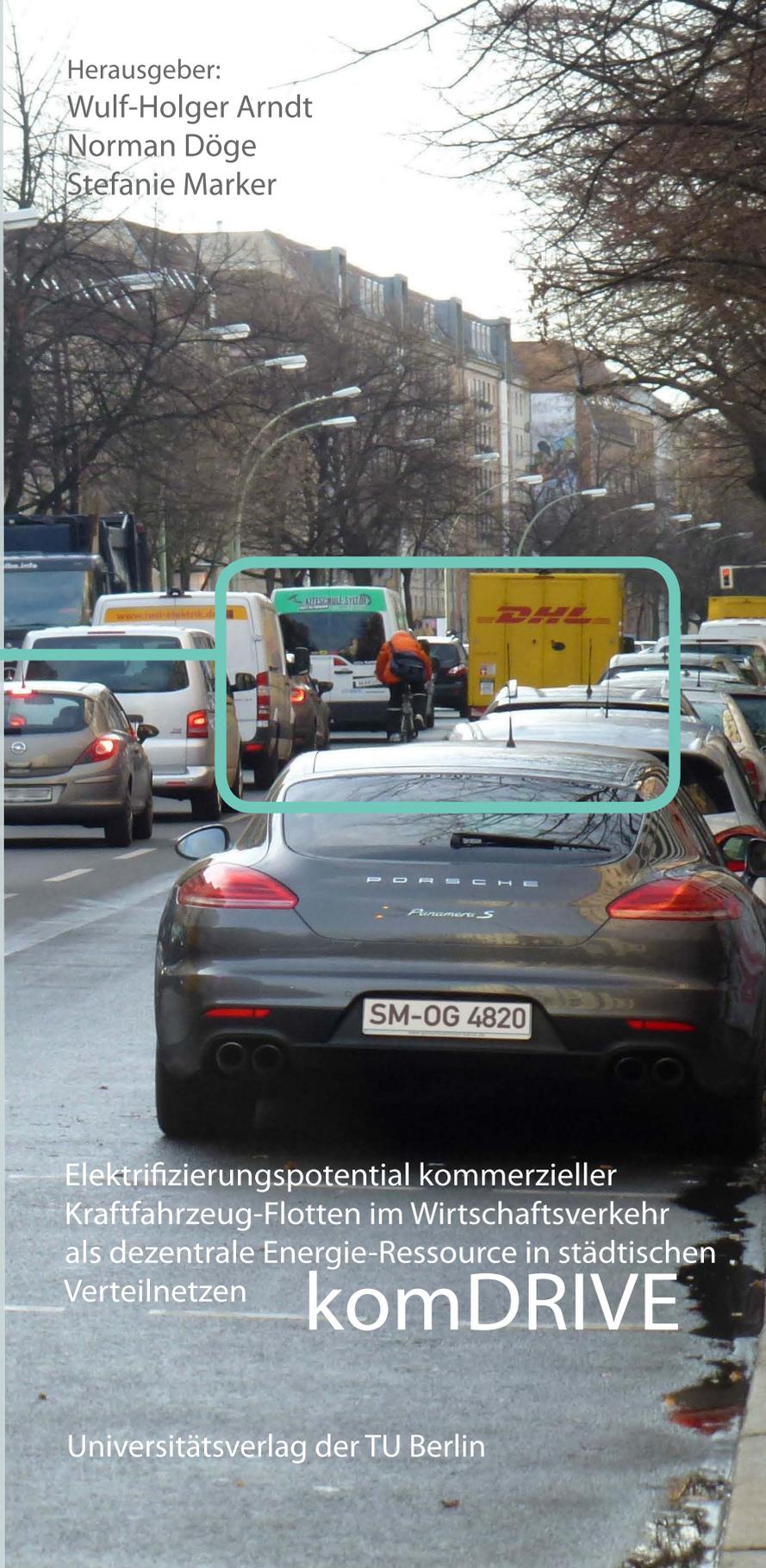
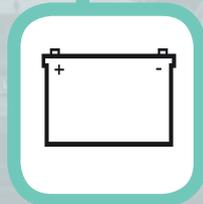


Herausgeber:  
Wulf-Holger Arndt  
Norman Döge  
Stefanie Marker



Elektrifizierungspotential kommerzieller  
Kraftfahrzeug-Flotten im Wirtschaftsverkehr  
als dezentrale Energie-Ressource in städtischen  
Verteilnetzen

**komDRIVE**

Universitätsverlag der TU Berlin



Wulf-Holger Arndt | Norman Döge | Stefanie Marker (Hrsg.)

**Elektrifizierungspotential kommerzieller Kraftfahrzeug-Flotten  
im Wirtschaftsverkehr als dezentrale Energie-Ressource  
in städtischen Verteilnetzen – komDRIVE**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Elektrifizierungspotential kommerzieller Kraftfahrzeug-Flotten  
im Wirtschaftsverkehr als dezentrale Energie-Ressource  
in städtischen Verteilnetzen – komDRIVE**

Herausgeber:  
Wulf-Holger Arndt  
Norman Döge  
Stefanie Marker

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

**Universitätsverlag der TU Berlin, 2016**

<http://verlag.tu-berlin.de>

Fasanenstr. 88, 10623 Berlin

Tel.: +49 (0)30 314 76131 / Fax: -76133

E-Mail: [publikationen@ub.tu-berlin.de](mailto:publikationen@ub.tu-berlin.de)

Alle Texte dieser Veröffentlichung – ausgenommen Zitate und Umschlag – sind unter der CC-Lizenz CC BY lizenziert.

Lizenzvertrag: Creative Commons Namensnennung 4.0

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Umschlagfoto: Norman Döge | Piktogramm entstammen der StVO

Umschlaggestaltung: Fabian Sachmann

Druckerei: docupoint GmbH

Satz/Layout: Marco Gampe, Gordon Jamerson, Fabian Sachmann, Oliver Stuve

**ISBN 978-3-7983-2801-3 (print)**

**ISBN 978-3-7983-2802-0 (online)**

Zugleich online veröffentlicht auf dem institutionellen Repositoryum der Technischen Universität Berlin:

DOI 10.14279/depositonce-4984

<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-4984>

# Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Arbeiten und Ergebnisse des Forschungsprojekts komDRIVE (Laufzeit 01.09.2013 bis 30.06.2016), das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter den Kennzeichen 03ET4012A bis C gefördert wurde.

Das Projekt befasst sich mit dem Elektrifizierungspotenzial kommerzieller Kraftfahrzeugflotten im Wirtschaftsverkehr als dezentrale Energie-Ressource in städtischen Verteilnetzen. Darin wurde eine ganzheitliche Lösungsstrategie für das Zusammenspiel von fortlaufender Dominanz CO<sub>2</sub>-intensiver Dieselantriebe im städtischen Wirtschaftsverkehr in Kombination mit einer erwarteten Zunahme der Verkehrsleistung auf der einen Seite und der Problematik der Energiespeicherung bei Zunahme des Anteils dezentral erzeugter Energie auf der anderen Seite entwickelt.

Das Projekt wurde im Verbund zwischen den Partnern

- Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung - Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE),
- Technische Universität Berlin, Institut für Land- und Seeverkehr (ILS), Fachgebiet Kraftfahrzeuge, später Fachgebiet Fahrerverhaltensbeobachtung für energetische Optimierung und Unfallvermeidung (FVB) (Koordination),
- Technische Universität Berlin, Fakultät Elektrotechnik und Informatik, Fachgebiet Energieversorgungsnetze und Integration erneuerbarer Energien (SENSE),
- Technische Universität Berlin, Zentrum für Technik und Gesellschaft (ZTG),
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

durchgeführt. Begleitend zur Projektbearbeitung wurde ein Industriebeirat eingerichtet. Wir danken den Mitgliedern, der Ford-Forschungszentrum Aachen GmbH, der NBB Netzgesellschaft Berlin-Brandenburg mbH & Co. KG, der Schneider Electric GmbH und den Berliner Stadtreinigungsbetrieben BSR für die konstruktive Unterstützung. In der Bearbeitungsphase wurden drei Workshops durchgeführt. Auf einem Workshop im April 2015 wurden Vorgehensweise, Lösungsansätze und der Zwischenstand der Projektarbeiten mit Expert\*innen aus Industrie und Wissenschaft erörtert. Im Juli 2015 wurden die Praktikabilität der Lösungsansätze und Hemmnisse in Bezug auf den Umstieg auf Elektrofahrzeuge mit Nutzer\*innen der Fahrzeuge und ebenfalls teilnehmenden Expert\*innen diskutiert. Auf dem Abschlussworkshop im Dezember 2015 wurden die Projektergebnisse vorgestellt und mit Expert\*innen aus verschiedenen Fachbereichen diskutiert. Anregungen für den künftigen Forschungsbedarf und Ideen für den Umgang mit offenen Fragen wurden gemeinsam erarbeitet. Wir danken allen Workshop-Teilnehmer\*innen für die konstruktiven und wertvollen Beiträge sowie Anmerkungen. Ebenso sei den Herren Jamerson, Gampe, Stuve und Sachmann gedankt, die sich maßgeblich um die organisatorischen Fragestellungen im Zusammenhang mit der Erstellung dieses Buches gekümmert und viele Stunden mit Formatierungs- und Layoutarbeiten verbracht haben. Die Projektpartner danken dem BMWi für die finanzielle Unterstützung des Forschungsvorhabens und dem Projektträger Jülich für die administrative Begleitung.

Die Annahmen, Modellansätze und Ergebnisse dieses Forschungsprojektes stellen das Ergebnis der abgestimmten wissenschaftlichen Arbeiten innerhalb des Projektkonsortiums dar. Der Bericht gibt die Auffassung des Projektkonsortiums wieder und muss nicht mit der Auffassung der beteiligten Institutionen übereinstimmen. Insbesondere sind daraus keine Verpflichtungen der beteiligten Institutionen abzuleiten, entsprechende Produkte, Mengen von Produkten oder Lösungen anzubieten. Zudem sind aus den Projektergebnissen keine Ansätze der beteiligten Institutionen für die weitere Verwendung der Ergebnisse zu folgern.

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Abbildungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis .....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	XII
1. Einleitung .....	1
2. Beschreibung des Forschungsprojekts und seiner Ziele .....	5
2.1 Der Städtische Wirtschaftsverkehr – Status Quo und zukünftige Entwicklungen.	5
2.2 Stand der Forschung und Fragestellungen des Projekts .....	33
2.3 Einordnung des Projektes in die Forschungslandschaft .....	39
3. Forschungsansatz (Methodik) .....	44
3.1 Wirtschaftsverkehr, Anwender, Flotten.....	46
3.2 Batteriealterung und Batteriekosten: Methodik.....	59
3.3 Netzintegrationsmanagement .....	72
3.4 Modell zur lokalen Emissionsabschätzung.....	83
3.5 Energiesystemmodell und Szenario-Rahmen .....	91
4. Ergebnisse .....	106
4.1 Fahrzeug- und Flottenebene .....	106
4.2 Batteriealterung und Batteriekosten: Ergebnisse Elektrische Speicher .....	159
4.3 Energieversorgungssystem und Systemdienstleistungen.....	181
4.4 Lokale Emissionsbelastung – Ergebnisse.....	206
4.5 Ergebnisse der Energiesystem-Modellrechnungen.....	216
4.6 Steuerungsinstrumente und deren Auswirkung auf eine Elektrifizierung des städtischen Wirtschaftsverkehrs .....	225
5. Ausblick .....	232
5.1 Schlussfolgerung .....	233
5.2 Zukünftiger Forschungsbedarf .....	235
6. Glossar Wirtschaftsverkehr/Elektromobilität .....	236
7. Autorenübersicht .....	246

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bestandteile des Wirtschaftsverkehrs .....	6
Abbildung 2: Abgeleitete Darstellung der KiD Definition für den Wirtschaftsverkehr.....	8
Abbildung 3: Absoluter Bestand der Fahrzeugklassen im Wirtschaftsverkehr in unterschiedlichen Raumkategorien .....	9
Abbildung 4: Anteile der Fahrzeugklassen im Wirtschaftsverkehr am Gesamtbestand nach Stadt- und Gemeindetypen.....	10
Abbildung 5: Relative Fahrzeugbestände nach Wirtschaftszweig im Jahr 2010 .....	11
Abbildung 6: Mittelwerte der täglichen Fahrzeugleistung im Wirtschaftsverkehr nach Fahrzeugklassen im Vergleich nach Stadt- und Gemeindetypen.....	13
Abbildung 7: Mittelwerte der Tagesfahrzeugleistung im Wirtschaftsverkehr nach Wirtschaftszweigen im Vergleich nach Stadttypen (eigene Darstellung nach KiD 2010).....	15
Abbildung 8: Anteile von Privat- und Wirtschaftsverkehr an der Fahrzeugleistung in der Raumkategorie Stadt .....	16
Abbildung 9: Entwicklung der transportierten Gütermenge in Deutschland 1998 bis 2014.....	17
Abbildung 10: Güterverkehrsleistung in Deutschland 2001 bis 2014.....	17
Abbildung 11: Anteil der Leer-km an der Gesamtfahrleistung im Lkw-Verkehr nach Entfernungsstufen.....	18
Abbildung 12: Flottenzusammensetzung nach Wirtschaftszweigen und Fahrzeugklassen in städtischen Räumen.....	20
Abbildung 13: Anteile unterschiedlicher Antriebsarten am hochgerechneten Gesamtbestand der jeweiligen Fahrzeugklasse.....	21
Abbildung 14: Vergleich der CO <sub>2</sub> -Emissionen der Güterverkehrsmittel.....	23
Abbildung 15: Trend der CO <sub>2</sub> -Emissionen des Güterverkehrs .....	23
Abbildung 16: Anteile Pkw-Individualverkehr und Wirtschaftsverkehr an verschiedenen Emissionen in München 1994 .....	26
Abbildung 17: Einteilung von Kraftfahrzeugen.....	28
Abbildung 18: Die Häufigkeitsverteilung der täglichen Fahrstrecke (blaue Balken), die kumulative Aufsummierung der täglichen Fahrstrecken (in rot).....	34
Abbildung 19: Die Wahrscheinlichkeitsverteilung eines Fahrzeugeinsatzes zu den entsprechenden Tageszeiten .....	34
Abbildung 20: Übersicht der Schadstoffemissionen verschiedener Antriebskonzepte für unterschiedliche Szenarien .....	36
Abbildung 21: Mögliche Anwendungen für Elektrofahrzeuge im Überblick .....	37
Abbildung 22: Vereinfachte Projektstruktur komDRIVE.....	44
Abbildung 23: Vernetzung der Teilmodelle und Arbeitsschritte des Projektes komDRIVE .....	45
Abbildung 24: Datenlogger TU-veLOG .....	55
Abbildung 25: Übersicht der unterschiedlichen Antriebsstrang-Konfigurationen.....	58

Abbildung 26: Im Alterungstest verwendete Li-Ionen-Batterie.....	60
Abbildung 27: Schematische Darstellung der Seitenansicht eines Moduls .....	61
Abbildung 28: Schematische Darstellung des Messaufbaus.....	61
Abbildung 29: Zeitverlauf der Modulleistung für die Fälle L1 – L4 .....	62
Abbildung 30: Schematische Darstellung des Konstantstrom-/Konstantspannungsladens.....	64
Abbildung 31: Zusätzlicher Dickenzuwachs durch Lithium-Plating.....	65
Abbildung 32: Messaufbau zur Bestimmung von Dickenänderungen an Batteriezellen .....	66
Abbildung 33: Plating-Aktivität $f_3$ (SOC) normiert auf die maximale Aktivität bei SOC = 1 .....	71
Abbildung 34: Übersicht des deutschen Strommarktes und Zeitpunkte $t$ für den Handel und des Abrufs vor und nach der physikalischen Erfüllung bei $t = 0$ .....	73
Abbildung 35: Konzept der hierarchischen Steuerung zur Teilnahme von EV am Energiemarkt .....	78
Abbildung 36: Modell zur EV-Flottenoptimierung und Teilnahme am Reservemarkt.....	80
Abbildung 37: Anpassung der Neubedingungen für die Bereitstellung von Regelleistung .....	80
Abbildung 38: (i) homogene und (ii) punktuelle Verteilung von EV im Niederspannungsnetz .....	83
Abbildung 39: Beispiel einer Grenzkurve nach Distanz zur Ortsnetzstation (ONS) .....	83
Abbildung 40: Verteilungsdiagramm (Boxplot) der Preiskurven am Day-Ahead-Markt für das Jahr 2014.....	83
Abbildung 41: Berechnungsablauf des TEECT .....	86
Abbildung 42: Darstellung der Ergebnisse in Google Earth.....	87
Abbildung 43: Das Projektgebiet „Green Moabit“ .....	91
Abbildung 44: Struktur des verwendeten Energiesystemmodells.....	93
Abbildung 45: Schematische Darstellung des Bestandsmodells.....	96
Abbildung 46: Überlebenswahrscheinlichkeiten der gewerblichen Pkw nach Antriebsarten .....	97
Abbildung 47: Überlebenswahrscheinlichkeiten der gewerblichen Lkw < 3,5 t zGG .....	98
Abbildung 48: Entwicklung der Neufahrzeugverkäufe (links) und des Bestands (rechts) der gewerblich zugelassenen Pkw im Referenzszenario.....	100
Abbildung 49: Entwicklung der Bestandszusammensetzung von Pkw mit Dieselantrieb und gewerblichen Haltern .....	100
Abbildung 50: Entwicklung der Neufahrzeugverkäufe (links) und des Bestands (rechts) der gewerblich zugelassenen Lkw im Referenzszenario .....	101
Abbildung 51: Auswahl an Trends zur Bevölkerung (links) und Bruttowertschöpfung (rechts) für Deutschland und Vergleich der komDRIVE-Annahmen zu anderen .....	103
Abbildung 52: Szenariotrend der Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr in Deutschland und Vergleich zu anderen Energieszenarien.....	103
Abbildung 53: Unterstellte Energiekostenentwicklung in den Szenarien und Einordnung zu anderen Energieszenarien Vergleich zu anderen Energieszenarien.....	105
Abbildung 54: Absolute Rückläufe nach Mitarbeiterzahl und Wirtschaftszweig .....	107

Abbildung 55: Fahrzeugeinsatz am Wochenende (n = 90).....	108
Abbildung 56: Haupteinsatzzeiten der Fahrzeuge im eigenen Fuhrpark (n = 90, Mehrfachauswahl möglich) .....	109
Abbildung 57: Haupteinsatzzeiten der Fahrzeuge im eigenen Fuhrpark nach Wirtschaftszweig (n = 90, Relative Auswahlhäufigkeit, Mehrfachauswahl möglich) .....	109
Abbildung 58: Tagesfahrleistungen für Pkw im städtischen Wirtschaftsverkehr nach Wirtschaftszweigen .....	120
Abbildung 59: Tagesfahrleistungen für LNF (Lkw kleiner 3,5 t Nutzlast) im städtischen Wirtschaftsverkehr nach Wirtschaftszweigen .....	120
Abbildung 60: Wegstreckenverteilung aller vermessenen Pkw (oben) und differenziert nach den unterschiedlichen Einsatzzwecken (unten).....	123
Abbildung 61: Aktivität der vermessenen Pkw aufgeschlüsselt nach allen Pkw (schwarz) und den jeweiligen Branchen (Graustufen).....	124
Abbildung 62: Häufigkeitsverteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten aufgeschlüsselt nach allen Pkw und für die jeweiligen Branchen .....	124
Abbildung 63: Wegstreckenverteilung aller vermessenen leichten Lkw (oben) und differenziert nach den unterschiedlichen KEP-Flotten (unten) .....	125
Abbildung 64: Häufigkeitsverteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten aufgeschlüsselt nach allen leichten Lkw und nach Einzelflotten im KEP-Bereich .....	127
Abbildung 65: Aktivität der vermessenen leichten Lkw aufgeschlüsselt nach allen Fahrzeugen (schwarz) und den Einzelflotten (Graustufen) .....	127
Abbildung 66: Wegstreckenverteilung aller vermessenen mittelschweren Lkw.....	128
Abbildung 67: Häufigkeitsverteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten aufgeschlüsselt nach allen mittelschweren Lkw und nach ausgewählten Einzelfahrzeugen.....	128
Abbildung 68: Aktivität der vermessenen mittelschweren Lkw aufgeschlüsselt nach allen Fahrzeugen (schwarz) und den Einzelfahrzeugen (Graustufen).....	129
Abbildung 69: a-v-Diagramme der Fahrzyklen: Pkw (oben links), leichte Lkw (oben rechts), mittelschwere Lkw (unten).....	130
Abbildung 70: Anzahl der Pkw gewerblicher und privater Halter nach Hubraum .....	134
Abbildung 71: Anzahl der Pkw gewerblicher und privater Halter nach Hubraum unter und über 1,6 l.....	134
Abbildung 72: skaliertes Motorkennfeld eines Pkw mit $V_H = 1,6$ l.....	135
Abbildung 73: skaliertes Motorkennfeld eines 12-t-Lkw mit $V_H = 5,1$ l.....	135
Abbildung 74: Entwicklung des Rollwiderstandsbeiwertes.....	137
Abbildung 75: $c_W$ -Werte unterschiedlicher Nutzfahrzeuge .....	138
Abbildung 76: Entwicklung der Energiedichte in Wh/kg von 2015 bis 2030.....	139
Abbildung 77: Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen Verbrauchswerte aller Fahrzyklen leichter Lkw (oben) und Korrelation des Verbrauchs mit Tagesfahrstrecken (unten) unterschieden nach batterieelektrischen Fahrzeugen (links) und konventionellen Diesel-Fahrzeugen (rechts).....	152

Abbildung 78: Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen Verbrauchswerte aller Fahrzyklen leichter Lkw (oben) und Korrelation des Verbrauchs mit Tagesfahrstrecken (unten) für PHEV	154
Abbildung 79: Gesamtbetriebskosten pro Kilometer im komDRIVE-Szenario	157
Abbildung 80: Normierter Kapazitätsverlust der vier Module für die Ladestrategien und Strommarktteilnahmeszenarien L1 – L4 als Funktion der Zeit in Tagen	160
Abbildung 81: Normierter Kapazitätsverlust der vier Module für die Ladestrategien und Strommarktteilnahmeszenarien L1 – L4 als Funktion des Energiedurchsatzes pro Zelle	160
Abbildung 82: Vergleich der Impedanzspektren der Fälle L1 – L4 zu Beginn der Tests und nach 381 Tagen gemessen an je einer Zelle der Module bei 22,5 °C und 50 % SOC dargestellt in Nyquist-Diagrammen mit negativer Ordinate	161
Abbildung 83: kalendarische Alterung in Abhängigkeit von Temperatur und Ladezustand	163
Abbildung 84: Impedanzspektroskopie zur SOC-Abhängigkeit der kalendarischen Alterung	164
Abbildung 85: Alterung durch Zyklisierung bei einer Stromrate von 1C für unterschiedliche Temperaturen (Dezimaltrennzeichen nach englischer Notation)	164
Abbildung 86: Impedanzspektroskopie zur zyklischen Alterung bei niedrigen Temperaturen	165
Abbildung 87: Impedanzspektroskopie zur zyklischen Alterung bei höheren Temperaturen, C3: $T = 17.5\text{ °C}$ , C4: $T = 22.5\text{ °C}$	166
Abbildung 88: Dilatation einer einzelnen Zelle während des Ladens und Entladens bei sehr geringer Stromrate ( $I = C/40$ ). Unterteilung der Kennlinie in 3 Bereiche A, B, C	167
Abbildung 89: Prozentuale Dickenwachstum der Dilatation bei Ladeschluss ( $\Delta_{\text{Seoc}}$ ) über der Zyklenzahl bei verschiedenen Temperaturen gemäß der zyklischen Testmatrix in Abschnitt 3.2.1	168
Abbildung 90: Vergleich von gemessenen Daten und parametrimtem Modell der kalendarischen Alterung bei SOC = 60 % für $T = 35\text{ °C}$ , $40\text{ °C}$ und $50\text{ °C}$	169
Abbildung 91: Vergleich von gemessenen Daten und parametrimtem Modell der kalendarischen Alterung für $T = 40\text{ °C}$ bei SOC =30 %, 60 % und 90 %	169
Abbildung 92: Vergleich von Datenpunkten ( $\square$ ) und parametrimtem Modell der zyklenbedingten Alterung (–) mit Hochtemperatur- (– –) und Plating-Anteil (···) als Funktionen der in die Module geladenen Ladungsmenge bei niedrigen Umgebungstemperaturen (C1: $T = 5\text{ °C}$ , C2: $T = 12,5\text{ °C}$ und C3: $T = 17,5\text{ °C}$ )	172
Abbildung 93: Vergleich von Datenpunkten ( $\square$ ) und parametrimtem Modell der zyklenbedingten Alterung (–) mit Hochtemperatur- (– –) und Plating-Anteil (···) als Funktionen des kumulierten Energiedurchsatzes der Module bei Umgebungstemperaturen von $TC4 = 22,5\text{ °C}$ , $TC5 = 40\text{ °C}$ und $TC6 = 50\text{ °C}$	172
Abbildung 94: Übersicht verschiedener Studien zur der Entwicklung der Preise von Lithium-Ionen-Batteriepacks für den Einsatz in BEV von 2012 bis 2025	174
Abbildung 95: Übersicht verschiedener Studien zur der Entwicklung der Preise von Lithium-Ionen-Batteriezellen für den Einsatz in BEV von 2012 bis 2025	175
Abbildung 96: Mittlere Preisentwicklung für Lithium-Ionen-Batterien von 2012 bis 2025 abgeleitet aus der Auswertung der verschiedenen Studien	177
Abbildung 97: Mobiles Fahrverhalten unterschiedlicher elektrifizierter Fahrzeugflotten für eine Flottengröße von 1.000 Fahrzeugen	185
Abbildung 98: Ladestrategie zur Bereitstellung negativer Minutenreserveleistung	186

Abbildung 99: Ladestrategie zur Bereitstellung positiver Minutenreserveleistung mit unterschiedlichen Realisierungsarten .....	187
Abbildung 100: Ladeprofil für die Ladestrategie zur Erhöhung des Grünstromanteils .....	190
Abbildung 101: Energiegehalt und Netzkopplung für die Ladestrategie zur Erhöhung des Grünstromanteils .....	191
Abbildung 102: Lastprofile der Grundlast für verschiedene CIGRE-NS-Netze .....	192
Abbildung 103: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Gewerbegebiet bei 80 % Grundlast, Laden von EV bei punktueller Verteilung .....	197
Abbildung 104: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Gewerbegebiet bei 50 % Grundlast, Laden von EV bei punktueller Verteilung .....	197
Abbildung 105: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Gewerbegebiet bei 50 % Grundlast, Rückspeisen der EV bei punktueller Verteilung .....	198
Abbildung 106: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Gewerbegebiet bei 50 % Grundlast, Rückspeisen der EV bei homogener Verteilung .....	198
Abbildung 107: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Wohngebiet bei 80 % Grundlast, Laden von EV bei punktueller Verteilung .....	204
Abbildung 108: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Wohngebiet bei 50 % Grundlast, Laden von EV bei punktueller Verteilung .....	204
Abbildung 109: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Wohngebiet bei 50 % Grundlast, Rückspeisen durch EV bei punktueller Verteilung .....	205
Abbildung 110: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Wohngebiet bei 50 % Grundlast, Rückspeisen durch EV bei homogener Verteilung .....	205
Abbildung 111: Berechnungsschema des TEECT .....	206
Abbildung 112: Beispiel für Emissionsberechnungen des Wirtschaftsverkehrs .....	208
Abbildung 113: Beispiel für Emissionsberechnung des Kunden-, Besucher- und Beschäftigtenverkehrs .....	209
Abbildung 114: Adaptierter FGSV-Ansatz zur Berechnung der Fahrten des Lieferverkehrs .....	210
Abbildung 115: Adaptierter Ansatz Dornier für Berechnung der Lieferverkehr Fahrten .....	210
Abbildung 116: Beispiel der Emissionsberechnung des Lieferverkehrs .....	210
Abbildung 117: Schritte der Emissionsberechnung im Wirtschaftsverkehr (dieses Modell) .....	211
Abbildung 118: Durchschnittliche tägliche CO <sub>2</sub> -Emissionen von Unternehmen in Green-Moabit für die Jahre 2015, 2020, 2030 .....	214
Abbildung 119: Durchschnittliche tägliche CO-Emissionen von Unternehmen in Green-Moabit für die Jahre 2015, 2020, 2030 .....	215
Abbildung 120: Durchschnittliche tägliche Feinstaub-Emissionen von Unternehmen in Green-Moabit für die Jahre 2015, 2020, 2030 .....	216
Abbildung 121: Primärenergiebilanz im Referenz-Szenario .....	218
Abbildung 122: Endenergiebedarf des Personen- und Güterverkehrs .....	220
Abbildung 123: Installierte Stromerzeugungskapazitäten (oben) und Netto-Stromerzeugungen (unten) im Referenz-Szenario .....	221

