
Modellregionen Elektromobilität

Umweltbegleitforschung
Elektromobilität

Dr. Karl Otto Schallaböck
(Projektleitung)
Rike Carpentier
Prof. Dr. Manfred Fishedick
Michael Ritthoff
Georg Wilke

unter Mitarbeit von
Wencke Bauhaus und
Sebastian Schröder

August 2012

ISSN 1862-1953

Wuppertal Report

6



Wuppertal Report Nr. 6

Modellregion Elektromobilität

Umweltbegleitforschung

Elektromobilität

Dr. Karl Otto Schallaböck (Projektleitung)

Rike Carpentier

Prof. Dr. Manfred Fishedick

Michael Ritthoff

Georg Wilke

unter Mitarbeit von

Wencke Bauhaus und Sebastian Schröder

Wuppertal, August 2012

**Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH**

Döppersberg 19
42103 Wuppertal

www.wupperinst.org

Ansprechpartner: Dr. Karl Otto Schallaböck

Forschungsgruppe 1

„Zukünftige Energie- und Mobilitätsstrukturen“

Tel.: (0202) 2492 - 115

Fax: (0202) 2492 - 263

E-Mail: karl.otto.schallaboeck@wupperinst.org

Internet: www.wupperinst.org

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung unter dem Förderkennzeichen 03KP5003 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Modellregionen Elektromobilität

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Verkehr, Bau
und Stadtentwicklung

Koordiniert durch:



Nationale Organisation Wasserstoff-
und Brennstoffzellentechnologie

„Wuppertal Reports“ sind Abschlussberichte aus Projekten, die vom Auftraggeber zur Veröffentlichung freigegeben wurden. Sie sollen Interessenten mit den Projektergebnissen aus der Arbeit des Instituts vertraut machen und zur kritischen Diskussion einladen. Das Wuppertal Institut achtet auf ihre wissenschaftliche Qualität. Für den Inhalt sind die Autoren verantwortlich.

Dieses Werk steht unter der Creative Commons *Namensnennung – nicht-kommerziell – keine Bearbeitung* Lizenz 3.0 Germany | <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de>



Kurzfassung

Im Zentrum dieser Untersuchung steht die Aufbereitung der Erfahrungen mit den Elektrofahrzeugen in Einzelprojekten der Modellregionen Phase I hinsichtlich der energiebezogenen Parameter und der nach Fahrzeugsegmenten differenzierte Vergleich mit herkömmlichen Fahrzeugen.

In der Literatur finden sich für die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen unterschiedliche Bewertungsmethoden, deren Ergebnisse kurzfristig stark streuen und sich erst mittel- bis längerfristig perspektivisch annähern. In der vorliegenden Untersuchung werden drei Varianten zur Bilanzierung der klimarelevanten Emissionen gerechnet: a) Werden Elektrofahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben, ist ihre Klimabilanz deutlich besser als diejenige fossil betriebener Pkw. Wann, inwieweit und unter welchen Voraussetzungen (Herkunftsnachweis) eine direkte Zuordnung des Fahrstroms zu einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien möglich ist, ist heute allerdings umstritten. b) Unter pragmatischen Gesichtspunkten bietet die Strommixmethode eine gute Orientierung für die klimabezogene Bewertung von Elektrofahrzeugen. Aufgrund der auf der Zeitachse planungsgemäß zunehmenden Anteile erneuerbarer Energien im Strommix führt dies für die Zeiten, in denen eine signifikante Durchdringung mit Elektrofahrzeugen zu erwarten ist, zu einer gegenüber heute deutlichen Verbesserung der spezifischen CO₂-Emissionen und respektive Vorteilen gegenüber mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeugen. c) Legt man dem Kraftwerkseinsatz Merit Order als Regel des ökonomischen Betriebs zugrunde und betrachtet den Stromverbrauch von Elektrofahrzeugen als „zusätzlichen“ Verbrauch gegenüber einem Zustand ohne Elektrofahrzeuge, stellt sich die Klimabilanz nicht so günstig dar.

Schlagwörter

Elektromobilität, Klimabilanz, Elektro-Pkw, Strommix, CO₂-Emissionen, Klimalasten, Energieverbrauch, LCA, Vergleichsfahrzeuge

Summary

This study focuses on the analysis of experiences with electric vehicles within several single projects of the model regions programme, part 1. Main issues are terms of energy-related parameters and the comparison with conventional vehicles (differentiated according to vehicles segments).

There are various methods of estimating the carbon footprint of electric vehicles in literature. In short-time considerations their results scatter, but perspective at middle- and long-time considerations they converge. The present study respects three variations of calculating the climate-relevant emissions: a) If electric vehicles are operated from renewable energy sources, their carbon footprint is significant better than fossil fuel cars. When, how and on what conditions (proof of origin) a direct correlation of the „driving-energy“ to a power generation from renewable energies is possible, is currently in discussion. b) Under pragmatic aspects the „energy-mix-method“ offers a good guide to a climate-related assessment of electric vehicles. Due to the planned growth of the ratio of renewable energies in the electricity mix according to the time-axis, this leads, in times where a significant penetration supply of electric vehicles is expected, to a serious improvement of specific CO₂-emissions compared to today. So electric vehicles might have benefits in contrast to vehicles with internal combustion engines. c) If one takes the merit order rule as a basis for the economic power plant operation and considers the power consumption of electric vehicles as an „additional“ consumption compared to a state without electric vehicles, the carbon footprint is not that convenient anymore.

Keywords

electric mobility, carbon footprint, electric vehicles, electric passenger cars, electricity mix, CO₂-emissions, climate loads, energy consumption, LCA, reference vehicles

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	III
SUMMARY	IV
1 EINLEITUNG	1
1.1 AUFGABENSTELLUNG	1
1.2 HINTERGRUND DER UNTERSUCHUNGEN: EINBETTUNG IN DIE STRATEGIE DER BUNDESREGIERUNG UND IN DEN FÖRDERSCHWERPUNKT MODELLREGIONEN ELEKTROMOBILITÄT	1
1.3 ORGANISATORISCHER RAHMEN	3
1.4 GLIEDERUNG.....	6
2 ELEKTRO-PKW IM VERGLEICH MIT KONVENTIONELLEN FAHRZEUGEN: ENERGIEVERBRAUCH UND DAMIT VERBUNDENE KLIMALASTEN	7
2.1 GRUNDANNAHMEN ZU VERGLEICHFAHRZEUGEN UND BETRIEBSBEDINGTE KLIMALASTEN	7
2.1.1 <i>Ansatz für die Wahl der Vergleichsfahrzeuge</i>	7
2.1.2 <i>Gewählte Vergleichsfahrzeuge</i>	8
2.1.3 <i>Rechnerischer Ansatz zur Bestimmung der Verbrauchs- und Emissionswerte</i>	10
2.1.4 <i>Ergebnisse: Klimalasten konventioneller Vergleichsfahrzeuge</i>	13
2.1.5 <i>Zusammenfassung und kritische Einschätzung</i>	15
2.2 GRUNDANNAHMEN ZU STROMVERBRAUCH UND DAMIT VERBUNDENEN KLIMALASTEN	16
2.2.1 <i>Physische Betrachtung: Strommix-Methode</i>	17
2.2.2 <i>Perspektivische Entwicklung der Stromerzeugung</i>	19
2.3 EMPIRISCHE BEFUNDE AUS DEN MODELLVERSUCHEN	20
2.3.1 <i>Datenquelle</i>	20
2.3.2 <i>Ergebnisse: Energieverbrauchswerte von Elektrofahrzeugen</i>	20
2.4 BERECHNUNGEN FÜR DEN KONKRETEN EINSATZ VON ELEKTROFAHRZEUGEN	25
2.4.1 <i>Rechnerischer Ansatz zur Bestimmung der Emissionswerte von Elektrofahrzeugen</i>	25
2.4.2 <i>Ergebnisse: Klimalasten des Einsatzes von Elektrofahrzeugen</i>	26
2.4.3 <i>Zusammenfassung und kritische Einschätzung</i>	30
3 WEITERE UMWELTPARAMETER	32
3.1 LÄRM UND SCHADSTOFFE	32
3.1.1 <i>Lärm</i>	32
3.1.2 <i>Gasförmige Emissionen</i>	34
3.1.3 <i>Partikelemissionen</i>	38
3.2 ÖKOBILANZIELLE BETRACHTUNGEN	40
3.2.1 <i>Fahrzeugvergleiche</i>	41
3.2.2 <i>Rohstoffverfügbarkeit: Batterien für Elektrofahrzeuge und Treibstoffe für herkömmliche Fahrzeuge</i>	44
3.2.3 <i>Flächeninanspruchnahme</i>	49

4	ZUSÄTZLICHE BEFUNDE AUS DEM PRAXISEINSATZ UND VERKEHRSSYSTEMARE BETRACHTUNGEN	51
4.1	BREITE EMPIRISCHE BEFUNDE AUS DEM PRAXISEINSATZ	51
4.1.1	<i>Untersuchungsansatz und Datengrundlage</i>	<i>51</i>
4.1.2	<i>Befunde zum Einsatz von Elektrofahrzeugen</i>	<i>54</i>
4.2	VERKEHRSSYSTEMARE BETRACHTUNGEN	76
4.2.1	<i>Veränderungen privater Mobilitätsmuster durch Elektrofahrzeuge</i>	<i>77</i>
4.2.2	<i>Einsatz von Elektrofahrzeugen bei Flottenbetreibern</i>	<i>80</i>
4.2.3	<i>Zusammenfassung und kritischen Einschätzung</i>	<i>81</i>
5	ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN	82
5.1	ZENTRALE ERGEBNISSE DER UMWELTBEGLEITFORSCHUNG ELEKTROMOBILITÄT	82
5.2	EMPFEHLUNGEN DER UMWELTBEGLEITFORSCHUNG ELEKTROMOBILITÄT	89
5.2.1	<i>Sachempfehlungen</i>	<i>89</i>
5.2.2	<i>Forschungsempfehlungen</i>	<i>90</i>
	LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS	91

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Forerunner herkömmlicher Pkw in den Fahrzeugsegmenten, in denen Elektro-Pkw vertreten sind.....	9
Tabelle 2	Forerunner herkömmlicher leichter Nutzfahrzeuge in den Fahrzeugsegmenten, in denen Elektro-Fahrzeuge vertreten sind	10
Tabelle 3	Ableitung des Aufschlags auf die TtW-Verbräuche zur Berechnung der Vorkette (Emissionen in g CO ₂ je l Kraftstoff).....	12
Tabelle 4	Spezifische Energieverbräuche (kWh pro 100 km).....	21
Tabelle 5	Spezifische CO ₂ -Emissionen (g CO ₂ /km) im Vergleich von herkömmlichen Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen bei unterschiedlichen Stromquellen	28
Tabelle 6	Komponenten von Verkehrsgeräuschen und deren maßgebliche Einflussfaktoren.....	33
Tabelle 7	Grenzwerte für stoffliche Emissionen von Pkw in mg/km nach den Regelungen EURO 1 bis EURO 6	35
Tabelle 8	Stickoxid-Emissionen aus dem Straßenverkehr, Gg NO ₂	37
Tabelle 9	Primäre Partikelemissionen des Straßenverkehrs, Gg PM(10) und PM(2,5).....	40
Tabelle 10	Übersicht über die Fahrzeugdaten der im Rahmen des 43. LCA Diskussionsforum vorgestellten Elektrofahrzeuge.....	42
Tabelle 11	Reserven zum Jahresende in EJ	47
Tabelle 12	Ressourcen zum Jahresende in EJ.....	47
Tabelle 13	CO ₂ -Potenziale der Reserven zum Jahresende in Gt.....	48
Tabelle 14	CO ₂ -Potenziale der Ressourcen zum Jahresende in Gt	48
Tabelle 15	Minimaldatenset Fahrten und Ladevorgänge*	52
Tabelle 16	Einbezogene Fahrzeuge nach Segmenten und Modellreihen	53
Tabelle 17	Empirische Basis: Einsatzzeiträume und Anzahlen von Tagen mit Beobachtungen	53
Tabelle 18	Empirische Basis: Nutzungsvorgänge.....	54
Tabelle 19	Spezifische CO ₂ -Emissionen (g CO ₂ /km) im Vergleich von herkömmlichen Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen bei unterschiedlichen Stromquellen	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Regionen und Plattformen des Förderschwerpunkts „Modellregionen Elektromobilität“.....	3
Abbildung 2	Einbettung der Umweltbegleitforschung Elektromobilität in das Förderprogramm „Modellregionen Elektromobilität“	4
Abbildung 3	Rechenschema zur Ermittlung der spezifischen CO ₂ -Emissionen herkömmlicher Fahrzeuge	11
Abbildung 4	Spezifische CO ₂ -Emissionen im kombinierten und im innerörtlichen Fahrzyklus mit den Vorketten für jeweils ein emissionsarmes Modell, den Segmentdurchschnitt und die emissionsstärkste relevante Modellreihe im Jahr 2010.....	14
Abbildung 5	(a) Bruttostromerzeugung nach Energieträgern im Ausstiegsszenario (links), (b) Verbrennungsbedingte Treibhausgasemissionen (rechts).....	19
Abbildung 6	Spezifische Energieverbräuche der einzelnen Elektrofahrzeuge	21
Abbildung 7	Energieverbräuche der einzelnen Fahrten	22
Abbildung 8	Spezifische Energieverbräuche der Demonstrationsfahrzeuge: Minis und Kleinwagen	23
Abbildung 9	Spezifische Energieverbräuche der Demonstrationsfahrzeuge: Kompakt- und Mittelklasse.....	23
Abbildung 10	Spezifische Energieverbräuche der Demonstrationsfahrzeuge: Leichte Nutzfahrzeuge/Utilities	24
Abbildung 11	Rechenschema zur Ermittlung der spezifischen CO ₂ -Emissionen von Elektrofahrzeugen..	25
Abbildung 12	Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen nach unterschiedlichen Methoden am Beispiel von Kleinwagen	27
Abbildung 13	Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen nach unterschiedlichen Stromerzeugungspfaden für das Jahr 2010	29
Abbildung 14	Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen nach unterschiedlichen Stromerzeugungspfaden für den Zeitverlauf 2010 bis 2030 am Beispiel der Kompakt- und Mittelklasse (kombiniert).....	30
Abbildung 15	Unterschiedliche Vorbeifahrtgeräusche von Elektrofahrzeugen (EV) und herkömmlichen Fahrzeugen (ICE).....	34
Abbildung 16	CO-Emissionen in Deutschland in Mio. t.....	36
Abbildung 17	HC (NMVOC) – Emissionen in Deutschland in Mio. t	36
Abbildung 18	NO _x -Emissionen in Deutschland (als NO ₂) in Mio. t.....	37
Abbildung 19	Gesamtstaub-Emission in Mio. t.....	39
Abbildung 20	PM(10) und PM(2,5) in Mio. t	39
Abbildung 21	Treibhausgaspotenzial für verschiedene Fahrzeuge und Stromerzeugungsvarianten	43
Abbildung 22	Versauerungspotenzial für verschiedene Fahrzeuge und Stromerzeugungsvarianten.....	44
Abbildung 23	Verteilung der Fahrtenlängen: alle Fahrten	55

Abbildung 24	Zurückgelegte Strecken: Kumulierte Anteile nach Streckenlänge	55
Abbildung 25	Verteilung der Fahrtenlängen: Fahrten innerhalb der Segmente	56
Abbildung 26	Zurückgelegte Strecken der Vergleichsgruppen: Kumulierte Anteile nach Streckenlänge ..	57
Abbildung 27	Verteilung der Betriebsdauern: alle Fahrten.....	58
Abbildung 28	Betriebsdauern aller Fahrten: Kumulierte Anteile der Fahrten nach Dauer	58
Abbildung 29	Verteilung der Betriebsdauern: Fahrten innerhalb der Segmente.....	59
Abbildung 30	Betriebsdauern der Fahrten innerhalb der einzelnen Segmente: Kumulierte Anteile der Fahrten nach Dauer	60
Abbildung 31	Tagesgänge aller Fahrten	61
Abbildung 32	Tagesgänge der Fahrten mit Minis und Kleinwagen	61
Abbildung 33	Tagesgänge der Fahrten mit Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse	62
Abbildung 34	Tagesgänge der Fahrten mit leichten Nutzfahrzeugen (Utilities)	63
Abbildung 35	Durchschnittsgeschwindigkeiten der einzelnen Fahrzeuge	63
Abbildung 36	Durchschnittsgeschwindigkeiten aller Fahrten: Kumulierte Anteile.....	64
Abbildung 37	Durchschnittsgeschwindigkeiten der Fahrten innerhalb der Segmente: Kumulierte Anteile	65
Abbildung 38	Abgenommene Energiemengen: Kumulierte Anteile an Ladevorgängen	66
Abbildung 39	Abgenommene Energiemengen (Ladevorgänge): Minis und Kleinwagen	67
Abbildung 40	Abgenommene Energiemengen (Ladevorgänge): Utilities.....	67
Abbildung 41	Abgenommene Energiemengen: Kumulierte Anteile an Ladevorgängen innerhalb der Segmente	68
Abbildung 42	Ladedauern insgesamt: Kumulierte Anteile nach Dauer	69
Abbildung 43	Ladedauern der Fahrten innerhalb der einzelnen Segmente: Kumulierte Anteile nach Dauer.....	70
Abbildung 44	Verteilung der Ladevorgänge im Tagesverlauf	71
Abbildung 45	Verteilung der Ladevorgänge im Tagesverlauf: Minis und Kleinwagen	72
Abbildung 46	Verteilung der Ladevorgänge im Tagesverlauf: Kompakt- und Mittelklasse	72
Abbildung 47	Verteilung der Ladevorgänge im Tagesverlauf: Utilities	73
Abbildung 48	Ladedauern und abgenommene Energiemengen: alle Fahrzeuge	74
Abbildung 49	Ladedauern und abgenommene Energiemengen: Minis und Kleinwagen.....	75
Abbildung 50	Ladedauern und abgenommene Energiemengen: Utilities	76
Abbildung 51	Verteilung substituierter und induzierter Wege bei den Roller-Langzeitnutzern	79

Abkürzungsverzeichnis

AK	Arbeitskreis
BEV	battery electric vehicle / rein batteriebetriebes Elektrofahrzeug
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
DK	Dieselmotortreibstoff
EA.NRW	Energieagentur Nordrhein-Westfalen
EV	Electric Vehicle / Elektrofahrzeug
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
HC	Hydrocarbons / Kohlenwasserstoffe
ICE	Internal Combustion Engine / Verbrennungsmotor
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
NEDC	New European Driving Cycle, s. auch NEFZ
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus , s. auch NEDC
NMVOG	Non methane volatile organic compounds / flüchtige Kohlenwasserstoffe
NO ₂	Stickstoffdioxid
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH
NO _x	Stickoxide
OK	Ottomotortreibstoff
PHEV	plug-in hybrid vehicle / Plug-In-Hybridfahrzeug
PF	Plattform (im Rahmen der Begleitforschung des Förderprogramms „Modellregionen Elektromobilität“)
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
REEV	range extended electric vehicle / Elektrisches Fahrzeug mit Range Extender
TtW	Tank to Wheels
WI	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
WtT	Well to Tank
WtW	Well to Wheels

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel der Umweltbegleitforschung Elektromobilität bestand darin, die Umweltwirkungen, insbesondere CO₂-Emissionen, des Betriebs der Fahrzeuge in den individuellen Demonstrationsprojekten der Modellregionen abzuschätzen und perspektivisch die Anforderungen und Potentiale für eine umwelt- und klimafreundliche Elektromobilität aufzuzeigen.

Zentraler Bestandteil des Vorhabens war dabei die Aufarbeitung und Analyse von Daten aus den einzelnen Forschungsprojekten des Förderprogramms Modellregionen Elektromobilität zu Einzelfahrten und Ladevorgängen der Elektrofahrzeuge und Vergleich mit nicht-elektrischer Verkehrsabwicklung. Zentrale Parameter bei der Betrachtung der Umweltwirkungen sind Lärm- und Schadstoffemissionen, Flächenverbrauch, Materialverbrauch, Energieverbrauch und Klimalasten. Der Fokus liegt dabei auf Energieverbräuchen und Klimalasten (CO₂-Emissionen durch Verbräuche und Vorketten).

Die Umweltbegleitforschung Elektromobilität erfüllte in diesem Themengebiet darüber hinaus eine Austausch- und Synthesefunktion innerhalb der Modellregionen und Einzelprojekte. Dies geschah mit dem Ziel, einen strukturierten und zusammenfassenden Beitrag bezüglich der Umweltwirkungen von Elektromobilität als inhaltliche Basis der strategischen Weiterentwicklung der Förderung der Elektromobilität zu leisten.

Der vorliegende Wuppertal-Report gibt eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse, die im Rahmen der Umweltbegleitforschung gewonnen werden konnten.

1.2 Hintergrund der Untersuchungen: Einbettung in die Strategie der Bundesregierung und in den Förderschwerpunkt Modellregionen Elektromobilität

Aufbauend auf dem *Integrierten Energie- und Klimaprogramm* vom Dezember 2007 hat die Bundesregierung im *Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität* vom August 2009 die Elektromobilität als wesentliche Stellschraube für eine zukunftsfähige Mobilität herausgestellt und das Ziel formuliert, dass Deutschland zum Leitmarkt für Elektromobilität wird. Eingebettet ist dieser Entwicklungsplan in die fortgeschriebene *Kraftstoffstrategie der Bundesregierung* im Rahmen der *Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie „Perspektiven für Deutschland“* vom April 2002, sowie der im Juli 2010 weiterentwickelten *Hightech-Strategie 2020 für Deutschland (HTS)* vom August 2006.

Als maßgebliche Potenziale nennt der Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität (S. 6f):

- Klimaschutz: Elektromobilität kann einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung der CO₂-Emissionen im Verkehrssektor leisten.
- Sicherung der Energieversorgung: Fahren mit elektrischem Strom kann unsere Abhängigkeit von Öl vermindern.
- Ausbau des Technologie- und Industriestandorts: Deutschland kann zum Leitmarkt für Elektromobilität werden und der deutschen Wirtschaft einen neuen Innovationsschub bringen.

- Verringerung lokaler Emissionen (Umweltschutz): Elektrofahrzeuge können die Städte von Schadstoffen, Feinstaub und Lärm befreien und so die Lebensqualität steigern.
- Fahrzeuge in das Stromnetz integrieren: Batteriefahrzeuge tragen zur Verbesserung der Effizienz der Netze bei und fördern den Ausbau der erneuerbaren Energien.
- Neue Mobilität: Elektrofahrzeuge können ein Baustein für intelligente und multimodale Mobilitätskonzepte der Zukunft sein.

Im nationalen Entwicklungsplan wird die Elektromobilität auf den Straßenverkehr begrenzt und dabei auf Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge fokussiert; betrachtet werden rein batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEV) und Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV) einschließlich der Fahrzeuge mit Range Extender (REEV) als Fahrzeugarten, die rein elektrisch angetrieben werden können. Die von der Bundesregierung bereits früher, im Mai 2006, mit dem Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie markierte strategische Option wird dabei weniger als konkurrierend, mehr als komplementär angesehen.

Zur Umsetzung des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität wurde zusammen mit Vertreterinnen und Vertretern aus Industrie, Wissenschaft und Gesellschaft die *Nationale Plattform Elektromobilität* etabliert, die im Mai 2011 ihren 2. Bericht mit ausführlichem Anhang veröffentlicht hat.

Innerhalb der vielfältigen Aktivitäten der Bundesregierung wurde im Rahmen des *Konjunkturpakets II (Pakt für Beschäftigung und Stabilität in Deutschland zur Sicherung der Arbeitsplätze, Stärkung der Wachstumskräfte und Modernisierung des Landes)* vom Januar 2009 ein zusätzlicher Betrag von 500 Mio. EURO für die Förderung anwendungsorientierter Forschung im Bereich Mobilität eingestellt. Ein erheblicher Teil dieser Mittel – 130 Mio. EURO – wurde dem *BMVBS-Förderschwerpunkt „Elektromobilität in Modellregionen“* zugewiesen, innerhalb dessen das vorliegende Vorhaben durchgeführt wurde.

Der insgesamt von der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), Berlin, koordinierte und vom Forschungszentrum Jülich als Projektträger betreute Förderschwerpunkt mit mehr als 70 Projektkonsortien und über 200 Partnern adressiert geografisch acht Modellregionen. Neben dieser Gliederung wurden sieben Plattformen zur begleitenden Bearbeitung überregionaler Fragen eingerichtet, vgl. Abbildung 1.



Abbildung 1 Regionen und Plattformen des Förderschwerpunkts „Modellregionen Elektromobilität“

Quelle: NOW: Umsetzungsbericht zum Förderprogramm „Elektromobilität in Modellregionen“ des BMVBS, Stand Mai 2011.

1.3 Organisatorischer Rahmen

Die hier vorliegenden Arbeiten sind der Plattform Umwelt/Sicherheit zuzuordnen. Diese Plattform wurde koordiniert durch die NOW GmbH und dem Netzwerk Kraftstoffe und Antriebe der Zukunft der EnergieAgentur.NRW und umfasst (neben dem separaten Aspekt Sicherheit) die Umweltbegleitforschung Elektromobilität.

Die Umweltbegleitforschung ist vom Ansatz her querschnittlich angelegt und durch ihren thematisch fokussierenden Begleitforschungs-Charakter gleich mehrfach verankert. Einerseits sollten Ergebnisse aus mehr als 70 Projektkonsortien mit über 200 Einzelpartnern integriert werden und als Basis für eine projektübergreifende Begleitforschung zum Thema Umweltwirkungen von Elektromobilität dienen. Durch den Begleitforschungscharakter war das Gelingen der Aufgaben demnach maßgeblich von der Stützung durch die Einzelprojekte und deren Beteiligten abhängig. Andererseits erfolgte die Begleitforschung des gesamten Förderprogramms „Modellregionen Elektromobilität“ im Rahmen von sieben thematischen Plattformen, zwischen denen sich ebenfalls Schnittstellen ergaben. Diese beiden Faktoren machten eine enge Abstimmung mit der Programmkoordination und mit bestimmten Teilen der anderen Plattformen notwendig.

Zur Abwicklung der anstehenden Arbeits-/Forschungsaufträge wurde die Plattform Umwelt/Sicherheit bereits zu Beginn der Projektlaufzeit konstituiert und von der Plattformkoordination EnergieAgentur.NRW und vom Wuppertal Institut gemeinsam auf verschiedenen Wegen innerhalb der Modellregionen und innerhalb der Einzelprojekte bekannt gemacht.

Die Einbeziehung der innerhalb der Modellregionen beteiligten Akteure erfolgte über unterschiedliche Kanäle. Neben zahlreichen persönlichen Kontakten über die üblichen Kommunikationsmedien sind hier vor allem zwei weitere Ebenen zu nennen:

- die überblicksartig und vor allem zum gegenseitigen Informationsaustausch angelegten Plattformsitzungen und
- die thematisch fokussierten Arbeitskreise, die der Erarbeitung und Diskussion verschiedener Grundlagen der Beurteilung der Umweltwirkungen von Elektromobilität dienen.

Die Teilnehmer der allgemeinen Sitzungen der Plattform Umweltbegleitforschung kamen aus unterschiedlichen Bereichen. Neben Programm- und Plattformkoordination waren Vertreter und Vertreterinnen aus Wissenschaft und Stakeholder aus Industrie und Dienstleistungsgewerbe vertreten. Die beteiligten Akteure innerhalb der Arbeitskreise unterschieden sich je nach Themensetzung.

Die folgende Abbildung 2 soll die Einbettung der Umweltbegleitforschung Elektromobilität in das Förderprogramm „Modellregionen Elektromobilität“ samt Begleitforschungsprogramm veranschaulichen.

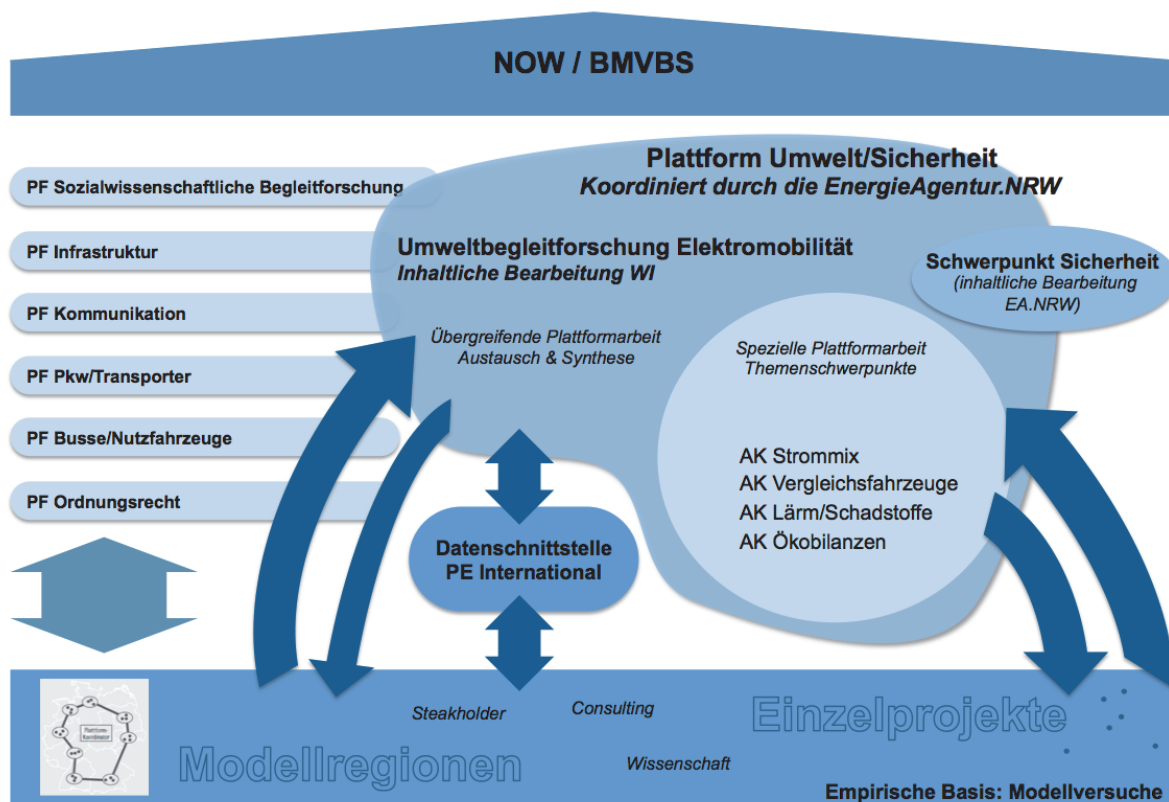


Abbildung 2 Einbettung der Umweltbegleitforschung Elektromobilität in das Förderprogramm „Modellregionen Elektromobilität“

Quelle Eigene Abbildung.

Die vier vertiefenden Arbeitskreise folgten unterschiedlichen Fragestellungen und erfüllten unterschiedliche Funktionen. Demensprechend war auch die Zusammenstellung der Teilnehmerinnen und Teilnehmer unterschiedlich.

- Der Arbeitskreis „Strommix“ baute auf der Leitfrage „Welcher Strommix soll den Vergleichsrechnungen zu Energieverbrauch und Klimabelastungen zugrunde gelegt werden?“ auf. Diskutiert wurden verschiedene Möglichkeiten der Festlegung der dem geladenen Strom

zugrunde liegenden Erzeugungspfade und deren perspektivischer Entwicklung. Beteiligte aus den Projekten waren vorrangig Energieversorgungsunternehmen (EVU).

- Innerhalb des Arbeitskreises „Vergleichsfahrzeug“ wurde die Leitfrage „Welche Vergleichsfahrzeuge mit herkömmlichem Antrieb sollen den Vergleichsbetrachtungen mit den Elektrofahrzeugen zugrunde gelegt werden?“ diskutiert. Demnach ging es um die Festlegung bestimmter Parameter zur Bestimmung derjenigen fossil betriebenen Fahrzeuge, die den Elektrofahrzeugen bei der Berechnung der Klimabilanzen vergleichend gegenübergestellt werden sollten. Diskussionspartner aus den Projekten waren vorrangig Automobilhersteller und -umrüster.
- Leitfrage des Arbeitskreises „Lärm und Schadstoffe“ war „Wie sind die Modifikationen bei Lärm und Abgasen durch Elektrofahrzeuge zu beurteilen?“. Im Rahmen der Treffen wurden primär Ergebnisse aus den Einzelprojekten ausgetauscht und aufgenommen und vorhandene Befunde gemeinsam erörtert. Partner waren Vertreterinnen und Vertreter aus Forschungsinstituten in den Modellregionen.
- Im Arbeitskreis „Ökobilanzen“ erfolgte ein Austausch zu der Leitfrage „Wie sind Elektrofahrzeuge in einer gesamtheitlichen, ökobilanziellen Abgrenzung zu beurteilen?“. Dies umfasste die maßgeblichen lebenszyklusweiten Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen und erfolgte einerseits auf Grundlage von Einzelprojekten, innerhalb derer Teile dieser Fragestellungen adressiert wurden sowie auf Grundlage externer Expertise. An diesem Austausch waren neben Vertreterinnen und Vertretern aus Forschungsinstituten in den Modellregionen auch Externe beteiligt.

Aufgabe der vier Arbeitskreise war die Bearbeitung grundlegender Fragestellungen zur Bewertung der Elektromobilität, die Festlegung verschiedener umweltrelevanter Einflussgrößen und die Untersuchung ihrer Wirkungen. Mit den Ausarbeitungen im Bereich Strommix und im Bereich Vergleichsfahrzeuge wurden die maßgeblichen Grundlagen geschaffen, um Elektromobilität im Vergleich zur Verkehrsabwicklung mit fossil betriebenen Fahrzeugen in verschiedenen Szenarien unter Umweltgesichtspunkten bewerten zu können.

Die Untersuchung des Betriebs der Elektrofahrzeuge selbst bildet einen weiteren maßgeblichen Baustein für dieses Vorhaben und stellt somit einen zentralen Teil der vorliegenden Untersuchungen dar. Durch den Einsatz einer erstmals in dieser Größenordnung vorhandene Anzahl moderner Elektrofahrzeuge innerhalb zahlreicher Demonstrationsvorhaben wurde hierfür die empirische Basis geschaffen. Um diese systematisch für konkrete Fragestellungen zu Einsatz, Betrieb und Energieverbrauch einbeziehen zu können, wurde innerhalb der Plattform ein einheitliches Datenformat definiert und eine Schnittstelle zum Datenaustausch mit den Partnerinnen und Partnern aus den Modellregionen implementiert. Zur Abwicklung des Datentransfers und zur technischen Unterstützung des Datenmanagements wurde PE International als Partner herangezogen und die SoFi-Software als Datenschnittstelle genutzt.

Im Rahmen des Datenaustausches war es den beteiligten Datenlieferanten zusätzlich möglich, über die dazugehörige Internetpräsenz mittels eines Web-Interfaces verschiedene Auswertungen ihrer eigenen Messdaten selbst durchzuführen und sich in Form von graphischen Veranschaulichungen und Tabellen ausgeben zu lassen.

Die gemeinsame und detaillierte/vertiefende Auswertung aller gewonnenen Daten erfolgte beim Wuppertal Institut. Zwischenergebnisse wurden im Rahmen der allgemeinen Plattformsit-

zungen in regelmäßigen Abständen vorgestellt und dort mit den Beteiligten aus den Modellregionen rückgekoppelt. Die Rückkopplung der Ergebnisse aus den vier thematischen Arbeitskreisen erfolgte ebenfalls im Rahmen der Plattformsitzung mit allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern.

Die Darstellung der Ergebnisse der vier Arbeitsgruppen und der Analysen des Fahrzeugeinsatzes erfolgt ausführlich in insgesamt fünf Teilberichten (s. Auflistung im Anhang), die diesem Forschungsbericht als inhaltliche Basis zugrunde liegen.

1.4 Gliederung

Die Abschätzung und Einordnung der Umweltwirkungen von Fahrten mit Elektrofahrzeugen als wesentliche Fragestellung des Kapitels 2 erfolgt im direkten Vergleich mit herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen. Die umweltseitige Betrachtung findet dabei mit Fokus auf Energieverbrauch und Klimalasten statt; es werden die CO₂-Emissionen durch Verbräuche und Erzeugungsketten von Elektrofahrzeugen denen von konventionellen Pkw gegenübergestellt. Untersucht wird diese Fragestellung, indem zuerst die maßgeblichen Vergleichsmaßstäbe bestimmt und alternative Betrachtungen erörtert werden (Kapitel 2.1 und 2.2). Darauf folgend werden die empirischen Befunde des Einsatzes von Elektrofahrzeugen aus den Modellregionen dargestellt (Kapitel 2.3) und fließen als Eingangsgrößen für die Berechnung der Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen ein (Kapitel 2.4).

Weitere für die Umweltwirkungen von Elektromobilität relevante Parameter werden in Kapitel 3 erörtert. Im Bereich Lärm und Schadstoffe wird auf Geräuschemissionen, gasförmige Emissionen und Partikelemissionen eingegangen (Kapitel 3.1). Der Abschnitt Ökobilanzielle Betrachtungen widmet sich den eingesetzten Materialien und deren Verfügbarkeit (Kapitel 3.2).

Im Anschluss an diese Untersuchungen werden zusätzliche Befunde aus dem Praxiseinsatz der Elektrofahrzeuge dargestellt (Kapitel 4.1) und Ansatzpunkte für verkehrssystemare Betrachtungen gegeben (Kapitel 4.2).

Der Forschungsbericht schließt in Kapitel 5 mit einer Zusammenfassung der zentralen Befunde der unterschiedlichen Untersuchungsgebiete (Kapitel 5.1) und darauf aufbauend einigen Überlegungen der Autoren zu sachlichen Weiterentwicklung der Elektromobilität und zu weiteren Forschungsbedarfen (Kapitel 5.2).

2 Elektro-Pkw im Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen: Energieverbrauch und damit verbundene Klimalasten

2.1 Grundannahmen zu Vergleichsfahrzeugen und betriebsbedingte Klimalasten¹

Bei der auf Pkw und leichte Nutzfahrzeuge fokussierten Betrachtung spielt naturgemäß die Bestimmung der herkömmlichen Vergleichsfahrzeuge eine maßgebliche Rolle. Um der Vielzahl der eingesetzten Fahrzeuge und der damit verbundenen Einsatzfelder gerecht zu werden, ist daher die Bestimmung mehrerer Vergleichsfahrzeuge angezeigt.

Anders als etwa im Untersuchungsprogramm der Busplattform zu Vergleichen herkömmlicher und Hybrid-Busse können in der vorliegenden Untersuchung zu Pkw und leichten Nutzfahrzeugen die Einzelfahrten der Elektrofahrzeuge nicht durch einzelne Vergleichsfahrten mit herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen vollständig nachgebildet werden. Dazu ist das Fahrtenprogramm der verschiedenen Fahrzeuge und das Fahrprofil der Einzelfahrten zu unterschiedlich. Deshalb muss Bezug genommen werden auf Normverbrauchswerte. Zusätzlich zu den spezifischen CO₂-Emissionen aus dem Betrieb werden weiterhin die CO₂-Emissionen der Vorketten bestimmt und einbezogen.

2.1.1 Ansatz für die Wahl der Vergleichsfahrzeuge

Als Grundansatz soll den Elektrofahrzeugen jeweils ein aktuelles herkömmlich angetriebenes Fahrzeug mit dem gleichen Gebrauchsnutzen gegenübergestellt werden. Zur Abbildung der unterschiedlichen Fahrzeugauslegungen und -gestaltungen wird grob auf die vom Kraftfahrtbundesamt (KBA) in Absprache mit der Fahrzeugindustrie vorgenommene Einteilung der Fahrzeugsegmente zurückgegriffen (vgl. KBA 2011d und die laufenden statistischen Angaben des KBA hierzu). Die im Forschungsprogramm eingesetzten Elektro-Pkw lassen sich im Wesentlichen den Segmenten Mini, Kleinwagen, Kompaktklasse und Mittelklasse zuordnen. Bei den Utilities erscheint eine Differenzierung in kleine und große leichte Nutzfahrzeuge sinnvoll, um der großen Spannweite der Fahrzeuge - und korrespondierend damit der Einsatzgebiete - in diesem Segment gerecht zu werden.

Die Bestimmung der Vergleichsfahrzeuge erfolgt für jedes Segment jeweils in drei Stufen:

- Best of Class/Forerunner (verbrauchsgünstigstes vergleichbares Serienmodell als Benchmark)
- Marktmittel (verkaufsgewichteter Durchschnitt)
- „noch marktgängig“ (verbrauchs-/emissionsseitig schlechteste marktrelevante Modellreihe)

Das jeweilige Best of Class-Fahrzeug wird unter Nutzung der aktuellen DAT-Listen (2011) und von Herstellerangaben als Benchmark besonders verbrauchs- und emissionsarme Modelle² bestimmt. Unter dem Gesichtspunkt einer Emissionsminimierung ergibt sich der

¹ Für detailliertere Ausführungen zum Thema Vergleichsfahrzeuge siehe den Teilbericht „Umweltbegleitforschung für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge: Auswahl der Vergleichsfahrzeuge“ des Wuppertal Instituts.

² Im Bereich der Forerunner können also konkrete Modelle als Vergleichsmaßstab herangezogen werden.

mögliche Vor- bzw. Nachteil von Elektro-Pkw gegenüber diesen praktisch verfügbaren Fahrzeugen.

Die Verbrauchs- und Emissionswerte der „Marktmittel“ bestimmen sich aus den Mittelwerten aller Neuzulassungen der jeweiligen Segmente innerhalb des Jahres 2010 und geben so den Durchschnitt der in diesem Jahr neu angeschafften Fahrzeuge wieder.

Der unterste Vergleichsmaßstab konventioneller Fahrzeuge innerhalb eines Segments wird anhand der verbrauchs- und emissionsseitig schlechtesten der zehn volumenstärksten (und damit marktrelevanten) Modellreihen gebildet.

2.1.2 Gewählte Vergleichsfahrzeuge

Während also für die Marktmittel und die marktrelevante schlechteste Modellreihe Durchschnittsbildungen Grundlage der Vergleichsfahrzeuge sind, stehen hinter den Forerunners tatsächlich vorhandene Fahrzeuge.

In der Klasse der Minis bildet der smart fortwo coupé cdi 40 kW DPF softip mit CO₂-Emissionen in Höhe von 86 g/km die Referenz, vergleichbar ist auch das entsprechende Cabriolet (smart fortwo cabrio cdi 40 kW DPF, 13.840 €). Im Bereich Kleinwagen setzt der VW Polo 1,2 TDI DPF (CR) BM den Benchmark bei 87 g CO₂ pro km. In der Kompaktklasse bildet der VW Golf 1,6 TDI DPF (CR) BM das Vergleichsfahrzeug. Die entsprechenden CO₂-Emissionen liegen bei diesem Fahrzeug bei 99 g CO₂ pro km. Forerunner der Mittelklassefahrzeuge ist das Hybridfahrzeug Toyota Prius mit CO₂-Emissionen in Höhe von 89 g CO₂ pro km.³

³ In dem Hybridfahrzeug kommt ein Benzin/Elektro-Hybridantrieb zum Einsatz, bei dem keine elektrische Energie aus dem Stromnetz entnommen wird. Die Aufladung der Batterie erfolgt während der Fahrt über den Generator vom Verbrennungsmotor und per Rekuperation (Energierückgewinnung durch Brems- und Schubkraft).

Eine Übersicht weiterer maßgeblicher Bestimmungsmerkmale dieser Fahrzeugmodelle enthält die nachfolgende Tabelle 1.

Tabelle 1 Forerunner herkömmlicher Pkw in den Fahrzeugsegmenten, in denen Elektro-Pkw vertreten sind

Segment		Minis	Kleinwagen	Kompaktklasse	Mittelklasse
Modell		<i>smart fortwo coupé cdi 40 kW DPF softip</i>	<i>VW Polo 1,2 TDI DPF (CR) BM</i>	<i>VW Golf 1,6 TDI DPF (CR) BM</i>	<i>Toyota Prius (Hybrid)</i>
Parameter	Einheit				
Länge	mm	2.695	3.970	4.199	4.460
Breite	mm	1.559	1.682	1.779	1.745
Höhe	mm	1.558	1.465	1.480	1.490
Leergewicht	kg	770	1.150	1.314	1.445
zul. Gesamtgewicht	kg	1.050	1.590	1.750	1.805
Sitzplätze	Anzahl	2	5	5	5
Motor	Energieart	Diesel	Diesel	Diesel	Benzin (El.)
Hubraum	ccm	799	1.199	1.589	1.798
Nennleistung	kW	40	55	77	100
Höchstgeschw.	km/h	135	173	190	180
Beschl. 0-100km/h	sek.	16,8	13,9	11,3	10,4
Verbrauch/100 km kombiniert	I DK, I OK	3,3	3,3	3,8	3,9
Verbrauch/100 km innerorts	I DK, I OK	3,4	4,0	4,7	3,9
CO ₂ -Emissionen	g/km	86	87	99	89
Listenpreis	€	10.190	16.675	22.150	25.750

Quelle: Herstellerangaben, DAT; Stand März 2011.

Die Fahrzeugklasse der leichten Nutzfahrzeuge wurde in Erweiterung der bestehenden KBA-Segmentierung zum Zweck einer differenzierteren Ableitung von Vergleichsfahrzeugen zusätzlich in kleine und große Utilities aufgeteilt. Zur Abgrenzung wurde hier beim Leergewicht ein Wert von 1.500 kg herangezogen. Innerhalb der kleinen Utilities bildet der Fiat Doblo Kastenwagen Basis 1,3 Multijet EURO5 mit 126 g CO₂ pro km das Vergleichsfahrzeug mit konventionellem Antrieb, innerhalb der großen Utilities setzt der Mercedes Vito 116 Cdi den Benchmark in Punkto CO₂-Emissionen (182 g/km).

In nachstehender Tabelle 2 sind weitere Bestimmungsmerkmale der beiden Nutzfahrzeugmodelle zusammengestellt.

Tabelle 2 Forerunner herkömmlicher leichter Nutzfahrzeuge in den Fahrzeugsegmenten, in denen Elektro-Fahrzeuge vertreten sind

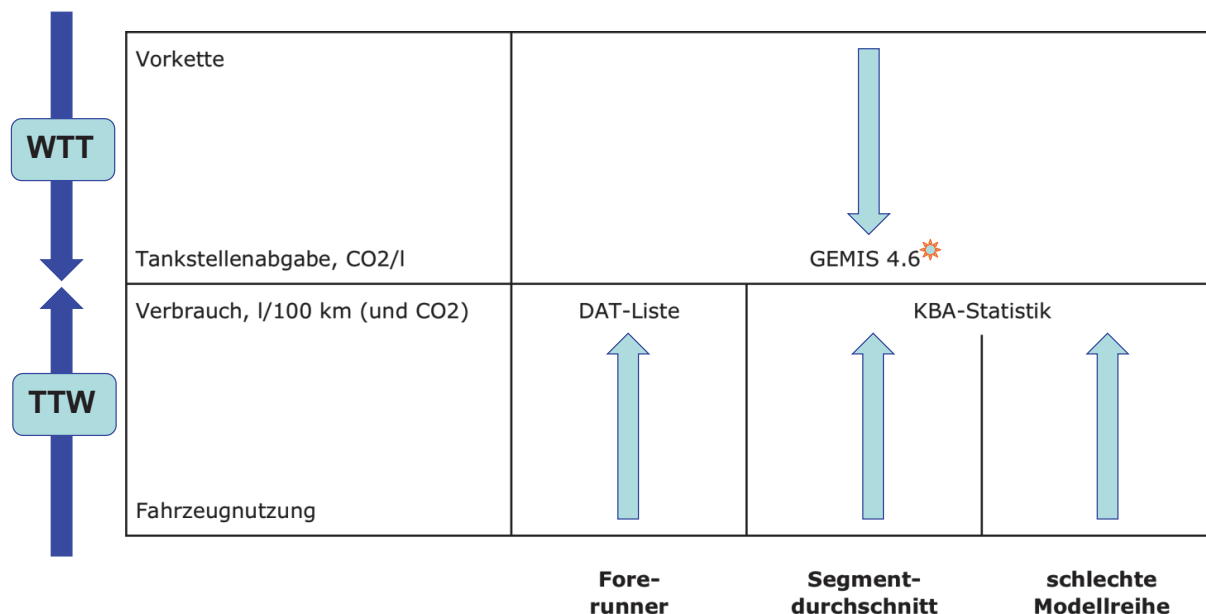
Segment		Kleine Utilities	Große Utilities
Modell		<i>Fiat Doblo Kastenwagen Basis 1,3 Multijet EURO5</i>	<i>Mercedes Vito 116 Cdl</i>
Parameter	Einheit		
Länge	mm	4390 (max)	4763
Breite	mm	1832 (max)	1901
Höhe	mm	1845 (max)	1902
Leergewicht	kg	1378	1833
zul. Gesamtgewicht	kg	2020	2800
Sitzplätze	Anzahl	2	3
Motor	Energieart	Diesel	Diesel
Hubraum	ccm	1248	2143
Nennleistung	kW	66	120
Höchstgeschw.	km/h	158	176
Beschl. 0-100km/h	sek.		13,4
Verbrauch/100 km kombiniert	I DK, I OK	4,8	6,9 / 7,4 (min/max)
Verbrauch/100 km innerorts	I DK, I OK	5,9	8,4 / 9,0 (min/max)
CO ₂ -Emissionen	g/km	126	182 / 195 (min/max)
Listenpreis	€	13.450	23.860

Quelle: Herstellerangaben, DAT; Stand März 2011.

2.1.3 Rechnerischer Ansatz zur Bestimmung der Verbrauchs- und Emissionswerte

Die Bestimmung der Verbrauchs- und Emissionswerte der konventionellen Vergleichsfahrzeuge erfolgt unter Berücksichtigung der direkten und indirekten Energieverbräuche. Das heißt, dass neben den direkten Verbräuchen und Emissionen durch den Betrieb der Fahrzeuge auch die Emissionen der Vorketten, also durch Bereitstellung des Kraftstoffs, einbezogen werden.

