden bereits verschiedene Beladeinfrastrukturen, Batteriekosten, die Batteriealterung, verschiedene Fahrzeugkonzepte, Technologieweiterentwicklungen und Fahrverhaltensänderungen analysiert. Da die restlichen, bisher als unveränderlich gesetzten Parameter jedoch mit Unsicherheit behaftet sind, werden diese, wie u. a. von Leamer (1985) gefordert, auf ihre Signifikanz überprüft. So zeigt sich, ob diese bei Änderung einzelner Parameter das Ergebnis beeinflussen und damit die Aussagen nur in einem begrenzten Bereich Gültigkeit erfahren können.²⁹³ Sensitivitätsanalysen untersuchen damit die Robustheit des Ergebnisses bei Veränderung unsicherer Inputvariablen, wie z. B. bei Levine und Renelt (1992) angewandt. Bei mehreren unabhängigen Faktoren, einem linear abhängigen, deterministischen Ergebnis und einer zeitaufwendigen Simulation schlagen Saltelli et al. (2007) einen „elementary effect test“ bzw. eine „one-at-a-time (OAT)“-Veränderung der Parameter vor. Damit gleichen diese Ansätze dem „piecemeal approach“ von Hermeling und Mennel (2008), bei dem ein Parameter gleichmäßig sowie intervallweise verändert und hinsichtlich der Ergebnisänderung betrachtet wird, während alle restlichen Parameter fixiert werden. Bei diesem Vorgehen ist allerdings das von Saltelli und Annoni (2010) beschriebene OAT-Paradoxon zu beachten, wonach bei isolierten Änderungen einzelner Parameter nur die Sensitivität hinsichtlich dieses Parameters dargestellt wird, obwohl die Veränderung mehrerer Parameter aber eine stärkere Ergebnisänderung verursachen kann.

Für die Sensitivitätsanalyse können die verbleibenden Parameter in drei Gruppen eingeteilt werden, die die Betriebskosten, die Lebensdauern und Verzinsung verändern; zu den Betriebskosten gehören die Treibstoff- und Stromkosten sowie der Stromverbrauch; zu den die Lebensdauer beeinflussenden Faktoren die kalendarische Batterie Lebensdauer, die Fahrzeuglebensdauer und die maximal mögliche Laufleistung. Die Verzinsung wird ausschließlich über den Kapitalzins abgebildet.

²⁹³ Im engl. formuliert Leamer (1985, S. 308): “Conclusions are judged to be sturdy only if the neighborhood of assumptions is wide enough to be credible and the corresponding interval of inferences is narrow enough to be useful”.



Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, bei Batteriekosten von 200 €/kWh und ohne Berücksichtigung der Batteriealterung. Beladeinfrastrukturszenario 1, siehe Tabelle 5.2. Für die Anpassung der Parameter siehe auch Anhangstabelle B.14.

Abbildung 5.6 – Einfluss der Parameter Treibstoff-, Stromkosten und Stromverbrauch auf den Marktanteil von (a) ICE, (b) PHEV und (c) EV.

Zur Durchführung der Sensitivitätsanalyse werden die einzelnen Simulationen unter gleichmäßiger Änderung der einzelnen Parameter erneut durchlaufen und hinsichtlich der Ergebnisänderung betrachtet. Außer der Zinsänderung werden alle Parameter einheitlich verändert und auf fünf neue diskrete Zustände gesetzt mit: -40 %, -20 %, +20 %, +40 %, +60 %. Der Zinssatz wird stufenweise auf bis zu 10 % erhöht. Ein Überblick über die geänderten Parameter und deren angenommene Werte sind Anhangstabelle B.14 zu entnehmen. Als Ergebnis soll der ökonomisch attraktive Anteil an ICE, PHEV und EV betrachtet werden. Als Ausgangsbasis werden Batteriekosten von 200 €/kWh ohne Berücksichtigung der Batteriealterung angenommen. Die Simulation wird unter Änderung jedes einzelnen Parameters für private Beladeinfrastruktur (Szenario 1) durchlaufen. Wie Saltelli et al. (2007) beschreiben, werden Sensitivitätsanalysen gerne in Unsicherheit-Sensitivitäts-Graphen dargestellt, bei denen die Inputparameterveränderung auf der Ordinate gegen Ergebnisänderungen auf der Abszisse abgetragen werden. Wichtig zur Beurteilung der Veränderung ist insbesondere, ob das Ergebnis schwächer, gleichmäßig oder stärker als die vorgenommene Parameteränderung verändert wird. Dazu sind in den folgenden Sensitivitätsanalysen Vergleichslinien eingezeichnet, die ausgehend vom Basisfall die Änderung des Ergebnisses bei positivem und negativem Effekt darstellen.

5.6.1 Betriebskostenänderung

Die Änderung jener Parameter, die die Betriebskosten beeinflussen, Treibstoff-, Stromkosten und -verbrauch, sind in Abbildung 5.6 für die drei Antriebstechnologien dargestellt.²⁹⁴ Es ist

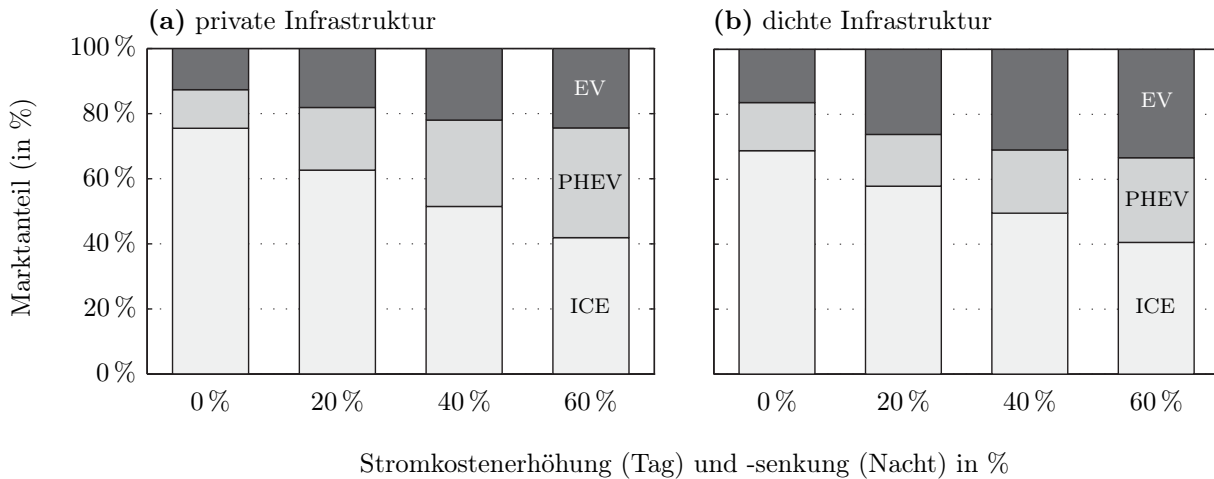
²⁹⁴ Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse unter Berücksichtigung der Batteriealterung ist in Anhangsabbildung B.1 zu finden.

zu beobachten, dass die Treibstoffkosten und der Stromverbrauch bei allen Fahrzeugkonzepten das Ergebnis überproportional stark verändern, d. h. eine Veränderung dieser Parameter erhöht bzw. reduziert den ökonomisch attraktiven Teil zu einem höheren Prozentsatz als die Parameteränderung selbst. Die Stromkosten wirken, was den ökonomisch attraktiven Anteil eines ICEs betrifft, gleichmäßig und bei PHEVs und EVs überproportional stärker. Mit steigenden Treibstoffkosten setzen sich deutlich weniger ICEs ökonomisch durch. Dieser Anteil wird größtenteils durch PHEVs, teilweise aber auch durch EVs aufgefangen. Selbst bei Treibstoffpreisänderungen von 20 % können mehr als 30 % des Marktes ökonomisch auf PHEVs oder EVs umgestellt werden. Steigende Stromkosten oder -verbräuche reduzieren das Elektromobilitätspotenzial. So kann damit eine teurere Stromgestehung (z. B. aufgrund der Forderung nach der Verwendung erneuerbarer Energien) oder der höhere Verbrauch von Nebenaggregaten zur Wärme- oder Kälteerzeugung das Elektromobilitätspotenzial gefährden. Des Weiteren ändern sich die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse kaum bei Berücksichtigung der Batteriealterung. Insgesamt haben damit alle drei die Betriebskosten beeinflussenden Faktoren einen großen Effekt auf die jeweiligen Fahrzeuganteile im Markt. Das Änderungspotenzial des ökonomisch attraktiven Anteils eines PHEVs ist dabei deutlich sensitiver als das des EVs und kann sich insbesondere bei steigenden Treibstoffkosten besser gegenüber dem EV durchsetzen. Treibstoff- und Stromkosten sind jedoch nicht nur sehr sensitiv, was die Ergebnisänderung angeht, sondern unterliegen heute unterschiedlichen Besteuerungen.²⁹⁵ Der Einfluss verschiedener Steuer- und Fördersysteme wird in Abschnitt 5.7 näher beleuchtet.

Aussage 16. *Die Betriebskosten können einen großen Einfluss auf den Marktanteil von Elektrofahrzeugen und insbesondere PHEVs haben. Vor dem Hintergrund sowohl volatiler Rohstoffmärkte als auch möglicher Steueränderung ist die Entwicklung der Betriebskostenparameter genau zu beobachten.*

In den bisherigen Analysen wurden zudem zeitunabhängige Stromkosten auf Basis des Endkundenpreises in Höhe von 0,20 €/kWh angenommen. Vor dem Hintergrund von Marktanforderungen und der zunehmenden Einspeisung fluktuierender erneuerbarer Energien muss und mit dem Einzug von Informationstechnologie, wie z. B. Smart Meter, kann die Stromnachfrage stärker gesteuert werden. Dadurch ist jedoch mit einer deutlichen zeit- und nachfragebezogenen Anpassung der Stromkosten zu rechnen. Insbesondere ist mit geringeren Kosten während der Nacht, aber teureren Ladungen am Tag zu rechnen. Daher soll eine weitere Sensitivität einer solchen Stromkostenentwicklung untersucht werden. Ausgehend von den zeitunabhängigen Stromkosten wird der Endkundenpreis in den Nachtstunden von 20–7 Uhr herab- und dafür in den Stunden am Tag zwischen 7–20 Uhr heraufgesetzt. Es werden drei Szenarien analysiert, in denen die Anpassung nach unten und oben jeweils um 20 %, 40 % und 60 % berechnet werden. Dafür wird die Simulation ausgehend von Batteriekosten von 200 €/kWh, ohne Einbeziehung der Batteriealterung bei zugrunde gelegter privater (Szenario 1) und dichter (Szenario 8) Beladeinfrastruktur durchlaufen. Die Veränderung des Ladeverhaltens bzw.

²⁹⁵ Siehe z. B. Bundesministerium der Finanzen (2010b) und Bundesministerium der Finanzen (2010a).

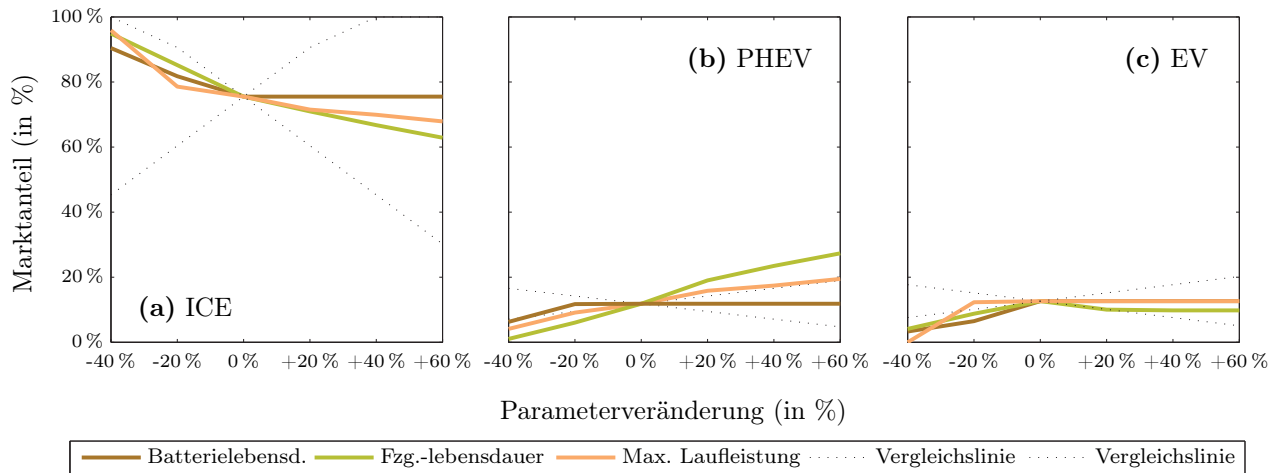


Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, bei Batteriekosten von 200 €/kWh und ohne Berücksichtigung der Batteriealterung. Private Infrastruktur (Szenario 1), dichte Infrastruktur (Szenario 8), siehe Tabelle 5.2. Tagtarif von 7–20 Uhr und Nachttarif von 20–7 Uhr.

Abbildung 5.7 – Einfluss zeitabhängiger Stromkosten auf Basis von Tag/Nacht-Spreads auf den ökonomisch attraktiven Anteil in (a) privater und (b) dichter Infrastruktur.

-profils auf verschiedene Strompreissignale ist exemplarisch in Anhangsabbildung B.4 dargestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.7 dargestellt. Wie bereits erwähnt, sind Stromkosten ein signifikanter Einflussfaktor für die ökonomische Attraktivität von PHEVs und EVs. Aufgrund langer Standzeiten über Nacht und kurzer Fahrstrecken ist es den meisten PHEVs und EVs möglich, in voller Höhe von den niedrigeren Stromkosten in der Nacht zu profitieren, wodurch bei zeitabhängiger Anpassung der Stromkosten hohe Elektromobilitätsanteile erreichbar werden. Im Vergleich zur zeitunabhängigen Anpassung können EVs jedoch aufgrund der größeren Batterie ein wenig stärker von den günstigeren Nachttarifen profitieren; absolut gesehen profitieren PHEVs in privater Infrastruktur wie bereits oben gesehen, jedoch stärker als EVs von sinkenden Stromkosten. In dichter Beladeinfrastruktur (siehe Abbildung 5.7, Teil b) sind bei stetigen Stromkosten mehr EVs und PHEVs ökonomisch attraktiv zu betreiben. Mit steigendem Tag-/Nachtgefälle hebt sich dieser Effekt jedoch fast auf, da nachts im Wesentlichen daheim geparkt und somit die private und nicht die öffentliche Infrastruktur genutzt wird. Obwohl sich das Elektromobilitätspotenzial in dichter im Vergleich zu privater Beladeinfrastruktur bei steigendem Kostengefälle nicht wesentlich erhöhen lässt, verschieben sich die Verhältnisse zugunsten der EVs. Die Benzinnutzung des PHEVs wird im Verhältnis zu den sinkenden Stromkosten deutlich teurer und das Beladen einer größeren Batterie wird daher mit günstigerem Nachtstrom attraktiver.

Aussage 17. *Ladezeitabhängige Stromkosten, wie z. B. ein Tag-/Nachtgefälle, lassen den Nutzer meistens in voller Höhe von den reduzierten Nachttarifen profitieren, da während langer Standzeiten über Nacht geladen werden kann. Mit günstigeren Nachttarifen wird die öffentliche Infrastruktur zudem weniger genutzt.*



Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, bei Batteriekosten von 200 €/kWh und ohne Berücksichtigung der Batteriealterung. Beladeinfrastrukturszenario 1, siehe Tabelle 5.2. Für die Anpassung der Parameter siehe auch Anhangstabelle B.14.

Abbildung 5.8 – Einfluss der Parameter Batterie-, Fahrzeuglebensdauer und max. Fahrleistung auf den Marktanteil von (a) ICE, (b) PHEV und (c) EV.

5.6.2 Lebensdaueränderung

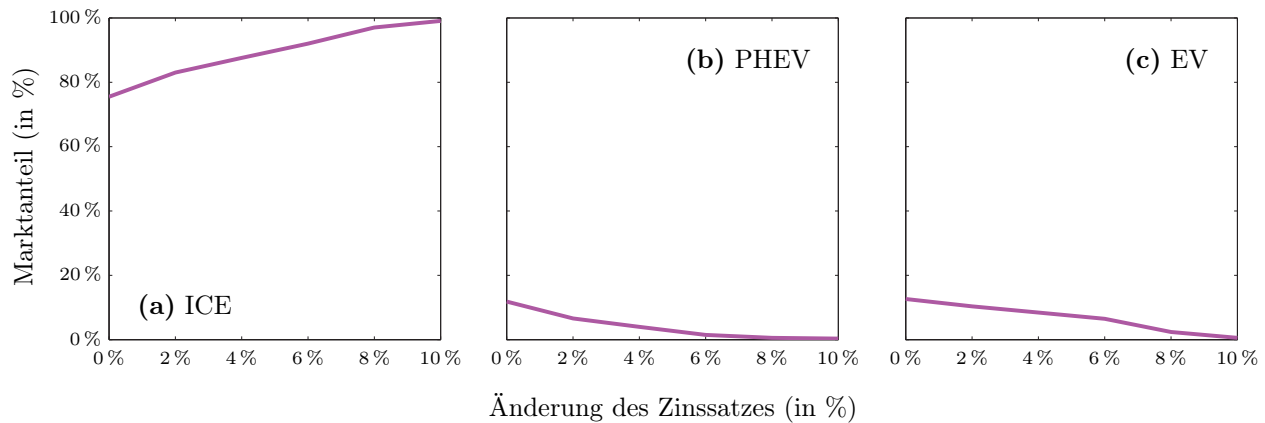
Die Lebensdauern von Batterie und Fahrzeug sowie deren Auswirkungen auf die Durchsetzung der drei Fahrzeugkonzepte werden in diesem Abschnitt untersucht. Als Batterielebensdauer wird die kalendarische Lebenserwartung gesetzt, für das Fahrzeug ist zum einen die erwartete Lebenszeit in Jahren und zum anderen die maximal mögliche Laufzeit einzubeziehen. Die Sensitivitätsanalyse ist in Abbildung 5.8 dargestellt.²⁹⁶ Im Vergleich zu den Betriebskostenänderungen ändert sich das Ergebnis hinsichtlich der Lebensdauer beeinflussenden Parameter verhältnismäßig wenig. Erhöhungen der angenommenen Lebensdauern und Laufleistungen ändern das Ergebnis kaum. Reduzierte Lebensdauern und Laufleistungen hingegen bevorzugen eher ICEs.

5.6.3 Zinssatzänderung

Als letzte Sensitivitätsanalyse wird noch der Effekt einer Zinsänderung auf den ökonomisch attraktiven Anteil betrachtet, der in Abbildung 5.9 dargestellt ist.²⁹⁷ Die bisherigen Gesamtkostenbetrachtungen wurden mit einem Zinssatz $k = 0\%$ berechnet. Wird ein höherer Zinssatz angenommen, so werden ICEs vor PHEVs und EVs bevorzugt. Ab einem Zinssatz von etwa 8% können sich PHEVs und EVs nicht mehr gegenüber ICEs durchsetzen. Das liegt daran, dass die bei PHEVs und ICEs günstigeren Betriebskosten in der Zukunft diskontiert werden, wobei die höheren Anschaffungsausgaben in voller Höhe einbezogen werden.

²⁹⁶ Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse unter Berücksichtigung der Batteriealterung ist in Anhangsabbildung B.2 zu finden.

²⁹⁷ Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse unter Berücksichtigung der Batteriealterung ist in Anhangsabbildung B.3 zu finden.



Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, bei Batteriekosten von 200 €/kWh und ohne Berücksichtigung der Batteriealterung. Beladeinfrastrukturszenario 1, siehe Tabelle 5.2.

Abbildung 5.9 – Einfluss des Zinssatzes auf den Marktanteil von (a) ICE, (b) PHEV und (c) EV.

5.7 Einfluss von Steuern und Förderprogrammen²⁹⁸

Wie in den vorherigen Abschnitten gesehen, hängt die Durchdringung von Elektrofahrzeugen wesentlich von Kostensenkungen der für diese Fahrzeuge benötigten Komponenten, wie Batterien, hybriden Antriebssträngen etc. ab. Um diese Kostensenkungen zu erzielen, werden jedoch zunächst gewisse Stückzahlen benötigt, sodass Skaleneffekte in der Produktion auftreten und somit die Gesamtkosten reduziert werden können. Auch wenn ein Teil der Nutzer, die anfänglich deutlich teureren Fahrzeugkonzepte aus „life style“- und Image-Gesichtspunkten kaufen, so wird die Mehrzahl an Kunden ein PHEV oder EV nicht kaufen, bevor es ungefähr ähnliche Gesamtkosten wie ein ICE verursacht. Aus diesem Grund haben die meisten europäischen Länder bereits Förderschemata für Elektrofahrzeuge eingeführt oder befinden sich in Planung, um die Gesamtkosten zu reduzieren und damit den Produktionsaufbau zu unterstützen.²⁹⁹ Fernab der monetären Unterstützung können insbesondere Städte weitere Anreize, wie z. B. freie Parkflächen oder reservierte Fahrbahnen³⁰⁰ für Elektrofahrzeuge, zur Verfügung stellen, um die Elektromobilität aus Nutzersicht attraktiver zu machen. Um den Effekt auf die Gesamtkosten zu identifizieren, wird im Folgenden auf die monetären Förderprogramme fokussiert. Zunächst werden die Wirkung von Förderprogrammen (Abschnitt 5.7.1) dargestellt, die einzelnen Mechanismen dahingehend bewertet (5.7.2) und abschließend in eine Gesamtkostenbetrachtung (5.7.3) überführt.³⁰¹

²⁹⁸ Dieser Abschnitt beruht im Wesentlichen auf Kley et al. (2012, in Druck).

²⁹⁹ Für eine Übersicht der installierten Förderschemata, siehe z. B. Abschnitt 3.5.3.

³⁰⁰ Im Englischen auch unter „high occupancy vehicle lane“ bekannt, auf denen nur Fahrzeuge mit mehreren Insassen fahren dürfen.

³⁰¹ Dabei wird, wie in der ganzen Arbeit, der private Verkehr beleuchtet, da insbesondere im gewerblichen Verkehr je nach Anwendung und Industrie verschiedene Einflüsse gelten können, wie z. B. die Dienstwagenbesteuerung oder die Freigabe enger Belieferungszeitfenster in Innenstädten, die im Einzelfall näher zu untersuchen sind.

5.7.1 Wirkung von Förderprogrammen

Um Anhaltspunkte für die zukünftige Förderpolitik zu geben, wird der Einfluss der monetären Förderinstrumente auf die Gesamtkosten und damit die ökonomisch attraktiven Anteile von PHEVs und EVs bewertet. Dazu werden nach Enzensberger und Wietschel (2003) die drei Bewertungskriterien Effektivität, Effizienz sowie Praktikabilität herangezogen und um ein viertes Kriterium der politischen Akzeptanz ergänzt. Diese Kriterien sind wie folgt zu beschreiben:

Effektivität bewertet, ob ein Politikinstrument hilft, das anvisierte Ergebnis zu erreichen, und misst dazu meistens die Anzahl der verwirklichten Planziele. Im Falle von Elektrofahrzeugen entspricht das der Anzahl der aufgrund des eingesetzten Instruments zusätzlich erworbenen Fahrzeuge. Dabei trifft die Effektivität keine Aussagen zur Qualität des Instruments, da bspw. weniger anspruchsvolle Ziele einfacher erreicht werden können. So werden im Wesentlichen die Anzahl zusätzlicher Fahrzeuge, aber nicht die damit verbundenen Kosten betrachtet. Eine hohe Effektivität eines Instruments geht dabei immer auch mit guter Vorhersagbarkeit einher.

Das Kriterium der *Effizienz* fügt der Effektivitätsdimension eine Kostenperspektive hinzu. Wie Voß et al. (2000) beschreibt, ist ein Instrument effizienter, wenn das gleiche Ergebnis zu geringeren Kosten erreicht werden kann, sodass die Anzahl der zusätzlichen Elektrofahrzeuge auf den Straßen mit minimalen Kosten zu erreichen ist. Technologiewahl, Transaktionskosten und Mitnahmeeffekte haben jedoch einen signifikanten Effekt auf die Effizienz und können als volkswirtschaftliche Kosten verstanden werden, ein solches Instrument einzusetzen. Diese Kosten sind von den Regulierungsbehörden, der Industrie und schlussendlich durch die Verbraucher zu tragen. So entstehen z. B. Mitnahmeeffekte, wie in Held (2007) beschrieben, wenn die Technologieentwicklung und die eingesetzten Förderinstrumente nicht richtig aufeinander abgestimmt sind. Ein dynamischerer Ansatz fordert daher die Antizipation zukünftiger Technologieentwicklungen, wie Enzensberger et al. (2002) zeigen. Des Weiteren wird u. a. von Weidner (1996) die integrierte Betrachtung mit anderen Politikzielen gefordert, um Reibungen zwischen diesen möglichst zu vermeiden.

Praktikabilität bewertet den mit dem Einsatz des Instruments verbundenen Regulierungs- und Kontrollbedarf sowie die damit verbundene Anforderung an Organisation und Verwaltung. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist dabei, auf veränderte Rahmenbedingungen flexibel reagieren zu können.

Des Weiteren muss die *politische Akzeptanz* berücksichtigt werden, da nur mit dieser ein Instrument erfolgreich eingeführt werden kann. Selbst ein Instrument, das durch die vorherigen Kriterien gut bewertet wird, ist ggf. politisch nicht durchsetzbar und kann dadurch sein theoretisches Potenzial nicht vollends entfalten. Hieraus kann nach Weidner (1996) ein erhöhter administrativer und kommunikativer Aufwand entstehen.

Aufgrund der Schwierigkeiten, diese Kriterien theoretisch nachzuweisen, sind Studien in diesem Umfeld typischerweise empirisch und fokussieren meistens auf die ersten beiden Kriterien: Effektivität und Effizienz. So diskutiert Kemp (1997) z. B. verschiedene ökonomische

Modelle zur Messung dieser Kriterien und wendet diese auch im Bereich der Umweltökonomik an. Er bemerkt jedoch auch, dass weiteren Faktoren, wie der Verknappung, Flexibilität, Differenzierung, dem zeitlichen Aufbau, der Durchführung und Sanktionen, wenig Aufmerksamkeit geschenkt wird, auch wenn diese das Ergebnis deutlich verändern können.³⁰² Daher ist eine breitere Betrachtung, wie hier durch die Praktikabilität und die politische Akzeptanz, als Ergänzung sinnvoll. Alle Instrumente müssen im gesellschaftlichen, politischen und regulativen Kontext betrachtet werden. Insbesondere sind politische und gesellschaftliche Ansichten nicht statisch und können sich über die Zeit ändern, wodurch sich auch der regulative Fokus verschieben kann.

5.7.2 Bewertung der monetären Förderprogramme

Da es bisher kaum Erfahrungen mit Förderschemata im Bereich der Elektromobilität gibt, werden die Instrumente im Folgenden anhand der in der Literatur beschriebenen Erfahrungen zu Hybriden oder erneuerbaren Energien bewertet. Für die Bewertung ist es vorab sinnvoll, den Zeitrahmen, wann die Instrumente wirken, zu betrachten, da sich dadurch sowohl die Wahrnehmung des Instruments als auch der Gesamtkosteneffekt ändert. Allgemein kann die finanzielle Förderung vor, während und nach dem Kauf einsetzen und dabei als einmalige oder wiederkehrende Zahlung angelegt sein. Steuerverringerungen beim oder nach dem Einkauf, direkte Subventionen oder Abwrackprämien sind meistens als Einmalzahlung angelegt und basieren typischerweise auf den Anschaffungsausgaben. Die anderen Instrumente basieren auf den jährlich anfallenden Steuern oder Gebühren, die daher typischerweise kleiner im Volumen sind und über die Lebensdauer des Fahrzeugs erhoben werden. Eine vergleichende Bewertung wird im Folgenden die Stärken und Schwächen der acht monetären Instrumente herausstellen und ist zusammenfassend in Tabelle 5.10 dargestellt.

Verringerung von Steuern beim Einkauf – Wenn ein Kunde ein Fahrzeug kauft, hat der Regulierer verschiedene Möglichkeiten, die Entscheidung durch Anpassung der Steuersätze zu beeinflussen. So erheben die meisten Länder bei Kauf bzw. Anmeldung eine Umsatz- sowie Zulassungssteuer, die für unterschiedliche Fahrzeugklassen reduziert werden könnten. Diese Steuerentlastung würde die Differenz in den Anschaffungsausgaben zwischen ICE und EV reduzieren und ist, wie Edquist und Hommen (2000) zeigen, der wesentliche Treiber für das Wachstum des Marktanteils der EV.³⁰³ Zum Teil, so Diamond (2008), läuft das Instrument jedoch Gefahr, Autohändler zu fördern, auch wenn Sallee (2008) zeigt, dass der größte Anteil der Förderung bei den Kunden ankommt. Aus Praktikabilitätsgesichtspunkten sind diese Steuerverringerungen einfach einzusetzen und in der Bevölkerung akzeptiert.³⁰⁴ Da die bisherigen Erfahrungen im Wesentlichen auf dem Hybridfahrzeugmarkt beruhen und diese Fahrzeuge nicht so teuer wie EVs sind, sind die Aussagen nur bedingt übertragbar.

³⁰² Aus dem Englischen: “stringency, flexibility, differentiation, phasing, enforcement, and sanctions”.

³⁰³ Allerdings haben nach Gallagher und Muehlegger (2008) direkte Verringerungen des Kaufpreises einen größeren Effekt als zeitlich versetzte Steuererstattungen.

³⁰⁴ Vergleiche de Haan (2008b).

Verringerung von Steuern nach dem Einkauf – Ähnlich zu den Steuerentlastungen auf den Einkaufspreis, hat der Regulierer zudem die Möglichkeit, einen Teil der gezahlten Steuern zeitversetzt zurückzuerstatten, dies wäre z. B. im Rahmen der Einkommensteuererklärung möglich. Dieses Instrument hat jedoch einen geringeren Effekt, wie Gallagher und Muehlegger (2008) zeigen. Des Weiteren sind Erstattungen im Rahmen der Einkommensteuererklärung nur für einen Teil der Bevölkerung interessant und können daher Mitnahmeeffekte verursachen. Praktikabilität und Akzeptanz sind aufgrund des komplexeren Systems für die Rückerstattung niedriger anzusetzen.

Direkte Subvention – Der Konsument erhält einen Teil der Anschaffungsausgaben direkt als finanzielle Unterstützung, anstatt dass die anfallenden Steuern reduziert oder diese über andere Wege zurückerstattet werden. Diese Förderung ist häufig an den Kauf eines bestimmten Fahrzeugs gebunden oder in verschiedene Klassen gestaffelt. Verglichen zur Steuerverringerung, schätzen Kunden einen separat gezahlten Betrag höher ein, wie z. B. von de Haan et al. (2007a) gezeigt wird. Die Praktikabilität der direkten Subvention ist abhängig vom eingesetzten System und wird daher nicht weiter betrachtet. Die Akzeptanz kann ähnlich zu Steuerverringerungen beim Einkauf beurteilt werden.

Abwrackprämie – Dieses Instrument ist vergleichbar zu direkten Subventionen, außer dass eine zusätzliche Anforderung besteht, das alte und evtl. umweltunfreundlichere Fahrzeug zu verschrotten. Nemry et al. (2009b) und Dill (2004) zeigen, dass Abwrackprämien es generell schaffen, die Fahrzeugflotte zu erneuern, aber verschiedene Nutzergruppen und Haushalte angesprochen werden. Außerdem verhält sich, wie von BenDor und Ford (2006) festgestellt, die Bereitschaft, das Altfahrzeug zu verschrotten, nicht linear mit dem Betrag der direkten Förderung. Des Weiteren werden häufig Fahrzeuge ersetzt, die sowieso entsorgt worden wären, was, wie von Nemry et al. (2009b) bemerkt, zu einer niedrigeren Effizienz des Instruments führt. Abwrackprämien sind jedoch besonders dann sinnvoll einsetzbar, wenn ältere und weniger effiziente Fahrzeuge schnell durch neuere und effizientere zu ersetzen sind. Dies bedeutet jedoch, dass Elektrofahrzeuge für den Massenmarkt verfügbar sein müssten, sodass die Abwrackprämie sich nicht gut für eine Marktanfangsphase eignet.

Feebate-System/ CO_2 -basierte Steuern – Generell lässt sich ein Feebate-System als eine emissionsbasierte Steuer mit einem Rückerstattungsanteil beschreiben.³⁰⁵ Ob eine Zahlung oder eine Rückerstattung fällig wird, hängt von den Emissionen des Fahrzeugs im Verhältnis zu einem vorgegebenen Zielwert ab. Dabei sind hohe Marktanreizwirkungen durch Feebate-Systeme generell möglich, wie Erfahrungen in schwedischen Kraftwerken oder Simulationen von de Haan et al. (2008) und Nemry et al. (2009b) zeigen. Die Effizienz von Feebate-Systemen ist jedoch stark abhängig von der Integration in das Steuersystem; so diskutiert u. a. Johnson (2006) Implementierungsherausforderungen und folgert daraus, dass Verwaltungs- und Transaktionskosten eng gesteuert werden müssen. Die meisten Feebate-Systeme zielen auf eine Nullsumme von Zahlungen und Rückerstattungen, die sich jedoch in der Praxis und

³⁰⁵ Vgl. auch Peters et al. (2008).

in sich verändernden Märkten schwer balancieren lässt.³⁰⁶ Feebate-Systeme sind akzeptierte Instrumente, wenn sie auch häufig als Förderung von Kleinfahrzeugen gesehen werden.³⁰⁷

Verringerung der jährlichen Kfz-Steuer – Im Vergleich zu den bisher diskutierten Instrumenten hat eine Reduktion der jährlichen Fahrzeugsteuer einen Effekt auf die laufenden Kosten.³⁰⁸ So zeigen z. B. de Haan et al. (2007b), dass eine erlassene jährliche Fahrzeugsteuer den Verkauf von Hybridfahrzeugen in bestimmten Fahrzeugsegmenten beflügelt. Des Weiteren werden jährliche Förderungen als effizienter betrachtet, da diese nicht in die Anschaffungsausgaben eingerechnet werden. Für Hybridfahrzeuge zeigen Giblin und McNabola (2009) sowie Ryan et al. (2009), dass Kaufentscheidungen für effiziente Fahrzeuge häufiger auf Basis der jährlichen Ausgaben als den anfallenden Anschaffungsausgaben getroffen werden. Da EVs jedoch deutlich teurer sind, sind weitere Untersuchungen nötig, um die Kundenwahrnehmung spezifizieren zu können. So bemerken Greene et al. (2005), dass Kunden möglicherweise nicht die ganzen während der Laufzeit des Fahrzeugs anfallenden Kosten vor Augen haben und zukünftige Steuererleichterungen sogar nur teilweise einrechnen, was u. a. auch von sich häufig ändernden steuerlichen und regulativen Rahmenbedingungen getrieben ist. Eine Verringerung der jährlichen Steuer kann gut in heutige Steuersysteme integriert werden.

Erhöhte Treibstoff- vs. Strombesteuerung – Erhöhte Treibstoffsteuern haben nicht nur einen Effekt auf die Gesamtkosten des ICE, sondern führen zu einem höheren Absatz an effizienteren Fahrzeugen, wie auch in Abschnitt 5.6.1 gezeigt. Mandell (2009) folgert daraus eine höhere Kundennachfrage nach effizienteren Fahrzeugen und somit einen Druck auf die Fahrzeughersteller, diese Fahrzeuge zu produzieren. Verschiedene Studien zeigen eine positive Korrelation zwischen Absätzen von Hybridfahrzeugen und steigenden Treibstoffkosten/-besteuerung.³⁰⁹ Heute profitieren EVs bereits von einer unterschiedlichen Besteuerung von Treibstoff und Strom, was sich allerdings mit einer stärkeren Marktdurchdringung von EVs und damit einem sinkenden Steueraufkommen der Treibstoffsteuern schnell ändern kann. Einer Erhöhung der Treibstoffsteuern stehen des Weiteren Auswirkungen auf andere Industrien entgegen. Kalinowska et al. (2009) beschreiben eine Erhöhung der Treibstoffsteuern als leicht durchführbar, diese wird hingegen von de Haan (2008a) auch als sehr unpopulär bewertet, u. a. auch deswegen, weil Haushalte mit niedrigerem Einkommen stärker betroffen sind.