Abbildung 124: Energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen in Deutschland.....	223
Abbildung 125: Relative Entwicklung der Systemkosten bezogen auf das Jahr 2010 für das Referenz-Szenario .....	224
Abbildung 126: Zielkurve Marktentwicklung .....	225

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Datenquellen zur Beschreibung des Wirtschaftsverkehrs .....	7
Tabelle 2: Anteile der täglichen Fahrzeugleistung nach Fahrzeugklassen im Wirtschaftsverkehr im Vergleich nach Stadt- und Gemeindetypen (eigene Darstellung nach KiD 2010).....	14
Tabelle 3: Hochgerechneter Fahrzeugbestand nach ausgewählten Antriebsarten im Wirtschaftsverkehr nach Stadt- und Gemeindetypen .....	21
Tabelle 4: Emissionstypen und gesundheitliche Effekte.....	22
Tabelle 5: Innerorts-Fahrleistungsanteile der Kfz-Flotte aus TREMOD 5.1 .....	24
Tabelle 6: Anteile verschiedener Fahrzeugkategorien an den Kfz-Emissionen innerorts .....	25
Tabelle 7: Lkw-Klassen im Güterverkehr.....	29
Tabelle 8: Bestand an ausgewählten Kfz am 1. Jan 2013 in Deutschland. ....	30
Tabelle 9: Neuzulassungen an ausgewählten Kfz im Jahr 2013 .....	30
Tabelle 10: Elektrische Referenzfahrzeuge für den städtischen Wirtschaftsverkehr .....	49
Tabelle 11: Variablenliste der Flottenbetreiber inkl. Kodierung.....	53
Tabelle 12: Variablenliste der Fahrer/-innen inkl. Kodierung. ....	54
Tabelle 13: Übersicht der mit dem veLOG vermessenen Probanden .....	56
Tabelle 14: Zeitraum und Anschlussleistung der getesteten Ladevorgänge .....	61
Tabelle 15: Testmatrix für kalendarische Batteriealterungstests .....	63
Tabelle 16: Testmatrix für zyklische Batteriealterungstests .....	64
Tabelle 17: Day-Ahead Marktdaten für das Jahr 2014. ....	74
Tabelle 18: Marktdaten der Sekundärreserve für das Jahr 2014 .....	76
Tabelle 19: Marktdaten der Minutenreserve für das Jahr 2014.....	77
Tabelle 20: Technische und nutzerspezifische Neubedingungen und Zielfunktionen .....	80
Tabelle 21: Grenzwerte zur Überlastungsprüfung des Netzes .....	82
Tabelle 22: Für die Erweiterung des TEECT relevante Vorstudien/Datenquellen .....	90
Tabelle 23: Errechneter Anteil des städtischen Verkehrs, Wirtschaftsverkehrs und städtischen Wirtschaftsverkehrs an der jeweiligen Gesamtfahrleistung im Szenario.....	105
Tabelle 24: Positive und negative Erfahrungen der Flottenbetreiber mit Elektromobilität .....	111
Tabelle 25: Positive und negative Erfahrungen der Fahrer mit Elektromobilität.....	112
Tabelle 26: Kodierung der Wirtschaftszweige und Fallzahlen der ausgewerteten Fahrzeuge pro Wirtschaftszweig.....	119

Tabelle 27: Übersicht der Motorleistungen in den Stützjahren für die unterschiedlichen Fahrzeugklassen in der Ausführung als BEV .....	132
Tabelle 28: Übersicht der Motorleistungen in den Stützjahren für die unterschiedlichen Fahrzeugklassen für konventionelle dieselbetriebene Fahrzeuge .....	136
Tabelle 29: Übersicht der Batteriekapazitäten der batterieelektrischen Fahrzeuge .....	136
Tabelle 30: Übersicht der Rollwiderstandsbeiwerte der entsprechenden Fahrzeuge .....	137
Tabelle 31: Übersicht der Luftwiderstandsbeiwerte und Stirnflächen der entsprechenden Fahrzeuge .....	139
Tabelle 32: Entwicklung der Energiedichte der Batteriepacks, der spezifischen Leistung der Elektro- und Dieselmotoren sowie der spezifischen Leistung der Leistungselektronik in den Stützjahren von 2015 bis 2030 .....	140
Tabelle 33: Übersicht der Leergewichte und max. Zuladungen der entsprechenden batterieelektrischen Fahrzeuge (gerundet auf volle 5) .....	141
Tabelle 34: Leergewicht und maximale Zuladung der konventionellen Fahrzeuge in kg .....	141
Tabelle 35: Investitionskosten der Fahrzeugkomponenten in den jeweiligen Stützjahren in €2015 ..	142
Tabelle 36: Investitionskosten der Gesamtfahrzeuge in den jeweiligen Stützjahren in €2015 .....	142
Tabelle 37: Zusammenfassung konventioneller Fahrzeuge (ICE Diesel) .....	144
Tabelle 38: Zusammenfassung batterieelektrischer Fahrzeuge .....	146
Tabelle 39: Zusammenfassung Plug-In Hybride .....	148
Tabelle 40: Relative Impedanzanstiege in bestimmten Frequenzbereichen .....	162
Tabelle 41: Zeitlicher Preisverlauf von Lithium-Ionen-Batteriepacks für den Einsatz in BEV abgeleitet aus den betrachteten Literaturstudien .....	173
Tabelle 42: Zeitlicher Preisverlauf von Lithium-Ionen-Batteriezellen für den Einsatz in BEV abgeleitet aus den betrachteten Literaturstudien .....	174
Tabelle 43: Zusammensetzung des Strompreises für EV-Endverbraucher 2015 .....	182
Tabelle 44: Inflationsbereinigte Verbraucherpreise für Strom in Cent/kWh .....	182
Tabelle 45: Anzahl möglicher Kombination bei der Teilnahme am Reservemarkt .....	184
Tabelle 46: Nebenbedingungen der EV-Flottenoptimierung für die jeweils untersuchten kommerziellen EV-Flotten .....	185
Tabelle 47: Anzahl an Fahrten und Tagesfahrleistung der untersuchten kommerziellen EV-Flotten	185
Tabelle 48: Nebenbedingungen der EV-Flottenoptimierung für unterschiedliche kommerzielle EV-Flotten .....	186
Tabelle 49: Ökonomische Auswertung kommerziell genutzter Pkw mit der Bereitstellung von Reserveleistung und der Teilnahme am Day-Ahead-Markt .....	188
Tabelle 50: Ökonomische Auswertung kommerziell genutzter Transporter bis 3,5 t mit der Bereitstellung von Reserveleistung und der Teilnahme am Day-Ahead-Markt .....	189
Tabelle 51: Nebenbedingungen der EV-Flottenoptimierung für die jeweils untersuchten kommerziellen EV-Flotten .....	189
Tabelle 52: Zukunftsprognose des Energiepreises der Best-Case-Szenarien kommerziell genutzter Pkw und Transporter bis 3,5 t .....	190

Tabelle 53: Nebenbedingungen der EV-Flottenoptimierung für die jeweils untersuchten kommerziellen EV-Flotten .....	191
Tabelle 54: Maximale Anzahl an EV in unterschiedlichen Netztopologien .....	192
Tabelle 55: Verteilung der Haushaltstypen mit anliegender Spitzenlast.....	193
Tabelle 56: Grundlastverteilung auf einzelne Netzwerkknoten im CIGRE-NS-Wohngebietsnetz....	194
Tabelle 57: Anteile Unternehmenstypen und ihre Anzahl an Kfz .....	194
Tabelle 58: Anliegende Lasten im CIGRE-NS-Gewerbegebietsnetz .....	195
Tabelle 59: Grenzwert der EV-Durchdringung in CIGRE-Niederspannungsnetzen für verschiedene Ladestrategien von Pkw.....	200
Tabelle 60: Grenzwert der EV-Durchdringung in CIGRE-Niederspannungsnetzen für verschiedene Ladestrategien von Transportern .....	201
Tabelle 61: Grenzwert der EV-Durchdringung in CIGRE-Niederspannungsnetzen für verschiedene Ladestrategien von Transportern .....	202
Tabelle 62: Veränderung der Anteile unterschiedlicher Antriebsarten bezogen auf den Gesamtbestand aller Fahrzeuge in der jeweiligen Fahrzeugklasse .....	212

## Abkürzungsverzeichnis

AABC	Advanced Automotive Battery Conference	IEA	Internationale Energieagentur
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit	IEEE	Institute of Electrical and Electronical Engineers
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung	KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie	KEP	Kurier-Express-Paketdienst
CE	Cambridge Ergonomics	Kfz	Kraftfahrzeug
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Électriques	KIC	Knowledge and Innovation Community
CO	Kohlenstoffmonoxid	Lkw	Lastkraftwagen
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid	LNF	Leichtes Nutzfahrzeug
dena	Deutsche Energie-Agentur	MiD	Mobilität in Deutschland
DOE	U.S. Department of Energy	MIV	Motorisierter Individualverkehr
E	Energiegehalt	NAS	National Academy of Sciences
ECA	Fachgebiet Akkumulatoren des Geschäftsbereichs Elektrochemie	NET-ELAN	Projekt Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen (Forschungsprojekt)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz	NET-INES	Projekt „Netzintegration mobiler Energiespeicher“ des FZJ, TUB, ZSW
EEX	European Energy Exchange	ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
eMo	Berliner Agentur für Elektromobilität	PC	Personal Computer
EPEX	European Power Exchange	Pkw	Personenkraftwagen
EU	Europäische Union	PV	Photovoltaik
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen	PVA	Photovoltaik-Anteil
FZ	Fahrzeug	ME	Mobilitätseinschränkung
FZJ	Forschungszentrum Jülich	SDL	(Strom-)Servicedienstleister
HBFA	Handbuch Emissionsfaktoren	SENSE	Institute of Sustainable Electric Networks and Sources of Energies
HT	Hochtarif		

SNF	schweres Nutzfahrzeug
Sonder- AfA	steuerrechtliche Sonderabschreibung
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
SrV	System repräsentativer Verkehrsbefragungen
T	Temperatur
TEECT	Transport Energy and Emission Calculation Tool
TUB	Technische Universität Berlin
VDE	Verband der Elektrotechnik
VEM	virtuelle Elektromobilität
VW	Volkswagen
WIV	Wirtschaftsverkehr
WiWo	Wirtschaftswoche
Wkt.	Werktag
zGG	zulässiges Gesamtgewicht des Fahrzeuges
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
ZTG	Zentrum Technik und Gesellschaft



# 1. Einleitung

Weltweit werden elektrisch angetriebene Fahrzeuge entwickelt, die einen ersten Einblick in die vermeintlich postfossile Mobilität der Zukunft geben. Elektromobilität existiert bereits seit dem späten 19. Jahrhundert, verlor aber an Bedeutung als sich Verbrennungsmotoren als Antrieb für Kraftfahrzeuge etablierten. Mit steigender Verkehrsleistung des motorisierten Verkehrs traten schnell auch seine negativen Auswirkungen, wie Lärm- und Abgasemissionen, verstärkt zu Tage, welche insbesondere in urbanen Räumen zu einer nachhaltigen Verschlechterung der Lebensqualität führten. Dies resultierte Anfang der 1990er Jahre in einem Erstarren des Umweltbewusstseins und verstärkter Forschungsaktivitäten sowie einem Umdenken in der Stadt- und Verkehrsplanung, um interne und externe Effekte des motorisierten Verkehrs zu verringern. Die Substitution von Verbrennungs- durch Elektromotoren bei gleichzeitigem Ausbau regenerativer Energien ist, auch vor dem Hintergrund der Herausforderung des globalen Klimawandels, neben Verkehrsvermeidung und -verlagerung, eine Maßnahme, Lärm-, Schadgas- und CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Verkehrssektor zu verringern.

Obwohl der Personenverkehr nur einen Teil des Gesamtverkehrssystems ausmacht, stand dieser in der letzten Dekade überwiegend allein im Zentrum des Elektromobilitäts-Diskurses. Der Wirtschaftsverkehr, jener Verkehr, dem eine wirtschaftliche Motivation zu Grunde liegt, wird im Elektromobilitäts-Diskurs häufig vernachlässigt – zu Unrecht, denn in den nächsten Dekaden wird beim städtischen Wirtschaftsverkehr von einer deutlichen Steigerung der Verkehrsleistung ausgegangen (vgl. z.B. BMU-Leitstudie, 2011 und Verkehrsszenarien des BMVBS). Obwohl gerade Pkw und leichte Nutzfahrzeuge aus technischer Sicht gut elektrifiziert werden können und im Bereich des Schwerlastverkehrs zumindest eine Elektrifizierung im Sinne von Hybridantrieben möglich wäre, kommen aus wirtschaftlichen Gründen, Nutzungseinschränkungen und mangelnder Informationslage fast ausschließlich Dieselfahrzeuge zum Einsatz. Somit steigen im Güterverkehr die CO<sub>2</sub>-Emissionen an, während sie im Personenverkehr rückläufig sind, und der Anteil an Emissionen durch den Verkehr insgesamt wächst.

Auch wenn der Wirtschaftsverkehr in Hinblick auf sein Elektrifizierungspotential zunehmend häufiger untersucht wird, werden hier immer noch weniger Alternativen diskutiert als beim Personenverkehr. Dabei erfüllt der Betrieb elektrischer Fahrzeuge in Flotten im Gegensatz zur privaten Nutzung viele Anforderungen idealer Erstnutzer<sup>1</sup>: Aufgrund bekannter Fahrprofile, Tourenplanung, regelmäßiger Einsätze und Ladeinfrastruktur auf dem Firmengelände können Betriebe die Vorteile elektrischer Fahrzeuge effizient ausnutzen. Die Potentiale für CO<sub>2</sub>-Reduktion sind im städtischen Raum, durch häufige Anfahr- und Anhaltevorgänge, z.B. von Lieferfahrzeugen, hoch.

Das Projekt „komDRIVE“, dessen Forschungsansatz und Ergebnisse in dieser Publikation dargestellt sind, hatte zum Ziel, der einseitigen Betrachtung von privater Nutzung elektrischer Kraftfahrzeuge entgegen zu wirken, indem es speziell den Einsatz im Wirtschaftsverkehr am Beispiel gewerblicher Fahrzeugflotten untersuchte. Hier standen

---

<sup>1</sup> Die aus Gründen der Lesbarkeit hier und weiter im Buch verwendete maskuline Form ist nur als grammatikalisches Geschlecht zu verstehen und schließt weibliche Personen mit ein, hier „Erstnutzerinnen“.

zudem durch eine Antriebssubstitution resultierende Aspekte der Energieerzeugung, der Speicherung sowie der Verteilung im Fokus des wissenschaftlichen Interesses.

Die Untersuchungen konnten zum Beispiel nachweisen:

- Die Bereitstellung von Systemdienstleistungen im Segment der Reserveleistung erfordert in Anbetracht der notwendigen Erfüllung regulatorischer Rahmenbedingungen und der derzeitigen technischen Grundvoraussetzungen der Elektrofahrzeuge, Flottengrößen von mehreren hundert Fahrzeugen.
- Die durch die Systemdienstleistung zusätzlich verursachte Degradation des elektrischen (Batterie-) Speichers ist vernachlässigbar, wenn die Belastungen in einem aus Speichersicht ( $T$ ,  $SOC$ ,  $\Delta SOC$ ,  $I$ ) moderaten Betriebsbereich gehalten werden.
- Auswirkungen des im Energiesystemmodell angenommenen EV-Bestands im Wirtschaftsverkehr (2030: 6 Mio. BEV) auf das gesamte Energieversorgungssystem in Deutschland sind nicht signifikant und es ist kein Kraftwerkszubau für die Deckung des aus den Annahmen resultierenden Bedarfes notwendig.
- In Ermangelung verfügbarer elektrifizierter Lkw im Schwerlastbereich, die überproportional zur Lärm- und Schadstoffgenerierung im Wirtschaftsverkehr beitragen, sollte auch weiterhin in die Weiterentwicklung von Antriebs- und Filtertechnologien investiert werden.
- Im städtischen Wirtschaftsverkehr wäre zum Beispiel ein großer Anteil der durchschnittlich täglich durch Pkw erbrachten Distanzen von derzeit auf dem Markt erhältlichen elektrischen Fahrzeugmodellen leistbar.
- Es fehlt an Test- und Fahrzeugleasingangeboten und an Anschaffungsanreizen, um die Unternehmen zum Umstieg auf EV zu motivieren.
- Ein großer Informationsbedarf existiert bezüglich Elektromobilität bei den Unternehmen, bestehende Informationsmöglichkeiten sind aber unbekannt bzw. unzureichend aufbereitet und es existieren keine allseits bekannten Anlaufstellen.

Insgesamt konnte das Projekt einen Beitrag für die Entwicklung einer ganzheitlichen Lösungsstrategie für die Problematiken der fortlaufenden Dominanz von CO<sub>2</sub>-intensiven Dieselantrieben im Wirtschaftsverkehr in Kombination mit einer erwarteten Zunahme der Verkehrsleistung und der Energiespeicherung bei Zunahme des Anteils dezentral erzeugter Energie leisten.

Weiterhin wurde innerhalb des Projektes ein Expertenworkshop zum Thema Datenverfügbarkeit mit Fokus auf Wirtschaftsverkehr und Elektromobilität durchgeführt. Auf diesem wurde neben der Betonung des Mangels an repräsentativen quantitativen Daten auch festgestellt, dass häufig Termini in unterschiedlicher Art und Weise benutzt werden. Um eine Grundlage für die einheitliche Verwendung von Fachbegriffen im Themenfeld zu schaffen, und die Vergleichbarkeit von wissenschaftlichen Publikationen zu erhöhen, wurde ein Glossar erarbeitet, in dem die als für die Thematik relevanten Begrifflichkeiten eindeutig definiert sind. Dieses befindet sich im Kapitel 6 dieser Publikation.

## Introduction

Electrically driven cars are being developed world wide and provide a first insight into the putative future of post fossil mobility. Electric mobility already exists since the 19th century, however, it lost its significance, when vehicles with internal combustion engines became the common standard. As traffic capacity grew, its negative impacts, such as noise and emissions, emerged with it. This led to an enduring decline of the quality of life especially in urban areas. In the early 1990s this development led to the emergence of ecological awareness, intensified research as well as rethinking existing traffic and city planning in order to reduce internal and external effects of motorized traffic. Substituting internal combustion engines with electric motors while developing regenerative energy sources in conjunction with traffic avoidance and modal shift – in the face of global warming – are actions to reduce emissions of noise, exhausts and CO<sub>2</sub> in the traffic sector.

In the last decade the electric mobility discourse was solely centered on passenger transport, although it represents only one part of the overall traffic. Commercial transport – and resulting traffic which is based on economic motivations – was only discussed as a marginal topic within the electric mobility discourse. This proves to be wrong as urban commercial transport is expected to grow significantly in the next decade (BMU-Leitstudie 2011 und Verkehrsszenarien des BMVBS). Even though cars and light utility vehicles can be easily electrified from a technical perspective, and there also is at least the possibility of using hybrid vehicles in the heavy goods vehicle traffic, commercial transport uses diesel fueled engines almost exclusively. This occurs due to economic factors, utilization restraints and lack of information. Thus, goods transport reports rising carbon dioxide production, while emissions are decreasing in passenger transport. In the meanwhile, the transport sectors' share on overall emissions grows steady.

Even if scientific research centers on the commercial transports' potential for electrification in comparison to passengers transport there are not as many alternatives being discussed. For first users electrically powered vehicles in their fleets fulfill many demands in comparison to private usage. Due to known driver's profiles, tour planning, regular assignments and battery charging infrastructure at the lots, companies can make efficient use of electric vehicles' advantages. In urban regions, there are big possibilities of reducing carbon dioxide emissions, as delivery vans, only to describe one example, are constantly in stop-and-go situations.

The "komDRIVE" project, whose scientific approaches and results are discussed in this publication, aimed at counteracting the one-sided perspective towards the private usage of electric mobility by especially researching the use of electric vehicles in commercial transport. Objectives of scientific interest were the aspects of generation, storage and distribution of energy resulting in the substitution of power units.

Research for example demonstrated that

- the provision of system services in the segment of reserve power requires fleet sizes of several hundred vehicles when taking into consideration the necessary satisfaction of regulatory framework conditions and current technical prerequisites,
- battery's additional degradation by system services can be neglected, if its load and stresses ( $T$ ,  $SOC$ ,  $\Delta SOC$ ,  $I$ ) are kept in a moderate range,

- there are no significant impacts on Germany's energy supply due to the usage of electric vehicles in commercial traffic as assumed in the energy system model (in 2030: 6 million EV), and there is no need for further extension of power plant system to meet the assumed power demand,
- there should be investments in the further improvement of ICE and exhaust gas treatment systems, due to the lack of available market-ready electrified freight vehicles in the heavy duty sector, which is disproportionately accountable for producing noise and emissions in commercial traffic,
- a great share of the daily average distances driven in urban commercial transport by car can be covered by electric vehicles available on the market today,
- there is a lack of test and leasing choices, as well as purchase appeals in order to motivate companies to switch to electric vehicles,
- there is a major information demand of companies regarding electric mobility, while existing information possibilities are unknown or insufficiently prepared, and no clear contact points exist.

Overall, the project was a contribution to the development of an integral solution statement for the problematic of the on-going dominance of CO<sub>2</sub> intensive diesel engines in commercial traffic combined with expected growth of traffic capacity, and energy storage next to decentralized energy generation.

Within the project an expert workshop regarding data availability with focus on commercial transport and electric mobility was realized. It was detected that not only too little quantitative data were accessible, but also technical terms were used in different ways. To create a basis for a standard use of technical terms in topic, and to optimize the comparability in scientific papers, a glossary has been developed, that clearly defines the topics relevant terms. It can be found in Chapter 6.

## **2. Beschreibung des Forschungsprojekts und seiner Ziele**

(N. Döge, S. Marker)

Im nachfolgenden Kapitel erfolgt eine Beschreibung des Forschungsprojektes „komDRIVE“ und seiner Ziele. Im Kapitel werden die Motivation zur Durchführung des Projektes und seine zentralen Fragestellungen näher beleuchtet. Zudem erfolgt eine wissenschaftliche Verortung, indem ein vertiefender Einblick in das existierende Wissen um den städtischen Wirtschaftsverkehr und seine zukünftige Entwicklung sowie dessen Ansätze zur Elektrifizierung dargestellt werden. Als Ausgangspunkt für relevante Fragestellungen erfolgt eine nähere Betrachtung des jeweiligen Standes der Forschung in den betrachteten Themenbereichen.

### **2.1 Der Städtische Wirtschaftsverkehr – Status Quo und zukünftige Entwicklungen**

(W.-H. Arndt, N. Döge, W. Hennings, J. Linssen, S. Siegert)

Der städtische Verkehr unterliegt derzeit vielen Wandlungsprozessen. Über Jahrzehnte hat die Breitenmotorisierung in den Städten, insbesondere im Westteil Deutschlands, stark zugenommen. Dies hat vielerorts zu einer einseitig autoorientierten Städteplanung und Zersiedlungs- bzw. Suburbanisierungseffekten geführt. Zudem erreichten Mitte der 1990er Jahre sowohl interne als auch externe negative Effekte des Verkehrs ihren Kulminationspunkt. Dies führte, auch im Zuge der Nachhaltigkeitsdebatte, vielerorts zum Umdenken politischer Akteure und einem verstärkten gesellschaftlichen Diskurs über anzustrebende Zielzustände städtischer Verkehrsplanung. Dieses langsam einsetzende gesellschaftliche und politische Umdenken hin zu einer Verkehrs- und Stadtplanung, die alle gesellschaftlichen Gruppen adressiert, führt mittlerweile zu ersten Erfolgen. Das ist in vielen Städten an einer verstärkten Nutzung des Umweltverbundes und stagnierenden, teilweise sogar rückläufigen Motorisierungsgraden, zu erkennen. Geradezu gegenteilig verhielt sich der Sektor des städtischen Wirtschaftsverkehrs (WIV). Mittlerweile lassen sich etwa 36 % des werktäglichen Kfz-Fahrtenaufkommens in Deutschland dem WIV zuordnen (KiD, 2010). Hinsichtlich der Fahrzeugleistung lässt sich zudem festhalten, dass 27 % der gesamten durch alle in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge erbrachten Fahrzeugleistung im Wirtschaftsverkehr erbracht werden.

Trotz dieser doch vergleichsweise präzisen Werte, stellt der städtische WIV noch immer ein ungenügend erforschtes und erhebungstechnisch schwer abgrenzbares Phänomen dar. Demzufolge gibt es mehrere Ansätze ihn und seine Bestandteile zu definieren. In Ermangelung einer allgemein hin gültigen und mehrheitlich akzeptierten Definition, sind die existierenden Studien zum WIV nur schwer miteinander vergleichbar. Hinzu kommt die naturgemäß schwere statistische Erfassung im Straßenverkehr, da Fahrzeuge die insbesondere im Personen- oder Dienstleistungswirtschaftsverkehr aktiv sind, oftmals nur schwer von jenen des privaten Pkw-Verkehrs zu unterscheiden sind.

## 2.1.1 Definition des Wirtschaftsverkehrs

Aus derzeit gültigen Planwerken, wissenschaftlichen Studien oder Erhebungen lassen sich unterschiedliche Definitionen bezüglich der Bestandteile des WIV ableiten. Generell kann jedoch festgehalten werden: „Als Wirtschaftsverkehr sind alle Ortsveränderungen von Personen und Gütern definiert, die erwerbswirtschaftlichen oder dienstlichen Zwecken dienen“ (Arndt, 2010: 22).

Auch wenn der Fokus jüngster Arbeiten sich nun auch verstärkt dem Dienstleistungsverkehr und Personenwirtschaftsverkehr widmet, ist die Betrachtung des WIV oft an den synonymen Gebrauch des Terms „Güterverkehr“ gekoppelt. Dies rührt unter anderem wohl auch von der Schwierigkeit her, die Art des wirtschaftlichen Zwecks als Grundlage des Transportvorganges (z.B. Erbringung einer Dienstleistung versus Beförderung eines Gutes) klar voneinander abzugrenzen.

Eine am ehesten zutreffende Strukturierung der Bestandteile des WIV ist in Abbildung 1 zu sehen. Hier wird der WIV in die Bestandteile Personenwirtschaftsverkehr, Dienstleistungsverkehr und Güterwirtschaftsverkehr unterteilt. Beim Dienstleistungsverkehr können dabei sowohl Güter als auch Personen transportiert werden, die mit bestimmten Dienstleistungen in Verbindung stehen.