Abbildung 3 zeigt das Rechenschema zur Ermittlung der CO₂-Emissionen herkömmlicher Pkw, das im Folgenden näher beschrieben wird.



*und künftige Entwicklung gemäß Dekarbonisierungsstrategie

Abbildung 3 Rechengesamtheit zur Ermittlung der spezifischen CO₂-Emissionen herkömmlicher Fahrzeuge

WtT = Well to Tank, TtW = Tank to Wheels

Quelle: Eigene Darstellung.

Verbräuche/Emissionen ab Treibstofftank (Tank to Wheels, TtW)

Als standardisierte Größen kommen zur Ermittlung der Verbrauchswerte im Betrieb der Fahrzeuge praktisch nur die Normverbrauchs- und Emissionswerte gem. Richtlinie 1999/94/EG⁴ in Frage.

Der kritische Einwand gegen eine schlichte Verwendung der Normverbrauchs- und Emissionswerte liegt auf der Hand: Die Bedingungen auf einem Rollenprüfstand für den standardisierten Fahrzyklus⁵ ermittelten Normwerte unterstützen zwar einen bestimmten ceteris-paribus-Vergleich verschiedener Fahrzeugmodelle untereinander, die Vergleichbarkeit mit Messwerten aus dem praktischen Verkehrseinsatz ist jedoch eingeschränkt. Für einen sachgerechten Vergleich sind deswegen in dem möglichen und begründet untersetzbaren Umfang Korrekturen vorzunehmen. So bestätigen die bislang vorliegenden Daten aus dem Praxiseinsatz, dass die Elektrofahrzeuge ein Einsatzprofil aufweisen, das eine vorzugsweise Verwendung in städtischen oder stadähnlichen Verkehrssituationen vermuten lässt. Bei Bestätigung soll dies dadurch berücksichtigt werden, dass nicht der gesamte Fahrzyklus und die darauf bezogenen Werte, sondern lediglich der innerstädtische Teilzyklus zugrunde gelegt wird, für den die Verbrauchswerte auch getrennt vorliegen.

Für die in erweiterter Betrachtung herangezogenen schlechtesten Modellreihen und Segmentdurchschnitte ist dies allerdings nicht ohne weiteres möglich, da nur die – verkaufsgewichteten – CO₂-Normemissionen aus dem gesamten Fahrzyklus vorliegen (Innerorts- und

⁴ Diese sind in der deutschen Pkw-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung v. 28.05.2004 umgesetzt und werden verordnungskonform regelmäßig von DAT kostenfrei öffentlich zugänglich (vgl. aktuell DAT 2011).

⁵ Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ) oder englisch New European Driving Cycle (NEDC).

Außerorts-Zyklus kombiniert). Zur Abbildung von Werten für den innerörtlichen Teilzyklus wird hier die Verwendung eines Aufschlags auf den kombinierten Emissionswert in Höhe von 15 % verwendet.⁶

Vorkette bis Treibstofftank (Well to Tank, WtT)

Für die Abbildung der Aufschläge, die durch die Vorkette vor der Tankbefüllung bedingt sind, wird bei den Vergleichsfahrzeugen auf GEMIS, Vers. 4.6 zurückgegriffen.⁷ In GEMIS 4.6 wird als Systemabgrenzung der gesamte Lebenszyklus inkl. Transporte + Materialvorleistung, ohne Entsorgung berücksichtigt, als Bezugspunkt wird die Endenergienutzung bei 100 % Nutzungsgrad gewählt. Pro im Fahrzeug genutzter Menge von 1 Liter Benzin wird eine gesamte CO₂-Emission von 3.055 g angegeben, pro Liter Diesel sind es 3.058 g. Demgegenüber werden für die örtliche Emission in der Kraftstoffverbrauchs- und CO₂-Emissionsrechnung als Rechenwerte zugrunde gelegt: 23,7 g CO₂ / km je l Benzinverbrauch auf 100 km, bzw. 26,5 g CO₂ / km je l Dieselverbrauch auf 100 km, also je l Benzin 2.370 g CO₂ und je l Diesel 2.650 g CO₂. Die Vorketten (WtT, Well to Tank) entsprechen damit Aufschlägen auf die üblicherweise genannten (örtlichen) Emissionswerte (TtW, Tank to Wheels) in Höhe von 28,9 % bei Benzin bzw. 15,4 % bei Diesel (s. Tabelle 3).

Tabelle 3 Ableitung des Aufschlags auf die TtW-Verbräuche zur Berechnung der Vorkette (Emissionen in g CO₂ je l Kraftstoff)

Kraftstoff	Emissionen gesamt (WtW) nach GEMIS 4.6	davon		Vorkette (WtT)	Faktor Aufschlag Vorkette
		Örtliche Emissionen des Kraftstoffver- brauchs (TtW)			
Benzin	3.055	2.370		685	28,9 %
Diesel	3.058	2.650		408	15,4 %

Mit diesen Aufschlägen können die Vorketten und Gesamtemissionen der Forerunner-Fahrzeuge bestimmt werden, für welche die Treibstoffart und die Normverbrauchswerte bekannt sind.

Für den erweiterten Ansatz, der die Segmentdurchschnitte und die jeweils schlechteste relevante Modellreihe abbildet, ist das Vorgehen etwas komplizierter. Da jedoch in jedem Fall die Anzahl der Fahrzeuge nach Benzin- und nach Dieselantrieb zusammen mit den jeweils zugehörigen durchschnittlichen Emissionswerten vorliegt, können entsprechend gewichtete Aufschlagfaktoren für die zugehörigen Vorketten und Gesamtemissionen gebildet werden.⁸

⁶ Angesichts der je nach Fahrzeugmodell deutlich unterschiedlichen Differenz zwischen dem Außerorts- und dem Innerorts-Wert der Normemissionen beinhaltet ein derartiger Aufschlag naturgemäß Unsicherheiten, dürfte die tatsächlichen Verhältnisse im Mittel aber gut treffen.

⁷ GEMIS = Globales Emissions-Modell integrierter Systeme, weitere Informationen unter <http://www.gemis.de/de/index.htm>.

⁸ Gewichtung gemäß der Anteile der Benzin- und der Anteile der Dieselfahrzeuge innerhalb der jeweiligen Segmente.

2.1.4 Ergebnisse: Klimalasten konventioneller Vergleichsfahrzeuge

Die spezifischen CO₂-Emissionen der aus dem Bereich der konventionellen Fahrzeuge ausgewählten Vergleichsfahrzeuge werden zusammenfassend in Abbildung 4 veranschaulicht. Nachfolgend eine kurze Darstellung der wichtigsten Befunde:

Minis

Auffällig im Mini-Segment ist, dass das positive Referenzfahrzeug (Smart) innerorts und außerorts nahezu die selben Verbrauchs- und Emissionswerte aufweist und – untypisch für dieses Segment – über einen Dieselantrieb verfügt, der nicht nur mechanisch effizienter ist, sondern auch von einem geringeren Emissionsaufschlag für die Vorkettenemissionen profitiert. Im Ergebnis liegt der Forerunner damit deutlich günstiger, als es in diesem Segment üblich ist, gegenüber der schlechtesten Modellreihe im Stadtverkehr nur bei halb so hohen Emissionswerten. Allerdings weist das hier zugrunde gelegte Referenzfahrzeug auch nur zwei Sitzplätze auf (wie auch manche elektrische Vergleichsfahrzeuge), während in dieser Fahrzeugklasse ansonsten Viersitzer dominieren.

Kleinwagen

Auch bei den Kleinwagen ist der niedrige Verbrauchs-/Emissionswert eine Folge eines effizienten Turbodiesel-Antriebs, allerdings mit einem deutlichen Mehrverbrauch im Stadtverkehrs-Zyklus. Auch hier weist der Durchschnitt des Segments – fast ausschließlich Fahrzeuge mit Benzinantrieb – weit höhere Emissionen auf. Zu beachten ist dabei, dass das gewählte verbrauchsgünstige Vergleichsfahrzeug (VW Polo) ein Fünfsitzer ist, während das Segment allgemein, wie auch die Elektrofahrzeuge, eher durch Viersitzer geprägt ist.

Kompaktklasse

Innerhalb der Kompaktklasse stellt sich der Forerunner (VW Golf) gegenüber dem Segmentdurchschnitt noch besser dar als bereits bei den Vergleichsfahrzeugen der Mini- und Kleinwagenklasse beobachtet. Insgesamt überwiegt auch in der Kompaktklasse der Benzinantrieb, mit einem Anteil von etwa zwei Dritteln allerdings nicht mehr ganz so deutlich wie bei den Minis und Kleinwagen. Klassentypisch handelt es sich in aller Regel um Fünfsitzer.

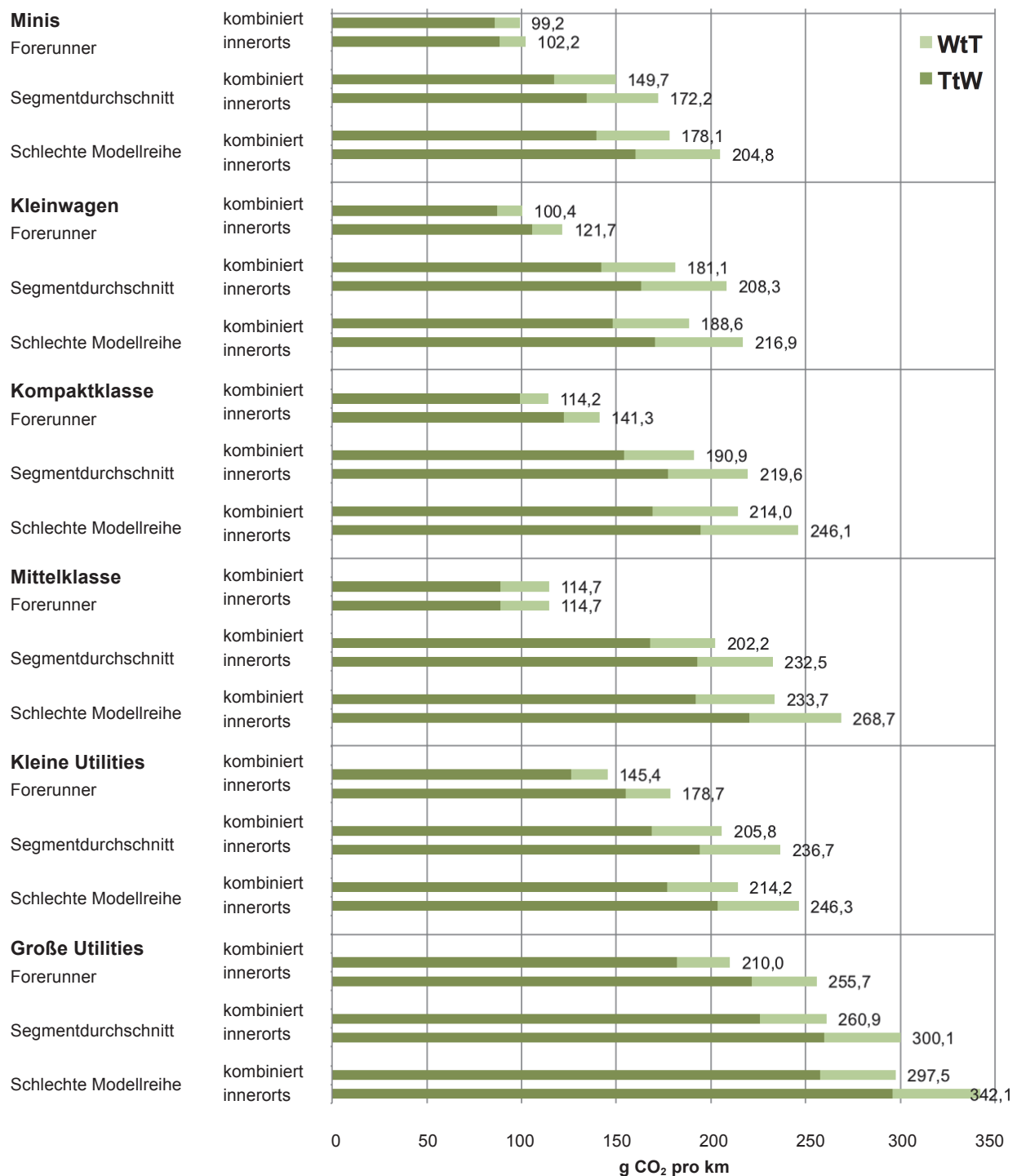


Abbildung 4 Spezifische CO₂-Emissionen im kombinierten und im innerörtlichen Fahrzyklus mit den Vorketten für jeweils ein emissionsarmes Modell, den Segmentdurchschnitt und die emissionsstärkste relevante Modellreihe im Jahr 2010

Quelle: eigene Berechnungen/eigene Darstellung auf Basis von Herstellerangaben und DAT (2011).

Mittelklasse

Das in der Mittelklasse gewählte verbrauchsgünstige Referenzfahrzeug (Prius) ist das einzige in Deutschland in größeren Stückzahlen verbreitete Voll-Hybridmodell. Trotz des mechanisch nicht so effizienten Grundantriebs durch einen Ottomotor zeigt das Fahrzeug in Anbetracht seiner Größe hervorragend niedrige Verbrauchs- und Emissionswerte. Außerdem ist

die Hybridisierung als Grund zu nennen für die erfreuliche Tatsache, dass der inner- und außerörtliche Verbrauch auf praktisch gleichem Niveau liegen. Auch hier liegt das Emissionsniveau im Durchschnitt des Segments weit höher, bei der schlechtesten Modellreihe auf doppelter Höhe. Allerdings ist zu beachten, dass der Prius innerhalb des Segments trotz der standesgemäßen fünf Sitzplätze zu den kleineren Modellen zu zählen ist.

Kleine leichte Nutzfahrzeuge

Auch innerhalb der kleinen leichten Nutzfahrzeuge sind deutliche Unterschiede zwischen dem Referenzfahrzeug (Fiat Doblo) und dem Segmentmittel zu erkennen. Die Splitting der Utility-Klasse hat hier zu einer deutlich homogeneren Bezugsgruppe geführt, innerhalb derer das Referenzfahrzeug bezogen auf Länge und Gewicht zwar nicht das kleinste Fahrzeug ausmacht, jedoch im unteren Bereich liegt. Auch der Forerunner der kleinen Utilities hat, wie gut 50 % dieses Teilsegments, einen Dieselantrieb und profitiert somit von günstigeren Vorkettenemissionen. Zu bemerken ist, dass es innerhalb der kleinen leichten Nutzfahrzeuge einen nicht unerheblichen Anteil an Fahrzeugen mit sonstigen Treibstoffen gibt, hier Gas-Hybridfahrzeuge.

Große leichte Nutzfahrzeuge

Gegenüber den kleinen leichten Nutzfahrzeugen streut das Teilsegment der großen leichten Nutzfahrzeuge stärker, der Differenzierungslogik folgend nach oben in Richtung verhältnismäßig schwererer und längerer Fahrzeuge. Dennoch zeigt sich in dieser Größenklasse ein verhältnismäßig geringerer Unterschied zwischen Forerunner und schlechtester Modellreihe, als in den Pkw-Segmenten zu beobachten ist. Hinsichtlich der Antriebsart herrscht innerhalb der großen Utilities Einheitlichkeit, fast alle Modelle sind Diesel-Fahrzeuge. Das Referenzfahrzeug (Mercedes Vito) liegt als kleinstes und leichtestes Fahrzeug dieses Teilsegments deutlich unter dem Klassenmittel.

2.1.5 Zusammenfassung und kritische Einschätzung

Die vorliegenden Berechnungen zeigen, dass die Emissionen der Vorketten auf keinen Fall vernachlässigt werden dürfen.

Die Analyse der Verbrauchs- und Emissionswerte zeigt weiterhin, dass die Bandbreite innerhalb der Fahrzeugsegmente ganz erheblich ist, deutlich größer als der durch die unterschiedliche Fahrzeuggröße bedingte verständliche Unterschied zwischen den betrachteten Segmenten. Dies lässt sich naturgemäß auch als Potenzial für weitere Effizienzsteigerungen in der Neuzulassungsflotte lesen.

Trotz größtmöglicher Genauigkeit müssen Einschränkungen der Vergleichbarkeit der vorliegenden Ergebnisse in Kauf genommen werden. So liegt beispielsweise auf der Hand, dass auch bei einer segmentweisen Zuordnung der Vergleichsfahrzeuge die Fahrzeugauslegung in einigen zentralen Parametern typischerweise zwischen Elektrofahrzeugen und herkömmlichen Fahrzeugen signifikant unterschiedlich ausfällt. Maßgebliche Unterschiede ergeben sich auch aus der Tatsache, dass die Elektrofahrzeuge typischerweise nur beschränkt marktverfügbare Vor- oder Kleinserienmodelle sind, während die herkömmlichen Vergleichsfahrzeuge aus dem ganz normalen Marktangebot auf der Basis üblicher Serienproduktion genommen werden. Einschränkungen dieser Art sind nicht vollständig zu beheben und legen

deutlich nahe, dass die zu erzielenden Ergebnisse insbesondere indikativen Charakter haben.

2.2 Grundannahmen zu Stromverbrauch und damit verbundenen Klimalasten

Als entscheidend für die Klimabe- bzw. -entlastung und den Vergleich mit herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen erweisen sich die CO₂-Emissionen, die aufgrund der Stromerzeugung dem Stromverbrauch der Elektrofahrzeuge zuzurechnen sind. Die angemessene Zuordnung der CO₂-Emissionen ist allerdings nicht offensichtlich und unstrittig, sondern abhängig von der Betrachtungsweise. Hierbei ist zunächst zu unterscheiden zwischen:

- einer Zurechnung von CO₂-Emissionen auf Basis des konkreten Stromverbrauchs der Elektrofahrzeuge sowie der dahinter liegenden Stromerzeugung und
- einer Betrachtungsweise, die sich auf bilanzielle Zurechnungen im Rahmen eines definierten Gesamtsystems (z.B. Deutschland oder die EU) entsprechend den bestehenden regulatorischen Bilanzansätzen bezieht.

Die rein regulatorische Betrachtung führt zu dem Ergebnis, dass Elektrofahrzeugen keine eigenständigen CO₂-Emissionen zuzurechnen sind: Die gesamten CO₂-Emissionen der Stromerzeugung sind im Rahmen des Cap&Trade-Regimes des Europäischen Emissionshandelssystems (European Emission Trading Scheme) limitiert und gelten mit diesem Limit als definiert.⁹ Menge und Art der Stromerzeugung (und -abnahme) verändern diesen Wert nicht, d.h. eine zusätzliche Nachfrage nach Strom etwa über den Einsatz von Elektrofahrzeugen führt in diesem System zu keinen Veränderungen der CO₂-Emissionen. Wieweit zur genauen Einhaltung des im Rahmen des Emissionshandelssystems limitierten Emissionsplans Emissionszertifikate zugekauft oder verkauft werden, und wer die jeweiligen Partner dieser Handelsvorgänge sind, bleibt für die insgesamt dem Stromsektor zugerechnete Emissionsmenge unbedeutend.

Die zuvor skizzierte Betrachtungsweise ist für die Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen unter systemanalytischen Gesichtspunkten und vor dem Hintergrund der geltenden energie- und klimapolitischen Regelungen grundsätzlich plausibel, erfordert aber bei der im Rahmen der Umweltbegleitforschung anstehenden Analyse der erzielbaren Nettoeffekte eine Ausweitung der Systemgrenze.

Insbesondere ist es notwendig, die – aktuell mögliche – Anrechnung der Elektrofahrzeuge im Rahmen der europäischen Flottenverbrauchslimits zu berücksichtigen. Konkret bedeutet dies:

- Sofern die Flottenverbrauchsgrenzen inklusive der Elektrofahrzeuge eingehalten werden, ergeben sich praktisch keine Auswirkungen der Elektrofahrzeuge auf die tatsächlichen CO₂-Emissionen aus dem Verkehr.

⁹ Nach Vorgaben des Europäischen Emissionshandelssystems müssen die Treibhausgasemissionen aus dem Bereich der Energiewirtschaft von 2005 bis 2020 um rd. 21 % reduziert werden. Entsprechend der geltenden Richtlinie geht die EU für den Zeitraum nach 2020 (d.h. nach dem Ende der jetzt fixierten Verpflichtungsperiode) von einer linear fortschreitenden Reduktion des caps von 1,74 %/a aus (vgl. Directive 2009/29/EC).

- Werden die Flottenverbrauchsgrenzen hingegen ohne Elektrofahrzeuge erreicht, kommt es durch die Elektrofahrzeuge zu einer Verminderung der tatsächlichen CO₂-Emissionen aus dem Verkehr.

2.2.1 Physische Betrachtung: Strommix-Methode

Konzentriert man sich auf die im vorliegenden Vorhaben auftragsgemäß im Kern zu betrachtende Fragestellung, wie sich die konkreten Fahrten der Elektrofahrzeuge mit ihrem Stromverbrauch und den darauf direkt entfallenden Erzeugungsketten auf die CO₂-Emissionen auswirken, gibt es keine einfache Antwort. Vielmehr werden in der Literatur und in der öffentlichen Debatte (vgl. z.B. die Vorträge auf dem 43rd LCA Discussion Forum, Life Cycle Assessment of Electromobility, 6th of April 2011, ETH Zürich) unterschiedliche Vorstellungen über die Zuordnung vertreten, da eine physikalisch eindeutige Zuweisung einer bestimmten Stromerzeugung einerseits zu einer bestimmten Stromverwendung andererseits in der Regel schwierig ist. Da die unterschiedlichen Zuweisungskonventionen zu weit auseinander liegenden Ergebnissen führen, greift nachfolgende Analyse alle Ansätze auf und macht damit die Unterschiede transparent. Dabei wird unterschieden zwischen:

- der vollständigen Versorgung der Elektrofahrzeuge mit erneuerbarem Strom (allgemein angestrebt und in den Modellregionen teils durch hohe Anforderungen an die Zertifizierung des Ladestroms gestützt),
- der Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom entsprechend dem derzeitigen deutschen Strommix und
- der Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom entsprechend der bei ökonomischem Betrieb anzusetzenden zusätzlichen Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge als zusätzliche Stromverbraucher.

Die unterschiedlichen Verfahren stellen letztlich Bewertungen im Rahmen bestimmter Kontexte dar, die je nach Perspektive jeweils für sich einen hohen Grad an Nachvollziehbarkeit aufweisen und für die Praxis unterschiedlich geeignet sind. Ein Vergleich der Ergebnisse der Modellrechnungen lässt damit eine ganzheitliche Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen zu. Während hier nachfolgend zunächst auf die grundsätzliche methodische Einordnung eingegangen wird, fasst Abschnitt 2.4.2 die resultierende Bewertung zusammen.

Versorgung der Elektrofahrzeuge mit regenerativem Strom

Eine Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Quellen wird allgemein angestrebt und in den Modellregionen teils durch hohe Anforderungen an die Zertifizierung des Ladestroms für die Batterien gestützt (vgl. hierzu u.a. die Strombezugsrichtlinie für Elektrofahrzeuge für die Modellregion Hamburg). Daneben wird von einzelnen Automobilunternehmen angestrebt, eigenständig Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien zu errichten, um so eine Versorgung der verkauften oder vermieteten Fahrzeuge gewährleisten zu können. Eine Betrachtungsweise, die bei der Bilanzierung der Klimawirkung von Elektrofahrzeugen die Verwendung von erneuerbarem Strom zugrunde legt, ist damit insbesondere aus der Sichtweise der Energieunternehmen und der Automobilindustrie deshalb gerechtfertigt. In diesem Fall sind die dem Stromverbrauch der Elektrofahrzeuge zuzurechnenden CO₂-Werte unter Berücksichtigung auch der vor- und nachgelagerten Prozesskette zwar nicht

Null, aber sehr gering, jedenfalls deutlich geringer als bei den verbrauchs- und emissionsgünstigsten herkömmlichen Vergleichsmodellen in den verschiedenen Fahrzeugsegmenten.

Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom entsprechend dem deutschen Stromerzeugungsmix

Bei der zuvor diskutierten Bewertungsmethode ist der klare Herkunftsnachweis des erneuerbar erzeugten Stroms zentral, angesichts der vielfältigen, heute auf dem Markt befindlichen Angebote von Ökostrom aber nicht unumstritten. Daher erscheint es sinnvoll, als Vergleichsbasis auch eine Bewertung auf der Basis des heutigen und (aufgrund des erst in der Zukunft energiewirtschaftlich signifikanten Beitrags der Elektromobilität) vor allem aber zukünftigen Strommixes (Perspektive 2020 und 2030) vorzunehmen. Dieser Ansatz ist in der Literatur weitgehend eingeführt und hinsichtlich der spezifischen Frage nach der aus der Perspektive der Kritiker des Herkunftsnachweisansatzes entscheidenden Kriteriums der Zusätzlichkeit von Stromnachfragekontingenten und deren spezieller Deckung neutral. Unter diesem Ansatz sind gegenwärtig die Elektrofahrzeuge hinsichtlich der CO₂-Emissionen etwa in dem Bereich der besten herkömmlichen Fahrzeuge in den jeweiligen Fahrzeugsegmenten einzuordnen. Im Vergleich zu den jeweiligen Durchschnittsfahrzeugen der verschiedenen Segmente liegen die zuzurechnenden CO₂-Emissionen der Elektrofahrzeuge niedriger.

Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom bei einer Betrachtung von Elektrofahrzeugen als zusätzliche Stromverbraucher (Merit-Order Ansatz)

Die dritte in der wissenschaftlichen Literatur zu findende Bewertungsmethode geht davon aus, dass es sich bei Elektrofahrzeugen um gegenüber dem Zustand ohne Elektrofahrzeuge zusätzliche Verbraucher handelt, deren Strombedarf durch eine zusätzliche Stromerzeugung gedeckt werden muss. Dieser Sichtweise wird von Kritikern entgegen gehalten, dass die Definition von „zusätzlich“ nicht uneindeutig ist, grundsätzlich auch auf andere Stromverbraucher zutrifft und zudem eine spezifische Herausnahme eines Verbrauchssegmentes nicht zulässig ist. Ungeachtet dieser Kritik eignet sich diese Bewertungsmethode, um eine Grenzbetrachtung anzustellen, sie stellt gleichermaßen die obere Bandbreite des Betrachtungsraums dar. Im Rahmen dieser Bewertungsmethode wird unterstellt, dass für die Abdeckung der zusätzlichen Stromnachfrage durch den Einsatz der Elektrofahrzeuge entweder ein bisher nicht am Netz befindliches Kraftwerk in Betrieb genommen werden muss oder aber ein bisher nicht vollständig ausgelastetes Kraftwerk einen höheren Stromerzeugungsbeitrag leisten kann.

Folgt man den Regeln des Kraftwerkseinsatzes nach der Merit-Order, also der (anbieterseitig) kostengünstigsten Deckung des zusätzlichen Strombedarfs, übernimmt diese Aufgabe das sog. Grenzkraftwerk. Dabei handelt es sich unter heutigen Rahmenbedingungen in der Regel um ein fossil befeuertes Kraftwerk, wodurch sich die resultierende Klimabilanz für die Elektrofahrzeuge ohne die Durchführung zusätzlicher Maßnahmen (z.B. Last- respektive Lademanagement) nicht so günstig darstellt wie bei den beiden anderen Bewertungsmethoden. Auf den zusätzlichen Kraftwerkseinsatz kann durch ein gesteuertes Laden der Elektrofahrzeuge gezielt Einfluss genommen werden. Geschieht dies in der Weise, dass hierdurch gezielt klimaverträglichere Kraftwerke adressiert werden, oder aber zukünftig sogar in nen-

nenswertem Umfang Überschussstrom aus erneuerbarer Erzeugung, dann stellt sich die Klimabilanz der Elektrofahrzeuge deutlich vorteilhafter dar.

2.2.2 Perspektivische Entwicklung der Stromerzeugung

Während die Angaben für den Status Quo mit empirischen Daten belegt werden können, sind für die weitere Perspektive Annahmen zu treffen bzw. Bezüge zu heute vorliegenden Szenarien notwendig. Als maßstabbildend hierfür kann derzeit das sogenannte „Ausstiegsszenario“ in den Energieszenarien 2011 von Prognos/EWI/GWS angesehen werden. Die dort vorgesehene Entwicklung der Stromerzeugung und der Treibhausgas-Emissionen zeigen die nachfolgenden Veranschaulichungen in Abbildung 5.

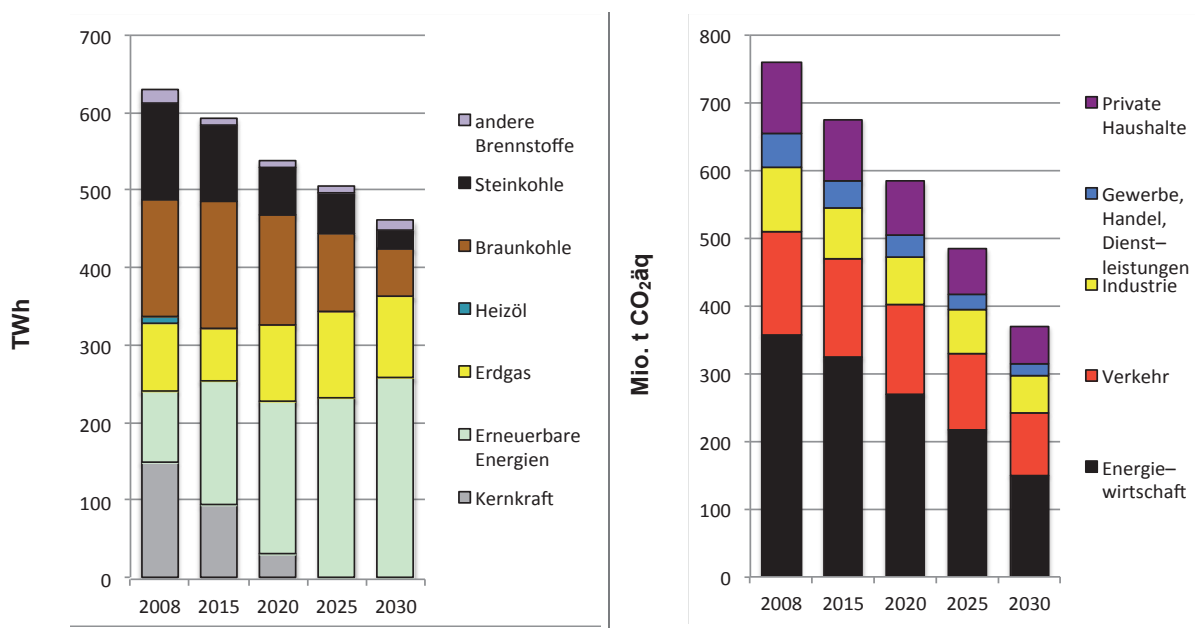


Abbildung 5 (a) Bruttostromerzeugung nach Energieträgern im Ausstiegsszenario (links), (b) Verbrennungsbedingte Treibhausgasemissionen (rechts)

Quelle: Eigene Darstellung nach Prognos/EWI/GWS (2010).

Durch den Kernenergieausstieg und den zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien ändert sich der Strommix bis zum Jahr 2020 bereits deutlich. Allerdings tragen auch fossile Kraftwerke noch im erheblichen Umfang zur Stromerzeugung bei.

Für die Rahmenannahmen der hier betrachteten Bewertungsmethoden bedeutet dies folgendes: Erneuerbarer Strom bleibt bei dem zu erwartenden Mix (mit sehr hohen Windenergieanteilen) sehr emissionsarm. Für die spezifischen Emissionen des nationalen Strommixes resultiert dem „Ausstiegsszenario“ folgend bis 2020 ein signifikanter Rückgang gegenüber dem Jahr 2010. Der Merit-Order-Strom bewegt sich deutlich auf eine Gasstromerzeugung, je nach Einsatzweise der Elektrofahrzeuge ggf. auch bereits auf eine teilweise erneuerbare Stromerzeugung zu.

Auch bei der Grenzbetrachtung ist damit zu berücksichtigen, dass sich im weiteren Zeitverlauf die Situation im deutschen Kraftwerkspark deutlich ändert: Zwar befinden sich aktuell zu größeren Teilen Kohlekraftwerke im Bau, die in den nächsten Jahren auch sukzessive in

Betrieb gehen; es kann aber schon für den weiteren Zeitraum bis 2020 und danach davon ausgegangen werden, dass aufgrund der absehbaren Anreizsysteme darüber hinaus primär Gaskraftwerke zugebaut werden. Eine derartige Vorgehensweise ist allein schon auf die Tatsache zurückzuführen, dass Gaskraftwerke aufgrund ihrer Anfahr- und Regeldynamik eine höhere Kompatibilität mit dem Ausbau erneuerbarer Energien aufweisen. In der weiteren Zukunft, etwa 2030 und danach, kann bei entsprechend gestalteter Entwicklung des Kraftwerksparks – d.h. weitgehende Konzentration auf erneuerbare Energien und Erdgaskapazitäten – nach der Merit-Order-Methode eine sehr weitgehende Versorgung der Elektrofahrzeuge durch Gasstrom unterstellt werden bzw. bei einem zukünftigen Einsatz der Elektrofahrzeuge als ausgleichendes Element für die Fluktuation der Wind- und Solarstromerzeugung auch anteilig durch erneuerbaren Strom.

2.3 Empirische Befunde aus den Modellversuchen¹⁰

Mit der Vielzahl der in den Modellregionen eingesetzten Fahrzeuge gibt es erstmals eine umfangreiche empirische Basis moderner Elektroautos, die zum Gegenstand systematischer Analysen gemacht werden können. Neben zahlreichen Fragestellungen zu Betriebs- und Ladevorgängen der Elektroautos ist für die Umweltbegleitforschung Elektromobilität vor allem die Frage der spezifischen Energieverbräuche der Elektrofahrzeuge zur Ableitung der Umweltwirkungen von Elektromobilität zentral.

Mit den im Rahmen der Einzelprojekte gewonnenen und von der Umweltbegleitforschung analysierten Daten liegen nun empirische Daten aus dem Praxiseinsatz vor. Aufbauend auf den vorne beschriebenen Grundlagen zu Vergleichsfahrzeugen und Strommix können diese Ergebnisse genutzt werden, um die Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen denen von vergleichbaren konventionellen Fahrzeugen heute und in der Zukunft gegenüber zu stellen.

2.3.1 Datenquelle

Grundlage der vorliegenden Analysen sind reale Messdaten aus den Demonstrationsprojekten des BMVBS Modellregionenprogramms (Phase 1). Diese wurden von den beteiligten Projektpartnern wie z.B. Fahrzeugherstellern oder Forschungsinstituten bzw. deren Unterauftragnehmern im Rahmen der Einsatzzeiträume der geförderten Fahrzeuge gewonnen und der Umweltbegleitforschung für eine systematische Analyse zur Verfügung gestellt. Nähere Informationen der Datenerhebung, -bereitstellung und -bearbeitung werden in Abschnitt 4 gegeben, der auch einen Einblick in die weiteren Ergebnisse der empirischen Untersuchungen liefert.

2.3.2 Ergebnisse: Energieverbrauchswerte von Elektrofahrzeugen

Als eins der zentralen Ergebnisse der empirischen Untersuchungen können die spezifischen Energieverbrauchswerte der einzelnen Fahrzeuge bzw. bestimmter Fahrzeugsegmente betrachtet werden. Die folgende Abbildung 6 zeigt die durchschnittlichen Energieverbräuche

¹⁰ Für eine detailliertere Darstellungen der empirischen Befunde siehe auch das Kapitel 4 sowie den Teilbericht „Analyse der Messdaten zum Betrieb und zur Ladung von Elektrofahrzeugen“ des Wuppertal Instituts.

der einzelnen Fahrzeuge als Funktion zurückgelegter Strecken und dabei verbrauchter Energiemengen.

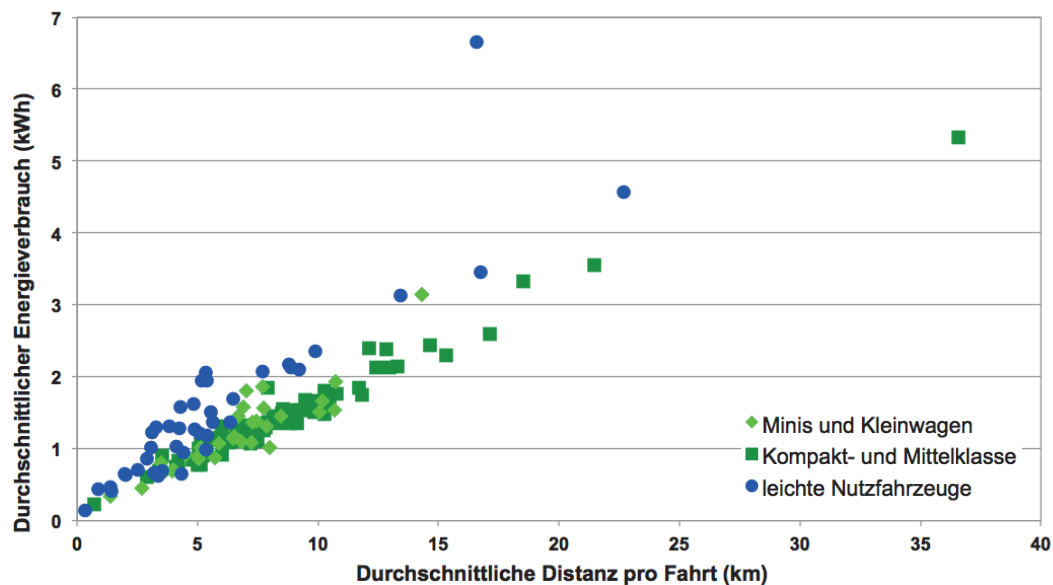


Abbildung 6 Spezifische Energieverbräuche der einzelnen Elektrofahrzeuge

N = 7.128 / 25.765 / 6.666 Fahrten von 31 / 81 / 40 Fahrzeugen (Minis und Kleinwagen / Kompakt- und Mittelklasse / Utilities).

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Innerhalb der einzelnen Segmente sind zwar Trendlinien zu beobachten, dennoch ist bei den Fahrzeugen eine deutliche Streuung zu beobachten. Dies kann einerseits auf die Vielfältigkeit der in den Segmenten vorhandenen Fahrzeuge zurückgeführt werden, andererseits darauf, dass es sich in der Regel bei den Fahrzeugen noch um Vorserien- und Umrüstfahrzeuge handelt. Die durchschnittlichen Verbräuche innerhalb der drei Vergleichsgruppen¹¹ Minis und Kleinwagen, Kompakt- und Mittelklasse und leichte Nutzfahrzeuge liegen bei folgenden Werten:

Tabelle 4 Spezifische Energieverbräuche (kWh pro 100 km)

Fahrzeugsegment	Spez. Energieverbrauch in kWh pro 100 km
Minis und Kleinwagen	17,2
Kompakt- und Mittelklasse	16,9
Leichte Nutzfahrzeuge	30,4

N = 7.128 / 25.765 / 6.666 Fahrten von 31 / 81 / 40 Fahrzeugen (Minis und Kleinwagen / Kompakt- und Mittelklasse / Utilities).

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

¹¹ Die drei Vergleichsgruppen wurden in Anlehnung an die Fahrzeugsegmentierung des KBA gebildet, um den unterschiedlichen Fahrzeugauslegungen und Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Modelle Rechnung zu tragen. Gleichzeitig gewährleistet die Zusammenfassung mehrere Segmente den nötigen Datenschutz der einzelnen Datenlieferanten bzw. Fahrzeughersteller.

Betrachtet man die einzelnen Fahrten der oben dargestellten 152 Fahrzeuge in Abbildung 7, zeigt sich ebenfalls eine relativ starke Streuung. Innerhalb der drei Vergleichsgruppen sind die Bilder erwartungsgemäß deutlich homogener, wenngleich auch ersichtlich ist, dass es zwischen den einzelnen Fahrten noch deutliche Variationen in den Verbrauchswerten gibt. Dies ist zum Teil auf das verhältnismäßig größere Gewicht von Messungenauigkeiten bei vielen kurzen Fahrten zurückzuführen, zum Teil auf Unterschiede im spezifischen Streckenverlauf und Fahrverhalten sowie auf den unterschiedlichen Einsatz von Nebenverbrauchern.

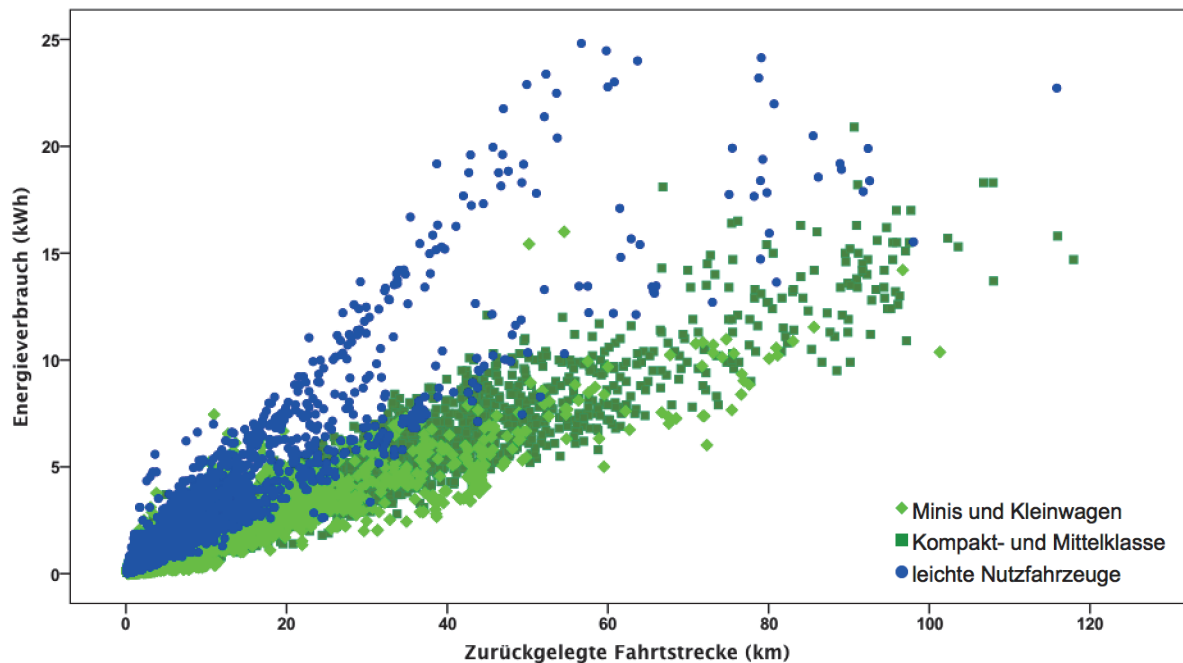


Abbildung 7 Energieverbräuche der einzelnen Fahrten

N = 7.128 / 25.765 / 6.666 Fahrten (Minis und Kleinwagen / Kompakt- und Mittelklasse / Utilities).

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Im Folgenden werden in Abbildung 8 bis Abbildung 10 die Streuungen der spezifischen Verbräuche der einzelnen Fahrten um die in Tabelle 4 angegebenen Mittelwerte abgebildet.

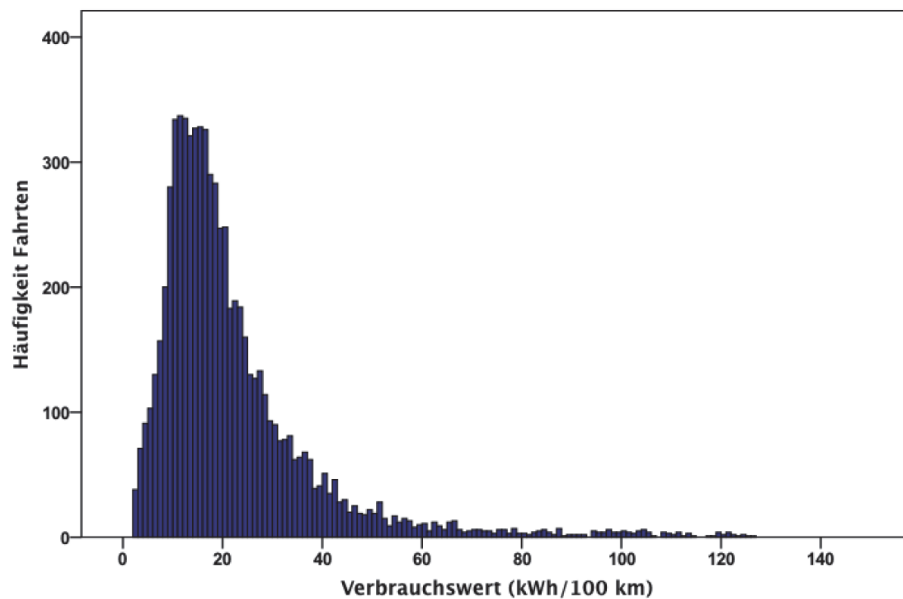


Abbildung 8 Spezifische Energieverbräuche der Demonstrationsfahrzeuge: Minis und Kleinwagen
N = 7.128 Fahrten.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Wie in Abbildung 8 zu erkennen ist, streuen die Energieverbräuche der Minis und Kleinwagen (hoher Anteil kurzer, energieintensiver Fahrten!) relativ stark, es haben nur ca. 21 % der Fahrten einen spezifischen Energieverbrauch im Bereich des Durchschnitts (17,2 kWh pro 100 km) \pm 2,5 kWh. Im Mittel liegen die Verbrauchswerte der Minis und Kleinwagen jedoch im Bereich der von den Herstellern angegebenen Verbräuche.

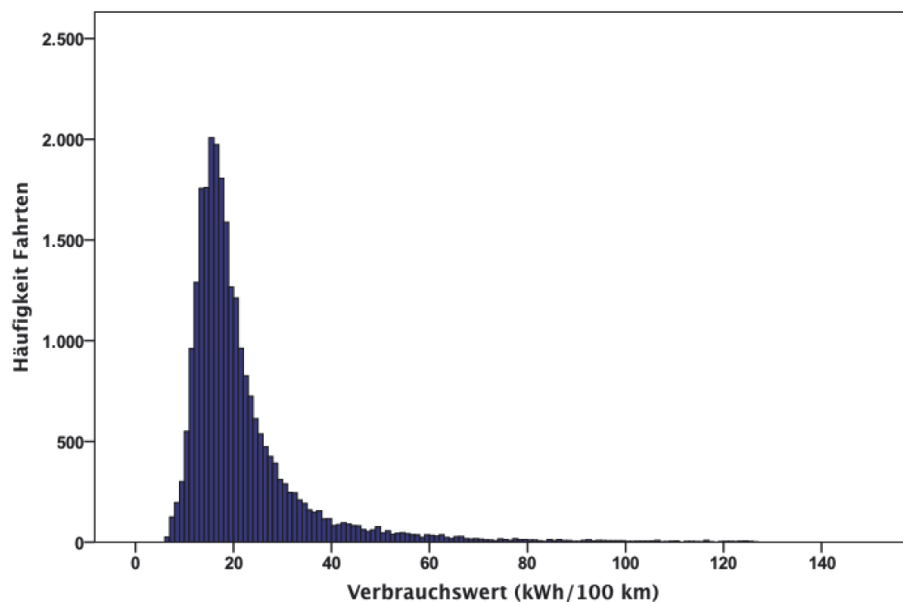


Abbildung 9 Spezifische Energieverbräuche der Demonstrationsfahrzeuge: Kompakt- und Mittelklasse
N = 25.765 Fahrten.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Ein ähnliches Bild wie bei Minis und Kleinwagen ergibt sich auch bei den Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse (siehe Abbildung 9). Im Vergleich zu den vorherigen Darstellungen ist die Streuung der Verbrauchswerte der Einzelfahrzeuge etwas geringer, was sich auch im Diagramm zeigt. Ca. 31 % der Einzelfahrten liegen im Bereich des durchschnittlichen Verbrauchs $\pm 2,5$ kWh. Mit einem Mittelwert von 16,9 kWh pro 100 km verbrauchen die Fahrzeuge der Kompakt- und Mittelklasse trotz größerer Fahrzeugmassen etwas weniger Energie als Minis und Kleinwagen, was auf den geringeren Anteil relativ verbrauchsintensiver kürzerer Strecken zurückgeführt werden kann, der sich im Praxiseinsatz ergeben hat.