Erlass von Maut- und Parkgebühren – Mautgebühren bzw. die aus London bekannte „congestion charge“ zielen darauf ab, den motorisierten Verkehr in Innenstädten zu reduzieren, und erheben daher für die Einfahrt in einen bestimmten Innenstadtbereich Gebühren – meistens auf Tagesbasis. Diese Gebühr kann für bestimmte Fahrzeuge reduziert oder nicht erhoben werden. Die Fahrzeuge, die nun in den Innenstadtbereich einfahren, profitieren im Gegenzug von weniger befahrenen Straßen und besser verfügbaren Parkflächen. Des Weiteren könnten Parkgebühren für EVs reduziert oder spezielle Flächen reserviert werden. Hinsichtlich des primären Ziels des Instruments, das Verkehrsaufkommen und Fahrzeiten zu reduzieren, haben

³⁰⁶ Siehe u. a. BenDor und Ford (2006).

³⁰⁷ Siehe z. B. de Haan et al. (2008), Greene et al. (2005) und Johnson (2006).

³⁰⁸ Siehe Giblin und McNabola (2009), Hayashi et al. (2001) und Ryan et al. (2009).

³⁰⁹ Siehe u. a. Benton (2008), Tiggis (2008) sowie Gallagher und Muehlegger (2008).

	Bewertung der Förderschemata			
	Effektivität	Effizienz	Praktikabilität	Politische Akzeptanz
Verringerung von Steuern beim Einkauf	+/-	+/-	++	+
Verringerung von Steuern nach dem Einkauf	-	-	+	+/-
Direkte Subvention	+/-	+/-	/	+
Abwrackprämie	+/-	-	/	+
Feebate-System/CO ₂ -basierte Steuern	+	+/-	-	+
Verringerung der jährlichen Kfz-Steuer	+	+	+	+
Erhöhte Treibstoff- vs. Strombesteuerung	+	-	+	--
Erlass von Maut- und Parkgebühren	+/-	/	-	+/-

Bewertung: ++ = sehr gut, + = gut, +/- = neutral, - = dürftig, -- = nicht gegeben, / = keine Aussage

Tabelle 5.10 – Qualitative Bewertung monetärer Förderprogramme für Elektromobilität.

Studien in London und Stockholm gezeigt, dass die eingeführten Mautgebühren erfolgreich waren.³¹⁰ Im Hinblick auf die Unterstützung alternativer Fahrzeugkonzepte gibt es Hinweise, dass eine reduzierte Maut die Absatzzahlen erhöht³¹¹, was jedoch dem primären Ziel, das Verkehrsvolumen zu reduzieren, widerspricht. Der Erlass der Maut ist daher nur in frühen Marktphasen denkbar, mit höheren Marktdurchdringungen muss dies angepasst werden – so wurden die Ausnahmen bereits in Stockholm aufgehoben und in London reduziert.³¹² Mautgebühren sind relativ einfach einzuführen, vom Verwaltungsaufwand überschaubar und politisch akzeptiert.³¹³

Die Instrumente werden im Folgenden noch miteinander verglichen und qualitativ bewertet. Die Zusammenfassung ist in Tabelle 5.10 dargestellt.

Die *Effektivität* wird dabei insbesondere bei den wiederkehrenden Instrumenten als „gut“ bewertet, da diese bei der Kaufentscheidung besonders wertgeschätzt werden, wie z. B. Ryan et al. (2009) zeigen. Eine Ausnahme ist die Mautgebühr, die aufgrund der neu in den Markt eintretenden Fahrzeuge ein Teil ihrer Wirkung verliert. Unter den einmaligen Förderungen ist nur die Steuerverringerung nach dem Einkauf als „dürftig“ zu bewerten, da die Rückerstattungen abgetrennt vom Einkauf z. B. im Rahmen der Einkommensteuererklärung stattfindet, wie Gallagher und Muehlegger (2008) beschreiben.

Bei der *Effizienz* zeigt sich ein gemischteres Bild. So ist nur die Verringerung der jährlichen Kfz-Steuer mit „gut“ zu bewerten. Steuerverringerungen beim Einkauf und direkte Subventionen sind als „neutral“ einzustufen, da nur die finanzielle Unterstützung in der Kaufentscheidung betrachtet, diese jedoch zum Teil auch eingepreist wird. Ähnlich sind Feebate-Systeme zu bewerten, da die Nullsumme der Zahlungen und Rückerstattungen in der Praxis nur schwer zu erreichen ist und insbesondere von der Integration in das antizipierte Steu-

³¹⁰ Siehe Marner (2004) und Eliasson (2008).

³¹¹ Wie z. B. von Transport for London (2009) oder Grüneweg (2007) beschrieben.

³¹² Siehe City of London (2008) und Swedish Transport Agency (2009).

³¹³ Siehe Eliasson (2008, 2009) und Marner (2004).

ersystem abhängt, wie in BenDor und Ford (2006) sowie Johnson (2006) beschrieben. Im Vergleich zu den anderen Instrumenten sind Steuerverringerungen nach dem Einkauf, die Abwrackprämie und erhöhte Treibstoffsteuern mit „dürftig“ zu bewerten, da diese zu ineffizienten Mitnahmeeffekte führen.

Aus Gesichtspunkten der *Praktikabilität* sind Steuerverringerungen sowohl beim Einkauf als auch auf wiederkehrende Steuern „gut“ zu realisieren und im Fall von Steuerverringerungen beim Einkauf sogar mit „sehr gut“, da diese direkt und ohne die Verbindung auf zugrunde liegende Faktoren, wie dem Treibstoffkonsum, angepasst werden können. Im Vergleich sind Feebate-Systeme und Mautgebühren bedingt durch den Implementierungsaufwand eher mit „dürftig“ zu bewerten.

Obwohl die *politische Akzeptanz* nicht statisch ist und sich über die Zeit ändern kann, ist ihre Bewertung wichtig, um abschätzen zu können, welches System sich in naher Zukunft implementieren lässt. Generell sind alle Instrumente bis auf die Steuerverringerung nach dem Einkauf, die Mautgebühr und Treibstoffsteueranpassung mit „gut“ zu bewerten, wobei die Steuerverringerung nach dem Einkauf und die Mautgebühr nur aufgrund der komplexeren Struktur geringfügig niedriger zu bewerten sind. Die Erhöhung der Treibstoffsteuern ist politisch schwer durchsetzbar und wird aus verschiedenen Gesichtspunkten wie der stärkeren Belastung kleiner Einkommen oder dem Effekt auf andere Industrien stark diskutiert.

Der zusammenfassende Überblick in Tabelle 5.10 verdeutlicht dass kein klarer Favorit unter den Instrumenten zu identifizieren ist. Insgesamt werden die wiederkehrenden Instrumente jedoch besser bewertet. Auch wenn die Konsumenten direkte und auf den Anfang bezogene Förderungen bevorzugen, wie durch Gallagher und Muehlegger (2008) gezeigt, schneiden die wiederkehrenden Instrumente – insbesondere die Verringerung der jährlichen Kfz-Steuer und Feebate-Systeme – hinsichtlich der Kriterien Effektivität und Effizienz gut ab. Jedoch ist das heutige Volumen dieser Steuern eher gering und kann daher nur einen Teil der nötigen Förderung bereitstellen. Der Effekt von Mautgebühren oder anderen lokal abhängigen Förderungen ist nicht einfach zu bewerten, da diese nur im lokalen Kontext und stark vom Nutzerverhalten abhängen. Im Falle einmaliger Fördersysteme sind Steuerverringerungen und Subventionen attraktiver, wenn diese beim Kauf wirken, als Zahlungen zu späteren Zeitpunkten. Generell gilt, dass die Zahlungen den Fahrzeugkäufern transparent und klar darzustellen sind, sodass Förderungen nicht bereits durch die Verkäufer eingepreist werden können. Es ist wahrscheinlich, dass Kunden bei EVs noch stärker als im Fall der Hybridfahrzeuge einmalige, anfängliche Förderungen bevorzugen, um die hohen Anschaffungsausgabenunterschiede auszugleichen.

5.7.3 Gesamtkosteneinfluss der Förderung

Die bisher vorgestellten Analysen wurden, wie bereits erwähnt, auf Basis von Bruttowerten durchgeführt, d. h. die Umsatzsteuer sowie Treibstoff- und Stromsteuern sind bereits in den in Tabelle 3.4 dargestellten und im Laufe diesen Kapitels verwendeten Werte enthalten. Weitere Steuern, wie z. B. Zulassungs- oder Kfz-Steuern, und Förderungen, wie Subventionen oder reduzierte Mautgebühren, wurden bisher aufgrund der Abhängigkeit von der gerade geltenden

	Referenzfzg.			Stadtfzg.	
	ICE	PHEV	EV	ICE	EV
Anschaffungsausgaben [€]	16.300	24.964	30.746	8.331	15.841
Betriebskosten [€]	6.878	6.394	6.072	4.788	4.195
Gesamtkosten [€]	23.178	31.358	36.818	13.119	20.036
Differenz vs. ICE [€]	/	8.180	13.640	/	6.917
Mobilitätskosten [€/km]	0,14	0,19	0,22	0,11	0,17

Tabelle 5.11 – Gesamtkosten verschiedener Fahrzeuge ohne Steuern und Abgaben.

Regulierung und der unterschiedlichen Anwendung in den verschiedenen Ländern zunächst außen vor gelassen. In den heute geltenden Steuersystemen sind zum Teil bereits Förderungen der einen oder anderen Technologie enthalten, wie z. B. bei unterschiedlichen Steuerhöhen auf Treibstoff und Benzin. Um das Ergebnis zu bereinigen, werden aus dem in Tabelle 3.4 dargestellten Referenzfahrzeug zunächst die Steuern herausgerechnet. Anschließend sind die bisher geltenden Abgaben zu berechnen und können im Anschluss zwischen den verschiedenen Technologien verglichen werden.

5.7.3.1 Ohne Steuern

Um das in Tabelle 3.4 gegebene Referenzfahrzeug um Steuern und Abgaben zu bereinigen, müssen die Umsatzsteuer sowie Treibstoff- und Stromsteuern herausgerechnet werden. Dafür wurden der in Europa durchschnittliche geltende Umsatzsteuersatz von 20 % herangezogen, ein Benzinpreis vor Steuern von 0,52 €/l sowie ein Strompreis vor Steuern von 0,12 €/kWh ermittelt. Die sich somit ergebenden Nettowerte sowohl für das Referenz- als auch für ein kleineres Stadtfahrzeug sind den Anhangstabellen A.1 und A.2 zu entnehmen. Um die Steuerlast zu den Gesamtkosten ins Verhältnis zu setzen, werden zunächst die Gesamtkosten ohne Besteuerung und Abgaben bestimmt. Dazu sind weitere Annahmen zu treffen, um die Gesamtkosten bei durchschnittlicher Nutzung bestimmen zu können: Es werden eine Jahreslaufleistung $m = 14.000$ km, ein elektrischer Fahranteil des PHEVs von 60 %, ein Zinssatz $k = 3$ % sowie keine Infrastrukturkosten angenommen. Ohne Steuern sind für das Referenzfahrzeug bei PHEVs Mehrkosten von ca. 8.200 € und bei EVs Mehrkosten von ca. 13.600 € zu zahlen, siehe Tabelle 5.11. Diese Kostendifferenz muss in der Marktanfangsphase ohne Steuer-effekte oder bei gleichmäßiger Steuerlast durch den Verbraucher getragen werden. Alternativ kann der Regulierer versuchen, diese Kostendifferenz über die Anpassung der Steuern und Abgaben bzw. über die Zahlung einer direkten Förderung zu senken, um einen Markt und damit Skaleneffekte für PHEVs und EVs zu schaffen.

5.7.3.2 Mit Steuern und Förderungen

Die heute anfallenden Steuern, Abgaben und möglichen Förderungen werden nach den jeweils gültigen Steuersätzen, Abgabenvorschriften oder Förderregularien bestimmt, zu denen im

Wesentlichen die folgenden Typen herangezogen werden müssen:

1. Umsatzsteuer – ist auf alle Zahlungsströme zu entrichten, d. h. sowohl auf die Anschaffungsausgaben des Fahrzeugs als auch auf die Betriebskosten, wie z. B. Benzin oder Strom.
2. Zulassungssteuer – fällt in den meisten Ländern einmalig für die Zulassung eines Pkws an.
3. Direkte Subvention – wird bereits in manchen Ländern für den Kauf eines alternativen Fahrzeugkonzepts gezahlt.
4. Feebate-Systeme – werden bisher nur in Frankreich als Alternative zur jährlichen Kfz-Steuer eingesetzt.
5. Jährliche Kfz-Steuer – fällt in manchen Ländern für das Halten eines Pkws an.
6. Treibstoffsteuer – ist eine Abgabe auf Treibstoff, die in den meisten Ländern als Mengensteuer erhoben wird.
7. Stromsteuer – wird ähnlich zur Treibstoffsteuer als Mengensteuer auf die konsumierte Kilowattstunde erhoben.
8. City-Maut – wird in manchen Städten für die Einfahrt in den innerstädtischen Mautbereich erhoben.

Die ersten drei Typen wirken dabei auf die Summe der Anschaffungsausgaben, die Umsatzsteuer und die letzten fünf Typen zudem auf die laufenden Kosten. Da sich einzelne Abgaben auf Basis der fahrzeugspezifischen CO₂-Emissionen berechnen, sind zur Aufstellung aller Gebühren neben den bereits oben getroffenen Annahmen noch Angaben über die spezifischen CO₂-Emissionen nötig.³¹⁴ Die über die Fahrzeuglebensdauer für das Referenz- und kleinere Stadtfahrzeug anfallenden Abgabenbeiträge sind für die unterschiedlichen Steuer-, Abgaben- und Fördertypen als Kapitalwert in Anhangstabelle B.15 zu finden. Positive Beträge stellen die vom Fahrzeugnutzer zu zahlenden Steuern und Abgaben dar, negative Beträge erhält der Fahrzeugnutzer z. B. in Form direkter Subventionen. Für die verschiedenen Abgabentypen gelten bereits heute unterschiedliche Sätze für ICEs, PHEVs und EVs. Die Summe über die betrachteten Steuern, Abgaben und Förderungen ist den Nettogesamtkosten hinzuzurechnen. Teil (a) der Abbildung 5.10 stellt die Differenz der anfallenden Steuern, Abgaben und möglichen Förderungen zwischen ICE und EV dar. Ist der Betrag negativ, so zahlen EV-Nutzer mehr Abgaben, ist der Betrag positiv, so zahlen EV-Nutzer wenig Steuern. Durch die höheren Anschaffungsausgaben eines EVs gegenüber eines ICEs fallen Steuern, Abgaben und Förderung auf die Summe der Anschaffungsausgaben bei EVs fast überall in Europa höher

³¹⁴ Die CO₂-Emissionen eines heutigen Referenzfahrzeugs können auf 137 g/km für ein ICE, 55 g/km für ein PHEV und 0 g/km für ein EV gesetzt werden. Das kleinere Stadtfahrzeug in der Verbrennungsmotorvariante wird auf 104 g/km gesetzt.

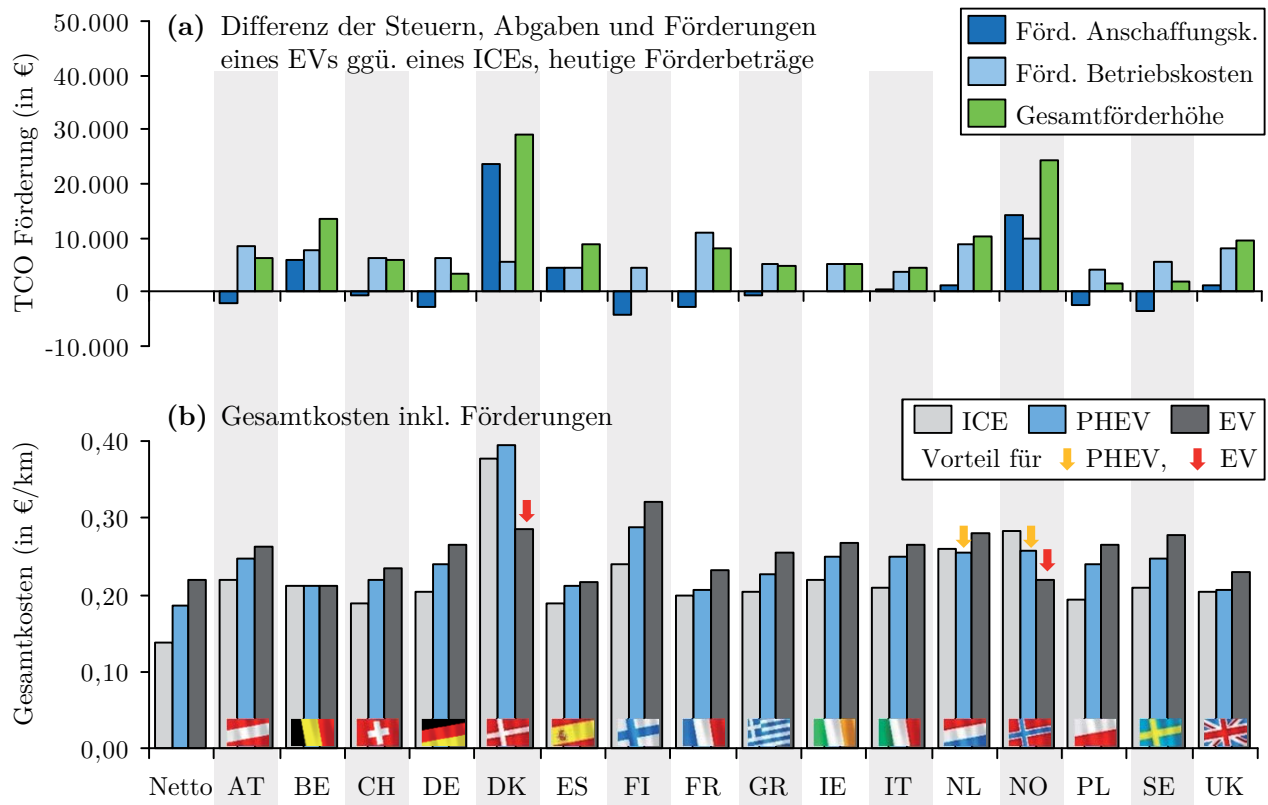


Abbildung 5.10 – Gesamtkostenbetrachtung des Referenzfahrzeugs unter Berechnung (a) aller Steuern, Abgaben und Förderungen sowie (b) der Fahrzeuggesamtkosten inkl. Abgabenlast.

aus und sind daher in der Grafik als negativer Balken dargestellt. Nur in manchen Ländern, wie Belgien, Dänemark und Spanien, sind durch das Zahlen direkter Subventionen (BE³¹⁵, ES) oder der erlassenen Zulassungssteuer (DK) die anfallenden staatlichen Gebühren auf die Summe der Anschaffungsausgaben niedriger. Die heutige Besteuerung und Abgabenerhebung ist in Summe für EVs in allen europäischen Ländern niedriger, was im Wesentlichen auf die geringere Besteuerung von Strom zurückgeführt werden kann. Manche Länder erheben auch geringere Kfz-Steuern oder zahlen wie im Falle Frankreichs einen Bonus über das dort existierende Feebate-System. Die Länder mit den vergleichsweise höchsten Förderungen auf die Betriebskosten (AT, FR, NL, NO) erlassen im Wesentlichen die in diesen Ländern hohe Kfz-Steuer. Die Besteuerung ist damit jedoch nicht nur in Betrachtung der angewendeten Instrumente, sondern auch in den bewilligten Förderhöhen in Europa sehr verschieden. Im Teil (b) der Abbildung 5.10 sind die Gesamtkosten für alle drei Fahrzeugkonzepte inklusive aller Steuern, Abgaben und Förderungen dargestellt. Während die Nettogesamtkosten (die ersten Säulen) der drei Fahrzeugkonzepte noch Mehrkosten von bis zu 0,08 €/100 km in den frühen Marktphasen bedeuten, liegen die Bruttogesamtkosten aufgrund der EV bevorzugen- den Besteuerung bereits heute in jedem europäischen Land näher zusammen. Jedoch sind im Durchschnitt EVs bisher nur in Dänemark und Norwegen und PHEVs nur in den Niederlanden

³¹⁵ Länderabkürzungen nach International Organization for Standardization (2010).

und Norwegen günstiger zu betreiben. Das Ergebnis Dänemarks ist insbesondere interessant, da hier zwar eine hohe Förderung des Elektrofahrzeugs stattfindet, jedoch im Verhältnis zu den durchschnittlichen Kosten, ein EV in Europa zu betreiben, deutlich teurer ist, d. h. hier werden vielmehr ICEs und PHEVs „bestraft“ als EVs gefördert.

Für das kleinere Stadtfahrzeug ist die Auswertung in Anhangsabbildung B.5 dargestellt und zeigt ein ähnliches Bild zum größeren Referenzfahrzeug. Dem Stadtfahrzeug ist es jedoch ggf. im Einzelfall möglich, stärker von städtischen Mautsystemen zu profitieren. In die Gesamtkosten eingerechnet verursachen diese vor allem in den heute geltenden Mautzonen in Oslo und London eine deutliche Reduzierung der Gesamtkosten für EVs.

Die heutigen Förderschemata unterscheiden sich jedoch nicht nur in der absoluten Höhe, sondern auch in ihrer Anwendung. Daher können Änderungen der Parameter, wie in Abschnitt 5.6 gezeigt, einen stärkeren oder schwächeren Einfluss auf die Gesamtkosten haben. Das gesamte Fördervolumen der Länder, die auf einmalige Förderungen setzen, ist z. B. nicht durch eine Änderung des Zinssatzes oder der Jahreslaufleistung betroffen. In Anbetracht möglicher Änderungen der Rohstoffpreise und sich fortwährend ändernder Steuersysteme wird die direkte Förderung beim Fahrzeugkauf von den möglichen Käufern stärker geschätzt. Ergänzend zu den finanziellen Förderungen kann der Regulierer über das Reduzieren von Unsicherheiten, wie z. B. transparente Förderregularien, Voraussetzungen für eine höhere Investitionssicherheit schaffen. Des Weiteren müssen die heutigen Förderungen auch mit der technologischen Weiterentwicklung angepasst werden, damit keine „Überförderung“ und Mitnahmeeffekte entstehen.

Aussage 18. *Ein Vergleich der heute in Europa bestehenden Förderschemata zeigt, dass EVs bisher in fast allen europäischen Ländern mit Ausnahme von Dänemark und Norwegen aus ökonomischer Sicht unattraktiv sind. Für die Förderung des EV-Erstmarktes ist, unabhängig von aufgebauten Ladeinfrastrukturen, eine Anhebung der Förderbeträge notwendig.*

5.8 Treiber der Kaufentscheidungen

Kunden treffen ihre Kaufentscheidungen anhand von Faktoren, zu denen nicht nur funktionale Bedürfnisse (Transportzweck, Komfort, Sicherheit u. a.) zählen, sondern auch emotionale (Spaß, Freiheit, Erlebnis u. a.) oder symbolische (Image, Individualität u. a.) Beweggründe einbezogen werden müssen.³¹⁶ In der Ökonomie wird häufig versucht, diese weiteren Faktoren anhand erhöhter Zahlungsbereitschaften zu erfassen³¹⁷, auf die daher zunächst eingegangen werden soll (siehe Abschnitt 5.8.1). Bei der Elektromobilität im Besonderen wird aufgrund der begrenzten Reichweite aus Sicht der Kunden zudem die Funktionalität beeinträchtigt. Eine Möglichkeit zur Kompensation dieser Einschränkung ist der Aufbau einer dichteren Ladeinfrastruktur. Daher wird anschließend auf Basis der Analysen in diesem Kapitel ein aus Kun-

³¹⁶ Vgl. Steg (2005, S. 153) aus dem Englischen: “respondents make a clear distinction between instrumental and symbolic and affective motives for car use”.

³¹⁷ Siehe u. a. Alpízar et al. (2001).

densicht sinnvoller Infrastrukturaufbau abgeleitet (siehe Abschnitt 5.8.2). Die schlussendliche Wahl der ökonomisch attraktivsten Technologie und einer sinnvollen Konfiguration z. B. eines PHEVs wird auf Basis des Fahrverhaltens der Kunden getroffen. Dieses ist den Kunden jedoch heute kaum bekannt und somit stellt sich die abschließende Frage, wie diese mit in die Kaufentscheidung einbezogen werden können (siehe Abschnitt 5.8.3).

5.8.1 Zahlungsbereitschaft

Die Zahlungsbereitschaft ist als der Betrag definiert, den ein Individuum bereit ist, für ein bestimmtes Produkt zu bezahlen.³¹⁸ Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Zahlungsbereitschaft liegt darin, den entstehenden Nutzen eines Individuums zu beziffern, der unterschiedlicher Ausprägung sein kann. U. a. kann dieser so auch in einem positiven Imagegewinn, bspw. ein „grünes“ Produkt zu nutzen, liegen. Vor diesem Hintergrund wird die Zahlungsbereitschaft, oder engl. „willingness to pay“, auch als Bereitschaft verstanden, einen bestimmten Preis für ein neues Produkt gegenüber dem herkömmlichen zu bezahlen. Der Preis, den ein Kunde bereit ist, höchstens zu bezahlen, entspricht der maximalen Zahlungsbereitschaft. Aufgrund der bereits im Lauf der Arbeit mehrfach erwähnten unterschiedlichen Zahlungsströme von ICEs und alternativen Antrieben sind die Gesamtkosten der beiden Technologien zu vergleichen. Häufiger findet man allerdings den Versuch, die Anschaffungsausgaben mit möglichen Erwartungen der Kunden an niedrigere Betriebskosten zu kompensieren.³¹⁹ Demgegenüber ist aber auch einzubeziehen, dass keine vollständig gleichen Fahrzeuge miteinander verglichen werden, was u. a. die Reichweite oder die möglichen Höchstgeschwindigkeiten angeht. Diese Nachteile einer neuen Technologie sind ebenfalls mit in die Zahlungsbereitschaft der Kunden einzubeziehen, wie Gärling und Thøgersen (2001) fordern. Umfragen zu Zahlungsbereitschaften stellen den Befragten häufig verschiedene Bandbreiten akzeptierter Mehrkosten zur Auswahl, die ein Kunde häufig – wie im Fall von PHEVs und EVs – ohne Kenntnis des Produkts beantworten soll. Vor diesem Hintergrund äußern Kurani und Turrentine (2004) Bedenken über die Interpretierbarkeit der Zahlen und zeigen, dass Fragebogenantworten und die Zahlungsbereitschaft in der Realität auseinanderliegen.³²⁰ Studien über Zahlungsbereitschaften untersuchen im Wesentlichen drei Bereiche der Elektromobilität:

1. Fahrzeug – Duvall (2002) betrachtet Fahrzeugkomponenten und deren Auswirkung auf die Zahlungsbereitschaft. Diesbezüglich identifiziert Högberg (2007), dass eine erhöhte Zahlungsbereitschaft für Komponenten, die das Fahrverhalten ändern, wie Motor-dimensionierung und Beschleunigungsverhalten, bestehen, jedoch für weitere Komponenten eine geringe Zahlungsbereitschaft existiert. Carlsson und Johansson-Stenman (2003) betrachten aus ökologischen Gesichtspunkten verbesserte Fahrzeuge und beziffern die Zahlungsbereitschaft auf 900–1.300 €. Turrentine und Kurani (2007) stellen für

³¹⁸ Siehe u. a. Rao (2009).

³¹⁹ Vergleiche u. a. Duvall (2004) oder Bradley und Quinn (2010).

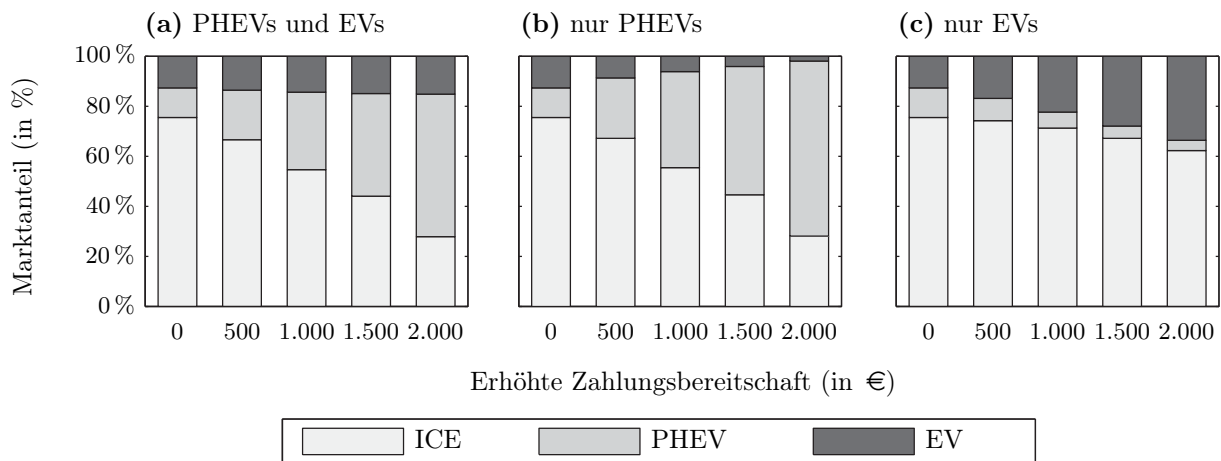
³²⁰ Des Weiteren zeigen z. B. auch Frykblom (1997) oder Carlsson und Martinsson (2001), dass Kunden die Zahlungsbereitschaft im Rahmen eines Fragebogens und ohne direkten Bezug zur Kaufentscheidung überschätzen.

Hybride fest, dass Kunden zwar bereit sind, höhere Anschaffungsausgaben von bis zu 5.000 € zu zahlen, jedoch auch erwarten, diese über das Fahrzeugleben durch Einsparungen zumindest teilweise wieder zu erhalten. Slater et al. (2009) betrachten PHEVs und identifizieren eine erhöhte Zahlungsbereitschaft von 1.000 bis 2.000 € im Wesentlichen in Abwägung einer erhöhten Zahlungsbereitschaft für einen höheren elektrischen Fahranteil.

2. Infrastruktur – Achtnicht et al. (2008) betrachten die Bereitschaft möglicher Nutzer, für den Zugang zu Ladeinfrastruktur zu bezahlen und differenzieren dabei, ob bereits ein weit verteilter Zugang zu der neu benötigten Infrastruktur besteht oder nicht. Im Fall noch dünner Infrastruktur beziffern sie 2 €/100 km und für dichtere Infrastruktur 0,40 €/100 km als Zahlungsbereitschaft der Kunden für einen Zugang zu dieser Infrastruktur.³²¹ Neenan et al. (2010) betrachten die Bereitschaft, im privaten Bereich eine Ladestation (z. B. mit höherer Anschlussleistung etc.) zu installieren und identifizieren dafür Zahlungsbereitschaften von 150 bis 750 €.
3. Grüne Energie – Ein weiterer Bereich ist, die Energieerzeugung und -bereitstellung des Stroms zur Beladung der Elektrofahrzeuge nachhaltig zu gestalten. Truffer et al. (2001) betrachten dazu, welchen Mehrpreis ein Kunde für den Bezug grünen Stroms bereit ist zu bezahlen und ermitteln für den Großteil der Kunden einen möglichen Preiszuschlag von 5 %. Für einen kleinen Teil der Kunden lassen sich ggf. auch Zuschläge von bis zu 20 % vermitteln, siehe z. B. Valocchi et al. (2009).

Insgesamt ist erkennbar, dass in jedem der drei Bereiche eine erhöhte Zahlungsbereitschaft für PHEVs und EVs zu identifizieren ist. Jedoch ist diese unter Abzug der erwarteten Gegenrechnung und möglicher technischer Nachteile nur noch von kleinem Ausmaß. Des Weiteren müssen die Vorteile beworben werden, wie z. B. Struben und Serman (2008) fordern, um die erhöhte Zahlungsbereitschaft zu rechtfertigen. Es ist daher davon auszugehen, dass Zahlungsbereitschaften nur in kleinem Umfang vorhanden sein werden. Vor allem der Plug-in-Hybrid kann aufgrund der hohen elektrischen Fahranteile ein „grünes Image“ verkörpern, ohne dabei wie das EV auf eine bestimmte Reichweite beschränkt zu sein. Diese zusätzliche Flexibilität kann beim Kunden eine erhöhte Zahlungsbereitschaft auslösen. Betrachtet man vor diesem Hintergrund erhöhte Zahlungsbereitschaften für beide alternative Fahrzeugkonzepte (Fall a), nur für PHEVs (b) oder nur für EVs (c), ergeben sich die in Abbildung 5.11 dargestellten ökonomisch attraktiven Marktanteile ausgehend von Batteriekosten von 200 €/kWh ohne Einbeziehung der Batteriealterung unter Annahme privater Beladeinfrastruktur (Szenario 1). Für den Fall, dass eine höhere Zahlungsbereitschaft sowohl für PHEVs als auch EVs gilt, setzen sich PHEVs auch gegenüber ICEs stärker durch und EVs können aus ökonomischer Sicht keine weiteren Marktanteile gewinnen. Werden höhere Zahlungsbereitschaften nur für

³²¹ Umgerechnet auf die vormals verwendeten Infrastrukturkosten in Abhängigkeit der umgesetzten Energiemenge ergibt sich eine Zahlungsbereitschaft von 0,02–0,09 €/kWh für Infrastrukturaufschläge auf die zu zahlenden Stromkosten.



Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, bei Batteriekosten von 200 €/kWh und ohne Berücksichtigung der Batteriealterung. Beladeinfrastrukturszenario 1, siehe Tabelle 5.2.

Abbildung 5.11 – Einfluss der Zahlungsbereitschaft (a) für beide alternative Antriebe, (b) nur für PHEVs und (c) nur für EVs.

PHEVs angenommen, so verringert sich zusätzlich auch der ökonomisch attraktive Anteil von EVs, zugunsten eines weiteren Ausbaus der PHEV-Marktanteile. Ist der Kunde nur bereit, einen Aufpreis für EVs zu bezahlen, so setzen sich EVs zwar stärker durch, jedoch kann ein ähnlich hoher Anteil an alternativen Antrieben im Markt nicht erreicht werden. Aufgrund der Nachteile einer reinen EV-Nutzung ist eine erhöhte Zahlungsbereitschaft ausschließlich für EVs jedoch unwahrscheinlich. Somit kann davon ausgegangen werden, dass, wenn ein Kunde bereit ist, höhere Preise für alternative Antriebe zu bezahlen, ein PHEV aus ökonomischer Sicht attraktiver ist. Eine ähnliche Entwicklung tritt auch bei dichterem Beladeinfrastruktur ein,³²² sodass auch hier bei höherer Zahlungsbereitschaft ein PHEV wirtschaftlich attraktiver ist.

Aussage 19. *Erhöhte Zahlungsbereitschaften – egal ob für Fahrzeug, Infrastruktur oder grüne Energie – lassen sich zusammenfassend ökonomisch bewerten und in die Gesamtkostenbewertung überführen. Ist der Kunde bereit, einen höheren Preis zu bezahlen, so kann sich das PHEV stärker durchsetzen. Ist ein Kunde bereit, einen Mehrpreis für dichtere Ladeinfrastruktur zu bezahlen, so ist aus wirtschaftlichen Überlegungen ebenfalls ein PHEV attraktiver.*

5.8.2 Reichweite und öffentliche Ladeinfrastruktur

Aufgrund der Angst der Kunden, mit einem Elektrofahrzeug liegen zu bleiben³²³, wird oftmals der Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur gefordert. Wie die Analysen dieses Kapitels gezeigt haben, ist eine dichtere Infrastruktur jedoch aus rein ökonomischen Gründen gerade in der Marktanzugsphase nicht notwendig und selbst mit deutlich günstigeren Batteriekosten

³²² Siehe Anhangsabbildung B.6 für eine Auswertung in dichterem Beladeinfrastruktur (Szenario 8).