Abbildung 1: Bestandteile des Wirtschaftsverkehrs

Immaterieller Verkehr	Materieller Verkehr				
	Personenverkehr			Güterverkehr	
Telefon-, Datenverkehr	<b>Privater</b> Personenverkehr	<b>Wirtschaftsverkehr</b>			<b>Privater</b> Güterverkehr
	Berufs-, Einkaufs-, Freizeitverkehr,...	Personen- wirtschafts- verkehr	Dienst- leistungs- verkehr	Güterwirt- schafts- verkehr	Privater Umzugs-, Entsorgungsverkehr

Quelle: Arndt, 2010

## 2.1.2 Datenquellen

Generell lässt sich festhalten, dass die nötige Datenverfügbarkeit, um den Wirtschaftsverkehr quantitativ ausreichend beschreiben zu können, derzeit nicht verfügbar ist. Diese Tatsache wurde auch durch den innerhalb des Forschungsprojektes durchgeführten Expertenworkshop „Datengrundlagen zu Fahrzeugeinsatz, Fahrzeugtypen, Energieverbrauch und Kostenstrukturen im Wirtschaftsverkehr mit besonderem Fokus auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge“ bestätigt. Somit müssen vor allem tägliche Aufkommen aus Sekundärdaten abgeleitet werden. Datenquellen und Standarderhebungen, die, neben den vielen unabhängig voneinander durchgeführten Einzelerhebungen, jedoch eine vertiefende Charakterisierung des WIV erlauben, wurden auf dem innerhalb des Forschungsprojektes durchgeführten Expertenworkshop zusammengetragen und sind in unten stehender Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Datenquellen zur Beschreibung des Wirtschaftsverkehrs

Sekundärquelle	Internetadresse
Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010	<a href="http://www.kid2010.de/de/page&amp;id=3103&amp;navid=307">http://www.kid2010.de/de/page&amp;id=3103&amp;navid=307</a>
Mobilität in Deutschland 2008	<a href="http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/02_MiD2008/publikationen.htm">http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/02_MiD2008/publikationen.htm</a>
Fahrleistungserhebung 2002	<a href="http://bast.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2010/24/pdf/V121.pdf">http://bast.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2010/24/pdf/V121.pdf</a>
Kraftfahrtbundesamt (Fahrzeugstatistik/Kraftfahrerstatistik/)	<a href="http://www.kba.de/DE/Statistik/produktkatalog_pdf.pdf?__blob=publicationFile&amp;v=34">http://www.kba.de/DE/Statistik/produktkatalog_pdf.pdf?__blob=publicationFile&amp;v=34</a>
Bundesamt für Güterverkehr (BAG)	<a href="http://www.bag.bund.de">www.bag.bund.de</a>
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)	<a href="http://www.bmvi.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/Verkehrspolitik/GueterverkehrUndLogistik/gueterverkehr-und-logistik_node.html">http://www.bmvi.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/Verkehrspolitik/GueterverkehrUndLogistik/gueterverkehr-und-logistik_node.html</a>
Industrie und Handelskammern	Jeweilige Landes IHK erreichbar über: <a href="http://www.dihk.de/">http://www.dihk.de/</a>
Verflechtungsprognose	<a href="http://daten.clearingstelle-verkehr.de/220/3/FE_96_857_2005_Verflechtungsprognose_2025_Gesamtbericht_20071114.pdf">http://daten.clearingstelle-verkehr.de/220/3/FE_96_857_2005_Verflechtungsprognose_2025_Gesamtbericht_20071114.pdf</a>
Handbuch der Emissionsfaktoren	<a href="http://www.hbefa.net/d/">http://www.hbefa.net/d/</a>
Open Street Map	<a href="http://www.openstreetmap.de/">http://www.openstreetmap.de/</a>

Bezugnehmend auf Tabelle 1 stellen die Erhebungen Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KiD) und die Fahrzeug- und Kraftfahrerstatistiken des Kraftfahrtbundesamtes die detailliertesten Datensätze bereit und werden nachfolgend ausgewertet, um einen Überblick über die gegenwärtige Situation im städtischen WIV Deutschlands zu vermitteln.

Der Differenzierung zwischen Güterverkehr und Personenverkehr folgen auch die Erhebungen KiD (Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland) aus den Jahren 2002 und 2010. Der Dienstleistungsverkehr wird dabei nicht gesondert betrachtet. Es wird lediglich zwischen Transport von Personen oder Gütern als Hauptzweck der Ortsveränderung unterschieden. Zudem wurde eine operationale Definition für die KiD-Studie folgendermaßen erweitert: Innerhalb der Fahrten im WIV wurde zwischen verschiedenen Fahrtzwecken unterschieden. Zu den Fahrten im Güterwirtschaftsverkehr gehört das „Holen, Bringen, Transportieren von Gütern, Waren, Material, Maschinen, Geräten etc.“, zu den Fahrten im Personenwirtschaftsverkehr das „Holen, Bringen, Befördern von Personen (dienstlich/geschäftlich)“

sowie „Fahrt[en] zur Erbringung beruflicher Leistungen (Montage, Reparatur, Beratung, Besuch, Betreuung etc.)“.

Der Dienstleistungsverkehr wird demnach dem Personenwirtschaftsverkehr zugeordnet. Weiter wurde die Kategorie von Fahrzeugfahrten im sonstigen Wirtschaftsverkehr mit dem Fahrtzweck „Sonstige dienstlich/geschäftliche Erledigung“ als zusätzliche Kategorie für Fahrten, die weder dem Güter- noch dem Personenwirtschaftsverkehr zuzuordnen waren, eingeführt (KiD, 2010 WVI GmbH Braunschweig). Auf Basis dieser Definition ergibt sich die in Abbildung 2 angepasste Darstellung über die Bestandteile des Wirtschaftsverkehrs.

Abbildung 2: Abgeleitete Darstellung der KiD Definition für den Wirtschaftsverkehr

Physischer Verkehr					
Personenverkehr			Güterverkehr		
Personen- privatver- kehr	Wirtschaftsverkehr				Güter- privat- verkehr
	Personenwirtschafts- verkehr		Güterwirtschafts- verkehr	Sonstiger Wirtschafts- verkehr	
	Holen, Bringen, Befördern von Personen (dienstlich/ geschäftlich)	Fahrten zur Erbringung beruflicher Leistungen	Holen, Bringen, Transportieren von Gütern, Waren, Material, Maschinen, Geräten etc.	Sonstige geschäftliche Erledigungen	

Quelle: Auf Basis der KiD 2010, WVI GmbH, Braunschweig

### 2.1.3 Charakterisierung des städtischen Wirtschaftsverkehrs

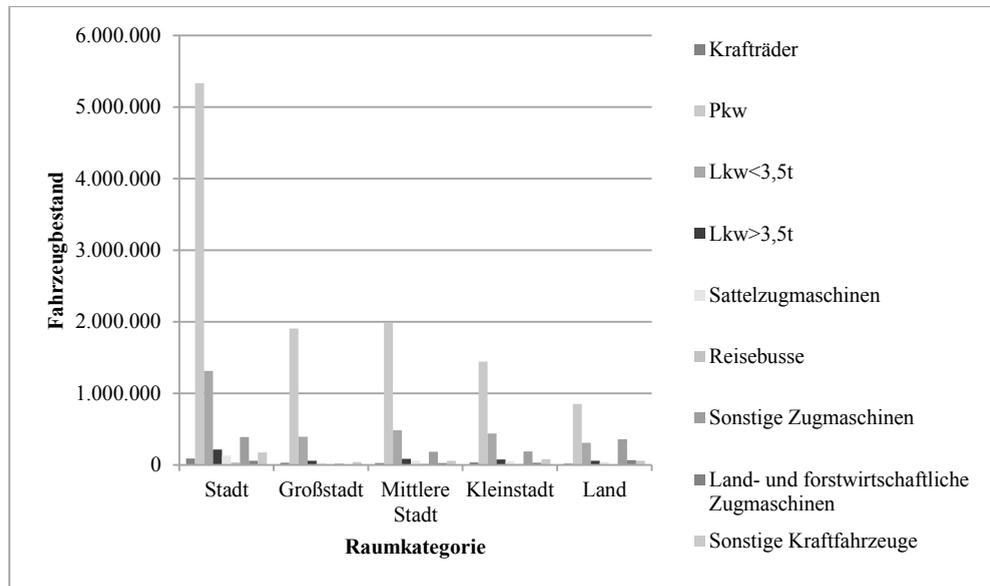
In den KiD-Daten sind vier Kategorien von Stadt- und Gemeindetypen unterschieden. Dies sind Großstädte (ab 100.000 Einwohner), Mittelstädte (20.000–100.000 Einwohner), Kleinstädte (5.000–20.000 Einwohner) und Landgemeinden. Im Folgenden werden Vergleiche zwischen den vier Raumkategorien hinsichtlich Fahrzeugbestand, Fahrzeugleistung, Verkehrsleistung (Pkm, tkm), Verkehrsbeteiligungsdauer und anderen Variablen angestellt. Zudem werden die ersten drei Kategorien (Großstädte, mittlere Städte und Kleinstädte) als zusätzliche Kategorie städtischer Raum gesammelt dargestellt, um klarere Unterschiede/ Gemeinsamkeiten zwischen städtischem und ländlichem Raum identifizieren zu können. Es werden stets die gewerblich gehaltenen Fahrzeuge sowie die privat gehaltenen Fahrzeuge mit mindestens einer Fahrt im WIV betrachtet.

#### Fahrzeugbestand nach Raumkategorien

Wie Abbildung 3 zeigt, sind in Deutschland aufgrund eines Urbanisierungsgrades von ca. 86 % in städtischen Gebieten, absolut gesehen, in fast allen Klassen deutlich höhere Fahrzeugbestände vorhanden als in ländlichen Gemeinden. Zudem lässt sich festhalten, dass Pkw und kleine Lkw < 3,5 t zGG mit 82,2 % den größten Anteil am Gesamtbestand aller privat und gewerblich gehaltenen Fahrzeuge mit Fahrten im WIV einnehmen. Schwerere

Nutzfahrzeuge wie Lkw > 3,5 t, Sattelzugmaschinen und Sonstige Zugmaschinen kommen auf einen vergleichsweise geringen Anteil von 12,5 %. Lediglich der Bestand sonstiger Zugmaschinen ist in ländlichen Gebieten vergleichsweise hoch. Im Vergleich zwischen den Stadttypen sind relativ zu einander jedoch ähnliche Bestandsverteilungen zu erkennen.

Abbildung 3: Absoluter Bestand der Fahrzeugklassen im Wirtschaftsverkehr in unterschiedlichen Raumkategorien



Quelle: Auf Basis der KiD 2010, WVI GmbH, Braunschweig

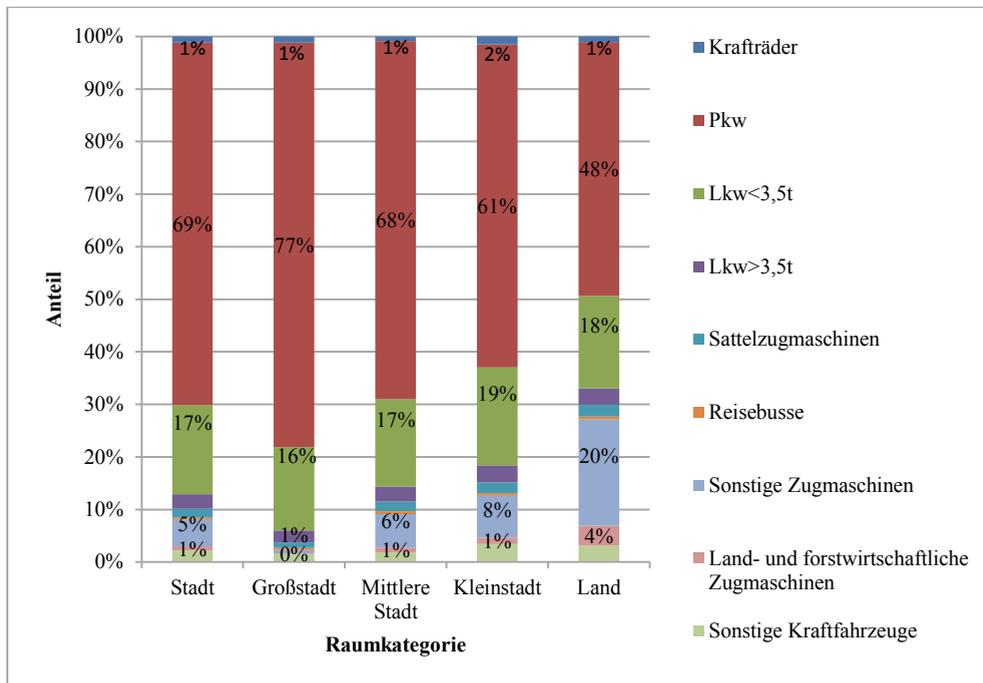
Die Anteile der jeweiligen Fahrzeugklassen am Gesamtbestand der verschiedenen Stadt- und Gemeindetypen sind in Abbildung 4 dargestellt. Krafräder weisen in allen Typen einen geringen Anteil am Gesamtbestand auf. Generell sind in städtischen Gemeinden jedoch die Anteile von Krafrädern höher als in ländlichen Gemeinden.

In Großstädten lassen sich mit 77,4 % deutlich höhere Anteile von Pkw im Wirtschaftsverkehr verorten, während bei den kleinen Lkw in mittleren und Kleinstädten größere Anteile am spezifischen Fahrzeugbestand feststellbar sind. Mit Lkw ab 3,5 t und sonstigen Kraftfahrzeugen verhält es sich ähnlich. Die Anteile sind mit 3,2 % und 3,5 % in Kleinstädten geringfügig höher als in ländlichen Gemeinden (3,2 % und 3,2 %), aber in mittleren (2,9 % und 1,9 %) und Großstädten (2,2 % und 1,5 %) deutlich niedriger.

### Fahrzeugbestand nach Wirtschaftszweigen

Des Weiteren wurde der Fahrzeugbestand nach Wirtschaftszweigen (nach der aktuellsten Systematik WZ, 2008) untersucht. In Abbildung 5 sind die relativen Fahrzeugbestände nach Wirtschaftszweigen für alle städtischen Räume zusammengefasst dargestellt. Dabei wurden lediglich die Fahrzeugklassen Krafräder, Pkw, Lkw bis 3,5 t, Lkw ab 3,5 t sowie sonstige Kraftfahrzeuge in die Berechnung einbezogen. Zugmaschinen und Busse wurden ausgeklammert da sich das komDRIVE-Projekt mit den Fahrzeugklassen vom Krafrad bis zum mittleren Lkw beschäftigt.

Abbildung 4: Anteile der Fahrzeugklassen im Wirtschaftsverkehr am Gesamtbestand nach Stadt- und Gemeindetypen



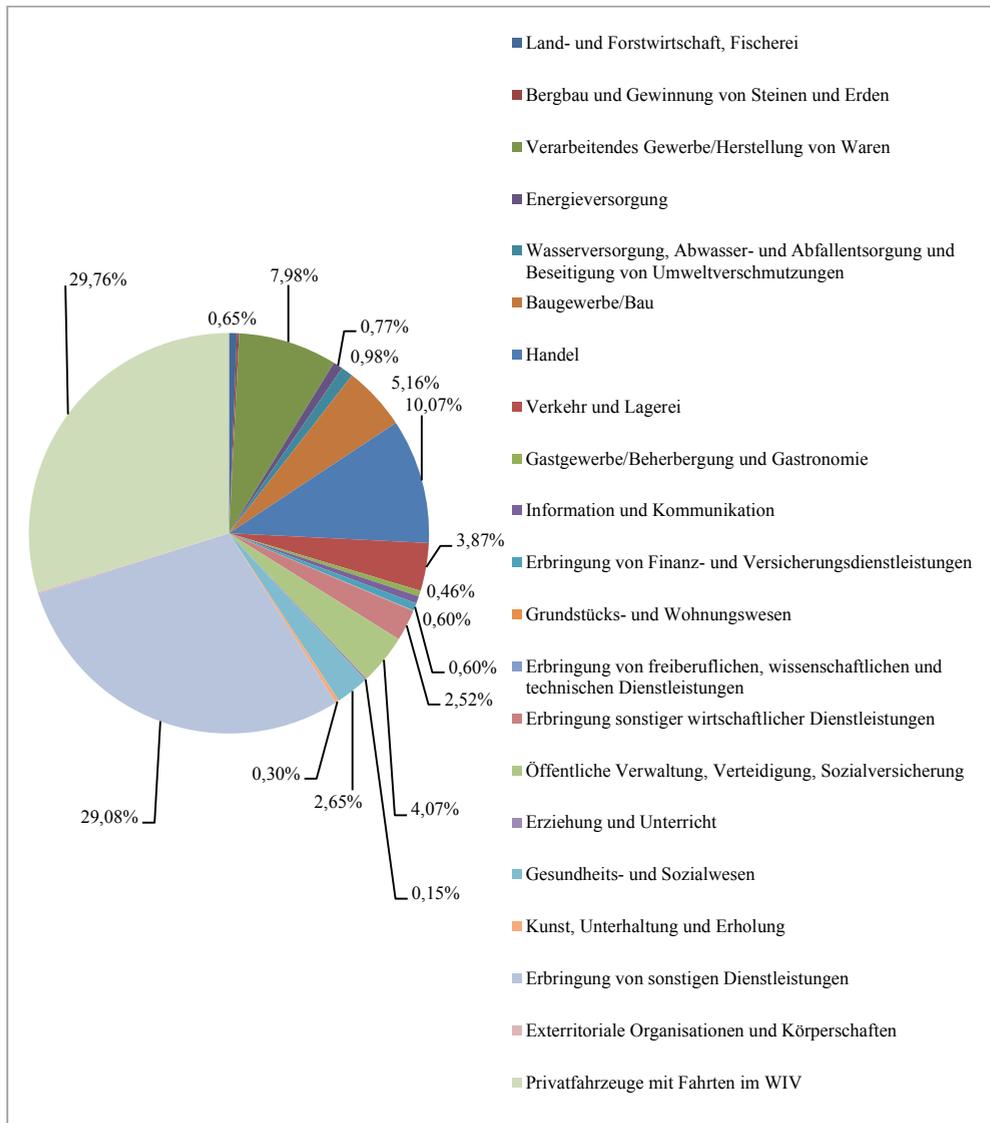
Quelle: Auf Basis der KiD 2010, WVI GmbH, Braunschweig

Die neun Wirtschaftszweige mit einem Anteil über 2 % an den Fahrzeugbeständen im WIV im städtischen Raum sind in absteigender Folge:

1. Privat gehaltene Fahrzeugen mit Fahrten im Wirtschaftsverkehr (29,8 %),
2. Erbringung von sonstigen Dienstleistungen (29,1 %),
3. Handel (9 %),
4. Verarbeitendes Gewerbe/Herstellung von Waren (7,3 %),
5. Baugewerbe/Bau (5,4 %),
6. Verkehr und Lagerei (4,9 %),
7. Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung (4,1 %),
8. Erbringung sonstiger wirtschaftlicher Dienstleistungen (2,2 %),
9. Gesundheits- und Sozialwesen (2,2 %).

Auf diese neun Wirtschaftszweige verteilen sich insgesamt 94 % aller Fahrzeuge mit Fahrten im städtischen WIV.

Abbildung 5: Relative Fahrzeugbestände nach Wirtschaftszweig im Jahr 2010



Quelle: Auf Basis der KiD 2010, WVI GmbH, Braunschweig

Der Anteil der kleinen Fahrzeuge, Pkw und Lkw < 3,5 t, sind wie insgesamt auch in diesen Wirtschaftszweigen hoch und liegen zwischen 85 % und 98 %:

1. Gesundheits- und Sozialwesen (97,5 %),
2. Baugewerbe/Bau, (95,8 %),
3. Verarbeitendes Gewerbe/Herstellung von Waren (95,5 %),
4. Erbringung von sonstigen Dienstleistungen (95,2 %),
5. Handel (93 %),

6. Erbringung sonstiger wirtschaftlicher Dienstleistungen (92 %),
7. Privat gehaltene Fahrzeugen mit Fahrten im Wirtschaftsverkehr (91,6 %),
8. Verkehr und Lagerei (85,3 %),
9. Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung (84,6 %).

Die auch für den städtischen Raum relevanten Wirtschaftszweige Verkehr und Lagerei, Wasserversorgung/Abwasser- und Abfallentsorgung, weisen mit Anteilen von 13,8 % und 6,9 % vergleichsweise hohe Bestände an schwereren Nutzfahrzeugen (Lkw >3,5 t) auf.

### **Fahrzeugleistung**

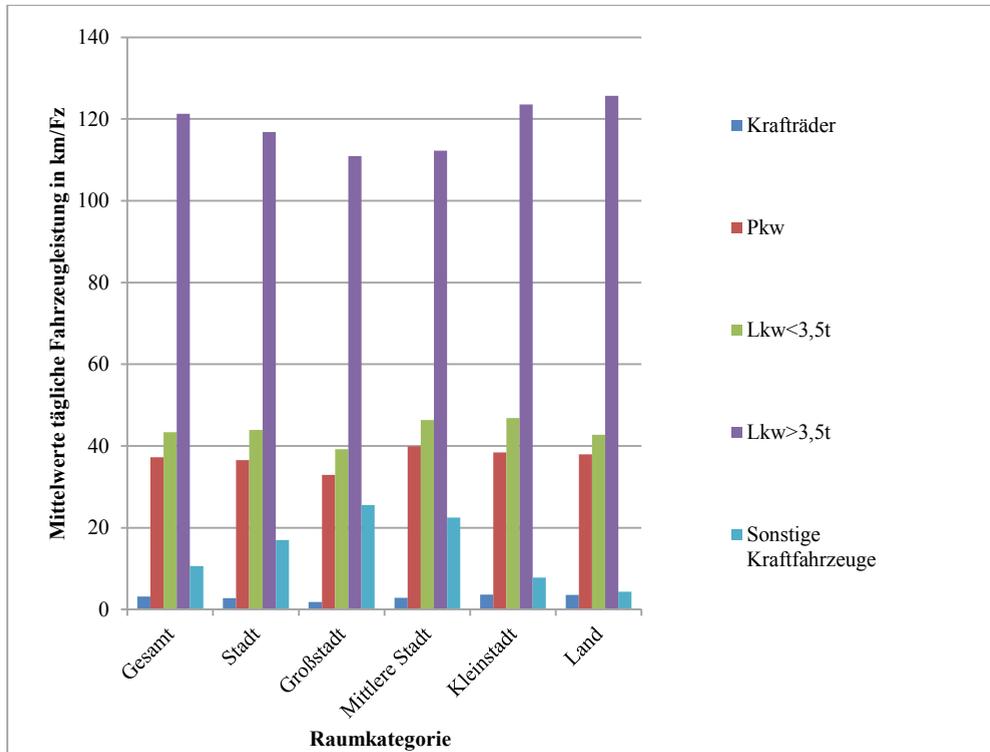
Bezüglich der Fahrzeugleistung lässt sich, wie Abbildung 6 darstellt, festhalten, dass im Land-Stadt Vergleich vor allem Unterschiede bei den Lkw >3,5 t und sonstigen Kraftfahrzeugen auftreten. So ist die mittlere Tagesfahrleistung der Lkw ab 3,5 t in ländlichen Gemeinden (125,7 km/d) höher, aber die Tagesfahrleistungen der Lkw bis 3,5 t (42,75 km/d) und der sonstigen Kraftfahrzeuge (4,35 km/d) niedriger als in Städten (116,79 km/d; 43,93 km/d; 16,98 km/d).

In Großstädten sind die mittleren Tagesfahrzeugleistungen aller Fahrzeugklassen, außer der sonstigen Kraftfahrzeuge (Höchstwert mit 25,52 km/d), geringer als in mittleren und Kleinstädten. In mittleren Städten sind die mittleren Tagesfahrleistungen der Pkw (39,89 km/d), in Kleinstädten die Mittelwerte der Krafträder (3,63 km/d) und Lkw bis 3,5 t (46,8 km/d) am höchsten. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass in Großstädten die räumliche Konzentration von unterschiedlichen Flächennutzungen bzw. wirtschaftlichen Aktivitäten zu durchschnittlich geringeren Tagesfahrleistungen führt, wohingegen in mittleren und kleinen Städten aufgrund ihrer geringeren Dichte längere Wege zurückzulegen sind. Da es sich bei sonstigen Kraftfahrzeugen häufig um Spezialfahrzeuge z.B. Krankenwagen, Müllsammelfahrzeuge, Kehrmaschinen etc. handelt, weicht deren Tagesfahrleistung aufgrund der räumlichen Ausdehnung in Großstädten und mittleren Städten, die zudem im Raumordnungsgefüge häufig Oberzentrencharakter haben, stark nach oben ab.

Zur besseren Vergleichbarkeit sind in Tabelle 2 die Anteile der Tagesfahrleistungen an der Gesamttagesfahrleistung im WIV nach Fahrzeugklassen im Vergleich nach Stadt- und Gemeindetyp dargestellt. Die wohl größte Auffälligkeit ist der in Städten deutlich höhere Anteil an der Fahrzeugleistung durch Pkw (60,4 % im Vergleich zu 48,5 % in ländlichen Gemeinden). In Großstädten sind es sogar 67,1 %. Auch bei den sonstigen Kraftfahrzeugen nimmt der Anteil in Richtung Großstadt zu. Weiterhin fällt auf, dass die Anteile der Krafträder, Lkw und Zugmaschinen in Richtung Großstadt geringer werden, wobei die höchsten Anteilswerte entweder in der Kleinstadt (Krafträder und Lkw bis 3,5 t) oder in ländlichen Räumen liegen (Lkw ab 3,5 t und Zugmaschinen).

Bei einer Differenzierung der Fahrleistungen nach Wirtschaftszweigen und Stadttypen lässt sich festhalten, dass hier die mittleren Tagesfahrleistungen in den Wirtschaftszweigen Richtung Großstadt abnehmen.

Abbildung 6: Mittelwerte der täglichen Fahrzeugleistung im Wirtschaftsverkehr nach Fahrzeugklassen im Vergleich nach Stadt- und Gemeindetypen



Quelle: Auf Basis der KiD 2010, WVI GmbH, Braunschweig

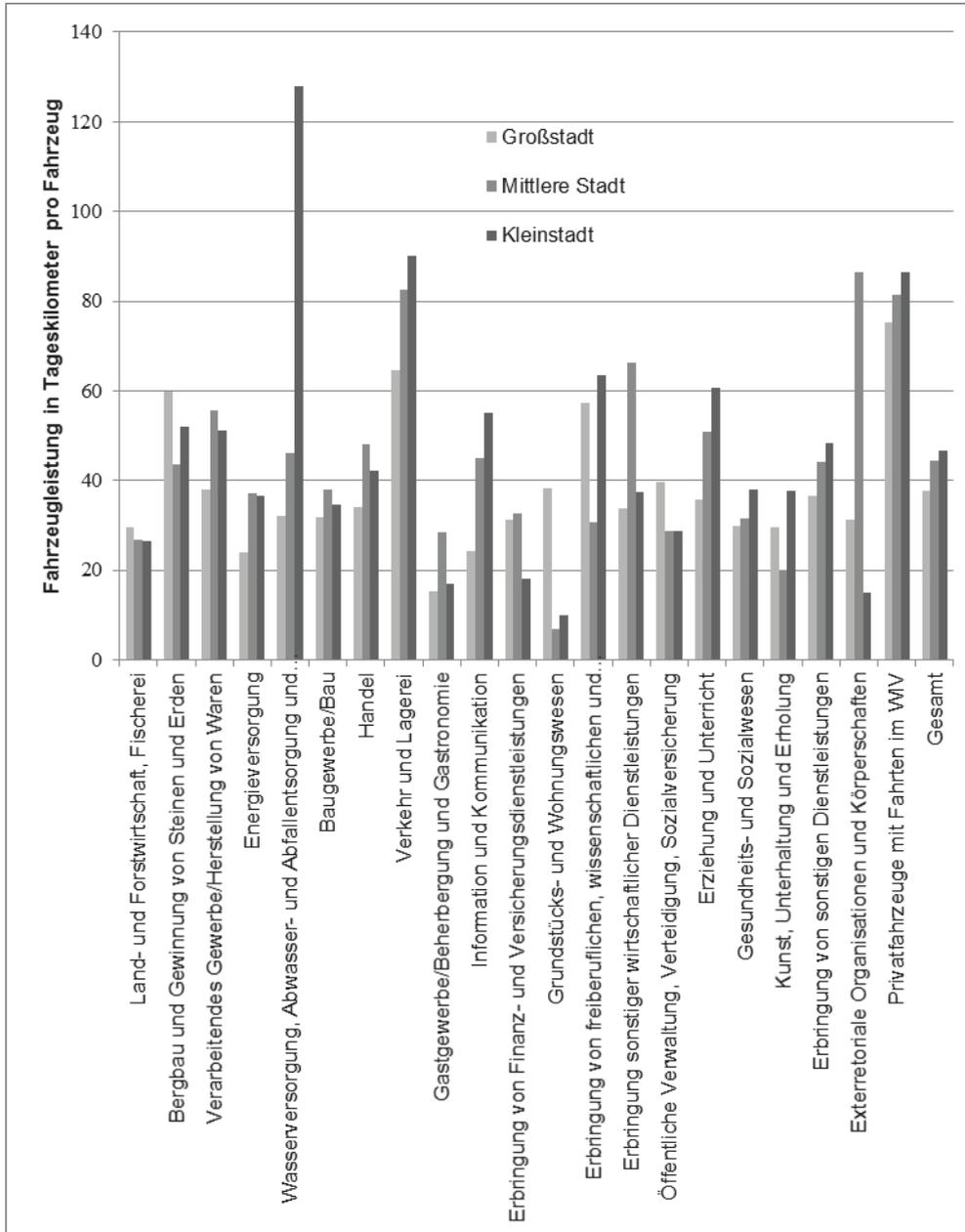
In Kleinstädten sind die höchsten Tagesfahrzeugleistungen in den Wirtschaftszweigen *Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung und Beseitigung von Umweltverschmutzungen* (hier tritt der Maximalwert von 1250km pro Tag und Fahrzeug 18 mal in 162 Fällen auf), *Verkehr und Lagerei, Erbringung von freiberuflichen, wissenschaftlichen und technischen Dienstleistungen, Erziehung und Unterricht, Information und Kommunikation* sowie *Erbringung von sonstigen Dienstleistungen* zu finden. In mittleren Städten sind die vergleichsweise höheren mittleren Tagesfahrleistungen in den Wirtschaftszweigen *Verarbeitendes Gewerbe/Herstellung von Waren, Baugewerbe/Bau, Energieversorgung, Handel, Gastgewerbe/Beherbergung und Gastronomie, Erbringung von Finanz- und Versicherungsdienstleistungen, Erbringung sonstiger wirtschaftlicher Dienstleistungen* und *Exterritoriale Organisationen und Körperschaften* festzustellen. In Großstädten sind die Tagesfahrleistungen im Vergleich nach Stadttypen in den Wirtschaftszweigen *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden, Grundstücks- und Wohnungswesen* sowie *Öffentliche Verwaltung, Verteidigung und Sozialversicherung* am höchsten (vgl. Abbildung 7).