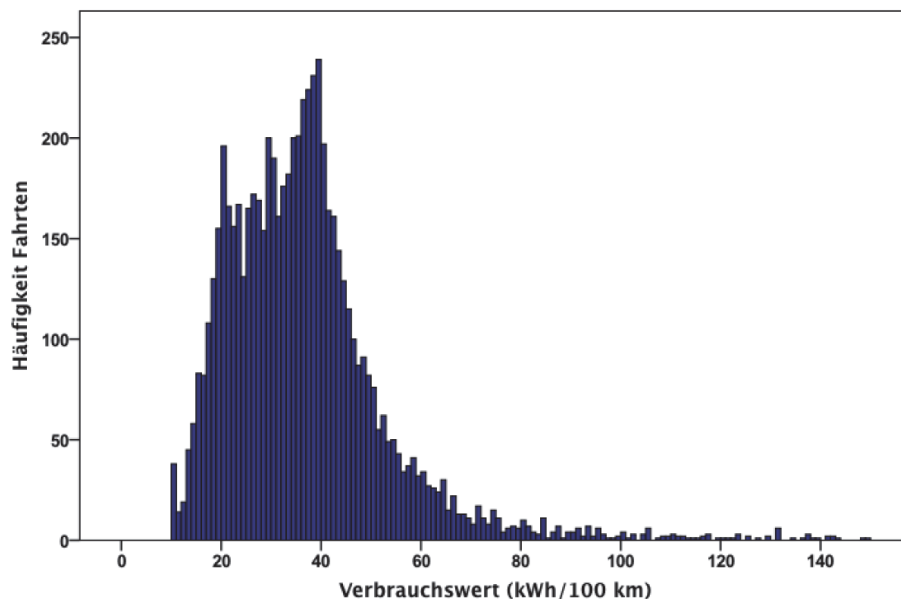


Abbildung 10 Spezifische Energieverbräuche der Demonstrationsfahrzeuge: Leichte Nutzfahrzeuge/Utilities
N = 6.666 Fahrten.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Innerhalb der Vergleichsgruppe der leichten Nutzfahrzeuge (s. Abbildung 10) ist erkennbar, dass diese mit den kleinen leichten Nutzfahrzeugen und den großen leichten Nutzfahrzeugen doch noch recht unterschiedliche Modellreihen enthält. So scheinen sich ab einer Strecke von ca. 20 km zwei unterschiedliche Ansammlungen von Verbrauchswerten abzuzeichnen,¹² eine Gruppe im Bereich von grob 30 bis 50 kWh/100 km und eine im Bereich zwischen grob 15 bis 25 kWh/100 km. Zu diesem Befund passt, dass sich lediglich 14 % der Einzelfahrten im Bereich durchschnittlichen Verbrauchs dieses Fahrzeugsegments $\pm 2,5$ kWh bewegen. Die (relative) Heterogenität der leichten Nutzfahrzeuge hinsichtlich der Verbräuche zeigt sich in der obigen Abbildung 10, in welcher kein klares Maximum zu erkennen ist. Stattdessen zeigen sich mehrere Maxima im breiten Bereich zwischen ca. 17-18 kWh/100 km und 40 kWh/100 km.

¹² Hier in Abbildung 10 nicht ersichtlich, vgl. aber Abbildung 29 des Teilberichts Analysen des Wuppertal Instituts.

2.4 Berechnungen für den konkreten Einsatz von Elektrofahrzeugen

2.4.1 Rechnerischer Ansatz zur Bestimmung der Emissionswerte von Elektrofahrzeugen

Während bei der Bestimmung der Verbräuche der konventionellen Vergleichsfahrzeuge Normverbrauchswerte zugrunde gelegt werden (vgl. Abschnitt 2.1.3), bilden bei den Elektrofahrzeugen die im Rahmen des Förderprogramms „Modellregionen Elektromobilität“ gewonnenen empirischen Daten die Grundlage der Verbrauchswerte (vgl. Abschnitt 2.3.2). Diesen Stromabnahmemengen sind die zugehörigen Energieeinsätze bei der Stromerzeugung/Vorkette zuzuordnen.

Die folgende Abbildung 11 stellt das für die Elektrofahrzeuge verwendete Rechenschema übersichtlich dar, während die folgenden beiden Textabschnitte weitere Erläuterungen geben.

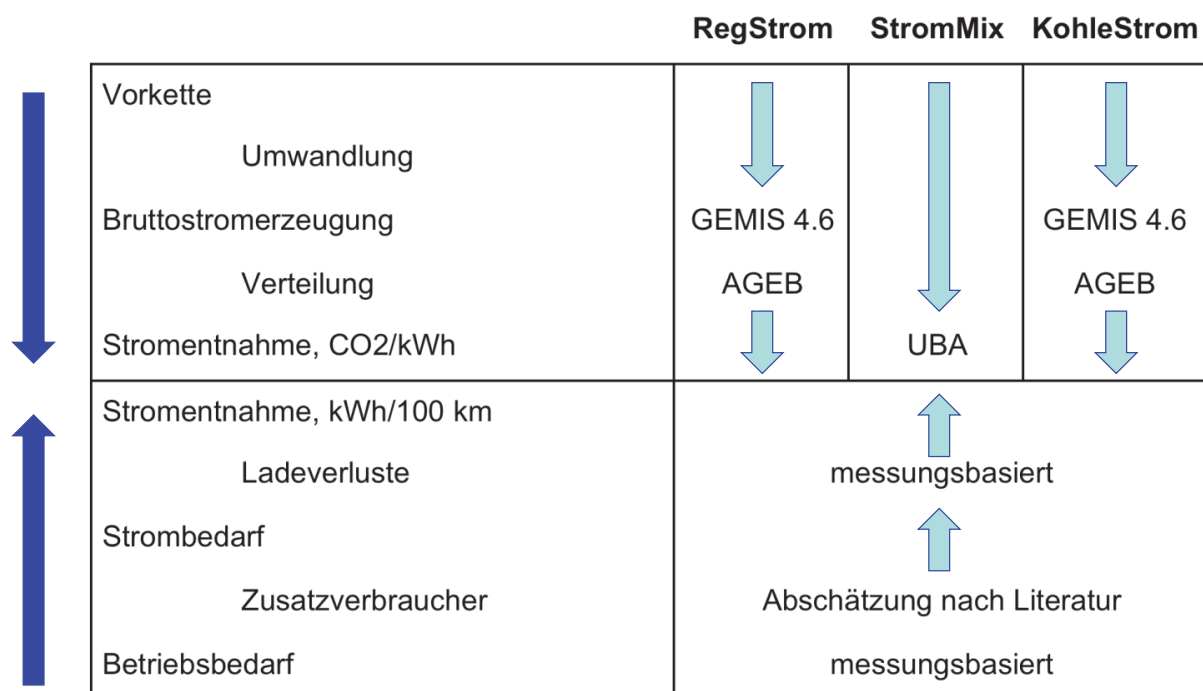


Abbildung 11 Rechenschema zur Ermittlung der spezifischen CO₂-Emissionen von Elektrofahrzeugen

Quelle: Eigene Darstellung.

Verbräuche/Emissionen bei Ladung und Fahrbetrieb der Fahrzeuge

Wie eben schon erläutert, können über die Vielzahl von Fahrzeugen und Einsatzprofilen – soweit die Daten durch entsprechende Erfassungsgeräte aufgenommen werden – die Energieverbräuche aus dem fahrzeuginternen Speicher (Batterie) aufgenommen und zu aussagekräftigen Mittelwerten und Verteilungsbildern zusammengeführt werden. Diese Verbrauchswerte bilden jedoch nur die Verbräuche aus dem reinen Fahrbetrieb ab und müssen um mehrere Faktoren korrigiert werden, um die Werte für die Stromabnahme aus dem Niederspannungsnetz zu erhalten.

- Erstens müssen die messungsbasierten Verbrauchswerte um die Ladeverluste der Batterien erhöht werden. Zu diesem herstellerseitig und unter Marktgesichtspunkten sehr sensiblen Thema liegen derzeit noch keine konkreten Messwerte vor. Bis zur Einsetzung besserer empirisch gestützter Größen kann hier als Orientierungsgröße ein Aufschlag in Höhe von 20 % angesetzt werden.
- Außerdem ist ein Aufschlag für den Winterbetrieb zu bilden, der den zusätzlichen Energiebedarf während der kalten Jahreszeit abbildet, wie er insbesondere zur Beheizung des Fahrgastraumes und zur Sicherung der Beschlagfreiheit der Scheiben erforderlich ist. Aufgrund des verzögerten Zugangs der Fahrzeuge zu den einzelnen Forschungsprojekten können die Werte hierfür nicht aus den empirisch aufgenommenen Daten abgeleitet werden, sondern müssen abgeschätzt werden. In einer vorläufigen Betrachtung wird hier von einer batteriegespeisten Beheizung ausgegangen, und die fallweise vorkommende Beheizung durch eine benzinbetriebene Zusatzheizung wird vernachlässigt. Vor einer abschließenden Prüfung unter Beiziehung insbesondere der in der Automobilpresse dargestellten Erfahrungswerte wird hier für die vorliegende Überschlagsrechnung ein Aufschlag von 10 - 20 % zur Beschreibung des Ganzjahresbetriebs angesetzt.

Verbräuche/Emissionen aus der Vorkette der Energieerzeugung

Bei der Bestimmung der aus den wie oben beschrieben berechneten Stromabnahmemenge resultierenden CO₂-Emissionen sollen die in Abschnitt 2.2.1 diskutierten unterschiedlichen Bewertungs- und Zurechnungsverfahren für den physischen Strombezug der Elektrofahrzeuge berücksichtigt werden, d.h.:

- vollständige Versorgung der Elektrofahrzeuge mit erneuerbarem Strom,
- Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom entsprechend dem derzeitigen deutschen Strommix und
- Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom entsprechend der bei ökonomischem Betrieb anzusetzenden zusätzlichen Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge als zusätzliche Stromverbraucher (Merit-Order Ansatz).

Zudem soll unterschieden werden zwischen einer Status Quo Betrachtung (2010) und einer perspektivischen Analyse für die Jahre 2020 und 2030, Zeiträume in denen deutlich höhere Anteile an Elektrofahrzeugen im Markt erwartet werden können und jenseits der Einzelfahrzeugebene überhaupt erst nennenswerte Entlastungseffekte zu beobachten sein werden.

2.4.2 Ergebnisse: Klimalasten des Einsatzes von Elektrofahrzeugen

Die Verknüpfung der empirisch gewonnenen Verbrauchswerte der Elektrofahrzeuge mit Annahmen zu Vergleichsfahrzeugen und Stromerzeugungspfaden lässt einen direkten Vergleich von konventionellen mit Elektro-Pkw zu.

Status Quo Analyse

Entsprechend der starken Dominanz von Kleinwagen und Mini-Pkw bei den Elektrofahrzeugen erfolgt dies nachfolgend zunächst beispielhaft für den Vergleich der zuzurechnenden

CO₂-Emissionen mit einem aktuellen emissionsarmen herkömmlich angetriebenen Pkw. Hierfür wurde das Vergleichsfahrzeug der Kleinwagenklasse¹³ zugrunde gelegt.

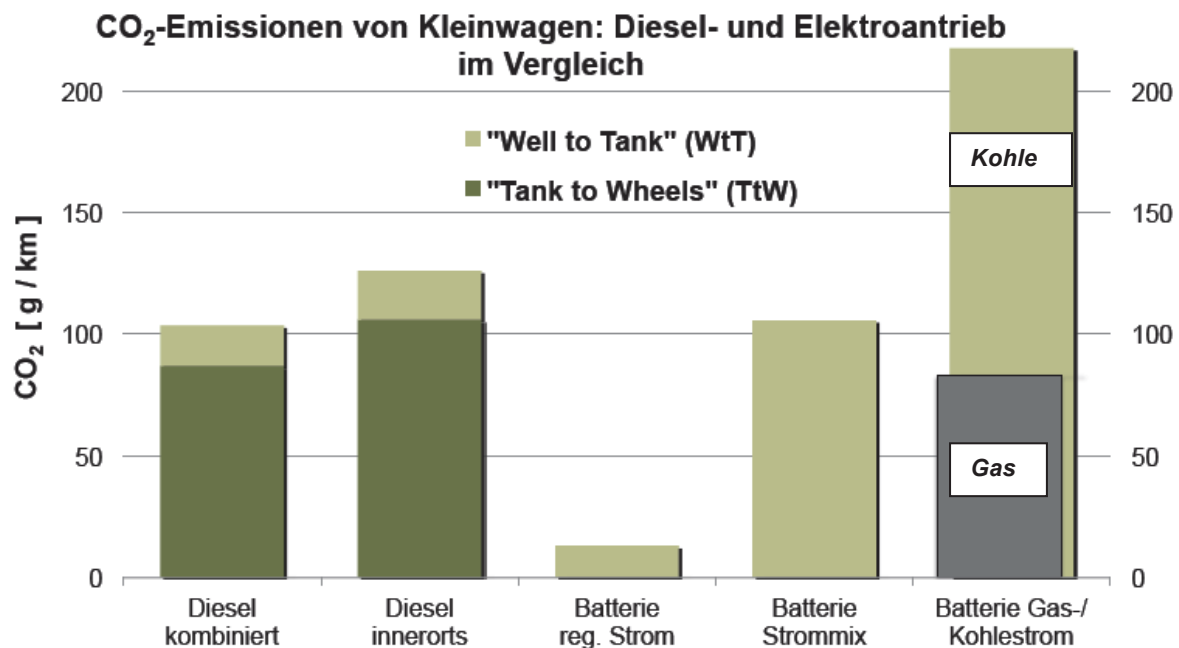


Abbildung 12 Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen nach unterschiedlichen Methoden am Beispiel von Kleinwagen

Quelle: eigene Darstellung. Berechnungsgrundlage: Diesel: VW Polo BlueMotion 87 g; direkte Emissionen (TtW): nach DAT, Leitfaden zu Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen, Ausgabe 2. Quartal 2011; Vorketten (WtT): nach CONCAWE/EUCAR, WTT-Report Version 2b, May 2006 und TTW-Report Version 3, Oct. 2008; Batterie: Stromverbrauch: nach Auswertung der bisherigen Messdaten aus den „Modellregionen Elektromobilität“ einschl. geschätzter Aufschläge für Ladeverluste und Winterbetrieb (Wuppertal Institut); Vorkette (WtT): reg. Strom: mittlerer Wert nach GEMIS 4.6 für Deutschland 2005, Aug. 2010; Strommix: Strommix Deutschland 2010 nach UBA 2011c; Kohlestrom: großes Import-Kohlekraftwerk, Gaskraftwerk nach GEMIS 4.6 für Deutschland 2005, Aug. 2010, mit 88 % Verteilungswirkungsgrad nach Energiebilanz 2010.

Im Ergebnis erweist sich die erwartete deutliche Spreizung je nach dem Ansatz hinsichtlich des Strommixes. Den unteren Grenzwert stellt die „reine Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien“ dar. Als oberer Grenzwert wird zu theoretischen Vergleichszwecken die „Bewertung nach der Merit-Order Methode“ und hier im doppelten Sinne als obere Bandbreite die Betrachtung eines Kohlekraftwerks als Grenzkraftwerk herangezogen.

Die quantitativen Ergebnisse der Fahrzeugvergleiche in allen auswertbaren Fahrzeugsegmenten zeigt die nachfolgende Tabelle 5 und korrespondierende Abbildung 13 für den heutigen Status (Stand 2010).

¹³ VW Polo BlueMotion, 87 g CO₂ gemäß Normverbrauchswerten von 4,0 l Diesel/100 km im Stadtverkehrszyklus, von 2,9 l Diesel/100 km im Außerortszyklus, sowie 3,3 l Diesel/100 km im kombinierten Zyklus. Siehe auch Abschnitt 2.1.2.

Tabelle 5 Spezifische CO₂-Emissionen (g CO₂/km) im Vergleich von herkömmlichen Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen bei unterschiedlichen Stromquellen

	herkömmlicher Antrieb		Elektrofahrzeug			
	innerorts	kombiniert	Regenerativ	Mix 2010	Merit Order Kohle	Merit Order Gas
Minis/Kleinwagen	112	100	16	134	274	108
Kompakt-/Mittelklasse	128	114	16	131	270	106
Utilities	217	178	29	236	485	191

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist – neben deren Bandbreite und den nicht unerheblichen Unsicherheitsmargen – zu berücksichtigen, dass die absoluten Mengen der rechnerischen Mehr- oder Minderbelastungen gegenwärtig wegen der geringen Zahl von Elektrofahrzeugen als weitgehend bedeutungslos anzusehen ist. Dies trifft in großem Umfang auch noch für 2020 zu, wenn die Anzahl der Elektrofahrzeuge zwar nach den Zielen der Bundesregierung deutlich auf 1 Mio. erhöht, aber gleichwohl nur etwa 2 % des Fahrzeugbestands ausmacht. Hinsichtlich des Stromverbrauchs ist der Anteil der Elektrofahrzeuge noch geringer. Er dürfte auch im Jahr 2020 noch deutlich unter einem halben Prozent des gesamten inländischen Stromverbrauchs liegen. Die Bewertung für das Jahr 2010 ist daher eine Momentaufnahme und nicht gleichzusetzen mit der Klimarelevanz von Elektrofahrzeugen in einem potenziellen zukünftigen Massenbetrieb in einer Zeit, in der auch der Energiemix für die Strombereitstellung verändert sein wird.

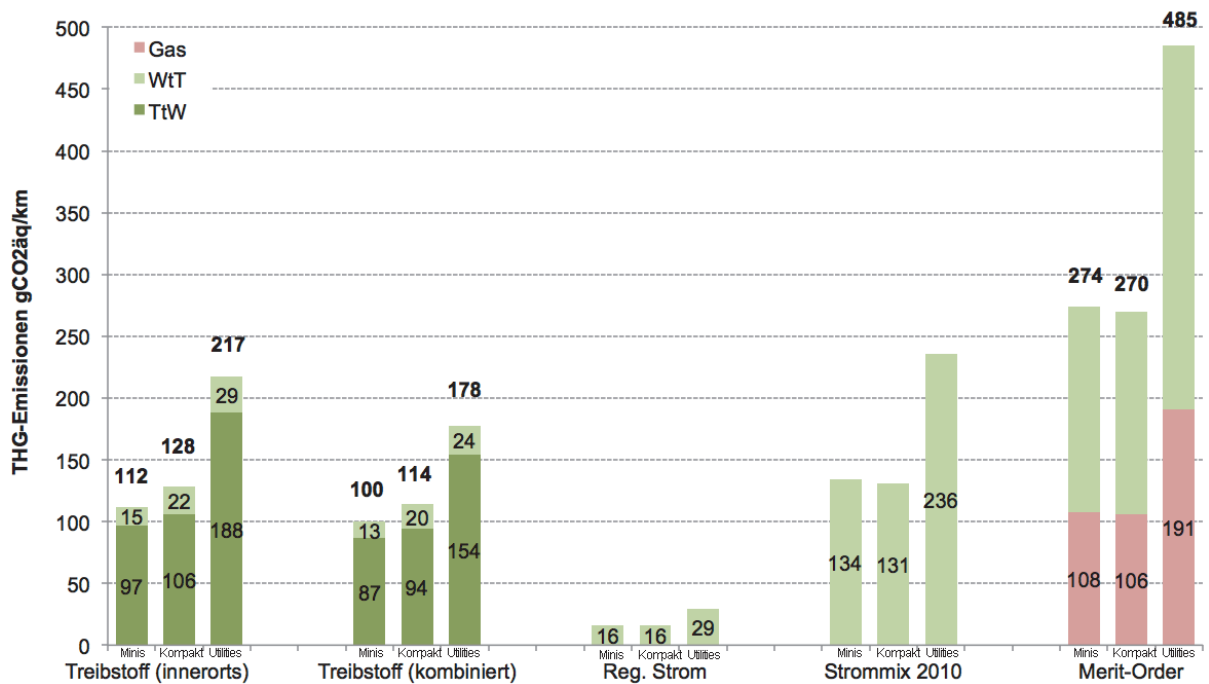


Abbildung 13 Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen nach unterschiedlichen Stromerzeugungspfaden für das Jahr 2010

Legende: WtT = Well to Tank; TtW = Tank to Wheel; Gas = Gasanteile innerhalb Merit-Order (Gesamtwerte für Kohlestrom); Minis = Minis und Kleinwagen; Kompakt = Kompakt- und Mittelklasse; Utilities = leichte Nutzfahrzeuge.

Erläuterung der Abbildung: Der regenerative Pfad ist der sinnvolle und perspektivisch anzustrebende Pfad der Stromerzeugung. Er reduziert die CO₂-Emissionen beispielsweise im Innerstädtischen Verkehr um den Faktor 6-9 (je nach Fahrzeugklasse, Vergleich der Realdaten innerhalb der Modellregionen mit Zyklusdaten konventioneller Fahrzeuge). Innerhalb des Strommix-Pfades fallen CO₂-Emissionen nahezu in der Größenordnung konventioneller Fahrzeuge an. Dies gilt auch für eine Verschiebung in Richtung gasbasierter Kapazitäten. Mit zunehmender Anzahl an Elektrofahrzeugen und der vermehrten Integration Erneuerbarer Energien in den Kraftwerkspark erhöhen sich die Klimaeffekte deutlich (s. auch perspektivische Annahmen zur Stromerzeugung für 2020 und 2030). Auch mit deutschem Strommix leisten Elektrofahrzeuge zukünftig einen Klimaschutzbeitrag.

Quelle: Eigene Darstellung nach Prognos/EWI/GWS (2010).

Perspektivische Betrachtung

Nachfolgende Abbildung stellt am Beispiel der Kompaktklasse die Ergebnisse der Emissionsbilanz im Zeitverlauf gegenüber, wobei sich die Betrachtung auf die Analyse der Strombezugsgröße erneuerbare Energien und Strommix beschränkt.

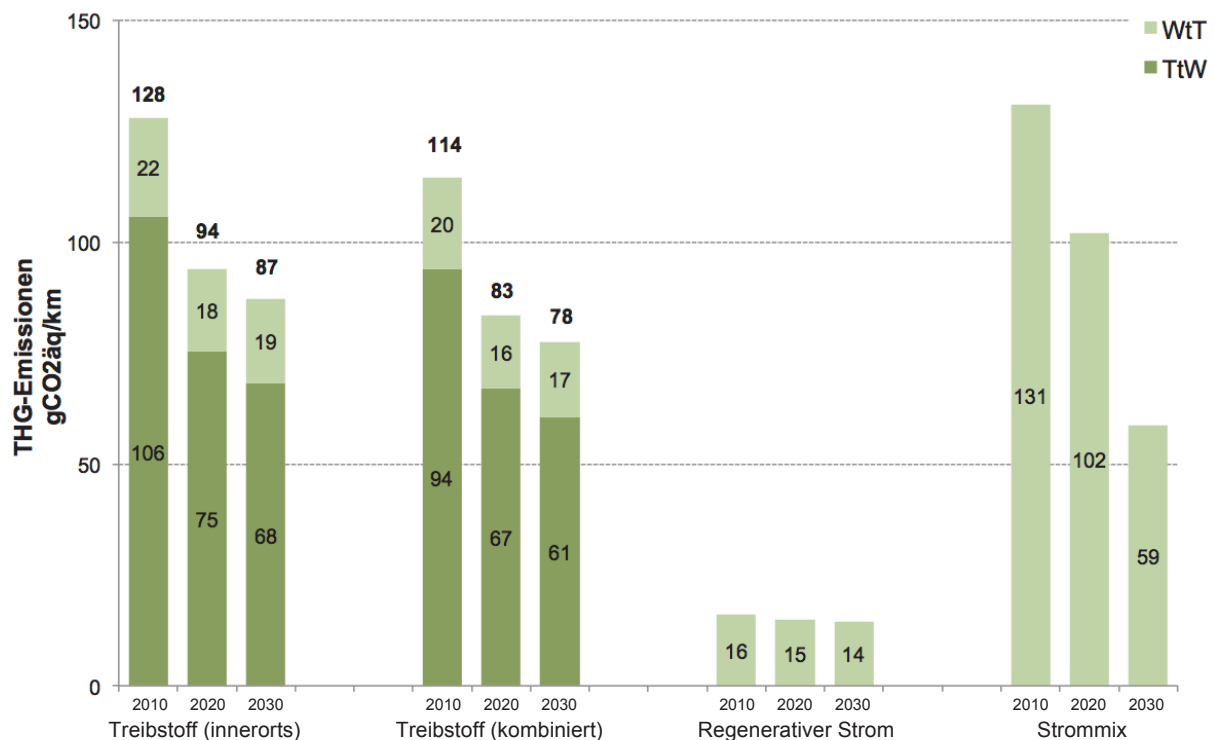


Abbildung 14 Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen nach unterschiedlichen Stromerzeugungspfaden für den Zeitverlauf 2010 bis 2030 am Beispiel der Kompakt- und Mittelklasse (kombiniert)

Quelle: Eigene Darstellung. Wesentliche Berechnungsannahmen: Entwicklung Strommix nach Prognos/EWI/GWS 2011. Effizienzsteigerung konventioneller Fahrzeuge bis 2020 nach eigenen Annahmen 3 %/a (nach 2020: 0,5 %/a). Erhöhung Biokraftstoffanteil gemäß BMU Leitszenario 2010 bis 2020 auf 10,3 % und bis 2030 auf 16,5 %. Erhöhung der CO₂-Reduktionsquoten bei Biokraftstoffen nach eigenen Annahmen angelehnt an die Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung von 35 % (2010) über 50 % (2020) auf 60 % (2030). Erhöhung der spezifischen Emissionen der vorgelagerten Prozesskette Öl gemäß eigener Abschätzung um 10 % bis 2020 und davon ausgehend weitere 15 % zwischen 2020 und 2030. Effizienzsteigerung Elektrofahrzeuge nach eigenen Annahmen bis 2020 1 %/a (nach 2020: 0,25 %/a).

Die Abbildung 14 verdeutlicht die weiter sehr positive Klimabilanz der Elektrofahrzeuge für den Fall, dass die Fahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Soweit nach 2020 die erneuerbare Stromerzeugung über das Maß der ausgeschleiften nuklearen Stromerzeugung hinaus zunehmend weitere Anteile an der gesamten Stromerzeugung übernimmt, was aus heutiger Sicht zu erwarten und politisch klar intendiert ist, wird sich das Verhältnis auch bei der Zugrundelegung des Strommixes als Bewertungsgröße zugunsten der Elektrofahrzeuge deutlich verändern. Bei einer für 2050 teils angestrebten sehr weitgehenden Stützung der Stromerzeugung auf erneuerbare Quellen (im Energiekonzept der Bundesregierung werden Anteile von mind. 80 % am Strombedarf für das Jahr 2050 genannt) nähert sich der CO₂-Wert im Stromerzeugungsmix demjenigen der reinen erneuerbaren Erzeugung perspektivisch immer weiter an.

2.4.3 Zusammenfassung und kritische Einschätzung

Fasst man die vorgenannten Aspekte zusammen, lässt sich folgendes feststellen:

In der Literatur finden sich für die Klimabilanz von Elektrofahrzeugen unterschiedliche Bewertungsmethoden, deren Ergebnisse kurzfristig stark streuen und sich erst mittel- bis längerfristig perspektivisch annähern. Werden Elektrofahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren

Energien betrieben, ist ihre Klimabilanz deutlich besser als diejenige fossil betriebener Pkw. Wann, inwieweit und unter welchen Voraussetzungen (Herkunftsnachweis) eine direkte Zuordnung des Fahrstroms zu einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien möglich ist, ist heute allerdings umstritten. Unter pragmatischen Gesichtspunkten bietet die Strommixmethode eine gute Orientierung für die klimabezogene Bewertung von Elektrofahrzeugen. Aufgrund der auf der Zeitachse planungsgemäß zunehmenden Anteile erneuerbarer Energien im Strommix führt dies für die Zeiten, in denen eine signifikante Durchdringung mit Elektrofahrzeugen zu erwarten ist, zu einer gegenüber heute deutlichen Verbesserung der spezifischen CO₂-Emissionen und respektive Vorteilen gegenüber mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeugen. Legt man dem Kraftwerkseinsatz Merit Order als Regel des ökonomischen Betriebs zugrunde und betrachtet den Stromverbrauch von Elektrofahrzeugen als „zusätzlichen“ Verbrauch gegenüber einem Zustand ohne Elektrofahrzeuge, stellt sich die Klimabilanz nicht so günstig dar.

Führt man eine Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen aus Systemsicht unter Berücksichtigung der regulatorischen Rahmenbedingungen durch (Europäisches Emissionshandelssystem), können den Elektrofahrzeugen rechnerisch CO₂-Emissionen von Null zugewiesen werden, zumindest solange die Einhaltung der ebenso von der EU vorgegebenen Flottenverbrauchsgrenzwerte ohne Elektrofahrzeuge erreicht werden.

3 Weitere Umweltparameter

3.1 Lärm und Schadstoffe¹⁴

Lärm und Luftschadstoffe bilden seit vielen Jahren kritisch verfolgte Begleiterscheinungen des Pkw-Verkehrs. In beiden Kategorien versprechen Elektro-Pkw offensichtlich entlastende Zielbeiträge wegen der Geräuscharmheit des Antriebs einerseits und der örtlichen Emissionsfreiheit andererseits. Umfang und Bedeutung dieser Zielbeiträge werden hier erörtert.

Zunächst ist zu beachten, dass es für die Stör- und Schädwirkungen auf die Immissionen ankommt, die sich aus dem Zusammenwirken der Belastungsbeiträge aller Emittenten ergeben. Neben den Pkw sind es im vorliegenden Fall auch andere Fahrzeuge, neben dem Verkehr auch weitere Emittenten. Da die Elektro-Pkw derzeit nur einen sehr geringen Anteil – weniger als 0,1 Promille – an der Pkw-Flotte und deren Fahrleistung ausmachen, kann deren Entlastungsbeitrag gegenwärtig abgesehen von ausgesprochenen Sondersituationen vernachlässigt werden. Hinsichtlich der künftigen Potenziale muss eine differenzierte Inspektion der verschiedenen Belastungskategorien erfolgen, die auch die Entwicklung bei den Fahrzeugen mit herkömmlichem Antrieb berücksichtigt.

3.1.1 Lärm

Bei den Geräuschen ist neben der positiven Wirkung einer Belastungsminderung auch das Potenzial einer Erhöhung der Unfallgefahr durch die Geräuscharmheit der Elektro-Pkw zu bedenken.

Die positiv empfundene Geräuschkürzung durch Elektro-Pkw wird grundsätzlich dadurch relativiert, dass geminderten bzw. vermiedenen Motor- und Auspuffgeräusche nur einen Teil der vom Fahrzeug ausgehenden Geräusche ausmachen: Die Rollgeräusche und die Windgeräusche sind vom Antrieb unabhängig, wie auch weitere Geräuschkomponenten, etwa Bremsgeräusche oder aus dem Fahrzeuginnern nach außen dringende künstlich erzeugte Geräusche durch Musikanlagen, vgl. Tabelle 6. Zudem wird die gesamte akustische Störwirkung des Straßenverkehrs örtlich vielfach durch den Schwerverkehr und/oder motorisierte Zweiräder, oder durch von Einzelfahrzeugen ausgelöste Geräuschspitzen geprägt. Generell ist daher auch bei verhältnismäßig hohen Anteilen von Elektro-Pkw – deutlich oberhalb der für das Jahr 2020 markierten Zielmarke von 1 Millionen (entsprechend dann gut 2 % des Pkw-Bestands) – in aller Regel nur von verhältnismäßig bescheidenen Entlastungen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle auszugehen. In besonderen städtischen Situationen, etwa im Anfahrbereich an Kreuzungen, kann der Entlastungseffekt relativ stärker ausfallen, zumal da Elektro-Pkw erwartungsgemäß im Vergleich zu den sonstigen Pkw stärker im städtischen als im außerörtlichen Verkehr eingesetzt werden. Doch selbst hier dürfte – bezogen auf die gesamte Geräuschbelastung – in der Regel der Entlastungseffekt wegen des geringen Anteils der Elektro-Pkw und des Auftretens einzelner anderer Fahrzeuge mit dominanten Störpegeln auf absehbare Zeit kaum wahrnehmbar sein.

¹⁴ Für detailliertere Ausführungen zum Thema Lärm und Schadstoffe siehe den Teilbericht „Überlegungen zu Lärm und Schadstoffen im Zusammenhang mit dem Betrieb von Elektrofahrzeugen“ des Wuppertal Instituts.

Dies schließt nicht aus, dass bei nahezu völligem Übergang auf Elektrofahrzeuge in besonders empfindlichen Gebieten relativ schnell örtlich relevante Effekte erzielt werden können. Auch ein beschleunigter Übergang auf elektrische Antriebe bei den spezifisch besonders belastenden Schwerverkehren (einschließlich Bussen) und motorisierten Zweirädern kann örtlich relevante Entlastungen zur Folge haben.

Anders als die Reduktion der Störwirkung durch die Minderung der Geräuschemissionen kann die Erhöhung der Verkehrsgefährdung durch die Geräuscharmheit der Elektro-Pkw auch schon bei einer geringen Zahl von solchen Fahrzeugen potenziell von Bedeutung sein; denkbar ist sogar, dass die Risiken mit steigender Zahl von Elektrofahrzeugen aufgrund von Gewöhnungs- und Anpassungseffekten sinken. In diese Richtung deuten vorliegende Ergebnisse bei ebenfalls weitgehend geräuschlosen Fahrrädern an, dass die Unfallgefahren mit steigenden Verkehrsanteilen dieser Fahrzeuge auch abnehmen können. Insgesamt allerdings erscheinen nach den im Rahmen des Forschungsprogramms von D'Angelico durchgeführten Recherchen die Gefahren eher limitiert: Zwar wird generell durchaus von der Erfahrung kritischer Verkehrssituationen berichtet, die mit der Geräuscharmheit in Verbindung gebracht werden, aber praktisch gar nicht von tatsächlichen Unfällen (D'Angelico 2011a, b).

Tabelle 6 Komponenten von Verkehrsgeräuschen und deren maßgebliche Einflussfaktoren

Geräuschart	Einflussfaktoren
Windgeräusch	Form und Größe des Fahrzeugs Geschwindigkeit
Antriebsgeräusch	Fahrzeugart und -modell Geschwindigkeit Fahrodynamik (Beschleunigung) Steigung
Rollgeräusch	Fahrzeugart Fahrbahnbelag(-Reifen-Kombination) Geschwindigkeit
Sonstiges, z.B.	<i>unterschiedlich</i>
durch Bremsen	Fahrzeugzustand, Nutzerverhalten
durch Ladung	Fahrzeug, Ladungsart, Nutzerverhalten
durch Reifen	Fahrtstil
durch Musik	Nutzerverhalten

Quelle: eigene Zusammenstellung.

Dies mag damit zusammenhängen, dass die Gefahrensituationen insbesondere in besonderen Verkehrssituationen außerhalb des normalen Verkehrsflusses und bei niedrigen Geschwindigkeiten auftreten, wo einerseits die Reaktionsbereitschaft der Verkehrsteilnehmer erhöht ist, andererseits die Fahrzeuge auch leicht zum Stillstand gebracht werden können. Auch die Untersuchungen von Dudenhöffer/Hause (2011) bestätigen die Relevanz des niedrigen Geschwindigkeitsbereichs (bis etwa 30 km/h), in dem die Rollgeräusche typischerweise gering ausfallen; von besonderem Interesse und gut nachvollziehbar ist auch das Ergebnis von Dudenhöffer/Hause, dass nicht unbedingt die Lautstärke des Geräuschs maß-

geblich ist, sondern vielmehr neben der Wahrnehmbarkeit das Geräuschmuster und seine örtliche und sachliche Interpretierbarkeit.

Da nach den Untersuchungen von D'Angelico speziell im tiefen Frequenzband von etwa 40-130 Hz Unterschiede auftreten (vgl. Abbildung 15), schlägt er vor, die Geräusche von Elektro-Pkw nur in diesem Bereich des Frequenzspektrums mäßig anzuheben. Dies kann insbesondere die Annäherung, das Abstellen und Starten der Fahrzeuge akustisch besser wahrnehmbar machen. Andere Vorschläge gehen dahin, über besondere Assistenzsysteme die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeug und insbesondere hör- und/oder sehbeeinträchtigten Personen sicherzustellen. Eine vollständige Anhebung der Fahrzeuggeräusche auf das Niveau herkömmlich angetriebener Pkw oder sogar darüber hinaus erscheint dagegen weder notwendig noch sinnvoll.

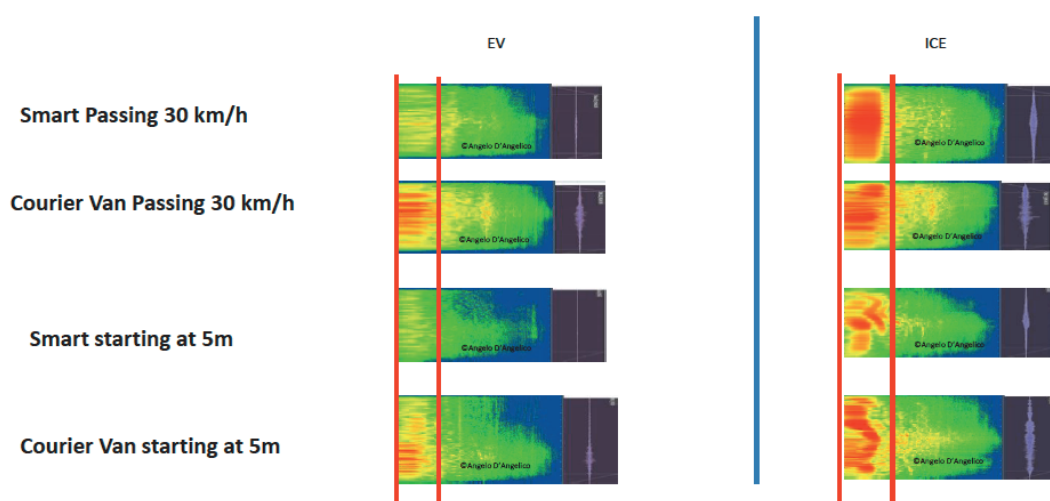


Abbildung 15 Unterschiedliche Vorbeifahrtgeräusche von Elektrofahrzeugen (EV) und herkömmlichen Fahrzeugen (ICE)

Anmerkungen: Vertikalskalen: Zeit; Horizontalskalen: Frequenzen; Farbcodierung: Amplitude (Lautstärke), von blau = leise zu rot = laut ansteigend; EV = Electric Vehicle, ICE = Internal Combustion Engine (= Verbrennungsmotor)

Quelle: D'Angelico (2011b).

3.1.2 Gasförmige Emissionen

Bei den Schadstoffemissionen ist zu unterscheiden zwischen den gasförmigen Emissionen und den Partikelemissionen (Feinstäube, Schwebstäube).

Bei den gasförmigen Emissionen werden traditionell insbesondere die Schadstofffraktionen Kohlenmonoxid (CO), flüchtige Kohlenwasserstoffe (NMVOC, non methane volatile organic compounds) und Stickoxide (NO_x, üblicherweise gerechnet als NO₂) betrachtet, bei deren Emission der Verkehr und insbesondere der Pkw-Verkehr eine besondere Rolle spielen. Hierfür sind, wie auch für Partikelemissionen, im Zeitverlauf zunehmend schärfere Grenzwerte auf europäischer Ebene eingeführt worden; eine Übersicht hierzu bietet die Tabelle 7.

Tabelle 7 Grenzwerte für stoffliche Emissionen von Pkw in mg/km nach den Regelungen EURO 1 bis EURO 6

	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4	EURO 5	EURO 6
Gültigkeit für						
Typprüfung ab	1.07.1992	1.01.1996	1.01.2000	1.01.2005	1.09.2009	1.09.2014
Neuzulassung ab	1.01.1003	1.01.1997	1.01.2001	1.01.2006	1.01.2011	1.01.2015
Pkw mit Benzinmotor						
CO	3.160	2.200	2.300	1.000	1.000	1.000
HC + NO _x	1.130	500				
NO _x			150	80	60	60
HC			200	100	100	100
PM					5*	5*
Pkw mit Dieselmotor						
CO	3.160	1.000	640	500	500	500
HC + NO _x	1.13	700 / 900*	560	300	230	170
NO _x			500	250	180	80
HC						
PM	180	80 / 100*	50	25	5	5

* mit Direkteinspritzung.

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

Bei Kohlenmonoxid und den flüchtigen Kohlenwasserstoffen sind die Pkw-bedingten Emissionen allerdings auf der Grundlage der Abgasgesetzgebung ab 1970 und insbesondere den Regelungen nach EURO 1 und folgenden ab 1991 sehr stark abgesunken und keineswegs mehr dominant, vgl. Abbildungen 16 und 17. Ungeachtet der Aussicht auf auch künftig noch weiter sinkende Werte können sie vielmehr bereits jetzt in der Regel praktisch vernachlässigt werden. Hinsichtlich dieser Schadstofffraktionen bleibt zwar die grundsätzliche Vorteilhaftigkeit der örtlichen Emissionsfreiheit von Elektro-Pkw bestehen. Es kann jedoch – auch bei zunehmenden Zahlen von Elektro-Pkw – nicht erwartet werden, dass dies Bedeutung erlangt.

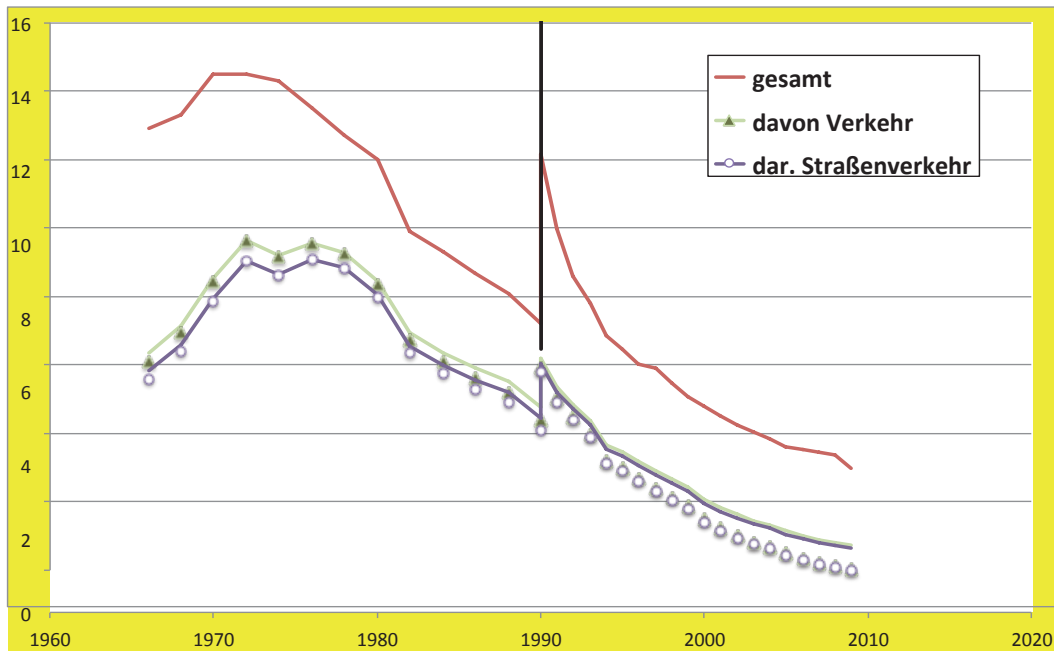


Abbildung 16 CO-Emissionen in Deutschland in Mio. t

Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage der Daten von: Umweltbundesamt (2011d); bis 1990(1): früheres Bundesgebiet, Daten des Umweltbundesamtes nach DIW, Verkehr in Zahlen (verschiedene Ausgaben).

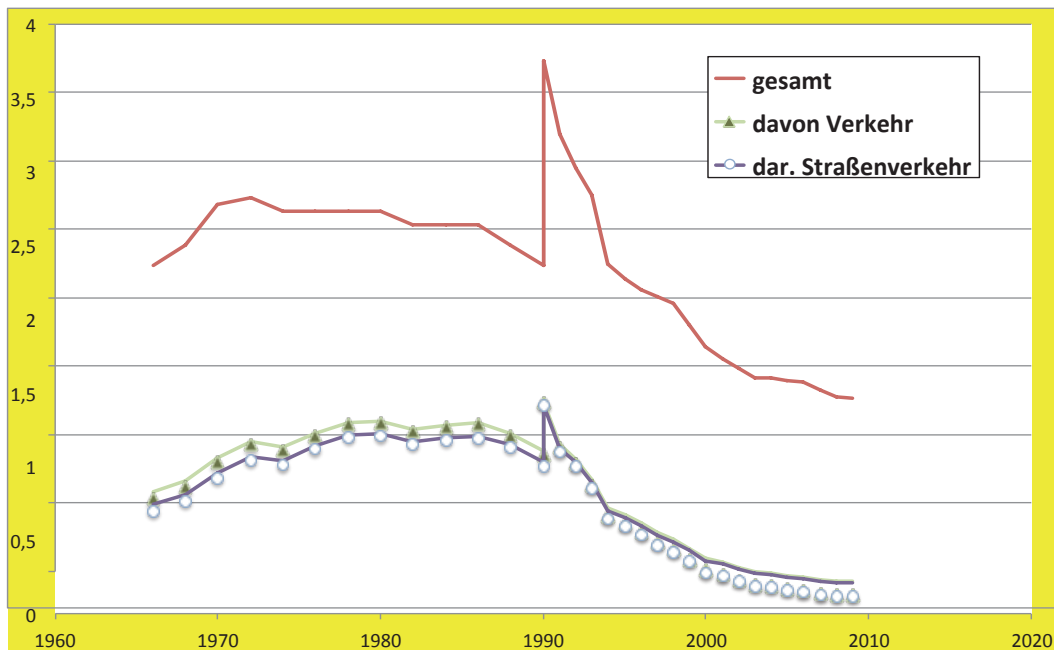


Abbildung 17 HC (NMVOC) – Emissionen in Deutschland in Mio. t

Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage der Daten von: Umweltbundesamt (2011d); bis 1990(1): früheres Bundesgebiet, Daten des Umweltbundesamtes nach DIW, Verkehr in Zahlen (verschiedene Ausgaben).

Etwas anders, nämlich deutlich ungünstiger stellt sich die aktuelle Lage bei den Stickoxiden dar. Hier werden noch an vielen Messstellen, und zwar an solchen mit straßenverkehrsbedingt erhöhten Immissionskonzentrationen, Überschreitungen der zulässigen Grenzwerte festgestellt, und zwar sowohl des zulässigen Jahresmittelwerts als auch der zulässigen

Anzahl hoch belasteter Stundenwerte. Nun sind auch bei den Stickoxiden die Emissionen insgesamt und speziell der Pkw stark reduziert worden, 2009 gegenüber 1990 um etwa drei Viertel, vgl. Abbildung 18 und Tabelle 8. Die Pkw tragen damit mittlerweile nur mehr zu etwa 15 % zu den gesamten Stickoxidemissionen (als NO₂), bzw. zu rd. 40 % zu jenen aus dem Straßenverkehr bei, sind aber wohl an den kritischen Messpunkten in der Regel überproportional an den Belastungen beteiligt. Entlastungen durch örtlich emissionsfreie Elektro-Pkw wären daher hier besonders erwünscht.

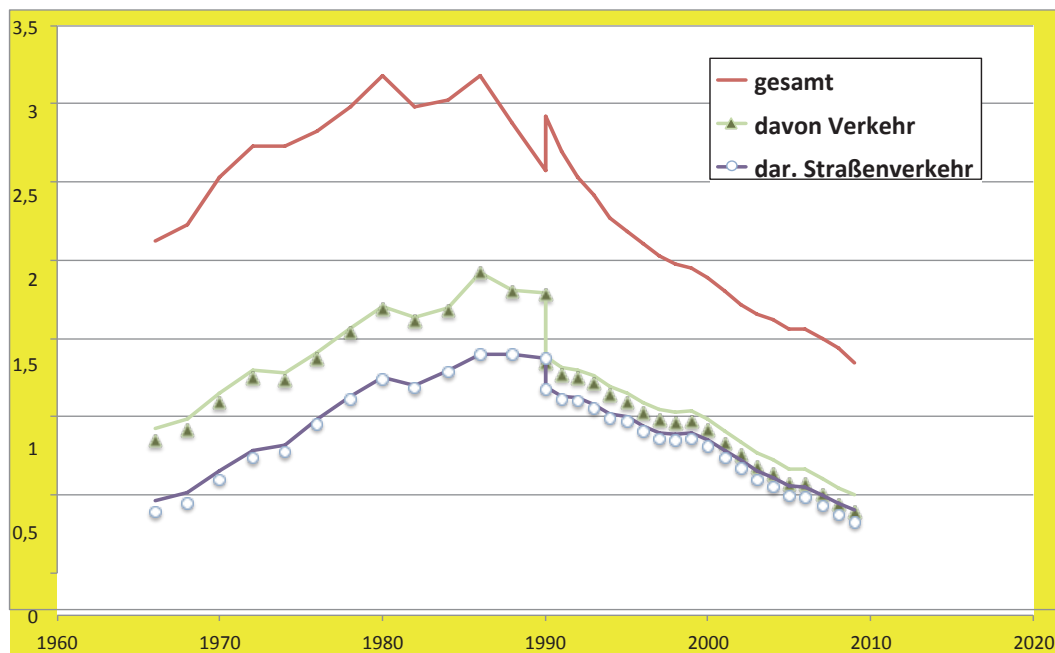


Abbildung 18 NO_x-Emissionen in Deutschland (als NO₂) in Mio. t

Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage der Daten von: Umweltbundesamt (2011d); bis 1990(1): früheres Bundesgebiet, Daten des Umweltbundesamtes nach DIW, Verkehr in Zahlen (verschiedene Ausgaben).

Tabelle 8 Stickoxid-Emissionen aus dem Straßenverkehr, Gg NO₂

	1990	1995	2000	2005	2009
1 A 3 b i Passagierfahrzeuge	820,25	507,65	292,75	230,88	206,65
1 A 3 b ii Leichte Nutzfahrzeuge	29,27	30,77	36,62	38,70	34,12
1 A 3 b iii Schwere Nutzfahrzeuge	489,58	605,45	671,35	434,14	310,65
1 A 3 b iv Motorisierte Zweiräder	2,34	2,69	3,31	3,31	2,78

Quelle: eigene Zusammenstellung auf Grundlage von Wirtschaftskommissionen für Europa der vereinten Nationen [UNECE] (2011).

Angesichts der bisher weitgehend vernachlässigbaren Zahl von Elektro-Pkw können sich nennenswerte Entlastungsbeiträge allerdings erst in der Zukunft ergeben. Grundsätzlich ist auch bei den herkömmlich angetriebenen Pkw von einer nennenswerten weiteren Emissionsabsenkung auszugehen. Bei den hier maßgeblichen Diesel-Pkw betragen die Absenkungen der NO_x-Normemissionen nach EURO 5 und EURO 6 gegenüber den bis vor kurzer Zeit im Bestand dominierenden EURO 3-Fahrzeugen immerhin 64 bzw. 84 %. Die weiter emissi-

onsreduzierten Pkw dürften im Jahr 2020 den Fahrzeugbestand deutlich dominieren, mit Anteilen der EURO 6-Pkw von etwa 40 % und der EURO 5-Pkw von etwa 30 %; Fahrzeuge nach EURO 3 und schlechter dürften auf eine Restgröße abgeschmolzen sein.