³²³ Siehe Tate et al. (2008) oder Abschnitt 2.3.1.

ist der damit generierte zusätzliche Anteil an alternativen Fahrzeugen relativ gering. Hohe Reichweitenanforderungen an ein Elektromobil werden zwar häufig in Umfragen genannt³²⁴, die damit verbundene Reichweitenangst ist jedoch eher psychologischer Natur, wie z. B. Taylor (2009) beschreibt. Sie verschwindet meist innerhalb weniger Wochen der Nutzung.³²⁵ Dies bestätigten zum Teil auch die Pilotversuche in den 1990er-Jahren³²⁶ und die Ergebnisse aus den Modellregionen³²⁷ von heute. Ein weiteres Argument für eine dichtere Beladeinfrastruktur sind einzelne längere Fahrten, wie z. B. Urlaubsfahrten, um diese mit Stopps an der öffentlichen Ladeinfrastruktur dennoch zurücklegen zu können. Dies erfordert jedoch nicht die einfache Existenz von Ladesäulen im öffentlichen Raum, sondern Stationen, die mit sehr hohen Anschlussleistungen kurze Beladezeiten ermöglichen und damit für eine rasche Weiterfahrt sorgen. Schnellladungen sind jedoch sowohl technisch als auch ökonomisch schwer zu realisieren, sodass andere Konzepte wie z. B. die Nutzung eines PHEVs, Tauschfahrzeuge etc. für diesen Anwendungsfall besser geeignet sind.³²⁸ Generell zeigt sich, dass Kunden sowohl technisch als auch ökonomisch keine dichte Beladeinfrastruktur benötigen, sie zudem nur in geringem Maße willens sind, dafür zu bezahlen, aber dass sie sich vor der Kaufentscheidung eines Elektrofahrzeugs sicherer fühlen, wenn im Notfall auf eine dichtere Beladeinfrastruktur zurückgegriffen werden kann. Ein kleiner Anteil gut sichtbarer und verfügbarer öffentlicher Ladeinfrastruktur kann daher ein wichtiger Markttreiber sein. Da jedoch primär die häusliche Ladeinfrastruktur aus ökonomischen Gründen benutzt werden wird, ist dieser Anteil möglichst gering zu halten. Die öffentlichen Ladestationen werden daher schlecht ausgelastet sein, was im Umkehrschluss die deren Nutzung noch weiter verteuert.

5.8.3 Verständnis Fahrprofile und Kaufberatung

Zur Auswahl des richtigen Fahrzeugs für einen Kunden wurden in diesem Kapitel das Fahrprofil zugrunde gelegt und auf Basis dessen das ökonomisch attraktivste Fahrzeug und ggf. die kostengünstigste Batteriedimensionierung bestimmt. Heutzutage haben Kunden jedoch wenig Kenntnis über ihr Fahrprofil und meistens wird ein Fahrzeug über maximale Reichweiten vielmehr aber über die Fahrdynamik oder sonstige Fahrzeugkomponenten ausgewählt. Jedoch ist aus ökonomischer Perspektive ein wesentlicher Treiber der Gesamtkosten, der nicht zwangsläufig die Qualität oder Funktionalität des Fahrzeugs einschränkt, die richtige Fahrzeugtechnologie und damit einhergehend ggf. geeignete Batteriegröße zu wählen. Daher ist es denkbar, zur Kaufunterstützung das Fahrprofil von Neuwageninteressenten über einen ge-

³²⁴ Vergleiche z. B. ADAC (2009).

³²⁵ Aus dem Englischen aus Taylor (2009, S. 4): “range anxiety is a psychological concern that generally fades within a few weeks of actual use of a BEV [battery electric vehicle], the incremental benefit for this extra cost is questionable”. Vgl. auch Wallentowitz et al. (2010, S. 60): „auch in Zukunft [ist] von Seiten der Käufer kein vollkommen rationales Verhalten zu erwarten [...] und darüber hinaus [stellt] eine große Reichweite für viele Kunden ein Grundbedürfnis dar[...]“.

³²⁶ Siehe z. B. die Frequentierung der öffentlich installierten Ladestationen im Mendrisio-Projekt, wie von Meier-Eisenmann et al. (2001) beschrieben.

³²⁷ Vgl. z. B. Hoffmann (2010).

³²⁸ Siehe hierzu auch Abschnitt 2.3.3.

wissen Zeitraum manuell oder über kleine GPS-Sender aufzuzeichnen und auszuwerten. Je nach zurückgelegten Fahrten und dazwischen liegenden Standorten und -zeiten sowie der zur Verfügung stehenden Beladeinfrastruktur lässt sich gemäß des in Kapitel 4 beschriebenen Optimierungsalgorithmus eine kostenminimierende Fahrzeugtechnologie und ggf. Batteriegröße bestimmen, die so Kaufentscheidungen unterstützen kann.

Zusammenfassung

- Technisch ist ein hoher EV-Anteil (>60%) möglich, dabei ist die Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur wichtiger als hohe Anschlussleistungen. Wirtschaftlich werden EVs erst mit niedrigeren Batteriekosten und bei privater, später teilweise auch dichter Infrastruktur möglich; generell ist das Potenzial jedoch beschränkt (<45%).
- PHEVs sind – selbst in dichter Infrastruktur – ein idealer Marktbereiter, da sie sich früher ggü. EVs durchsetzen und ihre Reichweite nicht beschränkt ist.
- Die Anpassung der Batteriegröße ist bei EVs wegen Reichweitenanforderungen kaum relevant; bei PHEVs sind anfangs kleinere und später fahrverhalten- sowie infrastrukturabhängige Größen attraktiv.
- Die Diffusion ist u. a. von Technologieentwicklungen und Mobilitätsanforderungen abhängig. Das Fahrverhalten der letzten Jahre ist jedoch stabil und daher für zukünftige Perioden heranzuziehen.
- Die Ergebnisse sind sensitiv und bei Treibstoff-/Stromkosten- und Verbrauchsänderungen stärker PHEV-bevorzugend; Lebensdauer- und Zinsanpassungen begünstigen hingegen ICEs.
- Steuer- und Fördersysteme bevorzugen bereits heute EVs, diese sind aber nur in Dänemark und Norwegen ggü. ICEs günstiger. Eine Anpassung der Strombesteuerung auf Treibstoffniveau ist kritisch.
- Die Zahlungsbereitschaft ist für alternative Antriebe, komfortablere Ladeinfrastruktur oder „grüne Energie“ verhältnismäßig klein und bevorzugt auf Gesamtkostensicht PHEVs.

Kapitel 6

Neue Geschäftsmodelle zur Ladeinfrastruktur

Forschungsfragen

- Was sind Geschäftsmodelle und wie lassen sich diese beschreiben?
- Wo und wie können neue Geschäftsmodelle ansetzen, die technischen und wirtschaftlichen Hemmnisse zu überwinden?
- Sind neue Geschäftsmodelle für die Ladeinfrastruktur nötig?

6.1 Überblick

Elektromobilität wird häufig mit neuen Geschäftsmodellen in Verbindung gebracht.³²⁹ Anlass hierfür sind u. a. unterschiedliche Kostenstrukturen von EVs und ICEs, die nötige Integration bisher unabhängiger Industrien oder aber technologische Unsicherheiten. Den Vorschlägen zu elektromobilen Geschäftsmodellen gemein ist das Bestreben, die bisher technischen Nachteile eines Elektrofahrzeugs durch eine Änderung des herkömmlichen Geschäftsmodells auszugleichen oder gar einen Mehrwert für den Kunden zu schaffen. Zudem kann die Elektromobilität zum Teil von anderen Nutzungskonzepten und sich verändernden Kundenanforderungen in Richtung eher bedarfsorientierter Lösungen profitieren.³³⁰ Um den Ansatz elektromobiler Geschäftsmodelle näher zu beleuchten, wird zunächst der Hintergrund der Geschäftsmodelle vorgestellt (siehe Abschnitt 6.2) und dieser auf die Mobilität übertragen (siehe Abschnitt 6.3). Anschließend werden mögliche elektromobile Geschäftsmodelle entlang des morphologischen Kastens strukturiert. Dabei wird auf den Bereich der Beladeinfrastruktur fokussiert und eventuelle Abhängigkeiten zum Fahrzeug/Batterie oder den Systemdienstleistungen überprüft (siehe Abschnitt 6.4). Abschließend werden die betrachteten Infrastruktur-Geschäftsmodelle

³²⁹ Vgl. u. a. Wallentowitz et al. (2010, S. 160 ff.), Winterhoff et al. (2009, S. 11), Arnold et al. (2010), Blank et al. (2008, S. 25), Canzler und Knie (2009).

³³⁰ Vgl. u. a. Winterhoff et al. (2009, S. 11).

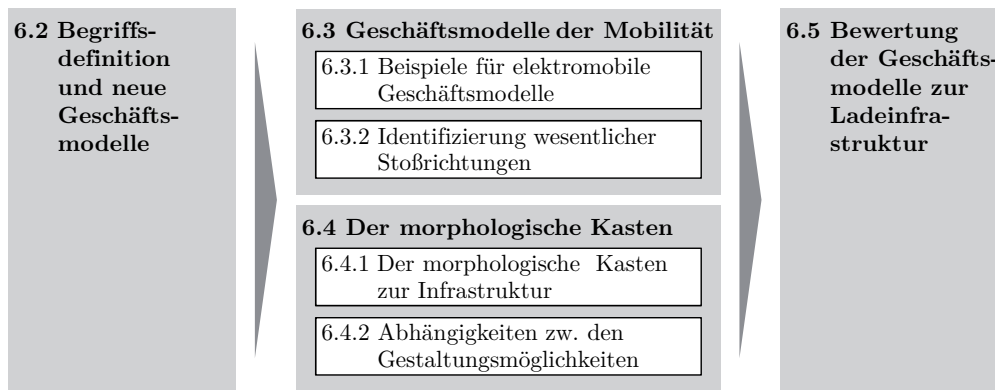


Abbildung 6.1 – Überblick über die Struktur der Geschäftsmodellbetrachtungen.

qualitativ auf Basis der vorherigen Betrachtungen eingeordnet (siehe Abschnitt 6.5). Eine Übersicht über die Struktur des vorliegenden Kapitels ist in Abbildung 6.1 dargestellt.³³¹

6.2 Begriffsdefinition und neue Geschäftsmodelle

Der Begriff des Geschäftsmodells, oder englisch „business model“, entstammt ursprünglich der Informationstechnologie und bezeichnet dort die Abbildung von Unternehmensprozessen, die bei Einführung datenverarbeitender Systeme dokumentiert werden. Mit der „New Economy“ Ende der 1990er-Jahre findet der Begriff eine zunehmend stärkere Nutzung³³² auch außerhalb der ursprünglichen Verwendung und wird fortan vielmehr genutzt, um die Wertschöpfung in den neu aufkommenden Internetgeschäften zu erklären.³³³ Der Begriff des Geschäftsmodells wird nun zunehmend stärker als Instrument verstanden, das hilft zu beschreiben, wie ein Unternehmen sein Geschäft ausführt. Beispielsweise gibt Afuah (2004) folgende Definition: „Ein Geschäftsmodell beschreibt die Gesamtheit der Aktivitäten, die ein Unternehmen durchführt, *wie* und *wann* sie diese durchführt und dabei ihre Ressourcen entsprechend den Gegebenheiten der Branche einsetzt, um einen höheren Kundennutzen zu schaffen, sowie sich dabei selbst in die Lage zu versetzen am geschaffenen Mehrwert zu partizipieren.“³³⁴ Übertragen aus der „New Economy“ zieht das Geschäftsmodell somit als „Analyseeinheit“ in andere Industrien ein und liefert damit einen neuen Ansatz zur Erklärung von Wertschaffung.³³⁵ Ein strukturierter Ansatz, welcher die obige Definition und eine methodische Vorgehensweise beinhaltet, untergliedert gemäß der Definitionen von Timmers (1998, S. 4) Geschäftsmodelle in drei Elemente³³⁶:

³³¹ Dieses Kapitel basiert zu Teilen auf der Ausarbeitung zu Geschäftsmodellen von Kley et al. (2011).

³³² Siehe Stähler (2001, S. 37).

³³³ Siehe z. B. Amit und Zott (2001).

³³⁴ Aus dem Englischen von Afuah (2004, S. 9): „A business model is the set of which activities a firm performs, how it performs them, and when it performs them as it uses its resources to perform activities, given its industry, to create superior customer value (low-cost or differentiated products) and put itself in a position to appropriate the value“.

³³⁵ Vgl. u. a. Bieger et al. (2002, S. 36) und Stähler (2001, S. 31 ff.).

³³⁶ Siehe auch Stähler (2001, S. 41 ff.) sowie Lehmann-Ortega und Schoettl (2005).

1. *Nutzenversprechen* – definiert den vom Hersteller im Voraus versprochenen Nutzen eines Angebots gegenüber dem Kunden,
2. *Wertschöpfungsarchitektur* – beschreibt die potenziellen Gestaltungsmöglichkeiten des Angebots hinsichtlich der verschiedenen Akteure, die an der Bereitstellung des Angebots beteiligt sind,
3. *Ertragsmodell* – legt die Art der Bezahlung des Kunden gegenüber den erbringenden Akteuren im Rahmen des Angebots fest.

Als neue und innovative Geschäftsmodelle werden die bisher weniger verbreiteten Konzepte bezeichnet, in denen neben der Sachleistung weitere Dienstleistungen angeboten werden und in den Vordergrund der Geschäftstätigkeit rücken.³³⁷ So werden z. B. auch in der Industrie seit einigen Jahren neue Geschäftsmodelle von Ausrüstern gegenüber ihren Kunden genutzt und umgesetzt.³³⁸ Diese neuen Geschäftsmodelle versuchen hierbei, das Produkt durch zusätzliche Dienstleistungen so zu konzipieren, dass ein erhöhter Nutzen für den Kunden und folglich ein Wettbewerbsvorteil für das Produkt des Anbieters entstehen.³³⁹ Tukker (2004) stellt drei verschiedene Haupttypen als Kombination aus Sach- und Dienstleistung heraus, welche auch in weiteren Klassifikationen der existierenden Literatur in gleicher oder ähnlicher Form Berücksichtigung finden.³⁴⁰ Diese Grundtypen liegen zwischen einem ausschließlich auf das Produkt ausgerichteten oder dienstleistungsorientierten Angebot. Letzteres unterteilt Tukker wiederum in nutzungsorientierte und ergebnisorientierte Geschäftsmodelle, wie Abbildung 6.2 darstellt. Bei dienstleistungsorientierten Geschäftsmodellen steht nicht mehr die Sachleistung, sondern die Dienstleistung im Vordergrund. So wird vielmehr eine gewisse Leistung zugesichert. In einem ersten Schritt gehen nutzungsorientierte Geschäftsmodelle über das verkaufte Produkt hinaus und garantieren als Leistung bspw. den reibungslosen Betrieb einer Maschine oder eine gewisse Qualität des auf diesen Maschinen produzierten Erzeugnisses. Ergebnisorientierte Geschäftsmodelle rücken den Dienstleistungsanteil noch weiter in den Vordergrund und so erhält der Kunde bspw. die Zusage, auf bereitzustellenden Maschinen zu der geforderten Menge, Qualität und Zeit produzieren zu können.

Wie Matzen et al. (2005) beschreiben, kommt neuen Geschäftsmodellen insbesondere dann eine zentrale Rolle zu, wenn diese geeignet sind, den Kundennutzen durch innovative Angebote zu erhöhen. Dies gilt umso mehr, wenn es gelingt, durch neue Wertschöpfungsarchitekturen Kosten für den Endkunden zu senken und durch geeignete Nutzenversprechen die Kundenakzeptanz zu erhöhen. Neue Geschäftsmodelle können jedoch auch technisch nicht funktionsfähige oder ökonomisch unattraktive Produkte nicht zum Markterfolg verhelfen.³⁴¹

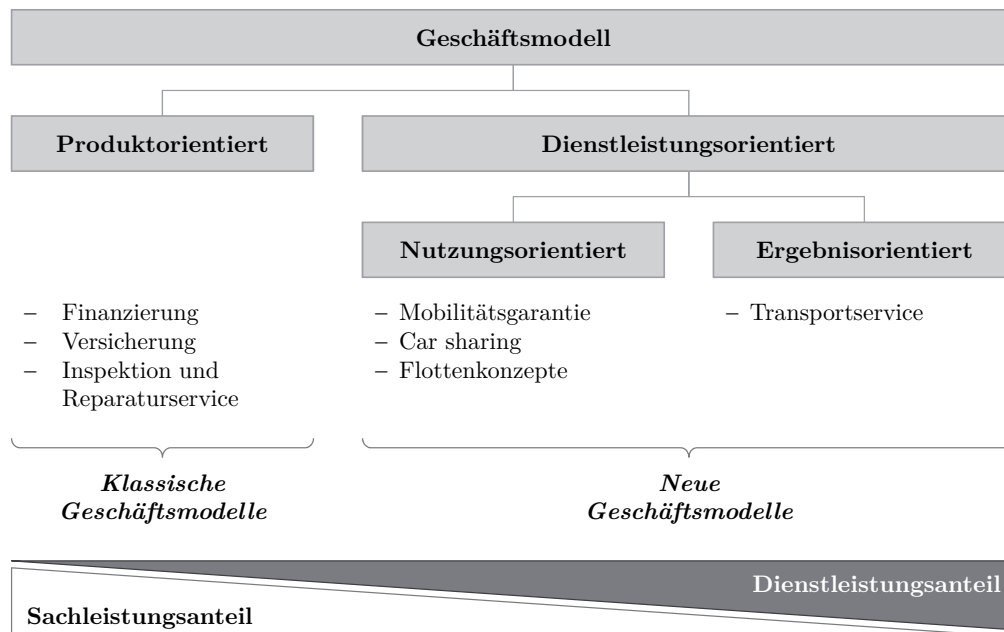
³³⁷ Siehe u. a. Baines et al. (2007), Williams (2005), Tukker (2004) sowie Spath und Demuß (2006).

³³⁸ Vgl. u. a. Wise und Baumgartner (1999) oder Fähnrich und Opitz (2006).

³³⁹ Siehe Matzen et al. (2005).

³⁴⁰ Vgl. etwa Sundin et al. (2008) oder Welp et al. (2008).

³⁴¹ Vgl. auch das Zitat von Lohbeck (2010): „Strahlt das Produkt nicht ganz so hell, dann braucht man ein Geschäftsmodell.“, das auf ironische Weise darstellt, dass ein Geschäftsmodell nur zu einem Teil helfen kann, technische Hemmnisse zu adressieren.



Anmerkung: Vgl. auch Kley et al. (2011, S. 3394).

Abbildung 6.2 – Übertragung der Typologie von Tukker (2004) auf Geschäftsmodelle für Mobilitätskonzepte.

6.3 Geschäftsmodelle der Mobilität

Im klassischen Geschäftsmodell gibt der Automobilhersteller gegenüber dem Kunden das *Nutzenversprechen* ab, ein hochwertiges Fahrzeug mit den jeweils vom Kunden gewünschten individuellen Eigenschaften zu liefern. In der *Wertschöpfungsarchitektur* der verbrennungsmotorbasierten Fahrzeuge produziert der Automobilhersteller das Fahrzeug inklusive Zulieferteilen und liefert dem Endkunden das Produkt aus. Dieser nutzt es über einen gewissen Zeitraum. Welcher Akteur Reparaturen oder Wartungen durchführt, wird vom Kunden selbst gewählt und ist meist nicht explizit festgelegt. Die Energiebereitstellung wird durch Tankstellen gewährleistet, die ebenfalls durch andere Akteure betrieben werden. Das *Ertragsmodell* ist bislang so ausgerichtet, dass der Kunde den Automobilhersteller für das Fahrzeug in Form des Verkaufspreises oder einer Leasing-Rate bezahlt. Reparaturen und Wartungen am Fahrzeug oder Tankvorgänge werden vom jeweiligen Betreiber einzeln und direkt abgerechnet. Das beschriebene klassische Geschäftsmodell ist in der Form aufgrund ökonomischer und technischer Herausforderungen (hohe Anschaffungsausgaben, limitierte Reichweiten, lange Beladung), Verschiebungen in der Wertschöpfungsarchitektur (Batteriehersteller und Stromversorger als neue Marktteilnehmer) und sich neu öffnenden Geschäftsfeldern und Ertragsmöglichkeiten (bspw. Nutzung der Batterie als stromnetzinterner Speicher, um Lastglättung vorzunehmen) nicht identisch auf die Elektromobilität übertragbar. Für die weitere Entwicklung und systematische Beschreibung von Geschäftsmodellen stellt sich somit die Frage, wie das klassische Geschäftsmodell angepasst werden kann.

Bezieht man Tukkers Typologie auf die Mobilität, sind für den Endnutzer zwei Extremfor-

men denkbar: (i) kann er das Produkt in Form eines Fahrzeugs kaufen oder (ii) eine Dienstleistung, z. B. in Form eines Taxiservices, in Anspruch nehmen. Zwischen diesen beiden Extremformen liegen jedoch zahlreiche Möglichkeiten, einem Endkunden „Mobilität“ anzubieten. Unter dem *produktorientierten Geschäftsmodell* kann man weitestgehend das klassische, zuvor beschriebene Geschäftsmodell verstehen. Das klassische Geschäftsmodell enthält gegenüber dem Kunden keine Leistungsgarantie nach der Produktauslieferung. Der Fokus des Herstellers liegt daher weiterhin auf dem Kernprodukt und Dienstleistungen werden nur unterstützend als verkaufsförderndes und kundenbindendes Instrument angesehen. Kennzeichnend bei dieser Kategorie ist, dass zusätzliche Dienstleistungen nicht in der Nutzungsphase des Fahrzeugs ansetzen. Typische Dienstleistungen bei produktorientierten Geschäftsmodellen sind z. B. Finanzierung, Versicherungsangebote sowie ein Inspektions- und Reparaturservice.

Dienstleistungsorientierte Geschäftsmodelle setzen im Gegensatz dazu erst in der Nutzungsphase des Fahrzeugs an.³⁴² Es steht hier nicht mehr das Fahrzeug als Kernprodukt im Mittelpunkt, sondern ein vertraglich zugesichertes Leistungsversprechen, welches auch nach der Auslieferungsphase zu erbringen ist. Für *nutzungsorientierte Geschäftsmodelle* bedeutet das, dass mit dem Erwerb eines Fahrzeugs bspw. eine Mobilitätsgarantie ausgesprochen wird. Aber auch Car-Sharing- oder Flottenkonzepte können die Bereitstellung von Fahrzeugen bzw. Mobilität garantieren, ohne dass der Kunde im Besitz eines Fahrzeugs sein muss. Unter *ergebnisorientierten Geschäftsmodellen* rückt die Mobilitätsanforderung des Endkunden, von Punkt A nach B gelangen zu wollen, in den Vordergrund. Der Kunde besitzt hier kein Fahrzeug, sondern erhält die Garantie, zu jedem gewünschten Zeitpunkt eine bestimmte Strecke zurücklegen zu können. Dies kann z. B. über einen Transportservice ermöglicht werden. Wer diese Leistung anbietet – externe Dienstleister oder Automobilhersteller –, hängt von der Ausgestaltung des Geschäftsmodells ab.

6.3.1 Beispiele für elektromobile Geschäftsmodelle

So stellt sich die Frage, welche Mobilitätskonzepte und Geschäftsmodelle dabei am besten die technologischen Vorteile von Elektrofahrzeugen in einen Kundenmehrwert umwandeln können. Ausgehend von heute existierenden Geschäftsmodellvorschlägen sind die wesentlichen Ansätze der Geschäftsmodelle zu identifizieren. Dabei existieren eine Vielzahl möglicher Geschäftsmodellvorschläge, die in Tabelle 6.1 aufgeführt sind. Die verschiedenen Vorschläge zu den Geschäftsmodellen können dabei hinsichtlich der betroffenen Bereiche (Fahrzeug/Batterie, Infrastruktur oder Systemdienstleistungen) unterschieden werden und konzentrieren sich dabei meist auf einen Schwerpunkt. Gemischte Modelle bringen mehrere dieser Bereiche zusammen. Erste Studien, wie z. B. von Walther et al. (2010), bewerten die verschiedenen Möglichkeiten bereits hinsichtlich der Marktrelevanz.

So werden aufgrund der hohen Anschaffungsausgaben für EVs, der technologischen Unsicherheiten oder der sich neu eröffnenden Möglichkeiten verschiedenste neue Konzepte angeboten, die von Finanzierung über Car-Sharing Angebote, Abrechnungsmodelle, Integration

³⁴² Siehe z. B. Markeset und Kumar (2005) sowie Spath und Demuß (2006).

Geschäftsmodellvorschlag	Betroffene Bereiche ^a			Bewertung ^b	Stoßrichtung ^c
	Fzg./ Bat.	Infra- struk.	System- dienstl.		
Fahrzeugzentrisch					
– Leasing des Fahrzeugs	◆			●	Finanzierung ^d
– Leasing der Batterie	◆			●	Batterierisiko ^d
– Car-Sharing ^e	◆			●	Auslastung ^f
– Multi-modale Mobilität, Integration mit anderen Verkehrsträgern	◆	◇		●	Auslastung ^f
– Fahrzeugdienste (Softwarediagnose, Fehlerspeicher,...)	◆			○	Zusatznutzen ^g
– Batterierecycling	◆			n/a	Zweitnutzung ^h
– Batterie-Zweitnutzung	◆		◇	n/a	Zweitnutzung ^h
Infrastrukturzentrisch					
– Abrechnung mit der privaten Stromrechnung		◆	◇	●	Einfachheit ^d
– Abrechnung mit der Parkgebühr		◆		●	Einfachheit ^d
– Hochleistungsladen		◆		●	Reichweite ^d
– Roamingmöglichkeit		◆		●	Akzeptanz ^d
– Applikation zum Auffinden und Reservieren von Ladesäulen		◇		●	Zusatznutzen ^g
– Induktive Ladung		◆		○	Bequemlichk. ^d
– Abrechnung mit Bezahlkarten		◆		○	Einfachheit ^d
– Werbung an der Ladesäule		◆		n/a	Zusatzumsatz ^g
– Werbung mit der Ladesäule z. B. bei McDonalds		◆		n/a	Zusatzumsatz ^g
Systemdienstleistungszentrisch					
– Integration mit erneuerbarem Strom		◇	◆	●	Nachhaltigkeit ^d
– Spitzen-/Schwachlasttarife		◇	◆	●	Ladekosten ^g
– Aggregator zum Stromhandel an den Regelenergiemärkten		◇	◆	○	Zusatzumsatz ^g
Gemischte Modelle					
– Auto-/Strom-Tarife bzw. Bündel mit Ladeinfrastruktur (Wall-Box)	◆	◆	◆	○	Einfachheit ^d
– Integration in Smart-Home-Systeme		◆	◆	○	Ladekosten ^g
– Smartphone: Stromverbrauch etc.	◇	◇	◇	○	Akzeptanz ^d
– Leasing und Batterietausch	◆	◆		○	Reichweite ^d
– Flotten-/städtischer Lieferverkehr ⁱ	◆	◆	◆	n/a	Auslastung ^d

^a Einteilung der Bereiche nach Kley et al. (2011). Unterschiedliche Kennzeichnung von ◆ stark und ◇ schwach betroffenen Bereichen.

^b Gemäß einer Expertenbefragung durch Walther et al. (2010) mit ○ niedriger und ● sehr guter Bewertung hinsichtlich der Marktrelevanz, nicht bewertete Geschäftsmodelle mit „n/a“ gekennzeichnet.

^c Wesentliche Zielsetzung aus Kundensicht.

^d Zusammengefasst als „Erhöhung der Akzeptanz“.

^e Vgl. Car2Go (2010) und Zipcar (2009).

^f Zusammengefasst als „Bessere Auslastung“.

^g Zusammengefasst als „Erweiterte Nutzerkonzepte“.

^h Zusammengefasst als „Zweitverwendung“.

ⁱ Vgl. z. B. Lieferverkehr FedEx (2010), Fideus (2009), Fildes et al. (2007) oder Norfleet (2009).

Tabelle 6.1 – Überblick verschiedener Vorschläge elektromobiler Geschäftsmodelle.

mit erneuerbaren Energien bis hin zu Anwendungen auf dem Handy reichen.

Hinsichtlich der Ladeinfrastruktur existieren vielfältige Vorschläge. Einige Industrieunternehmen haben bereits ein Konzept für ein Ladeinfrastruktursystem entwickelt. Unter diesen befinden sich hauptsächlich Energieversorger. Aber auch Automobilhersteller und neue Marktteilnehmer versuchen, sich als Ladeinfrastrukturbetreiber zu positionieren. Während manche eher auf die Entwicklung heimischer Ladeinfrastruktur setzen, verfolgen andere Marktteilnehmer weitergehende Möglichkeiten, wie die Kooperation mit Einkaufszentren (z. B. E-Leclerc/Renault-Nissan oder ECOtality/Best Buy), Parkhausbetreibern (z. B. RWE und Apcoa) oder mit Inhabern weiterer Flächen, auf denen regelmäßig Fahrzeuge geparkt werden.³⁴³ Für den öffentlichen Bereich entwickeln Anbieter wie Coulomb Technologies Kommunikations- und Authentifikationsprozesse, damit die an der Ladeinfrastruktur konsumierte Energie in Rechnung gestellt werden kann.³⁴⁴ Die Mehrheit der Anbieter fokussieren auf niedrige Anschlussleistungen; andere betrachten jedoch auch Hochleistungsladen, wie z. B. Aker Wade (2010), die 50 kW-DC-Ladestationen in Japan aufbauen, oder Siemens (2009, S. 46), die Hochleistungsladesäulen von bis zu 300 kW entwickeln. Die meisten Firmen planen kabelgebundene Ladeinfrastruktur, manche erwägen aber auch den Einsatz induktiver Ladeeinrichtungen, wie z. B. Nissan (2010), WiTricity (2009) oder Evatran (2010), oder sogar den Aufbau von Batterietauschstationen, wie Better Place (2009). Im Infrastrukturbereich werden des Weiteren Dienstleistungen zum Auffinden oder Reservieren von Ladesäulen vorgesehen. Darüber hinaus kann die Ladeinfrastruktur als Werbefläche genutzt werden oder mit dieser bspw. auf Kundenparkplätzen geworben werden.

6.3.2 Identifizierung wesentlicher Stoßrichtungen

Ausgehend von den bereits existierenden Vorschlägen elektromobiler Geschäftsmodelle lässt sich die wesentliche Stoßrichtung jedes Geschäftsmodells identifizieren und dahingehend gruppieren. Die Stoßrichtungen der einzelnen Geschäftsmodelle sind dabei in der letzten Spalte in Tabelle 6.1 dargestellt und lassen sich in vier Gruppen einteilen:

1. *Bessere Auslastung* – Neue, innovative Mobilitätskonzepte, wie z. B. Car-Sharing oder die Bereitstellung von Firmenflotten, nutzen die Erweiterung der Nutzerbasis bei niedrigeren Betriebskosten und verteilen die höheren Anschaffungsausgaben der Elektrofahrzeuge auf mehrere Köpfe. Ähnliches gilt auch für Elektromobile in Mehr-Fahrzeug-Haushalten. Durch den niedrigeren Verbrauch ist es sinnvoll, das Elektroauto stärker zu nutzen oder sogar als Hauptfahrzeug einzusetzen und ICEs für weitere und seltenere Fahrten heranzuziehen. Sind die Fahrzeuge alleine bereits hoch ausgelastet, kann für längere Fahrten nicht nur auf herkömmliche Antriebe zurückgegriffen, sondern auch ein integrierter Ansatz mit dem öffentlichen Verkehr aufgebaut werden.
2. *Erweiterte Nutzungskonzepte* – Es wird versucht, die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsys-

³⁴³ Vgl. Renault-Nissan (2010), ECOtality (2010) und RWE AG (2009).

³⁴⁴ Vgl. Coulomb Technologies (2011).

tems über neue Anwendungen zu verbessern. So können Batterien Energie zu Schwachlastzeiten günstig aufnehmen und zu Spitzenlastzeiten teuer abgeben. Systemdienstleistungen, wie Verlagerung oder Rückspeisung, reduzieren die Kosten und helfen dabei, gleichzeitig die Last zu glätten und die Netzqualität zu erhöhen.

3. *Zweitverwertung* – Eine weitere Möglichkeit ist, teure Komponenten, wie die Batterie, die für die Anwendung im Fahrzeug nicht mehr genutzt wird, einer Zweitverwertung zuzuführen und damit den Restwert der Batterie zu erhöhen. So können Batterien, die für den Einsatz im Fahrzeug nicht mehr den Anforderungen genügen, z. B. als stationäre Speicher genutzt werden und als solche helfen, die Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugs zu verbessern.³⁴⁵
4. *Erhöhung der Akzeptanz* – Hemmnisse können zum Teil für den Kunden reduziert werden, wie z. B. im Fall einer unsicheren Batterielebensdauer lässt sich das Risiko in einem Leasingangebot auf mehrere Vertragsnehmer verteilen. In diesen Bereich fallen auch kundenorientierte Infrastrukturlösungen, die den Kunden durch einen sinnvollen Mix mit einer günstigen und verlässlichen Infrastruktur versorgen.

Festzuhalten bleibt, dass diese Ansätze zwar helfen können, die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen zu fördern, jedoch wird zugleich die Komplexität der Konzepte deutlich. So müssen z. B. völlig neue Akteure involviert werden, die in der bisherigen verbrennungsmotorbasierten Wertschöpfungskette nicht integriert waren. Neben Automobil- und Batterieherstellern müssen Energieversorgungsunternehmen genauso wie z. B. neue Mobilitätsanbieter einbezogen werden. Folglich ergibt sich für die verschiedenen Anwendungsfälle eine Vielzahl potenzieller Geschäftsmodelle, bei denen die partizipierenden Akteure und Wertschöpfungsanteile neu definiert werden müssen. Zudem bestehen Unsicherheiten von Seiten der einzelnen Akteure, welche Geschäftsmodelle hinsichtlich eines vorteilhaften Gesamtkonzepts zielführend wirken und somit weiterverfolgt werden sollen.

Aufgrund der Komplexität sind die Geschäftsmodelle häufig mit Steuerungs- und Informationstechnologie zu hinterlegen, sodass für den Endkunden das Produkt oder die Dienstleistung im Vordergrund steht und kein zusätzlicher Aufwand anfällt. Neue, innovative Ansätze beinhalten daher einfache und informationstechnisch-unterstützte Prozesse, wie bspw. das Suchen und Reservieren von Ladeinfrastruktur oder die Steuerung des Ladeprozesses über ein Smartphone.

6.4 Der morphologische Kasten

Dennoch stellt sich für Unternehmen die Frage, welche Rahmenbedingungen existieren müssen, um die neuen Geschäftsmodelle anbieten zu können. Aufgrund der vorherrschenden Komplexität wird daher eine systematische Klassifikation für Geschäftsmodelle der Elektromobi-

³⁴⁵ Siehe u. a. Williams und Lipman (2010).

lität entwickelt, die es einerseits ermöglicht, geeignete Akteure im Rahmen eines Geschäftsmodells zu identifizieren und andererseits das angedachte Geschäftsmodell in seine Ausgestaltungsmöglichkeiten zu zerlegen.

Um die Vielzahl der verschiedenen Geschäftsmodellvorschläge zu vergleichen, lässt sich eine systematische Klassifikation auf Basis der Methode des morphologischen Kastens aufbauen.³⁴⁶ Diese Methode wurde z. B. bereits von Lay et al. (2009) genutzt, um Geschäftsmodelle in der Investitionsgüterindustrie zu systematisieren und zu vergleichen. Das Prinzip des morphologischen Kastens stellt eine kreative Methode dar, alle potenziellen Lösungen für bestehende Probleme strukturiert abzubilden, indem verschiedene Merkmale mit mehreren Merkmalsausprägungen hinsichtlich einer Problemstellung definiert werden, wie z. B. Zwicky und Wilson (1967) beschreiben. Diese potenziellen Lösungen lassen sich durch die logische Kombination und das Ausgrenzen technisch nicht möglicher oder unrentabler Merkmalsausprägungen auf einige konkrete Lösungen reduzieren. Dabei lassen sich die morphologischen Kästen für die vormals genannten Bereiche der Elektromobilität das Fahrzeug/Batterie, die Infrastruktur und die Systemdienstleistungen bestimmen. Im Folgenden wird auf die Ausprägung des Infrastruktur-Geschäftsmodells eingegangen.³⁴⁷

6.4.1 Der morphologische Kasten zur Infrastruktur

Die Beladeinfrastruktur ist zentraler Teil, da sie die beiden anderen Bereiche verbindet und die Fahrzeuge mit Strom versorgt. Hinsichtlich des Infrastruktursystems sind insgesamt neun Merkmale für die Geschäftsmodellausgestaltung von Bedeutung, die im morphologischen Kasten in Abbildung 6.3 dargestellt sind. Die ersten drei Merkmale (Art der Versorgungseinrichtung, Art der Zugänglichkeit, Anschlussleistung) werden bereits in Abschnitt 2.2 vorgestellt, die nächsten drei (Anschlussart, Informationsfluss, -verarbeitung) sind für die Einbindung ins Stromnetz wichtig, während die letzten drei Merkmale (Betreiber der Versorgungseinrichtung, Art der Abrechnung, Zählwerterfassung) insbesondere bei der Definition eines Geschäftsmodells zu beantworten sind.