Tabelle 2: Anteile der täglichen Fahrzeugleistung nach Fahrzeugklassen im Wirtschaftsverkehr im Vergleich nach Stadt- und Gemeindetypen (eigene Darstellung nach KiD 2010)

Fahrzeugklasse	Land	Stadt	Kleinstadt	Mittlere Stadt	Großstadt	Gesamt
Krafträder	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	<b>0,1 %</b>
Pkw	48,5 %	60,4 %	54,3 %	61 %	67,1 %	<b>58,7 %</b>
Lkw<3,5t	19,8 %	17,9 %	20,1 %	17,3 %	16,4 %	<b>17,9 %</b>
Lkw>3,5t	10,5 %	7,7 %	9,1 %	7,2 %	6,5 %	<b>8,3 %</b>
Sattelzugmaschinen	16,5 %	10,6 %	13,2 %	10,9 %	7,1 %	<b>11,7 %</b>
Reisebusse	2,2 %	1,5 %	1,1 %	1,7 %	1,5 %	<b>1,7 %</b>
Sonstige Zugmaschinen	1,4 %	0,8 %	1,2 %	0,8 %	0,2 %	<b>0,8 %</b>
Land- und forstwirtschaftliche Zugmaschinen	0,7 %	0,2 %	0,2 %	0,1 %	0,1 %	<b>0,3 %</b>
Sonstige Kraftfahrzeuge	0,4 %	0,9 %	0,6 %	1 %	1 %	<b>0,6 %</b>
<b>Gesamt</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>

Quelle: Auf Basis der KiD 2010, WVI GmbH, Braunschweig

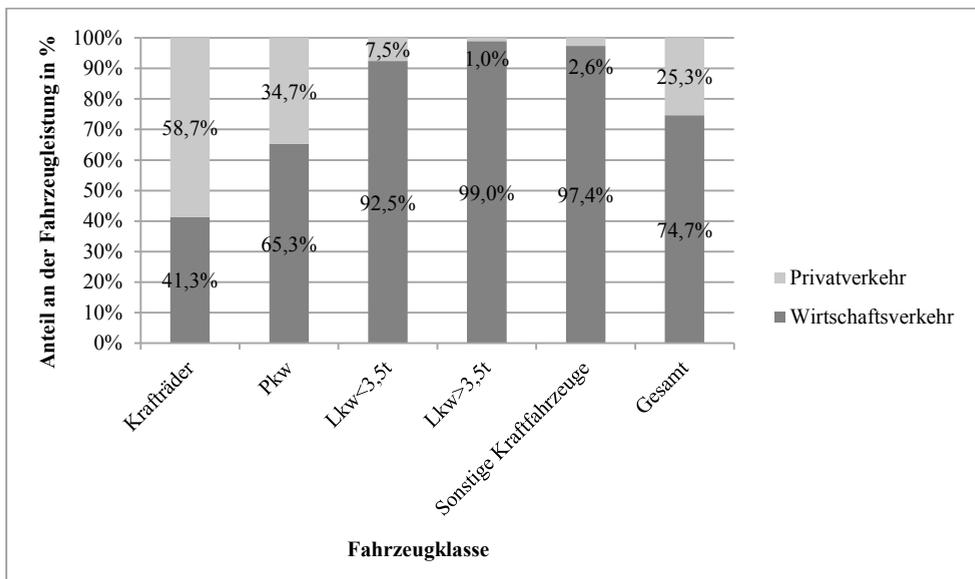
Abbildung 7: Mittelwerte der Tagesfahrzeugleistung im Wirtschaftsverkehr nach Wirtschaftszweigen im Vergleich nach Stadttypen (eigene Darstellung nach KiD 2010)



Quelle: Auf Basis der KiD 2010, WVI GmbH, Braunschweig

Auch ist in diesem Zusammenhang nicht zu vernachlässigen, dass einem Großteil der täglich zurückgelegten Wege keine wirtschaftliche Motivation zu Grunde liegt. Wie in Abbildung 8 deutlich zu ersehen ist, nehmen im städtischen Raum private Fahrten 34,7 % (Pkw) bzw. 58,7 % (Krafträder) der täglichen Fahrzeugleistung ein. Der KiD (2010) Schlussbericht hat hier detailliert die Fahrtzwecke der privaten Fahrten aufgeschlüsselt und kam im Bereich der Pkw zu dem Ergebnis, dass wochentags knapp 77 % der Fahrten den Zwecken „Fahrt nach Hause“ und „Fahrt zum Arbeitsplatz“ dienen (KiD, 2010). Dem zur Folge kann davon ausgegangen werden, dass wenn ein Dienstfahrzeug auch privat genutzt wird, dies, nach Beendigung des Dienstgeschäftes, in fast allen Fällen auch am Wohnort des Beschäftigten abgestellt wird. Die enormen Anteile des Privatverkehrs sind in Abbildung 8 unterschieden nach Fahrzeugklasse dargestellt.

Abbildung 8: Anteile von Privat- und Wirtschaftsverkehr an der Fahrzeugleistung in der Raumkategorie Stadt



Quelle: Auf Basis der KiD 2010, WVI GmbH, Braunschweig

### Verkehrsleistung – Personenkilometer/Tonnenkilometer

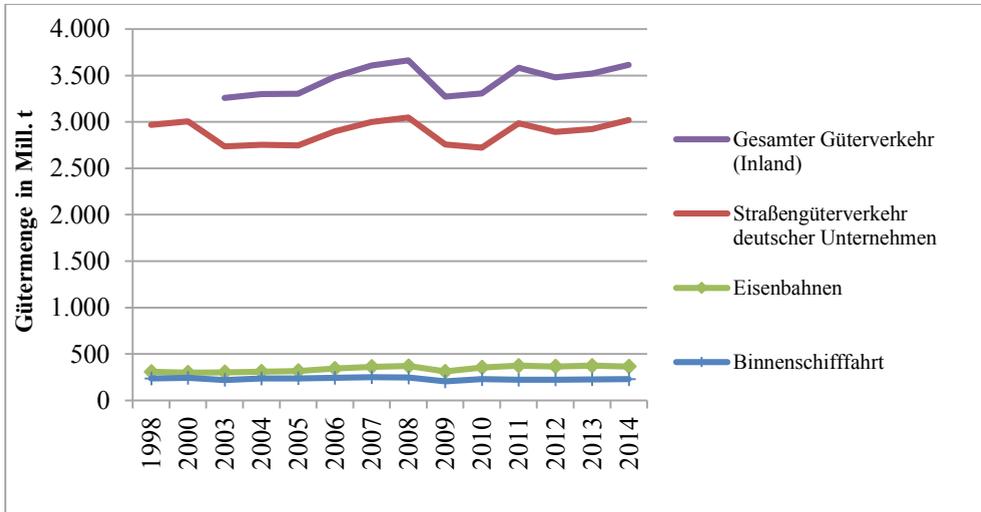
Nach den Statistiken des Bundesamtes für Statistik und des Bundesamtes für Güterverkehr wächst die transportierte Gütermenge in Deutschland schon seit Jahren nicht mehr (Destatis, 2015; BAG, o.J. und Abbildung 9). Die oben erwähnten zunehmend distanzintensiven Austauschbeziehungen stellen die eigentliche Herausforderung dar. Die gleiche Gütermenge wird nun weiter und damit mit mehr Ressourcenverbrauch transportiert. Den größten Anteil mit 71 % hat dabei der Verkehrsträger Straße<sup>2</sup> (Destatis, 2015).

Der Verkehrsaufwand (auch Verkehrsleistung in Tonnenkilometer, tkm) ist im Güterverkehr allein von 1998 bis 2014 um 53 % gestiegen (Destatis, 2015). Von 1998 bis 2012 hat die

<sup>2</sup> Ohne Berücksichtigung des Seeverkehrs.

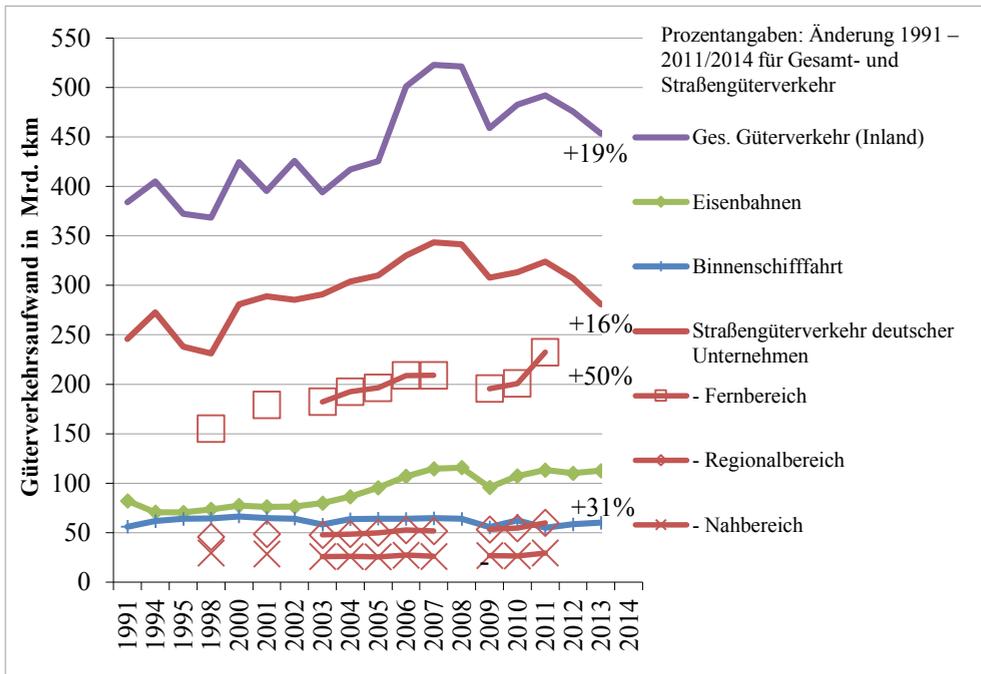
mittlere Transportweite der Güter um fast 20 Prozent zugenommen, am stärksten mit +36 % beim Verkehrsträger Straße (Destatis, 2015).

Abbildung 9: Entwicklung der transportierten Gütermenge in Deutschland 1998 bis 2014



Quelle: Arndt, 2014

Abbildung 10: Güterverkehrsaufwand in Deutschland 2001 bis 2014

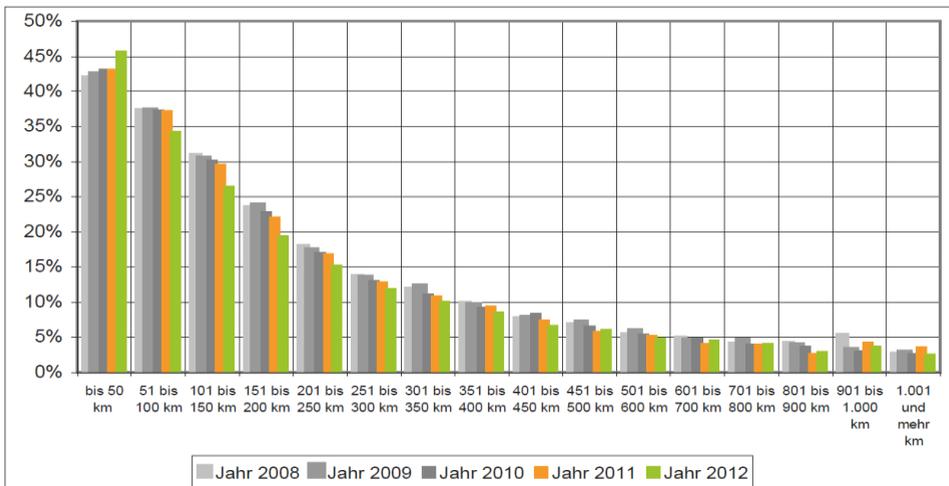


Quelle: Arndt, 2014: basierend auf Destatis und BAG, div. Jahrgänge

Für den urbanen Kontext ist die Betrachtung des Straßengüterverkehrs im Nahbereich besonders wichtig. Hier sind die Tonnenkilometer im selben Zeitraum gleich hoch geblieben. Die größte Anzahl der Fahrten (Fahrtaufkommen) hat jedoch kurze Distanzen und findet mit knapp 60 % im städtischen Bereich statt (BAG, 2012).

Wichtiger ist aber die Fahrleistung, die bei den Lkw-Fahrten immerhin zu ca. 40 % im städtischen Raum stattfindet (Sonntag, 1996). Die Fahrten im Nahbereich sind immer weniger ausgelastet, wie in der Abbildung 11 zu sehen ist. Während die Leer-km im Fernverkehr abnehmen, steigen diese in der Entfernungsklasse bis 50 km. Diese beschreibt das logistische Problem der „letzten Meile“ wie bereits in Arndt (2015) erwähnt. Die Bündelung der immer kleinteiligeren und zeitkritischeren Sendungen ist eine logistische Herausforderung.

Abbildung 11: Anteil der Leer-km an der Gesamtfahrleistung im Lkw-Verkehr nach Entfernungsstufen



Quelle: Arndt, 2015

## Flottenzusammensetzung und -größe nach Wirtschaftszweigen und Fahrzeugklassen

In Bezug auf eine potentielle Elektrifizierung von Fahrzeugflotten im Wirtschaftsverkehr bzw. zur Ableitung des Potentials zur Teilnahme an Netzdienstleistungen, ist ein Überblick über Flottenzusammensetzung und -größe wichtig. Auch hierfür werden die Daten der KiD (2010) wirtschaftszweigfein ausgewertet. Die Abbildung 12 zeigt die mittlere Anzahl der Fahrzeuge in den jeweiligen Fahrzeugklassen in den Fahrzeugflotten der Wirtschaftszweige.

In städtischen Räumen lassen sich die Flotten mit der durchschnittlich größten Anzahl von Fahrzeugen in den Wirtschaftszweigen *Energieversorgung, Verarbeitendes Gewerbe/Herstellung von Waren, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung und Beseitigung von Umweltverschmutzungen, Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden, Erbringung von Finanz- und Versicherungsdienstleistungen* ausmachen. In diesen Wirtschaftszweigen sind in den Flotten im Durchschnitt mehr als 20 Fahrzeuge, hauptsächlich Pkw zu finden. In anderen Wirtschaftszweigen hingegen ist die

durchschnittliche Fahrzeuganzahl deutlich geringer. So kommen z.B. *Erbringung von freiberuflichen, wissenschaftlichen und technischen Dienstleistungen, Gastgewerbe/ Beherbergung und Gastronomie* auf gerade mal durchschnittlich rund 5 Fahrzeuge pro Flotte.

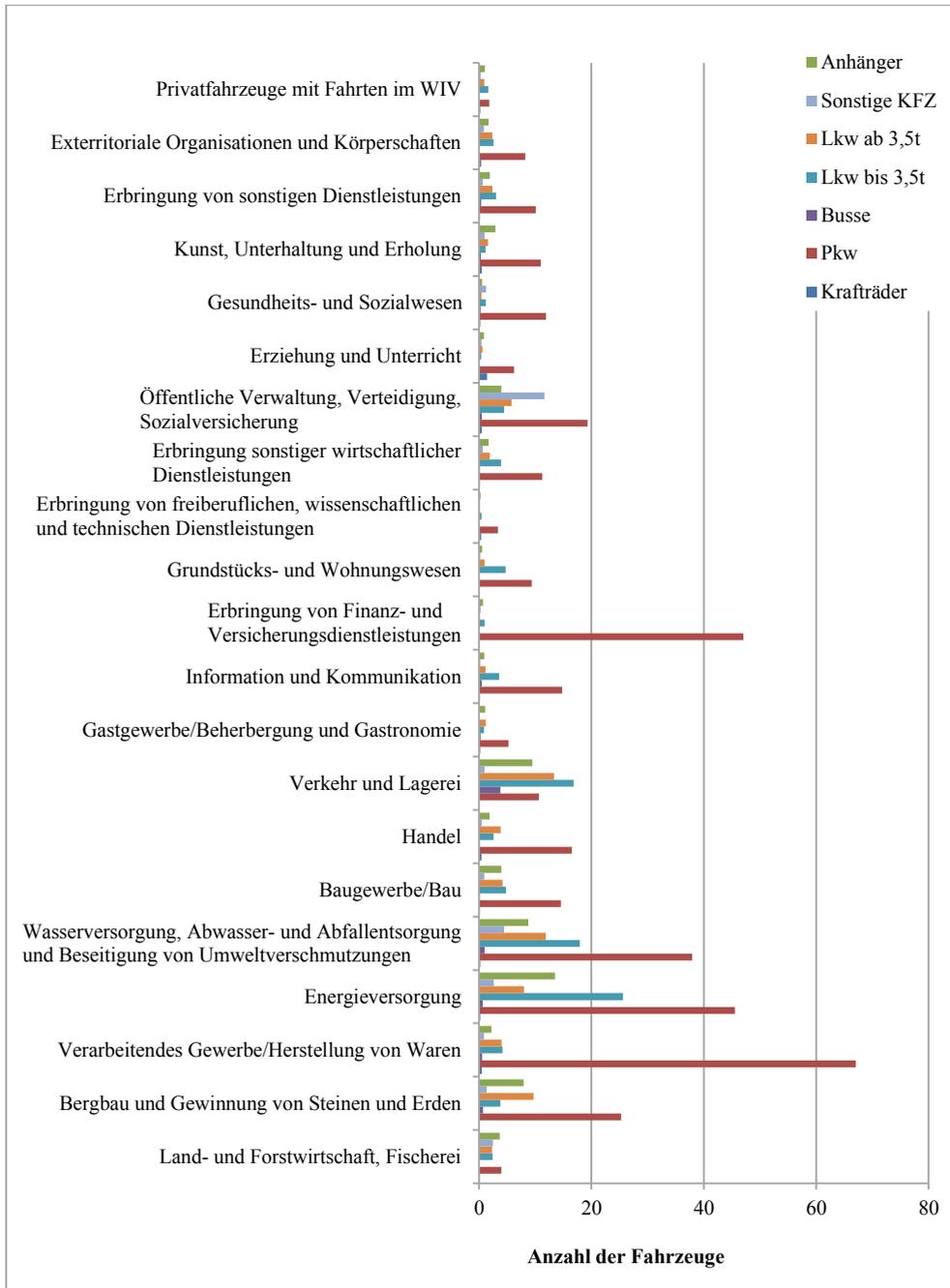
In den meisten Zweigen haben die Pkw den deutlich höchsten Anteil. Der Mittelwert für die Pkw beträgt 18,14 Fahrzeuge pro Flotte. Zweige mit hohen Anteilen von Lkw sind *Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung und Beseitigung von Umweltverschmutzungen, Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden* und *Verkehr und Lagerei*. Die Mittelwerte für die Lkw bis 3,5t und die Lkw ab 3,5 t liegen bei 5,11 und 3,66 Fahrzeugen pro Flotte. Auch fällt ein hoher Anteil an sonstigen Kraftfahrzeugen im Zweig *Öffentliche Verwaltung, Verteidigung und Sozialversicherung* auf. Hier sind durchschnittlich 11,65 sonstige Kraftfahrzeuge in einer Flotte vorhanden. Der Mittelwert für die sonstigen Kraftfahrzeuge liegt lediglich bei 1,52 Fahrzeugen pro Flotte. Die größte mittlere Anzahl an Krafträdern gibt es mit 1,41 Fahrzeugen im Bereich *Erziehung und Unterricht* gegenüber einem Mittelwert von 0,29 in allen Wirtschaftszweigen. Anhänger sind in vielen Zweigen zu hohen Anteilen vertreten, im Bereich der Dienstleistungen machen sie eher geringe Anteile aus. Zudem fallen auch im Vergleich der verschiedenen Stadttypen deutliche Unterschiede auf. In Großstädten sind durchschnittlich mehr als doppelt viele Fahrzeuge wie in mittleren und Kleinstädten Bestandteil der Flotten. Insbesondere in den Zweigen *Verarbeitendes Gewerbe/Herstellung von Waren, Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung und Beseitigung von Umweltverschmutzungen* sind sehr hohe mittlere Bestände an Fahrzeugen festzustellen.

### **Antriebsart der Fahrzeuge nach Stadt- und Gemeindetypen**

In Tabelle 3 sind die hochgerechneten Fahrzeugbestände nach ausgewählten Antriebsarten im WIV im Vergleich nach Stadt- und Gemeindetypen dargestellt. Diesel stellt, gefolgt von Benzin, die mit Abstand häufigste Antriebsart dar. Der hochgerechnete Bestand zeigt knapp 3 Millionen Fahrzeuge mit Benzinmotor und über 6,4 Millionen Fahrzeuge mit Dieselmotor im WIV. Die Zahl der Elektrofahrzeuge im WIV liegt noch bei bescheidenen 2.875 Stück. Dazu kommen 3.831 Hybrid (Benzin-Elektro)-Fahrzeuge, die im WIV eingesetzt werden. Das entspricht lediglich 0,07 % der gesamten WIV-Fahrzeugflotte. Im Vergleich der Stadt- und Gemeindetypen fällt zunächst auf, dass in allen Stadttypen die absoluten Bestände an Elektro- und Hybridfahrzeugen deutlich höher sind als in ländlichen Räumen. Auch sind ein geringerer Anteil an Fahrzeugen mit Benzinmotoren und ein hoher Anteil von Fahrzeugen mit Dieselmotoren (78,48 %) in ländlichen Gemeinden festzustellen. In mittleren Städten ist auffällig, dass dort deutlich weniger Elektrofahrzeuge eingesetzt werden als in Klein- und Großstädten, dafür aber deutlich mehr Fahrzeuge mit Erdgasantrieb. Auch der Anteil von Hybridfahrzeugen ist gegenüber Kleinstädten erhöht. Kleinstädte haben mit 0,049 % den größten Anteil an Elektrofahrzeugen, gegenüber 0,042 % in Großstädten. Weiterhin ist festzustellen, dass der Anteil von Fahrzeugen mit Dieselmotor mit der Größe der Städte ab- und der Anteil von Fahrzeugen mit Benzinmotoren zunimmt.

Die in Abbildung 13 dargestellte Aufschlüsselung der hochgerechneten Bestandszahlen für den städtischen Raum nach Antriebsart und Fahrzeugklasse zeigt, dass ein Großteil der im WIV eingesetzten Fahrzeuge von Dieselmotoren angetrieben wird. Lediglich im Bereich der Pkw kommen zu 34 % Benzinfahrzeuge zum Einsatz. Die Zahl der alternativ angetriebenen Fahrzeuge ist insgesamt gesehen verschwindend gering. Deren Zahl und die Antriebsvielfalt der zum Einsatz kommenden Fahrzeuge sind im Pkw-Bereich jedoch am höchsten.

Abbildung 12: Flottenzusammensetzung nach Wirtschaftszweigen und Fahrzeugklassen in städtischen Räumen



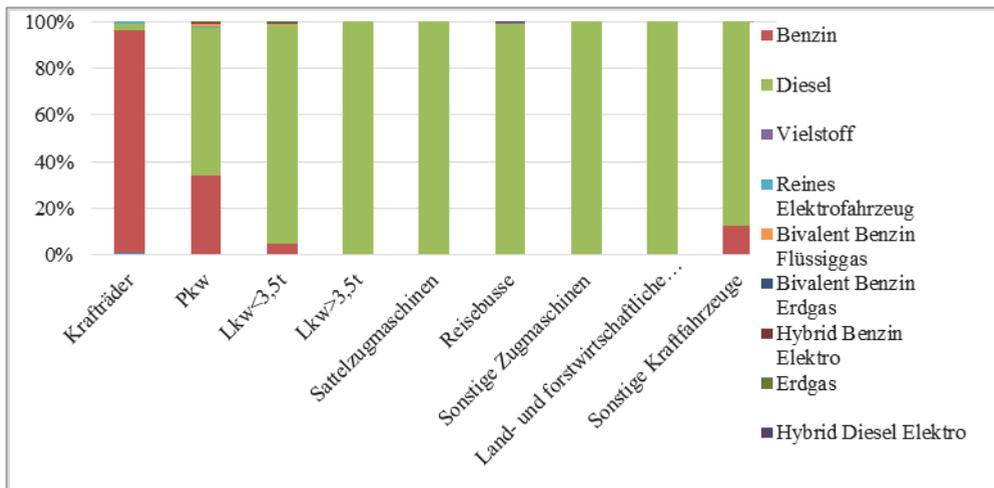
Quelle: Auf Basis der KiD 2010, WVI GmbH, Braunschweig

Tabelle 3: Hochgerechneter Fahrzeugbestand nach ausgewählten Antriebsarten im Wirtschaftsverkehr nach Stadt- und Gemeindetypen

Stadt- und Gemeindetypen	Benzin	Diesel	Reiner Elektroantrieb	Hybrid Benzin/ Elektro	Erdgas	Gesamt
Großstadt	1.029.464	1.419.614	1.037	1.615	7.161	<b>2.458.892</b>
Mittlere Stadt	897.533	1.968.832	477	1.082	10.791	<b>2.878.715</b>
Kleinstadt	669.272	1.653.145	1.152	782	3.311	<b>2.327.661</b>
Stadt	2.596.269	5.041.591	2.666	3.478	21.264	<b>7.665.268</b>
Land	373.755	1.376.327	209	353	3.113	<b>1.753.756</b>
<b>Gesamt</b>	<b>2.970.024</b>	<b>6.417.918</b>	<b>2.875</b>	<b>3.831</b>	<b>24.376</b>	<b>9.419.024</b>

Quelle: Auf Basis der KiD 2010, WVI GmbH, Braunschweig

Abbildung 13: Anteile unterschiedlicher Antriebsarten am hochgerechneten Gesamtbestand der jeweiligen Fahrzeugklasse



Quelle: Eigene Berechnung auf Basis von KiD 2010, WVI GmbH Braunschweig

### 2.1.4 Auswirkungen auf den Städtischen Lebensraum

Die Auswirkungen des Verkehrs auf den städtischen Lebensraum sind mannigfaltig. So sind der Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur einerseits Voraussetzung für die Versorgung der Stadtbevölkerung, Wirtschaftsfaktor und haben einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Flächennutzung und Nutzungsintensität in urbanen Agglomerationen. Andererseits prägt nicht zuletzt der Wirtschaftsverkehr das negative Bild des Verkehrs, welches sich wohl am ehesten durch die zahlreichen internen und externen negativen Effekte des Verkehrs beschreiben lässt. Die am häufigsten diskutierten sind Staus, Flächeninanspruchnahme, Lärmemissionen, Schadstoffemissionen, Verunfallte und Verkehrstote.