Zu den aktuellen EURO 5-Fahrzeugen liegen allerdings aus dem praktischen Betrieb noch keine gesicherten empirischen Werte vor, zu den EURO-6-Fahrzeugen noch gar keine Werte, die eine stabile Bildung von Emissionsfaktoren für die typischen Verkehrssituationen an den Belastungsschwerpunkten ermöglichen; es ist daher in gewissem Umfang unsicher, wieweit die Absenkung der Grenzwerte auch im städtischen Fahrbetrieb zu Buche schlägt. Qualitativ lässt sich allerdings abschätzen, dass aus einer für das Jahr 2020 denkbaren Substitution von Euro 6-Pkw durch Elektro-Pkw im Umfang von etwa 2 % des Pkw-Bestands – bei Erreichen des Ziels von 1 Mio. Elektro-Pkw – nur nachrangige Entlastungseffekte erwartet werden können.

Zur Erreichung und dauerhaften Einhaltung der verbindlichen EU-Immissionsgrenzwerte auch an Belastungsschwerpunkten kommen daher weiterhin insbesondere verkehrslenkende Maßnahmen (wie Ausschluss bestimmter emissionsträchtiger Fahrzeugklassen, Verringerung der Verkehrsmenge, Vermeidung/Verminderung von Verkehrsstockungen, Vergleichmäßigung des Verkehrsflusses, Reduktion der freien Geschwindigkeiten) in Frage, fallweise darüber hinaus wohl auch Maßnahmen zur Absenkung der Grundbelastung aus dem städtischen Hintergrund.

3.1.3 Partikelemissionen

Die Partikelemissionen, insbesondere auch aus dem Verkehr, sind um das Jahr 2005 mit dem Wirksamwerden der schwer einzuhaltenden Verschärfungen der Immissionsgrenzwerte verstärkt ins Bewusstsein getreten. Ein erhebliches Beurteilungsproblem ergibt sich in diesem Bereich durch die eingeführte trügerische Metrik: Herangezogen werden die Gesamtmassen an Feinstäuben (emissionsseitig etwa bezogen auf die Fahrleistung, immissionsseitig bezogen auf das Luftvolumen); dagegen besteht große fachliche Einigkeit darüber, dass die Partikelanzahl maßgeblich ist, wobei die Gefährdung umso größer ist, je kleiner die Partikel sind. Die verständliche Begründung dafür ist, dass die mögliche Eindringtiefe über die Atmungsorgane, aber auch über andere Wege, bei reduzierter Partikelgröße zunimmt. Die Gesamtmasse an Partikeln, die sich in ihren Einzelmassen um eine ganze Reihe von Größenordnungen unterscheiden, und die auch in ihrer Zusammensetzung deutlich unterschiedlich vorgefunden werden, kann aber diesbezüglich offensichtlich nur beschränkt Hinweise liefern. Die neuesten Ansätze der EURO 5- und EURO 6-Regelungen nehmen die Partikelzahl als zusätzlichen Regelungsgegenstand zwar auf, können diesbezüglich aber nur die Absicht anbieten, geeignete Verfahren entwickeln zu wollen. Die darüber hinaus gehende Notwendigkeit, auch die chemische und physikalische Beschaffenheit der Partikel mit einzubeziehen, da auch davon die biologische Störwirkung maßgeblich geprägt wird, wird im Regulierungsrahmen bislang noch nicht einmal angesprochen.

Soweit man sich mit dem notwendigen Vorbehalt auf die eingeführte Metrik der rechtsverbindlichen Vorgaben einlässt, stellt man auch bei den Stäuben und Feinstäuben fest, dass in der Folge der schrittweise verschärften Luftreinhaltevorschriften auch die Emissionen deutlich abgenommen haben, vgl. Abbildung 19 für die gesamten Staubemissionen und Abbildung 20 für die seit 1995 berichteten Feinstaubkategorien PM(10) und PM(2,5). Dies gilt

insbesondere auch für den Pkw-Verkehr, der aktuell nur mehr rd. 4 % (bei PM(2,5)) bzw. 2 % (bei PM(10)) der Partikelmasse emittiert, vgl. die anschließende Tabelle 9.

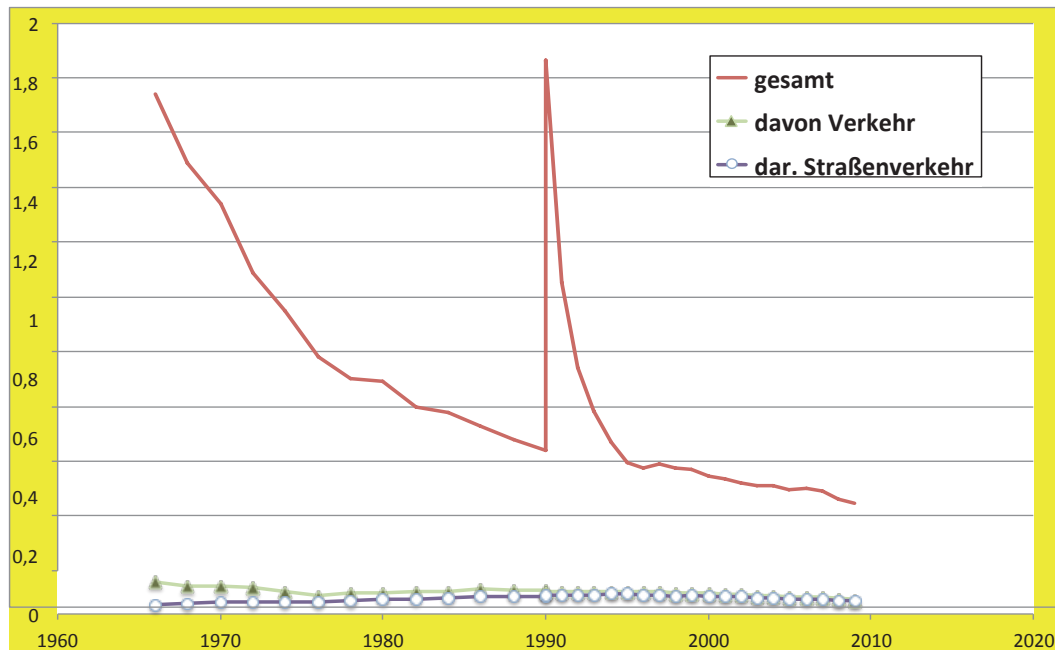


Abbildung 19 Gesamtstaub-Emission in Mio. t

Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage der Daten von: Umweltbundesamt (2011d); bis 1990(1): früheres Bundesgebiet, Daten des Umweltbundesamtes nach DIW, Verkehr in Zahlen (verschiedene Ausgaben).

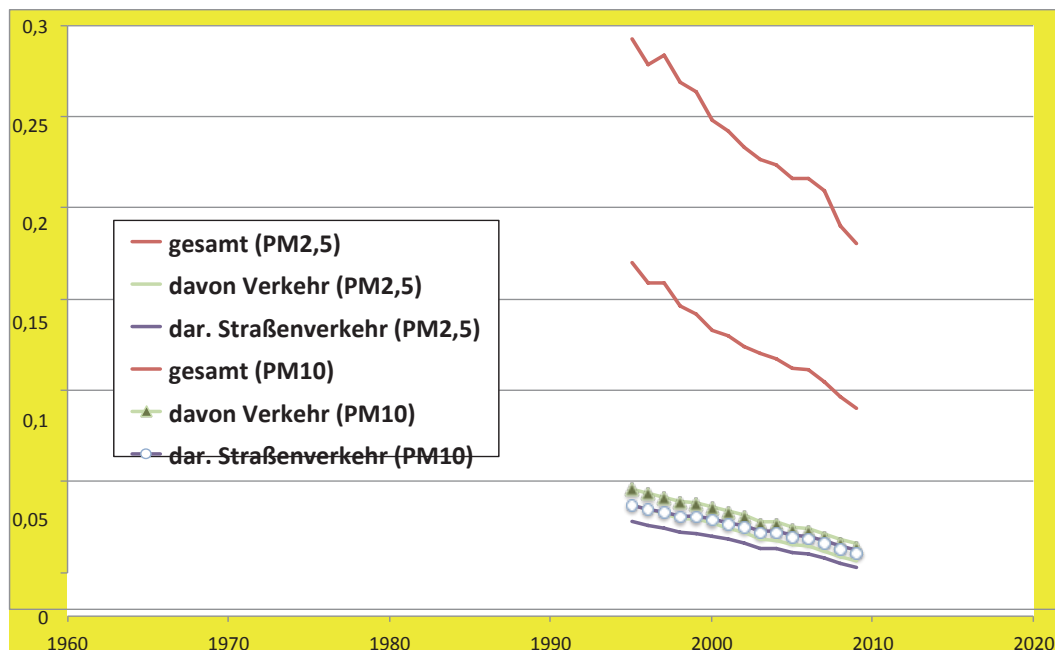


Abbildung 20 PM(10) und PM(2,5) in Mio. t

Quelle: eigene Darstellung auf Grundlage von UBA (2011d).

Tabelle 9 Primäre Partikelemissionen des Straßenverkehrs, Gg PM(10) und PM(2,5)

Bereich	PM(10)				PM(2,5)				
	Jahr	1995	2000	2005	2009	1995	2000	2005	2009
1 A 3 b i Passagierfahrzeuge		10,85	8,76	7,78	3,97	10,85	8,76	7,78	3,97
1 A 3 b ii Leichte Nutzfahrzeuge		2,96	3,62	3,47	2,71	2,96	3,62	3,47	2,71
1 A 3 b iii Schwere Nutzfahrzeuge		24,89	17,43	9,68	5,80	24,89	17,43	9,68	5,80
1 A 3 b iv Motorisierte Zweiräder		NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
1 A 3 b v Kraftstoffverbrennung		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1 A 3 b vi Reifen- und Bremsabrieb		11,03	12,03	12,27	12,38	5,95	6,49	6,62	6,68
1 A 3 b vii Straßenoberflächenabrieb		6,22	6,77	6,87	6,92	3,37	3,66	3,72	3,75
Summen		55,95	48,60	40,07	31,79	48,02	39,96	31,27	22,91

Quelle: eigene Zusammenstellung auf Grundlage von Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen [UNECE] (2006).

Bei den hier wiederum maßgeblichen Diesel-Pkw ist der Emissionsgrenzwert von EURO 1 auf EURO 5 von 180 auf 5 mg/km, mithin um etwa 97% reduziert worden, tatsächlich weisen aktuell schon rd. 80 % der neuen Diesel-Pkw Emissionskennwerte im Bereich bis 2 mg/km auf. Aufgrund des schrittweisen Eindringens der Neufahrzeuge mit den niedrigen Emissionswerten in die Fahrzeugflotte ist auch künftig mit einer signifikanten antriebsseitigen Emissionsminderung zu rechnen. Mit zunehmender Durchsetzung dieser Standards steigt bereits bisher die relative Bedeutung der nicht-antriebsseitigen Partikelemissionen (Abriebe von Straßen, Reifen, Bremsen) innerhalb der gesamten Partikelemissionen des Straßenverkehrs an, von 1995 bis 2009 bei den enger abgegrenzten PM(2,5) von knapp 20 auf knapp 50 %, bei den weiter abgegrenzten PM(10) von gut 30 auf gut 60 %. Bei Fortsetzung dieser laufenden Entwicklungen ist auch von einer bis 2020 deutlich erhöhten Anzahl von Elektro-Pkw keine nennenswerte Reduktion der verkehrsbedingten Partikellasten zu erwarten, weder emissionsseitig noch insbesondere auch immissionsseitig, da ja dabei zusätzlich auch die Sekundäremission bereits sedimentierter Partikel durch den Verkehrsfluss zu beachten ist, die naturgemäß nicht von der Antriebsart der Fahrzeuge abhängt.

3.2 Ökobilanzielle Betrachtungen¹⁵

Ökobilanzen sind etablierte Instrumente zur Analyse und Bewertung sowie zum Vergleich von Umweltwirkungen von Produkten, Technologien und Unternehmen.

Ziel von Produktökobilanz, damit auch von Ökobilanzen bei der Bewertung von Technologien, ist die lebenszyklusweite Betrachtung der relevanten Umweltwirkungen. Die Durchführung von Ökobilanzstudien ist in der ISO 14040¹⁶ und 14044¹⁷ normiert. Eine Vielzahl von Ökobilanzstudien orientiert sich an diesen Normen. Insbesondere aufgrund des hohen Aufwandes solcher Studien, aber auch aufgrund einer Reihe von Einschränkungen insbe-

¹⁵ Inhalt in wesentlichen Teilen übereinstimmend mit dem Teilbericht „Ökobilanzierung der Elektromobilität – Themen und Stand der Forschung“ des Wuppertal Instituts.

¹⁶ DIN EN ISO 14040:2009-11 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.

¹⁷ DIN EN ISO 14044:2006-10 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.

sondere in Hinblick auf die Ergebnisdarstellung und -auswertung, gibt es jedoch auch zahlreiche Lebenszyklusanalysen, die nicht oder nur in Teilen der Norm entsprechen.

Gemeinsames Element von Produktökobilanzen ist jedoch die Betrachtung des kompletten Lebensweges – von der Wiege bis zur Bahre – eines Produktes. Dementsprechend liegt der methodische Schwerpunkt solcher Analysen auf der zeitlich wie räumlich möglichst vollständigen Erfassung der Umweltwirkungen bzw. der ausgewählten Umweltwirkungen. Ökobilanzen zeichnen sich insofern oft durch ein hohes Maß an Vollständigkeit der Erfassung der Umweltwirkungen aus. Gleichzeitig haben sie häufig Schwächen hinsichtlich der räumlichen Zuordnung von Umweltwirkungen. Insbesondere gelingt es mit Ökobilanzen oft nicht, räumliche Emissionsspitzen adäquat abzubilden oder auch nur zu erkennen. Solche lokalen Auswirkungen auf die Umwelt können jedoch etwa im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung abgebildet werden. Diese ist jedoch ihrerseits völlig ungeeignet, wenn es um die Erfassung globaler Effekte wie etwa dem anthropogenen Treibhauseffekt geht.

Im Bereich von Mobilität wurden bisher verschiedenste Ökobilanzen durchgeführt. Wichtig waren insbesondere:

- Vergleiche von Verkehrssystemen und Verkehrsträgern,
- Ökobilanzen von einzelnen Kraftfahrzeugen,
- Ökobilanzen zu einzelnen Fahrzeugkomponenten zur Optimierung des Fahrzeugs,
- Vergleichende ökobilanzielle Betrachtungen zu Werkstoffen und möglichen Substituten, sowie zu Einsparpotenzialen durch Verringerung des Fahrzeuggewichts,
- Vergleiche zwischen unterschiedlichen Treibstoffen.

Elektro- und Hybridfahrzeugen wurden seit Mitte der 1990er Jahre in solche Ökobilanzen einbezogen. Ökobilanzen im Zusammenhang mit Elektromobilität beschäftigen sich derzeit vor allem mit drei Fragestellungen:

- dem Vergleich zwischen mit Verbrennungsmotor betriebenen Fahrzeugen, Hybridfahrzeugen (insbesondere Plug-in-Hybrid) sowie Elektrofahrzeugen,
- der Elektrizitätserzeugung für Elektromobilität und
- Traktionsbatterien.

Bezüglich aktueller und künftig weiter zu entwickelnden Batterietypen ist der Kenntnisstand allerdings erst in Entwicklung und dementsprechend in Umfang und Zuverlässigkeit eingeschränkt.

Daneben wird die Frage möglicher kritischer Ressourcen für Elektromobilität, insbesondere mit Blick auf Batterien und Antriebsmotoren, intensiv diskutiert.

3.2.1 Fahrzeugvergleiche

Bis heute wurde eine Reihe von ökobilanziellen Vergleichen zwischen Elektrofahrzeugen, Hybridfahrzeugen und herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen durchgeführt.

Bereits 1996 wurden mit Blick auf das Treibhausgaspotenzial des vollständigen Lebenswegs unterschiedlicher Fahrzeuge nur geringe Unterschiede zwischen konventionellen Fahrzeu-

gen und Hybridfahrzeugen identifiziert (Weibel/Dietrich 1996). Zwischenzeitlich wurde eine Reihe weiterer einschlägiger Untersuchungen durchgeführt. Zuletzt wurden auf dem 43. LCA Diskussionsforum¹⁸ im April 2011 verschiedene neuere Ergebnisse vorgestellt.

In mehreren Untersuchungen wurden insbesondere Fahrzeuge der Kompaktklasse („Golfklasse“) sowie „kleine Stadtfahrzeuge“ mit jeweils unterschiedlichen Antriebskonzepten verglichen.

Tabelle 10 Übersicht über die Fahrzeugdaten der im Rahmen des 43. LCA Diskussionsforum vorgestellten Elektrofahrzeuge

	Held	Lambrecht	Frischknecht	Althaus	Simons	Freire
Car weight (kg)	1,670	n.a.	1,632	1,880	1,650	1,531
Lifetime performance car (km)	171,600	150,000	150,000	150,000	n.a.	200,000
Battery weight (kg)	400	250	312	400	250	329
Lifetime performance battery (km)	114,400	100,000	75,000	150,000	n.a.	100,000
Electricity consumption (kWh/100 km)	22.9	22	20	20	20	18.8
Electricity mix	DE	DE	CH	CH	CH	PT
Climate change impact (g CO ₂ -eq/km)	240	225	150	95	110	165

Quelle: Frischknecht (2011).

Hinsichtlich des Treibhausgaspotenzials zeigt sich insbesondere eine deutliche Abhängigkeit des Ergebnisses vom eingesetzten Strommix.

Im Rahmen von FSEM (Fraunhofer System Research for Mobility), in dem Fraunhofer Institute entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Elektromobilität beteiligt sind, wurden Screening Ökobilanzen angefertigt, die auf FSEM interne Informationen aufbauen. Die Ergebnisse zeigen eine erhebliche Streuung der Treibhausgasemissionen in Abhängigkeit von Fahrzeuggröße und Antriebskonzept. Einen wesentlichen Einfluss hat jedoch – wie oben genannt - insbesondere der Strommix für den Betrieb der Elektrofahrzeuge (vgl. Abbildung 21).

Die betrachteten Szenarien legen einem Strommix mit 100 % Windenergie zugrunde sowie einen Mix gemäß Fortschreibung der aktuellen Trends für Deutschland mit steigenden Anteilen erneuerbarer Energien (Held 2011).

Bei den Kompaktfahrzeugen gibt es hinsichtlich der lebenszyklusweiten Treibhausgasemissionen nur geringe Unterschiede zwischen den konventionell angetriebenen Fahrzeugen und den Hybrid- und Elektrofahrzeugen, wenn für die Strombereitstellung der deutsche Strommix angesetzt wird. Hierbei ergeben sich für das Dieselfahrzeug die insgesamt geringsten und das Elektrofahrzeug die insgesamt höchsten Emissionen. Dieses Ergebnis ändert sich jedoch deutlich, wenn die Elektrizität ausschließlich aus Windkraft erzeugt wird. In diesem Fall schneidet das Plug-in-Hybrid Fahrzeug, vor dem reinen Elektrofahrzeug, am besten ab, wobei für das Hybridfahrzeug in der Darstellung wohl die Emissionen aus der Verbrennung des Kraftstoffs nicht abgebildet wurden. Dennoch dürfte sich auch bei Einbeziehung dieser Emissionen die Reihenfolge nicht ändern.

¹⁸ 43rd LCA Discussion Forum, Life Cycle Assessment of Electromobility, 6th of April 2011.

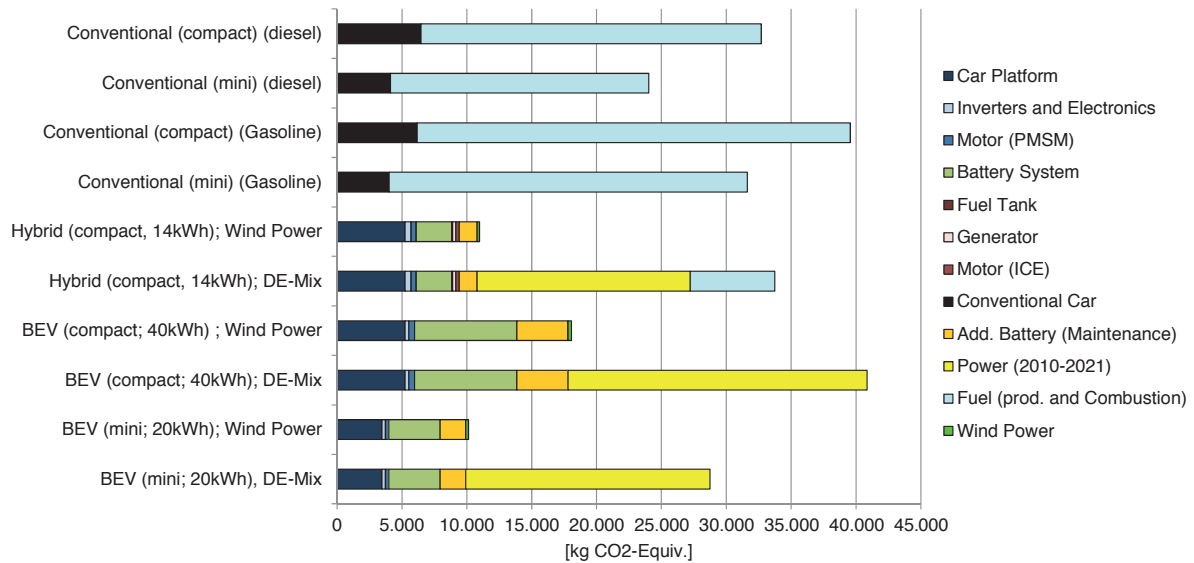


Abbildung 21 Treibhausgaspotenzial für verschiedene Fahrzeuge und Stromerzeugungsvarianten
Quelle: Held (2011).

Auch von Frischknecht (2011) wurden unterschiedliche Fahrzeuge miteinander verglichen. Bei den Kompaktwagen wurde neben herkömmlichen Pkw mit Diesel-, Benzin- und Erdgasantrieb zusätzlich ein besonders sparsames Dieselfahrzeug sowie ein Elektrofahrzeug betrachtet. Bei den Kleinwagen wurden ein Dieselfahrzeug und ein Elektrofahrzeug betrachtet.

Hierbei zeigt sich, dass bei den Kompaktwagen das Elektrofahrzeug lebenszyklusweit signifikant weniger Treibhausgasemissionen erzeugt als die herkömmlichen Benzin-, Diesel- und Erdgasfahrzeuge, der Unterschied zu einem verbrauchsarmen Diesel jedoch nur minimal ist. Bei den betrachteten Kleinwagen war der Unterschied größer, da hier von einer längeren Lebensdauer der Batterie ausgegangen wurde.

In einer portugiesischen Studie (Marques/Freire 2011) wurden ebenfalls Fahrzeuge der Kompaktklasse betrachtet. Hierbei wurde als zusätzliche Differenzierung noch der Unterschied zwischen innerstädtischem und außerstädtischem Verkehr untersucht. Bei Anwendung des portugiesischen Strommixes, hatten die Elektrofahrzeuge grundsätzlich Vorteile. Für den Fall, dass der Strom mit Kohle erzeugt werden muss, ergeben sich jedoch auch hier für das Elektrofahrzeug höhere Treibhausgasemissionen.

Ähnlich deutlich auf die Relevanz des Strommixes weisen die Ergebnisse von Althaus (2011) hin. Hierbei wurde ein "zukünftiges Elektrofahrzeug" mit einem effizienten Dieselfahrzeug verglichen. Wird der Mix aus dem UCTE-Netz verwendet, ergeben sich vergleichbare Ergebnisse. Beim Einsatz von Kohlestrom ergeben sich Vorteile für das Dieselfahrzeug, bei Einsatz von Kernenergie Vorteile für das Elektrofahrzeug.

Die Ergebnisse der Vergleiche ändern sich, wenn nicht nur das Treibhausgaspotenzial betrachtet wird, sondern ebenfalls andere Umweltindikatoren. So ergeben sich bei der FSEM Studie für den Indikator Versauerungspotenzial für die Hybrid- und Batteriefahrzeuge relativ gesehen schlechtere Werte im Vergleich zu den diesel- und insbesondere benzinbetriebenen Fahrzeugen (Held 2011).

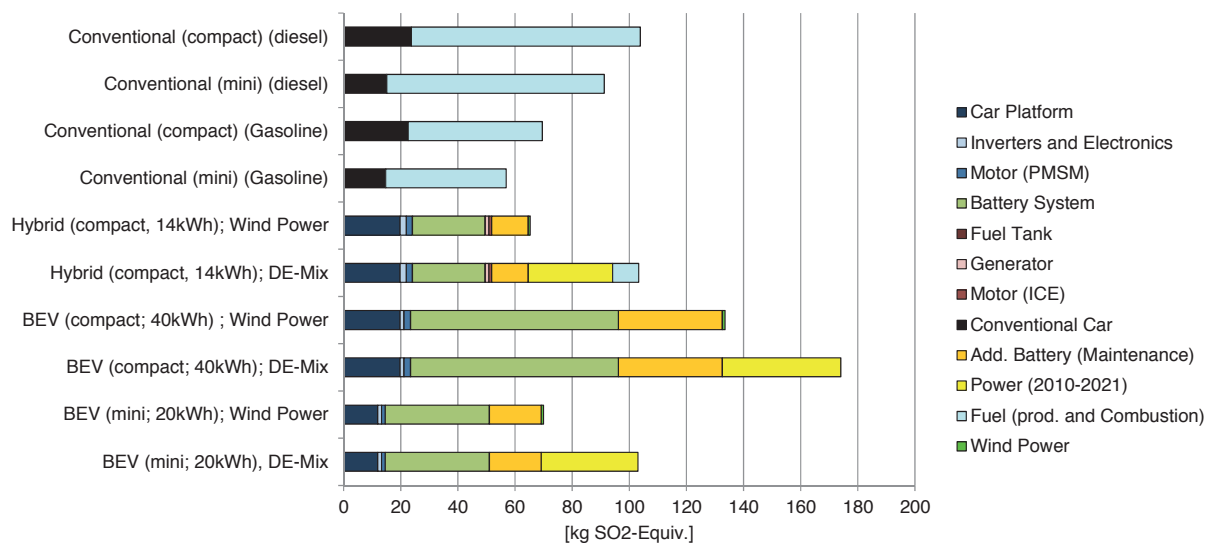


Abbildung 22 Versauerungspotenzial für verschiedene Fahrzeuge und Stromerzeugungsvarianten

Quelle: Held 2011.

Auch bei Frischknecht (2011) verschlechtern sich die Ergebnisse für die Hybrid- und Elektrofahrzeuge deutlich aufgrund anderer Emissionen bei der Herstellung der Batterien, wenn nicht alleine die Treibhausgasemissionen sondern EcoPoint 2006¹⁹, ein nicht ISO 14040 konformes Bewertungsverfahren für Ökobilanzen, für die Bewertung herangezogen werden.

3.2.2 Rohstoffverfügbarkeit: Batterien für Elektrofahrzeuge und Treibstoffe für herkömmliche Fahrzeuge

Batterien

Batteriesysteme für Elektrofahrzeuge wurden ebenfalls bereits 1996 untersucht. Dabei wurden jedoch nur nickel- und bleibasierte Systeme betrachtet (Weibel/Dietrich 1996). Auch Rantik (1999) untersuchte exemplarisch fünf Batterietypen auf potenzielle Umweltwirkungen von Herstellung, Nutzung und Recycling auf Grundlage der Lebensdauer eines Elektroautos. Auch bei dieser Studie wurden noch keine Lithiumbatterien untersucht. Als besonders kritisch wird die noch schlechte Effizienz der untersuchten Batterien herausgestellt, da durch die Speicherverluste höhere Umweltwirkungen entstehen können als durch die Batterieherstellung. Ergänzend wurde auch auf die schlechte Verfügbarkeit der Rohstoffe Nickel und Cadmium hingewiesen.

Auch Rydh (2003) betrachtete unterschiedliche Batterietypen aus einer Lebenszyklusperspektive, wobei mobile und industrielle Anwendungen berücksichtigt wurden und kein Schwerpunkt auf Traktionsbatterien gelegt wurde. Eine neuere LCA-Studie (Samaras/Meisterling 2008) beinhaltet Lebenszyklusanalysen von Lithium-Ionen-Batterien. Unter-

¹⁹ EcoPoint ist eine u.a. in den Modellen SimaPro und Umberto unterstütztes Umweltbewertungsmethode. Für einen kurzen Überblick, auch im Vergleich mit den Ansätzen von „Environmental Priority System“ und „Eco Indicator 99“ vgl. z.B. www.srl.gatech.edu/education/ME4171/LCA_metrics.ppt.

suchungsgegenstand sind hier aber keine reinen Elektroautos, sondern Hybrid- und Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge. Lambrecht (2011) schätzt ab, dass bei Elektrofahrzeugen, abhängig von Lebensdauer und Speicherbedarf, ca. 17 g CO₂ äquiv. pro km nur auf die Batterieherstellung entfallen.

Insbesondere für Batterien sind Fragen der Ressourcenverfügbarkeit von hoher Relevanz. Wichtige Metalle für Traktionsbatterien sind insbesondere Blei (und Antimon als Legierungsbestandteil), Cadmium, Nickel und Lithium. Von diesen Metallen kann Blei bei geologischen Reserven von 79 Mio. t, aber geschätzten Ressourcen²⁰ von 1.500 Mio. t und einer Jahresförderung von ca. 3.8 Mio. t im Jahr 2008 (US Geological Survey 2009) hinsichtlich der Verfügbarkeit als unkritisch eingeschätzt werden. Das gilt noch stärker für Antimon, da der Antimonanteil an den eingesetzten Bleilegierungen stetig verringert wurde und perspektivisch von antimonfreien Bleilegierungen ausgegangen wird (Carlin 2009). Die Verfügbarkeit von Cadmium ist hinsichtlich der verfügbaren Mengen zwar deutlich kritischer zu bewerten, jedoch erscheint es aufgrund des erheblichen toxikologischen und kanzerogenen Potentials von Cadmium unwahrscheinlich, dass es entgegen dem sonstigen Trend in Traktionsbatterien eine weite Verbreitung finden wird.

Deutlich kritischer gestaltet sich die Verfügbarkeit von Nickel und Lithium. Die Edelstahlherstellung ist für mehr als 60 % der Nickelverwendung verantwortlich, daneben wird es insbesondere auch für Superlegierungen eingesetzt. Insbesondere für die weitere Effizienzsteigerung von Wärmekraftwerken durch Erhöhung der Dampftemperaturen ist die Nutzung von hochtemperaturfesten neuen Stahllegierungen auf der Basis von Nickel oder von Superlegierungen notwendig und kann bisher nicht substituiert werden. Daneben wird Nickel zunehmend auch in Batterien eingesetzt. Die Verwendung von Nickel in Batterien hat stark zugenommen ist jedoch bisher dennoch nur für rund 5 % der Verwendung verantwortlich. Die Verfügbarkeit von Nickel ist kritisch, da die Nickelvorräte zwar global relativ weit verbreitet sind, es jedoch sowohl in Europa wie auch in den USA praktisch keine Vorräte gibt. Die derzeit wirtschaftlich gewinnbaren Vorräte würden auch eine stärkere Nutzung von Nickel in Batterien zulassen. Einer Förderung von ca. 1,6 Mio. t in 2008 stehen Reserven von rund 70 Mio. t gegenüber (U. S. Geological Survey 2009).

Lithium ist das vermutlich am meisten diskutierte Metall im Zusammenhang mit der Energiespeicherung in Pkws. Neben der Nutzung in Akkumulatoren und Batterien kommt es insbesondere in Spezialgläsern, bei der Herstellung von Aluminium und in Aluminiumlegierungen zum Einsatz. Die unterschiedlichen Einsatzbereiche von Lithium sorgen dafür, dass Lithium aus unterschiedlichen Lagerstättentypen wirtschaftlich gewonnen werden kann. Die bevorzugten Lagerstätten hängen auch von der Verwendung ab. Besonders preisgünstig lässt sich Lithium aus Lithiumlaugen von Salzseen (z. B. USA, China oder Chile) gewinnen. Für einige Anwendungen in der Glas- und Keramikindustrie werden jedoch die Minerale bevorzugt (Pohl 2005).

²⁰ Reserve: Diejenigen Mengen eines Rohstoffes, die mit großer Genauigkeit erfasst wurden und mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich gewonnen werden können. Ressourcen: Diejenige Mengen eines Rohstoffes, die entweder nachgewiesen, aber derzeit nicht wirtschaftlich gewinnbar sind, oder aber die Mengen, die auf Basis geologischer Indikatoren noch erwartet werden und mittels Exploration nachgewiesen werden können.

Derzeit wird Lithium nur von einer geringen Zahl von Ländern produziert, es sind jedoch in unterschiedlichen Regionen Lagerstätten vorhanden. Auch beim Lithium verfügt Europa jedoch nur über geringe Vorräte und eine geringe Förderung (ausschließlich Portugal), es wird jedoch eine weitere Lagerstätten in Finnland erschlossen, in mehreren anderen europäischen Ländern (Österreich, Frankreich, Irland, Spanien, Schweden) gibt es Lagerstätten lithiumhaltiger Pegmatite, die bei steigenden Preisen von Lithium wirtschaftlich abgebaut werden könnten (Jaskula 2009).

Die globalen Lithiumreserven werden vom USGS²¹ mit 4,1 Mio. t angegeben, die Ressourcen mit 13 Mio. t. Dem steht eine Förderung von 27.400 t in 2008 gegenüber. Bezogen auf die Reserven liegt die statische Reichweite derzeit damit bei rund 150 Jahren. Bei einer verstärkten Nutzung von Lithium in Traktionsbatterien und anderen Sekundärbatterien dürfte der Lithiumverbrauch jedoch deutlich ansteigen. Bereits derzeit wird der Lithiumbedarf stark vom Verbrauch in der Batterieproduktion getrieben (Jaskula 2009). Sollte es zu einem breiten Einsatz von Li-Ion-Batterien in Automobilen kommen, würde dies den bisherigen Verbrauch von Lithium deutlich steigern, wie die folgende Abschätzung verdeutlicht:

Der Lithiumgehalt für eine 20-kWh-Batterie wird mit rund 1,8 kg angegeben (Mathoy 2008). Hiermit soll ein rund 1 t schweres Fahrzeug eine Reichweite von 160 km erreichen können. In 2007 wurden weltweit rund 60,5 Mio. Personenkraftwagen produziert, rund 19,5 Mio. Pkw wurden davon in der EU und rund 5,7 Mio. Pkw in Deutschland produziert. Würde man jeweils alle Pkw mit einem Elektroantrieb und Lithium-Ionen-Batterien mit jeweils 20 kWh ausstatten würde sich ein jährlicher Lithiumbedarf von global rund 108.900 t/a, in der EU von rund 35.100 t/a und in Deutschland von rund 10.260 t/a ergeben.

Man wird jedoch auch davon ausgehen müssen, dass ein erheblicher Anteil des Lithiums recycelt werden kann. Für die Ausrüstung einer globalen Pkw-Flotte von 1 Mrd. Pkw würde sich ein Gesamtbedarf von rund 1,8 Mio. t Lithium ergeben. Das ist ein erheblicher Anteil der derzeitigen Reserven, erscheint aber mit Blick auf die Lithiumressourcen durchaus umsetzbar. Insofern ist beim Lithium keine rasche geologische Verknappung anzunehmen. Die Vorräte sind insgesamt groß und eine deutlich stärkere Nutzung von Lithium in Batterien erscheint möglich. Eine Kreislaufführung des eingesetzten Lithiums wird jedoch sicherlich notwendig sein.

Energierohstoffe

Auf Seiten der herkömmlich angetriebenen Fahrzeuge stellt die Aussicht auf eine abnehmende Verfügbarkeit mineralöl-basierter Kraftstoffe, insbesondere gestützt auf die Diskussion um Peak-Oil eine der zentralen Motivationen für deren kritische Einschätzung und in der Folge die beabsichtigte Elektrifizierung des Antriebsstrangs dar. Nun ist einerseits die Sorge um eine zureichende Ölversorgung nicht neu, sondern spätestens seit den Ölpreiskrisen von 1973 und 1979 auch ins breite öffentliche Bewusstsein gedrungen. Auch die logisch zwingende Notwendigkeit sinkender Ölförderraten in der Zukunft sollte mindestens seit der Diskussion um die „Grenzen des Wachstums“ vor etwa 40 Jahren (Forrester 1971, Meadows 1972 etc.) verstanden sein. Andererseits sollte ebenso klar sein, dass Mineralöl nicht die

²¹ U.S. Geological Survey (2009).

einzig mögliche Basis für flüssige Kraftstoffe darstellt und elektrischer Strom nicht die einzige mögliche Alternative bildet. Außerdem sind für die konkrete, auch quantitative Bestimmung der Perspektiven selbstverständlich auch das quantitative Ausmaß der Reservenlage und die Klimarelevanz der Nutzung fossiler Energierohstoffe maßgeblich.

Eine entsprechend differenzierte Betrachtung führt zu einem Ergebnis, das von der volkswirtschaftlich vereinfachten Einordnung nicht unwesentlich abweicht. Zunächst sei die aktuelle Einschätzung über den Umfang der Reserven und Ressourcen von Energierohstoffen und die Entwicklung dieser Einschätzung in jüngerer Zeit betrachtet. Die nachfolgenden Tabellen zeigen die entsprechenden Zahlenwerte nach den Surveys der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, die seit vielen Jahren auch international für ihre fundierten, abgewogenen Einschätzungen bekannt ist.

Tabelle 11 Reserven zum Jahresende in EJ

Energieträger	2001	2004	2007	2009
konventionelles Erdöl	6.360	6.669	6.575	6.731
nicht-konv. Erdöl	2.761	2.761	2.183	2.785
konventionelles Erdgas	5.109	5.599	6.947	7.291
nicht-konv. Erdgas	63	63	184	191
Hartkohle	17.668	18.811	18.060	17.906
Weichbraunkohle	1.963	1.963	3.113	3.216
Kernbrennstoffe	1.552	1.625	1.633	1.673
gesamt	35.477	37.492	38.695	39.794

Quelle: Zusammenstellung auf Grundlage von BGR (verschiedene Ausgaben).

Tabelle 12 Ressourcen zum Jahresende in EJ

Energieträger	2001	2004	2007	2009
konventionelles Erdöl	3.515	3.430	3.829	4.152
nicht-konv. Erdöl	10.460	10.460	12.919	12.993
konventionelles Erdgas	6.886	6.555	9.098	9.142
nicht-konv. Erdgas	48.633	48.633	103.364	103.351
Hartkohle	103.898	96.110	386.718	425.886
Weichbraunkohle	12.218	8.922	48.977	49.861
Kernbrennstoffe	8.230	8.230	6.806	7.794
gesamt	193.840	182.350	571.711	613.180

Quelle: Zusammenstellung auf Grundlage von BGR (verschiedene Ausgaben).

Auffällig ist, dass die Reserven trotz der zwischenzeitlichen teilweisen Förderung und Verwendung nicht gesunken, sondern angestiegen sind. Bei den – um mehr als eine Größenordnung höher eingeschätzten – Ressourcen sind die Mengenangaben aufgrund von Neubewertungen insbesondere bei Kohlen und bei Gas sogar auf ein Mehrfaches angehoben worden. Zu beachten ist ferner, dass im Falle substanzieller künftiger Preiserhöhungen entsprechende Mengen von den – wirtschaftlich nicht nutzbaren – Ressourcen zu den –

wirtschaftlich nutzbaren – Reserven umzubuchen sind. Sorgen um eine physische Verknappung der Energievorräte erscheinen daher auf absehbare Zeit nicht begründet; dies trifft auch auf flüssige Energieträger zu, da diese zu verträglichen Kosten auch aus Kohlen und Gas erzeugt werden können.

Für die Frage, wieweit die Nutzung dieser Energiemengen klimaverträglich ist, müssen insbesondere die zugehörigen CO₂-Mengen bestimmt werden. In den nachfolgenden Tabellen sind die CO₂-Potenziale der oben dargestellten BGR-Schätzgrößen für die einzelnen Energieträger entsprechend deren Kohlenstoffgehalt unter Verwendung der üblichen Umrechnungsfaktoren bestimmt.

Tabelle 13 CO₂-Potenziale der Reserven zum Jahresende in Gt

Energieträger	2001	2004	2007	2009
konventionelles Erdöl	468	491	484	495
nicht-konv. Erdöl	203	203	161	205
konventionelles Erdgas	287	314	390	409
nicht-konv. Erdgas	4	4	10	11
Hartkohle	1.672	1.780	1.709	1.695
Weichbraunkohle	186	186	295	304
Kernbrennstoffe	0	0	0	0
gesamt	2.819	2.978	3.049	3.119

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf BGR (verschiedene Ausgaben)

Tabelle 14 CO₂-Potenziale der Ressourcen zum Jahresende in Gt

Energieträger	2001	2004	2007	2009
konventionelles Erdöl	259	252	282	306
nicht-konv. Erdöl	770	770	951	956
konventionelles Erdgas	386	368	510	513
nicht-konv. Erdgas	2.728	2.728	5.797	5.796
Hartkohle	9.833	9.096	36.601	40.308
Weichbraunkohle	1.156	844	4.635	4.719
Kernbrennstoffe	0	0	0	0
gesamt	15.132	14.058	48.776	52.598

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf BGR (verschiedene Ausgaben)

Dem CO₂-Potenzial von Reserven und Ressourcen können jene Mengen gegenübergestellt werden, die als klimaverträglich anzusehen sind. Hierzu hat der WBGU (2009) Angaben für eine Einhaltung des Ziels einer Erwärmung um maximal 2°C gemacht. Für eine Einhaltung mit 67 % Wahrscheinlichkeit wird die verträgliche Emissionsmenge im Zeitraum 2010-2050 mit 750 Gt CO₂ angegeben, für eine Einhaltung mit 75 % Wahrscheinlichkeit mit 600 Gt; nach 2050 darf höchstens etwa ein Fünftel der Menge emittiert werden, die bis 2050 zur Verfügung steht (ebd.). Diese CO₂-Mengen werden im Wesentlichen allein bei Nutzung der (konventionellem und nicht konventionellem) Erdölreserven frei, bei Vermeidung einer weite-

ren Nutzung der Reserven von Erdgas und von Kohlen, sowie einem Verzicht auf den Rückgriff auf die über die Reserven hinausgehenden Ressourcen, die ein Vielfaches der Reserven und dementsprechend ein Vielfaches der CO₂-Potenziale der Reserven ausmachen. Demgegenüber decken Kohlen und Gas bekanntlich derzeit mehrheitlich den globalen Energiebedarf ab und werden in der weiteren Entwicklung – jedenfalls zunächst – noch mit steigenden Deckungsbeiträgen angenommen.

Dies bestätigt die Richtigkeit des in Deutschland seit vielen Jahren vertretenen politischen Ziels einer Energieeinsparung und Umstellung auf regenerative Energiequellen im Rahmen einer vor gut 30 Jahren angemahnten (Krause/Bossel/Müller-Reißmann 1980) und jetzt von der Bundesregierung zum Programm erhobenen „Energiewende“. Dies bestätigt aber auch, dass das Mengenproblem mit den Energievorräten global nicht in der Knappheit dieser Vorräte besteht, sondern darin, dass wir über mehr Vorräte verfügen, als wir bislang in der Lage sind, unseren Zugriff darauf zu beschränken.

3.2.3 Flächeninanspruchnahme

Bei der Flächeninanspruchnahme ist – wie beim Energieverbrauch oder anderen Parametern – zu unterscheiden zwischen der Nutzungsphase und den vor- und nachgelagerten Ketten. Hinsichtlich der spezifischen Flächenbedarfe der Produktions- und Entsorgungsphase von Batteriefahrzeugen stehen detailliertere Untersuchungen aus; hier sind wegen der teilweise unterschiedlichen Fahrzeugkomponenten mit den dort eingesetzten Materialien Unterschiede zu den herkömmlichen Fahrzeugen zu erwarten, die aber derzeit nicht beziffert werden können.

Gewisse Unterschiede sind auch bei den Komponenten zu erwarten, die sowohl in herkömmlichen als auch in batteriebetriebenen Fahrzeugen anzutreffen sind: Bei Elektrofahrzeugen wird wegen des Gewichts der Batterien das sonstige Eigengewicht des Fahrzeugs kritischer angesehen und verstärkt die Frage verfolgt, wieweit hier durch Leichtbautechniken und -materialien eine Reduktion erfolgen kann. Die hier anzusprechenden technologischen und materialtechnischen Ansätze zur Gewichtsminderung können weitgehend auch bei herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen verbrauchssenkend eingesetzt werden. Insofern reduziert sich die Fragestellung darauf, wie sich die jeweils unter Systemgesichtspunkten zu ermittelnden Optima unterscheiden. Auch dies erscheint als eine wichtige Frage bei der technologischen Weiterentwicklung der Fahrzeugkonzepte und deren Beurteilung.

Grundsätzlich werden Flächenansprüche durch Materialgewinnung und Produktion kaum betrachtet, weil die Bewertungsprobleme eine Vergleichbarkeit von Angaben weitgehend einschränken. Hinsichtlich der Flächeninanspruchnahme im Betrieb ist zunächst kein erheblicher Unterschied zu erkennen, worauf u.a. die Bremer Umweltbehörde hinweist (Glötz-Richter 2010). Auch bei einer 1:1-Substitution herkömmlicher durch elektrisch angetriebener Pkw kann allerdings mit eher geringfügigen zusätzlichen Flächenbedarfen für die Ladestationen der Fahrzeuge gerechnet werden. Werden die Elektrofahrzeuge zusätzlich in Verkehr gebracht, erhöht sich nicht nur der Materialeinsatz, sondern auch der Flächenverbrauch.

Andererseits kann bei einer Änderung des Verkehrssystems im Zusammenhang mit Elektrofahrzeugen auch eine erhebliche Senkung des Flächenbedarfs realisiert werden. So wird bisweilen das Bild entworfen, dass innerstädtische Verkehre mit kleinen Elektrofahrzeugen erledigt werden, die über Formen des Car Sharing genutzt werden, sowie zwischenstädti-

sche, längere Verkehre mit öffentlichen Verkehrsmitteln, wodurch insgesamt die Anzahl von Pkw signifikant reduziert werden kann – mit den entsprechenden Entlastungseffekten für die städtischen Flächenansprüche. Unabhängig von der Frage nach der zeitlichen Perspektive einer solchen Vorstellung liegt allerdings auf der Hand, dass die Flächeneinsparung nicht an die Antriebsart der Car-Sharing-Fahrzeuge gebunden ist, sondern an der geänderten Verkehrsmittelnutzung liegt.

4 Zusätzliche Befunde aus dem Praxiseinsatz und verkehrssystemare Betrachtungen

4.1 Breite empirische Befunde aus dem Praxiseinsatz²²

Die in Abschnitt 2.3 dargestellten empirischen Befunde zu spezifischen Energieverbräuchen des Betriebs von Elektroautos stellen nur einen kleinen Teil der gewonnenen Ergebnisse dar. Über diese Analysen hinaus wurden zahlreiche Gegenstände untersucht.

4.1.1 Untersuchungsansatz und Datengrundlage

Um eine möglichst breite Beteiligung der ganz unterschiedlich aufgestellten Einzelprojekte zu ermöglichen, wurde im Rahmen der Umweltbegleitforschung ein Minimaldatenset definiert, welches die Kernfragen hinreichend unterstützt. Praktisch erfolgte die Datengewinnung innerhalb der Einzelprojekte auf zwei unterschiedlichen Wegen:

- durch Auslesen bestimmter Informationen über technische Geräte wie Datenlogger, die über entsprechende Schnittstellen mit den Elektrofahrzeugen verbunden worden sind und die fahrzeuginterne Sensorik nutzen können. Oder
- über zusätzlich verbaute Messtechnik, wie z.B. Geräte zur Bestimmung der GPS-Position.

In der Regel erfolgte eine kombinierte Gewinnung von verschiedenen Daten über beide Wege.

Um die Vielzahl der unterschiedlichen so gewonnenen Daten auf ein einheitliches Niveau zu bringen und die Daten integriert betrachten zu können, wurde im Rahmen der Umweltbegleitforschung ein standardisiertes Datenformat definiert. Nach Festlegung der für die Forschungsfrage der Umweltbegleitforschung zentralen Parameter wurde im Rahmen der Plattform zusammen mit den Teilnehmern aus Projekten und den Partnern aus Industrie und Forschung ein Minimaldatenset entwickelt und ein angemessenes Aggregationsniveau definiert. Dies geschah unter Ausbalancierung der Anforderungen der Umweltbegleitforschung einerseits und dem technisch machbaren, wirtschaftlich vertretbaren und unter Marktgesichtspunkten Leistbaren der entsprechenden Datenlieferanten andererseits.

Bezüglich der Merkmalsträger wurde festgelegt, die beiden wichtigsten Vorgänge der Elektrofahrzeuge zu betrachten:

- Fahrten
- und Ladevorgänge.

Betrachtet werden Einzelvorgänge, wobei jeder Einzelvorgang mit einer bestimmten Anzahl weiterer forschungsrelevanter Informationen verknüpft ist, sodass eine adäquate Analyse des Fahrzeugeinsatzes im Hinblick auf die Grundlagen zur Beantwortung der Forschungsleitfragen der Umweltbegleitforschung möglich ist.

²² Für detailliertere Hintergrundinformationen und weitere Ergebnisse der Datenauswertung siehe den Teilbericht „Analyse der Messdaten zu, Betrieb und zur Ladung der Fahrzeuge“ des Wuppertal Instituts.