Von den Einbindungsmöglichkeiten ins Stromnetz hängt die Nutzung potenzieller Geschäftsmodelle im Bereich der Systemdienstleistungen ab. So können unidirektionale Anschlüsse Strom nur in eine Richtung liefern, während bidirektionale Anschlüsse den Strom in beide Richtungen transportieren. Analog dazu ist die Kommunikationsanbindung zu betrachten, die u. a. für die Beladungssteuerung gebraucht wird. Ist kein Informationsfluss vorgesehen, wird ungesteuert geladen. Besteht nur eine unidirektionale Schnittstelle, so wird die Steuerung nur auf Basis von Netz- oder Fahrzeugdaten vorgenommen. Erst ein bidirektionaler Kommunikationskanal erlaubt, beide Komponenten in der Ladesteuerung zu integrieren. Die Informationsverarbeitung kann dahingehend in Tagesschritten („day-ahead“), in mehreren Intervallen pro Tag (sog. „intra-day“) oder auch mit einer Echtzeitanbindung („real-time“)

³⁴⁶ Vgl. zur Methodik der morphologischen Kästen auch Zwicky (1966).

³⁴⁷ Für die drei genannten Bereiche stellen Kley et al. (2011) die Ausgestaltungsmöglichkeiten in Form morphologischer Kästen dar.

Infrastruktur				
Merkmal	Gestaltungsmöglichkeit			
Art der Versorgungseinrichtung	Konduktiv (Kabelgebunden)	Induktiv (Kabellos)	Batteriewechsel	
Art der Zugänglichkeit	Privat	Halböffentlich (z. B. beim Arbeitgeber)	Öffentlich	
Anschlussleistung	1-phasig (Level 1)	3-phasig (Level 2)	Hochleistungswechselstrom (Level 3)	Hochleistungsgleichstrom (Level 3)
Anschlussart	Unidirektional		Bidirektional	
Informationsfluss	Keiner	Unidirektional	Bidirektional	
Informationsverarbeitung	Day-ahead	Intra-day	Real-time	
Betreiber der Beladeinfrastruktur	Privat	Staat	Energieversorgungs- unternehmen	Unabhängiger Anbieter
Art der Abrechnung	Keine	Fixed rate	Pay per use	
Zählwerterfassung	Keine	An der Ladestation	Im Fahrzeug	

Anforderung an techn. & organisatorische Änderungen

Anmerkung: Vgl. auch Kley et al. (2011, S. 3396).

Abbildung 6.3 – Morphologischer Kasten zur Beladeinfrastruktur.

erfolgen. Die Güte der Informationsverarbeitung kann damit einen Einfluss auf die Änderungsmöglichkeit des Ladeprofiles haben.

Als mögliche Betreiber von Beladeinfrastruktur kommen private Haushalte in Frage, ebenso wie halböffentliche Einrichtungen, Energieversorgungsunternehmen, sonstige unabhängige Anbieter oder der Staat. Der Betreiber übernimmt folglich die Verantwortung für Installation, Wartung und Reparatur der betrachteten Versorgungseinheit. Die Art der Abrechnung des Nutzers gegenüber dem Stromlieferanten bzw. dem Betreiber kann gebührenfrei („no fee“), über eine feste Rate („fixed rate“) oder nach Nutzung („pay per use“) erfolgen.

Die Kombination verschiedener Gestaltungsmöglichkeiten in einem Geschäftsmodell wird im dargestellten morphologischen Kasten als Profilzug bezeichnet. Dieser kann sich mit zunehmender Reife und fortgeschrittenem Ausbau der Infrastruktur zunehmend auf die rechte Seite verschieben. Allerdings ist ein höherer Reifegrad mit zusätzlichen Anschaffungsausgaben und einem höheren Ressourceneinsatz verbunden.

6.4.2 Abhängigkeiten zwischen den Gestaltungsmöglichkeiten

Neben dem erläuterten morphologischen Kasten zur Beladeinfrastruktur existieren ebenfalls verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten in den beiden anderen Bereichen: dem Fahrzeug/Batterie sowie den Systemdienstleistungen.³⁴⁸ Zur Darstellung aller Ausgestaltungsmöglichkeiten für die Beladeinfrastruktur sind sowohl die Zusammenhänge innerhalb des morphologischen Kastens als auch zwischen den drei Kästen zu betrachten. Das Konzept erlaubt so,

³⁴⁸ Wie in Kley et al. (2011) ausführlicher beschrieben.

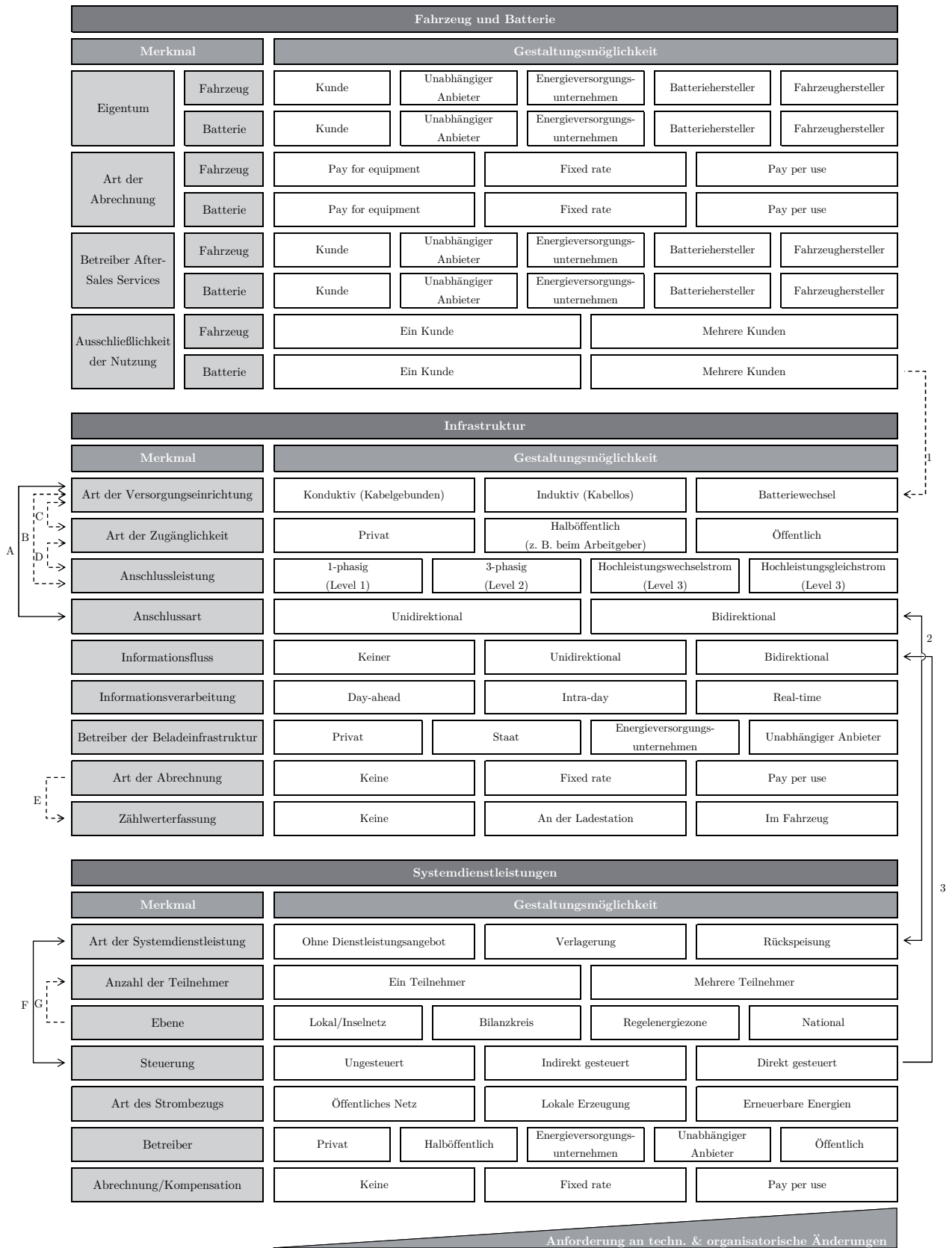
zunächst die abgeschlossenen Bereiche detaillierter zu analysieren und sie dann in einen größeren Kontext zu setzen. Dazu werden die drei morphologischen Kästen zusammen untersucht und die wechselseitigen Abhängigkeiten einzelner Merkmale markiert, siehe Abbildung 6.4. Die Zusammenhänge innerhalb der morphologischen Kästen sind dabei auf der linken Seite und die Abhängigkeiten zwischen den morphologischen Kästen auf der rechten Seite abgebildet. Dabei können die Abhängigkeiten entweder technischer (durchgezogene Linien, z. B. wenn eine Gestaltungsmöglichkeit eine bestimmte Hardware benötigt) oder organisatorischer Natur (gestrichelte Linien) sein. Zunächst werden die Zusammenhänge innerhalb des morphologischen Kastens betrachtet. Für die Ladeinfrastruktur existieren im Wesentlichen fünf innere Abhängigkeiten:

- A. Die Art der Versorgungseinrichtung (kabelgebunden, induktiv oder Batteriewechsel) beeinflusst die Anschlussart, wie z. B. dass eine induktive Ladung bidirektionale Anschlüsse verhindert,
- B. stellt aber auch unterschiedliche Anforderungen an die Höhe der Anschlussleistung. So brauchen Batteriewechsel z. B. keine Hochleistungsanschlüsse
- C. und verschiedene Arten der Versorgungseinrichtung sind nur an manchen Orten sinnvoll, bspw. wird der Batteriewechsel nicht im privaten Bereich angewendet werden.
- D. Des Weiteren hat die Art der Zugänglichkeit eine Auswirkung auf die dort benötigte Anschlussleistung. So werden niedrige Anschlussleistungen eher daheim und hohe eher im öffentlichen Raum installiert.
- E. Außerdem treiben die Abrechnungsanforderung, wo der Zähler und welcher -typ installiert sein muss.

Zwischen den morphologischen Kästen bestehen u. a. die folgenden Abhängigkeiten:

1. Die Ausschließlichkeit der Nutzung für Batterien treibt die Anforderungen, welche Infrastruktur aufgebaut werden muss. Sollten mehrere Kunden die Batterie nutzen wollen, muss diese auch getauscht werden können.
2. Die Art der Systemdienstleistung, die installiert werden soll, hat eine Auswirkung auf die benötigte Anschlussart; so muss bei Rückspeisung auch die Infrastruktur einen bidirektionalen Anschluss besitzen.
3. Außerdem hat die Steuerung eine Auswirkung, in welche Richtungen die Information fließen muss. Soll z. B. direkt gesteuert werden, muss ein Informationsaustausch in beide Richtungen ermöglicht werden.

Auf die morphologischen Kästen der Elektromobilität wirken aber auch Einflüsse von außen ein. Ergebnis können weitergefasste Geschäftsmodelle sein, die z. B. versuchen, inter-modale Mobilität mit Elektrofahrzeugen als ein mögliches Verkehrsmittel umzusetzen. Aber auch



Anmerkung: Vgl. auch Kley et al. (2011, S. 3401).

Abbildung 6.4 – Abhängigkeiten zwischen den morphologischen Kästen für Fahrzeug/Batterie, Infrastruktur und Systemdienstleistungen.

regulative Eingriffe können einen Effekt auf die Ausgestaltung von Geschäftsmodellen haben, so z. B. wenn eine bestimmte Zählwerterfassung gefordert wird, die aber aus technischer Sicht nicht nötig ist.

6.5 Bewertung der Geschäftsmodelle zur Ladeinfrastruktur

Die Entwicklung von Beladeinfrastruktur wird als eine der wichtigsten Forderungen verstanden, um Elektromobilität attraktiver zu machen.³⁴⁹ Inwieweit ein Geschäftsmodell beitragen kann, dieser Forderung nachzukommen, wird im Folgenden anhand der vorgestellten Modelle und der Analysen in dieser Arbeit kombiniert.³⁵⁰

Das Nutzerversprechen eines Infrastruktur-Geschäftsmodells kann in etwa folgende Komponenten umfassen: Ladeinfrastruktur sollte dort verfügbar sein, wo der Kunde sie benötigt, und Ladung mit der Ladeleistung zulassen, sodass eine geplante weitere Fahrt ermöglicht wird. Die Nutzung sollte zudem bequem, aber vor dem Hintergrund der hohen Gesamtkosten der Elektromobilität auch kostengünstig sein. Um die darauf geeignete Ladeinfrastruktur zu ermitteln, wurde in Kapitel 5 über die Auswertung des tatsächlichen Fahrverhaltens – der Fahrstrecken, aber auch der Standorte und -zeiten – ein besseres Verständnis der benötigten Ladeinfrastruktur entwickelt. Hier zeigt sich, dass kabelgebundene, private und normalleistungsbasierte Ladeinfrastruktur ausreicht, um die Mobilitätsbedarfe zu decken. Letztendlich auch deswegen, weil nicht kabelgebundene, nicht private und nicht normalleistungsbasierte Ladeinfrastruktur zu höheren Kosten führt und diese auf die Kunden abzuwälzen wären. Wie erste Erkenntnisse aus den Flottenversuchen zeigen, sind die Nutzer aber nicht bereit, diese Mehrkosten in Kauf zu nehmen.³⁵¹ Zwar wird im Wesentlichen die private Ladeinfrastruktur zur Ladung genutzt, zur Reduzierung der Reichweitenangst der Kunden kann jedoch der vereinzelte Aufbau öffentlicher Ladeinfrastruktur sinnvoll sein.

In den frühen Marktphasen spielen die Kosten jedoch beim Übergang auf elektromobile Konzepte eine erhebliche Rolle und auch mittelfristig sind die Gesamtkosten der Elektrofahrzeuge im Vergleich zu den ICEs so hoch, dass insbesondere nur kostengünstige Geschäftsmodelle erfolgreich sein werden. Zur weiteren Stärkung der Elektromobilität sind Maßnahmen zur Erhöhung der Kundenakzeptanz wünschenswert und daher ebenfalls in der Ausgestaltung des Geschäftsmodells zu berücksichtigen. Zur Möglichkeit weiterer Infrastruktur-Geschäftsmodelle werden die identifizierten Stoßrichtungen einzeln beleuchtet:

1. *Bessere Auslastung* – Grundsätzlich gilt, dass je mehr Ladeinfrastruktur existiert, desto schlechter ist die Auslastung jeder einzelnen Station und desto teurer wird das gesamte

³⁴⁹ Siehe hierzu Bundesregierung (2009) für den im Rahmen des „Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität“ in Deutschland geforderten Ausbau der Beladeinfrastruktur.

³⁵⁰ So fordert z. B. Nationale Plattform Elektromobilität (2011, S. 6): „Eine innovative Ladeinfrastruktur und Geschäftsmodelle werden entwickelt, um die kostendeckende Bereitstellung einer öffentlichen Infrastruktur langfristig sicherzustellen“.

³⁵¹ Siehe auch Dütschke et al. (2011).

Ladeinfrastruktursystem.³⁵² Daher ist insbesondere ein niedriges Verhältnis von Ladepunkten zu Elektrofahrzeugen sinnvoll. Ist dieses Verhältnis hoch, so ist Ladeinfrastruktur dementsprechend kapitalintensiv. Da auf Basis des heutigen Fahrverhaltens davon ausgegangen werden kann, dass im Wesentlichen zu Hause geladen wird, ist der Ausbau der halböffentlichen und öffentlichen Beladeinfrastruktur niedrig zu halten. In anderen Fahrzeugnutzungskonzepten (wie u. a. Car-Sharing oder Firmenflotten) lässt sich unter Umständen eine passendere Ladeinfrastruktur aufbauen, die jedoch vom jeweiligen Einzelfall abhängt.

2. *Erweiterte Nutzungskonzepte* – Mit neuen Nutzungskonzepten werden ggf. günstigere Ladekosten (Lastverlagerung) möglich oder sogar neue Einnahmequellen (Rückspeisung) erschlossen. Jedoch treiben solche Konzepte auch wesentlich die technischen Anforderungen an die Infrastruktur, wie z. B. Steuerlogik oder bidirektionale Anschlüsse, was wiederum zu höheren Infrastrukturkosten führt. Des Weiteren wird bei der Lastverlagerung die Ladung meistens in den Nachtstunden vorgenommen und bei der Rückspeisung sind lange Standzeiten nötig, damit die Energiebereitstellung auch entsprechend durch Marktmechanismen berücksichtigt werden kann. Lastverlagerung ist daher gut mit der privaten Ladeinfrastruktur vereinbar, an der sowieso über Nacht geparkt wird. Aufgrund der langen Standzeit ist Rückspeisung für den privaten und halböffentlichen Bereich interessant. Beide Varianten sind in der öffentlichen Ladeinfrastruktur schlechter realisierbar.
3. *Zweitverwertung* – Für die Zweitnutzung der Ladeinfrastruktur werden bisher keine Konzepte diskutiert. Jedoch ist eine Zweitnutzung der Batterie z. B. mit einem Batterietauschkonzept gut vereinbar, da hier die Batterie bereits vom Fahrzeug separiert werden kann. Aufgrund der in Abschnitt 2.2.1.3 dargestellten Argumente wird sich ein Batteriewechselsystem jedoch nur schwer im Massenmarkt durchsetzen lassen.
4. *Erhöhung der Akzeptanz* – Eine dichtere Ladeinfrastruktur kann, wie in Abschnitt 5.8.2 beschrieben, die Kundenakzeptanz für Elektromobilität erhöhen. Jedoch zeigt sich bereits in Pilotversuchen, dass diese bei existierender heimischer Infrastruktur schlecht angenommen wird. Für die öffentliche Infrastruktur gilt demnach, dass eine Installation im öffentlichen Raum die Reichweitenangst der Kunden herabsetzt, jedoch ein Kompromiss zwischen Kundenakzeptanz und Wirtschaftlichkeit zu treffen ist. Danach sind einerseits genug Säulen zur Herabsetzung der Reichweitenangst, andererseits hinreichend wenige, damit die Kosten begrenzt bleiben, zu installieren. Ähnlich dazu lässt sich über andere Instrumente nachdenken, die die Akzeptanz erhöhen, aber möglichst nicht die Gesamtkosten belasten. Dahingehend ist die Bandbreite an Instrumenten groß

³⁵² Becker und Ledwon (2010) sowie Jeß (2011) geben für Deutschland einen Faktor von 1,2 Ladepunkten zu Fahrzeugen an. Wobei davon ausgegangen wird, dass annähernd jeder Zugang zu häuslicher Ladeinfrastruktur hat (ca. 0,9) und zusätzlich relativ viel halböffentliche und öffentliche Ladeinfrastruktur (ca. 0,3) aufgebaut werden muss.

und reicht von Abholdiensten für Liegengebliebene, über das Bereitstellen oder Vorhalten von ICEs, wenn doch einmal längere Strecken gefahren werden müssen, bis zur eingehenden Beratung beim Kauf (siehe Abschnitt 5.8.3).

Daraus ergibt sich, dass ein attraktives Geschäftsmodell zur Beladeinfrastruktur auf insgesamt möglichst wenige Ladesäulen und mit Fokus auf den privaten Raum unter der nötigen Beimischung weniger halböffentlicher und öffentlicher Ladesäulen setzt. Hierbei stellt sich die Frage, wie ein solcher Infrastrukturmix, der insbesondere im Fall der öffentlichen Ladeinfrastruktur nicht auf hohe Auslastung, sondern auf Adressierung von Akzeptanzhürden aufgebaut wird, in ein Geschäftsmodell Eingang finden und schlussendlich auch abgerechnet werden kann. Aufgrund der niedrigen Auslastung werden diese öffentlichen Säulen daher nicht in der Lage sein, sich über den an der Säule vertriebenen Strom zu amortisieren. Zudem wird die öffentliche Ladeinfrastruktur aufgrund der niedrigen Auslastung in einem Pay-per-use-Tarif teurer. Wiederer und Philip (2010) argumentieren daher, dass ein monatlicher Beitrag („fixed rate“) besser funktioniert als ein Pay-per-use-Tarif und damit hilft, öffentliche Ladeinfrastruktur zu finanzieren und diese auszulasten.³⁵³ Sie berechnen in ihrer Studie eine notwendige Jahresgebühr zwischen 7–140 €, abhängig vom gewählten Ladeinfrastrukturtyp und Anteil der öffentlichen Ladungen.³⁵⁴ Diese Gebühr kann insbesondere in den ersten Jahren für Nutzer mit Reichweitenangst attraktiv sein. Nach einer Weile werden diese Nutzer jedoch feststellen, dass sie den Zugang zu öffentlicher Ladeinfrastruktur eigentlich nicht benötigen und folglich versuchen, die zusätzlichen Kosten zu vermeiden. Das bedeutet für die Entwickler und Betreiber öffentlicher Ladeinfrastruktur, dass diese nicht genutzt bzw. ausgelastet wird und damit nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Aus diesem Grund wird die Forderung nach einer öffentlichen Finanzierung der Ladeinfrastruktur laut. Jedoch erfüllt die Ladeinfrastruktur, wie bereits in Kapitel 2 gezeigt, die Kriterien zur staatlichen Finanzierung (hohe Entwicklungskosten, lange Lebensdauer) nicht. In abgeschlossenen Initiativen und zur regionalen Förderung, wie der Stärkung des Tourismus in einer Region, kann Infrastruktur aufgebaut werden, verfolgt damit jedoch eine andere Zielsetzung. Weitere Konzepte, wie z. B. die Ladesäulen zusätzlich als Werbeflächen zu nutzen, können eventuell helfen, die Wirtschaftlichkeit öffentlicher Infrastruktur zu verbessern.

Weitere Studien zeigen, dass einfache Konzepte wichtig sind, die der Kunde ohne technisches Expertenwissen verstehen kann. Dies ist vor allem für die Konfiguration von Lastverlagerung oder Rückspeisung zu beachten.³⁵⁵ Daher werden sich in der Marktanzugsphase insbesondere Geschäftsmodelle durchsetzen, die einem stark linksorientierten Profilverhalten im

³⁵³ Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass „fixed rate“-Tarife so ausgestaltet werden müssen, dass diese nicht zur Energieverschwendung führen und damit nicht im Widerspruch zu Energieeffizienzmaßnahmen und der Energieeinsparverordnung stehen.

³⁵⁴ Für die Jahresgebühr geben Wiederer und Philip (2010) 10–200 US\$ an.

³⁵⁵ Siehe hierzu z. B. Peters und Dütschke (2010) oder auch eine Umfrage von Walther et al. (2010, S. 37 ff.), die einfache Geschäftsmodelle wie die „Abrechnung mit der Stromrechnung“ oder „Grünstromangebote“ von den Kunden als besonders attraktiv bewertet werden. Komplexere Angebote, wie „Abrechnung über Bezahlkarten“ oder „Batterieleasing verbunden mit Batteriewechselstationen“, werden hingegen als kompliziert und nicht so attraktiv eingestuft.

morphologischen Kästen folgen. D. h. ein kabelgebundener, privater Level-1-Anschluss, der keine weitere Funktionalität in Hinsicht auf Rückspeisung, Informationsaustausch und Messung besitzt, und im Regelfall privat aufzubauen ist.

Zusammenfassung

- Ein Geschäftsmodell beschreibt die Aktivitäten eines Unternehmens sowie das Nutzenversprechen, die Wertschöpfungsarchitektur und das Ertragsmodell zur Erbringung eines Produkts oder einer Dienstleistung. Neue, innovative Geschäftsmodelle rücken neben der Sachleistung ergänzende Dienstleistungen in den Vordergrund. Dabei helfen morphologische Kästen, die einzelnen Ausgestaltungsmöglichkeiten zu strukturieren.
- Durch ihre Gestaltung können Geschäftsmodelle insb. eine bessere Auslastung, eine erweiterte Nutzung, eine Zweitverwertung ermöglichen oder die Akzeptanz des Produkts erhöhen.
- Auch wenn private, normalleistungsbasierte Ladeinfrastruktur ausreicht, kann ein Geschäftsmodell unter Hinzunahme einzelner halböffentlicher/öffentlicher Lademöglichkeiten mit einfacher Abrechnung sowie unterstützenden Systemen die Akzeptanz erhöhen.

Kapitel 7

Schlussfolgerungen, kritische Würdigung und Ausblick

7.1 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, eine aus Nutzersicht sinnvolle Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung verschiedener Fahrzeugkonzepte und Batteriegrößen zu identifizieren. Dazu wurden zunächst die existierenden Ladeinfrastrukturoptionen dargestellt sowie technisch und wirtschaftlich bewertet. So stehen dem Nutzer im Wesentlichen kabelgebundene Ladeinfrastrukturen zur Verfügung. Kabellose Ladetechnologien oder der Batteriewechsel sind technisch aufwendig und zudem wirtschaftlich unattraktiv. Ladeinfrastruktur kann dabei an verschiedenen Standorten aufgebaut werden, die sich in drei Bereiche der Zugänglichkeit – private, halböffentliche und öffentliche Ladeinfrastruktur – einteilen lassen. Des Weiteren kann die Ladeinfrastruktur anhand der Anschlussleistung differenziert werden, die die benötigte Ladezeit bestimmt. Basierend auf den benötigten Komponenten und existierenden Studien wurden die Kosten der verschiedenen Ladeinfrastrukturen ermittelt. Über ein Warteschlangenmodell konnten die zu erwartende Auslastung der Ladeinfrastruktur ermittelt und die entstehenden Kosten somit auf einzelne Fahrzeuge bzw. den konsumierten Strom umgelegt werden. Dabei ist die private Ladeinfrastruktur am günstigsten, gefolgt von der halböffentlichen und öffentlichen Infrastruktur.

Um die Ladeinfrastruktur hinsichtlich des Nutzerverhaltens zu untersuchen, wurde das Verkehrs- und Nutzerverhalten auf Basis mehrtägiger Wegetagebücher mit Angaben zu Streckenlängen und Zeiten berücksichtigt. Zudem wurden die technischen und ökonomischen Parameter für verschiedene Fahrzeuggrößen und -konzepte bestimmt. So können neben voll-elektrischen Fahrzeugen auch Plug-in-Hybride eingesetzt werden, die wegen ihres zusätzlichen Verbrennungsmotors nicht auf flächendeckende, öffentliche Ladeinfrastruktur angewiesen sind. Die aufgrund von Energie- und Leistungsanforderungen benötigte Lithium-Ionen-Batterie wurde hinsichtlich der Kostenentwicklung und Alterungseinflüsse näher betrachtet. Zudem konnten die Systemdienstleistungen und die Vorkonditionierung als wesentliche Treiber von Ladeinfrastruktur ausgeschlossen werden, sodass diese nicht weiter Eingang in die Betrachtung finden.

Die Nutzung der Ladeinfrastruktur wurde auf Basis des Nutzerverhaltens simuliert. Da-

zu wurden die mehrtägigen Wegetagebücher auf Fahrzeugebene aggregiert und in Fahr- und Standprofile überführt. Der Standort kann dabei aus dem Zielort des letzten Wegs ermittelt und nach den verschiedenen Standorten für Ladeinfrastruktur klassiert werden. Die dort verfügbare Ladeinfrastruktur wird über verschiedene Szenarien gesetzt. Ausgehend von voll-elektrischen Fahrzeugen kann das Ladeprofil abhängig von der Anschlussleistung und dem Fahrverhalten mittels dynamischer Programmierung optimiert werden. Das erhaltene kostenoptimale Ladeprofil lässt somit eine Aussage über die aus Nutzersicht attraktive Ladeinfrastruktur zu. Erweiterungen der dynamischen Programmierung berücksichtigen zudem Batteriealterungseinflüsse, Schnellladungen während der Fahrt und die mögliche Nutzung eines Verbrennungsmotors bei Plug-in-Hybriden. Zusammen mit den Anschaffungsausgaben und den Wartungskosten kann das kostenminimierte Ladeprofil in Gesamtkosten überführt werden, wodurch der Vergleich verschiedener Fahrzeugkonzepte möglich wird.

Dieses Modell erlaubt ausgehend vom Fahrverhalten, das Potenzial sowohl der einzelnen Fahrzeugkonzepte als auch der dafür benötigten Ladeinfrastruktur zu bestimmen. Über verschiedene Parameter können weitere Fragestellungen, wie optimale Batteriegrößen oder Kostenänderungen der verschiedenen Einflussfaktoren, überprüft werden. Betrachtet man ausschließlich vollelektrische Fahrzeuge, so kann auf Basis der Fahrprofile ein Anteil von etwa 60 % der heutigen Pkw als Elektrofahrzeug betrieben werden. Dabei ist aber vielmehr die Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur in den jeweiligen Standorten von Bedeutung, als die Einrichtung hoher Anschlussleistungen und damit Schnellladung. Wirtschaftlich attraktiv werden vollelektrische Fahrzeuge jedoch erst mit hohen Fahrleistungen und niedrigeren Batteriekosten. Bei geringer Marktdurchdringung ist eine private Ladeinfrastruktur aus technischer und wirtschaftlicher Sicht ausreichend. Mit sinkenden Batteriekosten kann ein zusätzlicher dichter Infrastrukturausbau den wirtschaftlich attraktiven Marktanteil nochmals erweitern, bleibt jedoch auf etwa 45 % der Pkw beschränkt. Im Vergleich dazu sind Plug-in-Hybride ein idealer Marktbereiter, da sie sich bei höheren Batteriekosten besser gegenüber vollelektrischen Fahrzeugen durchsetzen können und zudem aufgrund des mitgeführten Verbrennungsmotors keine Beschränkung in der Reichweite und den Beladezeiten aufweisen. Zudem kann bei Plug-in-Hybriden die Batterie unterschiedlich dimensioniert werden. Ist bei vollelektrischen Fahrzeugen aufgrund der Reichweitenanforderung eine Anpassung der Batteriegröße kaum relevant, kann bei hohen Batteriekosten die Batterie in Plug-in-Hybriden zunächst kleiner geplant werden und ist mit sinkenden Batteriekosten auf das Fahrverhalten und die verfügbare Infrastruktur auszulegen. Die Zyklenalterung der Batterie kann generell eher vernachlässigt werden; bei kleineren Batterien ist gerade aufgrund der regelmäßigen Nutzung des gesamten Batteriebereichs mit einer schnelleren Alterung zu rechnen, die jedoch insbesondere bei Plug-in-Hybriden gegen Ende der Lebensdauer über einen höheren verbrennungsmotorbasierten Anteil aufgefangen werden kann. Die Marktdurchdringung von hybriden oder vollelektrischen Fahrzeugen ist abhängig von der Entwicklung der Technologie oder den Mobilitätsanforderungen. Wie die Untersuchung zeigt, ist die Entwicklung des Fahrverhaltens der letzten Jahre sehr stabil geblieben, wodurch sich die Annahme, dass das Fahrverhalten auch für zukünftige Peri-

oden hergezogen werden kann, als valide bestätigt. Des Weiteren sind die Ergebnisse sensitiv gegenüber Parameterveränderungen, dabei bevorzugen steigende Treibstoffkosten, niedrigere Stromkosten oder ein geringerer Verbrauch Plug-in-Hybride, während kürzere Lebensdauern und höhere Zinssätze eher herkömmliche Verbrennungsmotorfahrzeuge favorisieren. Vollelektrische Fahrzeuge können gegenüber Plug-in-Hybriden in geringerem Ausmaß von der Parameterveränderung profitieren. Weitere Einflussfaktoren können das Steuersystem oder regulative Eingriffe sein. Dabei profitieren Elektrofahrzeuge bereits vom heutigen Steuersystem. Die aktuellen Mehrkosten werden jedoch nur in Dänemark und Norwegen kompensiert. Darüber hinaus sind die Zahlungsbereitschaften für alternative Antriebe, komfortablere Ladestationen oder „grüne Energie“ relativ klein und auf Gesamtkostenbasis können Plug-in-Hybride stärker von diesen profitieren.

Die häufig erwähnten neuen Geschäftsmodelle im Bereich der Mobilität können im Einzelfall helfen, die unterschiedlichen Kostenstrukturen verbrennungsmotorbasierter und elektrischer Fahrzeuge sowie technologische Unsicherheiten auszugleichen oder unterschiedliche Industrien zusammenzuführen. Dabei setzen die neuen Geschäftsmodelle vor allem an einer besseren Auslastung, einer erweiterten Nutzung, Zweitverwendungsmöglichkeiten oder der Akzeptanz des Produkts an. Überträgt man diese Stoßrichtungen auf die Ladeinfrastruktur, so werden zwar private Infrastrukturen niedriger Anschlussleistungen dominieren, jedoch können vereinzelte öffentliche Ladesäulen mit einfachen Abrechnungssystemen und informationstechnisch-unterstützenden Applikationen die Akzeptanz für die Ladung und Elektromobilität im Ganzen erhöhen.

Zusammenfassend konnte durch die vorliegende Arbeit eine systematische Bewertungsmethodik angewandt werden, auf Basis dessen sich eine geeignete Ladeinfrastruktur und attraktive Fahrzeugkonzepte ableiten lassen:

- Systematische Bewertungsmethodik
 - Bestimmung eines optimalen Ladeprofils unter Berücksichtigung möglicher Ladeinfrastrukturen, verschiedener Fahrzeugkonzepte und der Batteriealterung.
 - Ladeinfrastrukturnutzung ist somit zentraler Bestandteil, bezieht alle anfallenden Kosten ein und erlaubt eine ganzheitliche und systemische Bewertung der Elektromobilität.
 - Die Nutzung realer Fahrprofile lässt sich dabei sowohl für systemische Betrachtungen als auch für die individuelle Entscheidungsunterstützung heranziehen.
 - Die für die Infrastruktur anfallenden Kosten konnten über ein Warteschlangenmodell auf Fahrzeuge und die konsumierte Strommengen zugeordnet werden.

- Geeignete Ladeinfrastruktur
 - Basierend auf dem Fahrverhalten der Nutzer, ist Ladeinfrastruktur – sofern nicht bereits vorhanden – vor allem im privaten Bereich aufzubauen und kann mit zunehmender Marktdurchdringung der Fahrzeuge erfolgen.

- Dabei werden sich kabelgebundene Systeme niedriger Anschlussleistung aufgrund der geringen technischen Komplexität und niedriger Kosten am ehesten durchsetzen. Kabellose Ladetechnologien oder der Batteriewechsel sind technisch aufwendig und zudem wirtschaftlich unattraktiv.
 - Für vollelektrische Fahrzeuge kann mittelfristig eine darüber hinaus verfügbare halböffentliche/öffentliche Ladeinfrastruktur den Marktanteil weiter erhöhen. Hohe Anschlussleistungen sind aufgrund der längeren Standzeiten nicht nötig. Kurze Zwischenladungen zur Reichweitenverlängerung sind technisch nur schwer und über Alternativkonzepte wie „Range Extender“ günstiger zu realisieren.
 - Der Zugriff auf Ladeinfrastruktur, die Ladesteuerung oder die Auswahl eines Fahrzeugkonzepts können darüber hinaus über informationstechnische Anwendungen unterstützt werden.
- Attraktive Fahrzeugkonzepte
- Auf Basis des Fahrverhaltens lässt sich ein hoher Anteil der Pkw auf ein vollelektrisches Fahrzeug umstellen, davon können zunächst aber nur wenige wirtschaftlich betrieben werden. Mit sinkenden Batteriekosten erhöht sich das wirtschaftliche Potenzial, dieses bleibt jedoch beschränkt.
 - Alternativ zur dichteren Ladeinfrastruktur ist der Einsatz von Plug-in-Hybridfahrzeugen attraktiv, die mit ihrem zusätzlichen Verbrennungsmotor längere Reichweiten ermöglichen, jedoch mit kleineren Batterien ausgestattet werden können und somit kostengünstiger sind.
 - Darüber hinaus ermöglichen Plug-in-Hybride einen hohen elektrischen Fahranteil und helfen somit das Potenzial der Elektromobilität größtenteils bereits zu nutzen. Allerdings sind Plug-in-Hybride aufwendiger in der Antriebsarchitektur.
 - Das kostenminimale Fahrzeugkonzept hängt von vielen Faktoren wie Treibstoff- und Stromkosten ab und wird bereits heute durch unterschiedliche Steuer- und Fördersysteme bestimmt, die es weiterhin genau zu betrachten gilt.