Hierbei führen insbesondere Lärm- und Schadstoffemissionen mittel- bis langfristig zu gesundheitlichen Schäden und haben einen nachhaltig negativen Einfluss auf die Lebensqualität in städtischen Quartieren.

Während CO<sub>2</sub>-Emissionen hauptsächlich zum Voranschreiten der globalen Erwärmung beitragen, haben CO, NO<sub>x</sub> und Partikelemissionen (PM) die in Tabelle 4 dargestellten Effekte auf den menschlichen Körper.

Tabelle 4: Emissionstypen und gesundheitliche Effekte

<b>Emissionstyp</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Gesundheitlicher Effekt</b>
Kohlenstoffmonoxid (CO)	giftiges Gas, entzieht dem Blut Sauerstoff	befördert in geringen Dosen Herzkrankheiten
Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	reagieren unter Sonnenlicht mit Kohlenwasserstoffen, was zur Ozonbildung führt	Atembeschwerden
Partikel (PM)	Rußpartikel mit flüchtigen Kohlenwasserstoffen sowie Schwefel- und Metallrückstände von Kraftstoffen und Motorschmierstoffen	kleine und extrem kleine Partikel befördern kardiovaskuläre und Lungenerkrankungen

Quelle: AECC, 2015

Gerade in Bezug auf letztere Emissionen spielt der Wirtschaftsverkehr, insbesondere der Güterwirtschaftsverkehr, eine wichtige Rolle da hier im Vergleich zum Privatverkehr, große und dieselangetriebene Fahrzeuge zum Einsatz kommen.

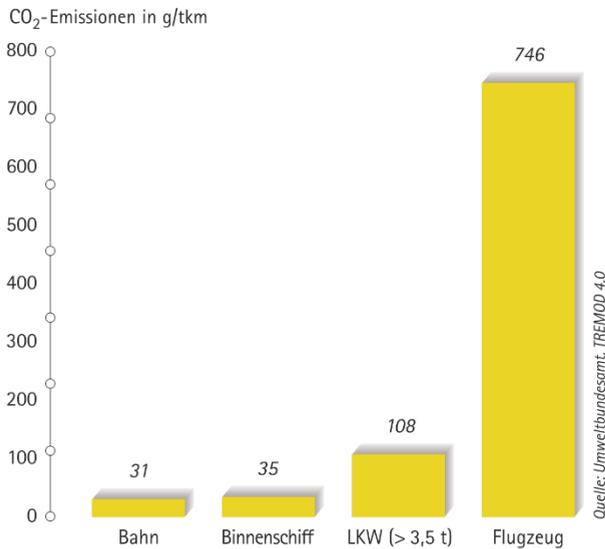
Insbesondere im Zusammenhang mit CO<sub>2</sub>-Emissionen spielt der Straßengüterverkehr eine zunehmende Rolle. Auch ist im Güterverkehr bei der bisherigen Rahmensetzung im Gegensatz zum Personenverkehr mit einer erheblichen Zunahme des Verkehrsaufwandes zu rechnen. Die Verkehrsprognose 2025 der Bundesregierung prognostiziert eine Steigerung des Verkehrsaufwandes im Straßengüterverkehr bis 2025 um 79 % (Intraplan, 2005).

Bezogen auf das Klima ist der Modal Split im Güterverkehr als besonders problematisch einzustufen. Wie in Abbildung 14 dargestellt, hat der dominierende Straßenverkehr (ca. 70 % an der Güterverkehrsleistung) mit Abstand den größten spezifischen CO<sub>2</sub>-Ausstoß von allen landgestützten Güterverkehrsmitteln.

Nach den Untersuchungen des Sachverständigenrates für Umweltfragen werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Güterverkehr weiter ansteigen (SRU, 2012). Das basiert vor allem auf der schon dargestellten Zunahme des Entfernungsniveaus im Güterverkehr.

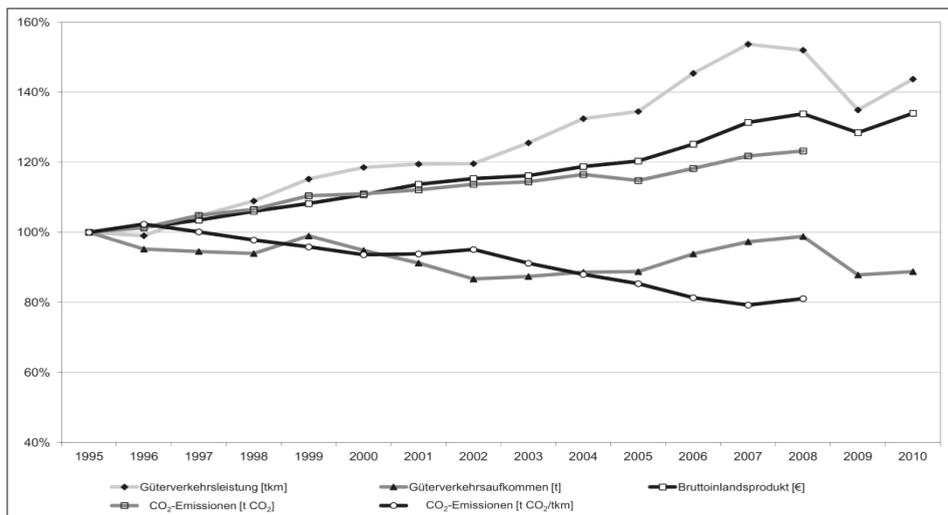
Abbildung 14: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Güterverkehrsmittel

### Kohlendioxidemissionen des Güterverkehrs in Deutschland



Quelle: BUND, 2006

Abbildung 15: Trend der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Güterverkehrs



Daten zu CO<sub>2</sub>-Emissionen nur bis 2008 vorhanden.  
 Quelle: BMVBS 2011; IFEU 2008; Statistisches Bundesamt 2010a; 2011b; 2011c

Quelle: SRU, 2012

Die durchaus im Verkehrsbereich vorhandenen technischen Effizienzverbesserungen trugen zwar zu einer moderaten Senkung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei, doch durch Zunahme des Verkehrsaufwandes durch die Entfernungssteigerung im Straßengüterverkehr wurden diese Effizienzgewinne überkompensiert.

Das Umweltbundesamt schreibt dazu: "Beim Straßengüterverkehr zeigt sich auch hier mit Ausnahme der SO<sub>2</sub>-Emissionen, dass die technisch bedingten Senkungen je Tonnenkilometer aufgrund der erheblich gestiegenen Verkehrsleistung (auf 198 % gegenüber 1991) teilweise (Partikel und VOC) oder fast vollständig (Stickstoffoxide, NO<sub>x</sub>) kompensiert und bei CO<sub>2</sub> sogar überkompensiert wurden. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßengüterverkehrs liegen 2006 trotz technischer Verbesserungen bei 109 % gegenüber 1991" (UBA, 2013).

Wie oben schon beschrieben, erbringt der Pkw mit 60 % einen Großteil der Fahrzeug-leistung im WIV. Dem TREMOD 5.1 Modell zur Folge, dessen Werte in Ifeu (2010) zitiert und in Tabelle 5 dargestellt werden, kommen die Pkw (Privat- und Personenverkehr) im Jahr 2015 innerorts auf einen Fahrleistungsanteil von 82,31 %. Demgegenüber kommen die Lkw im Jahr 2015 innerorts auf einen Fahrleistungsanteil von 4,29 %.

Tabelle 5: Innerorts-Fahrleistungsanteile der Kfz-Flotte aus TREMOD 5.1

Fzg.-Kategorie	FL-Anteil: 2005	FL-Anteil: 2010	FL-Anteil: 2015	FL-Anteil: 2020
Reisebus	0,11 %	0,08 %	0,09 %	0,14 %
Linienbus	0,46 %	0,46 %	0,46 %	0,48 %
LNF	7,62 %	8,42 %	9,04 %	9,61 %
MZR	3,47 %	2,91 %	2,97 %	3,49 %
Pkw	83,48 %	83,57 %	82,31 %	80,62 %
Lkw	3,57 %	3,80 %	4,29 %	4,74 %
sonstige	1,29 %	0,76 %	0,83 %	0,92 %
<b>gesamt</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>

Quelle: Ifeu, 2010

Obwohl im Fahrleistungsanteil der Pkw der Privatverkehr inkludiert ist, zeigen die in Tabelle 6 dargestellten Anteile an den Gesamtemissionen, dass Lkw und LNF trotz ihrer geringen Fahrleistungsanteile überproportional stark für die innerörtlichen Partikel- und Stickoxidemissionen verantwortlich sind. Hierbei sei zudem darauf verwiesen, dass in Bezug auf die privaten Fahrten mit Lkw und LNF laut der in Abbildung 8 dargestellten KiD (2010) Ergebnisse im Vergleich zum Pkw sehr gering ausfallen.

Ähnlich verhält es sich zudem mit den Lärmemissionen, wie die in Abbildung 16 dargestellte Studie aus dem Jahr 1998 zeigt.

Resümierend kann also festgehalten werden, dass die Pkw aufgrund ihrer zahlenmäßigen Verbreitung stärker zur Flächeninanspruchnahme, Staubildung und CO-Emissionen beitragen als die vergleichsweise wenigen Lkw auf innerstädtischen Straßen. Diese sind jedoch Hauptursache für NO<sub>x</sub>-, PM-, CO<sub>2</sub>- und Lärmemissionen.

Eine Strategie, die diesen Verhältnissen Rechnung trägt müsste folglich im Bereich der kleineren Fahrzeuge eher Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung bzw. Effizienzsteigerung

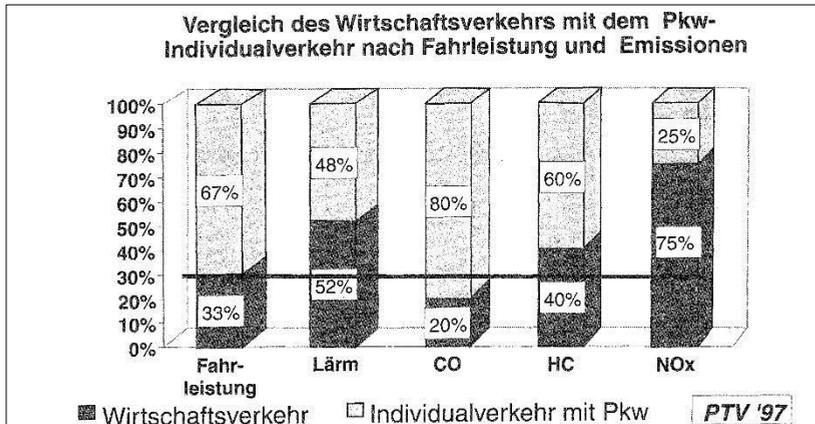
unterstützen, während gerade im Lkw-Bereich neben Verkehrsvermeidungsstrategien verstärkt nach effizienteren bzw. abgasfreien Antriebstechnologien geforscht werden sollte.

Tabelle 6: Anteile verschiedener Fahrzeugkategorien an den Kfz-Emissionen innerorts

<b>NO<sub>x</sub>-Anteile</b>								
<b>Kfz</b>	<b>2005</b>		<b>2010</b>		<b>2015</b>		<b>2020</b>	
	<b>HB2.1</b>	<b>HB3.1</b>	<b>HB2.1</b>	<b>HB3.1</b>	<b>HB2.1</b>	<b>HB3.1</b>	<b>HB2.1</b>	<b>HB3.1</b>
LNF	7,5%	10,1%	8,1%	12,8%	8,5%	14,2%	8,7%	14,9%
Lkw	46,7%	30,5%	50,2%	31,3%	46,9%	30,3%	44,7%	24,0%
Pkw(kalt)	12,0%	15,1%	8,5%	9,7%	7,5%	5,0%	8,2%	7,9%
Pkw(warm)	33,8%	44,3%	33,1%	46,2%	37,1%	50,5%	38,3%	53,1%
Gesamt	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
<b>PM-Anteile</b>								
<b>Kfz</b>	<b>2005</b>		<b>2010</b>		<b>2015</b>		<b>2020</b>	
	<b>HB2.1</b>	<b>HB3.1</b>	<b>HB2.1</b>	<b>HB3.1</b>	<b>HB2.1</b>	<b>HB3.1</b>	<b>HB2.1</b>	<b>HB3.1</b>
LNF	16,2%	24,6%	14,7%	28,9%	13,1%	30,5%	12,2%	29,9%
Lkw	39,0%	20,3%	32,5%	17,0%	24,9%	17,3%	22,0%	14,8%
Pkw(kalt)	12,5%	12,0%	16,8%	13,6%	21,9%	14,7%	25,4%	17,6%
Pkw(warm)	32,4%	43,1%	36,0%	40,5%	40,1%	37,5%	40,4%	37,7%
Gesamt	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Anmerkung: ohne motorisierte Zweiräder, Busse und sonstige Kfz							<b>IFEU 2010</b>	

Quelle: Ifeu, 2010

Abbildung 16: Anteile Pkw-Individualverkehr und Wirtschaftsverkehr an verschiedenen Emissionen in München 1994



Quelle: Bieling, 1998

## 2.1.5 Verkehrsleistung und Fahrzeuge im Wirtschaftsverkehrs

Die Datengrundlagen für den Wirtschaftsverkehr und im Speziellen für den städtischen Wirtschaftsverkehr sind immer noch eher rudimentär. Da der Wirtschaftsverkehr sowohl den gewerblichen Personen- als auch den Gütertransport sowie dessen Kombination umfasst, ist die Abbildung der Ausgangssituation nur mit Hilfe von Statistik-Kombinationen und Annahmen möglich. Die wichtigsten Statistiken hierzu sind die Erhebungen KiD (2010) und Wermuth (2012) für gewerbliche Halter und Nutzer sowie MiD (2008); infas und DLR (2009) für private Halter. Für die spätere Entwicklung eines Energieversorgungsszenarios inklusive der Berücksichtigung der Elektromobilität als neue Stromnachfrage ist auch die Berücksichtigung von Fahrzeugbeständen notwendig. Hierzu werden sowohl Status Quo als auch Trends aus der Fahrzeugbestandsstatistik des Kraftfahrtbundesamtes abgeleitet. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit eine Verbindung zwischen dem Fahrzweck und dem Fahrzeughalter herzustellen, da sonst die Merkmale aus den Statistiken und Befragungen nicht verknüpft werden können.

Im Projekt werden daher zur Erfassung der Ausgangssituation die Verkehrsleistungen über die Gruppe der gewerblichen Halter definiert. Die Aufteilung in privaten und gewerblichen Verkehr mit Kraftfahrzeugen (Pkw und Nutzfahrzeuge) wird anhand des Bestandes an gewerblichen Haltern zusammen mit den jährlichen Fahrleistungen aus der KiD (2010) vorgenommen. Als vereinfachend wird angenommen, dass sich die privat erbrachten Fahrleistungen mit gewerblich zugelassenen Fahrzeugen und die gewerblichen Fahrleistungen mit privaten zugelassenen Fahrzeugen gegenseitig annähernd aufheben. Die Auswertung nach Haltergruppen von Pkw und erbrachten Fahrleistungen in der KiD (2010) ergeben für gewerblich zugelassenen Pkw mit privater Nutzung ca. 30 Mrd. km und ca. 45 Mrd. km für private Halter mit gewerblicher Nutzung. Die KiD (2010) Auswertung ergibt für alle Haltergruppen einen Wert von 507 Mrd. km. Die getroffenen Annahmen sind mit Unsicherheiten behaftet, erlauben aber eine Abschätzung des Pkw-Wirtschaftsverkehrs für Deutschland.

Für die Abschätzung des Gütertransportanteils des Wirtschaftsverkehrs mit Kraftfahrzeugen auf der Straße wird unterstellt, dass die Transportleistung aller Lkw vollständig als gewerblich bedingt anzusehen ist. Die KiD (2010) weist einen privat bedingten Gütertransport von ca. 7 % bezogen auf die jährliche Gesamtfahrleistung in 2009/2010 auf. Auch hier sei darauf verwiesen, dass durch die getroffenen Annahmen Unsicherheiten bei der Abschätzung der Verkehrsleistung entstehen und das Phänomen des Wirtschaftsverkehrs durch diese Annahme um den genannten Anteil überschätzt wird.

Zur räumlichen Eingrenzung des Wirtschaftsverkehrs im städtischen Bereich wird unterstellt, dass der in der Verkehrsstatistik ausgewiesene Nahverkehr gleich gesetzt wird mit dem städtischen Verkehr (Radke, 2015). Der Regional- und Fernverkehr (Transport-Entfernung über 50 km) wird als überregionaler Fernverkehr gewertet. Durch diese Vereinfachung wird der Nahverkehr im ländlichen Bereich dem städtischen Bereich zugeschlagen.

Durch die getroffenen Annahmen ist eine Aufschlüsselung von Kenngrößen wie mittlere jährliche Fahrleistung, Beladungs- und Besetzungszahl sowie Fahrzeugbestand inklusive dessen zeitlicher Entwicklung möglich. Es kann auf die Fahrzeugstatistiken des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) zurückgegriffen werden.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass aufgrund der getroffenen Vereinfachungen das Phänomen des städtischen Wirtschaftsverkehrs in der Tendenz überschätzt wird, da der Verkehr in ländlichen Gebieten nicht abgegrenzt wird und der privat bedingte Güterverkehr mit gewerblich zugelassenen Kraftfahrzeugen dem Wirtschaftsverkehr zugeordnet wird.

Im Jahr 2010 wird für die gesamte Personenverkehrsleistung in Deutschland ein Wert von knapp 1.120 Mrd. Pkm angegeben. Auf den motorisierten Individualverkehr entfallen 912 darauf 81,6 % (Radke, 2015). Nach der beschriebenen Vereinfachung ergibt sich für das Jahr 2010 ein Anteil des Wirtschaftsverkehrs am Personenverkehr von 11,1 %. Auf den städtischen Wirtschaftsverkehr entfallen demnach 6,4 % der gesamten Personenverkehrsleistung. Gemäß den Annahmen entfällt der gesamte Güterverkehr auf den Wirtschaftsverkehr und auf den städtischen Wirtschaftsverkehr 4,9 % der gesamten Güterverkehrsleistung von knapp 630 Mrd. tkm. Der Straßenfernverkehr überwiegt deutlich, bedingt durch hohe Fahrleistungen gepaart mit vergleichsweise hoher Fahrzeugauslastung.

Die berechneten Fahrleistungen des Wirtschaftsverkehrs errechnen sich mit den Besetzungs- bzw. Beladungszahlen aus der KiD (2010) zu ca. 84 Mrd. km im Personenverkehr und im Güterverkehr zu knapp 91 Mrd. km. Für die Fahrleistungen des privaten Verkehrs ergeben sich 509 Mrd. km. Der berechnete Anteil des Wirtschaftsverkehrs beträgt 25,5 % an der gesamten Fahrleistung der Kraftfahrzeuge auf der Straße. In Wermuth wird eine gesamte Fahrleistung des Wirtschaftsverkehrs von knapp 162 Mrd. km angegeben, welche ca. 27 % der gesamten Fahrleistung aller Kraftfahrzeuge in Deutschland entspricht (Wermuth, 2012). Die durch die beschriebenen Annahmen berechneten Fahrleistungen des Wirtschaftsverkehrs (dominiert durch Pkw im Personenverkehr und Lkw im Güterverkehr) ergeben eine um knapp 8% höhere Fahrleistung. Dies stützt die bereits angesprochene Überschätzung des Wirtschaftsverkehrs in den Energieszenarien.

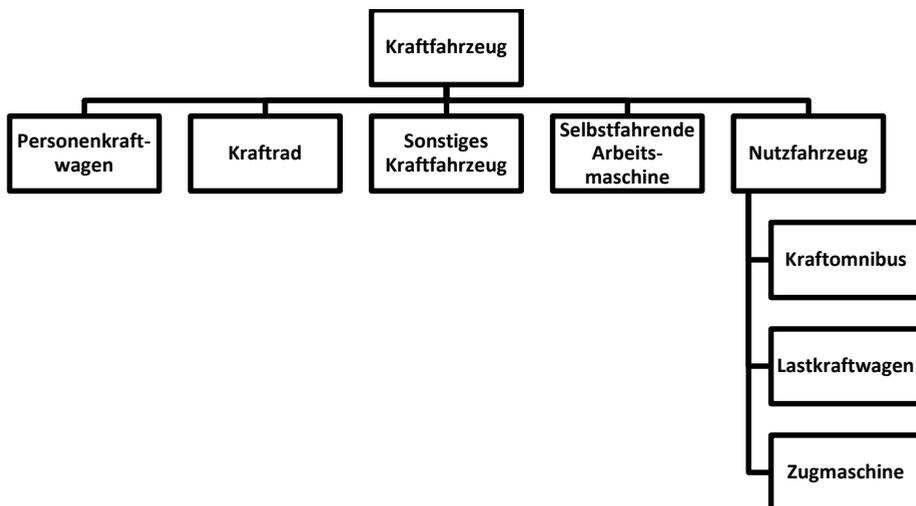
Mit der Annahme, dass der Wirtschaftsverkehr maßgeblich durch Fahrzeuge mit gewerblichen Haltern geleistet wird, kann auf die Bestandsstatistik des Kraftfahrtbundesamtes zurückgegriffen werden. Demnach wird der Wirtschaftsverkehr gemessen an

der Fahrzeuganzahl maßgeblich mit Personenkraftwagen (Pkw) und Nutzfahrzeugen (NFZ) durchgeführt. Die Einteilung der Fahrzeuge ist in Abbildung 17 aufgezeigt.

Bei den NFZ ist die Unterklasse leichten NFZ und leichten Lkw von besonderem Interesse. Sie eignen sich aufgrund der eher mäßigen zulässigen Gesamtgewichte und den relativ kurzen und gut bekannten Fahrstrecken sehr gut für eine Elektrifizierung des Antriebstrangs inklusive Batterieauslegung. Gemessen an der Fahrzeuganzahl ist der Bereich dominant in der NFZ-Klasse. Zur Erschließung hoher Marktanteile von gewerblichen Elektrofahrzeugen und damit auch möglichst hoher positiver Effekte ist dies ebenfalls entscheidend. Daraus ergeben sich Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und Lkw als interessante Fahrzeuggruppen für eine Elektrifizierungsstrategie des Wirtschaftsverkehrs. Sie vereinen zusammen knapp 84 % aller gewerblich gehaltenen Kraftfahrzeuge in Deutschland (Kraftfahrtbundesamt, 2014a). Die Lkw-Klasse lässt sich darüber hinaus noch weiter unterteilen. Shell (2010) und Aichinger (2014) nutzen für ihre Arbeiten eine funktionale Aufteilung mit 5 Untergruppen.

Die Gruppe Sattelzugmaschine wird nach dieser Definition der Lkw-Klasse zugerechnet. Die Einteilung ist in Tabelle 7 dargestellt.

Abbildung 17: Einteilung von Kraftfahrzeugen



Quelle: Auf Basis von Kraftfahrtbundesamt, 2014b

Das KBA und die Europäische Gemeinschaft (EG) nutzen eine gröbere Unterteilung der Lkw-Klasse. Sie gliedern die Lkw allein am zulässigen Gesamtgewicht (zul. GG). Der Unterschied zwischen den beiden Gliederungsvarianten besteht in einer feineren Unterteilung der Fahrzeugklasse N2 und dem Anrechnen der Sattelzugmaschinen zur Lkw-Klasse (Shell, 2010 und Aichinger, 2014). Da diese Einteilung differenziertere Betrachtungen erlaubt, wird sie der gröberen Einteilung vorgezogen. Die Gruppe der Sattelzugmaschinen werden durch den Fokus auf der Elektrifizierung des städtischen Wirtschaftsverkehrs auf Grund des vorherrschenden Einsatzes im Fernverkehr nicht betrachtet, sodass vier Untergruppen für die Lkw-Klasse verbleiben.

Die einzelnen Lkw-Fahrzeugklassen besitzen unterschiedliche Bestands- und Neuzulassungsstrukturen zueinander als auch im Vergleich zur Pkw-Klasse. Der Status-Quo wird im Folgenden kurz erläutert. Die Pkw-Klasse bildet betragsmäßig mit 4,4 Mio. gewerblichen Fahrzeugen im Bestand die größte Klasse gewerblicher Kfz (siehe Tabelle 8). Dies entspricht einem Anteil von 10 % des gesamten Pkw-Bestandes in Deutschland.

Im Mittel ist also jeder zehnte Pkw gewerblich zugelassen. Betrachtet man hingegen die Neuzulassungen im Pkw-Bereich, wird eine deutlich andere prozentuale Verteilung sichtbar (siehe Tabelle 9).

Knapp zwei Drittel aller Pkw-Erstzulassungen entfallen auf gewerbliche Halter. Dies kommt durch die deutlich kürzeren Haltedauern vieler gewerblicher Pkw zustande. Die Haltedauern sind dabei geringer als die Nutzungsdauern der Pkw, so dass sie trotzdem im gesamtdeutschen Bestand verbleiben und häufig über den Zweitmarkt an einen privaten Halter gelangen. Dadurch erhöht sich der Bestandsanteil privater Halter gegenüber den Erstzulassungen.

Tabelle 7: Lkw-Klassen im Güterverkehr

	<b>Fahrzeugklasse</b>	<b>Typischer Einsatzbereich</b>	<b>zulässiges Gesamtgewicht (zGG)</b>
	leichte Nutzfahrzeuge (N1)	Dienstleistungs- und Lieferfahrzeug	kleiner 3,5 t
	leichte Lkw (N1)	Lieferverkehr Nah	3,5 bis 7,5 t
	mittelschwere Lkw (N2)	Lieferverkehr Regional, Transport Volumengüter	7,5 bis 12 t
	schwere Lkw (N3)	Güterfern- und Baustellenverkehr	größer 12 t
	Sattelzugmaschine (N3)	Güterfernverkehr	größer 12 t

Quelle: Aichinger, 2014 [aktualisiert]

Tabelle 8: Bestand an ausgewählten Kfz am 1. Jan 2013 in Deutschland.

<b>Bestandszahlen 2013</b>			
<b>Fahrzeugklasse</b>	<b>Gesamt</b>	<b>gewerblich angemeldet</b>	<b>Anteil gewerblich angemeldet [%]</b>
<b>Pkw gesamt</b>	43.431.124	4.409.248	10,2
<b>Lkw gesamt</b>	2.578.567	1.685.895	65,4
<b>darunter kleiner 3,5 t zGG</b>	2.045.436	1.247.504	61,0
<b>darunter 3,5 bis 7,5 t zGG</b>	262.390	199.372	76,0
<b>darunter 7,5 bis 12 t zGG</b>	77.160	64.662	83,8
<b>darunter größer 12 t zGG</b>	193.581	174.357	90,0

Quelle: Kraftfahrtbundesamt, 2013a

Tabelle 9: Neuzulassungen an ausgewählten Kfz im Jahr 2013

<b>Neuzulassungen</b>			
<b>Fahrzeugklasse</b>	<b>Gesamt</b>	<b>gewerblich angemeldet</b>	<b>Anteil gewerblich angemeldet [%]</b>
<b>Pkw gesamt</b>	2.952.431	1.832.306	62,1
<b>Lkw gesamt</b>	254.263	222.062	87,3
<b>darunter kleiner 3,5 t zGG</b>	208.132	179.100	86,1
<b>darunter 3,5 bis 7,5 t zGG</b>	16.347	15.197	93,0
<b>darunter 7,5 bis 12 t zGG</b>	8.568	7.914	92,4
<b>darunter größer 12 t zGG</b>	20.944	19.579	93,5

Quelle: Kraftfahrtbundesamt, 2013b

Im Lkw-Bereich wird aus Tabelle 8 und Tabelle 9 ersichtlich, dass einerseits der Bestand und die Neuzulassungen an Lkw im Vergleich zum Pkw-Bereich geringer sind, andererseits deutlich höhere prozentuale Anteile an gewerblichen Fahrzeugen vorliegen. Eine starke prozentuale Abweichung zwischen Bestand- und Neuzulassungsanteilen gewerblicher und privater Lkw wie im Pkw-Bereich existiert nicht. Die größte Abweichung findet in der kleinsten Gewichtsklasse statt. Dort sind knapp 61 % gewerblich gemeldet und 86 % werden gewerblich zugelassen. Im Gegensatz zum Pkw-Markt verbleibt der überwiegende Anteil an Lkw über seine gesamte Nutzungsdauer im gewerblichen Betrieb und scheidet dann aus dem deutschen Fahrzeugmarkt aus. Ein großer Zweitmarkt für Privatpersonen existiert allgemein nicht. Innerhalb der einzelnen Lkw-Klassen fällt zwar mit zunehmendem zulässigem Gesamtgewicht (zGG) die Bestandszahl, der prozentuale Anteil gewerblicher Fahrzeuge

steigt hingegen. In der Lkw-Klasse mit einem zGG > 12 t sind 90 % der Fahrzeuge gewerblich angemeldet sind. Dies erklärt sich mit dem für Privatpersonen eingeschränkten Nutzen von solch großen Nutzfahrzeugen. Die Anteile gewerblicher Fahrzeuge, sowohl im Pkw, als auch Lkw-Bereich sind über die Jahre annähernd konstant geblieben.