Ausgewertet werden Informationen zu dem Ort der Messung (das Fahrzeug), der Dauer des Vorgangs, zurückgelegter Strecke und verbrauchter Energiemenge (bei Fahrten) bzw. Kilometerstand und aufgenommener Energiemenge (bei Ladevorgängen). Grob lassen sich die jeweiligen Parameter Tabelle 15 unten entnehmen.²³

Tabelle 15 Minimaldatenset Fahrten und Ladevorgänge*

Einzelfahrt	Ladevorgang
- Jahr der Messung	- Jahr der Messung
- Modellregion	- Modellregion
- Fahrzeug (ID)	- Fahrzeug (ID)
- Quellenangabe (Bereitsteller)	- Quellenangabe (Bereitsteller)
- Datum der Fahrt	- Datum des Ladevorgangs
- Anfangszeitpunkt der Fahrt	- Anfangszeitpunkt des Ladevorgangs
- Endzeitpunkt der Fahrt	- Endzeitpunkt des Ladevorgangs
- Dauer der Fahrt	- Dauer des Ladevorgangs
- Kilometerstand zu Anfang der Fahrt	- Kilometerstand zu Beginn des Ladevorgangs
- Kilometerstand zu Ende der Fahrt	
- Zurückgelegte Strecke	
- Energiestand zu Anfang der Fahrt	- Energiestand zu Anfang des Ladevorgangs
- Energiestand zu Ende der Fahrt	- Energiestand zu Ende des Ladevorgangs
- Verbrauchte Energiemenge	- Abgenommene Energiemenge

* Alle Werte zuzüglich der Angaben der verwendeten Messeinheiten.

Die entsprechend des Minimaldatensets gewonnenen Daten stellen die wesentliche empirische Grundlage der Auswertungen der Umweltbegleitforschung dar. Welche Projekte, Fahrzeughersteller oder Modellregionen einen Beitrag zu dieser empirischen Basis liefern konnten, war abhängig von den in den Einzelprojekten eingesetzten Fahrzeugen, den jeweiligen Forschungsschwerpunkten und dem Forschungsdesign der Einzelprojekte. So standen nicht in allen Projekten verwertbare Messdaten zur Verfügung bzw. konnten nicht von allen Projekten verfügbar gemacht werden. Die nachfolgende Tabelle 16 gibt einen Überblick über die im Untersuchungskollektiv vorhandenen Modellreihen, differenziert nach KBA-Klassierung.

²³ Konkret sind die spezifischen Parameter der Schnittstellenspezifikation von PE-International dokumentiert, welche darüber hinaus auch Details zur organisatorisch-technischen Abwicklung des Datentransfers liefert. Die Schnittstellenspezifikation ist Bestandteil des ausführlichen, in vorheriger Fußnote 22 schon angesprochenen Teilberichts zur Analyse der Messdaten.

Tabelle 16 Einbezogene Fahrzeuge nach Segmenten und Modellreihen

Segment	Anzahl	Modellreihen
Mini	151	smart fortwo ED, Think City, Mitsubishi i-MiEV, e-WOLF Delta-1, Fiat 500 (Umrüstfahrzeug), Citysax
Kleinwagen	11	Fräger Stromos
Kompaktklasse	111	Mercedes A-Klasse E-Cell, VW eGolf
Mittelklasse	1	Renault Fluence Z.E.
Utilities (klein)	36	Renault Kangoo Z.E., Fiat E-Fiorino, Ford Transit Connect Electric, EcoCraft Eco Carrier, Goupil G3
Utilities (groß)	35	Mercedes Vito e-cell, Ford Transit BEV, Modec
Insgesamt	345	

Quelle: eigene Auswertungen.

Nach grundlegenden Maßnahmen zur Sicherungen der Datenqualität ergab sich eine empirische Basis von Beobachtungen von Elektro-Pkw und leichten Nutzfahrzeugen (Utilities), die sich über den Einsatzzeitraum von insgesamt gut 56.100 einzelnen Einsatztagen erstreckt.²⁴ Innerhalb dieses Einsatzzeitraums wurden an insgesamt etwas weniger als der Hälfte (ca. 25.300 Tagen) Beobachtungen (Fahrten oder Ladevorgänge) dokumentiert; überwiegend Fahrten (an ca. 24.400 Einsatztagen) und weniger Ladevorgänge (an ca. 12.400 Einsatztagen). Tabelle 17 gibt hierüber einen Überblick.

Tabelle 17 Empirische Basis: Einsatzzeiträume und Anzahlen von Tagen mit Beobachtungen

Segment	Einsatzzeitraum (Tage)	Tage mit Beobachtungen		
		insgesamt	Tage mit Fahrten	Tage mit Ladevorgängen
Minis und Kleinwagen	38.087	15.890	14.726	7.257
Kompakt- und Mittelklasse	12.615	7.461	7.262	3.902
Utilities	10.442	4.585	4.056	1.270
Gesamt	56.119	25.304	24.359	12.429

Quelle: eigene Auswertungen.

Konkret sind in der oben genannten Summe der Einsatzzeiträume der betrachteten Fahrzeuge insgesamt gut 152.000 Nutzungsvorgänge dokumentiert, davon ca. 84 % Fahrten und 16 % Ladevorgänge (s. Tabelle 18).

Angemerkt werden muss zu dieser empirischen Basis, dass nicht alle Datenreihen zu Nutzungsvorgängen durchgehend Angaben zu allen im Minimaldatenset festgelegten Parametern hatten. Tatsächlich gab es im Bereich der Fahrten vor allem bezüglich der Energieverbräuche zahlreiche fehlende Werte. Im Bereich der Ladevorgänge traten bei den Angaben zur abgenommenen Energiemenge gehäuft fehlende Werte auf.

²⁴ Summe aller Einsatzzeiträume (in Tagen) über alle beobachteten Fahrzeuge.

Tabelle 18 Empirische Basis: Nutzungsvorgänge

Segment	Nutzungsvorgänge insgesamt	Fahrten**	Ladevorgänge**
Minis und Kleinwagen	88.793	73.160	15.633
Kompakt- und Mittelklasse	53.701	47.541	6.160
Utilities*	9.854	7.854	2.000
Gesamt	152.348	128.555	23.793

* Utilities im Bereich der großen leichten Nutzfahrzeuge ohne Einzelfahrten für die Modellreihen Mercedes Vito e-cell und Modec (Daten lagen nur in aggregierter Form als Tagessummen vor).

** In großem Umfang unvollständige Messreihen (fehlende Angaben zu einem oder mehreren relevanten Merkmalen des Vorgangs).

Quelle: eigene Auswertungen.

4.1.2 Befunde zum Einsatz von Elektrofahrzeugen

Fahrten mit Elektrofahrzeugen

Fahrleistungen (Strecken)

Die durchschnittliche Fahrtenlänge der untersuchten Elektrofahrzeuge liegt bei 7,7 km (Standardabweichung 10,8 km). Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen, dass sich ein Großteil der Fahrten im Bereich bis zu 10 km bewegt, nämlich gut 3/4 aller Fahrten. Trotz Beschränkung der Betrachtungen auf Fahrten mit einer Länge über 150 m gibt es einen erheblichen Anteil an Fahrten mit weniger als einem Kilometer Distanz (17 % aller Fahrten). Der Median der Verteilung liegt bei nur 4 km und somit deutlich unter dem arithmetischen Mittel. Die gegenüber dem Mittelwert relativ hohe Standardabweichung ergibt sich durch einen kleinen Anteil von Fahrten, die deutlich länger als die durchschnittliche Fahrt sind und im oberen Teil der Verteilung in Einzelfällen bis zu einer Länge von gut 200 km reichen. Gut die Hälfte aller Fahrten liegt zwischen 1,5 und knapp 10 Kilometern, jeweils ein Viertel darunter und ein Viertel darüber.

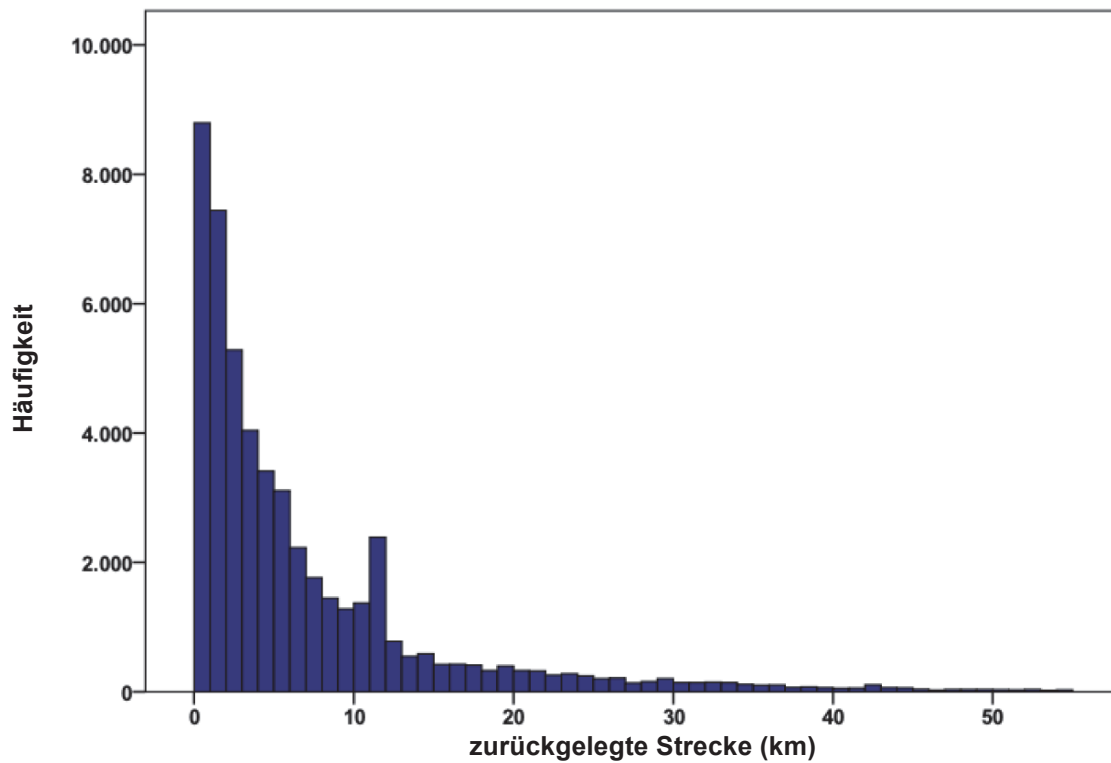


Abbildung 23 Verteilung der Fahrtenlängen: alle Fahrten

N = 51.097 Fahrten. Abgebildet werden hier nur Fahrten bis zu einer Länge von 55 km, weniger als 1 % aller Fahrten liegen in dem in der Abbildung nicht dargestellten Wertebereich.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

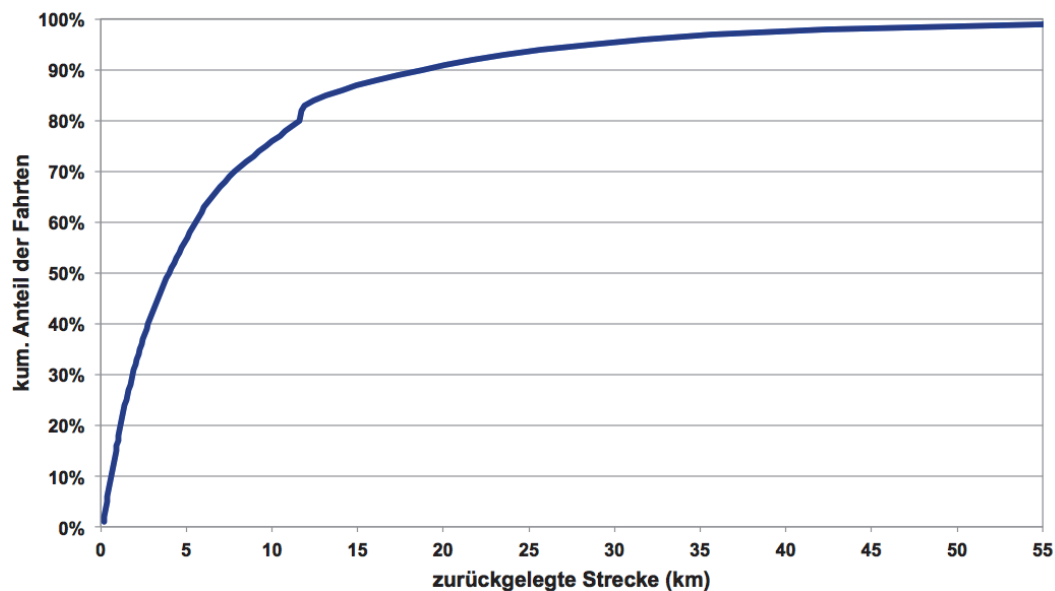


Abbildung 24 Zurückgelegte Strecken: Kumulierte Anteile nach Streckenlänge

N = 51.097 Fahrten. Abgebildet werden in diesem Ausschnitt nur Fahrten bis zu einer Länge von 55 km, weniger als 1 % aller Fahrten liegen in dem in der Abbildung nicht dargestellten Wertebereich.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Die Gegenüberstellung der Einzelstrecken innerhalb der drei Vergleichsgruppen in Abbildung 25 bis Abbildung 26 zeigt im Wesentlichen gleiche Verteilungsmuster, wobei die leichten Nutzfahrzeuge (Utilities) durch etwas kürzere Strecken und die Fahrzeuge der Mittel- und Kompaktklasse durch eine Anhäufung von Fahrten im Bereich um 12 km hervortreten. Einzelfahrten von Minis und Kleinwagen und Fahrzeuge der Kompakt- und Mittelklasse sind im Mittel 7,9 bzw. 8,4 km lang und streuen im Schnitt etwa gleich (Standardabweichung 11,1 km). Der niedrigere Durchschnittswert liegt bei den leichten Nutzfahrzeugen bei 4,8 km. Auch ist die Verteilung bei den leichten Nutzfahrzeugen insbesondere im oberen Bereich etwas homogener, was zu einer Standardabweichung von nur 8,5 km führt.

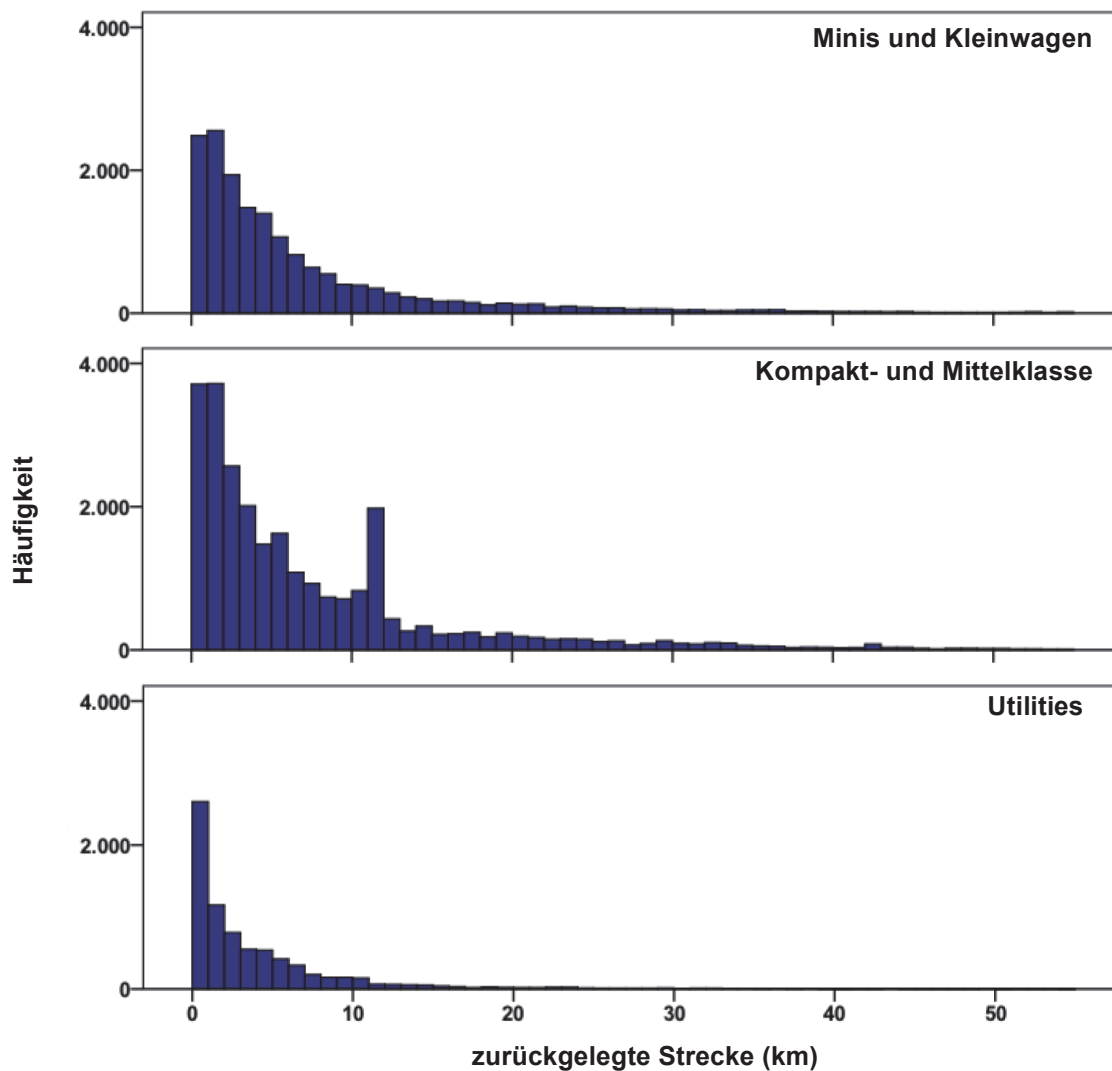


Abbildung 25 Verteilung der Fahrtenlängen: Fahrten innerhalb der Segmente

N = 17.201 / 26.110 / 7.786 Fahrten (Minis und Kleinwagen / Kompakt- und Mittelklasse / Utilities).

Abgebildet werden hier nur Fahrten bis zu einer Länge von 55 km, weniger als 1 % aller Fahrten liegen in dem in der Abbildung nicht dargestellten Wertebereich.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Bei Minis und Kleinwagen sowie bei Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse liegen jeweils knapp 15 % der Fahrten unter einem Kilometer Länge, bei den leichten Nutzfahrzeugen, vermutlich durch den spezifischen Einsatz im Lieferverkehr bedingt, sogar ein knappes

Drittel der Fahrten. Im Bereich bis zu 10 km Distanz liegen bei den Minis und Kleinwagen gut 77 % der Fahrten, innerhalb der Kompakt- und Mittelklasse etwas über 71 % und bei den leichten Nutzfahrzeugen sogar über 88 % der Fahrten. Mediane liegen bei etwas unter 4,1 km, knapp 4,7 km und bei nur knapp 2,9 km (Reihenfolge: Minis und Kleinwagen, Kompakt- und Mittelklasse, leichte Nutzfahrzeuge).

Innerhalb der drei Vergleichsgruppen sind es die Fahrzeuge der Kompakt- und Mittelklasse, welche den größten Anteil an Ausreißern nach oben haben (Maximum 208 km), Minis und Kleinwagen sowie leichte Nutzfahrzeuge fahren selbst bei relativ langen Strecken nicht so weit (Maxima bei 136 und 157 km).

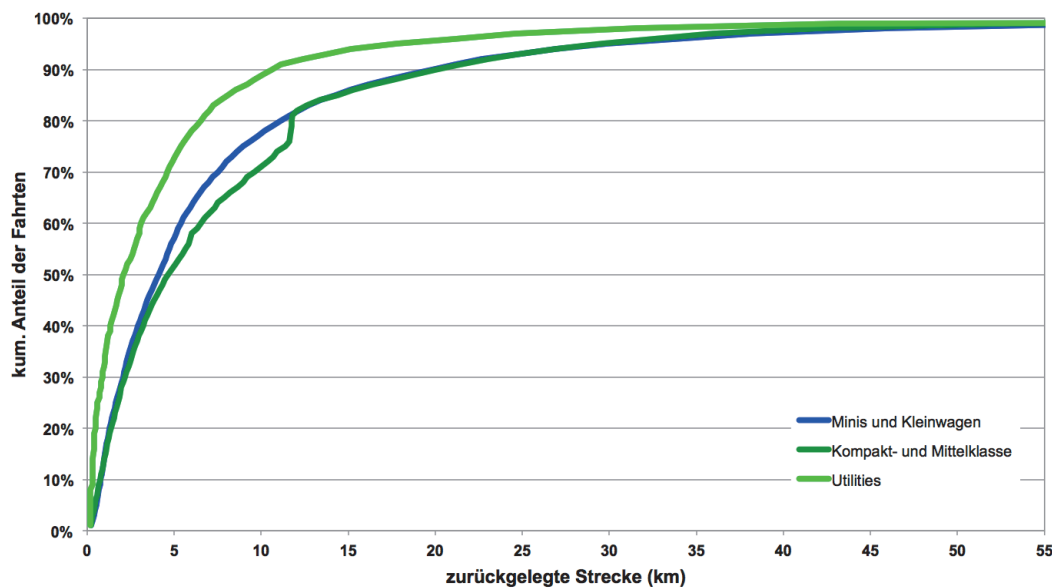


Abbildung 26 Zurückgelegte Strecken der Vergleichsgruppen: Kumulierte Anteile nach Streckenlänge
 N = 17.201 / 26.110 / 7.786 Fahrten (Minis und Kleinwagen / Kompakt- und Mittelklasse / Utilities). Abgebildet werden in diesem Ausschnitt nur Fahrten bis zu einer Länge von 55 km, weniger als 1 % aller Fahrten liegen in dem in der Abbildung nicht dargestellten Wertebereich.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Fahrdauern/Betriebsdauern

Die beobachteten Fahrten mit Elektrofahrzeugen sind meist relativ kurz, die Hälfte aller Fahrten ist nicht länger als 7 min. Im Mittel dauern sie ca. 12:40 min und streuen mit einer Standardabweichung von knapp 23 min. Obwohl hier nur Fahrten ab einer minimalen Dauer von 30 sek. betrachtet werden, dauern noch knapp 15 % aller beobachteten Fahrten weniger als 1 min. Über einer Dauer von 1 Std. befinden sich weniger als 2 % der Fahrten, diese reichen aber in Einzelfällen bis zu einer Dauer von knapp 10 Std. Diese sehr wenigen extremen Ausreißer könnten im Rahmen der Plausibilitätsprüfungen nicht mit Sicherheit als Messfehler ausgeschlossen werden. Denkbar ist auch, dass es sich um „Tests“ der Pkw-Betreiber handelt, in denen die maximale Akkuehaltbarkeit der Fahrzeuge „im Standbetrieb“ herausgefunden werden sollte. Bei der Interpretation der Standardabweichung der Fahrdauer muss allerdings berücksichtigt werden, dass diese extrem langen Betriebsdauern den

Wert deutlich in die Höhe treiben, während die maßgebliche Verteilung der Fahrtdauern relativ homogen ist.

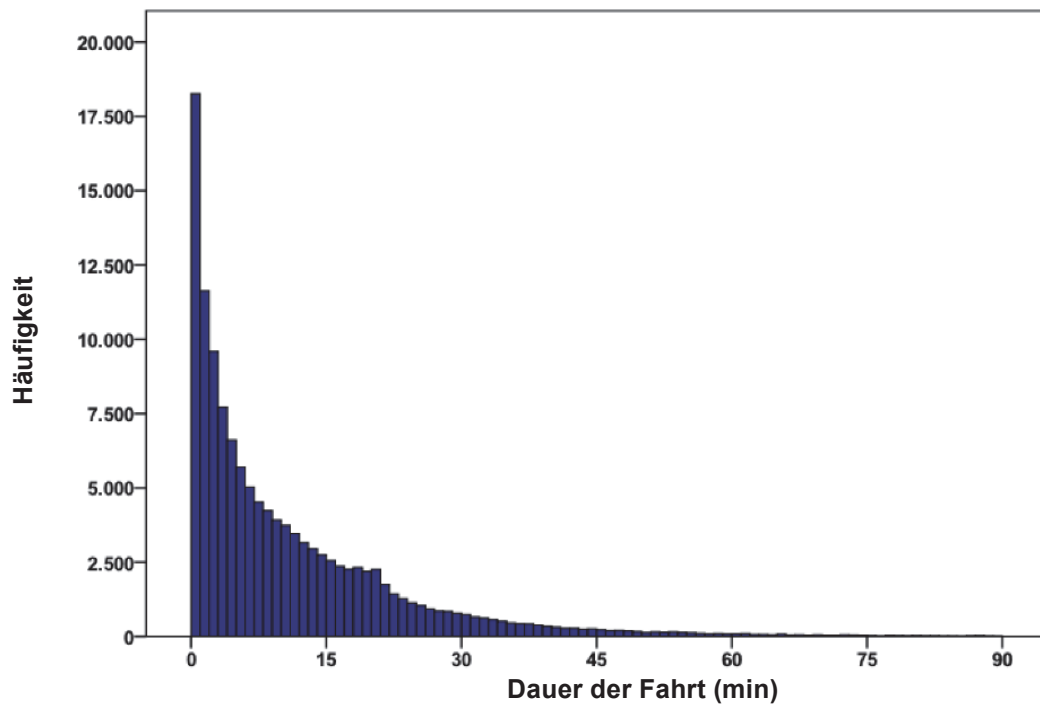


Abbildung 27 Verteilung der Betriebsdauern: alle Fahrten
N = 128.555 Fahrten.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

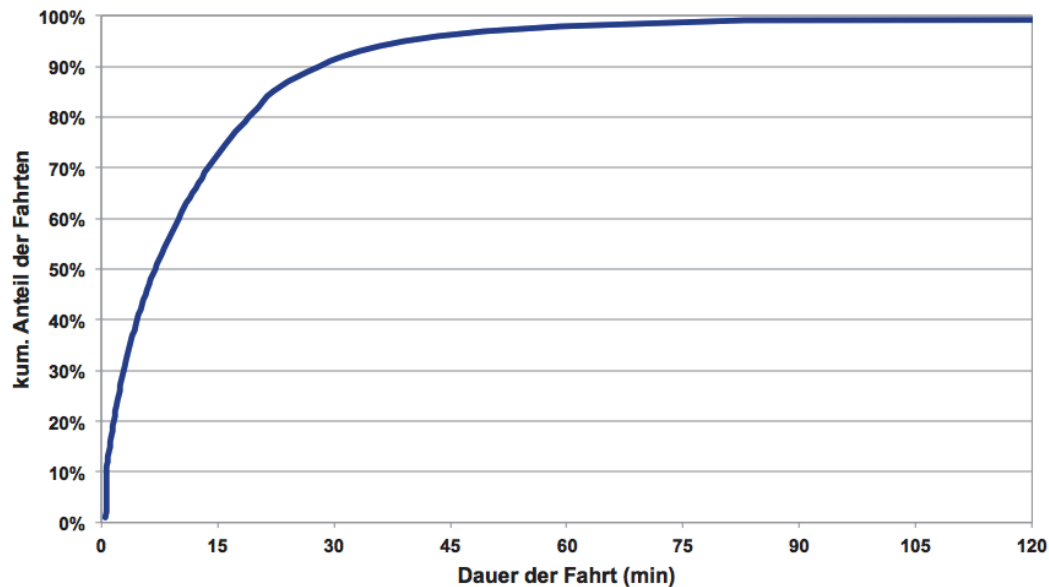


Abbildung 28 Betriebsdauern aller Fahrten: Kumulierte Anteile der Fahrten nach Dauer

N = 128.555 Fahrten. Dargestellt werden nur Fahrten bis zu einer Dauer von 120 min./2 Std., weniger als 1 % der Fälle liegen im nicht abgebildeten Wertebereich.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

50 % der Fahrten dauern zwischen zwei und 16 Minuten, knapp halb so viele Fahrten (24 %) sind kürzer, etwas mehr als die Hälfte dauern länger (26 %).

Differenziert man nun nach den drei Vergleichsgruppen, ergeben sich in den unteren Teilen der Verteilungen deutliche Unterschiede. Es stellt sich heraus, dass die hohen Anzahlen extrem kurzer Fahrten vor allem durch die Fahrzeuge der Kompakt- und Mittelklasse zustande kommen. Bei diesen haben über 27 % der Fahrten eine Dauer unter einer Minute. Dem stehen Anteile von knapp 7 % bei Minis und Kleinwagen und 6 % bei leichten Nutzfahrzeugen entgegen.

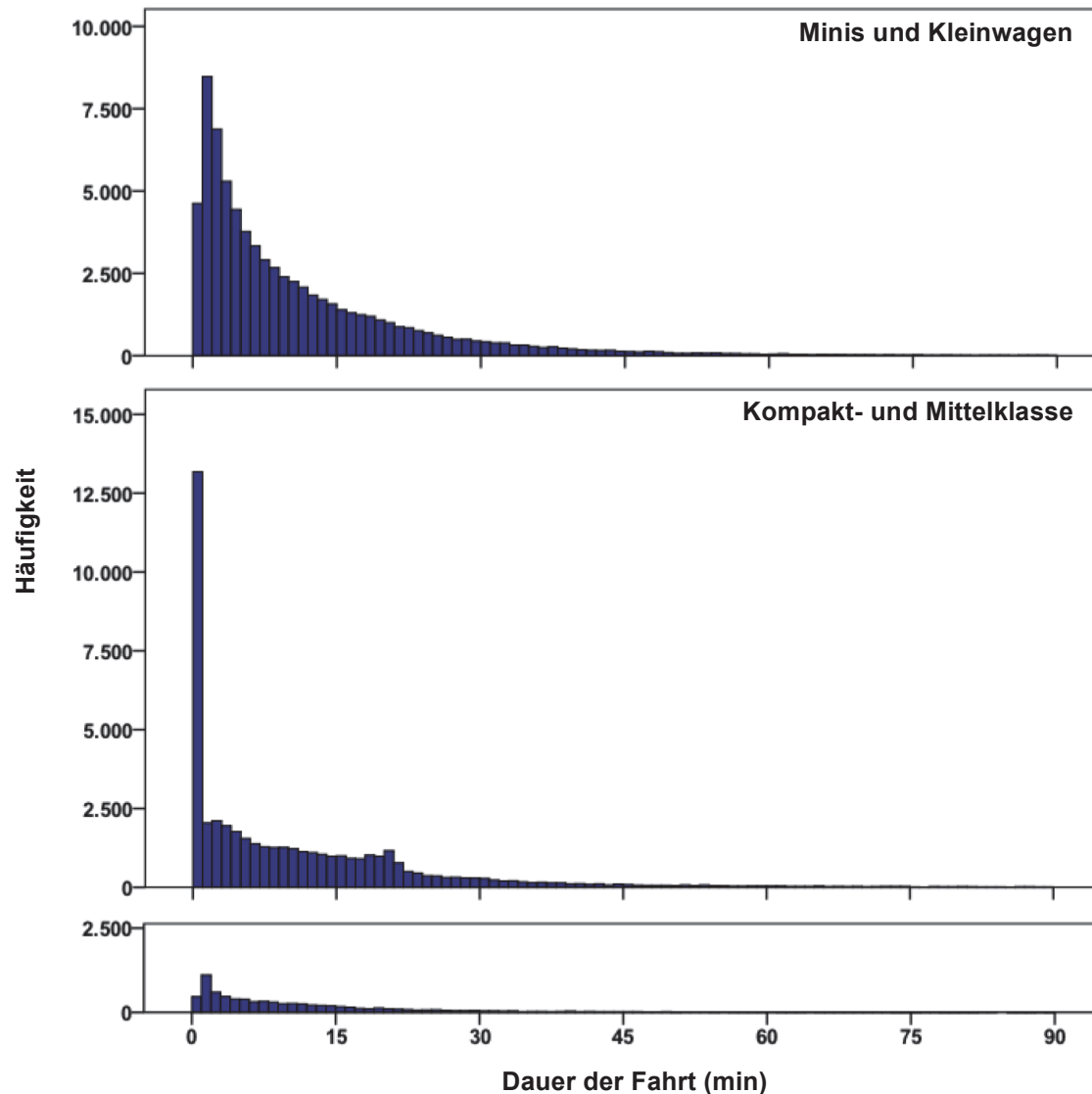


Abbildung 29 Verteilung der Betriebsdauern: Fahrten innerhalb der Segmente

N = 73.160 / 47.541 / 7.854 Fahrten (Minis und Kleinwagen / Kompakt- und Mittelklasse / Utilities).

Dargestellt werden nur Fahrten bis zu einer Dauer von 120 min./2 Std., weniger als 1 % der Fälle liegen im nicht abgebildeten Wertebereich.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Im Bereich bis 10 min Fahrdauer befinden sich bei den drei Vergleichsgruppen dann wieder ähnliche Anteile, in etwa gut 61 % bei Minis und Kleinwagen und knapp 59 % bei Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse und bei leichten Nutzfahrzeugen. Insb. Abbildung 30 zeigt, dass sich die Unterschiede in den Verteilungen der drei Gruppen ab ca. einem Anteil von 50 % der Fahrten (sortiert nach Dauer) wieder annähern. Im Bereich über 1 Std. Dauer liegen in allen drei Gruppen sehr wenige Fahrten, jeweils etwas über 1, knapp über 3 und ca. 2,5 % (Reihenfolge: Minis und Kleinwagen, Kompakt- und Mittelklasse, leichte Nutzfahrzeuge).

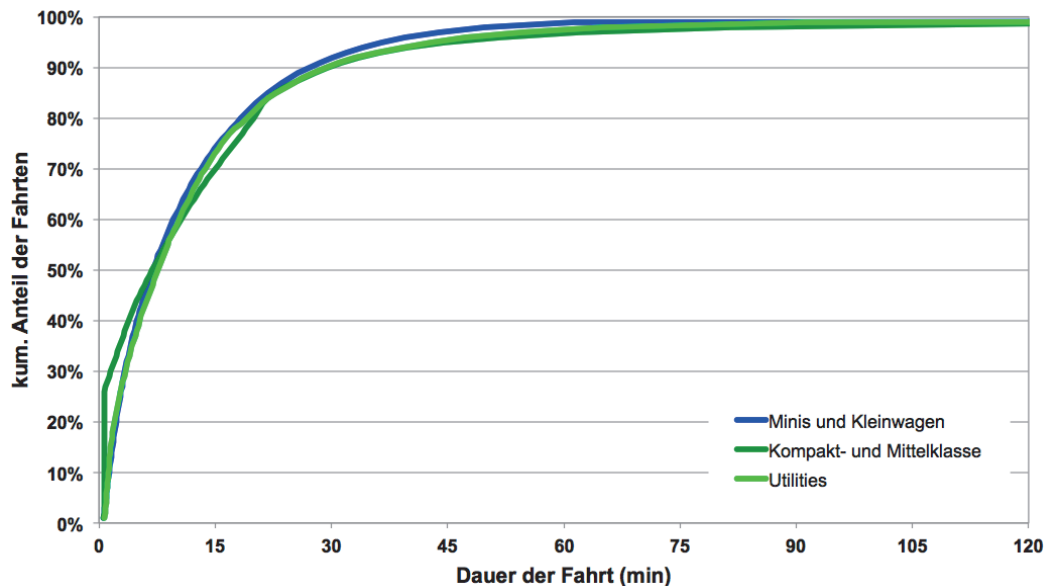


Abbildung 30 Betriebsdauern der Fahrten innerhalb der einzelnen Segmente: Kumulierte Anteile der Fahrten nach Dauer

N = 73.160 / 47.541 / 7.854 Fahrten (Minis und Kleinwagen / Kompakt- und Mittelklasse / Utilities). Dargestellt werden nur Fahrten bis zu einer Dauer von 120 min./2 Std., weniger als 1 % der Fälle liegen im nicht abgebildeten Wertebereich.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Die arithmetischen Mittel liegen ebenfalls nahe beieinander, es ergeben sich Werte von 11,5 und 12,9 min bei Minis und Kleinwagen und in der Klasse der leichten Nutzfahrzeuge, der Wert der Kompaktklasse liegt bei 14,4 min. Die Standardabweichungen sind entsprechend der unterschiedlichen Anteile von Werten im äußeren Rand der Verteilung auf die drei Gruppen recht unterschiedlich und liegen bei 14,6 min für Minis und Kleinwagen, 32,2 min bei Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse und 18,8 min bei den leichten Nutzfahrzeugen.

Tagesgänge Fahrten

Die Tagesgänge der Fahrzeugeinsätze werden in rechtsoffenen Viertelstundenintervallen angegeben und bezeichnen jeweils den Anteil der Fahrzeuge, die in diesem Zeitraum gefahren werden.

Bezogen auf alle Fahrten lässt sich anhand Abbildung 31 erkennen, dass maximal 4,3 % aller Fahrzeuge innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls im Rahmen einer Fahrt unterwegs

waren. Die Peaks liegen in den Intervallen [7:45, 8:00[und [8:15, 9:00[. Zwischen ca. 4:00 und ca. 6:45 Uhr gibt es einen relativ starken Anstieg in der Fahrtenhäufigkeit, bis ca. 15 Uhr folgt dann die Zeit des stärksten Fahrzeugeinsatzes. Zwischen 15 bis ca. 20 Uhr flaut dieser gleichmäßig ab und stabilisiert sich innerhalb der Nachtstunden bei einem Wert von unter 0,5 % der Fahrzeuge.

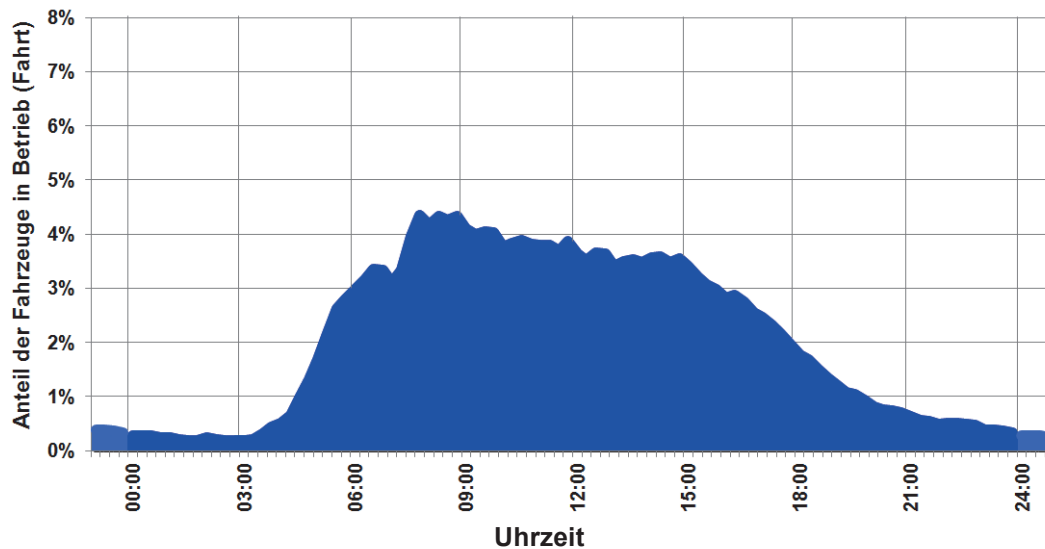


Abbildung 31 Tagesgänge aller Fahrten

N = 128.555 Fahrten. Viertelstundenintervalle; Anteile der durchschnittlich fahrenden Fahrzeuge im Beobachtungszeitraum.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

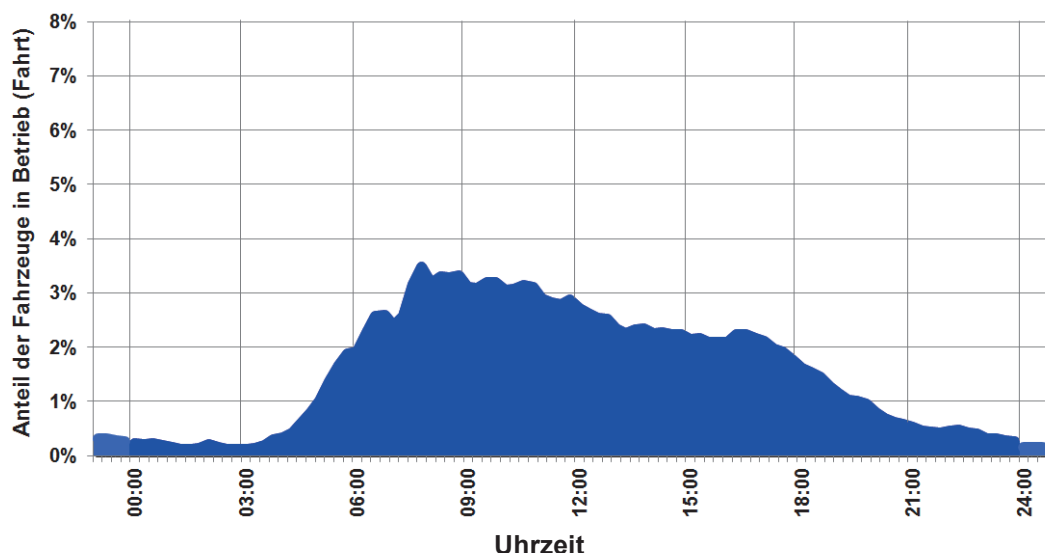


Abbildung 32 Tagesgänge der Fahrten mit Minis und Kleinwagen

N = 73.160 Fahrten. Viertelstundenintervalle; Anteile der durchschnittlich fahrenden Fahrzeuge im Beobachtungszeitraum.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Stellt man die drei Gruppen Minis und Kleinwagen, Kompakt- und Mittelklasse sowie leichte Nutzfahrzeuge gegenüber, werden leicht unterschiedliche Einsatzprofile deutlich. Innerhalb der folgenden drei Abbildungen ist die Skalierung der Y-Achse gleich gehalten, sodass auch im direkten Vergleich gut ersichtlich ist, dass die Anteile der Fahrzeuge „im Einsatz“ innerhalb der Fahrzeuge der Kompakt- und Mittelklasse am größten sind, gefolgt von denen der leichten Nutzfahrzeuge (bis Abbildung 34). Auch die Verteilungsmuster sind unterschiedlich. So liegt der Peak bei den Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse in den frühen Nachmittagsstunden zwischen 12 und 15 Uhr und erreicht Anteilswerte von 7,9 % der Fahrzeuge.

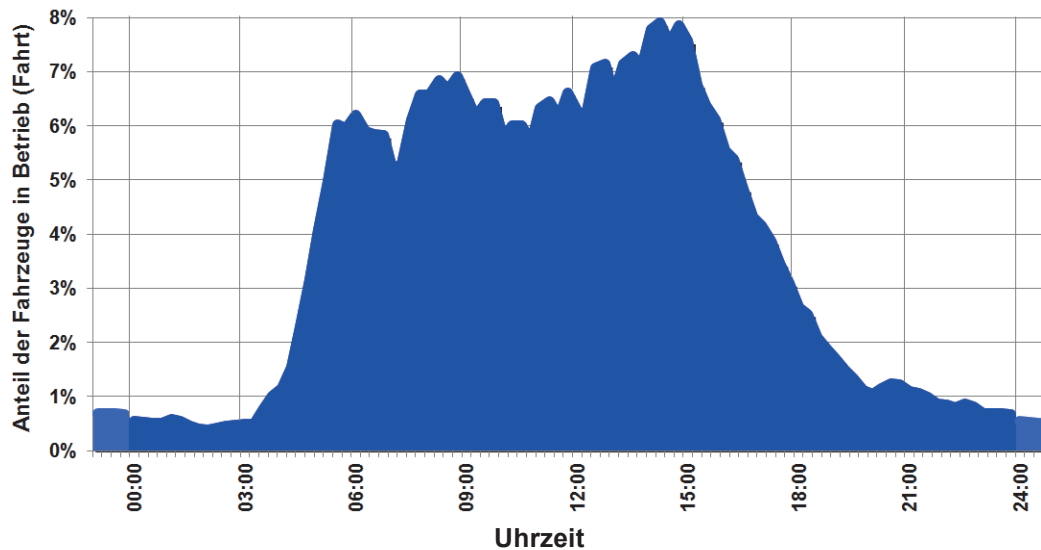


Abbildung 33 Tagesgänge der Fahrten mit Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse

N = 47.541 Fahrten. Viertelstundenintervalle; Anteile der durchschnittlich fahrenden Fahrzeuge im Beobachtungszeitraum.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Bei den leichten Nutzfahrzeugen werden die höchsten Einsatzanteile in den Morgenstunden zwischen 8:45 und 9:30 erreicht und gehen hinauf bis zu einem Anteil von 5,8 %. Auch ist die Zeitspanne der Einsatzzeiten bei den leichten Nutzfahrzeugen deutlich geringer und konzentriert sich stark auf den Bereich zwischen 5:00 und 18:00 Uhr. Nur wenige Fahrzeuge (maximal 0,5 %) sind noch später unterwegs, nach 21 Uhr fast gar keine mehr (höchstens 1 %, siehe Abbildung 34). Nimmt man bei den leichten Nutzfahrzeugen einen fast ausschließlich gewerblichen Einsatz an, passen die Tagesgänge zu den in diesem Bereich üblichen Einsatzzeiten.

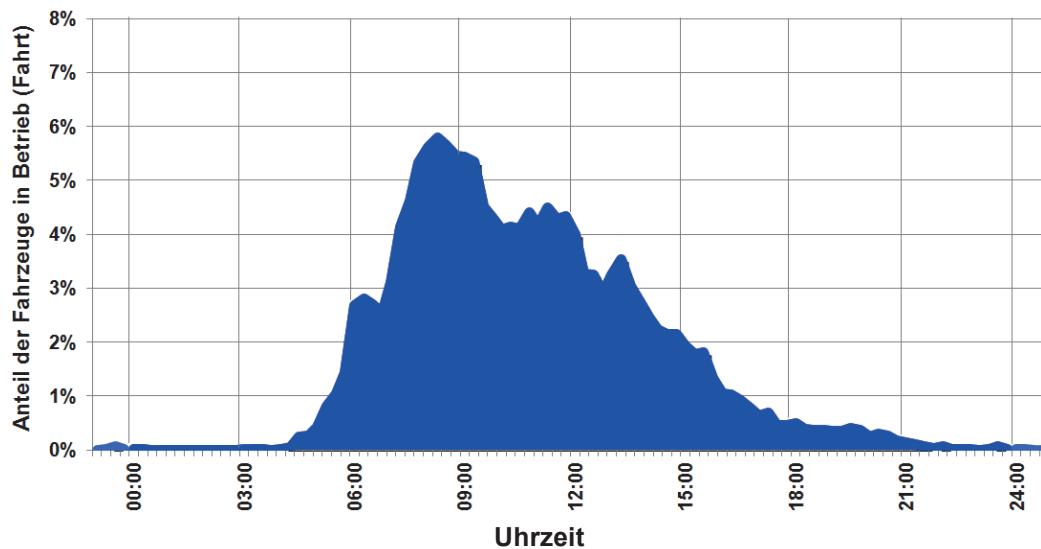


Abbildung 34 Tagesgänge der Fahrten mit leichten Nutzfahrzeugen (Utilities)

N = 7.854 Fahrten. Viertelstundenintervalle; Anteile der durchschnittlich fahrenden Fahrzeuge im Beobachtungszeitraum.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Geschwindigkeiten

Im Mittel über alle zurückgelegten Kilometer und alle dabei aufgewendete Fahrtzeit ergibt sich eine Durchschnittsgeschwindigkeit der untersuchten Elektrofahrzeuge von 26,3 km/h. Innerhalb der drei Vergleichsgruppen ist zu beobachten, dass die kleineren Fahrzeuge mit durchschnittlich 33,7 km/h deutlich schneller unterwegs sind und die leichten Nutzfahrzeuge mit einem Wert von 21,9 km/h deutlich langsamer. Fahrzeuge der Kompakt- und Mittelklasse liegen bei 23,8 km/h.

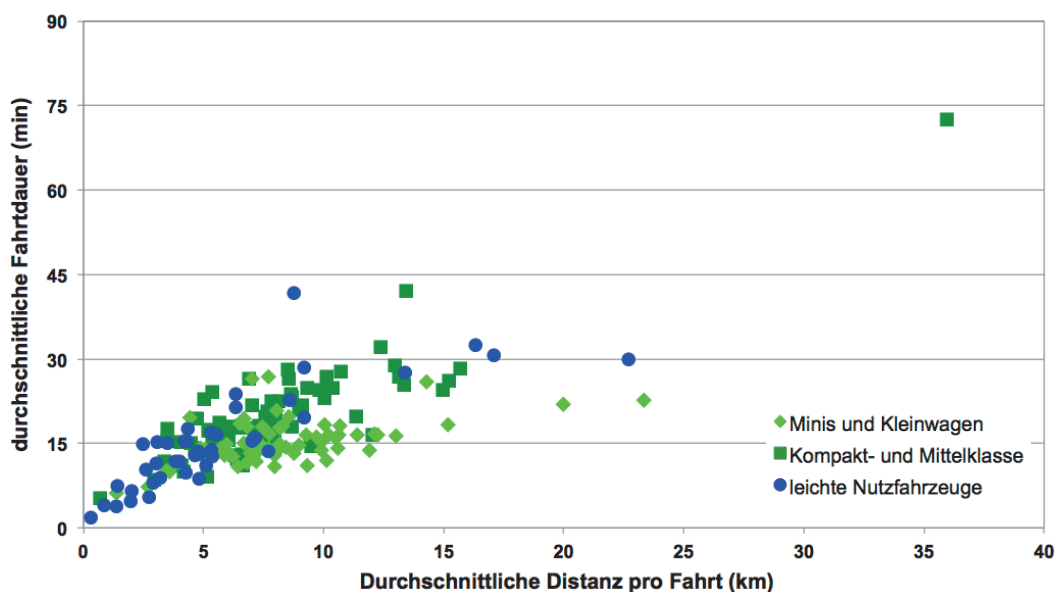


Abbildung 35 Durchschnittsgeschwindigkeiten der einzelnen Fahrzeuge

N = 17.182 / 25.660 / 7.745 Fahrten von 63 / 80 / 42 Fahrzeugen (Minis und Kleinwagen / Kompakt- und Mittelklasse / Utilities).