Staatliche Förderung der Ladeinfrastruktur sollte daher nicht auf dem Ausbau der Infrastruktur liegen, sondern vielmehr darauf abzielen, Anschlüsse, Kabel und Verbindungsprotokoll zu standardisieren, sodass die aufgebaute Infrastruktur auch vielseitig zu nutzen ist. Zudem können die Mehrkosten des elektrischen Fahrzeugkonzepts durch staatliche Förderungen oder Steuerreduzierungen verringert werden. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass jene Fahrzeuge unterstützt werden, die viel fahren und somit aus Emissionssicht eine Umstellung lohnen. Darüber hinaus können im Einzelfall Elektrofahrzeuge und Ladeinfrastruktur in einer Region gefördert werden, hier steht jedoch ein anderer Treiber, wie bspw. die Tourismusförderung, im Vordergrund.

7.2 Kritische Würdigung und Ausblick

Das entwickelte Modell erlaubt die Simulation des heutigen Fahrverhaltens und bestimmt für jedes dieser Fahrzeuge ein optimales Ladeprofil. Davon ausgehend sind verschiedene Interpretationen von einer attraktiven Ladeinfrastruktur über ein kostengünstiges Fahrzeugkonzept oder die nicht betrachteten Auswirkungen, wie der resultierenden Ladelast, möglich. Das Modell lässt sich jedoch nicht nur mit aufgezeichneten Wegetagebüchern verwenden, sondern kann auch mit realen Fahrprofilen gespeist werden, um das aus Nutzersicht attraktivste Fahrzeugkonzept und eine bedarfsgerechte Ladeinfrastruktur zu bestimmen. GPS-Aufzeichnungsgeräte und die dahingehende Auswertung des aufgezeichneten Fahrverhaltens können damit als Entscheidungsunterstützung im Kaufprozess eingesetzt werden.

Bei der Wahl der geeigneten Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur wird das aufgezeichnete Fahrverhalten auf zukünftige Mobilitätsanforderungen übertragen, welches sich jedoch in zwei Dimensionen ändern kann. Erstens wird durch die Nutzung der Wegetagebücher eine perfekte Vorausschau der zukünftigen Mobilität angenommen, die jedoch davon abweichen kann, indem andere Strecken und unterschiedliche Wegeketten zurückgelegt werden. Zweitens kann sich der Mobilitätsbedarf im Zeitverlauf ändern. Hinsichtlich dieser beiden Dimensionen ist das Fahrverhalten zu überprüfen. Für das verwendete Mobilitätspanel wurden die beiden Dimensionen durch die mehrtägigen, jährlichen Aufzeichnungen teilweise adressiert. Für eine Übertragung auf Einzelpersonen ist jedoch das Fahrverhalten nochmals zu überprüfen.

Des Weiteren basiert das Modell im Wesentlichen auf der zugrunde gelegten Optimierung des Ladeprofils, die zur Bestimmung eines kostenminimierenden Fahrzeugkonzepts und Ladeinfrastruktursystems verwendet wurden. Betrachtet man Kaufentscheidungen in der Realität, ist der unterstellte „Homo oeconomicus“ nur selten auszumachen. Vielmehr sind Wertevorstellungen sowie eine unvollständige Informationslage einzubeziehen. Vor dem Hintergrund einer nicht verfügbaren empirischen Datenbasis zur Kaufentscheidung von Elektrofahrzeugen ist jedoch die reine Kostensicht zu rechtfertigen. Insbesondere erlaubt die Kostenbetrachtung in der frühen Marktphase, die einzelnen Nutzerbedarfe zu aggregieren und somit ein kostenoptimales Infrastruktursystem zu bestimmen.

Erweiterungen der vorliegenden Arbeit sind im Wesentlichen in drei Dimensionen denkbar: hinsichtlich der Fahrprofildaten, des Modells und der durchgeführten Analysen. Das Fahrverhalten wurde über die berichteten Wege im Mobilitätspanel durchgeführt. Darüber hinaus könnten seltenere Ereignisse durch Zufallsvariablen einfließen oder durch eine längere Berichtsperiode berücksichtigt werden. Zudem kann die Wegeerfassung über GPS-Aufzeichnungsgeräte verbessert werden und erlaubt so die Betrachtung längerer Zeiträume, ohne dass Berichtsmüdigkeit auftritt.

Das entwickelte Optimierungsmodell konzentriert sich auf die wesentlichen Einflussfaktoren und zum Teil wurden vereinfachte Zusammenhänge, wie im Fall der Batteriealterung, modelliert. Mit der Detaillierung der Fahrprofildaten ließen sich diese genauer abbilden und bspw. Temperatureinflüsse mit in die Batteriealterung aufnehmen. Des Weiteren wären die vereinfachten Annahmen zur Entwicklung der Technologiekosten durch eine Betrachtung der

Entwicklungspotenziale, der Mengen und zu erreichenden Potenziale in Technologiekostenkurven zu überführen und würden somit eine zeitlich detailliertere Marktentwicklung ermöglichen. Zudem könnten die Annahmen für Plug-in-Hybride dahingehend erweitert werden, dass verschiedene Antriebsarchitekturen und -dimensionierungen berücksichtigt werden können. Des Weiteren wurden der Einfachheit halber weder der Strom- noch der Regelenergiemarkt betrachtet. Eine Abbildung dieser beiden Märkte im Modell ist aber vor allem vor dem Hintergrund eines sich eventuell künftig im Tages-, Wochen- und Jahresverlauf verändernden Strompreises sinnvoll, um so die Auswirkungen auf die Netzlast genauer zu modellieren.

Eine Anbindung der Energiemärkte ließe vor allem die Auswirkungen eines realen, variablen Stromtarifs beobachten. Auswertungen zur Netzlast sind zum Teil bereits in der jetzigen Form des Modells möglich: So können die Optimierung des Ladeprofils unter einer zeitlichen Veränderung des Strompreises erfolgen und dahingehend die Auswirkungen auf die Netzlast ausgewertet werden. Zudem erlaubt das vorgestellte Modell eine Einzelbetrachtung der Fahrprofile. Jedoch wurde aufgrund der nicht bekannten exakten Standorte und Wege die Auswertung nicht auf Regionen heruntergebrochen. Auf Basis eines detaillierteren Datensatzes kann diese Analyse aber in eine topografische Optimierung überführt werden, wodurch es möglich wird, nicht nur regional attraktive Ladeinfrastrukturen, sondern auch die aus dem optimierten Ladeverhalten resultierende Netzlast abzuleiten. Des Weiteren sollte die Untersuchung bei sich verändernden Marktbedingungen wie auch technischen Weiterentwicklungen auf die Veränderung der Ergebnisse hin überprüft werden.

Anhang A

Annahmen und ergänzendes Material

Inhalt

A.1 Technische und ökonomische Fahrzeugparameter	187
A.1.1 Referenzfahrzeug	188
A.1.2 Stadtfahrzeug	189
A.2 Batteriezustand nach Ladung und Entladung	190
A.2.1 Zustandsveränderung nach „Cycle Counting“	190
A.2.2 Beispiel eines Batterieprofils	190

A.1 Technische und ökonomische Fahrzeugparameter

A.1.1 Referenzfahrzeug

Variable	Heutige Werte				Zukünftige Werte				
	Brutto		Netto ^a		Brutto		Netto ^a		
	ICE	PHEV	EV	ICE	PHEV	EV	ICE	PHEV	EV
P_{ICE} [kW]	77	41		77	41		77	41	
P_{PEM} [kW]		68	75		68	75		68	75
κ [kWh]		14	30		14	30		14	30
u^E [kWh/km]		0,18			0,18			0,18	
η^{ch} [%]		84 %			84 %			84 %	
u^F [l/km]	0,06			0,06			0,06		
M [km]	200.000								
T^V [a]	12								
T^B [a]	12								12
I^V [€]	16.825								14.021
I^{Ta} [€]	125								104
I^{St} [€]	300								250
I^{ICE} [€/kW]	30								25
I^{EM} [€/kW]	27								23 ^b
I^{Hy} [€]	1500								900 ^b
I^B [€/kWh]	600								200 ^b
c^{OM} [€/a]	300								250
c^E [€/kWh]	0,20								0,20
c^F [€/l]	1,40								0,52 ^d

^a Sofern nicht anders ausgewiesen ist der Nettowert abzüglich des durchschnittlichen Umsatzsteuersatzes von 20 % in Europa zu bestimmen.

^b Kostenreduktionen aufgrund von Lernkurveneffekten, bei den anderen Komponenten wird vereinfachend darauf verzichtet.

^c Abzüglich der Stromsteuer und EEG Umlage.

^d Abzüglich der Treibstoffsteuern.

Anmerkung: Wenn nicht anders angegeben, beruhen die Werte auf Tabelle 3.4.

Tabelle A.1 – Technische und ökonomische Fahrzeugparameter des Referenzfahrzeugs für verschiedene Zeitpunkte mit und ohne Besteuerung.

A.1.2 Stadtfahrzeug

Variable		Heutige Werte				Zukünftige Werte			
		Brutto		Netto ^a		Brutto		Netto ^a	
		ICE	EV	ICE	EV	ICE	EV	ICE	EV
P^{ICE}	[kW]	45 ^b		45 ^b		45 ^b		45 ^b	
P^{EM}	[kW]		43 ^c		43 ^c		43 ^c		43 ^c
κ	[kWh]		16 ^d		16 ^d		16 ^d		16 ^d
u^E	[kWh/km]		0,12 ^e		0,12 ^e		0,12 ^e		0,12 ^e
η^{ch}	[%]		84 %		84 %		84 %		84 %
u^F	[l/km]	0,044 ^f		0,044 ^f		0,044 ^f		0,044 ^f	
M	[km]	200.000							
T^V	[a]	12							
T^B	[a]		12		12		12		12
I^V	[€]	8.225 ^g		6.852		8.225 ^g		6.852	
I^{Ta}	[€]	125		104		125		104	
I^{St}	[€]	300		250		300		250	
I^{ICE}	[€/kW]	30		25		30		25	
I^{EM}	[€/kW]		27		23		23 ^h		19
I^B	[€/kWh]		600		500		200 ^h		166
c^{OM}	[€/a]	300		250		300		250	
c^E	[€/kWh]		0,20		0,12 ⁱ		0,20		0,12 ⁱ
c^F	[€/l]	1,40		0,52 ^j		1,40		0,52 ^j	

^a Sofern nicht anders ausgewiesen ist der Nettowert abzüglich des durchschnittlichen Umsatzsteuersatzes von 20 % in Europa zu bestimmen.

^b Vgl. Conca et al. (2008).

^c Vgl. Biere et al. (2009).

^d Minimale Batteriekapazität um bei einem DOD-Hub von 60 %, also einer nutzbaren Batteriekapazität von 9,6 kWh eine Reichweite von 80 km zurücklegen zu können.

^e Verbrauch kleiner Stadtfahrzeuge.

^f Verbrauch eines neuen Smarts.

^g Anschaffungsausgaben eines heutigen Stadtfahrzeugs, wie eines Smarts, wurden mit 10.000 € angenommen, abzügl. der Kosten für Verbrennungsmotor, Tank und Starter ergeben sich Kosten fürs Chassis von 8.225 €.

^h Kostenreduktionen aufgrund von Lernkurveneffekten, bei den anderen Komponenten wird vereinfachend darauf verzichtet.

ⁱ Abzüglich der Stromsteuern und EEG Umlage.

^j Abzüglich der Treibstoffsteuern.

Anmerkung: Wenn nicht anders angegeben, beruhen die Werte auf Tabelle 3.4.

Tabelle A.2 – Technische und ökonomische Fahrzeugparameter des Stadtfahrzeugs für verschiedene Zeitpunkte mit und ohne Besteuerung.

A.2 Batteriezustand nach Ladung und Entladung

A.2.1 Zustandsveränderung nach „Cycle Counting“

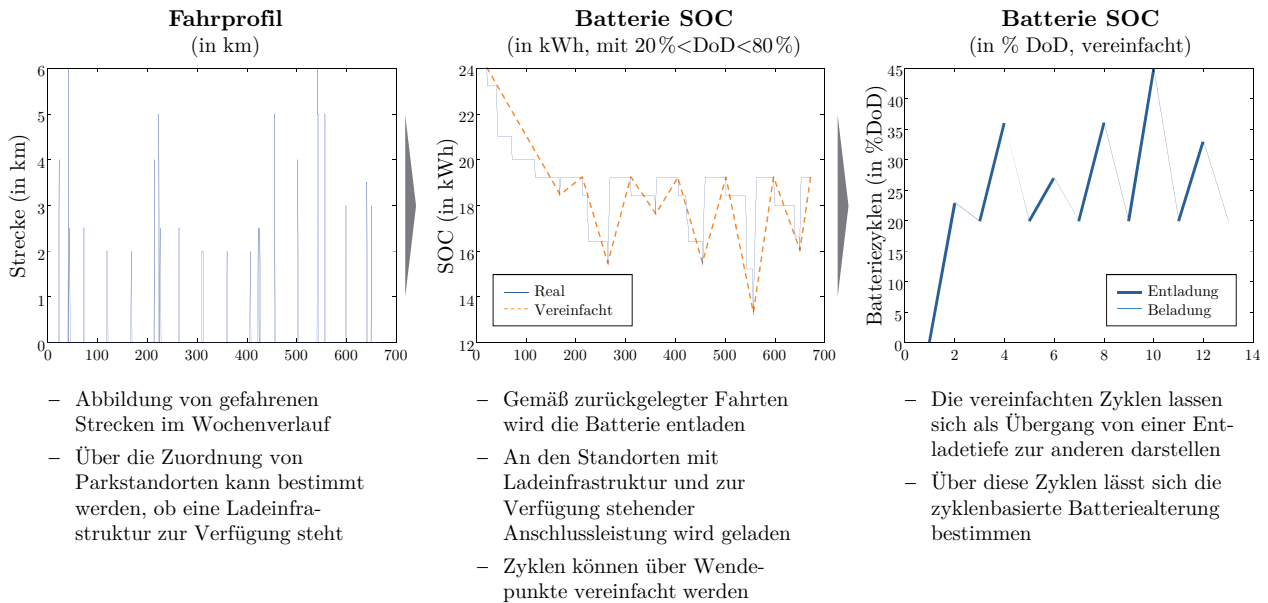


Abbildung A.1 – Batterieladezustandsveränderung auf Basis des Fahrprofils und Vereinfachung nach „cycle counting“ gemäß Downing und Socie (1982).

A.2.2 Beispiel eines Batterieprofils

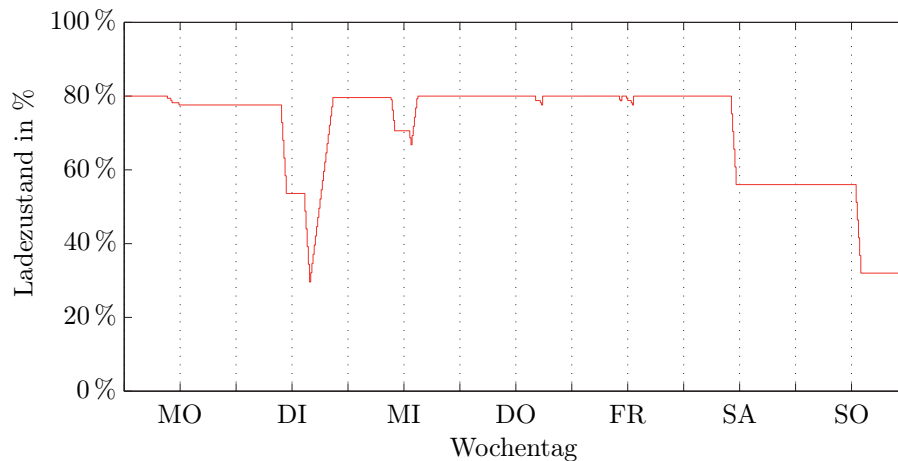


Abbildung A.2 – Beispiel eines Batterieprofils.

Anhang B

Weitere Auswertungen

Inhalt

B.1	Analyse für eine größere Batterie des Elektrofahrzeugs	191
B.2	Segmentanalyse des technisch möglichen und ökonomisch attraktiven Anteils	193
B.2.1	Effekte der Regionsausprägung	193
B.2.2	Effekte des Haushaltstyps	194
B.2.3	Effekte des Haushaltseinkommens	195
B.3	Plug-in-Hybride	196
B.3.1	Elektrischer Fahranteil	196
B.3.2	Optimale Batteriekapazität	197
B.4	Sensitivitätsanalyse	197
B.4.1	Veränderung der Parameter	197
B.4.2	Berücksichtigung der Batteriealterung	198
B.4.3	Ladeprofiländerung bei unterschiedlichen Strompreissignalen	199
B.5	Einfluss von Steuern und Förderungen	200
B.5.1	Gesamtbetrag der Steuern und Förderungen in Europa	200
B.5.2	Einfluss der Steuern und Förderungen bei Stadtfahrzeugen	202
B.6	Zahlungsbereitschaften	202

B.1 Analyse für eine größere Batterie des Elektrofahrzeugs

Die Simulation in Abschnitt 5.2 untersucht Elektrofahrzeuge mit einer Batteriekapazität von $\kappa = 24$ kWh. Diese Batterie ist, wie bereits erwähnt, für die gängigen Reichweitenanforderungen jedoch zu klein dimensioniert. Die Simulation wurde daher nochmals für eine größere Batteriekapazität ($\kappa = 30$ kWh) durchgeführt und im Folgenden dargestellt:

Beladeinfrastruktur-szenario	Anschlussleistung (in kW)				Technisch mögl. Anteil	
	Privat	Halb-öffentlich	Öffentlich	Anderorts	(a) bei geg. Infrastruktur	(b) privat, nur wenn Garage verf.
1	3,7				70,2 %	58,9 %
2	11,1	0	0	0	71,0 %	59,5 %
3	22,2				71,3 %	59,7 %
4		11,1			74,3 %	62,1 %
5	3,7	22,2	0	0	74,3 %	62,1 %
6			11,1		84,6 %	70,7 %
7	3,7	11,1	22,2	0	84,9 %	71,0 %
8			43,6		85,1 %	71,1 %
Schnellladung	3,7	+ während der Fahrt (100 kW)			100,0 %	100,0 %

Anmerkung: Auf Basis der technischen Parameter in Tabelle 3.4 und einer Batteriekapazität von 30 kWh.

Tabelle B.1 – Technisch möglicher Anteil auf Basis verschiedener Beladeinfrastrukturszenarien bei (a) angenommener privater Anschlussleistung und (b) mit Berücksichtigung, ob am privaten Stellplatz eine Garage zur Verfügung steht.

		Ökonomisch attraktiver Anteil in %									
<i>Batteriealterung:</i>		(a) Ohne Batteriealterung					(b) Reduzierung durch Alterung				
<i>Batteriekosten^a:</i>		750	400	250	200	150	750	400	250	200	150
Beladeinfrastruktur-szenarien	1	0 %	0 %	10 %	17 %	28 %	0 %	0 %	-0,9 %	0 %	0 %
	2	0 %	0 %	10 %	17 %	29 %	0 %	0 %	-0,7 %	0 %	0 %
	3	0 %	0 %	10 %	18 %	29 %	0 %	0 %	-0,9 %	0 %	0 %
	4	0 %	0 %	13 %	20 %	32 %	0 %	0 %	-3,4 %	-1,3 %	0 %
	5	0 %	0 %	13 %	20 %	32 %	0 %	0 %	-3,4 %	-1,3 %	-0,1 %
	6	0 %	0 %	15 %	26 %	41 %	0 %	0 %	-4,9 %	-2,5 %	-0,6 %
	7	0 %	0 %	15 %	25 %	41 %	0 %	0 %	-4,9 %	-2,4 %	-0,8 %
	8	0 %	0 %	13 %	24 %	40 %	0 %	0 %	-4,1 %	-2,3 %	-0,7 %
Schnellladung		0 %	0 %	9 %	21 %	37 %	0 %	0 %	-1,6 %	-1,8 %	-0,5 %

^a Die Batteriekosten werden in €/kWh angegeben. Heute sind die Batteriekosten in etwa bei 750 €/kWh einzuordnen. Wie in Abschnitt 3.4.3 gezeigt und in mehreren Studien, wie z. B. bei Kalhammer et al. (2007) oder Delucchi und Lipman (2001) beschrieben, können durch Skaleneffekte die Batteriekosten auf bis zu 150 €/kWh sinken.

Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4 und einer Batteriekapazität von 30 kWh. Für die Beladeinfrastrukturszenarien siehe Tabelle 5.2.

Tabelle B.2 – Ökonomisch attraktiver Anteil auf Basis verschiedener Beladeinfrastrukturszenarien, Batteriekosten und -alterung; (a) ohne Betrachtung der Batteriealterung, (b) Anteilsverluste unter Einbeziehung der Batteriealterung.

B.2 Segmentanalyse des technisch möglichen und ökonomisch attraktiven Anteils

Im Folgenden wird eine Segmentanalyse für den technisch möglichen und ökonomisch attraktiven Anteil von Elektrofahrzeugen bei Batteriekosten von 200 €/kWh und unter Einbeziehung der Batteriealterung vorgenommen.

B.2.1 Effekte der Regionsausprägung

<i>Infrastrukturszenario:</i>		Veränderung des technisch möglichen Anteils							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Regionstyp ³⁵⁶	1	3 %	4 %	4 %	3 %	3 %	1 %	1 %	1 %
	2	-4 %	-4 %	-3 %	-3 %	-3 %	-1 %	-1 %	-1 %
	3	-2 %	-3 %	-4 %	-3 %	-3 %	-2 %	-2 %	-2 %
Ø Anteil		62 %	63 %	63 %	67 %	67 %	79 %	79 %	79 %

Tabelle B.3 – Veränderung des technisch möglichen Anteils in den jeweiligen Regionstypen gegenüber dem Durchschnitt über die verschiedenen Infrastrukturszenarien.

<i>Infrastrukturszenario:</i>		Veränderung techn. mögl. Anteil inkl. Garagenrestr.							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Regionstyp	1	-1 %	-1 %	-2 %	-2 %	-2 %	-3 %	-3 %	-3 %
	2	0 %	0 %	1 %	1 %	1 %	3 %	3 %	3 %
	3	4 %	3 %	3 %	3 %	3 %	2 %	2 %	2 %
Ø Anteil		53 %	53 %	54 %	56 %	56 %	66 %	67 %	67 %

Tabelle B.4 – Veränderung des technisch möglichen Anteils unter Einbeziehung der Garagenrestriktion in den jeweiligen Regionstypen gegenüber dem Durchschnitt über die verschiedenen Infrastrukturszenarien.

<i>Infrastrukturszenario:</i>		Veränderung des ökonomisch attraktiven Anteils							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Regionstyp	1	1 %	1 %	1 %	1 %	1 %	-1 %	-1 %	0 %
	2	-1 %	-1 %	0 %	-1 %	-1 %	2 %	1 %	0 %
	3	0 %	0 %	-1 %	-1 %	-1 %	0 %	0 %	0 %
Ø Anteil		19 %	20 %	20 %	23 %	23 %	30 %	29 %	29 %

Tabelle B.5 – Veränderung des ökonomisch attraktiven Anteils in den jeweiligen Regionstypen gegenüber dem Durchschnitt über die verschiedenen Infrastrukturszenarien.

³⁵⁶ Nach BBSR (2010) als Regionsgrundtypen klassifiziert mit: (1) Agglomerationsraum, (2) verstädterter Raum, (3) ländlicher Raum.

B.2.2 Effekte des Haushaltstyps

<i>Infrastrukturszenario:</i>		Veränderung des technisch möglichen Anteils							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Haushaltstyp ³⁵⁷	1	1 %	0 %	1 %	2 %	2 %	-1 %	-1 %	-1 %
	2	1 %	1 %	1 %	-3 %	-3 %	-2 %	-2 %	-2 %
	3	-2 %	-1 %	-2 %	0 %	0 %	2 %	2 %	2 %
	4	1 %	0 %	0 %	1 %	1 %	3 %	2 %	2 %
Ø Anteil		62 %	63 %	63 %	67 %	67 %	79 %	79 %	79 %

Tabelle B.6 – Veränderung des technisch möglichen Anteils in den jeweiligen Haushaltstypen gegenüber dem Durchschnitt über die verschiedenen Infrastrukturszenarien.

<i>Infrastrukturszenario:</i>		Veränderung techn. mögl. Anteil inkl. Garagenrestr.							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Haushaltstyp	1	-4 %	-4 %	-4 %	-3 %	-3 %	-5 %	-5 %	-5 %
	2	3 %	3 %	3 %	-1 %	-1 %	0 %	0 %	1 %
	3	1 %	2 %	1 %	3 %	3 %	5 %	5 %	5 %
	4	8 %	7 %	7 %	9 %	9 %	8 %	7 %	7 %
Ø Anteil		53 %	53 %	54 %	56 %	56 %	66 %	67 %	67 %

Tabelle B.7 – Veränderung des technisch möglichen Anteils unter Einbeziehung der Garagenrestriktion in den jeweiligen Haushaltstypen gegenüber dem Durchschnitt über die verschiedenen Infrastrukturszenarien.

<i>Infrastrukturszenario:</i>		Veränderung des ökonomisch attraktiven Anteils							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Haushaltstyp	1	2 %	2 %	2 %	4 %	4 %	3 %	3 %	3 %
	2	-10 %	-10 %	-10 %	-14 %	-14 %	-14 %	-14 %	-14 %
	3	6 %	6 %	6 %	7 %	7 %	9 %	8 %	8 %
	4	-3 %	-4 %	-4 %	-4 %	-4 %	-6 %	-8 %	-8 %
Ø Anteil		19 %	20 %	20 %	23 %	23 %	30 %	29 %	29 %

Tabelle B.8 – Veränderung des ökonomisch attraktiven Anteils in den jeweiligen Haushaltstypen gegenüber dem Durchschnitt über die verschiedenen Infrastrukturszenarien.

³⁵⁷ Die Haushaltstypen werden wie folgt klassifiziert: (1) ein bis zwei Personen von denen mind. einer Berufstätig ist, (2) ein bis zwei Personen von denen keiner Berufstätig ist, (3) Haushalt mit Kindern unter 18 Jahren, (4) Haushalt ohne Kinder und mit drei oder mehr Erwachsenen.

B.2.3 Effekte des Haushaltseinkommens

<i>Infrastrukturszenario:</i>		Veränderung des technisch möglichen Anteils							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Haushalts- einkommen ³⁵⁸	1	5 %	4 %	3 %	-1 %	-1 %	-12 %	-13 %	-13 %
	2	12 %	11 %	11 %	7 %	7 %	5 %	4 %	4 %
	3	2 %	3 %	2 %	-1 %	-1 %	3 %	4 %	4 %
	4	1 %	0 %	-1 %	-1 %	-1 %	-2 %	-2 %	-2 %
	5	2 %	2 %	3 %	1 %	1 %	1 %	1 %	1 %
	6	-2 %	-1 %	-2 %	-2 %	-2 %	-1 %	0 %	0 %
	7	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %	0 %	0 %	-1 %
	8	-5 %	-5 %	-5 %	-2 %	-2 %	-2 %	-2 %	-2 %
	9	3 %	2 %	6 %	2 %	2 %	4 %	3 %	3 %
Ø Anteil		62 %	63 %	63 %	67 %	67 %	79 %	79 %	79 %

Tabelle B.9 – Veränderung des technisch möglichen Anteils in den jeweiligen Haushaltseinkommensklassen gegenüber dem Durchschnitt über die verschiedenen Infrastrukturszenarien.

<i>Infrastrukturszenario:</i>		Veränderung techn. mögl. Anteil inkl. Garagenrestr.							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Haushalts- einkommen	1	-19 %	-20 %	-20 %	-23 %	-23 %	-33 %	-33 %	-33 %
	2	-7 %	-8 %	-9 %	-11 %	-11 %	-18 %	-18 %	-18 %
	3	-3 %	-3 %	-4 %	-6 %	-6 %	-5 %	-4 %	-4 %
	4	-1 %	-2 %	-2 %	-3 %	-3 %	-3 %	-3 %	-2 %
	5	5 %	6 %	6 %	5 %	5 %	5 %	4 %	4 %
	6	-3 %	-2 %	-3 %	-2 %	-2 %	0 %	1 %	1 %
	7	4 %	4 %	4 %	4 %	4 %	1 %	1 %	1 %
	8	-2 %	-2 %	-2 %	1 %	1 %	2 %	1 %	1 %
	9	4 %	3 %	7 %	4 %	4 %	8 %	7 %	7 %
Ø Anteil		53 %	53 %	54 %	56 %	56 %	66 %	67 %	67 %

Tabelle B.10 – Veränderung des technisch möglichen Anteils unter Einbeziehung der Garagenrestriktion in den jeweiligen Haushaltseinkommensklassen gegenüber dem Durchschnitt über die verschiedenen Infrastrukturszenarien.

³⁵⁸ Das Haushaltseinkommen wird gemäß des monatlichen Nettoeinkommen wie folgt klassiert: (1) bis unter 500 €, (2) 500–1.000 €, (3) 1.000–1.500 €, (4) 1.500–2.000 €, (5) 2.000–2.500 €, (6) 2.500–3.000 €, (7) 3.000–3.500 €, (8) 3.500 € und mehr, (9) keine Angabe.

<i>Infrastrukturszenario:</i>		Veränderung des ökonomisch attraktiven Anteils							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Haushalts- einkommen	1	-19 %	-20 %	-20 %	-23 %	-23 %	-30 %	-29 %	-29 %
	2	-6 %	-7 %	-7 %	-10 %	-10 %	-11 %	-10 %	-12 %
	3	0 %	0 %	0 %	-2 %	-2 %	-2 %	-2 %	-2 %
	4	-4 %	-5 %	-6 %	-6 %	-6 %	-9 %	-8 %	-8 %
	5	2 %	2 %	3 %	1 %	1 %	0 %	-1 %	-1 %
	6	1 %	1 %	1 %	-1 %	-1 %	2 %	2 %	3 %
	7	8 %	8 %	8 %	9 %	9 %	9 %	9 %	8 %
	8	-2 %	-2 %	-2 %	2 %	2 %	4 %	3 %	3 %
	9	-10 %	-11 %	-7 %	-14 %	-14 %	-13 %	-12 %	-11 %
Ø Anteil		19 %	20 %	20 %	23 %	23 %	30 %	29 %	29 %

Tabelle B.11 – Veränderung des ökonomisch attraktiven Anteils in den jeweiligen Haushaltseinkommensklassen gegenüber dem Durchschnitt über die verschiedenen Infrastrukturszenarien.

B.3 Plug-in-Hybride

B.3.1 Elektrischer Fahranteil

PHEVs nutzen aufgrund der kleineren Batteriedimensionierung bei längeren Strecken den Verbrennungsmotor. Der Nutzungsgrad des elektrischen Antriebs, der elektrische Fahranteil, gibt Aufschluss darüber wieviel Strom anstatt Benzin genutzt wird und damit wie hoch Emissionsreduktionseffekte etc. sind.

<i>Batteriekosten:</i>		Elektrischer Fahranteil in %				
		750	400	250	200	150
Beladeinfra- struktur- szenarien	1		81 %	85 %	85 %	81 %
	2		82 %	86 %	86 %	81 %
	3		82 %	86 %	86 %	81 %
	4		87 %	91 %	90 %	83 %
	5		87 %	91 %	90 %	83 %
	6		91 %	96 %	97 %	91 %
	7		91 %	96 %	96 %	91 %
	8		91 %	96 %	96 %	92 %

Anmerkung: Ausgewählte PHEV ökonomisch vorteilhaft auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, einer kostenminimierten Batteriekapazität zwischen 1–24 kWh. Für die Beladeinfrastrukturszenarien siehe Tabelle 5.2.

Tabelle B.12 – Elektrischer Fahranteil in Abhängigkeit der Batteriekosten und des Beladeinfrastrukturszenarios.

B.3.2 Optimale Batteriekapazität

Plug-in-Hybride können aufgrund des zusätzlichen Verbrennungsmotors und der nicht bestehenden Reichweitenrestriktion unterschiedliche Batteriekapazitäten einsetzen. Für unterschiedliche Batteriekosten und angelegten Beladeinfrastrukturszenarien sind unterschiedliche Batteriekapazitäten optimal.

<i>Batteriekosten:</i>		Opt. Batteriekapazität (in kWh)				
		750	400	250	200	150
Beladeinfra- struktur- szenarien	1	7,29	10,02	10,63	14,04	
	2	7,61	10,08	10,82	14,16	
	3	7,61	10,04	10,77	14,08	
	4	6,77	7,73	7,88	10,81	
	5	6,74	7,73	7,82	10,72	
	6	6,77	7,71	7,15	8,55	
	7	6,82	7,71	7,18	8,48	
	8	6,82	7,75	7,20	8,51	

Anmerkung: Ausgewählte PHEV ökonomisch vorteilhaft auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, einer kostenminimierten Batteriekapazität zwischen 1–24 kWh. Für die Beladeinfrastrukturszenarien siehe Tabelle 5.2.

Tabelle B.13 – Durchschnittliche optimale Batteriedimensionierung in Abhängigkeit der Batteriekosten und der Beladeinfrastrukturszenarien.

B.4 Sensitivitätsanalyse

B.4.1 Veränderung der Parameter

Die veränderten Parameter in der Sensitivitätsanalyse nehmen die folgenden Werte an. Die grau hinterlegten Zellen stellen die Werte des Referenzszenarios dar.

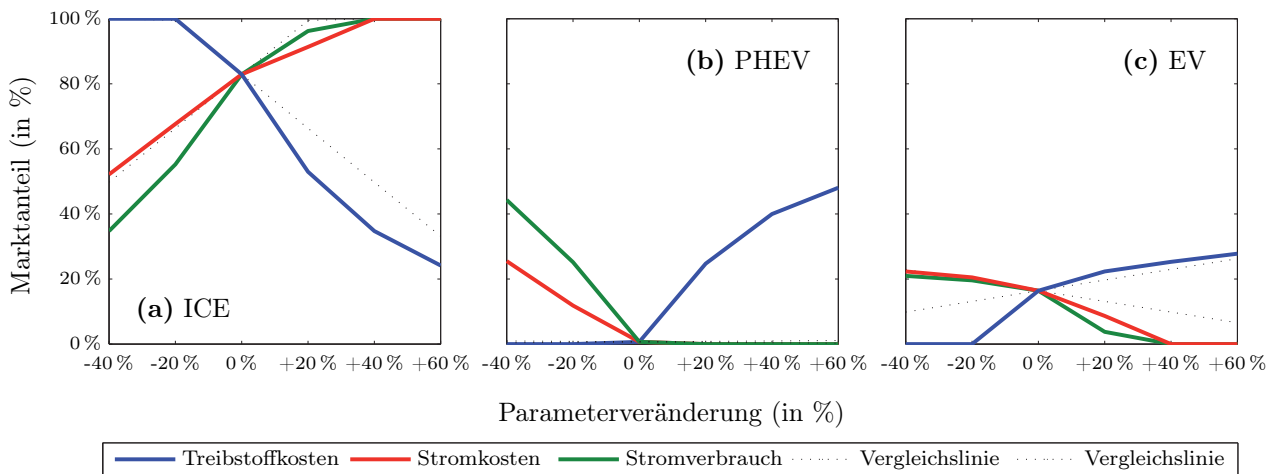
<i>Veränderung:</i>			Parameterveränderung					
			-40 %	-20 %	0 %	+20 %	+40 %	+60 %
Treibstoffkosten	[€/l]	c^F	0,84	1,12	1,40	1,68	1,96	2,24
Stromkosten	[€/kWh]	c^E	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32
Stromverbrauch	[kWh/km]	u^E	0,11	0,14	0,18	0,22	0,25	0,29
Batterielebensdauer	[a]	T^B	7,2	9,6	12,0	14,4	16,8	19,2
Fahrzeuglebensdauer	[a]	T^V	7,2	9,6	12,0	14,4	16,8	19,2
Max. Laufleistung	[km]	M	120.000	160.000	200.000	240.000	280.000	320.000
Verzinsung	[%]	k	0 %	2 %	4 %	6 %	8 %	10 %

■ = Werte des Referenzszenarios.