Im Hinblick auf eine breite Markteinführung von Elektrofahrzeugen im gewerblichen Bereich, ist die Verteilung der Fahrzeuge auf die einzelnen Klassen und Unterklassen vorteilhaft. Der Markt bietet in diesem Bereich bereits ein ausreichend großes Spektrum an Neufahrzeugen an. Innerhalb der Lkw-Klasse werden den leichten Nutzfahrzeugen (LNF) das größte Elektrifizierungspotenzial zugeschrieben. Dies lässt sich aufgrund ihres Einsatzmusters und ihres Gewichtes erklären. In der KiD (2010) wird für gewerbliche Lkw mit einer Nutzlast kleiner als 3,5 t eine durchschnittliche Tagesfahrleistung von knapp 61 km errechnet wohin gegen für Lkw mit höherer Nutzlast über 150 km Tagesfahrleistungen angegeben werden (Wermuth, 2012). Als Erkenntnis bleibt, dass Lkw mit höheren möglichen Nutzlasten deutlich längere Strecken pro Tag zurücklegen. Die Studie unterscheidet die Fahrzeuge nach zulässiger Nutzlast, dennoch gilt die Aussage im Trend auch für die Einteilung nach zulässigen Gesamtgewichten. Laut Aichinger besitzen die leichten Nutzfahrzeuge das „breiteste Angebot und die beste Verfügbarkeit im Bereich der rein elektrischen Nutzfahrzeugkonzepte“ (Aichinger, 2014).

Im Bereich der leichten Lkw (vgl. Tabelle 7) nimmt die “Anzahl der aktuell verfügbaren elektrischen Fahrzeuge bereits stark ab“. In der Klasse der schweren Lkw werden zurzeit nur einige wenige Umbauten unterschiedlicher Anbieter und noch weniger elektrische Eigenentwicklungen verwendet. Weiterhin werden diese Fahrzeuge fast ausschließlich in geförderten Forschungs- und Demonstrationsvorhaben eingesetzt. Als eines der wenigen Beispiele für schwere Lkw sei hier der BEV-Lkw (zGG 18 t) der Schweizer Firma E-Force genannt (E-Force, 2015). Hier bleibt ein Markterfolg abzuwarten, da eine wirtschaftliche Nutzung der Fahrzeuge aufgrund sehr hoher Anschaffungskosten aktuell schwierig ist.

### **2.1.6 Trends und Chancen für den städtischen Wirtschaftsverkehr**

Es konnte gezeigt werden, dass der Wirtschaftsverkehr zu einem bedeutenden Anteil zur Verkehrs- und Fahrleistung in Deutschland beiträgt sowie bedeutende Anteile am Fahrzeugbestand und an den Fahrzeug-Neuverkäufen erreicht (vgl. Kapitel 2.1.5). Für die Zukunft kann angenommen werden, dass der Wirtschaftsverkehr weiter wachsen wird und insbesondere in städtischen Gebieten durch gestiegene und veränderte Anforderungen vor tiefgreifenden Veränderungen steht. Somit ist davon auszugehen, dass klimarelevante und gesundheitsschädliche Emissionen des Wirtschaftsverkehrs ohne entsprechende Maßnahmen weiter steigen werden und der Erreichung von angestrebten nationalen Klimaschutz- und lokalen Emissionsschutzziele entgegenstehen. Lokal trägt der Wirtschaftsverkehr durch seinen hohen Anteil an dieselmotorischen Antriebstechniken besonders stark zur Feinstaub- und Stickoxidbelastung bei.

Zukünftige Trends des Verkehrs und damit auch des Wirtschaftsverkehrs sind Bestandteil von Szenarien zur Infrastrukturplanung und Energieversorgung. Prominentes Beispiel für den Bereich Infrastrukturplanung ist der Bundesverkehrswegeplan des Bundesministeriums für Verkehr und Infrastruktur (BMVI, 2014). Der Planungshorizont reicht dabei bis zum Jahr 2030. Die Prognose kommt zu dem Ergebnis, dass im Personenverkehr sowohl die Anzahl

der Fahrten um 4,6 % steigt, als auch die Verkehrsleistung um 10 % zunimmt. Das erwartete Wachstum beschränkt sich dabei nicht ausschließlich auf den Wirtschaftsverkehr, sondern bezieht sich auf den gesamten motorisierten Personenverkehr. Beim Güterverkehr wird ebenfalls ein Wachstum des Verkehrs auf der Straße prognostiziert. Es steigt nicht nur die transportierte Menge von Gütern um 17 % an, sondern auch die Transportleistung um 39 %. Die Studie sieht die Zunahme im Personenverkehr vor allem „auch künftig im Wirtschaftswachstum und der Individualmotorisierung“. Beim Güterverkehr wird kein expliziter Grund für die Zunahme genannt, jedoch ist es ersichtlich, dass der Güterverkehr eng an die wirtschaftliche Entwicklung gekoppelt ist, da er vor allem der Leistungserbringung bei wirtschaftlichen Aktivitäten dient.

Dem Wirtschaftsverkehr in der Stadt im Besonderen widmet sich Beckmann (2013). Die Studie identifiziert Zusammenhänge zwischen der städtischen Wirtschaft und dem Wirtschaftsverkehr. Aus den Erkenntnissen leitet sie Trends ab. So sind die zunehmende Miniaturisierung von Produkten, die Individualisierung der Nachfrage nach Produkten und Leistungen bzw. der Individualisierung der Nachfrage allgemein und die Zunahme des Online-Handels als Trend zu erkennen. Aus Kundensicht ist eine Erwartungshaltung hinsichtlich „Schnelligkeit der Lieferung“ immer stärker erkennbar. Dies bedeutet zusammengefasst, dass Kunden ihre Produkte, Leistungen oder Zustellungen zu jedem Ort, zu jeder Zeit und möglichst zeitnah fordern.

Als Treiber nennt sie demographische Veränderungen, wirtschaftsstrukturelle Veränderungen und globale Vernetzungen, Klimaschutz, Ziele der Energiewende und einen gesellschaftlichen Wertewandel. Als Trend sieht sie vor allem den Onlinehandel als treibenden Faktor für das Verkehrsaufkommen und -leistung des städtischen Güterverkehrs.

Zu einer ähnlichen Erkenntnis kommt auch Arndt (2013). Die Studie erkennt eine „Ausweitung und Flexibilisierung und Internationalisierung der Märkte“. Diese führt zu einer intensiveren und umfangreicheren Leistungserstellung in der Logistik. Sie benennt ebenso wie Beckmann neue Produktions- und Zustellungskonzepte (Just-In-Time, On-Demand), die für die Güterbereitstellung in Zukunft gefordert werden. Des Weiteren weist er auch auf den Verkehr aus Online-Geschäften hin. Dieser ist in den letzten Jahren kontinuierlich angestiegen und „eine Zunahme des elektronischen Handels (B2B, B2C) führt zu mehr Fahrten und zur Erhöhung der Transportweiten“. Der Wirtschaftsverkehr, der durch den Internethandel induziert wird, befindet sich noch in einer Wachstumsphase und wird daher weiterhin zunehmen.

Alle genannten Quellen kommen zu ähnlichen Einschätzungen des zukünftigen Trends im Wirtschaftsverkehr. Alle sehen eine weitere Zunahme und Intensivierung des Wirtschaftsverkehrs allgemein bzw. im Speziellen in Städten. Beckmann (2013) und Arndt (2013b) sehen veränderte Anforderungen an die Waren- und Leistungsbereitstellung im Hinblick auf Rund-um-die-Uhr und an-jedem-Ort Zustellung, einhergehend mit einer Just-in-time-Anlieferung und gestiegenen Schnelligkeit der Zusendung. Als weiteren großen Trend sehen beide Quellen den Online-Handel, der zu einer Zunahme des Wirtschaftsverkehrs führen wird und sich zurzeit noch in einer Wachstumsphase befindet. Dies macht deutlich, dass die Lösung eines nachhaltigen Wirtschaftsverkehrs im Hinblick auf Klimaschutzziele, Energieeffizienz und Reduktion lokaler Emissionen einen hohen Stellenwert hat insbesondere in Städten.

Chancen bietet daher die Elektromobilität speziell für den Wirtschaftsverkehr in der Stadt. So ist es einerseits möglich, lokale Abgasemissionen aus dicht besiedelten Gebieten fernzuhalten und so die Luftqualität in urbanen Gebieten zu verbessern. Weiterhin können durch elektrische Antriebe Lärmemissionen verringert werden. Die Lärmemissionen von Elektrofahrzeugen sind bei Pkw bis circa 25 km/h und bei Schwerlastfahrzeugen sogar bis 50 km/h deutlich geringer, da bei ihnen das Antriebsgeräusch konventioneller Motoren fehlt (Aichinger, 2014). Diese sind vor allem bei niedrigeren Geschwindigkeiten Hauptverursacher von Lärmemissionen. Eine geringere Lärmbelastung durch den Straßenverkehr ist positiv zu bewerten. Für Unternehmen, insbesondere aus der KEP-Branche, können dadurch Vorteile durch erlaubte Nachlieferungen entstehen. Sie können ihre Lieferzeiten anpassen, da nun nächtliche Lieferverbote aufgrund von Lärm keinen Bestand mehr haben könnten.

## **2.2 Stand der Forschung und Fragestellungen des Projekts**

(D. Dreyhaupt, S. Marker)

Das Projekt komDRIVE führt die im Forschungsprojekt „NET-ELAN“ begonnenen Untersuchungen zur Elektrifizierung des Verkehrs und dessen Netzintegration fort (Linszen et al., 2012). Im Projekt NET-ELAN wurde analysiert, ob im Sinne einer sektorübergreifenden Systemlösung ein Bestand an Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebskomponenten (EV) in bestehenden und zukünftigen Energieversorgungsstrukturen als Energiespeicher und zur energieeffizienten Einbindung von fluktuierenden Stromerzeugern eingesetzt werden kann. Die Untersuchung und Bewertung der Netzintegration von EV wurde sektorübergreifend anhand von Szenarioanalysen durchgeführt. Auswirkungen des Einsatzes einer EV-Flotte und Effekte bei verschiedenen Ladeszenarien bis hin zu einer möglichen Netzzurückspeisung wurden sowohl durch technische und ökonomische Detailmodelle als auch zusammenfassend durch ein Energiesystemmodell beschrieben und analysiert. Betrachtungsgegenstand in NET-ELAN ist die Elektrifizierung des privaten Personenverkehrs gewesen.

Abbildung 18: Die Häufigkeitsverteilung der täglichen Fahrstrecke (blaue Balken), die kumulative Aufsummierung der täglichen Fahrstrecken (in rot)

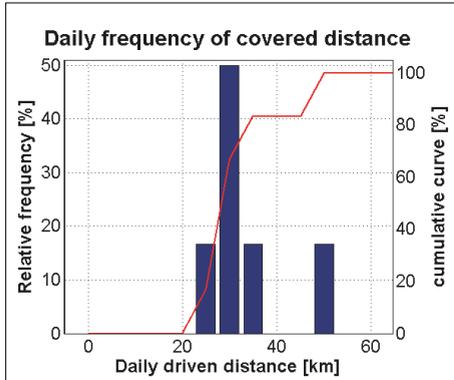
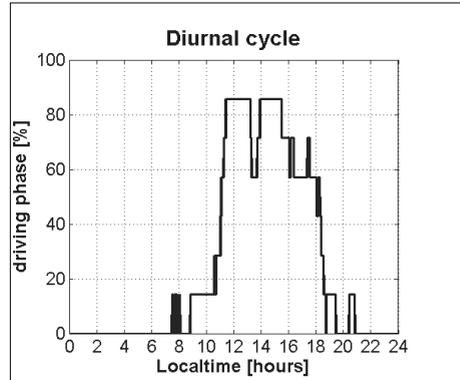


Abbildung 19: Die Wahrscheinlichkeitsverteilung eines Fahrzeug-einsatzes zu den entsprechenden Tageszeiten



Im Rahmen dieses Vorgängerprojektes wurden Fahrprofile messtechnisch erfasst, vereinzelt auch von gewerblich genutzten Fahrzeugen. Deren Auswertung ergab, dass diese (innerstädtisch) kommerziell genutzten Fahrzeuge oftmals Fahrverhalten aufweisen, die sich gut für eine EV-Nutzung eignen. In komDRIVE werden deshalb ausschließlich gewerbliche Flotten im Nahverkehr betrachtet. Hierbei stehen vor allem Pkw, leichte Transporter bis 3,5 t zGG und mittelschwere Lkw bis 12 t zGG im Vordergrund der Betrachtungen, da für die Fahrzeugklassen bereits Praxiserfahrungen vorliegen bzw. am ehesten von einer nennenswerten Substitution des Bestandes an konventionellen Fahrzeugen durch jene mit elektrischem Antriebsstrang ausgegangen werden kann. Als Beispiel für ein Fahrprofil ist die Auswertung der Vermessung eines Berliner Kurierfahrzeuges in Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt. Gewerbliche Flotten bieten oftmals günstige Rahmenbedingungen bzgl. einer geringen täglichen Wegstrecke bis ca. 50 km (vgl. Abbildung 18), bekannte und gut planbare Standzeiten, sowie definierte Stellplätze der Fahrzeuge auf den Betriebshöfen in Kombination mit einer hohen Regelmäßigkeit der Fahrten (vgl. Abbildung 19). Mit einem Anteil von 27 % an der Gesamtfahrleistung (vgl. Kapitel 2.1) bietet der innerstädtische Wirtschaftsverkehr ein nicht zu vernachlässigendes Schadstoffreduzierungspotential. Vor allem bei den zahlreichen Kurier- und Lieferdiensten werden sehr gute Voraussetzungen und ein hoher möglicher Elektrifizierungsgrad erwartet.

Insbesondere im städtischen Bereich führt die starke Dominanz von Dieselantrieben durch die große Fahrzeugdichte zu erhöhten Schadstoffbelastungen durch CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> (Knörr, 2012). Zwar werden immer schärfere Abgasgrenzwerte (EURO5/EURO6; LEV1/LEV2 etc.) definiert, die von den Fahrzeugen eingehalten werden müssen, jedoch kann es durch eine verstärkte Zunahme der Verkehrsleistung dennoch zu insgesamt erhöhten Luftschadstoffkonzentrationen kommen (Ratzenberger, 2014 und SRU, 2012). Hinzu kommt, dass die Ressourcen der fossilen Kraftstoffe nur begrenzt verfügbar sind. Daher sind auf lange Sicht nachhaltige Antriebskonzepte erforderlich. Abbildung 20 veranschaulicht die Schadstoffemissionen der in komDRIVE zu betrachtenden Antriebskonzepte „batterieelektrisch“ (battery electric vehicle, BEV) und „elektrohybrid“ (plug-in hybrid electric

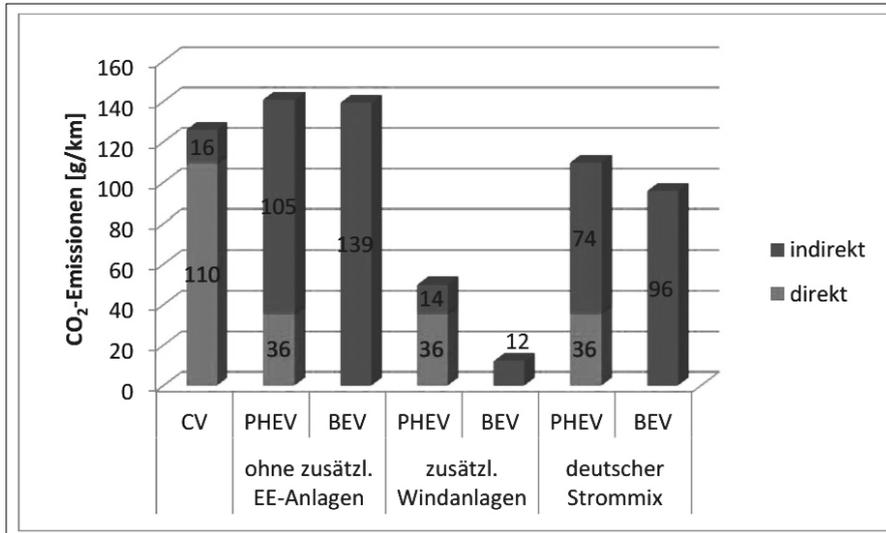
vehicle, PHEV<sup>3</sup>) im Vergleich zu konventionellen Varianten (ICEV). Herangezogen werden dabei nach Hacker et al. (2011) die verschiedenen Szenarien ohne zusätzliche erneuerbare Energieanlagen, mit zusätzlichen Windkraftanlagen und auf Basis der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Intensität der Gesamtstromerzeugung für das Jahr 2030. Es zeigt sich, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Antriebskonzepte direkt an die Art der Stromerzeugung gekoppelt sind und ohne einen weiteren Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen eine Reduktion nicht gegeben ist. Der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung, insbesondere Wind und Photovoltaik (PV), hat weitreichende Auswirkungen auf das elektrische Verteilnetz. Neben der naheliegenden Relevanz der Art der Stromerzeugung für die indirekten Emissionen der elektrifizierten Antriebskonzepte werden die direkten Emissionen der Antriebsarten aufgezeigt. Ausschließlich beim batterieelektrischen Fahrzeug entstehen keine lokalen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass, je nach Betriebsstrategie der Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge, kurze Teilstrecken auch rein elektrisch gefahren werden können, wodurch ebenfalls keine lokalen CO<sub>2</sub>-Emissionen entstünden. Die geringen Emissionen der elektrifizierten Antriebskonzepte, vor allem beim Ausbau regenerativer Energieerzeuger, sind die Motivation zur Analyse von Möglichkeiten für die Maximierung des Elektrifizierungsgrades sowohl für Einzelfahrzeuge als auch für Flotten im Projekt komDRIVE.

Ein weiterer Untersuchungsgegenstand ist die erhöhte Anforderung an das elektrische Verteilnetz aufgrund des steigenden Anteils dezentraler Stromerzeugung und zusätzlicher Ladevorgänge aus dem Privat- und Wirtschaftsverkehr bei einer Elektrifizierung von Fahrzeugen. Die Einspeisung von verteilten Erzeugungseinheiten kann lokal zur Verletzung des Spannungsbandes und zur Überschreitung der maximal zulässigen Auslastung von Netzkomponenten führen (Knoblauch, 2013). Eine weitere Herausforderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern (z. B. Wind und Sonne) ist es, das Gleichgewicht zwischen dargebotsabhängiger Erzeugung und zeitlich versetztem Verbrauch an elektrischer Energie sicherzustellen. Daher bedarf es Maßnahmen des steuerbaren Verbrauchs und der Speicherung. Der Ausbau der zentralen Langzeit-Energiespeicherung ist jedoch problematisch, da es entweder an geeigneten geologischen Formationen fehlt (z. B. Pump- und Druckluftspeicherkraftwerke), nur kurzzeitige Speicherung möglich ist (z. B. Schwungräder) oder große Kosten entstehen (z. B. stationäre Batteriespeicher) (Popp, 2010). Zudem werden solche Speichermöglichkeiten vor allem im Verteilnetz benötigt. Elektrofahrzeuge könnten hierbei – abgesehen von ihrer eigentlichen Aufgabe als Transportmittel – die Aufgabe von Energiespeichern übernehmen sowie zur Netzregelung eingesetzt werden. Dabei eignen sich besonders große Fahrzeugflotten, da sie als Einheit betrachtet die notwendigen Bedingungen erfüllen können, um diese Aufgaben effektiv zu übernehmen. Zur Zwischenspeicherung überschüssiger erneuerbarer Energie über mehrere Tage gibt es derzeit kostengünstigere Lösungen (VDE, 2015).

---

<sup>3</sup> Das Konzept der Range-Extender kann als eine Sonderform der Plug-in-Hybride aufgefasst werden und wird deshalb nicht explizit erwähnt.

Abbildung 20: Übersicht der Schadstoffemissionen verschiedener Antriebskonzepte für unterschiedliche Szenarien

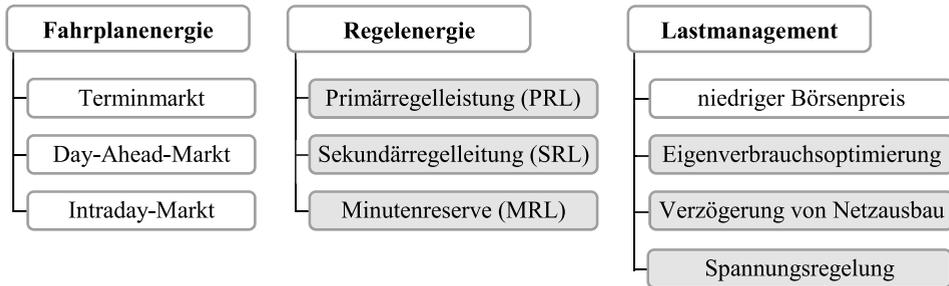


Quelle: Hacker et al., 2011

Durch die Transmission des deutschen Energieversorgungsystems hin zu erneuerbaren Energien ändert sich die Erzeugungsstruktur von einer zentralen hin zu einer dezentralen. Großkraftwerke, die bisher die Verantwortung für die Bereitstellung wichtiger Systemdienstleistungen (SDL) wie der Frequenzhaltung übernommen haben, werden zunehmend durch dezentrale Erzeugungseinheiten (engl. Distributed Energy Resources) substituiert. Oft befindet sich der Netzanschlusspunkt von dezentralen Erzeugungsanlagen im Verteilnetz. Im Jahr 2014 lag der Anteil an PV-Anlagen, die im Verteilnetz angeschlossen sind, bei ca. 80 % (von Oehsen, 2012). SDL im Verteilnetz, wie zum Beispiel die Spannungsregelung oder das aktive Lastmanagement, gewinnen zunehmend an Bedeutung. Daher müssen in Zukunft auch dezentrale Erzeugungsanlagen in die Bereitstellung von SDL eingebunden werden (dena, 2014). Ein Überblick netzdienlicher Anwendungen beziehungsweise SDL ist in Abbildung 21 grau dargestellt.

Dezentrale Erzeugungsanlagen sind technisch in der Lage SDL bereitzustellen. Die Herausforderung besteht in der kostengünstigen Einbindung und Umsetzung eines Steuerungsansatzes, der eine Vielzahl an technischen Einheiten koordiniert. Auch Elektrofahrzeuge können als dezentrale Erzeugungseinheiten sowie als steuerbare Last betrachtet werden und einen Beitrag leisten. Allerdings besteht bei der Elektromobilität der Hauptnutzen in der Bereitstellung der Mobilität für den Nutzer. SDL sind als Zusatznutzen zu verstehen, müssen aber so ausgestaltet sein, dass der Hauptnutzen nicht eingeschränkt wird.

Abbildung 21: Mögliche Anwendungen für Elektrofahrzeuge im Überblick



Bezüglich der Fragestellung, ob und in welcher Art und Weise BEV und PHEV Dienstleistungen im Erzeugungs- und Verteilungssystem des elektrischen Energiesektors erbringen können, ist die Traktionsbatterie der Fahrzeuge aufgrund ihrer Eigenschaften, wie beispielsweise Reaktionszeit, Leistung und Kapazität, eine der zentralen Komponenten. Die Idee der systemdienlichen Einbindung von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen in das Stromnetz (vehicle-to-grid, V2G) wurde in Referenz zu Kempton and Letendre (1997) erstmals diskutiert. Seither gab es eine Vielzahl an Untersuchungen zu diesem Thema und in Demonstrationsvorhaben werden EV für SDL eingesetzt. Neben der negativen Regelenergie kann durch eine Reduktion der Ladeleistung beziehungsweise durch eine Verschiebung des Ladevorgangs auch positive Regelenergie bereitgestellt werden. Bevor die notwendige Anzahl an Fahrzeugen sowie die technische Umsetzung der Kommunikation und der bidirektionalen Laderegulierung im Feld vorhanden sind, muss die eng mit der Batteriealterung verbundene Wirtschaftlichkeit der SDL durch elektrisch angetriebene Fahrzeuge gezeigt werden. Bisher ist unbekannt, welche Auswirkungen der wirtschaftlich positiv zu bewertende, erhöhte Nutzungsgrad einer Traktionsbatterie auf die Batteriealterung hat und wie diese Auswirkungen in Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen des Elektrofahrzeuges und der SDL monetär zu bewerten sind. Im Verbundprojekt NET-INES<sup>4</sup> wurden u. a. ähnliche Fragestellungen bezüglich der Batteriealterung durch SDL für privat genutzte Pkw untersucht. In komDRIVE wird die testbasierte Analyse und Bewertung der durch unterschiedliche SDL zusätzlich auftretenden Batteriealterung auf gewerblich genutzte Fahrzeuge ausgeweitet.

Der gesamte Batteriealterungstest umfasst auch mechanistische Alterungsstudien u. a. mittels Dilatometrie und eine Variation der maßgeblichen Betriebsparameter Stromstärke, SOC-Bandbegrenzung und Umgebungstemperatur. Die testbasierte Simulation der Batteriebelastung wird in gemeinschaftlicher Arbeit mit Fachgebieten der Technischen Universität Berlin erstellt. Die Leistungsanforderungen an die Batterie eines mathematischen BEV-Modells für verteiltdienststypische Fahrzyklen werden mit dem Fachgebiet Fahrerhaltensbeobachtung für energetische Optimierung und Unfallvermeidung (FVB) und die durch SDL bedingten Leistungsverläufe mit dem Fachgebiet Energieversorgungsnetze und Integration Erneuerbarer Energien (SENSE) erzeugt. Ein mathematisches Modell der Batteriealterung wird mit Hilfe der Testergebnisse parametrisiert und kann in Verbindung mit der im Rahmen

<sup>4</sup> [http://www.fz-juelich.de/iek/iek-ste/EN/NET-INES/\\_node.html](http://www.fz-juelich.de/iek/iek-ste/EN/NET-INES/_node.html)

des Projektes durchgeführten Batteriekostenstudie für die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von SDL verwendet werden.

Da einzelne Fahrzeuge nicht die Anforderungen erfüllen, um netzdienstliche Anwendungen (Erreichung nennenswerter Kapazitäten und Leistungen) zu ermöglichen, bietet sich eine Betrachtung von Fahrzeugflotten an. Allerdings gehen entsprechend groß dimensionierte elektrifizierte Flotten vor allem beim Laden mit zusätzlichen Netzbelastungen einher. Deshalb ist es notwendig entsprechende Ladestrategien zu entwickeln, sodass Überlastungen im Verteilnetz vermieden werden. Vorab muss jedoch analysiert werden, inwieweit es das lokale Energieversorgungssystem zulässt, entsprechende Energiemengen in den verfügbaren Zeiten zu transportieren.