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Innerhalb der drei Gruppen streuen die einzelnen Fahrzeuge zwar, doch wie sich Abbildung 35 oben entnehmen lässt, bleiben die beschriebenen Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit und Fahrzeuggröße klar erkennbar.

Betrachtet man die Verteilung der Durchschnittsgeschwindigkeiten der einzelnen Fahrten in Abbildung 36, erkennt man einen S-förmigen Kurvenverlauf mit Wendepunkt nach etwa 50 bis 60 % der Fahrten. Die Hälfte aller Einzelfahrten liegt bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen knapp 16 und gut 34 km/h, jeweils ein Viertel darunter und ein Viertel darüber.

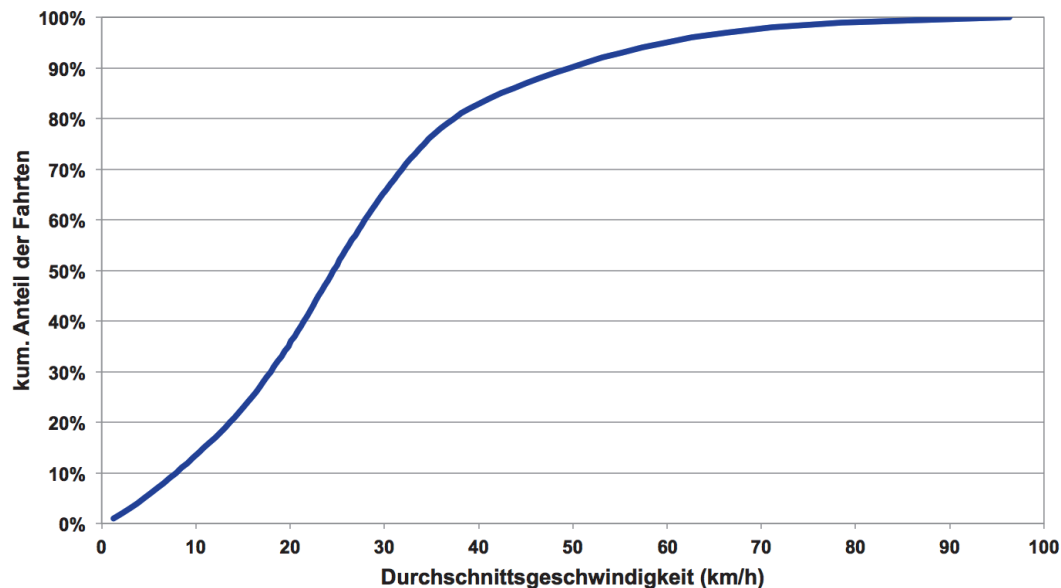


Abbildung 36 Durchschnittsgeschwindigkeiten aller Fahrten: Kumulierte Anteile
N = 50.587 Fahrten.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Bei Betrachtung der Verteilungen innerhalb der Vergleichsgruppen zeigt sich, insb. in Abbildung 37, dass nicht nur die Geschwindigkeits-Mittelwerte der kleineren Fahrzeuge tendenziell höher liegen, sondern dass auch die Einzelfahrten kleinerer Fahrzeuge schneller zurückgelegt werden. Ab einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 10 km/h liegen die Summenhäufigkeitskurven der drei Vergleichsgruppen mit klarem Abstand übereinander; oben die verhältnismäßig größeren und schwereren Utilities, darunter die Fahrzeuge der Kompakt- und Mittelklasse und darunter die Minis und Kleinwagen mit den zügigsten Fahrten.

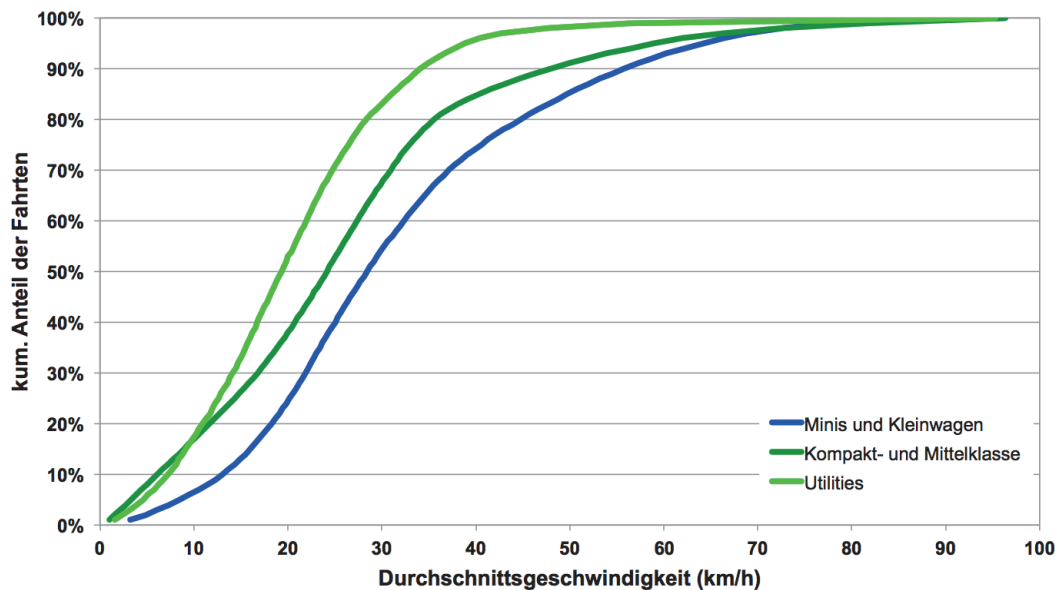


Abbildung 37 Durchschnittsgeschwindigkeiten der Fahrten innerhalb der Segmente: Kumulierte Anteile
 N = 17.182 / 25.660 / 7.745 Fahrten (Minis und Kleinwagen / Kompakt- und Mittelklasse / Utilities).

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Ladevorgänge²⁵ von Elektrofahrzeugen

Abgenommene Energiemenge

Insgesamt bewegen sich die Mengen der abgenommenen Energie in Relation zu den Ladekapazitäten der betrachteten Elektrofahrzeuge überwiegend im Bereich verhältnismäßig kleiner Größen. In der Praxis heißt das also, dass entweder häufig nicht vollgeladen wurde, oder, was wahrscheinlicher ist, nur wenig entleerte Akkus an die Ladevorrichtungen angeschlossen wurden. Die durchschnittlich pro Ladevorgang abgenommene Energiemenge beträgt 5,3 kWh und bei 63 % der einzelnen Ladevorgänge wird sogar weniger Energie abgenommen. Mit einer Größe von 5,8 kWh ist die Standardabweichung nicht unerheblich, was unter anderem auf einen sehr großen Anteil an Ladevorgängen, bei denen unter 1 kWh Energie abgenommen wird, zustande kommt (bei fast 29 % der Ladevorgänge). Unter 0,5 kWh liegen dabei gut 23 % aller Ladevorgänge.²⁶

²⁵ Zur Interpretation der Auswertungen der Ladevorgänge muss vorab angemerkt werden, dass „Ladevorgang“ in diesen Untersuchungen in der Regel über die Verbindung von Stecker und Fahrzeug definiert wird. Dies hat messtechnische Gründe und steht in Abgrenzung zum tatsächlichen „Laden“, bei dem Energie durch das Fahrzeug abgenommen wird. Somit wird als „Ladevorgang“ meist der gesamte Zeitraum bezeichnet, innerhalb dessen eine Verbindung zwischen Fahrzeug und Stromnetz vorhanden war, unabhängig davon, ob die Batterie vorher maßgeblich entleert war, ob nur „ein wenig nachgeladen“ wurde oder ob die Batterie sogar ganz voll war und gar kein Strom mehr floss. In Bezug auf mögliche Ableitungen hinsichtlich gesteuerten Ladens bedeutet dies u.a., dass die Energieflüsse innerhalb des gesamten hier berücksichtigten Ladevorgangs theoretisch weitestgehend flexibel gesteuert werden könnten. Weiterhin muss angemerkt werden, dass die eingesetzte Sensorik nur „Normalladungen“ erfasst und keine Schnellladungen mit Starkstrom oder induktives Laden.

²⁶ Betrachtet werden nur hier nur Ladevorgänge mit einer Energieabnahme > 0, Verbindungen mit dem Stromnetz vollkommen ohne Energieabnahme sind also schon ausgeschlossen.

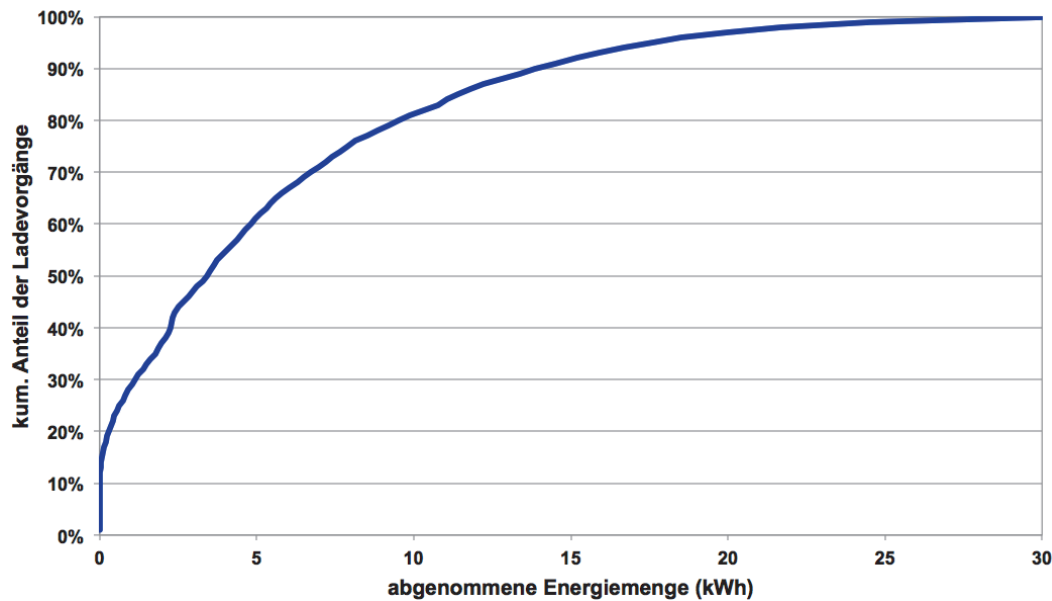


Abbildung 38 Abgenommene Energiemengen: Kumulierte Anteile an Ladevorgängen
N = 4.623 Ladevorgänge.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Knapp über 81 % der Ladevorgänge liegen im Bereich bis zu 10 kWh, im Bereich bis 15 kWh weitere 10 %. Ladevorgänge mit einer abgenommenen Energiemenge darüber hinaus machen gute 8 % aus.

Der segmentweisen Betrachtung muss der Hinweis vorweggenommen werden, dass an dieser Stelle nur Fahrzeuge der Klassen Minis und Kleinwagen und leichte Nutzfahrzeuge betrachtet werden können. Die Darstellung von Analyseergebnissen zu Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse muss aufgrund fehlender Angaben zu abgenommenen Energiemengen einzelner Datenquellen leider entfallen.²⁷

Der oben genannte Befund zahlreicher „kleiner“ Ladungen zeigt sich sowohl bei Minis und Kleinwagen, als auch bei leichten Nutzfahrzeugen und ist somit keine Besonderheit z.B. einzelner Modellreihen. Bei Minis und Kleinwagen liegen gute 30 % der abgenommenen Energiemengen unter 1 kWh, bei leichten Nutzfahrzeugen etwas mehr als 28 %. Unter 0,5 kWh liegen in beiden Gruppen 23 % der Ladevorgänge. Bezüglich der Mittelwerte gibt es klare Unterschiede; die Fahrzeuge der Klassen Minis und Kleinwagen nehmen durch ihre fahrzeugspezifisch auch kleineren Batterien mit durchschnittlich 4,5 kWh fast 2 kWh weniger Energie auf als die leichten Nutzfahrzeuge (6,1 kWh). Die Standardabweichungen variieren ebenfalls mit der Ladekapazität und durchschnittlichen Lademenge der Fahrzeuge und liegen bei Minis und Kleinwagen bei 4,8 und bei leichten Nutzfahrzeugen bei 6,8 kWh.

²⁷ Insb. wäre bei der Darstellung der wenigen vorhandenen Daten keine Anonymität bezogen auf die konkrete Modellreihe mehr gewährleistet.

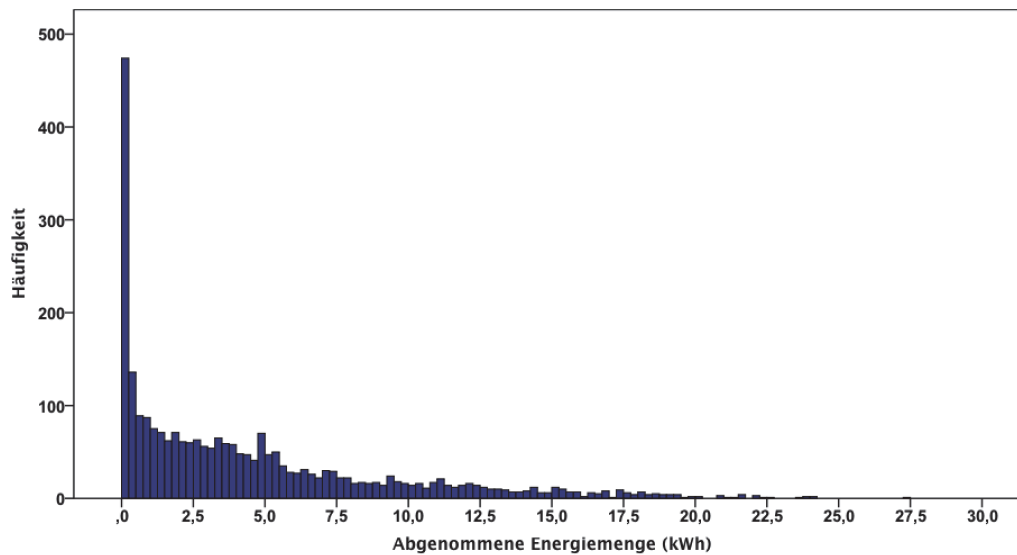


Abbildung 39 Abgenommene Energiemengen (Ladevorgänge): Minis und Kleinwagen
N = 2.620 Ladevorgänge.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

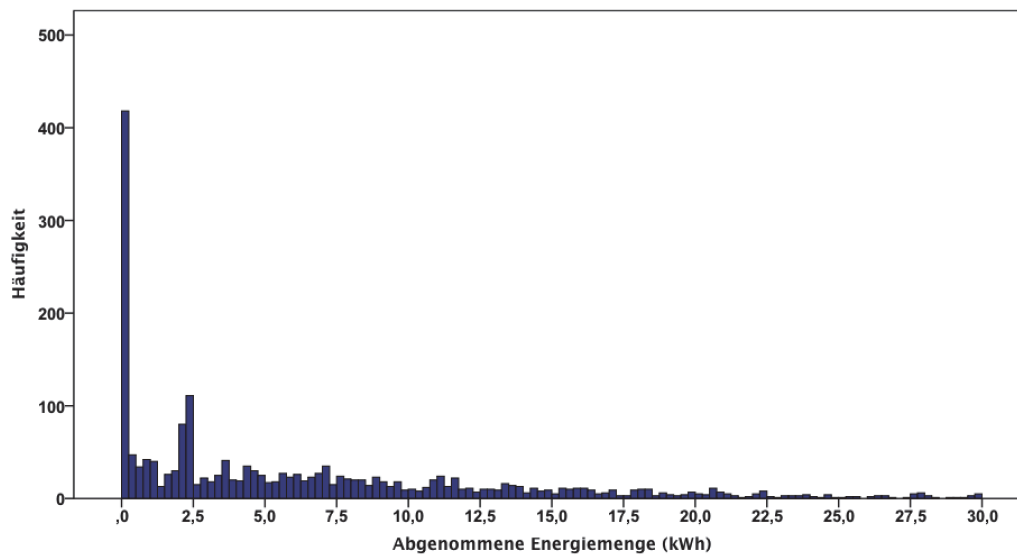


Abbildung 40 Abgenommene Energiemengen (Ladevorgänge): Utilities
N = 1.999 Ladevorgänge.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Die direkte Gegenüberstellung der Summenhäufigkeitskurven der zwei Vergleichsgruppen in Abbildung 41 zeigt die Zusammenhänge zwischen Fahrzeuggröße und abgenommener Energiemenge deutlich. Generell ist der Funktionsgraph der leichten Nutzfahrzeuge (Utilities) zwar am Anfang ungleichmäßiger und schneidet bzw. berührt die Kurve, ab ca. 40 % der Ladevorgänge stellen sich die leichten Nutzfahrzeuge jedoch als diejenigen mit überwiegend größeren abgenommenen Energiemengen heraus.

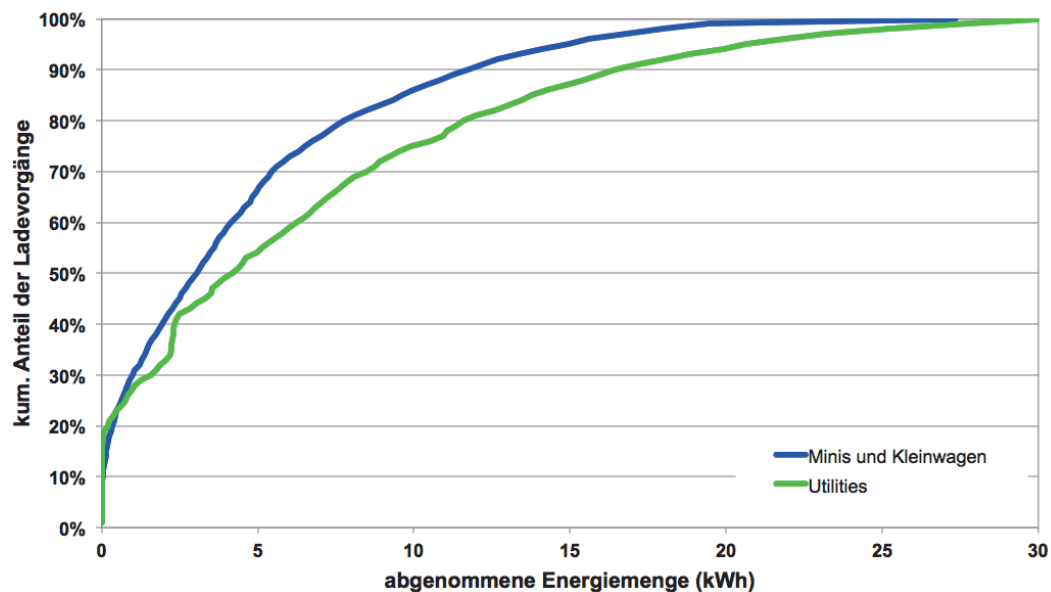


Abbildung 41 Abgenommene Energiemengen: Kumulierte Anteile an Ladevorgängen innerhalb der Segmente N = 2.620 / 1.999 Ladevorgänge (Minis und Kleinwagen / Utilities).

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Ladedauern

Abgenommene Energiemengen stehen in einem klaren Bezug zu Ladedauern; und wie aus den folgenden Abbildungen zu entnehmen ist, können die geringen abgenommenen Energiemengen auch für die vorliegenden Messdaten zumindest zum Teil mit kurzen Ladedauern in Verbindung gebracht werden. Über ein Viertel der Ladevorgänge dauern nicht mehr als eine Viertelstunde, gut 33 % sind kürzer als eine halbe Stunde. Der durchschnittliche Ladevorgang – sofern man das bei einer Standardabweichung von gut vier Stunden sagen kann – dauert 141 Minuten, also 2:21 Std. Es sind weitaus mehr Ladungen kürzer, nämlich über 68 % aller Ladungen. Vor allem gibt es aber einen nicht unerheblichen Anteil an Ladevorgängen, die deutlich über die potenziell zum Vollladen benötigte Zeit hinausgehen. Insgesamt 3 % der Ladevorgänge erstrecken sich über einen halben Tag, einige davon (unter 1 %) sogar über einen Tag.²⁸

Als maßgebliche Ladedauer kann, wie Abbildung 42 zeigt, der Bereich bis 6 Stunden (360 min) angesehen werden, in dem knapp 92 % der Ladevorgänge liegen.

²⁸ Im Rahmen der qualitätssichernden Maßnahmen wurden Ladevorgänge über 3 Tagen Dauer ausgeschlossen; das deckt zwar z.B. noch ein Wochenende an der Ladevorrichtung ab, soll aber eine unangemessene Verzerrung der Gesamtergebnisse verhindern.

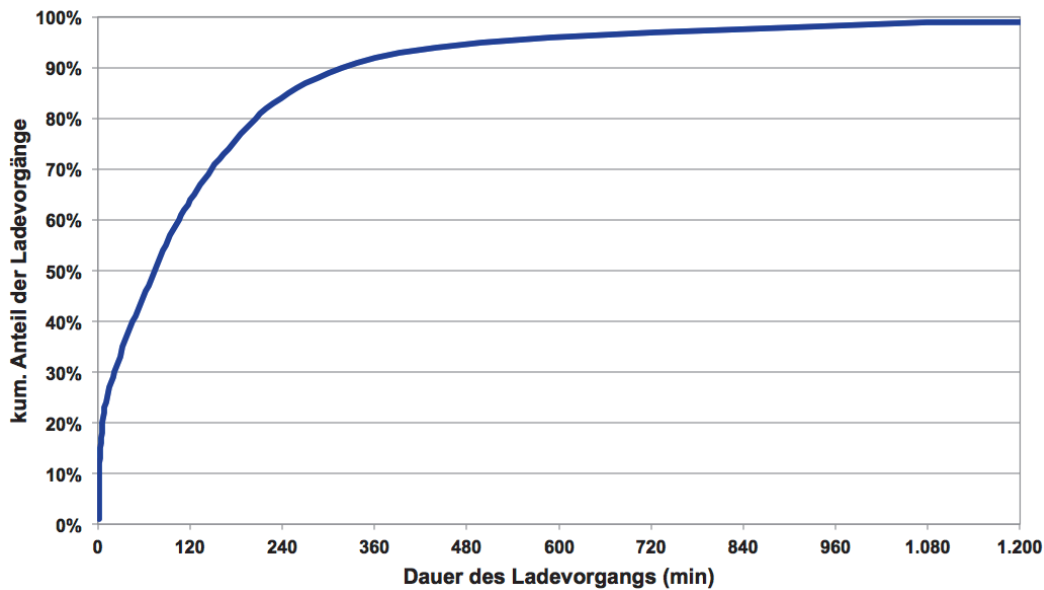


Abbildung 42 Ladedauern insgesamt: Kumulierte Anteile nach Dauer

N = 23.792 Ladevorgänge. Dargestellt werden nur Ladevorgänge bis zu einer Dauer von 1200 min./20 Std., weniger als 1 % der Fälle liegen im nicht abgebildeten Wertebereich.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Im Vergleich zwischen den Segmenten lässt sich herausstellen, dass es zwischen diesen Gruppen erhebliche Unterschiede in der Verteilung der Ladedauern gibt. Mit über 34 % haben die Minis und Kleinwagen den mit Abstand größten Anteil an Ladevorgänge unter 15 min. Bei den Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse liegt der Anteil für diesen Zeitraum bei 15 % und bei den leichten Nutzfahrzeugen sind nur gut 4 % der Ladevorgänge so kurz. Betrachtet man die Ladungen von bis zu unter einer halben Stunde, so liegen bei den Minis und Kleinwagen gute 40 % der Ladevorgänge in diesem Bereich, bei Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse knapp 24 % und bei den leichten Nutzfahrzeugen knapp 10 %. Bei letzteren muss allerdings angemerkt werden, dass die Mess- bzw. Dokumentations-schärfe eines Teils der Werte mit Viertelstundenschritten wenig genau ist²⁹ und sich ein Wert von ca. 20 % ergibt, wenn man Fahrten bis einschließlich 30 min. betrachtet. Auch dann ergibt sich jedoch ein klares Bild mit größeren Anteilen kürzerer Ladevorgänge bei den kleineren Fahrzeugen.

Die durchschnittlichen Ladezeiten innerhalb der drei Vergleichsgruppen liegen bei Minis und Kleinwagen bei 1:46 Std., bei Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse bei 3:11 Std. und bei leichten Nutzfahrzeugen bei 3:54 (Standardabweichung 3:11 Std., 4:53 Std. und 5:44 Std.). Minis und Kleinwagen laden also mit Abstand am kürzesten, im Mittel weniger als halb so lange wie leichte Nutzfahrzeuge.

²⁹ Siehe daher auch die treppenartige Steigung der Summenhäufigkeitskurve in Abbildung 43.

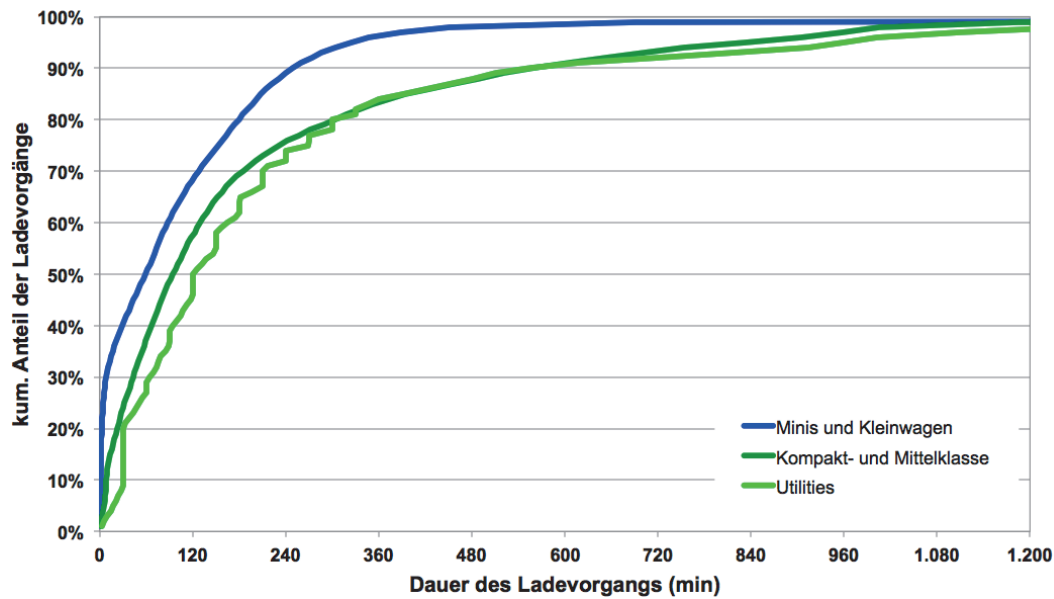


Abbildung 43 Ladedauern der Fahrten innerhalb der einzelnen Segmente: Kumulierte Anteile nach Dauer
 N = 15.633 / 6.160 / 1.999 Ladevorgänge (Minis und Kleinwagen / Kompakt- und Mittelklasse / Utilities). Dargestellt werden nur Ladevorgänge bis zu einer Dauer von 1200 min./20 Std., weniger als 1 % der Fälle liegen im nicht abgebildeten Wertebereich.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Diese Befunde spiegeln sich auch in der grafischen Veranschaulichung der Verteilungsfunktion in Abbildung 43 wieder. So lässt sich z.B. weiterhin erkennen, dass bei Minis und Kleinwagen knapp 90 % der Ladevorgänge im Bereich bis zu 4 Stunden liegen, wohingegen dieser Wert bei den restlichen betrachteten Fahrzeugklassen bei ca. 9:20 Std. liegt. Kompakt- und Mittelklasse und leichte Nutzfahrzeuge zeigen einen ähnlichen Kurvenverlauf, wenn man von den Ungleichmäßigkeiten bei den leichten Nutzfahrzeugen absieht. Tendenziell steigt der Funktionsgraph bei den Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse zu Anfang etwas schneller an, was einem größeren Anteil kleiner Aufladungen entspricht. Im weiteren Verlauf schneiden/berühren sich die Kurven allerdings mehrmals, was die höheren Anteile von Fahrten mit verhältnismäßig langen Strecken widerspiegelt.

Tagesgänge Laden

Die Tagesgänge der Ladevorgänge werden analog zu denen der Fahrten berechnet (vgl. S. 60).

Bezogen auf alle Fahrten lässt sich anhand Abbildung 44 erkennen, dass maximal 7,1 % aller Fahrzeuge innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls über ein Ladekabel mit dem Stromnetz verbunden waren. Entgegen dem Bild der Tagesgänge der Fahrten zeigt sich im Bezug auf das Ladeverhalten eine breitere Verteilung der Vorgänge innerhalb des kompletten Tagesverlaufs, was sicher auch auf die in der Regel längere (und zum Teil deutlich längere) Zeitdauer der Ladungen zurückzuführen ist.

Der Ladepeak liegt im Bereich von ca. mittags bis zum Nachmittag (grob zwischen 12:00 und 16:30 Uhr) und geht somit konform mit dem Solarpeak. Gezielte Ladevorgänge könnten also einen Beitrag zur Systemintegration von Solarenergie leisten. Es gibt einen Anteil von min-

destens 3,5 % Fahrzeugen, die sich, selbst in den Zeiten geringer Aufladequoten noch am Netz befinden. Im Kurvenverlauf ist ab ca. 6:00 Uhr morgens ein konstanter Anstieg bis ca. 13:00 Uhr zu beobachten, dann stabilisiert sich der Anteil der ladenden Fahrzeuge im Wesentlichen und fällt erst wieder gegen 17:00 Uhr langsam und gleichmäßig ab (bis zum erneuten Anstieg in den frühen Morgenstunden).

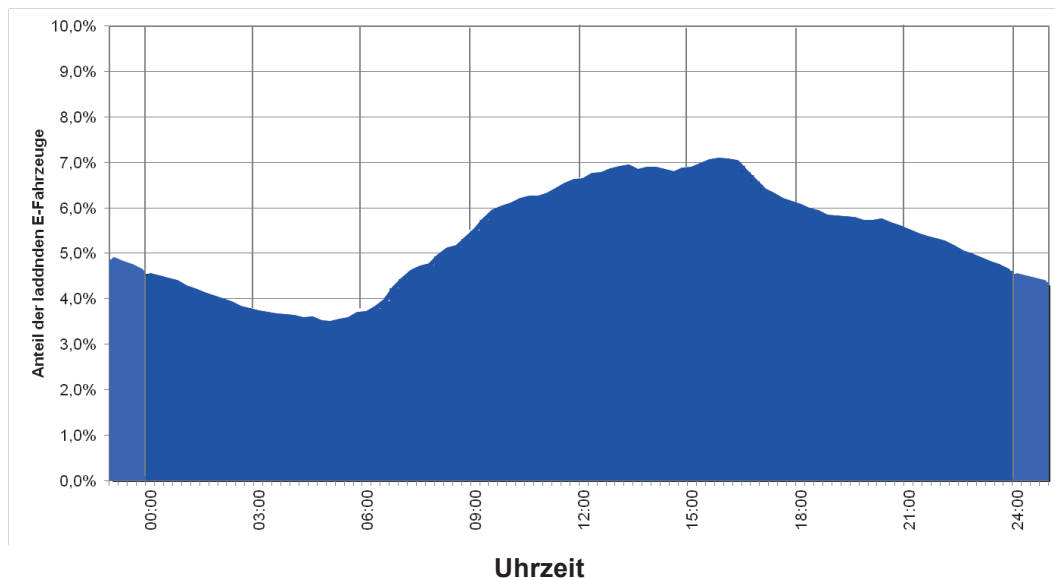


Abbildung 44 Verteilung der Ladevorgänge im Tagesverlauf

N = 23.792 Ladevorgänge. Viertelstundenintervalle; Anteile der durchschnittlich ladenden Fahrzeuge im gesamten Beobachtungszeitraum.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Betrachtet man die Tagesgänge der Ladevorgänge vergleichend in den drei Gruppen Minis und Kleinwagen, Kompakt- und Mittelklasse und leichte Nutzfahrzeuge, stellt sich heraus, dass das Ladeverhalten der drei Gruppen vollkommen anderen Mustern folgt. Beobachten lässt sich dies sowohl an unterschiedlichen Peaks als auch an den unterschiedlichen minimalen Anteilen von Fahrzeugen, die am Netz hängen (vgl. im Folgenden Abbildung 45 bis Abbildung 47).

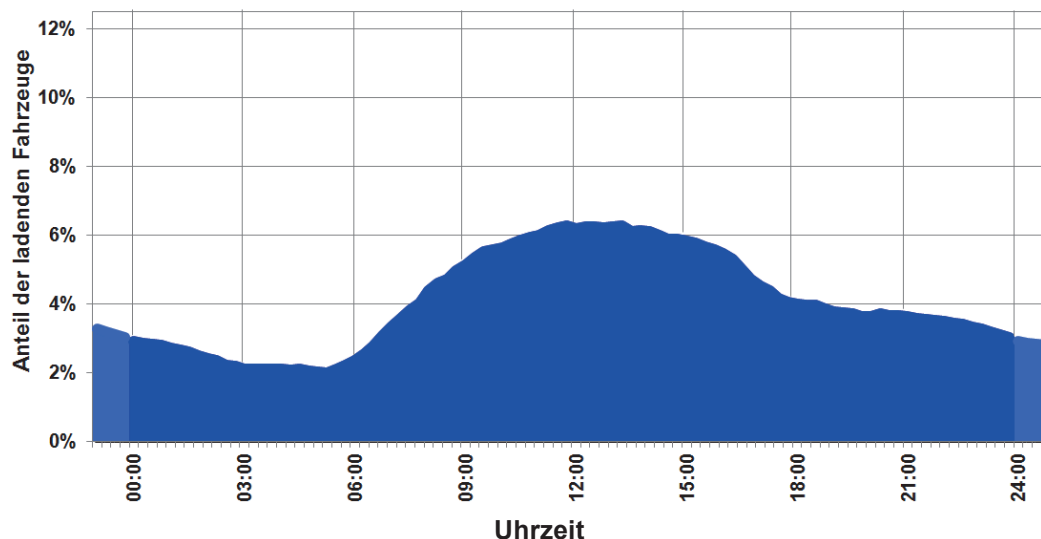


Abbildung 45 Verteilung der Ladevorgänge im Tagesverlauf: Minis und Kleinwagen

N = 15.633 Ladevorgänge. Viertelstundenintervalle; Anteile der durchschnittlich ladenden Fahrzeuge im gesamten Beobachtungszeitraum.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Innerhalb der Gruppe der Minis und Kleinwagen liegt dieser Anteil z.B. bei niedrigen 2 %, wohingegen er bei Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse nur auf 5,5 % sinkt. Die leichten Nutzfahrzeuge liegen bei 4,5 %. Auch haben alle drei Fahrzeugsegmente unterschiedliche Kurvenverläufe. In der Gruppe der Minis und Kleinwagen ist die stärkste Steigung in der Zeit zwischen 6:00 Uhr bis 10:00 Uhr zu beobachten, auf eine leichte weitere Steigung folgt dann ein breiter Peak mit Maximum bei ca. 6,3 % Ladequote um ca. 12:00 bis 13:30 Uhr. Darauf ein in etwa so starker Abfall wie die morgendliche Steigung bis ca. 17:30 Uhr, dann ein kontinuierliches langsames Absinken bis zum nächsten Morgen.

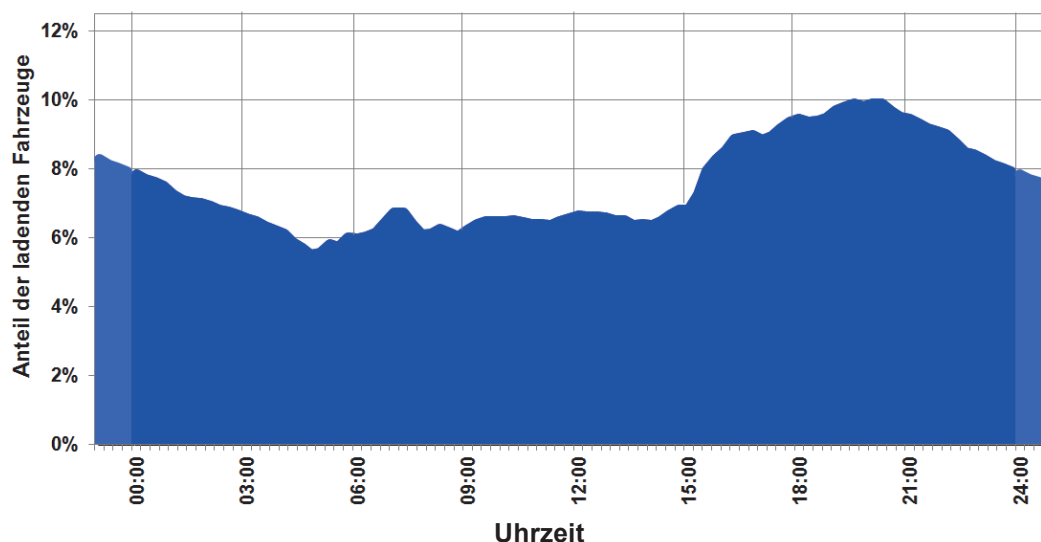


Abbildung 46 Verteilung der Ladevorgänge im Tagesverlauf: Kompakt- und Mittelklasse

N = 6.160 Ladevorgänge. Viertelstundenintervalle; Anteile der durchschnittlich ladenden Fahrzeuge im gesamten Beobachtungszeitraum.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Die Verteilung der Ladevorgängen bei Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse hingegen ist deutlich anders, mit niedrigsten Anteilen ladender Fahrzeuge zwischen 4:30 Uhr bis ca. 14:30 Uhr. Erst ab ca. 15:00 Uhr folgt ein stärkerer Anstieg und das Maximum von bis zu 10 % Anteil ladender Kompakt- und Mittelklassewagen wird im Zeitraum zwischen 19:00 Uhr und 20:30 Uhr erreicht.

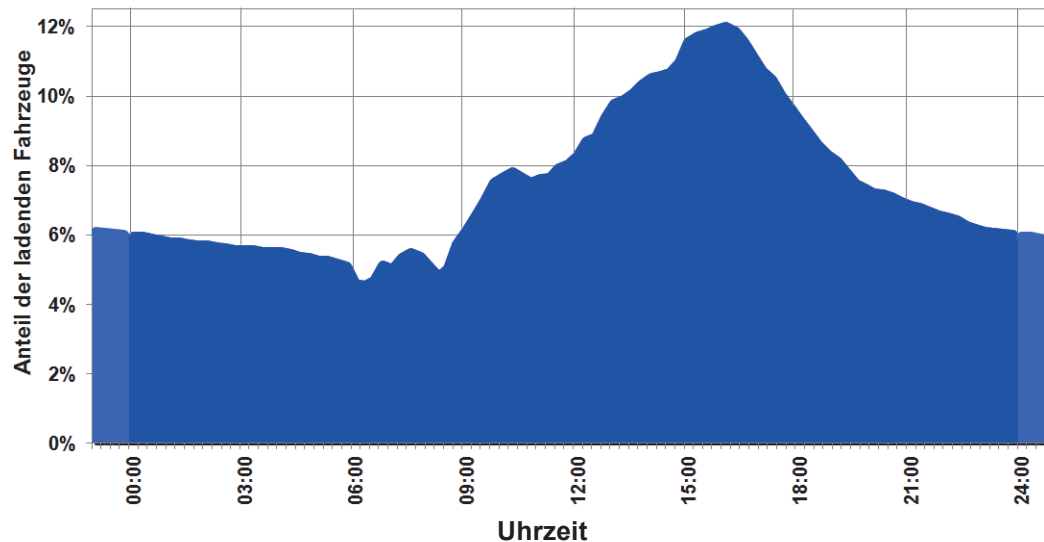


Abbildung 47 Verteilung der Ladevorgänge im Tagesverlauf: Utilities

N = 1.999 Ladevorgänge. Viertelstundenintervalle; Anteile der durchschnittlich ladenden Fahrzeuge im gesamten Beobachtungszeitraum.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Noch einmal anders gestaltet sich das durchschnittliche Muster bei den leichten Nutzfahrzeugen, deren Ladepeak am Nachmittag bei ca. 16:00 Uhr liegt. Zu diesem Zeitpunkt sind gut 12 % der leichten Nutzfahrzeuge am Netz. Abgesehen von einigen kleineren Schwankungen gibt es von ca. 6:30 Uhr an eine kontinuierliche Zunahme der ladenden/mit dem Netz verbundenen Fahrzeuge bis zum Peak, dann einen ebenso steilen Abfall bis ca. 20:00 Uhr und im Anschluss daran ein kontinuierliches langsames Abflauen bis zum nächsten Morgen.

Die unterschiedlichen Lade- und auch Fahrtmuster sind beträchtlich und veranschaulichen sehr gut, dass es von den Einsatzbedingungen der unterschiedlichen Fahrzeuge und Segmente in diesen Fahrzeugen abhängt, wie sich der Praxiseinsatz der Fahrzeuge gestaltet.

Spezifische Energieabnahme (nach Ladedauer)

Je nach technischer Ausstattung sind die Ladegeschwindigkeiten der betrachteten Elektrofahrzeuge unterschiedlich. Das Gebiet der Batterietechnologie ist momentan und auf absehbare Zeit ein zentraler Aspekt der Fortentwicklung von Elektrofahrzeugen.

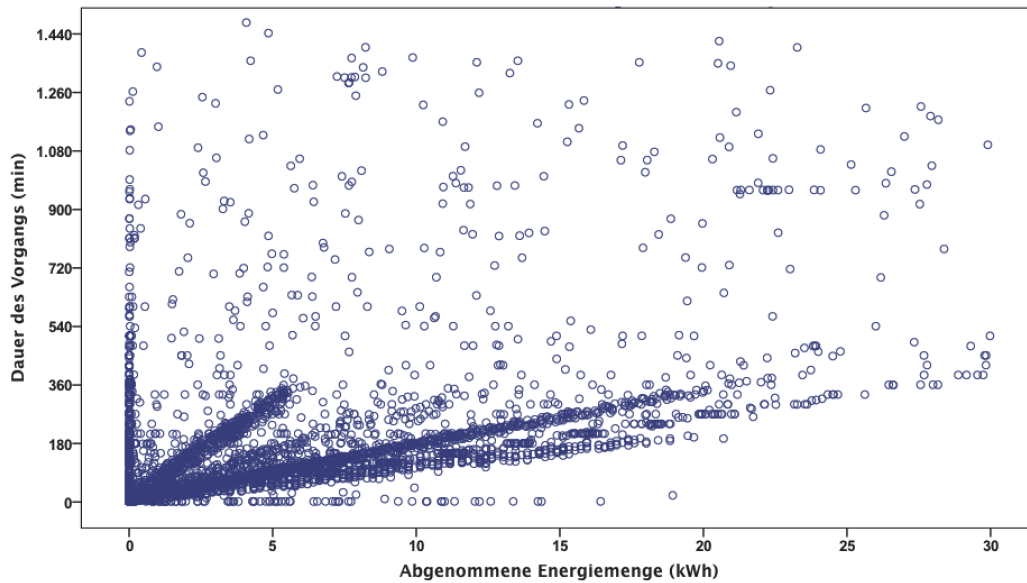


Abbildung 48 Ladedauern und abgenommene Energiemengen: alle Fahrzeuge

N = 4.623 Ladevorgänge. Einige der Ladevorgänge liegen im nicht dargestellten Wertebereich, weniger als 1 % der Vorgänge (mit entsprechenden Daten) werden daher nicht abgebildet.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

Das Streudiagramm aller Ladevorgänge zeigt einige klare Trendlinien und darüber hinaus ein breit gestreutes Feld von Ladungen mit geringerer spezifischer Energieabnahme (als den Trendlinien entsprechend). Links kann man parallel zur Y-Achse diejenigen Ladevorgänge sehr unterschiedlicher Dauer identifizieren, bei denen kaum/keine Energie von den Fahrzeugen abgenommen wurde. In diesen Fällen kann davon ausgegangen werden, dass Fahrzeuge mit (beinahe) voller Ladekapazität mit dem Netz verbunden worden sind.³⁰

³⁰ Die einzelnen Punkte parallel der X-Achse sind hingegen vermutlich auf Fahlmessungen zurück zu führen.

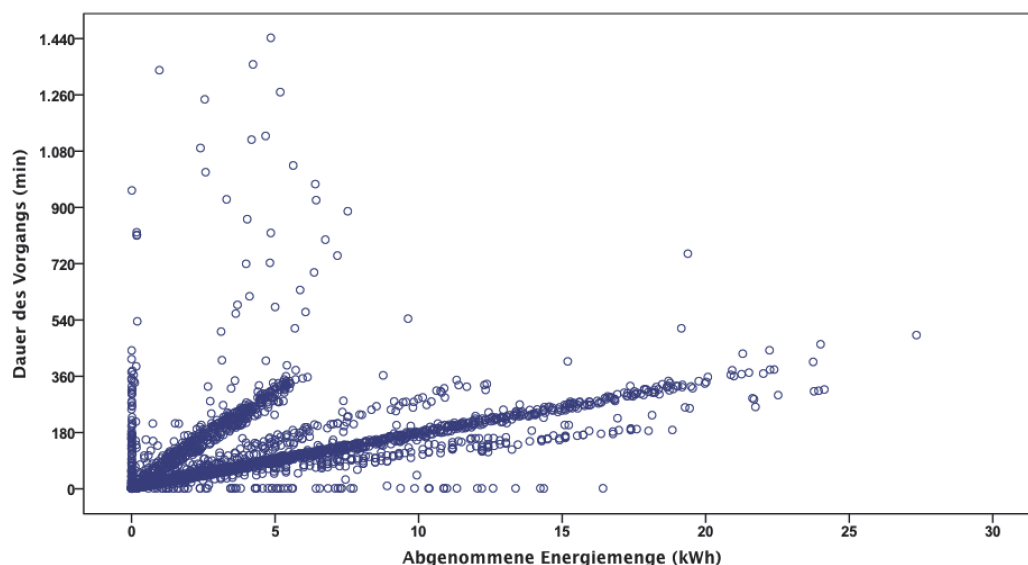


Abbildung 49 Ladedauern und abgenommene Energiemengen: Minis und Kleinwagen

N = 2.620 Ladevorgänge. Einige der Ladevorgänge liegen im nicht dargestellten Wertebereich, weniger als 1 % der Vorgänge (mit entsprechenden Daten) werden daher nicht abgebildet.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

In der Gruppe der Minis und Kleinwagen (vgl. Abbildung 49) kann man im Bereich von bis zu 6 Stunden eine starke Ansammlung von Ladevorgängen erkennen, die im Wesentlichen einer Ladegeschwindigkeit von 1 kWh pro Stunde entsprechen. Diese ist spezifisch für das Segment und findet sich bei den leichten Nutzfahrzeugen nicht.³¹ Eine weitere, gut sichtbare Trendlinie zeichnet sich mit Ladungen bis zu knapp 20 kWh bei einer Ladegeschwindigkeit von 3 bis 3,5 kWh pro Stunde ab. Weiterhin erkennbar sind bei den Minis und Kleinwagen schwache Trendlinien bei spezifischen Ladegeschwindigkeiten von 2 kWh pro Stunde und von ca. 5,5 kWh pro Stunde.

Innerhalb der leichten Nutzfahrzeuge ist eine weitaus deutlichere Streuung der spezifischen Energieabnahmen zu beobachten als bei den Minis und Kleinwagen. Deutlich erkennbar ist vor allem eine breite Trendlinie im unteren Bereich des Diagramms, die bei einer Ladegeschwindigkeit von ca. 4 bis 6 kWh liegt und unter Umständen auch von zwei leicht unterschiedlichen, jedoch ebenfalls hohen, Ladegeschwindigkeiten gebildet sein könnte.

³¹ Wie auch schon bei der Analyse der Energieabnahmen, findet auch hier aufgrund der Datenlage keine separate Darstellung und kein Vergleich mit Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse statt. Vergleiche dazu auch die vorhergehende Fußnote 27.

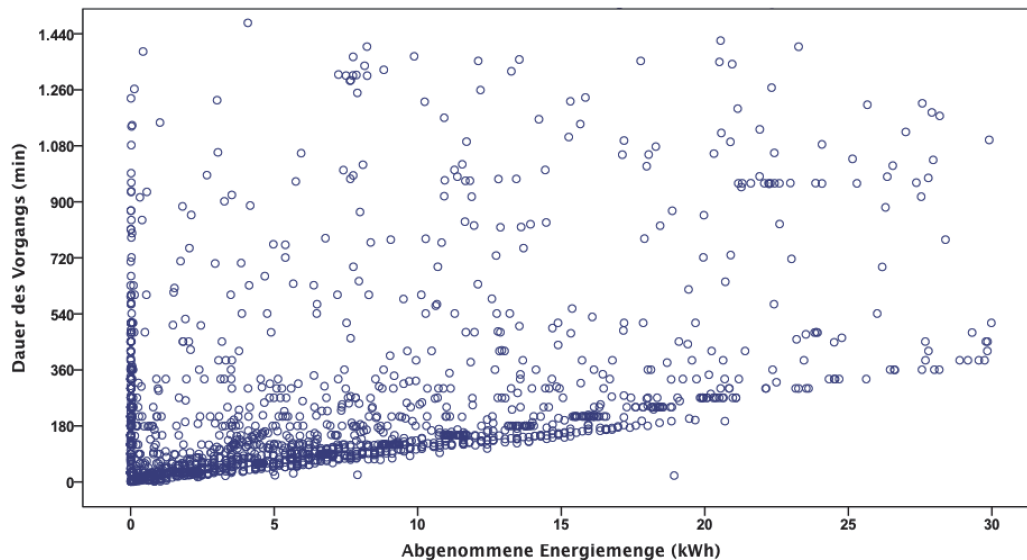


Abbildung 50 Ladedauern und abgenommene Energiemengen: Utilities

N = 1.999 Ladevorgänge. Einige der Ladevorgänge liegen im nicht dargestellten Wertebereich, weniger als 1% der Vorgänge (mit entsprechenden Daten) werden daher nicht abgebildet.