Tabelle B.14 – Veränderung der Parameter in der Sensitivitätsanalyse.

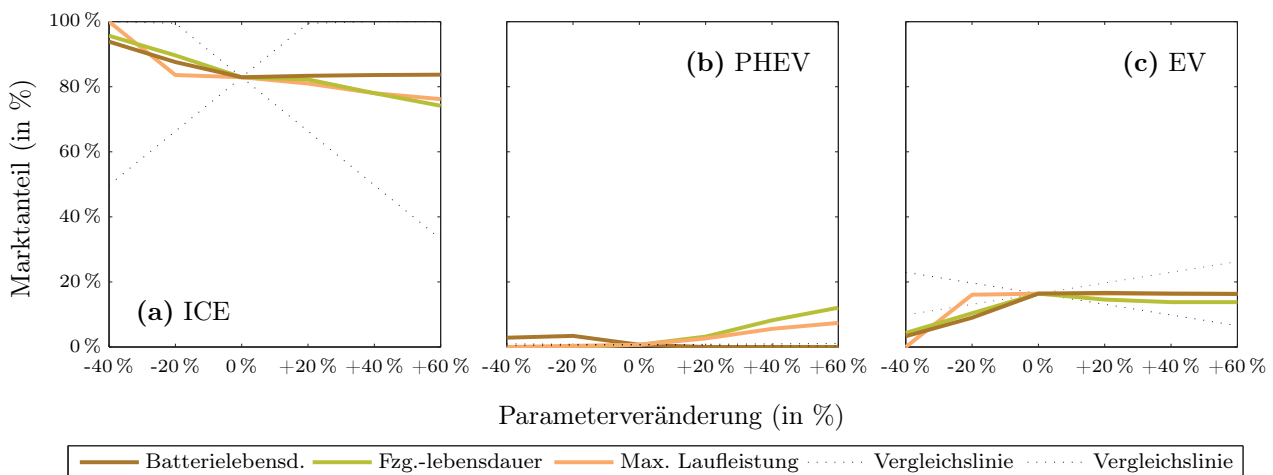
B.4.2 Berücksichtigung der Batteriealterung

Die Sensitivitätsanalysen aus Abschnitt 5.6 verändern sich kaum unter Berücksichtigung der Batteriealterung.



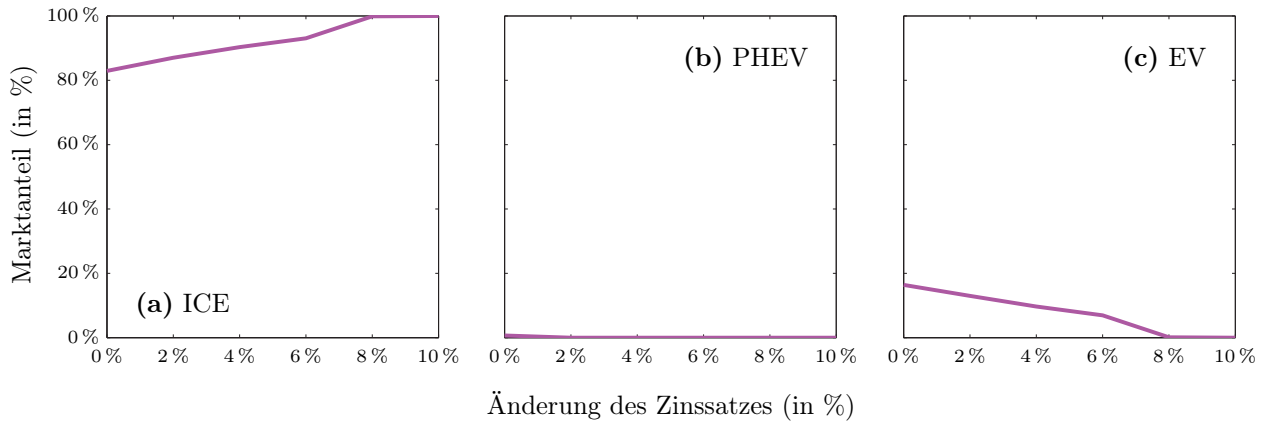
Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, bei Batteriekosten von 200 €/kWh und unter Berücksichtigung der Batteriealterung. Beladeinfrastrukturszenario 1, siehe Tabelle 5.2. Für die Anpassung der Parameter siehe auch Anhangstabelle B.14.

Abbildung B.1 – Einfluss der Parameter Treibstoff-, Stromkosten und Stromverbrauch auf den Marktanteil von (a) ICE, (b) PHEV und (c) EV unter Berücksichtigung der Batteriealterung.



Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, bei Batteriekosten von 200 €/kWh und unter Berücksichtigung der Batteriealterung. Beladeinfrastrukturszenario 1, siehe Tabelle 5.2. Für die Anpassung der Parameter siehe auch Anhangstabelle B.14.

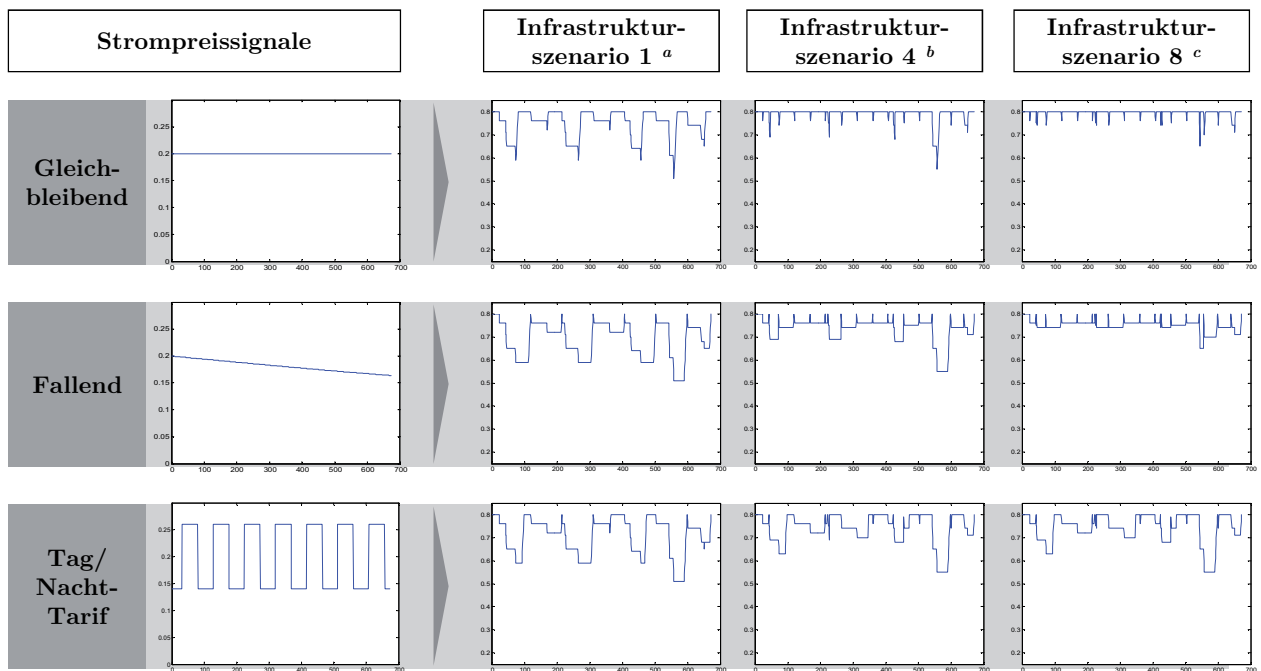
Abbildung B.2 – Einfluss der Parameter Batterie-, Fahrzeuglebensdauer und max. Fahrleistung auf den Marktanteil von (a) ICE, (b) PHEV und (c) EV unter Berücksichtigung der Batteriealterung.



Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, bei Batteriekosten von 200 €/kWh und unter Berücksichtigung der Batteriealterung. Beladeinfrastrukturszenario 1, siehe Tabelle 5.2. Für die Anpassung der Parameter siehe auch Anhangstabelle B.14.

Abbildung B.3 – Einfluss des Zinssatzes auf den Marktanteil von (a) ICE, (b) PHEV und (c) EV unter Berücksichtigung der Batteriealterung.

B.4.3 Ladeprofiländerung bei unterschiedlichen Strompreissignalen



^a Vgl. für die Infrastrukturszenarien Tabelle 5.2, hier nur private Infrastruktur mit 3,7 kW.

^b Infrastrukturszenario 4 mit 3,7 kW privat, 11,1 kW halböffentlich.

^c Infrastrukturszenario 8 mit 3,7 kW privat, 11,1 kW halböffentlich und 43,6 kW öffentlich.

Anmerkung: Batterieladestand dargestellt in % SOC, Preissignale in €/kWh; beide über den Verlauf einer Woche.

Abbildung B.4 – Batterieladestand und kostenoptimale Ladeprofile in Abhängigkeit unterschiedlicher Strompreissignale und verschiedenen Infrastrukturszenarien.

Steuer	Größe	Typ	AT	BE	CH	DE	DK	ES	FI	FR	GR	IE	IT	NL	NO	PL	SE	UK	
Jährliche Kfz-Steuer	Referenzfzg.	ICE	3.482	1.640	1.900	577	2.032	637	1.493	0	1.115	1.553	1.977	5.773	3.384	0	901	1.258	
		PHEV	1.708	0	338	159	695	55	3.764	0	0	1.035	1.284	0	0	0	0	190	0
		EV	0	0	0	242	0	55	3.756	0	0	1.035	1.695	0	0	0	0	190	0
Stadt fzg.	ICE	ICE	1.380	1.255	1.571	199	695	219	1.206	0	1.115	1.035	1.156	637	3.384	0	414	229	
	EV	EV	0	0	0	151	0	0	2.271	0	0	1.035	770	0	0	0	190	0	
Treibstoffsteuer ³⁵⁹	Referenzfzg.	ICE	6.070	7.134	4.793	7.346	6.979	4.543	7.902	6.929	4.450	5.466	6.517	7.700	7.975	4.953	6.759	7.112	
		PHEV	2.428	2.854	1.917	2.939	2.792	1.817	3.161	2.772	1.780	2.187	2.607	3.080	3.190	1.981	2.704	2.845	
		EV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Stadt fzg.	ICE	ICE	3.180	3.737	2.511	3.848	3.656	2.380	4.139	3.630	2.331	2.863	3.414	4.033	4.177	2.595	3.541	3.725	
	EV	EV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Stromsteuer ³⁵⁹	Referenzfzg.	ICE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		PHEV	753	741	222	846	2.177	454	757	679	194	452	1.731	2.775	817	582	1.153	108	
		EV	1.254	1.235	370	1.409	3.628	757	1.262	1.132	323	753	2.884	4.625	1.361	971	1.922	179	
Stadt fzg.	ICE	ICE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	EV	EV	597	588	176	671	1.728	360	601	539	154	358	1.374	2.203	648	462	915	85	
City-Maut	Referenzfzg.	ICE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		PHEV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		EV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Stadt fzg.	ICE	ICE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.426 ³⁶⁰	0	0	9.151 ³⁶¹	
	EV	EV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabelle B.15 – Absolute Förderhöhen in Europa.³⁶²³⁶⁰ Oslo.³⁶¹ London.³⁶² Unter anderem wurden die folgenden Quellen genutzt: Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA) (2009), Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas (2009), Bundesministerium der Finanzen (2009, 2010a), Die Bundesbehörde der Schweizerischen Eidgenossenschaften (2007), EDF (2009), H. M. Revenue & Customs (2009, 2010), Iberdrola (2010), Lovdata (2009), NAF (2010), Parkinen (2008), Postbus51 (2009), Revenue Irish Tax and Customs (2009), Transport for London (2010b) und Wiko (2009).

B.5.2 Einfluss der Steuern und Förderungen bei Stadtfahrzeugen

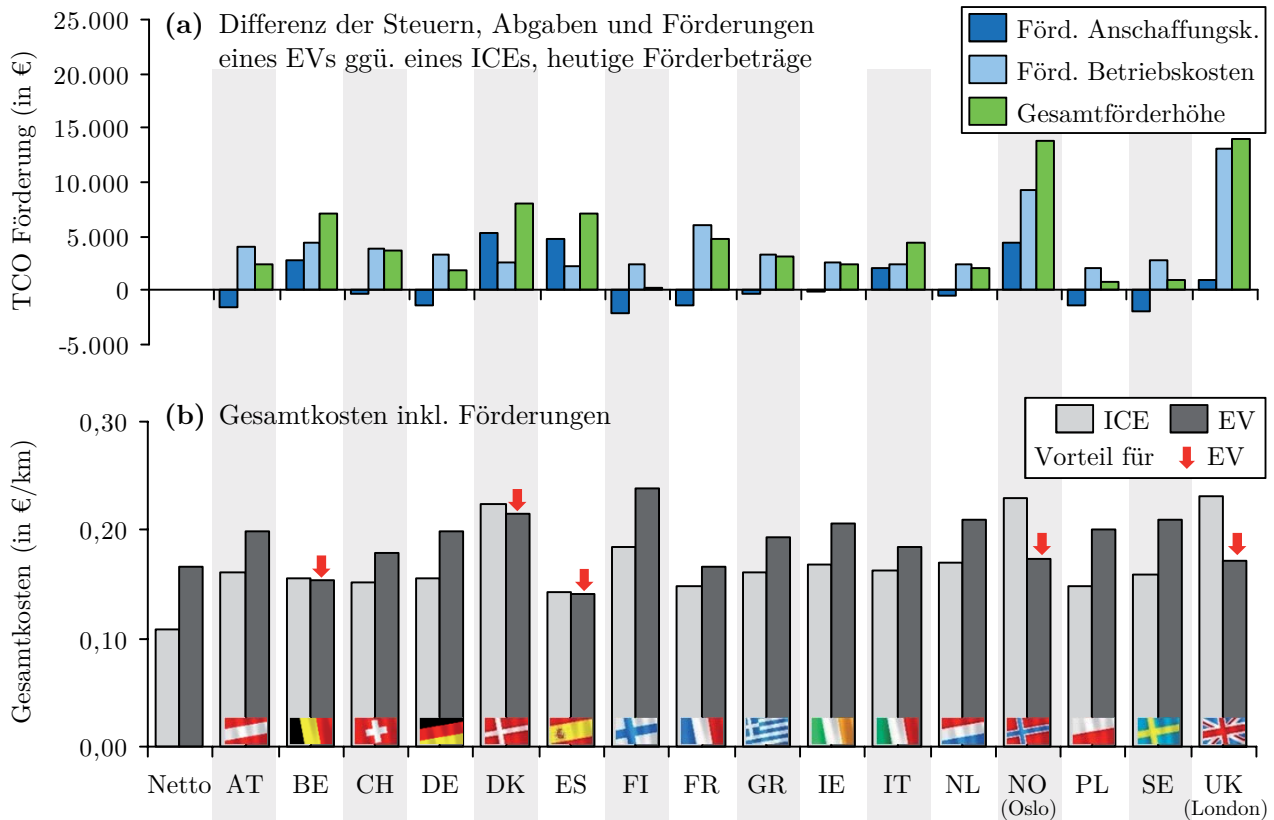
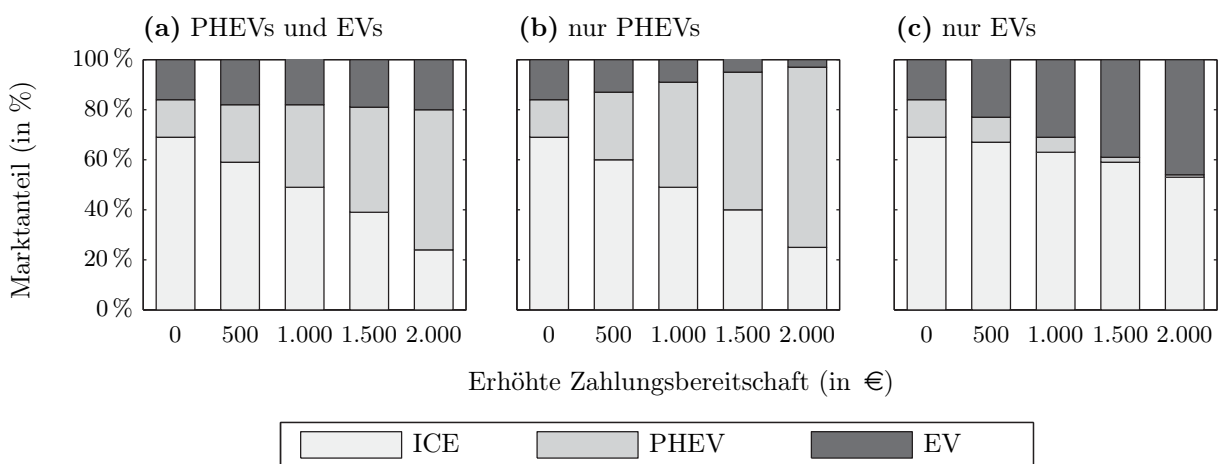


Abbildung B.5 – Gesamtkostenbetrachtung des Stadtfahrzeugs unter Berechnung (a) aller Steuern, Abgaben und Förderungen sowie (b) der Fahrzeuggesamtkosten inkl. Abgabenglast.

B.6 Zahlungsbereitschaften



Anmerkung: Auf Basis der technischen und ökonomischen Parameter in Tabelle 3.4, bei Batteriekosten von 200 €/kWh und ohne Berücksichtigung der Batteriealterung. Beladeinfrastrukturszenario 8, siehe Tabelle 5.2.

Abbildung B.6 – Einfluss der Zahlungsbereitschaft bei zugrunde gelegter dichter Beladeinfrastruktur (a) für beide alternative Antriebe, (b) nur für PHEVs und (c) nur für EVs.

Literaturverzeichnis

- Achtnicht, M., Bühler, G. und Hermeling, C. (2008): Impact of service station networks on purchase decisions of alternative-fuel vehicles. Discussion Paper No. 08-088. Techn. Ber., Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung, Mannheim. URL <ftp://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp08088.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- ADAC (2009): ADAC-Umfrage Kaufbereitschaft Elektroautos. ADAC Test und Technik. Technik Zentrum, Landsberg am Lech.
- Afuah, A. (2004): *Business models: A strategic management approach*. McGraw-Hill/Irwin, Boston. ISBN 978-0-07-288364-0.
- Aker Wade (2010): Tokyo Electric Power Company (TEPCO) licenses Aker Wade to build level III fast chargers. Press Release. URL <http://www.akerwade.com/v.php?pg=78>, zuletzt zugegriffen am 30.04.2011.
- Al-Daas, M. (1995): Zankapfel oder der Streit um des Kaisers Bart? Wirtschaftsverkehr: Definition und Begrenzung. In: *Zeitschrift für Logistik*, Bd. 3, S. 45–48.
- Al-Hallaj, S., Kizilel, R., Lateef, A., Sabbah, R., Farid, M. und Selman, J. (2005): Passive thermal management using phase change material (PCM) for EV and HEV Li-ion batteries. In: *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, S. 376–380. IEEE, doi:10.1109/VPPC.2005.1554585.
- Alpizar, F., Carlsson, F. und Martinsson, P. (2001): Using choice experiments for non-market valuation. In: *Economic Issues*, Bd. 8 (1), S. 83–110.
- Amit, R. und Zott, C. (2001): Value creation in e-business. In: *Strategic Management Journal*, Bd. 22 (6-7), S. 493–520, doi:10.1002/smj.187.
- Anderman, M. (2010): Feedback on ARB's zero-emission vehicle staff technical report of 11/25/2009 including attachment A: Status of EV technology commercialization. Techn. Ber., Advanced Automotive Batteries, Oregon House, California. URL http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/2009zevreview/anderman_review.pdf, zuletzt zugegriffen am 10.05.2011.
- Anderman, M., Kalhammer, F.R. und Macarthur, D. (2000): Advanced batteries for electric vehicles: An assessment of performance, cost, and availability. Prepared for State of California Air Resources Board. URL <http://www.herecomesmongo.com/ae/documents/btapreport.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Andersen, P.H., Mathews, J.A. und Rask, M. (2009): Integrating private transport into renewable energy policy: The strategy of creating intelligent recharging grids for electric vehicles. In: *Energy Policy*, Bd. 37 (7), S. 2481–2486, doi:10.1016/j.enpol.2009.03.032.

- Anderson, D.L. (2009): An evaluation of current and future costs for lithium-ion batteries for use in electrified vehicle powertrains. Masterarbeit, Duke University.
- Anderson, T., Abeywardana, V., Wolf, J. und Lee, M. (2009): National travel survey GPS feasibility study. Techn. Ber., National Centre for Social Research. URL <http://www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/personal/methodology/ntsreports/ntsgpsstudy.pdf>, zuletzt zugegriffen am 03.05.2011.
- Anegawa, T. (2010): Quick charging station technology. URL <http://www.cars21.com/article.print.php?Id=419>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Angerer, G., Marscheider-Weidemann, F., Wendl, M. und Wietschel, M. (2009): Lithium für Zukunftstechnologien: Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Techn. Ber., Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe. URL http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/n/download/publikationen/Lithium_fuer_Zukunftstechnologien.pdf, zuletzt zugegriffen am 01.05.2011.
- Arnold, H., Kuhnert, F., Kurtz, R. und Bauer, W. (2010): Elektromobilität – Herausforderungen für Industrie und öffentliche Hand. Techn. Ber., PricewaterhouseCoopers, Fraunhofer IAO. URL <http://www.iao.fraunhofer.de/images/downloads/elektromobilitaet.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Association des Constructeurs Européens d’Automobiles (ACEA) (Hg.) (2009): *Tax guide motor vehicle taxation in Europe 2009*. ACEA, Brüssel.
- Autorità per l’Energia Elettrica e il Gas (2009): Le tariffe D2 e D3. URL <http://www.energia.it/it/d2d3.htm>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Axsen, J. und Burke, A. (2008): Batteries for plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs): Goals and the state of technology circa 2008. Techn. Ber., Institute of Transportation Studies, University of California in Davis.
- Axsen, J., Kurani, K.S. und Burke, A. (2010): Are batteries ready for plug-in hybrid buyers? In: *Transport Policy*, Bd. 17 (3), S. 173–182, doi:10.1016/j.tranpol.2010.01.004.
- Baines, T.S., Lightfoot, H.W., Evans, S., Neely, A., Greenough, R., Peppard, J., Roy, R., Shehab, E., Braganza, A., Tiwari, A., Alcock, J.R., Angus, J.P., Bastl, M., Cousens, A., Irving, P., Johnson, M., Kingston, J., Lockett, H., Martinez, V., Michele, P., Tranfield, D., Walton, I.M. und Wilson, H. (2007): State-of-the-art in product-service systems. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Bd. 221 (10), S. 1543–1552, doi:10.1243/09544054JEM858.
- Bandivadekar, A., Bodek, K., Cheah, L., Evans, C., Groode, T., Heywood, J.B., Kasseris, E., Kromer, M.A. und Weiss, M. (2008): On the road in 2035: Reducing transportation’s petroleum consumption and GHG emissions. Techn. Ber., MIT, Cambridge.
- Barkenbus, J.N. (2009): Our electric automotive future: CO₂ savings through a disruptive technology. In: *Policy and Society*, Bd. 27 (4), S. 399–410, doi:10.1016/j.polysoc.2009.01.005.

- Barlow, T.J., Latham, S., McCrae, I.S. und Boulter, P.G. (2009): A reference book for driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions. Techn. Ber., Department for Transport, London.
- Bashash, S., Moura, S.J., Forman, J.C. und Fathy, H.K. (2011): Plug-in hybrid electric vehicle charge pattern optimization for energy cost and battery longevity. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 196 (1), S. 541–549, doi:10.1016/j.jpowsour.2010.07.001.
- BBSR (2010): BBR Raumabgrenzungen. URL http://www.bbr.bund.de/nn_103086/BBSR/DE/Raumb Beobachtung/Werkzeuge/Raumabgrenzungen/SiedlungsstrukturelleGebietstypen/gebietstypen.html, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Becker, S. und Ledwon, M. (2010): Zwischenbericht: Lade-Infrastruktur und Netzintegration. Techn. Ber., Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Berlin. URL <http://www.bmu.de/verkehr/downloads/doc/46765.php>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Becker, T.A. (2009): Electric vehicles in the United States: A new model with forecasts to 2030. Techn. Ber., University of California, Berkley.
- Bellman, R.E. (1957): *Dynamic programming*. Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, 3. Aufl.
- Bending, S., Ferdowsi, M., Channon, S. und Strunz, K. (2010): MERGE Deliverable D1.1 – Specifications for EV-grid interfacing, communication and smart metering technologies, including traffic patterns and human behaviour descriptions. URL http://www.ev-merge.eu/images/stories/uploads/MERGE_WP1_D1.1.pdf, zuletzt zugegriffen am 15.05.2011.
- BenDor, T. und Ford, A. (2006): Simulating a combination of feebates and scrappage incentives to reduce automobile emissions. In: *Energy*, Bd. 31 (8-9), S. 1197–1214, doi:10.1016/j.energy.2005.05.024.
- Benton, J. (2008): Hybrid sales and prices climb in lockstep with gas prices. URL http://www.consumeraffairs.com/news04/2008/05/gas_prices235.html, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Bertsekas, D.P. (2005): *Dynamic programming and optimal control, Vol. 1*. Athena Scientific, Belmont, Mass., 3. Aufl. ISBN 1-886529-26-4.
- Better Place (2009): Battery switch station. URL <http://www.betterplace.com/the-solution-switch-stations>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Bhat, U.N. (2008): An introduction to queueing theory: Modeling and analysis in applications. In: *An introduction to queueing theory*, Statistics for Industry and Technology, S. 29–73. Birkhäuser, Boston. ISBN 978-0-8176-4724-7.
- Bieger, T., Bickhoff, N., Caspers, R., zu Knyphausen-Aufseß, D. und Reding, K. (Hg.) (2002): *Zukünftige Geschäftsmodelle. Konzept und Anwendung der Netzökonomie*. Springer, Berlin. ISBN 978-3540427445.
- Biere, D., Dallinger, D. und Wietschel, M. (2009): Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen. In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, Bd. 33, S. 173–181.

- Biermann, J.W. (2007): Der Elektro-Hybrid – eine Übersicht zu einem erfolgversprechenden, alternativen Fahrzeugantrieb. In: *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge: Technik, Strukturen und Entwicklungen*, herausgegeben von D. Naunin, Kap. 6, S. 65–77. expert-Verlag, Renningen, 4. Aufl. ISBN 978-3-8169-2625-2.
- Bindner, H., Cronin, T., Lundsager, P., Manwell, J.F., Abdulwahid, U. und Baring-Gould, I. (2005): Benchmarking – Lifetime modelling. URL http://www.benchmarking.eu.org/Publications/Deliverables/Benchmarking_D4-1_Lifetime_modelling.pdf, zuletzt zugegriffen am 30.04.2011.
- Birnbaum, U., Linssen, J., Markewitz, P., Martinsen, D., Vögele, S., Froeschle, P. und Wind, J. (2009): Elektromobilität – Auswirkungen auf die elektrische Energieversorgung. In: *BWK*, Bd. 61 (1/2), S. 67–74.
- Blank, T., Mauch, W., Mezger, T. und Wagner, U. (2008): Zusätzlicher Energie- und Leistungsbedarf für Elektrostraßenfahrzeuge. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, Bd. 58. Jg. (12), S. 24–26.
- Bloom, I., Cole, B.W., Sohn, J.J., Jones, S.A., Polzin, E.G., Battaglia, V.S., Henriksen, G.L., Motloch, C., Richardson, R., Unkelhaeuser, T., Ingersoll, D. und Case, H.L. (2001): An accelerated calendar and cycle life study of Li-ion cells. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 101 (2), S. 238–247, doi: 10.1016/S0378-7753(01)00783-2.
- BMW AG, Daimler AG, Ford, General Motors LLC, Honda R&D, Hyundai Motor Company, Kia Motors Corporation, Nissan, Renault, Toyota Motor Corporation, Volkswagen, ENI Refining and Marketing, Galp Energia, OMV Refining and Marketing GmbH, Shell Downstream Services International B.V., Total Raffinage Marketing, EnBW Baden-Wuerttemberg AG, Vattenfall, Air Liquide, Air Products, The Linde Group, Intelligent Energy Holdings plc, Power-tech, Nordex, ELT Elektrolyse Technik, Hydrogenics, Hydrogen Technologies, Proton Energy Systems, European Climate Foundation, European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking und NOW GmbH (2010): A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis. URL http://www.zeroemissionvehicles.eu/uploads/Power_trains_for_Europe.pdf, zuletzt zugegriffen am 12.05.2011.
- Bodek, K. und Heywood, J. (2008): Europe’s evolving passenger vehicle fleet: Fuel use and GHG emissions scenarios through 2035. Techn. Ber., Massachusetts Institute of Technology, Laboratory for Energy and Environment, Cambridge.
- Boehm, S. (2009): France launches battle of the electric car. URL <http://www.google.com/hostednews/afp/article/ALeqM5hZhuMvZKvJM36Q7zC339ocRVNhGw?index=0>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Botsford, C. und Szczepanek, A. (2009): Fast charging vs. slow charging: Pros and cons for the new age of electric vehicles. In: *Electric Vehicle Symposium 24, 13-16 Mai 2009*, S. 1–9. Starvanger, Norwegen.
- Bradley, S.P., Hax, A.C. und Magnanti, T.L. (1977): *Applied mathematical programming*. Addison-Wesley. ISBN 978-0-20-100464-9.

- Bradley, T.H. und Frank, A.A. (2009): Design, demonstrations and sustainability impact assessments for plug-in hybrid electric vehicles. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 13 (1), S. 115–128, doi:10.1016/j.rser.2007.05.003.
- Bradley, T.H. und Quinn, C.W. (2010): Analysis of plug-in hybrid electric vehicle utility factors. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 195 (16), S. 5399–5408, doi:10.1016/j.jpowsour.2010.02.082.
- Brooker, A., Thornton, M. und Rugh, J. (2010): Technology improvement pathways to cost-effective vehicle electrification. Techn. Ber., National Renewable Energy Laboratory. URL <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47454.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Broussely, M., Biensan, P., Bonhomme, F., Blanchard, P., Herreyre, S., Nechey, K. und Staniewicz, R. (2005): Main aging mechanisms in Li-ion batteries. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 146 (1-2), S. 90–96, doi:10.1016/j.jpowsour.2005.03.172.
- Broussely, M., Herreyre, S., Biensan, P. und Kasztejna, P. (2001): Aging mechanism in Li-ion cells and calendar life predictions. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 98, S. 13–21, doi:10.1016/S0378-7753(01)00722-4.
- Buhr, W.H.W. (2003): What is infrastructure? Techn. Ber., Universität Siegen, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Wirtschaftsinformatik und Wirtschaftsrecht. URL <http://www.uni-siegen.de/fb5/vwl/repec/sie/papers/107-03.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Bundesamt für Statistik Schweiz und Bundesamt für Raumentwicklung (2007): Mobilität in der Schweiz, Ergebnisse des Mikrozensus 2005 zum Verkehrsverhalten. Techn. Ber., Bundesamt für Statistik Schweiz, Neuchâtel, Bern. URL http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/dienstleistungen/publikationen_statistik/publikationskatalog.Document.91873.pdf, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Bundesministerium der Finanzen (2009): Übersicht zur Kraftfahrzeugsteuer. URL http://www.bundesfinanzministerium.de/nm_55228/DE/BMF__Startseite/Service/Downloads/Abt__IV/081,templateId=raw,property=publicationFile.jpg, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Bundesministerium der Finanzen (2010a): Stromsteuer. URL http://www.bundesfinanzministerium.de/nm_53848/DE/BMF__Startseite/Service/Glossar/S/015__Stromsteuer.html?__nnn=true?__nnn=true, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Bundesministerium der Finanzen (2010b): Wie setzt sich der Spritpreis zusammen? URL http://www.bundesfinanzministerium.de/DE/Buergerinnen__und__Buerger/Mobilitaet__und__Reisen/Rund__ums__Auto/0001__Spritpreis.html, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Bundesministerium der Justiz (2005): Verordnung über den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen (StromNZV). URL <http://www.gesetze-im-internet.de/stromnkv/BJNR224300005.html>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2010): Schlüsseltechnologien. URL <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Technologie-und-Innovation/Technologiepolitik/schlueseltechnologien.html>, zuletzt zugegriffen am 09.05.2011.

- Bundesregierung (2009): Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. URL http://www.bmbf.de/pubRD/nationaler_entwicklungsplan_elektromobilitaet.pdf, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Bunzeck, I., Backhaus, J. und Hoevenaars, B. (2010): Building a hydrogen refuelling infrastructure in the Netherlands: Influencing factors from the car drivers' perspective. In: *Proceedings of the WHEC, May 16.-21. 2010, Essen*, Bd. 78, S. 67–73. Institute of Energy Research – Fuel Cells (IEF-3). URL http://juwel.fz-juelich.de:8080/dspace/bitstream/2128/4155/1/SA3_2_Bunzeck.pdf, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Burke, A. (2007): Comparisons of lithium-ion batteries and ultracapacitors in hybrid-electric vehicle applications. In: *EET-2007 European Ele-Drive Conference, 30.05.-01.06.2007*. Brussels, Belgium.
- Burke, A. (2009): Performance, charging, and second-use considerations for lithium batteries for plug-in electric vehicles. Techn. Ber. UCD-ITS-RR-09-17, Institute of Transportation Studies, UC Davis. URL <http://escholarship.org/uc/item/2xf263qp>, zuletzt zugegriffen am 30.04.2011.
- California Air Resources Board (2001): Staff paper on the standardization of electric vehicle charging infrastructure. URL <http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/infrastructure/2001infrastructure/staffpaper.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Canzler, W. und Knie, A. (2009): *Grüne Wege aus der Autokrise: Vom Autobauer zum Mobilitätsdienstleister*. Heinrich-Böll-Stiftung, Berlin. ISBN 978-3-86928-005-9.
- Car2Go (2010): Car2Go. URL <http://www.car2go.com/?selection=new>, zuletzt zugegriffen am 01.05.2011.
- Carlsson, B. und Stankiewicz, R. (1991): On the nature, function and composition of technological systems. In: *Journal of Evolutionary Economics*, Bd. 1 (2), S. 93–118, doi:10.1007/BF01224915.
- Carlsson, F. und Johansson-Stenman, O. (2003): Costs and benefits of electric vehicles – A 2010 perspective. In: *Journal of Transport Economics and Policy*, Bd. 37 (1), S. 1–28.
- Carlsson, F. und Martinsson, P. (2001): Do hypothetical and actual marginal willingness to pay differ in choice experiments?: Application to the valuation of the environment. In: *Journal of Environmental Economics and Management*, Bd. 41 (2), S. 179–192, doi:10.1006/jeeem.2000.1138.
- Chan, C.C. (2007): The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. In: *Proceedings of the IEEE*, Bd. 95 (4), S. 704–718, doi:10.1109/JPROC.2007.892489.
- Cheng, I., Desai, D., Koudigkelis, K., de Vasconcellos, P., Kaminsky, P., Sidhu, I. und Tenderich, B. (2008): Electric vehicle charging infrastructure rollout strategy. Techn. Ber., Global Venture Lab UC Berkeley, Berkley.
- Chéron, E. und Zins, M. (1997): Electric vehicle purchasing intentions: The concern over battery charge duration. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 31 (3), S. 235–243, doi:10.1016/S0965-8564(96)00018-3.