Weiterhin muss die Frage nach der notwendigen Infrastruktur beantwortet werden. Zum einen betrifft dies die Ladeinfrastruktur, welche sich idealerweise auf dem entsprechenden Betriebshof befindet. Kriterien wie Energieversorgung über Niederspannungs- oder Mittelspannungsnetz spielen dabei ebenso eine Rolle wie die zu verwendende Ladestrategie und die Kosten für den Auf- und Ausbau. Zum anderen erfordern netzstabilisierende Dienste weitere Komponenten zur Regelung.

Neben diesen theoretisch planerischen Betrachtungen wird im Projekt der Frage der Akzeptanz nachgegangen. Hierbei wird vor allem untersucht, welche Erfahrungen bereits mit elektrischen Fahrzeugen in gewerblichen Flotten gemacht worden sind und welche Vorbehalte existieren. Da die Anschaffung und Einsatz von Fahrzeugen gerade im unternehmerischen Bereich eine zentrale strategische Entscheidung darstellen, ist es wichtig mehr über den unternehmensseitigen Informationsstand bzw. -bedarf in Bezug auf elektrische Fahrzeuge herauszufinden. Auch wurde untersucht, welche konkreten Maßnahmen dazu führen, dass mehr E-Fahrzeuge in städtischen Flotten zum Einsatz kommen. Diese Aspekte sollen vor allem mit Hilfe von Nutzerbefragungen und -workshops näher beleuchtet werden.

Da zusätzliche elektrifizierte Fahrzeuge als Alternative zu konventionellen Fahrzeugen zudem positive Auswirkungen auf die innerstädtische Luftqualität haben, werden in komDRIVE auch einerseits lokale und andererseits deutschlandweite ökologische Effekte einer Bestandsdurchdringung konventionell angetriebener Flotten durch EV analysiert. Zudem sind durch eine große Zahl an Elektrofahrzeugen Auswirkungen auf die Energieversorgung zu erwarten. Diese Thematik wird ebenfalls adressiert.

Zusammenfassend untersucht das Projekt komDRIVE unter welchen Rahmenbedingungen der Einsatz von EV im Güternahverkehr technisch, ökologisch und ökonomisch vorteilhaft ist und welche Synergien sich zu anderen Bereichen, insbesondere zur Stromwirtschaft, erzielen lassen. Drei Projektziele sind:

1. Optimierung der Elektrifizierung des städtischen Wirtschaftsverkehrs mit Rücksicht auf Mobilitätsansprüche der Flottenbetreiber und Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen,
2. Erfassung des Potenzials zur Integration fluktuierend einspeisender erneuerbarer Energien durch Optimierung der Ladevorgänge elektrifizierter Flotten und
3. Identifikation eines Gesamtkonzepts zur kostenoptimalen Zusammensetzung gewerblich genutzter Fahrzeugflotten unter Berücksichtigung der ermittelten Synergien.

Im Rahmen des Projekts werden diese drei Ziele über die folgenden Teilziele und Untersuchungen beantwortet:

- Untersuchung der Einsatz- und Fahrprofile im städtischen WIV und Ableitung des Energie- und Kraftstoffverbrauchs für Fahrzeuge im städtischen Wirtschaftsverkehr,
- Nutzerbefragung: Akzeptanz und Probleme sowie Vorurteile auf Seiten von Flotten und Fahrern,
- technische und wirtschaftliche Aspekte für SDL mit EV,
- Analyse der Batteriealterung:
  - Testbasierte Untersuchung der Batteriealterung durch Superposition von Fahr- und Systemdienstleistungsbelastungen,
  - Testbasierte mechanistische Batteriealterungsanalyse mittels Dilatometrie,
  - Durchführung einer Batteriekostenstudie zur Wirtschaftlichkeitsanalyse von Systemdienstleistungen.
- lokale ökologische Effekte durch Elektrifizierung des städtischen WIV,
- Auswirkungen auf das Energiesystem Deutschlands.

## 2.3 Einordnung des Projektes in die Forschungslandschaft

(D. Dreyhaupt, S. Marker)

Das Projekt komDRIVE wird im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms BMWi (2011) gefördert und betrachtet eine Schnittmenge von Schwerpunkten aus den Themenbereichen Systemanalyse und energiewirtschaftliche Schlüsselemente der Elektromobilität. Dabei wird die Integration von BEV ins Stromnetz, Markt- und Technologiechancen der Elektromobilität und die Erweiterung des Energiesystemmodells betrachtet. Das Wissen über die Techniken und deren Akzeptanz bei potentiellen Nutzern wird dabei ebenfalls berücksichtigt.

Ein generelles Kernziel aktueller Bestrebungen in Forschung und Wirtschaft ist der Betrieb von Fahrzeugen mit nachhaltig gewonnener Energie. Dazu bedarf es eines passenden Energieträgers. Als alternative Energieträger bzw. Energieüberträger für Langstrecken-Pkw werden derzeit erforscht:

- Wasserstoff, Methan (auch in Verbindung mit Power-to-Gas) und synthetische Flüssigkraftstoffe,
- Akkumulatoren,
- Stromschienen und Induktionsschleifen.

Parallel zu den derzeitigen Forschungsarbeiten an alternativen Treibstoffen und Energieträgern steht weiterhin das Thema der Verbrauchs- und Emissionsreduzierung von konventionellen Fahrzeugantrieben im Fokus. Auch hier gibt es verschiedene Konzepte. Diese sind zum Beispiel:

- verbrauchsoptimierte Verbrennungsmotoren,
- Flüssiggasfahrzeuge,
- Elektrohybride.

Diese Konzepte ermöglichen grundsätzlich die teilweise Nutzung von erneuerbaren Energien in Kraftfahrzeugen. So sind Verbrennungsmotoren in der Lage synthetische Flüssigkraftstoffe oder synthetisches Gas zu verwerten (Power-to-Gas-Technik) und elektrifizierte Fahrzeuge Strom z.B. aus Solarzellen zu verbrauchen. Der Einsatz fossiler Energieträger ist bei diesen Techniken jedoch weiterhin notwendig.

Eine generelle Aussage, welche der derzeit untersuchten Techniken die zu favorisierende ist, konnte bisher auch in unterschiedlichen Forschungsprojekten nicht beantwortet werden. Vielmehr sind jeweils bedarfsgerechte Lösungen Stand der Technik. Je nach Anforderungsprofil und Verfügbarkeit der Energiequellen sind unterschiedliche Lösungen vorteilhaft. Ein Ergebnis aus dem Projekt NET-ELAN zeigt, dass innerstädtisch gewerblich genutzte Fahrzeuge Fahrprofile aufweisen, die sehr gute Randbedingungen für eine Elektrifizierung des Antriebsstranges bieten und damit für die Nutzung alternativer Antriebe prädestiniert sind. Die Tatsache, dass diese Nutzergruppen oftmals über ganze Fuhrparks – statt Einzelfahrzeuge wie im privaten Nutzungsfall – verfügen, bietet weitere Optimierungspotenziale.

Im Folgenden wird eine Auswahl an Forschungsprojekten vorgestellt, die ähnliche Teilaspekte analysieren wie komDRIVE. Die sich ergebende Klassifizierung ist dabei nur als grobe Einteilung zu verstehen, da zahlreiche Projekte mehrere Teilaspekte fokussieren und eine eindeutige Zuordnung somit nicht immer möglich ist.

### **2.3.1 Forschungsvorhaben mit Fokus auf batterieelektrischen Fahrzeugen**

Ein Konzept, fossile Brennstoffe in Fahrzeugen zu ersetzen, ist der Einsatz von Akkumulatoren (im Buch wird der Einfachheit halber „Batterie“ statt „Akkumulator“ benutzt). Diese speichern die elektrische Energie, die im Idealfall aus regenerativen Energiequellen gewonnen wurde. Das heißt, es wäre ein Betrieb mit ausschließlich regenerativ erzeugter Energie möglich.

Zwar werden solche Fahrzeuge derzeit überwiegend für den Pkw-Bereich entwickelt und hergestellt, es gibt jedoch auch Fahrzeuge aus anderen Segmenten. Weit verbreitet sind zum Beispiel Fahrräder mit elektrischem (Hilfs-)Motor (E-Bikes), die sowohl für den privaten als auch den gewerblichen Bereich genutzt werden. Das Projekt „Ich ersetze ein Auto“ (07/2012–07/2014) untersuchte das Potenzial beim Einsatz von Elektro-Lastenrädern hinsichtlich Klimaschutz und der notwendigen Rahmenbedingungen (Ich ersetze ein Auto, 2016). In „Ecargo“ (Erneuerbar Mobil, 2014) wurden Elektrofahrzeuge im Transporter-Segment anhand von Nutzeranalysen ausgelegt, und auch das Projekt „E-Lieferungen im Allgäu“ beschäftigt sich mit der Frage der Elektrifizierung von leichten Lkw (Rupp, 2016). Weiterhin sei im Bereich der E-Transporter das Projekt „Elektrifizierung von Mercedes-Benz Kleintransportern in Entwicklung und Produktion“ genannt, welches sich von 2009–2011 mit der Entwicklung und Erprobung von 65 elektrisch betriebenen MB Vitos beschäftigte (EMKEP, 2011). Im Bereich der schwereren Nutzfahrzeuge seien beispielhaft ein Konzept für einen 18-t-Lkw (Burkert, 2013 und E-Force One AG, 2016) sowie für batterieelektrische Busse (Altenkirch, 2011) genannt. Auch untersucht das Schaufenster-Projekt „KV-E-CHAIN“ den Einsatz eines 40-t-BE-Lkw, der seit Sommer 2014 Container mit Waren von Berlin Westhafen aus in der Stadt ausliefert (Sonntag, 2016).

Weiterhin analysieren verschiedene Projekte BEV-Varianten von Sonderfahrzeugen, insbesondere der Abfall- und Entsorgungswirtschaft. Ein Beispiel ist das Projekt „Elektromobilität in Bereichen der Abfallwirtschaft der Landeshauptstadt Dresden“ mit dem Ziel der „Erprobung alternativer neuer Antriebe (Elektroantrieb) für Flottenfahrzeuge in den Bereichen Abfallsammlung, Abfallmanagement und Straßenreinigung“ (Trautewig, 2016).

Alle in diesem Abschnitt genannten Projekte haben die Dimensionierung der Fahrzeugkomponenten und vor allem die Analyse der Alltagstauglichkeit für den jeweiligen Anwendungsfall gemein. Der Unterschied zu komDRIVE besteht darin, dass bei den genannten Projekten hauptsächlich Einzelfahrzeuge betrachtet werden.

### **2.3.2 Forschungsprojekte mit dem Fokus auf Plug-In-Hybriden und Elektrofahrzeugen mit Reichweitenverlängerung**

Ein Ansatz für eine bedarfsgerechte Erfüllung der Mobilitätsansprüche, die gleichzeitig den Einsatz von erneuerbarer Energie ermöglicht, sind PHEV und Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerung, sogenannte range extended electric vehicles (REEV). Das Konzept von PHEV und REEV basiert auf dem Umstand, dass der Großteil der im innerstädtischen Wirtschaftsverkehr zurückgelegten Distanzen Kurzstrecken sind (Linsen, 2012). Idealerweise können diese Fahrzeuge die kurzen Strecken größtenteils rein elektrisch bewältigen (Hoffmann, 2010). Als Stromspeicher dienen Akkus, die zumeist über das allgemeine Stromnetz geladen werden. Auf Langstrecken kommt ein integrierter Range-Extender auf Basis eines konventionellen Aggregats zum Einsatz. Mit diesem Konzept versucht man die derzeitigen Nachteile von BEV zu umgehen – insbesondere in den Punkten Reichweite, Klimatisierung und Wirtschaftlichkeit.

Analog zu den batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) gibt es auch Konzepte für PHEV und REEV in den verschiedenen Fahrzeugklassen. Im Pkw-Bereich sei zum Beispiel das Projekt AMPERE genannt, welches die Praxistauglichkeit und das Nutzerverhalten des Opel Ampera analysiert (Projekt-Ampere, 2016). Im Segment der leichten Nutzfahrzeuge (LNF) beschäftigten sich unter anderem die Projekte „EleNa“ (02/2010–09/2011) und „EleNa II“ (03/2012–08/2013) mit dem Thema der Hybridisierung. Im Ergebnis wurde ein Nachrüstsatz für Elektroantriebe entwickelt, der speziell bei Lieferwagen mit konventionellem Verbrennungsmotor anwendbar ist (Schaufenster-Elektromobilität, 2014a). Weiterhin sei in diesem Zusammenhang das bereits unter den BEV-Konzepten genannte Projekt Ecargo genannt. Dieses beschäftigt sich im zweiten Projektteil auch mit der Auslegung eines Hybrid-Antriebsstranges in einem VW-Transporter (Erneuerbar Mobil, 2014).

Auch im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) kommen Hybrid-Fahrzeuge zum Einsatz. Mit dem Ziel der Prüfung der Alltagstauglichkeit, sowie einer ökologischen und ökonomischen Bilanzierung (im Vergleich zu reinen dieselbetriebenen Fahrzeugen) analysiert das Projekt HyLine-S seit Herbst 2010 den Einsatz von Dieselhybrid-Bussen im Stuttgarter Linienverkehr (eCars, 2016). Seit Anfang 2013 kommen hier außerdem Brennstoffzellenbusse zum Einsatz. Der Schwerpunkt selbstlernende, adaptive Energie- und Leistungsmanagementsysteme wird im Schaufensterprojekt SaxHybrid PLUS-Energiespeichersysteme für Hybridbusse mit qualifiziertem Energiemanagement erforscht (Knote, 2016). Parallel zum SaxHybrid PLUS-Projekt werden in Pilotlinie 64 – effiziente Elektromobilität Lösungen für die derzeitigen Schwachpunkte von Elektrofahrzeugen entwickelt

(Fahrzeuggewicht, Beheizung und Klimatisierung, sowie in der prädiktiven Steuerung) (Kiele, 2016). Die Lösungen sollen dann über SaxHybrid PLUS getestet werden. Im Gegensatz zu komDRIVE liegt der Fokus hier jedoch in der Optimierung des Komponenten-Aufbaus, statt in der Optimierung der Flotten-Zusammensetzung.

Weitere Projekte beschäftigen sich mit dem Einsatz von Hybrid-Fahrzeugen im Sonderfahrzeug-Segment. In „ElektroAES“ werden drei Erprobungsfahrzeuge für die Abfallentsorgung als Sperrmüllsammel- und Seitenlader im Einsatz getestet (Munder und Neumann, 2013). Ebenso untersucht das Projekt „Demo-Einsatz-Hybrid“ den Einsatz von Hybrid-Abfallsammelfahrzeugen, jedoch mit dem zusätzlichen Fokus auf einer speziell entwickelten Tourenplanungssoftware für den optimalen Einsatz der Hybrid-Technologie (Eden, 2016).

### **2.3.3 Forschung mit Fokus auf Fahrzeugkomponenten**

Neben Projekten, bei denen bereits etablierte Komponenten in ebenfalls etablierten Fahrzeugkonzepten umgesetzt werden, gibt es auch solche, in denen neue Komponenten und Konzepte erforscht werden. So wird beispielsweise versucht, die Kombination Akku/ E-Motor/Verbrennungsmotor, durch die Kombination von Brennstoffzelle/Akku/E-Motor zu ersetzen. Vorteile dieser Entwicklung sind unter anderem die hohe Reichweite bei gleichzeitig kurzen Betankungszeiten des Wasserstoffspeichers und die (theoretische) Möglichkeit zu 100 % erneuerbare Energien einsetzen zu können. In diesem Bereich wird z.B. im Projekt Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität II (2013–2015) an vielen Detailfragen, wie der Entwicklung schnellladefähiger Akkus mit hohem Wirkungsgrad und Zyklenstabilität, geforscht (Busse und Horch, 2016).

### **2.3.4 Projekte mit Bezug zu Systemdienstleistungen**

Der besondere Fokus des Projektes komDRIVE liegt jedoch in der Analyse des Potenzials von Systemdienstleistungen und deren Auswirkungen auf die Batteriealterung. In diesem Zusammenhang ist das Forschungsprojekt NET-INES (Laufzeit: Juli 2012 bis Juni 2015) zu erwähnen (Forschungszentrum Jülich, 2015). Hierbei werden ebenfalls technische und ökonomische Aspekte bzgl. Systemdienstleistungen mit Elektrofahrzeugen und deren Potentiale analysiert werden. Das Thema Batteriealterung wird dabei ebenfalls adressiert. Zusätzlich wurden über Nutzerbefragungen die „motivationalen Voraussetzungen der Fahrzeughalter für die Netzintegration mobiler Energiespeicher“ identifiziert. Ökologische Betrachtungen stehen nicht im Fokus des Projektes. Analog zu komDRIVE finden die Analysen überwiegend im Labor statt.

Ein praxisnahes Projekt in dieser Kategorie ist hingegen INEES – Intelligente Netzanbindung von Elektrofahrzeugen zur Erbringung von Systemdienstleistungen (Laufzeit: Juni 2012 bis Mai 2015) (Degner, 2016). In diesem Vorhaben wurde ein Anreizsystem für Fahrzeugnutzer erforscht und konzipiert, welches anschließend in einem Flottentest mit 20 Fahrzeugen umgesetzt wurde. Weiterhin fanden Analysen zur Massenmarktfähigkeit und Standardisierungen statt.

### 2.3.5 Begleitforschung zur Elektromobilität

Ein weiterer Forschungszweig ist die mit der Elektromobilität zusammenhängende Übersicht gesamtwirtschaftlicher Fragestellungen. Diese wurden im Konjunkturpaket II im Rahmen der Begleitforschung abgedeckt (Helms, 2011 und Hacker, 2011). Insbesondere wurden hierbei auch die Anforderungen an die zukünftige Ladeinfrastruktur und Netzinfrastruktur und das Absorptionspotential für überschüssigen Strom aus erneuerbaren Energien analysiert.

### 2.3.6 Projekte zum E-Flottenmanagement

Weitere Forschungsprojekte setzen sich zudem mit dem Thema der optimalen Zusammensetzung einer gewerblich genutzten (Nahverkehrs-)Flotte auseinander. Zum Beispiel wurde im Projekt Future Fleet bis 2011 bei SAP die Akzeptanz, Attraktivität und das Nutzungsverhalten von Elektrofahrzeugen im betrieblichen Rahmen untersucht (Deffner, 2012). Ziel ist hier allerdings durch Erfassung des konkreten Nutzungsvorhabens den Mitarbeitern von SAP bedarfsgerechte EV zur Verfügung zu stellen. Zahlreiche Synergien zu komDRIVE zeigen sich bei dem Projekt VEM – Virtuelle Elektromobilität für den Taxi- und Gewerbeverkehr München (VEM, 2014). Vom Simulationsmodell über die Vorgehensweise der Fahrprofilfassung (hier allerdings via Smartphones) bis zum Projektziel „Mittels einer detaillierten Analyse des Mobilitätsverhaltens sollen Aussagen getroffen werden, inwieweit große Fahrzeugflotten, aus technischen, ökologischen als auch ökonomischen Gesichtspunkten, elektrifiziert werden können“, zeigen sich Gemeinsamkeiten. Auch werden Lademöglichkeiten und Auswirkungen auf das Infrastrukturnetz untersucht.

Weiterhin sei das Projekt „Urbaner Logistischer Wirtschaftsverkehr“ (01.10.2012–30.09.2015) erwähnt (Schaufenster-Elektromobilität, 2016). Es verfolgte das Ziel der „Durchführung eines praxisnahen Feldversuchs, bei dem der Einsatz elektrischer Transporter im innerstädtischen Lieferverkehr im Rahmen unterschiedlicher Logistikkonzeptionen umfassend untersucht und evaluiert“ wurde. Es wurden detailliert die Einsatzstrategien der Elektrotransporter und Anforderungen an die Fahrzeuge analysiert, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen durchgeführt und eine Ladeinfrastruktur an den Verteilerzentren aufgebaut.

Das Projekt PREMIUM (01.01.2014–31.12.2016) beschäftigt sich mit der Erforschung des Nutzerverhaltens für BEV, REEV und PHEV. Jedoch werden neben gewerblichen Fahrzeugflotten im Wirtschaftsverkehr auch Personenverkehrsflotten und Einzelfahrzeuge von Privatanwendern betrachtet (Erneuerbar Mobil, 2016). Darauf aufbauend sollen energiepolitische sowie ökologische Auswirkungen beim verstärkten Einsatz von Elektrofahrzeugen untersucht werden. Fast alle der oben beschriebenen Projekte befassen sich entweder mit konkreten Fahrzeug-lösungen oder der Integration dieser in bestimmte Flotten oder mit der Analyse des Privat- oder Güterverkehrs.

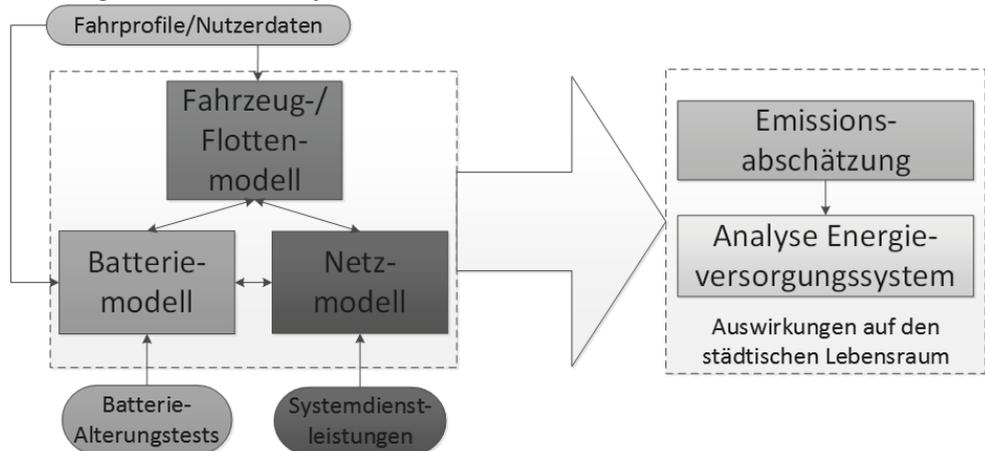
KomDRIVE hingegen betrachtet den innerstädtischen Wirtschaftsverkehr als Anwendungsfall und hat zudem mikroskopische (Batteriealterung mit und ohne Systemdienstleistungen, Fahrzeug- und Verbrauchsmodellierung) als auch makroskopische Analysen (lokale ökologische Effekte, Auswirkungen von Elektrofahrzeugen im Energiesystem Deutschlands) zum Ziel.

### 3. Forschungsansatz (Methodik)

(D. Dreyhaupt, N. Döge, S. Marker)

Die Beantwortung der zentralen Fragestellung erfolgt, wie in Kapitel 2.2 erläutert, auf Basis der Betrachtung der Teilaspekte Fahrzeug/Flotte, Batterie, Netz, und städtischer Lebensraum. Diese werden in verschiedenen Modellen detailliert analysiert, wobei die Arbeiten und Modelle untereinander vernetzt sind. Abbildung 22 zeigt den vereinfachten Aufbau des Projektes mit den entsprechenden Verknüpfungen.

Abbildung 22: Vereinfachte Projektstruktur komDRIVE



Die Verknüpfung der Einzelmodelle ist in Abbildung 23 visualisiert, die den Gesamtstrukturplan des Projektes darstellt. Hier werden vor dem Hintergrund der Teilfragestellungen Interdependenzen zwischen den einzelnen Projektbausteinen, unterschieden nach Eingangsgröße, Zentralem Modell, Zwischenschritt und Ergebnis dargestellt.

Deutlich wird, dass das Forschungsprojekt einen ganzheitlichen Forschungsansatz verfolgt, der darauf abzielt das komplexe System „Elektromobilität im städtischen Wirtschaftsverkehr“ aus unterschiedlichen Blickwinkeln bzw. Teilaspekten genauer zu ergründen. Diese unterschiedlichen Blickwinkel, welche sich aber an einem innerhalb des Projektes festgelegten Rahmens, z.B. in Form aufeinander abgestimmter Modellszenarien, ausrichten, finden ihre Entsprechung in den dargestellten Einzelmodellen.

Die diesem Kapitel folgenden Ausführungen gewähren einen Einblick in die jeweilige Modellmethodik. Somit folgen die Ausführungen zur Datenerfassung nutzerbezogener Daten und den Fahrzeugmodellen (Abschnitt 3.1), zum Batteriemodell mit den zugrunde liegenden Tests (Abschnitt 3.2), zu Systemdienstleistungen und Netzmodellen (Abschnitt 3.3), zum lokalen Emissionsabschätzungsmodell (Abschnitt 3.4) und letztendlich zum Energiesystemmodell (Abschnitt 3.5), in das ein Großteil der Ergebnisse aus den Teilmodellen eingeht.

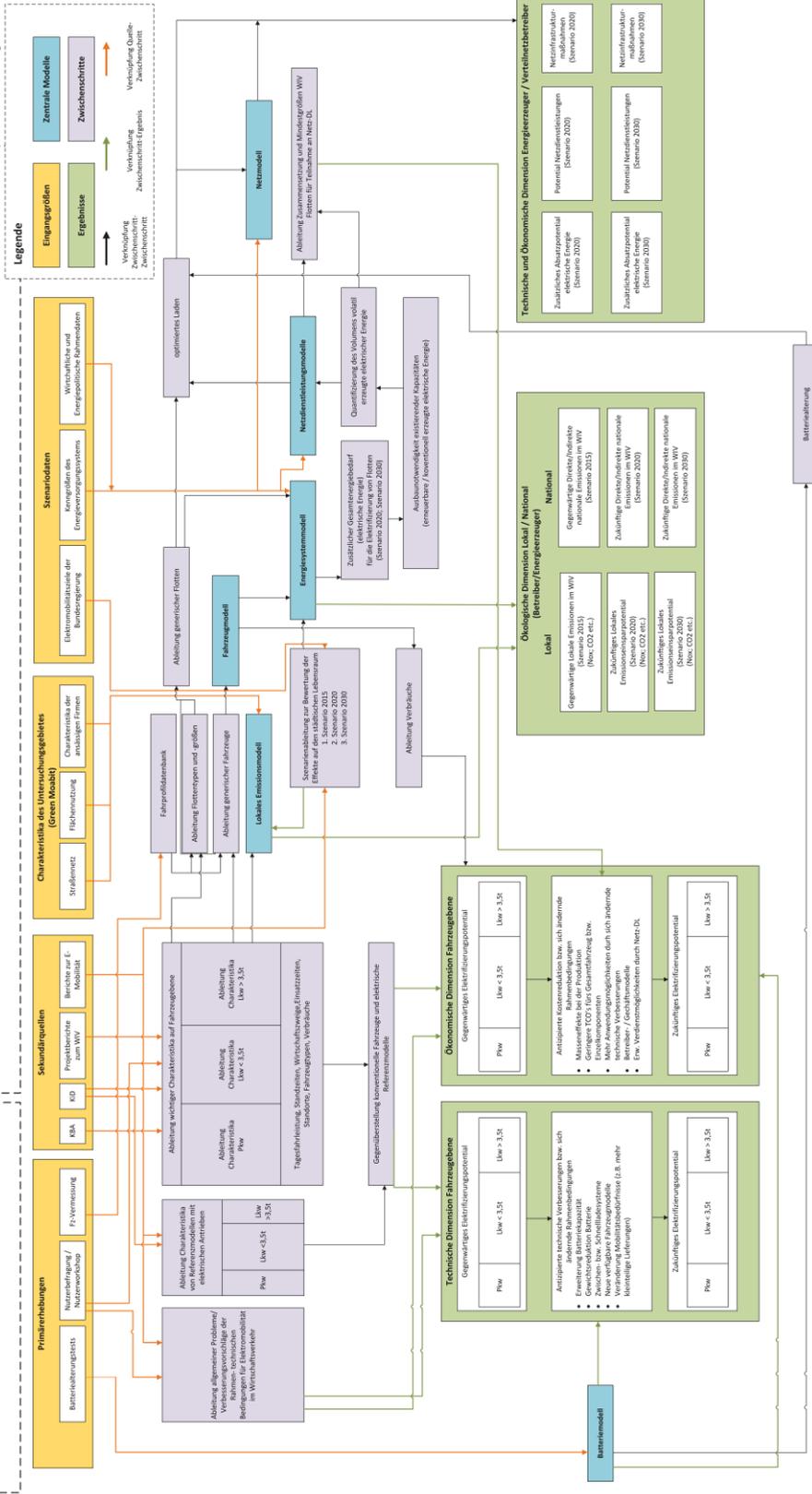
Abbildung 23: Vernetzung der Teilmodelle und Arbeitsschritte des Projektes komDRIVE

### KOMDRIVE Strukturplan

**Gesamtziel laut Projektantrag:**  
Ermitteln unter welchen Randbedingungen der Einsatz von Elektrofahrzeugen im Wirtschaftsverkehr technisch, ökologisch und ökonomisch vorteilhaft ist, und welche Synergien sich zur Stromwirtschaft erzielen lassen.