Quelle: Daten aus den Modellregionen, Auswertung und Darstellung Wuppertal Institut.

4.2 Verkehrssystemare Betrachtungen

Elektrofahrzeuge unterscheiden sich unter anderem durch ihre Ausstattungsmerkmale und die Reichweiten von konventionellen Fahrzeugen. Naturgemäß ergeben sich dadurch in der praktischen Nutzung Anwendungsvor- und -nachteile und verbunden damit unterschiedliche Nutzungsmuster. Dies ist sowohl für den privaten Einsatz von Elektrofahrzeugen als auch für den betrieblichen Einsatz der Fahrzeuge im Rahmen von Fahrzeugflotten relevant. Elektrofahrzeuge werden in ihrem derzeitigen und vor allem in ihrem perspektivischen Einsatz nicht einfach nur konventionelle Fahrzeuge ersetzen, sondern sind geeignet, das gesamte Mobilitätssystem zu verändern. In wieweit dies geschehen wird, hängt insbesondere mit der damit zusammenhängenden Infrastruktur und der Entwicklung spezifischer Mobilitätsdienstleistungen zusammen. Auf Seiten der Infrastruktur ist die Ausstattung mit Lademöglichkeiten ein zentraler Punkt, der die Einsatzbereiche von Elektroautos betrifft. Mobilitätsdienstleistungen wie Car-Sharing oder Mobilitätsberatungen können einen verstärkten Einsatz von Elektrofahrzeugen (auch Zweirädern) in Verbindung mit öffentlichen Verkehrsmitteln (Inter- und Multimodalität) fördern. Sie sind somit wichtige Faktoren für die aus Umweltsicht zentralen Aspekte Verkehrsvermeidung und Verkehrsverlagerung.

In wieweit durch Elektromobilität systemische Veränderungen erzielt werden und welche Umwelteffekte daraus resultieren, ist eine komplexe Frage, zu deren Beantwortung zum Zeitpunkt der Berichtslegung nur Richtungen vorgegeben werden können. Veränderungen eines Gesamtsystems sind von zahlreichen verschiedenen Faktoren abhängig, die in ihrem Wechselspiel miteinander zu Veränderungen führen. Für den Bereich der Elektromobilität steht dieser Prozess erst am Anfang, was allein schon durch die bisher geringe Anzahl der Elektrofahrzeuge im gesamten Verkehrssystem und durch die relativ neue Beschäftigung auch auf Dienstleistungsseite mit Elektrofahrzeugen bedingt ist.

Nichtsdestotrotz können anhand der Ergebnisse aus den Modellversuchen im Rahmen des Förderprogramms „Modellregionen Elektromobilität“ erste Hinweise zu diesem Themenkomplex gegeben werden.

4.2.1 Veränderungen privater Mobilitätsmuster durch Elektrofahrzeuge

Im Mittelpunkt der Frage nach Umweltwirkungen durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen im privaten Bereich sollen hier Personen stehen, die Elektrofahrzeuge im Rahmen der Modellversuche erstmals über einen gewissen Zeitraum privat nutzen.³²

Im Rahmen des Förderprogramms „Modellregionen Elektromobilität“ kamen aufgrund der Fokussierung auf gewerbliche Anwendungen überhaupt nur sehr wenige in Betracht, in denen Privatpersonen Elektrofahrzeuge über einen längeren Zeitraum (mind. 1 Monat) zur Verfügung hatten. Ein solcher Zeitraum ist nötig, da sich nach Veränderungen der Fahrzeugausstattung eines Haushalts stabile Veränderungen der Mobilitätsmuster erst nach einer gewissen Zeit einstellen, und nur so Möglichkeiten für Modifikationen im Mobilitätsverhalten untersucht werden können, das über reine „Probier-Effekte“ von interessierten Erstnutzern hinausgehen.

Insgesamt wurden innerhalb der Modellregionen vier relevante Vorhaben ermittelt: das Projekt „Drive eCharged“, das Projekt „E-mobil“ NRW, ein von EnBW in Stuttgart mit E-Scootern durchgeführtes Projekt sowie das Projekt „e-flott“. Im Rahmen der Umweltbegleitforschung konnten hierzu allerdings zum Teil nur wenige Befunde der Projekte aufgenommen werden.³³

Im Folgenden werden ausschnitthafte Ergebnisse der beiden Projekte „Drive eCharged“ und „E-mobil NRW“ dargestellt.

Das Projekt „Drive eCharged“

Methodisches Vorgehen und Datengrundlagen

Im Modellprojekt „Drive eCharged“ von BMW wurden für den Zeitraum September 2010 bis Juni 2011 in München 26 Probenutzer mit Elektrofahrzeugen vom Typ Mini E ausgestattet. Die Probenutzer wurden zu drei Zeitpunkten befragt. Außerdem wurde für drei Nutzungsphasen das Mobilitätsverhalten (Wegetagebuch) und das Ladeverhalten (Ladetagebuch) erhoben.

³² Verändert sich die Fahrzeugausstattung eines Haushalts, kann dies jedoch auch Auswirkungen auf die alltäglichen Mobilitätsmuster aller Haushaltsmitglieder haben. Verändern können sich beispielsweise die Nutzungsarrangements (Wer nutzt welches Fahrzeug aus der Fahrzeugflotte des Haushalts zu welchen Zeiten und in welchem Umfang?) oder der Modal Split, d.h. die auf verschiedene Verkehrsmittel entfallenden Fahrten und Fahrleistungen, sowie die daraus resultierenden ökologischen Effekte. Um solche Auswirkungen untersuchen zu können, würde ein spezifisches Untersuchungsdesign benötigt, was deutlich über den Rahmen der Demonstrationsprojekte in den Modellregionen hinausgehen würde. In dem vorliegenden Textabschnitt liegt der Fokus daher auf der Untersuchung der Probenutzer von Elektrofahrzeugen selber, nicht auf deren Haushaltskonstellationen.

³³ Nicht berücksichtigt ist das Projekt von EnBW, da die vorliegenden Materialien keine Informationen über die Veränderung der Mobilitätsmuster enthalten. Aufgrund des verzögerten Projektstarts ebenfalls nicht berücksichtigt werden konnte der Modellversuch e-flott von Audi. Umfangreiche Forschungsergebnisse standen nur aus dem Projekt E-mobil NRW zur Verfügung.

Zur Nutzung der Fahrzeuge im Alltag und zur Veränderung der Mobilitätsmuster liegen nur wenige Ergebnisse vor, die auf zusammenfassenden Selbsteinschätzungen der Probenutzer basieren. Daher werden ergänzend Ergebnisse aus den von BMW in Deutschland (Berlin), Großbritannien und den USA mit dem Mini E und konventionellen Vergleichsfahrzeugen durchgeführten Feldversuchen herangezogen. Die zugrunde liegenden Daten wurden mit Datenloggern erhoben.

Ergebnisse

Im Münchner Modellversuch Drive eCharged (vgl. BMW Group o.J.a) haben 89 % der Nutzer die Reichweite des Mini E als ausreichend für die Alltagsmobilität bewertet, aber 44 % trotzdem die begrenzte Reichweite als grundsätzliche Einschränkung empfunden. Für 66 % war die eigene Flexibilität mit dem Mini E genauso hoch wie mit einem konventionellen Pkw, und nur 20 % der Nutzer berichten von einer signifikanten Veränderung ihres Mobilitätsverhaltens.

Bei den Feldversuchen von BMW (vgl. BMW Group o.J.b) wurden die Fahr- und Ladeprofile der Nutzer des Mini E untersucht. Die Fahrprofile (tägliches Verkehrsverhalten) der Mini-E-Nutzer wurden außerdem in einem Querschnittsvergleich den Fahrprofilen der Nutzer ähnlicher konventioneller Fahrzeuge innerhalb des Kleinwagensegments (Mini Cooper, BMW 116i) sowie den Fahrprofilen der Nutzer eines konventionellen Fahrzeugs aus der oberen Mittelklasse (BMW 530d) gegenübergestellt. Der wichtigste Befund für die vorliegende Fragestellung ist, dass innerhalb eines Segments große Ähnlichkeiten zwischen den Fahrprofilen der Nutzer konventioneller und elektrisch angetriebener Fahrzeuge bestehen, während sich bei einem Vergleich verschiedener Segmente deutliche Unterschiede zeigen. Daraus wird von BMW die Schlussfolgerung abgeleitet, dass in der täglichen Alltagsmobilität die Nutzung eines Elektrofahrzeugs vom Typ Mini E nicht limitierend wirkt, der Mini E also ähnlich alltagstauglich ist wie vergleichbare konventionelle Fahrzeuge.

Das Projekt „E-mobil NRW“

Methodisches Vorgehen und Datengrundlagen

Im Modellprojekt „E-mobil NRW“ wurden u.a. von den beteiligten Stadtwerken Elektro-Pkw und Elektro-Roller kostenlos an private Probenutzer verliehen. Zu unterscheiden sind dabei Kurzzeitnutzer (Nutzungszeitraum von einer Woche) und Langzeitnutzer (Nutzungszeitraum von einem Monat). Im Rahmen der Begleitforschung wurden die Probenutzer vor und nach der Probenutzung befragt (Erhebungszeitraum November 2010 bis August 2011). Bei den Langzeitnutzern wurden zusätzlich mit Hilfe von Mobilitätstagebüchern für die jeweils letzte Woche der Nutzungsphase die Mobilitätsmuster erhoben. Bei Fahrten mit dem Elektrofahrzeug wurden die Probenutzer gefragt, ob sie die jeweilige Fahrt auch ohne das Vorhandensein des Elektrofahrzeugs durchgeführt und welche Verkehrsmittel sie in diesem Fall genutzt hätten. Damit ist es möglich, die Mobilitätsmuster mit und ohne Verfügbarkeit eines Elektrofahrzeugs zu vergleichen.

Insgesamt liegen von 11 Roller- und 2 Pkw-Langzeitnutzern Mobilitätstagebücher vor. Im Folgenden werden die im Rahmen der Umweltbegleitforschung relevanten Auswertungsergebnisse für die Roller-Langzeitnutzer skizziert.³⁴

Ergebnisse

Die mit Elektrorollern zurückgelegten Wege machen bei den untersuchten Roller-Langzeitnutzern rund 60 % der Wege und (aufgrund der Kürze der Fahrtstrecken) rund 30 % der erbrachten Fahrleistungen aus, d.h. bei 40 % der Wege wurden andere Verkehrsmittel genutzt, auf die rund 70 % der Fahrleistungen entfallen.

Bei fast allen Fahrten, die mit den Elektro-Rollern unternommen wurden, wären (hätten die Roller nicht zur Verfügung gestanden) andere Verkehrsmittel genutzt worden (vgl. Abbildung 51). In diesen Fällen wurden Wege mit anderen Verkehrsmitteln substituiert. Nur ein sehr kleiner Teil der Wege mit Elektro-Rollern wurde unternommen, weil die Befragten die Elektro-Roller zur Verfügung hatten (induziert). Ähnlich verhalten sich die substituierten und induzierten Fahrleistungen zueinander.

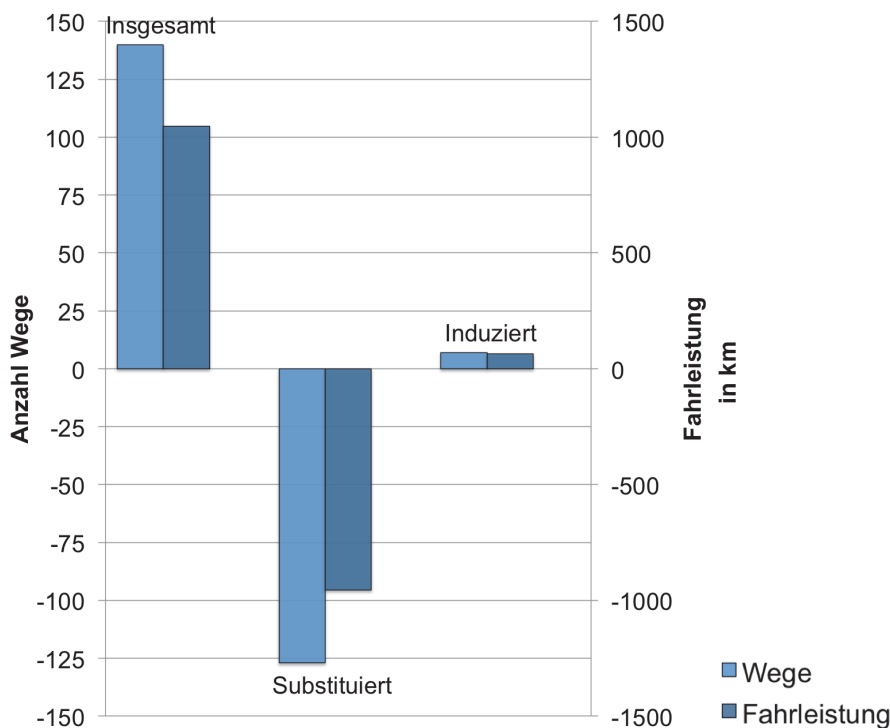


Abbildung 51 Verteilung substituerter und induzierter Wege bei den Roller-Langzeitnutzern
N = 140 Wege mit insg 1.047 Kilometern Fahrleistung

Quelle: Daten Projekt E-mobil NRW; Erhebungen und Auswertungen Wuppertal Institut.

Für die Beantwortung der Frage, ob bzw. inwieweit durch die substituierten Fahrleistungen CO₂-Emissionen reduziert werden konnten, ist entscheidend, welche Verkehrsmittel an

³⁴ Aufgrund der ohnehin schon geringen empirischen Basis Personen, die ein Elektrofahrzeuge in privaten Einsatz mindestens einen Monat lang testen konnten, wurde die ursprünglich geplante Beschränkung auf Pkw-Fahrer fallen gelassen. In die Untersuchungen der Umweltbegleitforschung werden demnach auch Fahrer von Elektroroller aufgenommen.

Stelle der Elektro-Roller genutzt worden wären. Unter der vereinfachenden Annahme, dass bei der Nutzung des ÖPNV oder eines Mofas oder Mopeds ähnlich viel CO₂ emittiert wird wie bei der Nutzung eines Elektro-Rollers, ergibt sich ein positiver Gesamteffekt, da für rund 70 % der Fahrleistungen sonst ein Pkw oder Motorrad (positiver Effekt) genutzt und 20 % der Weg-strecken zu Fuß (negativer Effekt) zurückgelegt worden wären. Dieser Befund weist darauf hin, dass der Einsatz von Elektrorollern ein erhebliches Substitutionspotenzial beinhaltet.

4.2.2 Einsatz von Elektrofahrzeugen bei Flottenbetreibern

Die Einsatzmuster gewerblich genutzter Fahrzeuge im Flottenbetrieb hängen stark vom Einsatzzweck ab. Hier können deutliche Unterschiede angenommen werden, z.B. in Abhängigkeit davon, ob die Fahrzeuge für Dienstfahrten (Hin- und Rückwege zum Ort der Erledigung eines Dienstgeschäfts) oder zum Transport von Gegenständen (eventuell sogar im Lieferverkehr) genutzt werden. Es kann allerdings angenommen werden, dass sich die Anforderungen an die Fahrzeuge innerhalb der Flotten bestimmter Betreiber weniger unterscheiden, also bestimmte Einsatzprofile bei bestimmten Flottenbetreibern überwiegen.

Die Einsatz- und Substitutionspotenziale von Elektrofahrzeugen hängen demnach auch im Flottenbetrieb stark von den jeweiligen Mobilitäts- bzw. Transporterfordernissen ab und können nicht pauschal abgeleitet werden.

Im Rahmen der Einzelprojekte in den Modellregionen Elektromobilität wurde ein Großteil der eingesetzten Elektro-Pkw betrieblich genutzt, die leichten Nutzfahrzeuge fast ausschließlich.³⁵ In großen Teilen der regulären Flotteneinsätze (Ausnahme Lieferverkehr) sind generell nur näherungsweise Schätzungen der Substitutionspotenziale durch die Flottenverantwortlichen von Elektroautos möglich (z.B. Fuhrparkleiter oder Leiter der jeweiligen Organisationseinheiten). Grund hierfür ist der zum Teil sehr flexible und kurzfristige Einsatz der Flottenfahrzeuge gemäß aktueller Bedarfe. Fahrtenbücher werden, wenn überhaupt, oft nur handschriftlich und z.T. rudimentär geführt, was eine detaillierte Übersicht über die Fahrprofile konventionell angetriebener Flottenfahrzeuge erschwert. In wieweit im konkreten Einsatz von Elektrofahrzeugen Einschränkungen durch geringere Reichweiten und lange Ladedauern zum Tragen kommen oder sogar den Einsatz verhindern, kann unter diesen Voraussetzungen nur schwer systematisch abgeleitet werden.

Wesentliche Einsatzpotenziale von Elektrofahrzeugen in Flotten können im Bereich des Lieferverkehrs gesehen werden. Die gute Vorhersehbarkeit der Streckenumfänge und die gute Planbarkeit der meist relativ kurzen Routen lässt hier einen gezielten Einsatz von Elektrofahrzeugen möglich erscheinen. Hier könnten zusätzlich Lärmreduktionspotenziale gegenüber konventionell betriebenen Fahrzeugen genutzt werden. Eine Einschränkung im Bereich des Lieferverkehrs besteht bei Elektrofahrzeugen allerdings darin, dass sich die zulässige Beladung der Fahrzeuge durch den Einsatz relativ schwerer Batterien deutlich verringert. Elektrofahrzeuge können konventionelle nur dann substituieren, wenn dadurch der „reguläre“ Streckenverlauf und das nötige Ladevolumen (und -gewicht) nicht beeinträchtigt werden.

³⁵ Ausnahme bildet die Integration eines leichten Nutzfahrzeugs in das Angebot eines Car-Sharing Anbieters, das so im regulären Fahrzeugverleih zur Verfügung stand.

4.2.3 Zusammenfassung und kritischen Einschätzung

Fasst man die Überlegungen zu verkehrssystemaren Betrachtungen sowie die bisherigen, eher beispielhaften Befunde zusammen, wird deutlich, dass es im Bereich der durch Elektromobilität bedingten Veränderungen des gesamten Mobilitätssystems noch große Wissens- und Forschungslücken gibt. Veränderungen haben hier erst begonnen und Elektrofahrzeuge sind in vielen potenziellen Einsatzbereichen gerade erst „angekommen“. Art und Weise ihrer Integration in das Gesamtsystem sowie daraus entstehende Beeinflussungen sind von zahlreichen Faktoren abhängig, denen in Folgeuntersuchungen peu à peu systematisch nachzugehen ist. Erfolgversprechend können hier auch Studien über einen etwas längeren Zeitverlauf sein, welche das Transformationspotenzial der Elektromobilität für das Gesamtsystem betrachten und neben Verkehrsverlagerung auch Verkehrsvermeidung in den Fokus nehmen.

Nicht zuletzt bedürfen auch vertiefende Untersuchungen zu praktischen Voraussetzungen eines verstärkten Einsatzes von Elektrofahrzeugen weiterer Aufmerksamkeit, um handlungsrelevantes Wissen für die Realisierung bisher nur theoretischer Potenziale zu erlangen. Inter- und Multimodalität und moderne Mobilitätsangebote (wie z.B. Car-Sharing) scheinen hier fruchtbare Anknüpfungspunkte zu sein.

5 Zusammenfassung und Empfehlungen

5.1 Zentrale Ergebnisse der Umweltbegleitforschung Elektromobilität

Untersuchungsansatz

Als Basishypothese hat den Untersuchungsansatz die Überlegung geprägt,

- dass unter Relevanz Gesichtspunkten der Fokus auf die Energie- und Klimaaspekte zu legen sei,
- dass durch die große Zahl von Elektro-Pkw im gesamten Untersuchungsprogramm der „Modellregionen Elektromobilität“ diesbezügliche Betrachtungen auf eine bislang unerreichte breite empirische Basis gestützt werden können, sowie
- dass weitere und gesamtheitliche Umweltbetrachtungen, gestützt auf vereinzelte Untersuchungsansätze in verschiedenen Einzelprojekten des Förderschwerpunktes und auf Literaturlauswertungen, eine zureichende Einordnung ermöglichen.

Diesem Untersuchungsansatz wurde einerseits durch die Beauftragung entsprochen, andererseits hat er sich im Gang der Untersuchung als angemessen bestätigt.

Hinsichtlich der sich aus diesem Untersuchungsansatz ergebenden Arbeitsaufgaben können daraus drei deutlich voneinander getrennte Teile abgegrenzt werden, nämlich

- das Sammeln und Auswerten von Betriebsdaten von Elektro-Pkw, insbesondere hinsichtlich bezüglich ihrer Energieverbräuche;
- die Konstruktion eines Vergleichsansatzes zwischen Elektro-Pkw und herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen und die Durchführung des Vergleichs hinsichtlich der Energieverbräuche und Klimabelasten aus dem Betrieb;
- die vereinfachte Analyse weiterer bedeutsamer Umweltaspekte und gesamtheitlicher Umwelteinordnungen.

In dieser Reihenfolge wird auch nachfolgend zusammenfassend berichtet.

Erfahrungen aus dem Betrieb von Elektro-Pkw, insbesondere den Energieverbrauch betreffend

Die Aufnahme empirischer Daten aus den Einzelprojekten des Förderschwerpunktes war von Anfang an eine zentrale Aufgabe. Einschränkungen ergaben sich daraus, dass die Umweltbegleitforschung startete, nachdem die Untersuchungsdesigns in den Einzelprojekten im Grundsatz festgelegt waren und somit nur beschränkte Möglichkeiten für eine datenmäßige Vereinheitlichung bestand. Andererseits ergaben sich auch Einschränkungen daraus, dass die Versuchsfahrzeuge teilweise erst verhältnismäßig spät physisch eingesetzt werden und Daten liefern konnten. Durch ein entsprechendes Design und nicht zuletzt durch eine gewisse zeitliche Toleranz bei der Entgegennahme und Analyse der Daten konnten jedoch belastbare Ergebnisse sichergestellt werden.

Datengrundlage

Um möglichst viele Fahrzeuge einbeziehen zu können, wurde ein möglichst einfaches Anforderungsprofil hinsichtlich der Datenstruktur gewählt. Um detailgestützte Aussagen generieren zu können, wurde die Aufnahme der relevanten Einzelvorgänge, nämlich der einzelnen Fahrten und Ladevorgänge, festgelegt. Diese wurden aus praktischen Gründen mit relativ wenigen Merkmalen belegt: Neben der Fahrzeugkennung wurde die Zeit (Anfang und Ende bzw. Dauer), die Energiemenge (Abnahme aus dem Netz; Verbrauch aus der Batterie), und bei den Fahrten die zurückgelegte Wegstrecke aufgenommen. Dies ermöglicht einerseits lediglich grundlegende Aussagen, diese jedoch in verhältnismäßig fundierter Form.

Zu dem 345 einbezogenen Elektrofahrzeugen unterschiedlicher Modelle liegen rund 150.000 Messreihen eines dokumentierten Einsatzzeitraums von insg. 56.000 Tagen vor. Knapp 85 % dieser Vorgänge sind Fahrten, gut 15 % Ladevorgänge. Bezüglich einzelner Merkmale wie z.B. insb. den Energiemengen verringern sich die gültigen Fallzahlen deutlich, sodass bei einigen Untersuchungsgegenständen eine weitaus kleinere empirische Basis zur Verfügung steht.

Untersuchungsergebnisse

Als ein zentraler Befund der Umweltbegleitforschung können die Ergebnisse zu den spezifischen Verbrauchsdaten der einzelnen Fahrzeugsegmente bezeichnet werden. Minis und Kleinwagen verbrauchen im Mittel 17,2 kWh pro 100 km, Kompaktwagen und Mittelklassefahrzeuge 16,9 kWh pro 100 km und leichte Nutzfahrzeuge durchschnittlich 30,4 kWh pro 100 km.

Hinsichtlich der weiteren Befunde zeigt sich, dass die Fahrdauern der unterschiedlichen Fahrzeugtypen relativ ähnlich sind und zumeist kurze Fahrten unternommen werden. Die Hälfte aller Fahrten ist dabei nicht länger als 7 min, eine durchschnittliche Fahrt mit einem Elektrofahrzeug dauert 12:40 min. Die durchschnittliche Streckenlänge beträgt dabei knapp 8 km und gut $\frac{3}{4}$ aller Fahrten erstrecken sich über eine Distanz von höchstens 10 km.

Sehr große Unterschiede gibt es zwischen den unterschiedlichen Fahrzeugtypen vor allem im Bereich der Einsatz- und Ladeprofile im Tagesverlauf. In Abhängigkeit von den fahrzeugspezifischen praktischen Einsatzmöglichkeiten und den projektspezifischen Einsatzgebieten variieren die Muster stark mit unterschiedlichen Hauptnutzungs- und Hauptladezeiten.

Vergleich von Elektro-Pkw und herkömmlich angetriebenen Pkw hinsichtlich Energieverbrauch und Klimabelastungen aus dem Betrieb

Für die Durchführung dieser Aufgabe waren drei Teilarbeiten notwendig, nämlich

- die Kategorisierung bzw. Klasseneinteilung der Elektro-Pkw und die Bestimmung der herkömmlichen Vergleichsfahrzeuge,
- die Entwicklung einer Methode, die den Vergleich von Elektro-Pkw und herkömmlich angetriebenen Pkw hinsichtlich des Energieverbrauchs und der Klimabelastungen ermöglicht, sowie
- die Durchführung des Energieverbrauchs- bzw. Klimabelastungsvergleichs selbst.

Zu den beiden erstgenannten Punkten wurden Arbeitskreise mit den Schwerpunkten „Vergleichsfahrzeuge“ und „Strommix“ eingerichtet, um die Überlegungen seitens der Umweltbegleitforschung mit der Expertise aus den Einzelprojekten des Förderschwerpunkts zu verknüpfen. Für die Ergebnisse zeichnet naturgemäß allerdings ungeachtet der Beratungen die Umweltbegleitforschung verantwortlich.

Vergleichsfahrzeuge

Für einen sachlich angemessenen Vergleich war es nötig, die Elektro-Fahrzeuge zu kategorisieren, um jeweils in Art und Größe vergleichbare herkömmlich angetriebene Fahrzeuge zuordnen zu können. Aus Gründen der Transparenz und der Datenverfügbarkeit wurde hier auf die Klasseneinteilung des Krafftahrtbundesamtes (KBA) zurückgegriffen. Bei dem vorliegenden Feld von Elektro-Pkw waren tatsächlich nur die kleineren Fahrzeugklassen zu berücksichtigen und die sog. Utilities, also die leichten, vom KBA als Pkw eingestufteten Nutzfahrzeuge.

Da die Anschaffung eines Elektro-Pkw zu erhöhten Kosten und mit begrenzter Reichweite eine klare Bereitschaft zur Wahl von besonders umweltfreundlichen Modellen auch unter Inkaufnahme von Nachteilen signalisiert, wurden als im Kern relevante herkömmlich angetriebene Vergleichsfahrzeuge jeweils die aktuell besten, d. h. verbrauchsärmsten, in der jeweiligen Fahrzeugklasse gewählt. Diese konnten der vierteljährlich aktualisierten sog. DAT-Liste entnommen werden, die ja bei jedem Neuwagenhändler und im Internet verpflichtend kostenfrei vorgehalten werden muss.

Darüber hinaus wurden auch auf Wunsch verschiedener Beteiligter aus der Fahrzeugindustrie zusätzlich die (synthetischen) Durchschnittsfahrzeuge und die jeweils verbrauchsschlechteste der relevanten Modellreihen in jeder Klasse abgebildet. Auf diese Weise kann auch die Einordnung in den jeweils relevanten Gesamtmarkt erfolgen. Die hier zugehörigen Verbrauchswerte konnten der jährlichen Auswertung des KBA entnommen werden.

Vergleichsmethode und Ansätze zum Strommix

Wegen der unterschiedlichen Energiewandlungsketten müssen für einen vernünftigen Vergleich von herkömmlich angetriebenen und Elektro-Pkw die Energiepfade vom Anfang an berücksichtigt werden, also nicht nur der Energieverbrauch des Fahrzeugs selbst und die dabei entstehenden Emissionen, sondern auch die Bereitstellung der Energie für den Fahrzeugbetrieb. Für die sog. Vorketten, also die Bereitstellungsprozesse und deren Kennwerte, konnten aktuelle Daten des in Deutschland zumeist genutzten, vom deutschen und vom österreichischen Umweltbundesamt unterstützten GEMIS-Systems verwendet werden.

Während die Energieverbräuche und Klimabelastungen der herkömmlich angetriebenen Fahrzeuge damit hinreichend charakterisiert sind, ist es für die elektrisch betriebenen Fahrzeuge entscheidend, aus welcher Energiequelle der verwendete Strom stammt. Dies festzustellen oder festzulegen ist allerdings eine keineswegs triviale Aufgabe. Da die unterschiedlichen Zuweisungskonventionen zu weit auseinander liegenden Ergebnissen führen, greift die Analyse das Spektrum der Ansätze auf und macht damit die Unterschiede transparent. Dabei wird unterschieden zwischen

- der vollständigen Versorgung der Elektrofahrzeuge mit erneuerbarem Strom (allgemein angestrebt und in den Modellregionen teils durch hohe Anforderungen an die Zertifizierung des Ladestroms gestützt),
- der Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom entsprechend dem derzeitigen deutschen Strommix und
- der Versorgung der Elektrofahrzeuge mit Strom entsprechend der bei ökonomischem Betrieb anzusetzenden zusätzlichen Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge als zusätzliche Stromverbraucher (Ansatz nach Merit Order).

Die unterschiedlichen Verfahren stellen letztlich Bewertungen im Rahmen bestimmter Kontexte dar, die je nach Perspektive jeweils für sich einen hohen Grad von Nachvollziehbarkeit aufweisen und für die Praxis unterschiedlich geeignet sind. Ein Vergleich der Ergebnisse der Modellrechnungen lässt damit eine ganzheitliche Bewertung der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen zu.

Vergleichsergebnisse

Die zusammengefassten Ergebnisse der so begründeten Vergleichsrechnungen werden anschließend noch einmal tabellarisch zusammengestellt. Gegenübergestellt sind die zurechenbaren CO₂-Emissionen einschließlich der Vorketten (Energieumwandlungsprozesse außerhalb des Fahrzeugs) für Elektro-Pkw in Abhängigkeit von der Stromquelle im Vergleich zu jenen der energieverbrauchsgünstigsten herkömmlich angetriebenen Pkw der gleichen Klasse. Aus Gründen des Datenschutzes wurden die vorkommenden Fahrzeugklassen teilweise zusammengefasst.

Tabelle 19 Spezifische CO₂-Emissionen (g CO₂/km) im Vergleich von herkömmlichen Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen bei unterschiedlichen Stromquellen

	herkömmlicher Antrieb		Elektrofahrzeug			
	innerorts	kombiniert	Regenerativ	Mix 2010	Merit Order Kohle	Merit Order Gas
Minis/Kleinwagen	112	100	16	134	274	108
Kompakt-/Mittelklasse	128	114	16	131	270	106
Utilities	217	178	29	236	485	191

Als robuste Aussagen können davon abgeleitet werden:

- Beim Einsatz von regenerativem Strom sind Elektro-Pkw deutlich klimafreundlicher als herkömmlich angetriebene Pkw.
- Beim Einsatz von Strom entsprechend dem Durchschnitt der gegenwärtigen und zeitnahen Stromerzeugung ist die Klimaschädlichkeit von herkömmlich angetriebenen und Elektro-Pkw in der gleichen Größenordnung.
- Beim Einsatz von Strom aus fossilen Quellen sieht die Sache für Elektro-Pkw ungünstiger aus: Im Falle des gegenwärtig stärker in Betracht zu ziehenden Kohlestroms liegen die CO₂-Emissionen deutlich über denen vergleichbarer herkömmlich angetriebener Pkw; bei dem künftig stärker ausgebauten Gasstrom auf ähnlicher Höhe.

Qualitativ decken sich diese Feststellungen ganz gut mit den Ergebnissen ähnlicher Untersuchungen. Die Besonderheit der vorgelegten Zahlen liegt darin, dass sie in nachvollziehbarer Weise aus der realen Verwendung einer großen Zahl von verschiedenen Elektro-Pkw gestützt sind.

Weitere bedeutsame Umweltaspekte und gesamtheitliche Umwelteinordnung

Als weitere bedeutsame Umweltaspekte wurden einerseits die Geräuscentwicklungen und die damit zusammenhängenden Belastungen, andererseits die Schadstoffemissionen identifiziert. Bei den Geräuscentwicklungen war sowohl die Entlastung durch die geringere Lärmentwicklung der Elektro-Pkw als auch die potenzielle Verkehrsgefährdung durch die Geräuscharminderung zu betrachten. Bei den Schadstoffemissionen waren einerseits die einschlägig beachtlichen gasförmigen Emissionsfraktionen, andererseits die Partikelemissionen zu behandeln.

Für die gesamtheitliche Umwelteinordnung wurden zum einen die üblichen umweltbilanziellen Ansätze aufgegriffen, zum anderen der Frage nach der Ressourcenbeanspruchung – sowohl hinsichtlich der stofflichen Ressourcen als auch hinsichtlich der Flächenverbräuche – nachgegangen.

Für beide großen Fragenkomplexe, „Lärm und Schadstoffemissionen“ und „Umweltbilanzierung“ wurden ebenfalls Arbeitskreise eingerichtet, um die Überlegungen seitens der Umweltbegleitforschung mit der Expertise aus den Einzelprojekten des Förderschwerpunkts zu verknüpfen. Für die Ergebnisse zeichnet naturgemäß allerdings auch hier ungeachtet der Beratungen die Umweltbegleitforschung verantwortlich.

Lärm

Eine nennenswerte Minderung der Lärmbelastungen durch Elektro-Pkw ist trotz deren im Einzelfall geringen Geräuschemissionen in absehbarer Zukunft nicht zu erwarten, da Elektro-Pkw noch recht lange Zeit nur nachrangig am Verkehr beteiligt sein werden, da zudem die maßgeblichen Störwirkungen vielfach von anderen Fahrzeugarten (insbes. dem Schwerverkehr) ausgehen, sowie schließlich die antriebsseitig allein modifizierten Motorgeräusche nicht die einzige Quelle des Verkehrslärms darstellen.

Andererseits sind auch die potenziellen Unfallgefährdungen durch die Geräuscharmheit der Elektro-Pkw bei näherer Betrachtung stark zu relativieren, da sie praktisch nur bei sehr

geringer Fahrgeschwindigkeit und entsprechend guter Beherrschbarkeit des Fahrzeugs von Belang sind; zudem können in diesen Fahrzuständen die Risiken auch durch eine zusätzliche Erzeugung von mäßigen Geräuschen weiter gemindert werden.

Gasförmige Schadstoffemissionen

Bei den gasförmigen Schadstoffemissionen werden herkömmlich – soweit es den Verkehr betrifft – insbesondere Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC, insbesondere flüchtige Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe, NMVOC), sowie Stickoxide (NO_x) betrachtet.

Bei Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen können sowohl die Emissions- als auch die Immissionssituation inzwischen wegen der zunehmenden Durchsetzung fortgeschrittener Emissionsstandards als in der Regel weitgehend entspannt eingestuft werden; weitere Verbesserungen sind im Zuge des revolvierenden Fahrzeugbestandsaufbaus zu erwarten, und erhebliche zusätzliche Zielbeiträge durch Elektro-Pkw erscheinen weder möglich noch notwendig.

Bei Stickoxiden ist die Situation etwas prekärer. Auch dort ist die verkehrsbürtige (insbes. Pkw-bürtige) Emissionsmenge stark zurückgegangen, die Immissionssituation ist jedoch an einer Reihe von stark verkehrsbelasteten Standorten absolut unbefriedigend. Kurzfristig ist hier (insbesondere auch durch Elektro-Pkw) keine signifikante Entlastung in Aussicht. Mittel- und längerfristig sind weitere massive Belastungsabsenkungen durch die normale Erneuerung des Fahrzeugbestands zu erwarten, soweit es um die Belastungsbeiträge seitens der Pkw geht. Ein zusätzlicher Entlastungsbeitrag durch Elektro-Pkw kann daher lediglich langfristig und in geringem Umfang erwartet werden.

Partikelemissionen

Auch bei den Partikeln ist die Beurteilungsbasis schwierig. Die bisherige Reduktion der Staub- und Feinstaubfraktionen aus dem Verkehr und insbes. dem Pkw-Verkehr ist beeindruckend, weitere starke Abminderungen sind wegen der zunehmenden Verbreitung noch stärker emissionsgeminderter Pkw zu erwarten. Ein immissionsseitig relevanter zusätzlicher Entlastungsbeitrag durch Elektro-Pkw kann auf absehbare Zeit nicht erwartet werden, zumal die dabei allein vermiedenen verbrennungsbedingten Partikel lediglich einen Teil der Partikelfrachten ausmachen, und die Mengen aus anderen Quellen, aus fahrzeuginternen Reifen- und Straßenabrieb, sowie aus der Mobilisierung bereits sedimentierter Partikel durch die Art des Fahrzeugantriebs naturgemäß nicht variiert werden.

Die Beurteilungsbasis ist allerdings durch die gegenwärtig verfolgten Messkonzepte und Vorschriften stark eingeschränkt: Diese heben auf gravimetrische Verfahren und Massenkonzentrationen in der Umgebungsluft ab. Die für die Gesundheitsgefährdung maßgebliche Anzahl der Partikel – je kleiner und je leichter, desto gefährlicher – wird damit ebenso überdeckt, wie die ebenfalls maßgeblichen Fragen nach der Physik der Partikel und deren chemischer und biologischer Reagibilität vernachlässigt werden.

Umweltbilanzen

Die in der aktuellen Literatur vorliegenden ökobilanziellen Betrachtungen konzentrieren sich verhältnismäßig stark auf die Klimafragen und den diesbezüglichen Vergleich zwischen

unterschiedlichen Antriebs- und Stromerzeugungskonzepten. Dies bestätigt den in der Umweltbegleitforschung gewählten methodischen Ansatz.

Die dabei vorgetragenen Ergebnisse sind im Grundsatz mit der in der vorliegenden Untersuchung ermittelten Sachlage kompatibel: Als maßgeblich erweist sich, mit welchen Lasten die Erzeugung des in den Elektro-Pkw verbrauchten elektrischen Stroms verbunden ist. Die Einbeziehung auch der Fahrzeuge selbst in die Beurteilungsbasis führt in der Regel zu einer mäßigen Schlechterstellung der Elektro-Pkw, verglichen mit einer rein betriebsbezogenen Betrachtung. Auch andere Bezugspunkte als die Klimaverträglichkeit, nämlich konkret in einer Studie dargestellt das Versauerungspotenzial, können zu einer mäßigen Verschlechterung der Position der Elektro-Pkw führen.

Deutlich übertönt werden diese Aussagen allerdings durch die Zeitbezogenheit und damit Vorläufigkeit der Feststellungen: Insbesondere die spezifischen Komponenten der Elektro-Fahrzeuge sind noch einer erheblichen laufenden Weiterentwicklung unterworfen, wodurch abschließende Bewertungen stark eingeschränkt sind; beispielsweise hängt die fahrzeugseitige Beurteilung nicht zuletzt von der Standfestigkeit (Haltbarkeit) der Batterie ab, bezüglich welcher derzeit noch erhebliche Unsicherheitsbandbreiten berücksichtigt werden müssen.

Ressourcenverbrauch

Bezüglich der Ressourcenverfügbarkeit und des Ressourcenverbrauchs ist sowohl bei herkömmlich angetriebenen als auch bei Elektro-Pkw von eher geringen Problemen auszugehen.

Bei Elektro-Pkw wird normalerweise der Materialeinsatz für die Batterien als kritischer Pfad betrachtet. Hier ist angesichts der zunächst eher geringen Stückzahlen kein Problem zu erkennen. Bei global massenhafter Verwendung können sich insbesondere bei Nickel und Lithium Probleme ergeben, die allerdings weitgehend über Preiserhöhungen und Kreislauf-führung der Rohstoffe aufgefangen werden dürften.

Bei herkömmlich angetriebenen Pkw wird üblicherweise die Treibstoffversorgung wegen der Endlichkeit der Ölreserven als kritischer Pfad angesetzt. Hierbei zeigt sich jedoch, dass bereits die Verwendung der heute als gesichert angesehenen wirtschaftlich gewinnbaren Ölmengen innerhalb des laufenden Jahrhunderts selbst bei sofortigem Verzicht auf eine weitere Nutzung von Erdgas und Kohlen aus Klimaschutzgründen kontraindiziert ist. Da nun über die gegenwärtig wirtschaftlich gewinnbaren Reserven hinaus erheblich größere Energieressourcen – wenngleich zu höheren Preisen – verfügbar gemacht werden können, aus denen flüssige Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren abzuleiten sind, kann auch hierin kein kritischer Pfad gesehen werden.

Flächenverbrauch

Hinsichtlich des Flächenverbrauchs unterscheiden sich herkömmlich angetriebene und Elektro-Pkw naturgemäß nicht substantiell. Bei massenhaftem Einsatz ergeben sich in beiden Fällen Konflikte aufgrund der hohen Flächenansprüche an die beschränkt verfügbaren städtischen Verkehrsflächen.

5.2 Empfehlungen der Umweltbegleitforschung Elektromobilität

5.2.1 Sachempfehlungen

Aus der durchgeführten Umweltbegleitforschung Elektromobilität im Rahmen des Förderschwerpunkts „Modellregionen Elektromobilität“ können vor allem folgende zentrale Sachempfehlungen abgeleitet werden:

Stabilisierung des Übergangs auf eine erneuerbare Stromerzeugung

Wie die Berechnungen im Rahmen der Begleitforschung zeigen, können Elektrofahrzeuge dann einen deutlichen Klimavorteil erreichen, wenn – wie von der Politik angestrebt – die Stromerzeugung der Zukunft in immer stärkeren Maße durch Erneuerbare Energien geprägt sein wird. Für die durch Elektrofahrzeuge zukünftig erreichbare CO₂-Entlastung im Straßenverkehr bei steigenden Zahlen an Elektrofahrzeugen wird langfristig die konsequente Veränderung der derzeitigen Stromerzeugungsstrukturen hin zu erneuerbaren Energiequellen von entscheidender Bedeutung sein.

Fortsetzung der Forschung und Entwicklung bei Elektrofahrzeugen

Eine Fortsetzung der Forschung und Entwicklung bei Elektrofahrzeugen bietet auch aus Umweltsicht noch große Chancen. Hierbei sind insbesondere die Energieeffizienz, aber auch z.B. der Materialeinsatz und die Haltbarkeit der Batterien von großer Bedeutung. Da die Marktdurchdringung der Elektrofahrzeuge und eine überwiegend erneuerbare Strombereitstellung und damit ein substantieller Klimaschutzbeitrag der Fahrzeuge nicht vor 2030 zu erwarten ist, wird zudem die Weiterentwicklung herkömmlicher Antriebe hinsichtlich Energieverbrauchsreduktion empfohlen. Diese werden noch über mehrere Jahrzehnte große Teile der Fahrzeugflotte in Deutschland ausmachen.

Kostenreduktion bei Elektrofahrzeugen

Generell bedeutsam für die Frage einer Marktfähigkeit ist naturgemäß auch die erforderliche Kostenreduktion, die insbesondere auch für einen breiten Einsatz in dem als besonders interessant einzuschätzenden Segment der leichten Nutzfahrzeuge (Utilities) von Bedeutung erscheint.

Nutzung der Lärmreduktionspotenziale und akustische Markierung von Elektrofahrzeugen

Lärmreduktionspotenziale von Elektrofahrzeugen lassen sich vermutlich bei Fahrzeugen im Lieferverkehr mit häufigen Stopp- und Anfahrvorgängen erschließen. Gleiches gilt für die verstärkte Elektrifizierung von Bussen, weiteren Nutzfahrzeugen und Zweirädern.

Eine Verkehrsgefährdung durch die Geräuscharmheit von Elektrofahrzeugen erscheint demgegenüber nach jetzigem Stand wenig bedeutend. Aus den Ergebnissen einschlägiger Projekte im Rahmen des Förderschwerpunkts (AUE-mobility/Angelico-Acoustic-Consult und ColognE-mobil/Universität Duisburg) kann die Empfehlung abgeleitet werden, potenzielle Risiken aus der geringen Geräuschemission von Elektrofahrzeugen durch eine ausdrückliche akustische Markierung der Fahrzeuge zu minimieren. Hierfür dürfte allerdings eine geringe Geräuschanhebung im unteren Frequenzband, sowie lediglich im niedrigen Geschwindigkeitsbereich bis etwa 30 km/h, ausreichen. Dies könnte insbesondere bereits in der (frühen) Einführungsphase von Elektrofahrzeugen von Bedeutung sein.

5.2.2 Forschungsempfehlungen

Für die weitere Forschung können aus dem Kontext der Umweltbegleitforschung Elektromobilität insbesondere folgende Aufgabenstellungen herausgehoben werden:

Verbreiterung des Kenntnisstandes hinsichtlich des Betriebs der Elektrofahrzeuge

Aufgrund des schrittweisen Zugangs der Fahrzeuge und der Daten über ihren Betrieb und der gegebenen Fahrzeugauswahl konnten im Rahmen der Begleitforschung einerseits hinsichtlich des Winterbetriebs und seiner Besonderheiten, andererseits für Plug-In-Hybridfahrzeuge (einschließlich Range Extender) keine empirischen Befunde aus dem breiten Praxiseinsatz in den Forschungsprojekten zugrunde gelegt werden. Eine entsprechende Verbreiterung des Kenntnisstands durch Ausweitung bzw. Fortsetzung der Datenaufnahme und -analyse im Realbetrieb wird empfohlen.

Vertiefung des Kenntnisstands hinsichtlich der ökosystemaren Wirkungen von Elektrofahrzeugen

Die im Rahmen der Untersuchung aufgenommenen ökobilanziellen Betrachtungen weisen teilweise noch erhebliche Lücken und Unsicherheiten auf. Dies ist aufgrund der beschränkten Erfahrungen mit Elektrofahrzeugen und der raschen technologischen Weiterentwicklung in diesem Bereich auch nicht vollständig zu vermeiden. Jedenfalls aber sollte für eine bessere Fundierung der ökosystemaren Beurteilung der diesbezügliche Kenntnisstand deutlich weiter entwickelt werden.

Vertiefung des Kenntnisstands hinsichtlich der verkehrssystemaren Wirkungen und Einbindung in die diesbezüglichen Entwicklungsziele

Die bisher hierzu vorliegenden Erkenntnisse haben mehr hinweisenden Charakter und sollten verbreitert werden. Für die weitere Entwicklung ist die Frage einer optimalen Verknüpfung mit den aus Umweltsicht bedeutenden Zielen der Verkehrsvermeidung und Verkehrsverlagerung weiter zu erkunden. Insbesondere vertiefende Untersuchungen zu den Potenzialen und praktischen Voraussetzungen für einen verstärkten Einsatz von Elektrofahrzeugen (auch Zweirädern) und Car-Sharing in Verbindung mit öffentlichem Verkehr (Multimodalität) können empfohlen werden und vertiefende Hinweise zu Gestaltung und Einsatzbedingungen von Elektrofahrzeugen liefern.

Weitere ergebnisoffene Erforschung der Fahrzeugeinbindung in eine insgesamt erneuerbar basierte Energiewirtschaft

Im größeren Kontext stellen Elektrofahrzeuge lediglich eines der potenziell relevanten Elemente im Übergang zu einer postfossilen Energiewirtschaft dar und sind in dementsprechende gesamtheitliche Ansätze einzubinden. Im Rahmen der diesbezüglich anzustellenden systemanalytischen Fragestellungen sind dabei die möglichen Systemdienstleistungen von Elektrofahrzeugen für den Ausbau fluktuierender erneuerbarer Energieträger durch die Nutzung der Stromspeicher an Bord ein zentraler Gegenstand. Einen anderen stellen die Überlegungen dar, im Rahmen einer Gesamtstrategie zur Speicherung fluktuierender erneuerbarer Energien eine chemische Energiespeicherung (z.B. in Form von Wasserstoff oder synthetischem Methan) direkt zum Fahrzeugantrieb zu nutzen.

Literatur- und Quellenverzeichnis

Im Rahmen der Umweltbegleitforschung Elektromobilität sind fünf Teilberichte entstanden, die unterschiedliche thematischen Schwerpunkte vertiefen.

Der vorliegende WI-Report greift im Wesentlichen auf die Befunde der Teilberichte zurück und integriert sie.

Die Teilberichte zur Umweltbegleitforschung Elektromobilität sind unter www.wupperinst.org online verfügbar.

Teilberichte der Umweltbegleitforschung Elektromobilität

Teilbericht Vergleichsfahrzeuge: Schallaböck, Karl Otto; Carpantier, Rike (2012): Umweltbegleitforschung für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge: Auswahl der Vergleichsfahrzeuge.

Teilbericht Strommix: Schallaböck, Karl Otto; Fishedick, Manfred (2012): Strommix beim Betrieb von Elektrofahrzeugen.

Teilbericht Analyse der Messdaten: Carpantier, Rike (2012): Analyse der Messdaten zum Betrieb und zur Ladung von Elektrofahrzeugen.

Teilbericht Lärm und Schadstoffe: Schallaböck, Karl Otto (2012): Überlegungen zu Lärm und Schadstoffen im Zusammenhang mit dem Betrieb von Elektrofahrzeugen.

Teilbericht Ökobilanz: Ritthoff, Michael; Schallaböck, Karl Otto (2012): Ökobilanzierung der Elektromobilität – Themen und Stand der Forschung.