- Chlond, B. und Kuhnimhof, T. (2005): Panelhandbuch – Das deutsche Mobilitätspanel: Informationen sowie Anleitung und Anregung zur Datennutzung. Techn. Ber., Institut für Verkehrswesen (IfV), Karlsruhe.
- Chojnacki, K. (2000): Relationship marketing at Volkswagen. In: *Relationship marketing: Gaining competitive advantage through customer satisfaction and customer retention*, herausgegeben von T. Hennig-Thurau und U. Hansen, S. 49–59. Springer-Verlag, Berlin.
- City of London (2008): News release. URL http://www.cityoflondon.gov.uk/Corporation/media_centre/files2008/City+of+London+ends+parking+trail+for+electric+cars.htm, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Clement, K., Haesen, E. und Driesen, J. (2009): *Coordinated charging of multiple plug-in hybrid electric vehicles in residential distribution grids*. IEEE. ISBN 978-1-4244-3810-5, doi:10.1109/PSCE.2009.4839973.
- Clement-Nyns, K., Haesen, E. und Driesen, J. (2010): The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid. In: *IEEE Transactions on Power Systems*, Bd. 25 (1), S. 371–380, doi:10.1109/TPWRS.2009.2036481.
- Collantes, G.O. und Sperling, D. (2008): The origin of California’s zero emission vehicle mandate. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 42 (10), S. 1302–1313, doi:10.1016/j.tra.2008.05.007.
- Collin, J. (1994): Verkehrstechnische Datenerhebungen (Zählungen). In: *Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung: für die Praxis in Stadt und Region*, herausgegeben von T. Bracher, M. Haag, H. Holzapfel, F. Kiepe, M. Lehm Brock und U. Reutter. Wichmann, Berlin.
- Concawe, European Council for Automotive R&D und European Commission Joint Research Center (2008): Vehicle retail price estimation. Techn. Ber., Concawe, European Council for Automotive R&D, European Commission Joint Research Center. URL <http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/V3.1TTWApp107102008.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Conrad, K. und Seitz, H. (1994): The economic benefits of public infrastructure. In: *Applied Economics*, Bd. 26 (4), S. 303–311, doi:10.1080/00036849400000077.
- Coulomb Technologies (2011): Coulomb Technologies – Product overview. URL <http://www.coulombtech.com/products.php>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Cready, E., Lippert, J., Pihl, J., Weinstock, I., Symons, P. und Jungst, R.G. (2003): Technical and economic feasibility of applying used EV batteries in stationary applications. Techn. Ber. SAND2002-4084, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NW and Livermore, CA. URL <http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/809607-9aimly/native/>, zuletzt zugegriffen am 01.05.2011.
- Dallinger, D., Krampe, D. und Wietschel, M. (2011): Vehicle-to-grid regulation reserves based on a dynamic simulation of mobility behavior. In: *IEEE Transactions on Smart Grid*, Bd. 2 (2), S. 302–313, doi:10.1109/TSG.2011.2131692.

- de Haan, P. (2008a): Hohe Treibstoffpreise – Effekte auf das tägliche Mobilitätsverhalten. In: *SVWG Forum* 24.10.2008.
- de Haan, P. (2008b): Wirkungen von Bonus-Malus-Systemen beim Neuwagenkauf. In: *BFE, Forschungstage Verkehr*, 10. Sept. 2008.
- de Haan, P., Müller, M. und Peters, A. (2007a): Anreizsysteme beim Neuwagenkauf: Wirkungsarten, Wirksamkeit und Wirkungseffizienz. Techn. Ber., Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institute for Environmental Decisions (IED), Natural and Social Science Interface (NSSI), Zürich, doi:10.3929/ethz-a-006123188.
- de Haan, P., Müller, M. und Scholz, R.W. (2008): How much do incentives affect car purchase? Agent-based microsimulation of consumer choice of new cars – Part II: Forecasting effects of feebates based on energy-efficiency. In: *Energy Policy*, Bd. 37, S. 1083–1094, doi:10.1016/j.enpol.2008.11.003.
- de Haan, P., Peters, A. und Scholz, R.W. (2007b): Reducing energy consumption in road transport through hybrid vehicles: Investigation of rebound effects, and possible effects of tax rebates. In: *Journal of Cleaner Production*, Bd. 15 (11-12), S. 1076–1084, doi:10.1016/j.jclepro.2006.05.025.
- Deconinck, G. (2008): An evaluation of two-way communication means for advanced metering in Flanders (Belgium). In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008. IMTC 2008. IEEE*, S. 900–905. doi:10.1109/IMTC.2008.4547164.
- Degraeve, Z. und Roodhooft, F. (1999): Improving the efficiency of the purchasing process using total cost of ownership information: The case of heating electrodes at Cockerill Sambre S.A. In: *European Journal of Operational Research*, Bd. 112 (1), S. 11, doi:10.1016/S0377-2217(97)00383-4.
- Delucchi, M. und Lipman, T. (2001): An analysis of the retail and lifecycle cost of battery-powered electric vehicles. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 6 (6), S. 371–404, doi:10.1016/S1361-9209(00)00031-6.
- Denardo, E.V. (1982): *Dynamic programming: Models and applications*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. ISBN 978-0-13-221507-7.
- Denkena, B., Rudzio, H., Eikötter, M. und Blümel, P. (2009): Total cost and benefit of ownership. In: *Industrie Management*, Bd. 25 (5), S. 35–38.
- Denstadli, J.M., Engebretsen, Ø., Hjorthol, R. und Vågane, L. (2006): Den nasjonale reisevaneundersøkelsen 2005 – nøkkelrapport. Techn. Ber. TØI rapport 844/2006, Transportøkonomisk institutt (TØI), Oslo. URL <http://www.toi.no/getfile.php/Publikasjoner/T%D8I%20rapporter/2006/844-2006/844-2006-e1.pdf>, zuletzt zugegriffen am 03.05.2011.
- Deutscher Wetterdienst (2010): Wetter und Klima – Klimadaten. URL http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation/0effentlichkeit/Klima__Umwelt/Klimadaten/kldaten__kostenfrei/ausgabe__mittelwerte__node.html?__nnn=true, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.

- Dhillon, B.S. (2009): *Life cycle costing for engineers*. CRC Press, Boca Raton, FL. ISBN 1439816883.
- Diamond, D. (2008): The impact of government incentives for hybrid-electric vehicles: Evidence from US states. In: *Energy Policy*, Bd. 37, S. 972–983, doi:10.1016/j.enpol.2008.09.094.
- Die Bundesbehörde der Schweizerischen Eidgenossenschaften (2007): Automobilsteuerverordnung. URL <http://www.admin.ch/ch/d/sr/6/641.511.de.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Dill, J. (2004): Estimating emissions reductions from accelerated vehicle retirement programs. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 9 (2), S. 87–106, doi:10.1016/S1361-9209(03)00072-5.
- Doggett, S. (2008): Spain taking steps to put 1 million electric vehicles on nation's roads by 2014. URL <http://blogs.edmunds.com/greencaradvisor/2008/07/spain-taking-steps-to-put-1-million-electric-vehicles-on-nations-roads-by-2014.html>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Downing, S. und Socie, D. (1982): Simple rainflow counting algorithms. In: *International Journal of Fatigue*, Bd. 4 (1), S. 31–40, doi:10.1016/0142-1123(82)90018-4.
- Drouilhet, S. und Johnson, B.L. (1997): A battery life prediction method for hybrid power applications. Techn. Ber., National Renewable Energy Laboratory.
- Dütschke, E., Schneider, U. und Hoffmann, J. (2011): Was erwarten künftige Nutzer von elektrischen Fahrzeugen? Zwischenanalyse der Nutzerbefragung aus den Modellregionen des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Techn. Ber., Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe/ Berlin.
- Duvall, M. (2002): Comparing the benefits and impacts of hybrid electric vehicle options for compact sedan and sport utility vehicles. Techn. Ber., Electric Power Research Institute.
- Duvall, M. (2004): Advanced batteries for electric-drive vehicles: A technology and cost-effectiveness assessment for battery electric vehicles, power assist hybrid electric vehicles, and plug-in hybrid electric vehicles. Techn. Ber., Electric Power Research Institute, Palo Alto.
- Duvall, M., Knipping, E., Alexander, M., Tonachel, L. und Clark, C. (2007a): Environmental assessment of plug-in hybrid electric vehicles – Volume 1: Nationwide greenhouse gas emissions. Techn. Ber., Electric Power Research Institute, Natural Resources Defense Council, Charles Clark Group. URL http://my.epri.com/portal/server.pt?Abstract_id=000000000001015325, zuletzt zugegriffen am 10.05.2011.
- Duvall, M., Knipping, E., Alexander, M., Tonachel, L. und Clark, C. (2007b): Environmental assessment of plug-in hybrid electric vehicles – Volume 2: United States air quality analysis based on AEO-2006 assumptions for 2030. Techn. Ber., Electric Power Research Institute, Natural Resources Defense Council, Charles Clark Group. URL http://my.epri.com/portal/server.pt?Abstract_id=000000000001015326, zuletzt zugegriffen am 10.05.2011.

- ECotality (2010): ECotality to provide Blink EV charging stations at select U.S. Best Buy stores as part of the EV project. URL http://www.ecotality.com/pressreleases/10112010_EC0tality_to_provide_Blink_EV_Charging_Stations_at_select_Best_Buy_stores.pdf, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Eden, T.U., Heber, C., Höpfner, U. und Voy, C. (1997): Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen. In: *Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 99 (9), S. 536–550.
- EDF (2009): Les tarifs électricité. URL <http://www.edf-bleuciel.fr/accueil/j-ai-besoin-d-energies/electricite/les-tarifs-electricite-141626.html>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Edquist, C. und Hommen, L. (2000): Public technology procurement and innovation theory. In: *Public technology procurement and innovation*, herausgegeben von C. Edquist, L. Hommen und L. Tsipouri, Kap. 1, S. 5–70. Kluwer Academic Publishers, Boston, Dodrecht, London. ISBN 0-7923-8685-X.
- Ehsani, M., Gao, Y. und Miller, J.M. (2007): Hybrid electric vehicles: Architecture and motor drives. In: *Proceedings of the IEEE*, Bd. 95 (4), S. 719–728, doi:10.1109/JPROC.2007.892492.
- Electrification Coalition (2010): Electrification roadmap. Techn. Ber., Electrification Coalition, Washington. URL <http://www.electrificationcoalition.org/reports/EC-Roadmap-screen.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Elgowainy, A., Han, J., Poch, L., Wang, M., Vyas, A., Mahalik, M. und Rousseau, A. (2010): Well-to-wheels analysis of energy use and greenhouse gas emissions of plug-in hybrid electric vehicles. Techn. Ber. ANL/ESD/10-1, Argonne National Laboratory. URL <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/629.PDF>, zuletzt zugegriffen am 10.05.2011.
- Eliasson, J. (2008): Lessons from the Stockholm congestion charging trial. In: *Transport Policy*, Bd. 15 (6), S. 395–404, doi:10.1016/j.tranpol.2008.12.004.
- Eliasson, J. (2009): A cost-benefit analysis of the Stockholm congestion charge system. In: *Transportation Research Part A*, Bd. 43 (4), S. 468–480, doi:10.1016/j.tra.2008.11.014.
- Ellram, L.M. (1993): A framework for total cost of ownership. In: *The International Journal of Logistics Management*, Bd. 4 (2), S. 49–60, doi:10.1108/09574099310804984.
- Ellram, L.M. (1995): Total cost of ownership: An analysis approach for purchasing. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Bd. 25 (8), S. 4–23, doi:10.1108/09600039510099928.
- Ellram, L.M. und Siferd, S.P. (1993): Purchasing: The cornerstone of the total cost of ownership concept. In: *Journal of Business Logistics*, Bd. 14 (1), S. 163–184.
- Emadi, A., Williamson, S.S. und Khaligh, A. (2006): Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric and fuel cell vehicular power systems. In: *IEEE Transactions on Power Electronics*, May 2006, Bd. 21 (3), S. 567–577, doi:10.1109/TPEL.2006.872378.

- Enzensberger, N. und Wietschel, M. (2003): Klassifizierung umweltpolitischer Instrumente und Bewertungskriterien. In: *Regenerative Energieträger: Der Beitrag und die Förderung regenerativer Energieträger im Rahmen einer Nachhaltigen Energieversorgung*, herausgegeben von M. Wietschel, W. Fichtner und O. Rentz, Kap. 3, S. 30–50. Ecomed Verlagsgesellschaft, doi:10.1002/9783527625543.
- Enzensberger, N., Wietschel, M. und Rentz, O. (2002): Policy instruments fostering wind energy projects – A multi-perspective evaluation approach. In: *Energy Policy*, Bd. 30 (9), S. 793–801, doi:10.1016/S0301-4215(01)00139-2.
- European Expert Group on Future Transport Fuels (2011): Future transport fuels. URL http://ec.europa.eu/transport/urban/vehicles/road/doc/2011_01_25_future_transport_fuels_report.pdf, zuletzt zugegriffen am 12.05.2011.
- Evatran (2010): Hands-free power. URL <http://www.pluglesspower.com>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Fährnich, K.P. und Opitz, M. (2006): Service Engineering – Entwicklungspfad und Bild einer jungen Disziplin. In: *Service Engineering*, S. 85–112. Springer-Verlag.
- Farmer, C., Hines, P., Dowds, J. und Blumsack, S. (2010): Modeling the impact of increasing PHEV loads on the distribution infrastructure. Techn. Ber., University of Vermont, Vermont.
- Farrell, A.E., Keith, D.W. und Corbett, J.J. (2003): A strategy for introducing hydrogen into transportation. In: *Energy Policy*, Bd. 31 (13), S. 1357–1367, doi:10.1016/S0301-4215(02)00195-7.
- FedEx (2010): FedEx introduces first all-electric trucks to be used in the U. S. parcel delivery business. URL <http://news.van.fedex.com/node/16475>, zuletzt zugegriffen am 01.05.2011.
- Ferrin, B.G. und Plank, R.E. (2002): Total cost of ownership models: An exploratory study. In: *The Journal of Supply Chain Management*, Bd. 38 (3), S. 18–29, doi:10.1111/j.1745-493X.2002.tb00132.x.
- Fideus (2009): Freight innovative delivery of goods in european urban spaces. URL http://www.hannover.de/data/download/doku/fideus_brosch_engl.pdf, zuletzt zugegriffen am 01.05.2011.
- Fildes, M., Nelson, S., Sener, N., Steiner, F., Suntharasaj, P., Tarman, R.T. und Harmon, R.R. (2007): Marketing opportunity analysis for Daimler Chrysler's Sprinter van plug-in hybrid electric vehicle. In: *PICMET '07 – 2007 Portland International Conference on Management of Engineering & Technology*, S. 1797–1810. IEEE, doi:10.1109/PICMET.2007.4349506.
- Fischer, M., Werber, M. und Schwartz, P.V. (2009): Batteries: Higher energy density than gasoline? In: *Energy Policy*, Bd. 37 (7), S. 2639–2641, doi:10.1016/j.enpol.2009.02.030.
- Follmer, R., Engelhardt, K., Gilberg, R., Kunert, U., Kloas, J. und Kuhfeld, H. (2003): Mobilität in Deutschland 2002 – Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten. Techn. Ber., infas – Institut für angewandte Sozialwissenschaft, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin.

- Follmer, R., Gruschwitz, D., Jesske, B., Quandt, S., Lenz, B., Nobis, C., Köhler, K. und Mehlin, M. (2010): *Mobilität in Deutschland 2008 – Ergebnisbericht*. Techn. Ber., infas – Institut für angewandte Sozialwissenschaft, Institut für Verkehrsforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V., Berlin.
- Follmer, R., Kunert, U., Kloas, J. und Kuhfeld, H. (2004): *Mobilität in Deutschland – Ergebnisbericht*. Techn. Ber., infas – Institut für angewandte Sozialwissenschaft, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- u. Verkehrswesen (Hg.) (2005): *Empfehlungen für Anlagen des ruhenden Verkehrs: EAR 05*. Kirschbaum, Köln, 2005. Aufl. ISBN 978-3-7812-1632-7.
- Franz, S. (2004): Grundlagen des ökonomischen Ansatzes: Das Erklärungskonzept des Homo Oeconomicus. In: *International Economics*, herausgegeben von U. Potsdam, Nr. 2004-02. W. Fuhrmann, 2. Aufl.
- Frey, H. (2009): Lastmanagement mit intelligenten Tarifen. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, Bd. 126 (10), S. 358–364, doi:10.1007/s00502-009-0677-6.
- Fricker, R. (2010): Evaluation von Förderkonzepten für Elektrofahrzeuge. Bachelorarbeit, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Frykblom, P. (1997): Hypothetical question modes and real willingness to pay. In: *Journal of Environmental Economics and Management*, Bd. 34 (3), S. 275–287, doi:10.1006/jeem.1997.1015.
- Gaines, L. und Cuenca, R. (2000): Costs of lithium-ion batteries for vehicles. Techn. Ber., Center for Transportation, Research Argonne National Laboratory, Argonne, IL. URL <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/149.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Gallagher, K.S. und Muehlegger, E.J. (2008): Giving green to get green: Incentives and consumer adoption of hybrid vehicle technology. Techn. Ber., John F. Kennedy School of Government, Harvard University. URL http://belfercenter.ksg.harvard.edu/publication/18063/giving_green_to_get_green.html, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Gärling, A. und Thøgersen, J. (2001): Marketing of electric vehicles. In: *Business Strategy and the Environment*, Bd. 10, S. 53–65, doi:10.1002/1099-0836(200101/02).
- Geißdörfer, K. (2009): *Total Cost of Ownership (TCO) und Life Cycle Costing (LCC) – Einsatz und Modelle: Ein Vergleich zwischen Deutschland und USA*. LIT-Verlag, Berlin. ISBN 978-3-8258-1863-0.
- Gellings, C. (1985): The concept of demand-side management for electric utilities. In: *Proceedings of the IEEE*, Bd. 73 (10), S. 1468–1470, doi:10.1109/PROC.1985.13318.
- Gerschler, J.B., Hammouche, A. und Sauer, D.U. (2006): Investigation of cycle-life of lithium-ion batteries by means of electrochemical impedance spectroscopy. In: *Technische Mitteilungen*, Bd. 99 (1/2), S. 214–222.

- Giblin, S. und McNabola, A. (2009): Modelling the impacts of a carbon emission-differentiated vehicle tax system on CO₂ emissions intensity from new vehicle purchases in Ireland. In: *Energy Policy*, Bd. 37 (4), S. 1404–1411, doi:10.1016/j.enpol.2008.11.047.
- Gnann, T. (2010): Techno-ökonomische Bewertung der Vorkonditionierung von Elektrofahrzeugen. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe.
- Gnann, T., Kley, F. und Wietschel, M. (2010): Thermische Vorkonditionierung. In: *Mobility 2.0*, Bd. Okt., S. 54–57.
- Gonder, J., Markel, T., Simpson, A. und Thornton, M. (2007): Using GPS travel data to assess the real world driving energy use of plug-in hybrid electric vehicles. Techn. Ber., National Renewable Energy Laboratory.
- Gong, Q., Li, Y. und Peng, Z.R. (2008): Trip-based optimal power management of plug-in hybrid electric vehicles. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 57 (6), S. 3393–3401, doi:10.1109/TVT.2008.921622.
- Götze, U. und Weber, T. (2008): Total cost of ownership. In: *Zeitschrift für Planung & Unternehmenssteuerung*, Bd. 19 (2), S. 249–257, doi:10.1007/s00187-008-0054-3.
- Gramlich, E.M. (1994): Infrastructure investment: A review essay. In: *Journal of Economic Literature*, Bd. XXXII, S. 1176–1196.
- Greene, D.L. (1985): Estimating daily vehicle usage distributions and the implications for limited-range vehicles. In: *Transportation Research Part B: Methodological*, Bd. 19 (4), S. 347–358, doi:10.1016/0191-2615(85)90041-4.
- Greene, D.L., Patterson, P.D., Sing, M. und Li, J. (2005): Feebates, rebates and gas-guzzler taxes: A study of incentives for increased fuel economy. In: *Energy Policy*, Bd. 33 (6), S. 757–775, doi:10.1016/j.enpol.2003.10.003.
- Großmann, H. (2005): Heizung, Lüftung, Klimatisierung von PKW. In: *Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort*, herausgegeben von W.H. Hucho, S. 757–805. Vieweg+Teubner, 5. Aufl. ISBN 978-3-528-03959-2.
- Grüneweg, T. (2007): Umsonst im Sperrbezirk. URL <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,494250,00.html>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Guille, C. und Gross, G. (2009): A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation. In: *Energy Policy*, Bd. 37 (11), S. 4379–4390, doi:10.1016/j.enpol.2009.05.053.
- Hannig, F., Smolinka, T., Bretschneider, P., Nicolai, S., Krüger, S., Meißner, F. und Voigt, M. (2009): Stand und Entwicklungspotenzial der Speichertechniken für Elektroenergie – Ableitung von Anforderungen an und Auswirkungen auf die Investitionsgüterindustrie. Techn. Ber., Fraunhofer-ISE, Fraunhofer-AST, VK Partner.
- Harriman, N.F. (1928): *Principles of scientific purchasing*. McGraw-Hill, New York.

- Hatton, C., Beella, S., Brezet, J. und Wijnia, Y. (2009): Charging stations for urban settings the design of a product platform for electric vehicle infrastructure in Dutch cities. In: *Electric Vehicle Symposium 24, 13-16 Mai 2009*, S. 1–13. Starvanger, Norwegen. URL <http://www.e-mobile.ch/pdf/2010/EVS-24-1230095.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Hayashi, Y., Kato, H. und Teodoro, R.V.R. (2001): A model system for the assessment of the effects of car and fuel green taxes on CO₂ emission. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 6 (2), S. 123–139, doi:10.1016/S1361-9209(00)00021-3.
- Held, A. (2007): *Politikinstrumente zur Förderung erneuerbarer Energien: Grundlagen, Wirksamkeit und ökonomische Bewertung*. VDM Verlag Dr. Müller.
- Held, M. (2011): Current LCA results and need for further research. In: *43rd LCA Discussion Forum, Life Cycle Assessment of Electromobility*. Zürich. URL [http://www.lcaforum.ch/portals/0/df43/DF43-01%20Michael%20Held%20\(v2\).pdf](http://www.lcaforum.ch/portals/0/df43/DF43-01%20Michael%20Held%20(v2).pdf), zuletzt zugegriffen am 09.06.2011.
- Helms, H. und Hanusch, J. (2010): Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen. Techn. Ber., Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg.
- Hensley, R., Knupfer, S. und Pinner, D. (2009): Electrify cars: How three industries will evolve. In: *McKinsey Quarterly*, 3, S. 87–96. McKinsey.
- Hermeling, C. und Mennel, T. (2008): Sensitivity analysis in economic simulations: a systematic approach. Techn. Ber., Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung, Mannheim.
- Hillier, F.S. und Lieberman, G.J. (2005): *Introduction to operations research*. McGraw-Hill, Boston, 8. Aufl.
- H. M. Revenue & Customs (2009): Hydrocarbon oils: duty rates. URL <http://www.hmrc.gov.uk/budget2009/bn66.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- H. M. Revenue & Customs (2010): Money, tax and benefits VAT. URL http://www.direct.gov.uk/en/MoneyTaxAndBenefits/Taxes/BeginnersGuideToTax/DG_4015895, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Hoffmann, J. (2010): Does the use of battery electric vehicles change attitudes and behaviour? In: *Proceedings of 27. International Congress of Applied Psychology*. Melbourne, Australia.
- Högberg, M. (2007): Eco-driving? A discrete choice experiment on valuation of car attributes. Masterarbeit, Lund University, Lund. URL <http://www.vti.se/7860.epibrw>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Hu, A.P. (2009): *Wireless/ contactless power supply – Inductively coupled resonant converter solutions*. VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken. ISBN 978-3639116731.
- Huschle, J. (2010): Realisierbarkeit von Elektromobilität im deutschen Wirtschaftsverkehr. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe.
- Iberdrola (2010): Condiciones de la oferta. URL <https://www.iberdrola.es/webibd/corporativa/iberdrola?IDPAG=ESWEBCLIHOGOLEDISCON>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.

- Institut national de la statistique et des études économiques (2010): Enquête Nationale Transports et Déplacements 2007-2008. URL <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=sources/ope-enq-transports-deplac-2007.htm>, zuletzt zugegriffen am 03.05.2011.
- Institute for Social-Ecological Research (2009): Future Fleet – Integrating electric and plug-in hybrid cars in company vehicle fleets. URL <http://www.isoe.de/english/projects/futurefleet.htm>, zuletzt zugegriffen am 01.05.2011.
- International Energy Agency (2009): *Transport, energy and CO₂: Moving toward sustainability*. ISBN 978-92-64-07316-6. URL <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/transport2009.pdf>, zuletzt zugegriffen am 09.05.2011.
- International Organization for Standardization (2010): English country names and code elements. URL http://www.iso.org/iso/english_country_names_and_code_elements, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Irish Department for Transport (2008): Government announces plans for the electrification of Irish motoring. URL <http://www.transport.ie/pressRelease.aspx?Id=61>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Jackson, D.W. und Ostrom, L.L. (1980): Life cycle costing in industrial purchasing. In: *Journal of Purchasing and Materials Management*, Bd. 16 (4), S. 8–12.
- James, R., Richels, R., Blanford, G. und Gehl, S. (2007): The power to reduce CO₂ emissions. Techn. Ber., Electric Power Research Institute. URL <http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/AboutEPRI/DiscussionPaper2007.pdf>, zuletzt zugegriffen am 10.05.2011.
- Janßen, T. und Vollmer, R. (2005): Kleinräumige Wirtschaftsverkehrsmodelle. Techn. Ber. FE-Nr 70.0689/2002, Ingenieurgruppe IVV, Aachen.
- Jeß, H. (2011): BDEW zum Zwischenbericht der NPE: Politik muss Investitionssicherheit schaffen. URL http://www.bdew.de/bdew.nsf/id/DE_20101130_PM_Politik_muss_Investitionssicherheit_schaffen?open&Highlight=, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Jochem, P., Gerbracht, H., Ihrig, J. und Fichtner, W. (2010): Integrating battery electric vehicles into the german electricity market. In: *Proceedings of 12th World Conference of Transport Research Society*. Lisbon.
- Johnson, K.C. (2006): Feebates: An effective regulatory instrument for cost-constrained environmental policy. In: *Energy Policy*, Bd. 34 (18), S. 3965–3976, doi:10.1016/j.enpol.2005.10.005.
- Jorgensen, K. (2008): Technologies for electric, hybrid and hydrogen vehicles: Electricity from renewable energy sources in transport. In: *Utilities Policy*, Bd. 16 (2), S. 72–79, doi:10.1016/j.jup.2007.11.005.
- Jossen, A., Phan, T.B., Vojtech, S. und Döring, H. (2001): Der Memory-Effekt – Ursache, Auswirkung und Vermeidung. In: *Vortrag auf dem 8. Entwicklerforum „Batterien, Ladekonzepte und Stromversorgungen“*. URL <http://www.basytec.de/Literatur/memoryeffekt/memory.html>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.

- Jossen, A. und Weydanz, W. (2006): *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*. Reichardt, Untermeitingen, 1. Aufl. ISBN 978-3-939359-11-1.
- Jungst, R.G., Nagasubramanian, G., Case, H.L., Liaw, B.Y., Urbina, A., Paez, T.L. und Doughty, D.H. (2003): Accelerated calendar and pulse life analysis of lithium-ion cells. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 119-121, S. 870–873, doi:10.1016/S0378-7753(03)00193-9.
- Kalhammer, F.R., Kopf, B.M., Swan, D.H., Roan, V.P. und Walsh, M.P. (2007): Status and prospects for zero emissions vehicle technology. Report of the ARB independent expert panel 2007. Techn. Ber., State of California Air Resources Board.
- Kalinowska, D., Keser, K. und Kunert, U. (2009): CO₂-Besteuerung von Pkws in Europa auf dem Vormarsch. In: *Wochenbericht des DIW*, Bd. 76 (27/28), S. 438–450. URL <http://ideas.repec.org/a/diw/diwwob/76-27-1.html>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Kang, J.E. und Recker, W. (2009): An activity-based assessment of the potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on energy and emissions using 1-day travel data. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 14 (8), S. 541–556, doi:10.1016/j.trd.2009.07.012.
- Karlsson, S. (2009): Optimal size of PHEV batteries from a consumer perspective – estimation using car movement data and implications for data harvesting. In: *World Electric Vehicle Journal*, Bd. 3, S. 1–9.
- Kaschub, T., Mültin, M., Fichtner, W., Schmeck, H. und Kessler, A. (2010): Intelligentes Laden von batterieelektrischen Fahrzeugen im Kontext eines Stadtviertels. In: *Tagungsbandbeitrag VDE Kongress*. Leipzig.
- Kemp, R. (1997): *Environmental policy and technical change: A comparison of the technological impact of policy instruments*. Edward Elgar, Cheltenham, UK, doi:10.1017/S0376892998290126.
- Kempton, W. und Tomić, J. (2005): Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 144 (1), S. 268–279, doi:10.1016/j.jpowsour.2004.12.025.
- Kempton, W., Tomić, J., Letendre, S., Brooks, A. und Lipman, T.E. (2001): Vehicle-to-grid power: Battery, hybrid, and fuel cell vehicles as resources for distributed electric power in California. Working paper, Institute of Transportation Studies, UC Davis.
- Kendall, D.G. (1953): Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of the imbedded markov chain. In: *The Annals of Mathematical Statistics*, Bd. 24 (3), S. 338–354.
- Kendall, G. (2008): Plugged in. The end of oil age. URL http://assets.panda.org/downloads/plugged_in_full_report___final.pdf, zuletzt zugegriffen am 01.05.2011.
- Khan, I.A. (1994): Battery chargers for electric and hybrid vehicles. In: *Power Electronics in Transportation; 20-21 Oct 1994*, S. 103–112. General Motors, Dearborn, MI, USA, doi:10.1109/PET.1994.572365.

- Kiefer, S. (2009): Ganz ohne Kabelsalat. In: *Sonne, Wind & Wärme*, Bd. 16/2009, S. 32–34.
- King, J. (2007): The King review of low-carbon cars – Part 1: the potential for CO₂ reduction. Techn. Ber., Office of Public Sector Information, London. URL <http://hm-treasury.gov.uk/king>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Kintner-Meyer, M., Schneider, K. und Pratt, R. (2007): Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional U.S. power grids. Part 1: Technical Assessment. Techn. Ber., Pacific Northwest National Laboratory.
- Kirby, B., Hirst, E. und Vancoevering, J. (1995): Unbundling electric generation and transmission services. In: *Energy*, Bd. 20 (12), S. 1191–1203, doi:10.1016/0360-5442(95)00060-T.
- Kirsch, L. und Singh, H. (1995): Pricing ancillary electric power services. In: *The Electricity Journal*, Bd. 8 (8), S. 28–36, doi:10.1016/1040-6190(95)90014-4.
- Kitamura, R. und Sperling, D. (1987): Refueling behavior of automobile drivers. In: *Transportation Research Part A: General*, Bd. 21 (3), S. 235–245, doi:10.1016/0191-2607(87)90017-3.
- Kley, F., Lerch, C. und Dallinger, D. (2011): New business models for electric cars – a holistic approach. In: *Energy Policy*, Bd. 39 (6), S. 3392–3403, doi:10.1016/j.enpol.2011.03.036.
- Kley, F., Wietschel, M. und Dallinger, D. (2012, in Druck): Evaluation of european electric vehicle support schemes. In: *Paving the Road to Sustainable Transport: Governance and Innovation in Low-Carbon Vehicles*, herausgegeben von M. Nilsson, K. Hillman, A. Rickne und T. Magnusson, Routledge Studies in Ecological Economics, Kap. 8. Routledge. ISBN 978-0-415-68360-9.
- Klobasa, M. (2007): Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten. Dissertation, ETH Zürich.
- Kölling, C. (2010): Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von Elektromobilität anhand realer Fahrprofile. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe.
- Kraftfahrtbundesamt (2009): Fahrzeugzulassungen Bestand Halter. URL http://www.kbashop.de/webapp/wcs/stores/servlet/ProductDisplay?catalogId=10051&categoryId=10014&storeId=10001&productId=16552&langId=-3&parent_category_rn=10014&top_category=10002, zuletzt zugegriffen am 01.05.2011.
- Kromer, M.A. und Heywood, J.B. (2007): Electric powertrains: Opportunities and challenges in the U. S. light-duty vehicle fleet. Techn. Ber., Sloan Automotive Laboratory.
- Kummer, S. (2006): *Einführung in die Verkehrswirtschaft*, Bd. 2. UTB, Stuttgart. ISBN 9783825283360.
- Kümpers, J. (2009): Batterietechnologien für elektrische Antriebssysteme. In: *Euroforum Elektronik-Systeme im Automobil, München, 9-12 Februar 2009*. Johnson Controls Saft Advanced Power Solutions GmbH.

- Kurani, K.S., Turrentine, T. und Sperling, D. (1996): Testing electric vehicle demand in 'hybrid households' using a reflexive survey. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 1 (2), S. 131–150, doi:10.1016/S1361-9209(96)00007-7.
- Kurani, K.S. und Turrentine, T.S. (2004): Analysis of consumer response to automobile regulation and technological change in support of California climate change rulemaking. Research Report UCD-ITS-RR-04-21, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis. URL http://pubs.its.ucdavis.edu/publication_detail.php?id=183, zuletzt zugegriffen am 15.05.2011.
- Larminie, J. und Dicks, A. (2003): *Fuel cell systems explained*. Wiley, Chichester, UK, 2. Aufl. ISBN 0-470-84857-X.
- Lay, G., Schroeter, M. und Biege, S. (2009): Service-based business concepts: A typology for business-to-business markets. In: *European Management Journal*, Bd. 27 (6), S. 442–455, doi:10.1016/j.emj.2009.04.002.
- Leamer, E.E. (1985): Sensitivity analyses would help. In: *The American Economic Review*, Bd. 75 (3), S. 308–313.
- Leenders, M.R. und Fearon, H.E. (2008): Developing purchasing's foundation. In: *The Journal of Supply Chain Management*, Bd. 44 (2), S. 17–27, doi:10.1111/j.1745-493X.2008.00052.x.
- Lehmann-Ortega, L. und Schoettl, J.M. (2005): From buzzword to managerial tool: The role of business models in strategic innovation. In: *CLADEA, Santiago de Chile, October 2005*.
- Leifeld, A. (1998): *Bedarfsorientierter Güter- und Personenverkehr: Substitutionsmöglichkeiten für den Pkw-Wirtschaftsverkehr in Städten*. Schriftenreihe A des Instituts für Straßen- und Schienenverkehr. Inst. für Straßen- und Schienenverkehr, Berlin. ISBN 3-7983-1783-6.
- Levine, R. und Renelt, D. (1992): A sensitivity analysis of cross-country growth regressions. In: *The American Economic Review*, Bd. 82 (4), S. 942–963.
- Li, J., Murphy, E., Winnick, J. und Kohl, P.A. (2001): Studies on the cycle life of commercial lithium ion batteries during rapid charge-discharge cycling. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 102 (1-2), S. 294–301, doi:10.1016/S0378-7753(01)00821-7.
- Liaw, B.Y. und Dubarry, M. (2007): From driving cycle analysis to understanding battery performance in real-life electric hybrid vehicle operation. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 174 (1), S. 76–88, doi:10.1016/j.jpowsour.2007.06.010.
- Lin, J. und Niemeier, D.A. (2003): Regional driving characteristics, regional driving cycles. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 8 (5), S. 361–381, doi:10.1016/S1361-9209(03)00022-1.
- Linden, D. und Reddy, T.B. (Hg.) (2002): *Handbook of batteries*. McGraw-Hill, New York, 3. Aufl. ISBN 0-07-135978-8.

- Link, J., Büttner, M., Dallinger, D. und Richter, J. (2010a): Optimisation algorithms for the charge dispatch of plug-in vehicles based on variable tariffs. Working Papers „Sustainability and Innovation“ S3/2010, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe.
- Link, J., Eberhardt, T., Benoit, P., Noeren, D. und Wittwer, C. (2010b): Infrastructure: Comparison of stationary and mobile metering concepts for electric vehicles. In: *Proceedings of 2nd European Conference Smart Grids and E-Mobility, 20-21 Oktober 2010*, S. 102–109. Brüssel, Belgien.
- Lohbeck, W. (2010): E-Autos – ein Zukunftsgeschäft? URL <http://blog.greenpeace.de/blog/2010/06/26/zukunftsgeschaeft-e-auto/>, zuletzt zugegriffen am 26.05.2011.
- Lombardo, M. und Behrens, G. (1987): Survey of vehicle refueling. In: *SAE government-industry meeting and exhibition, 18 Mai 1987*. Society of Automotive Engineers, Washington, DC.
- Lovdata (2009): Vedtak om særavgifter til statskassen for budsjetterminen 2009. URL <http://www.lovdata.no/for/sf/sv/td-20081127-1295-004.html>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Mackay-Fisher, K. (2010): Understanding infrastructure investments. URL <http://www.ceoforum.com.au/article-print.cfm?cid=6309&t=/Kirsty-Mackay-Fisher--Berkley-Group/Understanding-infrastructure-investments>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Magnor, D., Gerschler, J.B., Ecker, M., Merk, P. und Sauer, D.U. (2009): Concept of a battery aging model for lithium-ion batteries considering the lifetime dependency on the operation strategy. In: *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 21-25 September 2009*, S. 1–7.
- Malorny, C. und Krieger, A. (2010): Electric vehicles in megacities. URL <http://www.dietraumhausbauer.de/downloads/Electricvehicles.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Maly, D.K. und Swan, K.S. (1995): Optimal battery energy storage system (BESS) charge scheduling with dynamic programming. In: *IEEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, Bd. 142 (6), S. 453, doi:10.1049/ip-smt:19951929.
- Mandell, S. (2009): Policies towards a more efficient car fleet. In: *Energy Policy*, Bd. 37 (12), S. 5184–5191, doi:10.1016/j.enpol.2009.07.068.
- Markel, T. (2010): Plug-in electric vehicle infrastructure: A foundation for electrified transportation. Techn. Ber. April, National Renewable Energy Laboratory.
- Markel, T. und Simpson, A. (2006): Cost-benefit analysis of plug-in hybrid electric vehicle technology. In: *World Electric Vehicle Journal*, Bd. 1, S. 1–8.
- Markeset, T. und Kumar, U. (2005): Product support strategy: Conventional versus functional products. In: *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Bd. 11 (1), S. 53–67, doi:10.1108/13552510510589370.
- Marner, T. (2004): Die Problematik innerstädtischer Staus – ein spieltheoretischer Ansatz. In: *Politische Weichenstellungen für den Verkehr: Verkehrsplanung, Bepreisung, Deregulierung. Themenschwerpunkte der Studienkreistagung 2004*, herausgegeben von K.H. Hartwig, Vorträge und

- Studien aus dem Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität Münster, S. 61–108. Institut für Verkehrswissenschaften an der Universität Münster, Göttingen.
- Matzen, D., Ronald, A. und Andreasen, M.M. (2005): Product/ service-systems: Proposal for models and terminology. In: *16. Symposium DESIGN FOR X, 13-14 Oktober 2005*. Neukirchen.
- May, J.W. und Mattila, M. (2009): Plugging in: A stakeholder investment guide for public electric-vehicle charging infrastructure. Techn. Ber., Rocky Mountain Institute.
- Mayor of London (2009): An electric vehicle delivery plan for London. URL <http://www.london.gov.uk/archive/mayor/publications/2009/docs/electric-vehicles-plan.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Mayor's Office of Long-Term Planning and Sustainability (2010): Exploring electric vehicle adoption in New York City. URL http://nytelecom.vo.llnwd.net/o15/agencies/planyc2030/pdf/electric_vehicle_adoption_study_2010-02.pdf, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Mazza, P. und Hammerschlag, R. (2005): Wind-to-wheel energy assessment. Techn. Ber., Institute for Lifecycle Environmental Assessment.
- Meier-Eisenmann, E., Moreni, G. und Simon, M. (2001): The utilisation of recharging stations and reserved parking places. Techn. Ber., Swiss Energy. URL http://www.park-charge.ch/documents/Public_chargingstations.pdf, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Meinhardt, M., Burger, B. und Engler, A. (2007): PV-Systemtechnik – Motor der Kostenreduktion für die photovoltaische Stromerzeugung. URL http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2007/th2007_05_2.pdf, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Melaina, M. (2003): Initiating hydrogen infrastructures: preliminary analysis of a sufficient number of initial hydrogen stations in the US. In: *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 28 (7), S. 743–755, doi:10.1016/S0360-3199(02)00240-9.
- Michaelis, P. (1996): *Ökonomische Instrumente in der Umweltpolitik – Eine anwendungsorientierte Einführung*. Physica Verlag, Heidelberg. ISBN 3-7908-0916-0.
- Milligan, B. (1999): Tracking total cost of ownership proves elusive. In: *Purchasing*, Bd. 127 (3), S. 22–23.
- Ministry of Transport and Communications Finland, Finnish National Road Administration und Finnish Rail Administration (2010): National travel survey 2004-2005. URL http://www.htt.fi/english/pts_description.htm, zuletzt zugegriffen am 03.05.2011.
- Moawad, A., Singh, G., Hagspie, S., Fella, M. und Rousseau, A. (2009): Impact of real world drive cycles on PHEV fuel efficiency and cost for different powertrain and battery characteristics. In: *Electric Vehicle Symposium 24, 13-16 Mai 2009*, S. 1–10. Starvanger, Norwegen.
- Mobilitätspanel (2006): Mobilitätspanel Deutschland. Projektbearbeitung durch das Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (TH).

- Morrow, K., Karner, D. und Francfort, J. (2008): Plug-in hybrid electric vehicle charging infrastructure review. Techn. Ber., Idaho National Laboratory.
- NAF (2010): Bilavgifter fra 1. januar 2010. URL <http://naf.no/no/Eie-Bil/Avgifter/Endringer-i-bilavgifter-fra-1januar/>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Nailis, D. und Ritzau, M. (2006): Studie zur Marktgestaltung der Regel- und Ausgleichsenergie vor dem Hintergrund des neuen EnWG. Techn. Ber., Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, Aachen.
- Narkiewicz, W. (2000): *The development of prime number theory*. Springer. ISBN 978-3-540-66289-1.
- Nationale Plattform Elektromobilität (2011): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Techn. Ber., Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Berlin. URL http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_emob_2.pdf, zuletzt zugegriffen am 29.05.2011.
- Neenan, B., Cromie, R. und Wheat, T. (2010): Characterizing consumers' interest in and infrastructure expectations for electric vehicles: Research design and survey results. Techn. Ber., Electric Power Research Institute.
- Nemry, F., Leduc, G. und Muñoz, A. (2009a): Plug-in hybrid and battery-electric vehicles: State of the research and development and comparative analysis of energy and cost efficiency. Techn. Ber., JRC Technical Notes. URL http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC54699_TN.pdf, zuletzt zugegriffen am 10.05.2011.
- Nemry, F., Vanherle, K., Zimmer, W., Uihlein, A., Genty, A., Rueda-Cantuche, J.M., Mongelli, I., Neuwahl, F., Delgado, L., Hacker, F., Seum, S., Buchert, M. und Schade, W. (2009b): Feebate and scrappage policy instruments: Environmental and economic impacts for the EU27. Techn. Ber., European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies. URL <http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC51094.pdf>, zuletzt zugegriffen am 10.05.2011.
- Neumann, K. und Morlock, M. (1993): *Operations research*. Hanser, München, Wien. ISBN 3-446-15771-9.
- Nissan (2009): Nissan and Sumitomo to initiate 'second-life' business for electric-car batteries. URL http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2009/_STORY/091020-03-e.html, zuletzt zugegriffen am 02.05.2011.
- Nissan (2010): Non-contact charging. URL <http://www.nissan-global.com/en/technology/introduction/details/charging>, zuletzt zugegriffen am 25.08.2010.
- Nitsch, J. (2007): Ausbaustrategie Erneuerbare Energien. Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick bis 2050. Techn. Ber., Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stuttgart.
- Nobis, C. und Luley, T. (2007): Personenwirtschaftsverkehr in Deutschland – Empirische Befunde auf Grundlage der KiD 2002 und MiD 2002. In: *Wirtschaftsverkehr, alles in Bewegung?*, herausgegeben

- von C. Nobis und B. Lenz, *Studien zur Mobilitäts- und Verkehrsforschung*, Bd. 14, S. 131–152. MetaGIS. ISBN 978-3-936438-14-7.
- Norfleet, N. (2009): U.S. Postal Service to test a repurposed electric vehicle fleet. URL <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2010/03/03/AR2010030304085.html>, zuletzt zugegriffen am 01.05.2011.
- NPE (2010): Die deutsche Normungs-Roadmap. Techn. Ber., Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Berlin. URL http://www.elektromobilitaet.din.de/sixcms_upload/media/3310/Normung-Roadmap_Elektromobilitaet.pdf, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- NPE (2011): Kosten für öffentliche Ladestationen am Wohnort sowie zentraler Stelle. Datenblatt.
- Nørgaard, P. und Christensen, L. (2009): Estimated impact of the uncertainties in the driving patterns on the power system flexibility provided by electrical vehicles. Techn. Ber., Technical University of Denmark.
- Offer, G., Contestabile, M., Howey, D., Clague, R. und Brandon, N. (2011): Techno-economic and behavioural analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system in the UK. In: *Energy Policy*, Bd. 39 (4), S. 1950–1939, doi:10.1016/j.enpol.2011.01.006.
- Offer, G., Howey, D., Contestabile, M., Clague, R. und Brandon, N. (2010): Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. In: *Energy Policy*, Bd. 38 (1), S. 24–29, doi:10.1016/j.enpol.2009.08.040.
- Paetz, A.G. und Dütschke, E. (2011): Dynamische Stromtarife – nur gesetzliche Pflicht oder Kundenwunsch? In: *SIV.news*, Bd. 1/2011, S. 47–49.
- Pander, J. (2010): Die elektrische Autobahn. URL <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,druck-678168,00.html>, zuletzt zugegriffen am 01.05.2011.
- Parkkinen, T. (2008): Detailed information on environment-related taxes and charges in Finland. Techn. Ber., Ministry of the Environment, Finland.
- Pehnt, M., Höpfner, U. und Merten, F. (2007): Elektromobilität und erneuerbare Energien. Techn. Ber., ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung und Wuppertal Institut, Heidelberg, Wuppertal.
- Persky, J. (1995): Retrospectives: The ethology of homo economicus. In: *The Journal of Economic Perspectives*, Bd. 9 (2), S. 221–231.
- Pesaran, A., Markel, T., Tatara, H.S. und Howell, D. (2007): Battery requirements for plug-in hybrid electric vehicles – Analysis and rationale. In: *23rd International Electric Vehicle Symposium, 2-5 Dezember 2007*. Anaheim, California. URL <http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/42240.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.

- Peters, A. und Dütschke, E. (2010): Zur Nutzerakzeptanz von Elektromobilität – Analyse aus Expertensicht. Techn. Ber., Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe. URL <http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn:nbn:de:0011-n-1450132.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Peters, A., Mueller, M.G., de Haan, P. und Scholz, R.W. (2008): Feebates promoting energy-efficient cars: Design options to address more consumers and possible counteracting effects. In: *Energy Policy*, Bd. 36 (4), S. 1355–1365, doi:10.1016/j.enpol.2007.12.015.
- Peterson, S.B., Apt, J. und Whitacre, J.F. (2010a): Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 195 (8), S. 2385–2392, doi:10.1016/j.jpowsour.2009.10.010.
- Peterson, S.B., Whitacre, J.F. und Apt, J. (2010b): The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for grid storage. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 195 (8), S. 2377–2384, doi:10.1016/j.jpowsour.2009.09.070.
- Postbus51 (2009): Wat zijn de tarieven van de energiebelasting? URL <http://www.postbus51.nl/nl/home/themas/consumentenzaken/energie-en-waterleiding/energiebelasting/wat-zijn-de-tarieven-van-de-energiebelasting.html>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Rajashekara, K. (1994): History of electric vehicles in General Motors. In: *IEEE Transactions on Industry Applications*, Bd. 30 (4), S. 897–904, doi:10.1109/28.297905.
- Rao, V.R. (Hg.) (2009): *Handbook of pricing research in marketing*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK. ISBN 978-1847202406.
- Renault-Nissan (2010): E.Leclerc and the Renault-Nissan alliance to place EV chargers in nearly 500 E.Leclerc centers by 2015. URL http://www.media.renault.com//data/doc/mediarenaultcom/en/23841_CP_E_Leclerc-Renault_GB_F00F4840.pdf, zuletzt zugegriffen am 02.07.2010.
- Rentz, O., Wietschel, M. und Enzensberger, N. (2001): Vergleichender Überblick über energiepolitische Instrumente für kleinere und mittlere Unternehmen aus dem Bereich der Autoreparaturlackierung. Techn. Ber., Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion, Karlsruhe. Endbericht eines Forschungsvorhabens im Auftrag des Büros für Technikfolgen-Abschätzungen beim Deutschen Bundestag.
- Revenue Irish Tax and Customs (2009): Vehicle registration tax – VRT1. URL <http://www.revenue.ie/en/tax/vrt/leaflets/vrt1.html>, zuletzt zugegriffen am 21.02.2010.
- Ritchie, A. und Howard, W. (2006): Recent developments and likely advances in lithium-ion batteries. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 162 (2), S. 809–812, doi:10.1016/j.jpowsour.2005.07.014.
- Romm, J. (2006): The car and fuel of the future. In: *Energy Policy*, Bd. 34 (17), S. 2609–2614, doi:10.1016/j.enpol.2005.06.025.
- Rosenkranz, C.A., Köhler, U. und Liska, J.L. (2007): Modern battery systems for plug-in hybrid electric vehicles. In: *23rd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS-23), 2-5 Dezember 2007*. Anaheim.

- Royal Academy of Engineering (2010): *Electric vehicles: charged with potential*. Royal Academy of Engineering, London. ISBN 1-903496-56-X.
- RWE AG (2009): „Tankstelle der Zukunft“ RWE und Europas größter Parkhausbetreiber APCOA kooperieren. URL <http://www.rwe.com/web/cms/de/37110/rwe/presse-news/pressemitteilung/?pmid=4003525>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Ryan, L., Ferreira, S. und Convery, F. (2009): The impact of fiscal and other measures on new passenger car sales and CO₂ emissions intensity: Evidence from Europe. In: *Energy Economics*, Bd. 31 (3), S. 365–374, doi:10.1016/j.eneco.2008.11.011.
- SAE International (2010): SAE standard on EV charging connector approved. URL <http://www.sae.org/mags/AEI/7479>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Saft (2010): Lithium-ion batteries. URL http://www.saftbatteries.com/Technologies_Lithium_Liion_301/Language/en-US/Default.aspx, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Sallee, J.M. (2008): The incidence of tax credits for hybrid vehicles. Harris School Working Papers 08.16, Harris School of Public Policy Studies, University of Chicago. URL <http://ideas.repec.org/p/har/wpaper/0815.html>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Saltelli, A. und Annoni, P. (2010): How to avoid a perfunctory sensitivity analysis. In: *Environmental Modelling & Software*, Bd. 25 (12), S. 1517–1508, doi:10.1016/j.envsoft.2010.04.012.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M. und Tarantola, S. (2007): *Global sensitivity analysis. The primer*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. ISBN 9780470725184.
- Sandmeier, P. und Felsenstein, S. (2010): Required infrastructure for electric vehicles by 2020 – the case of Switzerland. In: *International Advanced Mobility Forum, Genf, 9-10 März 2010*, S. 1–23. ABB Switzerland Ltd.
- Sauer, D.U. und Wenzl, H. (2008): Comparison of different approaches for lifetime prediction of electrochemical systems – Using lead-acid batteries as example. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 176 (2), S. 534–546, doi:10.1016/j.jpowsour.2007.08.057.
- Schad, H., Funke, C., Rommerskirchen, S. und Vödisch, M. (2001): Konstanz und Variabilität des Mobilitätsverhaltens im Wochenverlauf – Studie auf der Basis des deutschen Mobilitätspanels. Schlussbericht FE-Nr. 70.556/1998, Prognos AG, Basel. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn/Berlin.
- Schedler, D. (2009): *Kontaktlose Energieübertragung – Neue Technologie für mobile Systeme*. Süddeutscher Verlag onpact GmbH, München.
- Schneider Electric (2010): Creation of the EV Plug Alliance by three major industrial players. URL http://www.schneider-electric.com/corporate/en/press/press-releases/viewer-press-releases.page?c_filepath=/templatedata/Content/Press_Release/data/en/shared/2010/03/20100317_creation_of_the_ev_plug_alliance_by_three_major_industrial_players.xml, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.

- Schraven, S. (2010): Techno-ökonomische Bewertung induktiver Lademöglichkeiten für Elektrofahrzeuge. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe.
- Schraven, S., Kley, F. und Wietschel, M. (2011): Induktives Laden von Elektromobilen – Eine techno-ökonomische Bewertung. In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, S. 1–11, doi:10.1007/s12398-010-0040-y.
- Schuh, H. (2007): Moderne Lithium-Ionen Batteriesystem im Niederspannungsnetz. In: *Bayern Innovativ Kooperationsforum – Elektrische Energiespeicher, 6. Dezember 2007*. URL http://bayern-innovativ.de/ib/site/documents/media/a4b19110-2f76-6f56-cdba-ee4488d23df8.pdf/07_Schuh_Saft_Deutsch_Vortrag.pdf, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Scott, M.J., Kintner-Meyer, M., Elliott, D.B. und Warwick, W.M. (2007): Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional U. S. power grids. Part 2: Economic Assessment. Techn. Ber., Pacific Northwest National Laboratory.
- Shaheen, S.A., Wright, J. und Sperling, D. (2002): California’s zero-emission vehicle mandate: Linking clean-fuel cars, carsharing, and station car strategies. In: *Transportation Research Record*, Bd. 1791, S. 113–120.
- Shiau, C.S.N., Samaras, C., Hauffe, R. und Michalek, J.J. (2009): Impact of battery weight and charging patterns on the economic and environmental benefits of plug-in hybrid vehicles. In: *Energy Policy*, Bd. 37 (7), S. 2653–2663, doi:10.1016/j.enpol.2009.02.040.
- Shidore, N., Bohn, T., Duoba, M., Lohse-Busch, H. und Sharer, P. (2009): PHEV all electric range and fuel economy in charge sustaining mode for low SOC operation of the JCS VL41M Li-ion battery using Battery HIL. Techn. Ber., Argonne National Laboratory.
- Siemens (2009): From wind to wheels. In: *Pictures of the future*, The Magazine for Research and Innovation, S. 44–47. Siemens.
- Slater, S., Dolman, M., Tylor, P., Trichakis, P. und Shine, J. (2009): Strategies for the uptake of electric vehicles and associated infrastructure implications. Techn. Ber., Element Energy.
- Sovacool, B.K. und Hirsh, R.F. (2008): Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition. In: *Energy Policy*, Bd. 37 (3), S. 1095–1103, doi:10.1016/j.enpol.2008.10.005.
- Spath, D. und Demuß, L. (2006): Entwicklung hybrider Produkte – Gestaltung materieller und immaterieller Leistungsbündel. In: *Service Engineering*, herausgegeben von H.J. Bullinger und A.W. Scheer, S. 463–502. Springer. ISBN 978-3-540-29473-3.
- Sperling, D. und Kitamura, R. (1986): Refueling and new fuels: An exploratory analysis. In: *Transportation Research Part A: General*, Bd. 20 (1), S. 15–23, doi:10.1016/0191-2607(86)90011-7.
- Stähler, P. (2001): *Merkmale von Geschäftsmodellen in der digitalen Ökonomie*. Nr. 7 in Electronic Commerce. Josef Eul Verlag, St. Gallen.

- Statistisches Bundesamt (Hg.) (2008): *Statistisches Jahrbuch 2008*. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. ISBN 978-3-8246-0822-5.
- Steg, L. (2005): Car use: lust and must. Instrumental, symbolic and affective motives for car use. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 39 (2-3), S. 147–162, doi:10.1016/j.tra.2004.07.001.
- Steinmeyer, I. (2007): Personenwirtschaftsverkehr – Veränderte Mobilitätsmuster in der Dienstleistungsgesellschaft und deren Berücksichtigung in der Forschungslandschaft. In: *Wirtschaftsverkehr, alles in Bewegung?*, herausgegeben von C. Nobis und B. Lenz, *Studien zur Mobilitäts- und Verkehrsforschung*, Bd. 14, S. 113–130. MetaGIS. ISBN 978-3-936438-14-7.
- Stern, N. (2007): *The economics of climate change*. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 9780521700801. URL http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.hm-treasury.gov.uk/stern_review_report.htm, zuletzt zugegriffen am 09.05.2011.
- Stolz, E. (2009): Strategy for European EV & PHEV conductive charging infrastructure: analysis of the situation. Techn. Ber., Protoscar, Park & Charge.
- Struben, J. und Sterman, J.D. (2008): Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems. In: *Environment and Planning B: Planning and Design*, Bd. 35, S. 1070–1097, doi:10.1068/b33022t.
- Sundin, E., Östlin, J., Rönnbäck, A.Ö., Lindahl, M. und Sandström, G.Ö. (2008): Remanufacturing of products used in product service system offerings. In: *Proceedings of 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, S. 537–542.
- Suzuki, I., Shizuki, T. und Nishiyama, K. (2003): High power and long life lithium-ion battery for backup power sources. In: *Telecommunications Energy Conference, 2003. INTELEC '03. The 25th International*, S. 317–322. doi:10.1109/INTLEC.2003.1252131.
- Swedish Institute for Transport and Communications Analysis (2007): RES 2005-2006, The National Travel Survey, Sweden. URL http://www.sika-institute.se/Doclib/2007/SikaStatistik/ss_2007_19_eng.pdf, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Swedish Transport Agency (2009): Exemptions. URL <http://www.transportstyrelsen.se/en/road/Congestion-tax/Congestion-tax-in-stockholm/Exemptions/>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Tate, E.D., Harpster, M.O. und Savagian, P.J. (2008): The electrification of the automobile: From conventional hybrid, to plug-in hybrids, to extended-range electric vehicles. In: *2008 SAE World Congress, Detroit, Michigan, 14-17 April 2008*. General Motors Corporation, SAE 2008-01-0458, doi:10.4271/2008-01-0458.
- Taylor, D. (2009): The differences and similarities between plug-in hybrid EVs and battery EVs. In: *Electric Vehicle Symposium 24, 13-16 Mai 2009*, S. 1–10. Starvanger, Norwegen.
- Thiel, C., Perujo, A. und Mercier, A. (2010): Cost and CO₂ aspects of future vehicle options in Europe under new energy policy scenarios. In: *Energy Policy*, Bd. 38 (11), S. 7142–7151, doi:10.1016/j.enpol.2010.07.034.

- Tiggis, C. (2008): Der hohe Benzinpreis in Amerika zeigt Wirkung. URL <http://www.faz.net/s/RubEC1ACFE1EE274C81BCD3621EF555C83C/Doc~E577C8452C95C47B2B8311A038C073141~ATpl~Ecommon~Scontent.html>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Tijms, H.C. (2003): *A first course in stochastic models*. Wiley, Chichester. ISBN 0-471-49880-7.
- Timmers, P. (1998): Business models for electronic markets. In: *Electronic Markets*, Bd. 8 (2), S. 3–8.
- Tippelt, C. (2009): Norwegens Fuhrpark wird umweltfreundlicher. Ambitionierte Wachstumspläne für aufladbare Fahrzeuge. URL http://www.gtai.de/DE/Content/___SharedDocs/Links-Einzeldokumente-Datenbanken/fachdokument.html?fIdent=MKT200912048014, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Tomić, J. und Kempton, W. (2007): Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 168 (2), S. 459–468, doi:10.1016/j.jpowsour.2007.03.010.
- Transport for London (2009): Straight to the points. URL <http://www.tfl.gov.uk/corporate/media/newscentre/metro/12155.aspx>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Transport for London (2010a): Guidance for implementation of electric vehicle charging infrastructure. URL <http://www.newride.org.uk/downloads/EVCP-Guidance-Apr10.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Transport for London (2010b): Payments. URL <http://www.tfl.gov.uk/roadusers/congestioncharging/default.aspx>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Truffer, B., Markard, J. und Wüstenhagen, R. (2001): Eco-labeling of electricity – strategies and tradeoffs in the definition of environmental standards. In: *Energy Policy*, Bd. 29, S. 885–897, doi:10.1016/S0301-4215(01)00020-9.
- Tukker, A. (2004): Eight types of product – service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. In: *Business Strategy and the Environment*, Bd. 13 (4), S. 246–260, doi:10.1002/bse.414.
- Turrentine, T.S. und Kurani, K.S. (2007): Car buyers and fuel economy? In: *Energy Policy*, Bd. 35 (2), S. 1213–1223, doi:10.1016/j.enpol.2006.03.005.
- Turton, H. und Moura, F. (2008): Vehicle-to-grid systems for sustainable development: An integrated energy analysis. In: *Technological Forecasting and Social Change*, Bd. 75 (8), S. 1091–1108, doi:10.1016/j.techfore.2007.11.013.
- UK Department of Transport (2010): Transport statistics bulletin, National Travel Survey 2008. URL <http://www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/nts/>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Uphaus, F. (2006): Objektorientiertes Betriebsführungssystem zur Koordinierung dezentraler Energieumwandlungsanlagen. Dissertation, Universität Dortmund.

- U. S. Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics (2003): Highlights of the national household travel survey. URL http://www.bts.gov/publications/highlights_of_the_2001_national_household_travel_survey/, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- USABC (1996): Electric vehicle battery test procedure manual. URL http://avt.inel.gov/battery/pdf/usabc_manual_rev2.pdf, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Valocchi, M., Juliano, J. und Schurr, A. (2009): Lighting the way. Understanding the smart energy consumer. Techn. Ber., IBM.
- van den Bossche, P. (2010): Defining and developing standards. Presentation, Erasmus University College Brussels, Brüssel, Belgien. URL http://www.ecs-five.ch/parkcharge/documents/P_Van_den_Bossche1.pdf, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- VDE (2008): *Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 69/156/CD:2008)*. VDE Verlag, Berlin.
- VDE (2009): *Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker – Ladung von Elektrofahrzeugen Teil 2-2: Anforderungen und Hauptmaße für die Austauschbarkeit von Stift- und Buchsensteckvorrichtungen*. VDE Verlag, Berlin.
- Vetter, J., Novák, P., Wagner, M.R., Veit, C., Möller, K.C., Besenhard, J.O., Winter, M., Wohlfahrt-Mehrens, M., Vogler, C. und Hammouche, A. (2005): Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 147, S. 269–281, doi:10.1016/j.jpowsour.2005.01.006.
- Voß, A., Dicke, N. und Rath-Nagel, S. (2000): Konzeption eines effizienten und markt-konformen Fördermodells für erneuerbare Energien. Techn. Ber., Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart. Gutachten im Auftrag des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg, URL <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2000/613/pdf/GutachWimi.pdf>, zuletzt zugegriffen am 10.05.2011.
- Wallentowitz, H. und Reif, K. (2006): *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. ATZ-MTZ-Fachbuch. Vieweg. ISBN 9783528039714.
- Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A. und Olschewski, I. (2010): *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges*. Vieweg+Teubner. ISBN 978-3-8348-9701-5.
- Wallerath, J. (2004): Induktive Energieübertragung für tragbare elektronische Geräte. Diplomarbeit, Fachhochschule Köln. URL <http://www.extra.research.philips.com/publ/rep/nl-ur/PR-TN2004-01106.pdf>, zuletzt zugegriffen am 15.01.2011.
- Walther, S., Markovic, I., Schuller, A. und Weidlich, A. (2010): Classification of business models in the e-mobility domain. In: *Proceedings of 2nd European Conference Smart Grids and E-Mobility, 20-21 Oktober 2010*, herausgegeben von Ostbayrisches Technologie-Transfer-Institut e. V., S. 35–42. Brüssel, Belgien. ISBN 978-3-941785-14-4.
- Warrier, D., Osborne, J. und Odama, Y. (2009): The race for the electric car: A comprehensive guide to battery technologies and market development. Techn. Ber., Thomas Weisel Partners, San Francisco.

- Warweg, O., Nicolai, S. und Bretschneider, P. (2011): Elektromobilität: Integration in die Regularien des Energiemarktes. In: *Energy 2.0 Kompendium 2011*, Bd. 1 (Kompendium 2011), S. 224–225. URL <http://www.mobility20.net/pi/index.php?StoryID=317&articleID=179352>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Webster, R. (1999): Can the electricity distribution network cope with an influx of electric vehicles? In: *Journal of Power Sources*, Bd. 80 (1-2), S. 217–225, doi:10.1016/S0378-7753(98)00262-6.
- Weidner, H. (1996): *Basiselemente einer erfolgreichen Umweltpolitik. Eine Analyse und Evaluation der Instrumente der japanischen Umweltpolitik*. Rainer Bohn Verlag, Berlin.
- Welp, E.G., Meier, H., Sadek, T. und Sadek, K. (2008): Modelling approach for the integrated development of industrial product-service systems. In: *Manufacturing systems and technologies for the new frontier*, herausgegeben von M. Mitsuishi, K. Ueda und F. Kimura, S. 525–530. Springer, London. ISBN 978-1-84800-266-1.
- Wenzl, H. (2010): Lifetime. In: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, S. 552–558. Elsevier Science. ISBN 9780444520937.
- Wenzl, H., Baring-Gould, I., Kaiser, R., Liaw, B.Y., Lundsager, P., Manwell, J., Ruddell, A. und Svoboda, V. (2005): Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 144 (2), S. 373–384, doi:10.1016/j.jpowsour.2004.11.045.
- Werber, M., Fischer, M. und Schwartz, P.V. (2009): Batteries: Lower cost than gasoline? In: *Energy Policy*, Bd. 37 (7), S. 2465–2468, doi:10.1016/j.enpol.2009.02.045.
- Wermuth, M., Wirth, R., Neef, C., Löhner, H., Hilmer, J., Hautzinger, H., Heidemann, D., Stock, W., Schmidt, J., Mayer, K., Michael, M., Amme, F., Ohrem, P., Hansjosten, E. und Binnenbruck, H.H. (2003): Kontinuierliche Befragung des Wirtschaftsverkehrs in unterschiedlichen Siedlungsräumen: Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2002 – Schlussbereich. Techn. Ber. 70.0682/2001, IVS Institut für Verkehr und Stadtbauwesen.
- Wery, R. und Derriennic, Y. (2010): Paving the way for electric vehicles: A trajectory for a 50 % cost reduction by 2020. In: *Electrical Vehicle Plug and Play, 29 April 2010*. Institut Français des Relations Internationales, Brussels, Belgium. URL http://www.ifri.org/downloads/comptes_rendu/fichiers/34/derriennick29april.pdf, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Wiederer, A. und Philip, R. (2010): Policy options for electric vehicle charging infrastructure in C40 cities. Masterarbeit, Harvard Kennedy School.
- Wiesspeiner, G. (2005): Drahtlos Akkus aufladen. URL <http://www.bticcs.com/pub/d+e2005.pdf>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Wietschel, M., Bünger, U. und Weindorf, W. (2010): Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-freie Endenergieträger, Endbericht im Auftrag der RWE AG. Techn. Ber., Fraunhofer-Institut System- und Innovationsforschung, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Karlsruhe.

- Wietschel, M., Dallinger, D., Peyrat, B., Noack, J., Tübke, J., Schnettlers, A., Schowe-von Der Brelies, B., Dederichs, T., Machare, U. und Smolka, T. (2008): Marktwirtschaftliche Analysen für Plug-In-Hybrid Fahrzeugkonzepte. Techn. Ber., Fraunhofer-ISI, Fraunhofer-ICT, Institut für Hochspannungstechnik (IFHT) RWTH Aachen, Karlsruhe, Pfinztal, Aachen.
- Wietschel, M., Kley, F. und Dallinger, D. (2009): Eine Bewertung der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. In: *Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft*, Bd. 12 (3), S. 33–41.
- Wild, M. und Herges, S. (2000): Total Cost of Ownership (TCO) – Ein Überblick. Techn. Ber., Lehrstuhl für Allg. BWL und Wirtschaftsinformatik, Univ.-Prof. Dr. Herbert Kargl, Mainz.
- Willeke, R. (1992): *Wirtschaftsverkehr in Städten*. Schriftenreihe des Verbandes der Automobilindustrie. VDA, Frankfurt am Main.
- Williams, A. (2005): The strategic management of product service systems. Techn. Ber., The centre for business relationship, accountability, sustainability and society (BRASS).
- Williams, B.D. und Lipman, T.E. (2010): Strategies for transportation electric fuel implementation in California: Overcoming battery first-cost hurdles. Techn. Ber., Transportation Sustainability Research Center.
- Winterhoff, M., Kahner, C., Ulrich, C., Sayler, P. und Wenzel, E. (2009): Zukunft der Mobilität 2020 – Die Automobilindustrie im Umbruch. Techn. Ber., Arthur D. Little.
- Wirges, J. und Fulda, A.S. (2010): MeregioMobil: Standortplanung von Ladestationen für Elektrische Fahrzeuge. Techn. Ber., Europäisches Institut für Energieforschung.
- Wise, R. und Baumgartner, P. (1999): Go downstream – The new profit imperative in manufacturing. In: *Harvard Business Review*, Bd. 77 (5), S. 133–141.
- WiTricity (2009): WiTricity applications: Transportation. URL <http://www.witricity.com/pages/application.html>, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Wko (2009): Energiebesteuerung – Die Elektrizitätsabgabe. URL http://portal.wko.at/wk/format_detail.wk?AngID=1&StID=457856&DstID=0&titel=Energiebesteuerung,-,Die,Elektrizitätsabgabe, zuletzt zugegriffen am 28.04.2011.
- Wood, E., Alexander, M. und Bradley, T.H. (2011): Investigation of battery end-of-life conditions for plug-in hybrid electric vehicles. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 196 (11), S. 5154–5147, doi:10.1016/j.jpowsour.2011.02.025.
- Wynstra, F. und Hurkens, K. (2005): Total cost and total value of ownership. In: *Perspektiven des Supply Management*, herausgegeben von M. Eßig, S. 463–482. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg. ISBN 978-3-540-27018-8.
- Zhang, S.S. (2006): The effect of the charging protocol on the cycle life of a Li-ion battery. In: *Journal of Power Sources*, Bd. 161 (2), S. 1385–1391, doi:10.1016/j.jpowsour.2006.06.040.

-
- Zhang, Y.F., Wyon, D.P., Fang, L. und Melikov, A.K. (2007): The influence of heated or cooled seats on the acceptable ambient temperature range. In: *Ergonomics*, Bd. 50 (4), S. 586–600, doi:10.1080/00140130601154921.
- Zipcar (2009): Westminster city council and Zipcar launch UK's greenest car club in London. URL <http://zipcar.mediaroom.com/index.php?s=43&item=131>, zuletzt zugegriffen am 01.05.2011.
- Zumkeller, D., Chlond, B. und Lipps, O. (1998): Konstanz/ Variabilität des Verkehrsverhaltens bei gleichen Personen. Endbericht Forschungsauftrag BMV FE 70.595 / 1998, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe (TH).
- Zumkeller, D., Chlond, B., Kuhnimhof, T., Kagerbauer, M., Schlosser, C., Wirtz, M. und Ottmann, P. (2010): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – wissenschaftliche Begleitung und erste Auswertungen Bericht 2008. Techn. Ber., Institut für Verkehrswesen (IfV), Karlsruhe.
- Zwick, J. (2011): Netzintegration von Elektrofahrzeugen in den deutschen Strommarkt. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe.
- Zwicky, F. und Wilson, A.G. (Hg.) (1967): *New methods of thought and procedure: Contributions to the symposium of methodologies*. Springer, Berlin. ISBN 978-3540039426.
- Zwicky, F. (1966): *Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild*. Droemer Knaur, München.

Welche Ladeinfrastruktur wird für Elektrofahrzeuge benötigt? Zunächst werden die technischen Möglichkeiten zur Ladung beschrieben und diese anschließend mit wirtschaftlichen Kriterien unter Berücksichtigung des realen Fahrverhaltens bewertet. Dies ermöglicht es, eine geeignete Ladeinfrastruktur, ein kostenminimierendes Fahrzeugkonzept und eine optimale Batteriegröße zu bestimmen.

Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI untersucht Marktchancen technischer Entwicklungen und deren Auswirkungen auf Wirtschaft, Staat und Gesellschaft. Die interdisziplinären Forschungsgruppen konzentrieren sich auf die Bereiche Energie, Umwelt, Produktion, Kommunikation und Biotechnologie sowie auf Regionalforschung und Innovationspolitik.



FRAUNHOFER VERLAG