Quellenverzeichnis

- 50Hertz Transmission GmbH (2011): Hochrechnungswerte-Windenergieeinspeisung. Online verfügbar unter: <http://www.50hertz.com/de/Netzkennzahlen.htm> (letzter Zugriff 16.1.2012).
- Abele, R.; Peters, W. (2010): Elektro-Autos. Ab 2011: Mehr Strom wagen. FAZ.net Frankfurter Allgemeine. Online verfügbar unter: <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/elektro-autos-ab-2011-mehr-strom-wagen-1637343.html> (letzter Zugriff 13.1.2012).
- Acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, (2010): Wie Deutschland Zum Leitanbieter für Elektromobilität werden kann: Status Quo- Herausforderungen - Offene Fragen. Springer.
- ADAC (2009): Elektroauto-Käufer werden Notlösungen nicht akzeptieren. Online verfügbar unter: <http://www.kfz.net/autonews/adac-elektroauto-kaeuer-werden-notloesungen-nicht-akzeptieren-29063/> (letzter Zugriff am 13.11.2009)
- AG Energiebilanzen (2011): Stromerzeugung nach Energieträgern von 1990 bis 2011 (in TWh) Deutschland insgesamt. Online verfügbar unter: <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=65> (letzter Zugriff 9.1.2012).
- Aigle, Th.; Marz, L. (2007): Automobilität und Innovation. Versuch einer interdisziplinären Systematisierung. Berlin. (WZB-discussion paper SP III 207-102).
- Althaus, H.-J. (2011): Comparative assertion of battery electric cars with various alternatives. Vortrag, gehalten im Rahmen des 43rd LCA Discussion Forums, Life Cycle Assessment of Electromobility. ETH Zürich.
- Andrleit, H. et al. (2011): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2011 (Kurzstudie). Hannover: Deutsche Rohstoffagentur; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [DERA].
- Aral Forschung (2011): Frequently Asked Questions. Online verfügbar unter: <http://www.aral.de/aral/faq.do?categoryId=4000141&contentId=56034¤tPage=2> (letzter Zugriff 12.1.2012).
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen [AGEB] (2010): Vorwort zu den Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland, Stand: August 2010. Online verfügbar unter: www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=118.
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen [AGEB] (2011a): Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990-2009, Stand März 2011. Online verfügbar unter: www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=139 (letzter Zugriff 14.1.2012).
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen [AGEB] (2011b): Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2010 nach Energieträger, Stand März 2011. Online verfügbar unter: <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=65> (letzter Zugriff 14.1.2012).
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen [AGEB] (2011c): Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2010. Online verfügbar unter: www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=118 (letzter Zugriff 14.1.2012).
- Backhaus, O.; Döther, H.; Heupel, T. (2011): Elektroauto - Milliardengrab oder Erfolgsstory? Entstehungsgeschichte, Marktanalyse 2010 und Zukunftspotenziale der Elektromobilität (Arbeitspapier). ild Schriftenreihe Logistikforschung Band 19. FOM Hochschule für Oekonomie & Management, ild Institut für Logistik- & Dienstleistungsmanagement. Essen.
- Beck, M.-A. (2011): Electricity consumption. Real life acquisition of Electric Cars. Vortrag, gehalten im Rahmen des 43rd LCA Discussion Forums, Life Cycle Assessment of Electromobility. ETH Zürich.
- Betzüge, M.O. et al. (2008): Plug-in Hybrid Electric Vehicles. Wissenschaftlicher Workshop. Energiewirtschaftliches Institut zu Köln [EWI]; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung [ISI]. Köln. Online verfügbar unter: <http://elib.dlr.de/59501/1/PHEV-Workshop-Koeln-Schier.pdf> (letzter Zugriff 9.1.2012).
- Beutler, F. (2004): Intermodalität, Multimodalität und Urbanability - Visionen für einen nachhaltigen Stadtverkehr. Herausgegeben von Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung. Berlin. (Discussion Paper SP III, 2004-107).

- Bömer, J. (2011): Abschätzung der Bedeutung des Einspeisemanagements nach EEG 2009 - Auswirkungen auf die Windenergieerzeugung in den Jahren 2009 und 2010. Berlin: Ecofys Germany GmbH.
- Bratzel, S. (2010): Automotive Markets: Jugend und Automobil 2010. Bergisch-Gladbach: Center of Automotive Management.
- Brosius, F. (2008): SPSS-Programmierung: Effizientes Datenmanagement und Automatisierung mit SPSS-Syntax. Heidelberg: mitp Redline.
- Brosius, F. (2011): SPSS 19 (2011. Aufl.). Heidelberg: mitp Redline.
- Brunekreeft, G.; Buchmann, M.; Gabriel, J. (2011): Der Beitrag der Elektromobilität zur Netzintegration von erneuerbaren Energien in der Region NordWest. Gehalten auf der Fachtagung Elektromobilität. Bremen.
- Buchert, M. et al. (2011): Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität (Arbeitspaket Nr. 7). OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Freiburg: Öko-Institut e.V.
- Buller, U.; Hanselka, H. (2009): Potenziale der Elektromobilität aus Sicht der Fraunhofer-Gesellschaft. In: Institut für Wirtschaftsforschung [IfW] Schnelldienst, Ausgabe 62.2009 (22), Seite 3-5.
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz [LAI] (2010): Stickstoffdioxid (NO₂)-Belastungen in der Bundesrepublik Deutschland Sachstand - Ursachen - Minderungsmaßnahmen im Verkehrsbereich (Fort-schreibung des Berichts zur Bewertung verkehrsbezogener Minderungsmaßnahmen). Ausschuss „Luftquali-tät/Wirkungsfragen/Verkehr“.
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft [BUWAL] (Hg.) (2004a): Elektro-Zweiräder. Auswirkungen auf das Mobilitätsverhalten. Umwelt-Materialien Nr. 173. Bern.
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft [BUWAL] (Hg.) (2004b): 3- und 4-rädrige Leicht-Elektromobile (LEM) in Mendrisio. Auswirkungen auf das Mobilitätsverhalten. Umwelt-Materialien Nr. 174. Bern.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [BGR] (o.J.): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. DERA Rohstoffinformationen.
- Bundesministerium der Justiz [BMJ] (2004): Verordnung über Verbraucherinformationen zu Kraftstoffverbrauch, CO₂-Emissionen und Stromverbrauch neuer Personenkraftwagen: Pkw-Energieverbrauchskennzeichnungs-verordnung [Pkw-EnVKV]. Berlin.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung [BMBF] (2010a): Elektromobil in die Zukunft. Batterietechnologie als Schlüssel. Bonn, Berlin. Online verfügbar unter: <http://www.bmbf.de/pub/elektromobilitaet.pdf> (letzter Zu-griff 11.1.2012).
- Bundesministerium für Bildung und Forschung [BMBF] (2010b): Ideen. Innovation. Wachstum. Hightech-Strategie 2020 für Deutschland. Bonn, Berlin. Online verfügbar unter: http://www.bmbf.de/pub/hts_2020.pdf (letzter Zugriff 11.1.2012).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [BMU] (2010a): Dossier Energie - natürlich erneuerbar - Elektromobilität: Erneuerbare Energien tanken. Online verfügbar unter: <http://www.bmu.de/verkehr/elektromobilitaet/doc/45969.php> (letzter Zugriff 11.1.2012).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [BMU] (2010b): Erneuerbar mobil - Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich Elektromobilität. Berlin. Online verfügbar unter: <http://www.bmu.de/verkehr/downloads/doc/46088.php> (letzter Zugriff am 23.09.2010).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [BMU] (2011a): Erneuerbar mobil - Marktfähige Lösungen für eine klimafreundliche Elektromobilität. Berlin. Online verfügbar unter: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_emob_bf.pdf (letzter Zugriff 11.1.2012).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [BMU] (2011b): UMBReLA Umweltbewertung Elektromobilität – Zusammenführung und Analyse der Erkenntnisse aktueller Flottenversuche der Bundesre-gierung. Berlin.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [BMVBS] (2010a): Umsetzungsbericht zum Förder-programm „Modellregionen Elektromobilität“ des BMVBS. Berlin. Online verfügbar unter:

<http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/66620/publicationFile/37873/modellregionen-elektromobilitaet-umsetzungsbericht-mai-2011.pdf> (letzter Zugriff am 19.10.2010).

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [BMVBS] (2010b): Pressemitteilungen - Modellregionen Elektromobilität: E-City Logistik.

Online verfügbar unter: <http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2010/406-ramsauer-city-logistik.html> (letzter Zugriff 5.1.2012).

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [BMVBS] (2011): Pressemitteilungen-Staatssekretär eröffnet Entwicklungs- und Testzentrum in Zwickau. Online verfügbar unter:

<http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2011/067-muecke-zwickau.html?linkToOverview=SiteGlobals%2FForms%2FArchiv%2FPressemitteilungen%2>

[FPressemitteilungen_Formular.html%3Fnn%3D35788%26amp%3Bgtp%3D36166_list%3D2%26amp%3BsearchIssued%3D0%26a](http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2011/067-muecke-zwickau.html?linkToOverview=SiteGlobals%2FForms%2FArchiv%2FPressemitteilungen%2FPressemitteilungen_Formular.html%3Fnn%3D35788%26amp%3Bgtp%3D36166_list%3D2%26amp%3BsearchIssued%3D0%26a) (letzter Zugriff 5.1.2012).

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [BMVBS]; Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie [NOW] (2011): Umsetzungsbericht zum Förderprogramm „Elektromobilität in Modellregionen“ des BMVBS. Stand Mai 2011. Berlin. Online verfügbar unter:

<http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/66620/publicationFile/37873/modellregionen-elektromobilitaet-umsetzungsbericht-mai-2011.pdf> (letzter Zugriff 11.1.2012).

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (2011a): Der Weg zur Energie der Zukunft - sicher, bezahlbar und umweltfreundlich - Eckpunkte für ein energiepolitisches Konzept. Online verfügbar unter:

www.bmwi.de/BMWi/Navigation/energie,did=405004.html (letzter Zugriff 4.1.2012).

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie [BMWi] (2011b): Innovationspolitik, Informationsgesellschaft, Telekommunikation - IKT für Elektromobilität. Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie [BMWi]; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [BMVBS]; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [BMU]; Bundesministerium für Bildung und Forschung [BMBF]; Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz [BMELV] (2009): Auszug aus dem Bericht an den Haushaltsausschuss Konjunkturpaket II, Ziffer 9 Fokus „Elektromobilität“. Berlin. Online verfügbar unter:

<http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/27910/publicationFile/83/massnahmen-elektromobilitaet-im-konjunkturpaket-ii.pdf> (letzter Zugriff 11.1.2012).

Bundesregierung (2002): Perspektiven für Deutschland. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Berlin: Bundesregierung. Online verfügbar unter:

http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nachhaltigkeit_strategie.pdf (letzter Zugriff 11.1.2012).

Bundesregierung (2007): Integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung. Hintergrundpapier. Berlin: Bundesregierung. Online verfügbar unter:

http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/hintergrund_meseberg.pdf (letzter Zugriff 11.1.2012).

Bundesregierung (2009): Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin: Bundesregierung. Online verfügbar unter:

<http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/nationaler-entwicklungsplan-elektromobilitaet-der-bundesregierung,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf> (letzter Zugriff 4.1.2012).

Bundesregierung (2010a): Etablierung der Nationalen Plattform Elektromobilität am 3. Mai 2010. Gemeinsame Erklärung der Bundesregierung und der deutschen Industrie. Berlin: Bundesregierung.

Bundesregierung (2010b): National Renewable Energy Action Plan in accordance with Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources. Berlin: Bundesregierung. Online verfügbar unter:

http://ec.europa.eu/energy/renewables/transparency_platform/doc/national_renewable_energy_action_plan_germany_en.pdf (letzter Zugriff 4.1.2012).

Bundesregierung (2011): Regierungsprogramm Elektromobilität. Rostock: Bundesregierung.

Busch, N. (2010): Die Elektrifizierung betrieblicher Flotten: Individuelle und organisationale Einflüsse auf die Adoptionsbereitschaft. Lizentiatsarbeit, Zürich: Fraunhofer ISI, Universität Zürich.

- Canzler, W.; Knie, A. (2009): Grüne Wege aus der Autokrise Vom Autobauer zum Mobilitätsdienstleister. Band 4 der Reihe Ökologie. Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung. Online verfügbar unter: <http://www.boell.de/downloads/E-Digest2009-03Autokrise.pdf> (letzter Zugriff 5.1.2012).
- Canzler, W.; Knie, A. (2010): Elektromobilität: Innovationen nur in vernetzter Form. WZBrief Arbeit. Berlin: Wissenschaftszentrum Berlin [WZB]. Online verfügbar unter: http://bibliothek.wzb.eu/wzbrief-arbeit/WZBriefArbeit082010_canzler_knie.pdf (letzter Zugriff 5.1.2012).
- Carlin, J. F. J. (2009): 2007 Minerals Yearbook - Antimony [advance release], U.S. Geological Survey.
- Carpantier, Rike (2012): Analyse der Messdaten zum Betrieb und zur Ladung von Elektrofahrzeugen. Teilbericht im Rahmen der Umweltbegleitforschung Elektromobilität im Förderschwerpunkt „Modellregionen Elektromobilität“. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Center für Automobil-Management [CAMA] (2010): CAMA-Studie - Elektromobilität 2010. Wahrnehmung, Kaufpräferenzen und Preisbereitschaft potenzieller E-Fahrzeug-Kunden. Duisburg. Online verfügbar unter: http://www.forum-elektromobilitaet.ch/fileadmin/DATA_Forum/Publikationen/CAMA_Studie_2010-wahrnehmung-pr%C3%A4ferenzen.pdf (letzter Zugriff 11.1.2012).
- Chlond, Bastian; Lipps, Oliver (2000): Multimodalität im Personenverkehr im intrapersonellem Längs-schnitt. IfV-Report Nr. 00-7. Arbeitsbericht des Institutes für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe (TH). Ebenfalls erschienen in: Schriftenreihe des Instituts für Stadtbauwesen, RWTH Aachen. Heft 69. Aachen.
- CONCAWE/EUCAR/JRC (2008a): Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. TANK-to-WHEELS Report. Version 3. Online verfügbar unter: <http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/V3.1%20TTW%20Report%2007102008.pdf> (letzter Zugriff 13.04.2011).
- CONCAWE/EUCAR/JRC (2008b): Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context WELL-TO-TANK Report. Version 3.0. November 2008. WTT Appendix 2: Description and detailed energy and GHG balance of individual pathways. Online verfügbar unter: <http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/WTT%20App%202%20v30%20181108.pdf> (letzter Zugriff 13.04.2011).
- Continental AG (2008): Hybrid- und Elektrofahrzeuge bei Autofahrern weltweit im Ansehen auf dem Vormarsch. Pressemitteilung vom 27.06.2008. Online verfügbar unter: http://www.conti-online.com/generator/www/de/de/continental/automotive/general/press_service/press_releases/download/powertrain/doc_2008_06_27_studie_de.doc (letzter Zugriff 13.11.2009)
- D'Angelico Acoustic Consult (2011a): Akustische Umweltaspekte der E-Mobilität. Bericht zum Projekt AUE-Mobility, gefördert durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung im Rahmen des Förderprogramms „Modellregionen Elektromobilität“. Berlin.
- D'Angelico Acoustic Consult (2011b): Presentation at the 6th WG QRTV Meeting. San Diego State University.
- Dallinger, D. et al. (2011): Gesellschaftspolitische Fragestellungen der Elektromobilität. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung [Fraunhofer ISI], Competence Center Industrie- und Serviceinnovationen ISI.
- DAUG [Deutsche Automobilgesellschaft] (Hg.) (1997): Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen und Energieversorgung für Elektrofahrzeuge durch Solarenergie und Stromtankstellen. Abschlussbericht zu einem vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben. CD-ROM.
- Deutsche Automobil Treuhand GmbH [DAT] (2011): Leitfaden über den Kraftstoffverbrauch, die CO₂-Emissionen und den Stromverbrauch aller neuen Personenkraftwagenmodelle, die in Deutschland zum Verkauf angeboten werden. Online verfügbar unter: www.dat.de/leitfaden/LeitfadenCO2.pdf (letzter Zugriff 6.1.2012).
- Deutsche Unternehmensinitiative Energieeffizienz e.V. [DENEFF] (2011): 10-Punkte Sofortprogramm: wirtschaftlicher und schneller Atomausstieg durch Energieeffizienz (Kurzfassung). Online verfügbar unter: http://www.deneff.org/cms/index.php/news-reader/items/id-10-punkte-sofortprogramm.html?file=tl_files/Infomaterial/Presse/20110407%2010%20Punkte%20Kurzfassung.pdf (letzter Zugriff 6.1.2012).

- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. [DIW] (2010): Verkehr in Zahlen. Verschiedene Jahrgänge. Hamburg.
- Diekmann, A. (2000): Empirische Sozialforschung: Grundlagen, Methoden, Anwendungen. 6. A. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.
- DIN EN ISO 14040:2009-11 (2009): Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- DIN EN ISO 14044:2006-10 (2006): Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.
- Dudenhöffer, F. (2010): Die Bedeutung von Elektromobilität für den Standort Deutschland und Defizite in der Förderung. In: Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht, Ausgabe 3/2010, Seite 243-260.
- Dudenhöffer, F.; John, E. M. (2009): Marktanreizprogramme für Endkunden sind falsch. In: Institut für Wirtschaftsforschung [ifo] Schnelldienst, Ausgabe 62.2009 (22), Seite 5-8.
- Dudenhöffer, K.; Hause, L. (2011): Hörbare Vehikel. Experimente zur Geräuschwahrnehmung von Elektroautos durch Handicap-Gruppen. In: UNIKATE, Ausgabe 39, Seite 52-61.
- Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln [EWI] (2010): Potenziale der Elektromobilität bis 2050. Eine szenarienbasierte Analyse der Wirtschaftlichkeit, Umweltauswirkungen und Systemintegration. Köln.
- Engel, T. (2007): Plug-in Hybrids. Studie zur Abschätzung des Potenzials zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Pkw-Verkehr. München: Dr. Hut.
- Erdmann, L. (2011): Availability of raw materials and resources used in electric cars. Vortrag, gehalten im Rahmen des 43rd LCA Discussion Forums, Life Cycle Assessment of Electromobility. ETH Zürich.
- Ernst&Young (2010): Gauging interest for plug-in hybrid and electric vehicles in select markets. Online verfügbar unter: [http://www.ey.sk/Publication/vwLUAssets/Gauging-interest-for-plug_in-hybrid-and-electric-vehicles/\\$FILE/Gauging-interest-for-plug_in-hybrid-and-electric-vehicles.pdf](http://www.ey.sk/Publication/vwLUAssets/Gauging-interest-for-plug_in-hybrid-and-electric-vehicles/$FILE/Gauging-interest-for-plug_in-hybrid-and-electric-vehicles.pdf) (letzter Zugriff 14.6.2011).
- Essen, C. von (2011): Zukünftige Mobilität - Was kann der Hybridantrieb dazu beitragen? Gehalten auf der Zukünftige Mobilität, Bremen.
- Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union (2000): Richtlinie 1999/94/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Dezember 1999 über die Bereitstellung von Verbraucherinformationen über den Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen beim Marketing für neue Personenkraftwagen.
- Europäische Union [EU] (2009): Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. Online verfügbar unter: www.eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0001:0015:DE:PDF (letzter Zugriff 9.1.2012).
- European Council für Automotive R&D [EUCAR]; Conservation of Clean Air and Water in Europe [CONCAWE]; Joint Research Centre/Institute of Environment and Sustainability [JRC/IES] (2008): Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context: TANK-to-WHEELS Report; Version 3.
- European Energy Exchange AG [EEX] (2011): Marktdaten Strom, Marktdaten Emissionsrechte. Online verfügbar unter: <http://www.eex.com/de/Marktdaten> (letzter Zugriff 6.1.2012).
- European Federation of Transport and Environment AISBL (2009): How to avoid the electric shock. Electric cars: from hype to reality. Brüssel: Transport & Environment. Online verfügbar unter: <http://www.transportenvironment.org/sites/default/files/media/2009%2011%20Electric%20Shock%20Electric%20Cars.pdf> (letzter Zugriff 12.1.2012).
- European network of transmission system operators für electricity [entsoe] (2011): Exchange Data. Online verfügbar unter: <https://www.entsoe.eu/resources/data-portal/exchange> (letzter Zugriff 6.1.2012).
- European Research Group on Mobile Emission Sources [ERMES] (2010): Handbuch für Emissionsfaktoren 3.1. Bern.
- Forrester, J. W. (1971): World dynamics. Cambridge.

- Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation [IAO]; PricewaterhouseCoopers AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft [PwC] (2010): Elektromobilität. Herausforderungen für Industrie und öffentliche Hand. Frankfurt am Main.
- Fried, I.; Ayalon, O. (2011): EASYBAT – Easy and safe battery switch in an EV. Project Introduction. Vortrag, gehalten im Rahmen des 43rd LCA Discussion Forums, Life Cycle Assessment of Electromobility: ETH Zürich.
- Frischknecht, R. (2011): Life Cycle Assessment of Driving Electric Cars and Scope Dependent LCA models. Vortrag, gehalten im Rahmen des 43rd LCA Discussion Forums, Life Cycle Assessment of Electromobility.
- Gläser, J.; Laudel, G. (2010): Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse. 4. A. Wiesbaden.
- Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme [GEMIS] (2010): Ergebnisdaten „g46-results_ aug2010daten1“. Excel-Datei. Version 4.6. Online verfügbar unter: www.oeko.de/service/gemis/de/material.htm (letzter Zugriff 10.1.2012).
- Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme [GEMIS] (o. J.): Version 4.6. Online verfügbar unter: <http://www.oeko.de/service/gemis/de/index.htm> (letzter Zugriff 10.1.2012).
- Glötz-Richter, M. (2010): The Future of Mobility. Options for sustainable transport in a low carbon society. Gehalten auf der Expo Shanghai, Präsentation, Shanghai. Online verfügbar unter: http://www.care-north.eu/sites/default/files/Day%201_01_Michael%20Glötz-Richter_-Intro-Bremen.pdf (letzter Zugriff 11.1.2012).
- Häder, M. (2010): Klimaschutzpolitik in Deutschland – eine ökonomische Konsistenzanalyse der Rahmenbedingungen für den Strommarkt. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft, Ausgabe 1, Seite 11-19.
- Halder, M. (2011): Electric mobility – opportunities for sustainable transport by rail and road. Vortrag, gehalten im Rahmen des 43rd LCA Discussion Forums, Life Cycle Assessment of Electromobility: Zürich.
- Hannig, F. et al. (2009): Stand und Entwicklungspotenzial der Speichertechniken für Elektroenergie – Ableitung von Anforderungen an und Auswirkungen auf die Investitionsgüterindustrie. Abschlussbericht. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme [ISE], Fraunhofer-Anwendungszentrum Systemtechnik [AST], VKPartner.
- Hautzinger, H.; Tassaux-Becker, B.; Hamacher, R. (1991): Elektroauto und Mobilität: das Einsatzpotential von Elektroautos. Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt FE-Nr. 70379/91 des Bundesverkehrsministeriums. Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung. Heilbronn.
- Held, M. (2011): Current LCA results and need for further research. Vortrag, gehalten im Rahmen des 43rd LCA Discussion Forums, Life Cycle Assessment of Electromobility. ETH Zürich.
- Helmers, E. (2010): Bewertung der Umwelteffizienz moderner Autoantriebe – auf dem Weg vom Diesel-Pkw-Boom zu Elektroautos. In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung, Ausgabe 22, Seite 564-578.
- Helms, H. et al. (2011): UMBReLA - Umweltbilanzen Elektromobilität (Ergebnisbericht). Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung [ifeu].
- Heymann, E.; Koppel, O.; Puls, T. (2011): Elektromobilität Sinkende Kosten sind conditio sine qua non. Frankfurt am Main: Deutsche Bank Research; Institut der deutschen Wirtschaft Köln [IW]. Online verfügbar unter: [http://www.dbresearch.de/servlet/reweb2.ReWEB?rwnode=DBR_INTERNET_DE-PROD\\$NEU&rwsite=DBR_INTERNET_DE-PROD](http://www.dbresearch.de/servlet/reweb2.ReWEB?rwnode=DBR_INTERNET_DE-PROD$NEU&rwsite=DBR_INTERNET_DE-PROD) (letzter Zugriff 11.1.2012).
- Horst, J.; Frey, G.; Leprich, U. (2009): Auswirkungen von Elektroautos auf den Kraftwerkspark und die CO₂-Emissionen in Deutschland. Frankfurt am Main: World Wide Fund For Nature [WWF].
- Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH [IFEU] (2010): Fortschreibung und Erweiterung "Daten und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030. (TREMOMOD, Version 5). Endbericht. Heidelberg.
- International Energy Agency [IEA] (2011): Technology Roadmap - Electric and plug-in hybrid electric vehicles. Frankreich: International Energy Agency.

- International Journal for Nuclear Power [atw] (2010): Kernkraftwerke in Deutschland: Betriebsergebnisse 2009. Online verfügbar unter: www.kernenergie.de/kernenergie/documentpool/Service/602atw-betriebsergebnisse-kkw2009.pdf (letzter Zugriff 5.1.2012).
- Jakob, M. (2011): Methodological approaches for determining marginal electricity mixes. Vortrag, gehalten im Rahmen des 43rd LCA Discussion Forums, Life Cycle Assessment of Electromobility. ETH Zürich.
- Jaskula, B. W. (2009): 2007 Minerals Yearbook . Lithium [advance release]. U.S. Geological Survey.
- Kaiser, O. S.; Meyer, S.; Schippl, J. (2011): Elektromobilität. Düsseldorf: Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH.
- Knie, A. et al. (1999): Die Neuerfindung urbaner Mobilität. Elektroautos und ihr Gebrauch in den USA und Europa. Herausgegeben vom Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung [WZB]. Berlin: Ed. Sigma.
- Knie, A.; Berthold, O. (1995): Das Ceteris paribus-Syndrom in der Mobilitätspolitik. Tatsächliche Nutzungsprofile von elektrischen Straßenfahrzeugen. Veröffentlichungsreihe der Abteilung „Organisation und Technikgenese“ des Forschungsschwerpunkts Technik-Arbeit-Umwelt am WZB. WZB papers FS 95-104. Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung [WZB]. Berlin.
- Knie, Andreas (1999): Die Nutzer. In: Dienel, Hans-Liudger (Hg.) (1999): Erdgas- und Elektrofahrzeuge in Berlin: Zukunftskonzepte für emissionsarme Fahrzeugflotten. Berlin: Ed. Sigma. S. 141-149.
- Koepp, M.; Krampe, L.; Peter, F. (2011): Letztverbrauch bis 2016 – Planungsprämissen für die Berechnung der EEG-Umlage. Berlin: Prognos AG. Online verfügbar unter: http://www.eeg-kwk.net/de/file/111115_Prognos_Letztverbrauch_bis_2016.pdf (letzter Zugriff 13.1.2012).
- Kohler, S. (2011): Arbeitsgruppe Netzentwicklungsplan. Gehalten auf der Zukünftige Energienetze, Berlin. Online verfügbar unter: http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Projekte/ESD/110705_AGNEP_dena_Bericht_PlattformNetze.pdf (letzter Zugriff 13.1.2012).
- Kraftfahrt-Bundesamt [KBA] (2007): Dieselpartikel auf dem Prüfstand. Neuzulassungen – Emissionen, Kraftstoffe. Kurzberichte im Jahr 2007.
- Kraftfahrt-Bundesamt [KBA] (2008): Diesel auf dem Rückzug. Neuzulassungen – Emissionen, Kraftstoffe, Kurzberichte im Jahr 2008.
- Kraftfahrt-Bundesamt [KBA] (2009): Fahrzeugzulassungen. Neuzulassungen – Emissionen, Kraftstoffe, Jahr 2008. Statistische Mittelungen des Kraftfahrt-Bundesamtes.
- Kraftfahrt-Bundesamt [KBA] (2010): Neuzulassungen und Besitzumschreibungen von Kraftfahrzeugen nach Emissionen und Kraftstoffen. Jahr 2010. FZ 14.
- Kraftfahrt-Bundesamt [KBA] (2011a): Bestand an Kraftfahrzeugen nach Emissionen und Kraftstoffen. 1. Januar. FZ 13.
- Kraftfahrt-Bundesamt [KBA] (2011b): Bestand an Personenkraftwagen in den Jahren 2006 bis 2011 nach Kraftstoffarten. Online verfügbar unter: www.kba.de/cln_005/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/b__emi__z__teil__2.html (letzter Zugriff 18.1.2012).
- Kraftfahrt-Bundesamt [KBA] (2011c): CO₂-Emission bei 152 Gramm. Pressemitteilung.
- Kraftfahrt-Bundesamt [KBA] (2011d): Immer weniger Trabis. Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes. Online verfügbar unter: www.KBA.de/cln_032/nn_191188/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugalter/2011__b__trabis__pdf,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/2011_b_trabis_pdf.pdf (letzter Zugriff 18.1.2012).
- Kraftfahrt-Bundesamt [KBA] (2011e): Methodische Erläuterungen zu Statistiken über Fahrzeugzulassungen.
- Kraftfahrt-Bundesamt [KBA] (2011f): Neuzulassungen von Personenkraftwagen in den Jahren 2005 bis 2010 nach Kraftstoffarten.
- Kraftfahrt-Bundesamt [KBA] (2011g): Neuzulassungsbarometer Personenkraftwagen im August 2011 nach ausgewählten Merkmalen (Teil 2). Online verfügbar unter:

http://www.KBA.de/cdn_031/nn_330190/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/201108GV1monatlich/201108__n__barometer__teil2__tabelle.html (letzter Zugriff 18.1.2012).

- Krause, F.; Bossel, H.; Müller-Reißmann, K.-F. (1980): Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran – Ein Alternativ-Bericht des Öko-Instituts/Freiburg. Freiburg: Öko-Institut e.V.
- Krüger, C. (2010): Energiespeicher - Herausforderungen an Technologie und Entwicklung. Bizepsgazelle. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Kunz, F. et al. (2011): Nachfragesicherung und Lastflüsse nach dem Abschalten von Kernkraftwerken in Deutschland – Sind Engpässe zu befürchten? Electricity Markets Working Papers, WP-EM-44, . Online verfügbar unter: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_wirtschaftswissenschaften/bwl/ee2/lehrstuhlseiten/ordner_programmes/ordner_ge/wp_em_44_Kunz_et%20al_Kernkraftwerksausstieg.pdf (letzter Zugriff 17.1.2012).
- Lahl, U. (2009): Zukünftige Antriebe für Automobile aus Sicht der Bundesregierung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [BMU].
- Lambrecht, U. (2011): Electric vehicles in a future energy system context. Vortrag, gehalten im Rahmen des 43rd LCA Discussion Forums, Life Cycle Assessment of Electromobility. ETH Zürich.
- Leipziger Institut für Energie GmbH [IE Leipzig] (2011): Mittelfristprognose zur deutschlandweiten Stromerzeugung aus regenerativen Kraftwerken bis 2016. Online verfügbar unter: http://www.eeg-kwk.net/de/file/111115_IE-Leipzig_EEG-Mittelfristprognose_bis_2016.pdf (letzter Zugriff 16.1.2012).
- Leitinger, C.; Litzlbauer, M. (2011): Netzintegration und Ladestrategien der Elektromobilität. In: e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Ausgabe 1-2, Seite 10-15.
- Lesemann, M. et al. (2011): Advanced Electric Vehicle Architectures - Societal scenarios and available technologies for electric vehicle architectures in 2020. Endbericht. Aachen: ELVA Consortium.
- Lubbadeh, J. (2011): Elektroautos können Klimafreundlich sein. In: Greenpeace Magazin, Ausgabe Februar 2011, Seite 23-30.
- Luhmann, J. (2011): 100 Prozent Strom aus erneuerbaren Quellen in Deutschland. In: GAIA, Ausgabe 4, Band 20, Seite 217.
- Marques, P.; Freire, F. (2011): Comparative life-cycle assessment of electric and conventional vehicles in Portugal. Vortrag, gehalten im Rahmen des 43rd LCA Discussion Forums, Life Cycle Assessment of Electromobility: ETH Zürich.
- Marwede, M.; Knoll, M. (2010): Dossier Elektromobilität und Dienstleistungen. Arbeitsbericht Nr. 39/2010. Berlin: ITZ Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung.
- Mathoy, A. (2008): Die Entwicklung bei Batterien und Antriebstechnik für Elektroautomobile. In: Bulletin SEV/VSE, Ausgabe 1, Seite 8-13.
- Mattes, K. et al. (2010): Anwendungsfelder mobiler Energiespeicher - Eine Bestandsaufnahme und Perspektiven für die Konzeption aussichtsreicher Geschäftsmodelle für Elektrofahrzeuge (Nr. 2). Working Paper Sustainability and Innovation. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung [ISI] Competence Center Industrie- und Serviceinnovationen.
- Mauch, W. et al. (2010): Modellregion Elektromobilität München. Szenarien für das Potenzial an Elektrofahrzeugen im Münchner Individualverkehr bis 2030. Endbericht Nr. swm-03. München: Stadtwerke München [SWM]; Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. [FfE].
- McKinsey, et al. (2010): A portfolio of power-trains for Europe: A fact-based analysis. Online verfügbar unter: http://www.europeanclimate.org/documents/Power_trains_for_Europe.pdf (letzter Zugriff 16.1.2012).
- Meadows, D. L. et al. (1972): Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Stuttgart: Club of Rome.
- Merten, F. (2010): Elektromobilität - Zukunftsmarkt und Forschungsfeld. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.

- Mock, P. et al. (2009): Electric vehicles – A model based assessment of future market prospects and environmental impacts. Gehalten auf der EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Stavanger, Norwegen.
- Müller, B. (2009): Strom auf Vorrat. In: Fraunhofer-Magazin, Ausgabe 4.
- Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie [NOW] (2011a): Ergebnisbericht 2011 der Modellregionen Elektromobilität (Endbericht). Berlin.
- Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie [NOW] (2011b): Jahresbericht 2010. Berlin.
- Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie [NOW] (o. J.). Ein Portfolio von Antriebssystemen für Europa: Eine faktenbasierte Analyse - Die Rolle von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen, Plug-in Hybridfahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen. Berlin.
- Nationale Plattform Elektromobilität [NPE] (2010a): Arbeitsgruppe 4 – Eckpunktepapier Normung, Standardisierung und Zertifizierung. Berlin. Online verfügbar unter:
<http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/60004/publicationFile/30841/elektromobilitaet-ag-4.pdf>
 (letzter Zugriff 12.1.2012).
- Nationale Plattform Elektromobilität [NPE] (2010b): Bericht der Arbeitsgruppe 2 Batterietechnologie für den Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Berlin. Online verfügbar unter:
<http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/60000/publicationFile/30839/elektromobilitaet-ag-2.pdf>
 (letzter Zugriff 12.1.2012).
- Nationale Plattform Elektromobilität [NPE] (2010c): Zwischenbericht der Arbeitsgruppe 1 Antriebstechnologie und Fahrzeugintegration. Berlin. Online verfügbar unter:
<http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/59998/publicationFile/30838/elektromobilitaet-ag-1.pdf>
 (letzter Zugriff 12.1.2012).
- Nationale Plattform Elektromobilität [NPE] (2010d): Zwischenbericht der Arbeitsgruppe 3 Lade-Infrastruktur und Netzintegration. Berlin. Online verfügbar unter:
<http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/60002/publicationFile/30840/elektromobilitaet-ag-3.pdf>
 (letzter Zugriff 12.1.2012).
- Nationale Plattform Elektromobilität [NPE] (2010e): Zwischenbericht der Arbeitsgruppe 5 Materialien und Recycling. Berlin. Online verfügbar unter:
<http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/60008/publicationFile/30842/elektromobilitaet-ag-5.pdf>
 (letzter Zugriff 12.1.2012).
- Nationale Plattform Elektromobilität [NPE] (2010f): Zwischenbericht der Arbeitsgruppe 6 Ausbildung und Qualifizierung. Berlin. Online verfügbar unter:
<http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/60006/publicationFile/30844/elektromobilitaet-ag-6.pdf>
 (letzter Zugriff 12.1.2012).
- Nationale Plattform Elektromobilität [NPE] (2010g): Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Berlin. Online verfügbar unter:
<http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/60020/publicationFile/30870/elektromobilitaet-zwischenbericht.pdf> (letzter Zugriff 12.1.2012).
- Nationale Plattform Elektromobilität [NPE] (2011): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Berlin: Nationale Plattform Elektromobilität.
- Nebel, A.; Krüger, C.; Merten, F. (2011): Vehicle to Grid and Demand Side Management – An Assessment of Different Strategies for the Integration of Electric Vehicles, Manuskript: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Nickel, M. (2011): Entwicklungen in der Stromwirtschaft 2011. Gehalten auf der Sitzung der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen Hamburg.
- Niesling, B. (2009a): Mit dem Strom fahren. In: Fraunhofer-Magazin, Ausgabe 4/2009.
- Niesling, B. (2009b): Strom aus der Konserve. In: Fraunhofer-Magazin, Ausgabe 1/2009.

- Nischler, G. et al. (2011): Auswirkungen von Elektromobilität auf das Energiesystem. In: e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Ausgabe 1-2, Seite 53-57.
- Nitsch, J. et al. (2010): Leitstudie 2010. Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Stuttgart, Kassel, Teltow: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt [DLR]; Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik [IWES]; Ingenieurbüro für neue Energien [IFNE]. Online verfügbar unter: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010_bf.pdf (letzter Zugriff 11.1.2012).
- Öko-Institut e.V.; Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt [DLR] – Institut für Verkehrsforschung (2009): RENEWABILITY „Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030“. Endbericht Teil 1. Berlin.
- Pehnt, M. et al. (2011): Elektroautos in einer von erneuerbaren Energien geprägten Energiewirtschaft. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft, Ausgabe 3, Seite 221-234.
- Pehnt, M.; Höpfner, U.; Merten, F. (2007a): Elektromobilität und erneuerbare Energien. Working Paper. Heidelberg, Wuppertal: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH [ifeu], Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Peters, A.; Dütschke, E. (2010): Zur Nutzerakzeptanz von Elektromobilität: Analyse aus Expertensicht. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung [ISI].
- Pohl, W. L. (2005): Mineralische und Energie-Rohstoffe. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Potsdam Institut für Klimafolgenforschung [PIK]; Institut für Infrastruktur- und Ressourcenmanagement [IIRM] der Univ. Leipzig (2011): Der Einstieg in den Ausstieg: Energiepolitische Szenarien für einen Atomausstieg in Deutschland. Potsdam, Leipzig. Kurzfassung online verfügbar unter: <http://www.pik-potsdam.de/research/research-domains/sustainable-solutions/research/MitigationScenarios/energiewende/imagefolder/kurzfassung> (letzter Zugriff 13.1.2012).
- PricewaterhouseCoopers (PwC); Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation [IAO] (2010): Elektromobilität. Herausforderungen für Industrie und Handel. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter: www.iao.fraunhofer.de/images/downloads/elektromobilitaet.pdf (letzter Zugriff 11.1.2012).
- Rantik, M. (1999): Life cycle assessment of five batteries for electric vehicles under different charging regimes. Stockholm: KFB.
- Referat IG I 5, Umwelt und Verkehr, Elektromobilität (2011): Die Umweltbilanz muss stimmen. In: UMWELT, Ausgabe 4, Seite 40-43.
- Richter, J.; Lindenberger, D. (2010): Elektromobilität als CO₂-Vermeidungsoption. Ergebnisse einer aktuellen EW-Studie. In: e|mw, Ausgabe 4/2010, Seite 20-22.
- Ritthoff, Michael/Schallaböck, Karl Otto (2012): Ökobilanzierung der Elektromobilität – Themen und Stand der Forschung. Teilbericht im Rahmen der Umweltbegleitforschung Elektromobilität im Förderschwerpunkt „Modellregionen Elektromobilität“. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Rohwer, G.; Pötter, U. (2001): Grundzüge der sozialwissenschaftlichen Statistik. Grundlagentexte Soziologie. Weinheim: Juventa.
- Roland Berger Strategy Consultants GmbH (2009): Elektromobilität: Geschäftsmodell entscheidender Erfolgsfaktor. Pressemitteilung, 2.09.2009. Wien. Online verfügbar unter: http://www.rolandberger.at/media/pdf/Roland_Berger_PM_E-Mobility_20090902.pdf (letzter Zugriff am 13.11.2009).
- Ruhe, H. (2011): BMVBS – Nationale Plattform Umwelt. Anpassung einer Schnittstelle zum Datentransfer. Leinenfeld-Echterdingen: PE International GmbH.
- Rydh, C. J. (2003): Environmental Assessment of Battery Systems: Critical Issues for Established and Emerging Technologies. Göteborg: Chalmers University of Technology.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen [SRU] (2010): 100% erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar. Stellungnahme. Online verfügbar unter:

http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2010_05_Stellung_15_erneuerbareStromversorgung.pdf?__blob=publicationFile.

- Samadi, S. et al. (2011): Kurzstudie zu möglichen Strompreiseffekten eines beschleunigten Ausstiegs aus der Nutzung der Kernenergie. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Online verfügbar unter: Online verfügbar unter:
http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wiprojekt/Strompreiseffekte_Endbericht.pdf (letzter Zugriff 11.1.2012).
- Samaras, C.; Meisterling, K. (2008): Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy. *Environmental Science and Technology*, 42(9), S. 3170-3176.
- Schade, W. et al. (2011): VIVER Vision für nachhaltigen Verkehr in Deutschland (Nr. 3). Working Paper Sustainability and Innovation. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI) Competence Center Industrie- und Serviceinnovationen.
- Schallaböck, Karl Otto (2012): Überlegungen zu Lärm und Schadstoffen im Zusammenhang mit dem Betrieb von Elektrofahrzeugen. Teilbericht im Rahmen der Umweltbegleitforschung Elektromobilität im Förderschwerpunkt „Modellregionen Elektromobilität“. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Schallaböck, Karl Otto/Carpantier, Rike (2012): Umweltbegleitforschung für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge: Auswahl der Vergleichsfahrzeuge. Teilbericht im Rahmen der Umweltbegleitforschung Elektromobilität im Förderschwerpunkt „Modellregionen Elektromobilität“. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Schallaböck, Karl Otto/Fischedick, Manfred (2012): Strommix beim Betrieb von Elektrofahrzeugen. Teilbericht im Rahmen der Umweltbegleitforschung Elektromobilität im Förderschwerpunkt „Modellregionen Elektromobilität“. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Schill, W.-P. (2010): Elektromobilität in Deutschland: Chancen, Barrieren und Auswirkungen auf das Elektrizitätssystem. Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung, 2/2010, S. 139-159.
- Schill, W.-P. (2010): Elektromobilität: Kurzfristigen Aktionismus vermeiden, langfristige Chancen nutzen. In: DIW-Wochenbericht Nr. 27-28. S. 2-9. Online verfügbar unter:
http://www.diw.de/de/diw_01.c.358374.de/themen_nachrichten/elektromobilitaet_aktionismus_vermeiden_aber_chancen_nutzen.html (letzter Zugriff 11.1.2012).
- Schill, W.-P. (2010): Wir sollten von der Elektromobilität kurzfristig nicht zu viel erwarten. Sechs Fragen an Wolf-Peter Schill. DIW Wochenbericht, 77. Jg., S. 27-28.
- Schlesinger, M.; Lindenberger, D.; Lutz, C. (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Basel, Köln, Osnabrück: Prognos AG; Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln [EWI]; Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH [GWS]. Online verfügbar unter:
http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/11_08_12_Energieszenarien_2011.pdf (letzter Zugriff 17.1.2012).
- Schlick, T. et al. (2011): Zukunftsfeld Elektromobilität - Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau (Studie). Roland Berger Strategy Consultants.
- Scholz, W. (2010): NO₂-Immissionsbelastung in Deutschland und Baden-Württemberg. Vortrag, gehalten auf der NO₂-Tagung 2010. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg [LUBW].
- Schuchmann, C.; Kriegsch, O. (2010): e-trans. Wir fahren mit dem Strom. Grüne City Logistic UG.
- Simons, A. (2011): LCA comparison of electric drivetrains in passenger cars. Vortrag, gehalten im Rahmen des 43rd LCA Discussion Forums, Life Cycle Assessment of Electromobility: ETH Zürich.
- Siret, C. (2011): Emobility at Saft and JCS. Vortrag, gehalten im Rahmen des 43rd LCA Discussion Forums, Life Cycle Assessment of Electromobility: ETH Zürich.
- Stangner, P. (2011): Paradigmawandel automobiler Antriebstechnologien: eine techno-ökonomische Analyse unter Berücksichtigung umweltpolitischer Instrumente. Düsseldorf: VDI-Verl.
- Steven, H. (2005): Ermittlung der Geräuschemission von Kfz im Straßenverkehr (Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes). Würselen: TÜV Nord Mobilität - RWTÜV Fahrzeug GmbH.
- Stratmann, K. (2010): Gas statt Strom, der Umwelt zuliebe. Handelsblatt.

- TÜV SÜD (2009): Zeit ist reif für E-Mobilität. Pressemitteilung.
- U.S. Geological Survey (2009): Mineral commodity summaries 2009: U.S. Geological Survey.
- Umweltbundesamt [UBA] (2011a): Aktuelle Immissionsdaten und Ozonvorhersage; Stickstoffdioxid: Deutschlandkarte, 1-Stunden-Mittelwerte, 01.07.2011, 09:00 Uhr. Online verfügbar unter: www.env-it.de/umweltbundesamt/luftdaten/map.fwd?comp=NO2.
- Umweltbundesamt [UBA] (2011b): Aktuelle Immissionsdaten und Ozonvorhersage; Stickstoffdioxid: Deutschlandkarte, 1-Stunden-Tagesmaxima, 30.06.2011. Online verfügbar unter: www.env-it.de/umweltbundesamt/luftdaten/map.fwd?comp=NO2&type=1TMAX&date=20110630&time=-1&state=UB&version=v1.
- Umweltbundesamt [UBA] (2011c): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2009 und erste Schätzung 2010. Online verfügbar unter: www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf.
- Umweltbundesamt [UBA] (2011d): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen, 1990 - 2009 (Endstand 08.03.2011, v1.3.0). Online verfügbar unter: www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm.
- Universität Duisburg-Essen (2011): Unikate 39: Ingenieurwissenschaften – Herausforderung Elektromobilität. Diverse Beiträge. Universität Duisburg-Essen/Wissenschaftsverlag SSC.
- Verkehrsclub Österreichs (VCÖ) (2009a): Multimodale Mobilität als Chance. Wien. (= Schriftenreihe „Mobilität mit Zukunft“, 3/2009).
- Verkehrsclub Österreichs (VCÖ) (2009b): Potenziale von Elektro-Mobilität. Wien. (Schriftenreihe „Mobilität mit Zukunft“, 2/2009).
- Vollmer, A. (2009): Alternative Antriebskonzepte. Elektroautos im Überblick. In: Automobil-Elektronik. Juni 2009.
- Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I. (2009): Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges: Technologien, Märkte und Implikationen. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Wartig Chemieberatung (o.J.): Feinstaubmessungen und Partikeluntersuchungen. M. Santen. Online verfügbar unter: <http://www.wartig.de/beraten-planen-begutachten/download/Feinstaub-Messung.pdf> (letzter Zugriff 11.1.2012).
- Weibel, T.; Dietrich, P. (1996): Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Antriebssystemen – Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Hybridfahrzeugen. (Gemeinschaftstagung Nr. 1307). VDI Bericht. VDI.
- Weinert, Jonathan X.; Ma, Chaktan; Cherry, Chris (2007): The transition to electric bikes in China: history and key reasons for rapid growth. In: Springer Transportation 34 (3). S. 301-318.
- Weissenberger-Eibl, M. (2009): Potenziale der Elektromobilität aus Sicht der Fraunhofer-Gesellschaft. Ifo-Schnelldienst, 62.2009 (22), S. 8-10.
- Wiedemann, B.; von Essen, C. (2011): Die Zukunft der Mobilität mit oder ohne Verbrennungsmotor. TU International, (Januar) 8+10.
- Wietschel, M. (2010): Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung [Fraunhofer ISI] Competence Center Industrie- und Serviceinnovationen ISI.
- Wietschel, M.; Weindorf, W.; Bünger, U. (2010): Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-freie Energieträger. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung; Ludvig Bölkow Systemtechnik. Online verfügbar unter: http://isi.fraunhofer.de/isi-de/e/download/publikationen/Endbericht_H2_vs_Strom-final.pdf (letzter Zugriff 11.1.2012).
- Wilke, Georg (2002b): Neue Mobilitätsdienstleistungen und Alltagspraxis. Wuppertal. (= Wuppertal Paper Nr. 127).
- Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen [UNECE] (2011): Berichterstattung 2011 unter dem Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung (UN ECE-CLRTAP). Inventar-

tabellen im New Reporting Format (NFR) 1990-2009. Online verfügbar unter:
www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm (letzter Zugriff 11.1.2012).

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen [WBGU] (2009): Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz (Sondergutachten). Berlin.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen [WBGU] (2011): Welt im Wandel. Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. Berlin

World Health Organization [WHO] (2006): Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution. (Nr. # E88189). Copenhagen.

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (2011): Thesen des Wuppertal Instituts zum geplanten Energiekonzept der Bundesregierung. Wuppertal. Online verfügbar unter:
http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/WI-Thesen_Energiekonzept.pdf (letzter Zugriff 11.1.2012).

Yetano Roche, M. et al. (2009): Public attitudes towards and demand for hydrogen and fuel cell vehicles: A review of the evidence and methodological implications. In: Energy Policy. Volume 38, Issue 10, October 2010, Pages 5301 - 5310.

Zeiss, C. (2009): Elektromobilität NRW - Arbeitsgruppe. Standards / Rahmenbedingungen. Arbeitsgruppen-Papier. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.

Zumkeller, Dirk (2002): Von der Mono- zur Multimodalität im Personenfernverkehr: Wie wenige reisen wie viel?. IfV-Report Nr. 02-3. Arbeitsbericht des Institutes für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe (TH). Ebenfalls erschienen in: FGSV (Hg.), Deutscher Straßen- und Verkehrskongress München 2002. Bonn: Kirschbaum Verlag.