- Legende**
- 1. Erstellung einer Fahrzeugdatenbank mit verschiedenen Nutzfahrzeugen vom Zweirad bis zum Verteil-Lkw (PVB, ZTG)
  - 2. Ableitung einer optimalen Flottenzusammensetzung unter Berücksichtigung des Elektrifizierungsgrades für einen spezifischen gewerblichen Anwender (PVB, ZTG, SENSE)
  - 3. Implementierung und Anwendung von Fahrzeug-, Flotten-, Netz- und Batteriemodellen zur ganzheitlichen Beurteilung von (teil-) elektrifizierten Fahrzeugflotten (PVB, SENSE, ZSW)
  - 4. Abschätzung der potenziellen CO<sub>2</sub>-Einsparungen und der Erzeugung der Wirtschaftlichkeit von niedrigeren Kosten im stationären Wirtschaftsverkehr (SSDS)
  - 5. Abschätzung der dabei freigesetzten und verbrauchten elektrischen Energie aus unterschiedlichen stationären Wirtschaftsverkehr auf dem stationären Lebensraum und Übertragung auf den gesamten Wirtschaftsverkehr in Deutschland (EE-STE, ZTG).

**VERSION 3**  
Stand: 02.07.2015  
Herausgeber:  
Flavio Gromann  
Clemens Günther  
Moritz Bauer  
Wolfgang Hennings



### 3.1 Wirtschaftsverkehr, Anwender, Flotten

(D.Dreyhaupt, N. Döge, S. Marker)

Dieses Methodenkapitel erläutert, mit Hilfe welcher Methoden nähere Informationen über den Forschungsgegenstand des städtischen Wirtschaftsverkehrs, genau genommen der Akteure der Wirtschaftsverkehrsflotten, gewonnen wurden. Diesem Kapitel kommt deshalb eine zentrale Bedeutung zu, da, bezugnehmend auf die wissenschaftliche Fragestellung, städtische Wirtschaftsverkehrsflotten einerseits Anwendungsfeld der gewonnenen Erkenntnisse und andererseits Flottencharakteristika, die den Status Quo beschreiben, wichtige Eingangsgrößen für die unterschiedlichen in Kapitel 3 dargestellten Modelle sind. Somit sind einige Ergebnisse der vertiefenden Recherche bereits in Kapitel 2.1 (Status Quo) enthalten um thematisch in das Buch einzuleiten. Hier folgt nun die Beschreibung der Methodik.

Der Fokus auf städtische Wirtschaftsverkehrsflotten allein lässt sich, wie in Kapitel 2.1 dargestellt, argumentativ darauf zurückführen, dass vor allem mit elektrifizierten Wirtschaftsverkehrsflotten, die aus einer Vielzahl von ähnlichen Fahrzeugen mit ähnlichen Einsatzmustern bestehen, ein Anbieten von Systemdienstleistungen (SDL) am ehesten vorstellbar wäre. Zudem wurde bei der Formulierung der Forschungsfragen davon ausgegangen, dass es für Unternehmen mit eigenem Firmengelände am ehesten möglich wäre, die für den Einsatz von E-Fahrzeugen sowie für das Fahrzeugpooling notwendige technische Infrastruktur zu schaffen. Beim Eintreten einer Bestandsdurchdringung der Flotte mit elektrischen Fahrzeugen wären sie prädestiniert, durch die Teilnahme an SDL monetäre, direkt auf die TCO anrechenbare Effekte zu erzielen.

Um die ökonomischen und unternehmenspolitischen Effekte abschätzen zu können und um die ökologischen Folgen auf lokaler und nationaler Ebene bemessen zu können, müssen zunächst genauere Informationen über städtische Wirtschaftsverkehrsflotten gewonnen werden. Dies ist auch vor dem Hintergrund nötig, dass flottenseitig Steuerungsinstrumente identifiziert werden, deren Einsatz notwendig wäre, um die Elektrifizierung des städtischen Wirtschaftsverkehrs zu befördern. Zur Identifikation geeigneter Steuerungsinstrumente ist es zudem auch nötig auf Seiten der Flottenbetreiber und Fahrer in Flotten, Wissen um Elektromobilität und SDL, Erfahrungen und Vorbehalte zu ergründen.

Zur Erlangung vertiefender Erkenntnisse kommt eine Mischung aus deduktiven und induktiven Vorgehensweisen zum Einsatz. Durch die Erstellung des in Kapitel 3 dargestellten Arbeitsschemas, welches die Vorgehensweise, vor allem mit Bezug zu den Forschungsfragen, darstellt, konnten so spezifische Datenbedarfe abgeleitet und Synergien zwischen den Teilmodellen sichtbar gemacht werden.

Die deduktiven Untersuchungen befassen sich mit einer Auswertung der existierenden Daten zum Wirtschaftsverkehr. Hier werden vor allem die Daten der KiD hinsichtlich einer Charakterisierung des städtischen Wirtschaftsverkehrs im Allgemeinen und der städtischen Wirtschaftsverkehrsflotten im Besonderen ausgewertet (KiD, 2010). Auch die Begleit- und Wirkungsforschung der Schaufenster Elektromobilität beschäftigt sich mit der Elektrifizierung des Wirtschaftsverkehrs (Deutsches Dialog Institut, 2014).

Da es in diesem ersten Schritt der Flottenbetrachtung jedoch um eine Auswertung möglichst repräsentativer Daten zur Charakterisierung von Flotten im städtischen Wirtschaftsverkehr geht, konnten die Ergebnisse der Schaufensterprojekte, die sich doch eher auf ausgewählte Flotten konzentrieren nicht herangezogen werden.

Induktiv muss vor allem dann vorgegangen werden, wenn keine der benötigten Informationen in der geeigneten Form aus Sekundärquellen zu beziehen und ein verallgemeinernder Input z.B. in Bezug auf typische Fahrprofile unterschiedlicher Flotten zur Erstellung generischer Flottenprofile notwendig ist.

Die dabei angewandten Methoden umfassten jene der Primärerhebungen (Fahrzeugvermessungen, Umfragen, Workshops) und jene der Sekundärrecherche (Auswertung von Studien und Datenmaterial).

Nachfolgend werden die einzelnen Arbeiten, ihr Ziel und Hintergrund, differenziert nach der angewendeten Methode, dargestellt. Es wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, sondern eine Auswahl vorgestellt, die zur Bearbeitung der Forschungsfrage am zweckmäßigsten ist.

### **3.1.1 Auswertung KiD 2010**

(N. Döge, W. Siegert)

Die periodisch wiederholt durchgeführte Erhebung „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“ hat zum Ziel, aktuelle und umfassende Grundlagendaten im Hinblick auf die Strukturen und die Entwicklung des straßengebundenen Kraftfahrzeugverkehrs, insbesondere des Wirtschaftsverkehrs, zu ermitteln, da diese Daten durch die amtliche und nicht-amtliche Statistik nicht hinreichend erfasst werden. Mit Hilfe dieser Daten soll es gelingen, den straßengebundenen Wirtschaftsverkehr in den Planungen des Bundes, der Länder und der Kommunen in seiner ihm zukommenden hohen Bedeutung zu berücksichtigen (WVI GmbH Braunschweig, 2012).

Mit der bei Projektstart aktuellsten Erhebung zum Wirtschaftsverkehr, der KiD (2010), stand dem Projekt ein reichhaltiges Datenangebot zur Verfügung, dass im Sinne des Untersuchungszieles ausgewertet wurde, um den zusätzlich durch Primärerhebungen zu generierenden Datenumfang zu minimieren.

#### **Allgemeine Auswertung zum Wirtschaftsverkehr zur Gewinnung von Informationen über städtische Wirtschaftsverkehrsflotten**

Da in komDRIVE das Elektrifizierungspotential kommerzieller Kraftfahrzeugflotten im städtischen Wirtschaftsverkehr im Fokus der Betrachtung steht, werden zunächst allgemeine in der KiD erfragte Kenngrößen des Wirtschaftsverkehrs ausgewertet, um diese zu einem späteren Zeitpunkt als Eingangsgrößen für die zu erstellenden Modelle heranzuziehen.

Dabei wurde unter den Projektpartnern zunächst erfragt welche KiD-Kenngrößen für die einzelnen Projektbausteine relevant sind. Ergebnis ist eine Zusammenstellung und räumlich differenzierte Auswertung und Kreuzabfrage der Variablen:

Fahrzeugart (K01),

- Fahrzeugtagesfahrleistung (K34),
- Verkehrsbeteiligungsdauer (K36),
- Wirtschaftszweige (K19),
- Flottenzusammensetzung und -größe (H06),
- Antriebsart (K07),
- des Fahrzeugfragebogens auf deskriptiver Analyseebene (KiD 2010, WVI GmbH Braunschweig, 2012).

Diese Werte tragen dazu bei, Erkenntnisse darüber zu gewinnen, in welchen Wirtschaftszweigen und Fahrzeugklassen Elektromobilität zum Erhebungszeitpunkt am häufigsten vorzufinden ist und bezugnehmend auf Flotten- und Einsatzcharakteristika am ehesten Anwendung finden könnte. Dies beinhaltet auch eine vertiefende Auswertung der Tagesfahrleistungen, deren methodischer Ansatz Gegenstand des folgenden Kapitels ist.

Die obigen Kennwerte gehen zudem als Eingangsparameter in das lokale Emissionsmodell und das Energiesystemmodell (Kapitel 3.4 und Kapitel 3.5) ein. Die Ergebnisse dieser Modelle sind in den Kapiteln 4.4 und 4.5 dargestellt.

### **Vertiefende Auswertung von Tagesfahrleistungen zur Bemessung des Elektrifizierungspotentials von Flotten in bestimmten Wirtschaftszweigen**

Die meist besprochenen Themen, welche die Skepsis gegenüber Elektrofahrzeugen stärken, sind die begrenzte Reichweite, die relativ langen Ladezeiten sowie die Einschränkung hinsichtlich der Fahrzeugklassen. Auch ist die Ladeinfrastruktur im öffentlichen Bereich noch wenig ausgebaut. Letzteres betreffend, bietet der Wirtschaftsverkehr Potenziale. Durch Ladestationen auf Firmenplätzen würde die Schaffung einer öffentlichen Ladeinfrastruktur für den Wirtschaftsverkehr weniger wichtig. Die Ladezeiten spielten in dem Fall keine entscheidende Rolle, sobald das Fahrzeug am Tag innerhalb der möglichen Reichweite bleibt und eine gewisse Ruhezeit zwischen den Einsatzfenstern besteht, um das Fahrzeug wieder zu laden. Die Tagesfahrleistung ist daher eine der bedeutendsten Faktoren, um das Einsatzpotenzial von EV im Wirtschaftsverkehr zu untersuchen.

Bezüglich der Fahrzeugklassen kommen derzeit nur elektrische Pkw und leichte Nutzfahrzeuge (LNF, Transportlast kleiner als 3,5 t) zum Einsatz. Für größere Fahrzeugklassen gibt es zum einen bisher wenige Modelle auf dem Automobilmarkt, zum anderen ist die Reichweite von Elektrofahrzeugen stark vom Gewicht der Fahrzeuge und der zu transportierenden Last abhängig, was die elektrische Reichweite für Lkw deutlich verkürzt. Folglich sind E-Fahrzeuge dieser Fahrzeugklasse momentan für einen Einsatz im Wirtschaftsverkehr wenig geeignet. Dementsprechend wurde der Fokus der Auswertung auf Pkw und LNF gesetzt. Eine genauere Analyse der Tagesfahrleistung und Elektrifizierungspotentialabschätzung auf Ebene des Einzelfahrzeuges wird in Kapitel 4.1.4 beschrieben.

Weiterhin sollen im Zuge der KiD (2010) Auswertung nur Fahrzeuge gewerblicher Haltung aus dem Datensatz ausgewählt werden, da diese den Großteil des Wirtschaftsverkehrs abbilden. Zwar finden auch Fahrten im Wirtschaftsverkehr mit privat gehaltenen Fahrzeugen statt, diese lassen sich aber zum einen keinen Wirtschaftszweigen zuordnen und zum anderen ist ein Einsatz von EV insbesondere für Flottenbetreiber sinnvoll.

Bei privater Haltung kann ausgeschlossen werden, dass das Fahrzeug Teil einer Flotte ist. Weiterhin sollten nur Fahrzeuge aus den Stadt- und Gemeindetypen Kleinstadt, Mittelstadt und Großstadt betrachtet werden, da der städtische Wirtschaftsverkehr der Betrachtungsgegenstand ist. Die Fahrzeugklassen wurden einzeln untersucht.

Die Darstellung der Tagesfahrleistungen sollte mittels Kastengrafik (Boxplot) erfolgen, da diese die gesamte Spanne der Stichprobe abbilden können und damit Aussagen darüber zulassen, wie groß der Anteil der Fahrzeuge in den jeweiligen Wirtschaftszweigen ist, die die elektrische Reichweite am Tag nicht überschreiten. Als Referenz für die Reichweite wurden für die zwei Fahrzeugklassen Referenzfahrzeuge ausgewählt und die jeweiligen Reichweitenwerte verwendet (Siegert, 2015). Die Referenzfahrzeuge sind in der folgenden Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10: Elektrische Referenzfahrzeuge für den städtischen Wirtschaftsverkehr

Fahrzeugmodell	Fahrzeugart	Reichweite nach NEFZ in km	Ladedauer in Std. bei 230 V	Batteriekapazität in kWh	Potenzielle Nutzlast in kg
E-Wolf Omega 0.7 Cargo	Pkw	154	8	24,2	666
Renault Kangoo Z.E.	Pkw	170	9	22,0	650
Mercedes Vito E-Cell	LNF (< 3,5 t)	130	10	36,0	850
Iveco Daily 35S	LNF (< 3,5 t)	130	8 (380 V)	21,2	1000

Quelle: eWOLF GmbH, 2015; Renault Deutschland, 2015; ADAC, 2013; Electrosuisse. e'mobile, 2014)

### 3.1.2 Unternehmensbefragung unter Wirtschaftsverkehrsflotten in Berlin und dem Berliner Umland

(N. Döge, W. Siegert)

Spezifisch auf komDRIVE zugeschnittene Basisinformation lässt sich nicht aus Standarderhebungen beziehen. Deshalb wurde eine Nutzerbefragung von Flottenbetreibern und Fahrern durchgeführt.

#### Hintergrund

Diese Befragung sollte vor allem Daten für weitere Berechnungen in den Modell-Arbeitspaketen liefern, aber auch Informationen zu Beweggründen und Motivationen für den möglichen Einsatz elektrischer Antriebskonzepte sowie die Bereitschaft für eine Nutzung von Elektrofahrzeugen (E-Fahrzeuge) für Netzdienstleistungen. Zum anderen sollten die Anforderungen ermittelt werden, die die Nutzer an die Fahrzeuge und die gesamte Flotte haben.

Weiterhin sollten in der Befragung Kenndaten für die Einsatzprofile und -muster gewerblicher Flotten, zum aktuellen Stand und zu bestehenden Hürden beim Einsatz von EV erfragt werden.

Da der WIV ein unterschiedlich definiertes Verkehrsphänomen darstellt, schwer im Alltagsverkehr messbar ist und somit keine Informationen über die Grundgesamtheit existieren können, kommt für die Datenerhebung nur eine explorative Befragung in Betracht, da so vor allem qualitative Aspekte erfasst werden können (Atteslander, 2010). Zuzüglich zu den im Zentrum des Interesses stehenden qualitativen Charakteristika, wie Wissens-, Erfahrungs- und Akzeptanzfragen, sollten flotten- und unternehmensspezifische Charakteristika abgefragt werden, um später in der Lage zu sein, einen Bezug zu der KiD Datenauswertung herstellen zu können.

### **Erhebungsdesign und Operationalisierung**

Es wurden zwei getrennte Fragebögen für Flottenbetreiber bzw. Fuhrparkleiter und Fahrer erarbeitet, um beide Sichtweisen in Bezug auf Erfahrungen mit Elektromobilität zu erfassen. Hier wurde angenommen, dass die Fahrer detailliertere Aussagen über Probleme aber auch positive Erfahrungen mit getesteten Fahrzeugen im Alltagsverkehr berichten könnten.

Die Variablenliste und Befragungsinhalte der Flottenbetreiber sind in Tabelle 11, die der Fahrer in Tabelle 12 aufgeführt.

Um die Auswertung zu erleichtern und den subjektiv wahrgenommenen Bearbeitungsaufwand für die Probanden zu minimieren, wurde für beide Befragungen ein online ausfüllbarer, strukturierter Fragebogen mit überwiegend geschlossenen Fragen erstellt (Atteslander, 2010). Dieser enthält Filterfragen und dynamische Antwortkategorien. Die Erstellung des Fragebogens erfolgte mittels des Portals „onlineumfragen.de“, die Probanden erhielten eine Einladungsemail mit einem automatisch generiertem Passwort, das ihnen erlaubte, die Befragung zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchzuführen, beliebig zu unterbrechen und zu einem späteren Zeitpunkt zu Ende zu führen.

Den Anforderungen an den Datenschutz wurde in der Form Rechnung getragen, als dass das Erhebungsdesign inklusive beider Fragebögen vor dem Erhebungsbeginn von der Datenschutzbeauftragten der TU Berlin überprüft und entsprechend ihrer Rückmeldung angepasst wurde.

Ursprünglich wurde nur eine Erhebungswelle für den November 2014 vorgesehen. Für diese sind insgesamt 5.000 Unternehmen/Organisationen in Berlin und dem engeren Verflechtungsraum um Berlin über ihre E-Mail-Adressen, die von einem kommerziellen Anbieter bezogen worden sind, kontaktiert worden. Aufgrund des geringen Rücklaufs und der wenigen Unternehmen, die angaben, schon Erfahrungen mit Elektromobilität gemacht zu haben, wurde im März 2015 eine zweite Erhebungswelle durchgeführt. Um die Rücklaufquote zu verbessern und auch gezielt die den Anforderungen entsprechenden Probanden kontaktieren zu können, wurden über Unternehmensportale insgesamt 3.159 E-Mail-Adressen eigenständig recherchiert. Über diese E-Mail-Adressen wurden die Unternehmen zu Beginn der zweiten Erhebungswelle kontaktiert.

Insgesamt erhielten die kontaktierten Unternehmen im Abstand von jeweils einer Woche zwei Erinnerungen mit der Bitte, sich doch an der Erhebung zu beteiligen. Die Ergebnisse der Erhebung sind in Kapitel 4.1.1 einzusehen.

### **3.1.3 Nutzerworkshop mit Betreibern von Wirtschaftsverkehrsflotten und Fahrern**

(N. Döge)

Der durchgeführte Nutzerworkshop mit Fahrern in und Betreibern von kommerziellen Fahrzeugflotten im Wirtschaftsverkehr sollte vor allem den drei folgenden Fragen nachgehen:

1. Welche Vorurteile bestehen in Bezug auf Elektromobilität im Wirtschaftsverkehr von Seite der Unternehmen/Fahrer?
2. Welche positiven und negativen Erfahrungen sind im Praxistest mit E-Fahrzeugen gemacht worden?
3. Was müsste sich ändern, um mehr Elektrofahrzeuge auf die Straße bringen zu können?

Dieser in erster Linie als erfahrungsaustausch- und problemlösungsorientiert angelegter Workshop fand am 16. Juli 2015 statt. Es konnten die Berliner Agentur für Elektromobilität (eMo) und die Statwerke Consult GmbH des Projektes „e mobility Mitte“ als Inputgeber gewonnen werden.

Die Ansprache potentieller Teilnehmer, bei denen es sich vorwiegend um Flottenbetreiber und Fahrer in Flotten aus der Berliner Wirtschaft handelte, erfolgte mittels telefonischer Ansprache. Eine Streuung der textlichen Einladungen in Form eines Informationsblattes erfolgte über die Inputgeber.

Die Ergebnisse des Nutzerworkshops sollten vor allem zweckdienliche Erkenntnisse für die Identifikation von Steuerungsinstrumenten zur Beförderung von Elektromobilität im städtischen WIV liefern. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 dargestellt.

### **3.1.4 Expertenworkshop zum Thema Datenverfügbarkeit im Wirtschaftsverkehr und Elektromobilität**

(N. Döge)

Wie bereits in Kapitel 2.3 dargestellt, wird derzeit eine Vielzahl von Forschungsvorhaben im Themenfeld Elektromobilität, zunehmend auch mit Fokus auf dem Wirtschaftsverkehr, umgesetzt. So konnten zahlreiche Forschungsvorhaben identifiziert werden, die thematische Überschneidungen mit Teilaspekten des komDRIVE Projektes aufwiesen. Mit vertiefender Betrachtung der Einzelprojekte fiel auf, dass viele der von anderen Vorhaben erhobenen Daten für das komDRIVE Projekt nicht nutzbar waren, da z.B. in Bezug auf Modellierungsaktivitäten von abweichenden Annahmen ausgegangen wurde oder Erhebungsdesigns voneinander abwichen.

Da zudem der den WIV beschreibende Datenbestand ein generelles Problem von Forschung und Planung darstellt, welches die Mehrheit der Forschungsprojekte betrifft, wurde ein Expertenworkshop zum Thema „Datenverfügbarkeit im Wirtschaftsverkehr und Elektromobilität“ organisiert.

Der Expertenworkshop am 16. April 2015 hatte zum Ziel:

- die Aussagegüte einzelner im Projekt entwickelter Einzelmodelle zu verbessern, indem die entwickelten Ansätze im Expert\*innenkreis diskutiert werden,
- eine Vernetzung unter den Forschungsprojekten ähnlicher Thematik herzustellen,
- Ansätze für eine langfristige Verbesserung der Datengrundlagen im Themenfeld „Wirtschaftsverkehr und Elektromobilität“ zu generieren, und
- die Schaffung einheitlicher Standards für durchzuführende Primärerhebungen anzustoßen.

Dazu wurden mit den Teilnehmenden aus Forschung, Verwaltung und Wissenschaft zwei Fragestellungen diskutiert:

1. Welche aktuellen Probleme bei der Elektrifizierung des Wirtschaftsverkehrs werden momentan von Ihnen untersucht?
2. Welche Forschungsansätze sind in Bezug auf eine Elektrifizierung des Wirtschaftsverkehrs am bedeutendsten?

Die Ergebnisse des Expertenworkshops sind in Kapitel 4.1.2 dargestellt.

Tabelle 11: Variablenliste der Flottenbetreiber inkl. Kodierung.

Variablenbezeichnung	Nr.	Variablenbezeichnung	Nr.
Wirtschaftliche Hauptausrichtung des Unternehmens	v1	Anzahl Touren/Länge Touren	v33/v33z
Detaillierte wirtschaftliche Ausrichtung	v2- v15	Standzeiten Stopps/Anzahl Stopps	v34/v34z
Anzahl der Mitarbeiter	v16	Antrieb der Mehrzahl der Fahrzeuge/Verbrauch	v35/v35z
Postleitzahl	v17	Fahrzeugklassen mit elektr. Antrieben	v36
Kategorie räumlicher Aktivitäten	v18	Antriebsformen/Anzahl Fahrzeuge	v37/v37z
Aktivitätszeitraum am Wochenende	v19	Hersteller der elektrischen Fahrzeuge	v38
Einsatzzeiten	v20	Reichweitenabweichung zur Herstellerangabe	v39
Flottentyp	v21	Speichertechnologie	v40
Fahrzeugklassen	v22	Eigengewicht Speicher	v41
Spezialfahrzeuge	v23	Nennenergie (Kapazität)	v42
Anzahl der Fahrzeuge im Fuhrpark	v24	Erfahrungen mit elektrischen Antrieben	v43
Gewicht ohne Zuladung	v25	Grund für Anschaffung von E-Fahrzeugen	v44
Gewicht bei Vollladung	v26	Planung Ausbau des Bestandes	v45
Tägliche Einsatzzeit in Stunden	v27	Ökonomische Rentabilität als Kriterium	v46
Abweichung Einsatzzeit Durchschnitt	v28	Gründe für Zurückhaltung Anschaffung	v47
Jahre bis Ausmusterung	v29	Interesse an Forschungsstand	v48
Zuladungsprofil	v30	Bekanntheit Netzdienstleistungen	v49
Routenkonstanz	v31	Interesse an Forschungsstand Netzdienstleistungen	v50
Standort Fahrzeuge	v32		

Tabelle 12: Variablenliste der Fahrer/-innen inkl. Kodierung.

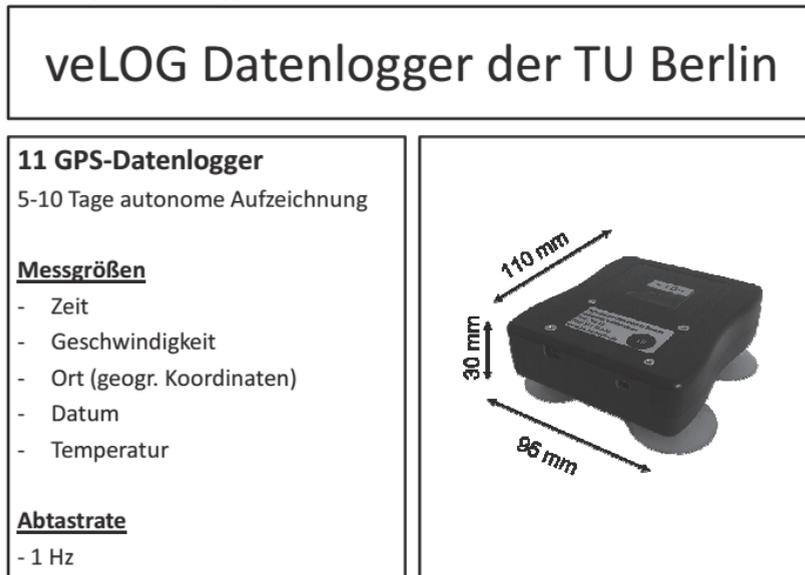
Variablenbezeichnung	Nr.	Variablenbezeichnung	Nr.
Wirtschaftliche Hauptausrichtung des Unternehmens	v1	durchschnittliche Dauer Stopp/Anzahl Stopps pro Tour	v24/v24 z
Detaillierte wirtschaftliche Ausrichtung	v2- v15	Antrieb Mehrzahl der Fahrzeuge/Verbrauch	v25/v25 z
Tätigkeiten im Arbeitsalltag	v16	Erfahrung Fahrzeugklassen mit elektr. Antrieben	v26
Anzahl der Mitarbeiter	v17	Antriebsformen Fahrzeugklassen	v27
Kategorie räumlicher Aktivitäten	v18	Reichweitenabweichung zur Herstellerangabe	v28/v28 z
Aktivitätszeitraum am Wochenende	v19	Hersteller der elektrischen Fahrzeuge	v29
Einsatzzeiten	v20	Erfahrungen mit elektrischen Antrieben	v30
genutzte Fahrzeugklassen während des Einsatzes	v21	Bereitschaft zur zukünftigen Nutzung von EV	v31
Spezialfahrzeuge	v22	Probleme/Vorteile eines Umstieges auf EV	v32
Zurückgelegte km Einsatztag/Anzahl Touren	v23 /v2 3z	Interesse an Forschungsstand	v33

### 3.1.5 Vermessung realer Fahrzyklen

(D. Dreyhaupt, S. Marker)

Die Bestimmung des Energie- und Kraftstoffverbrauchs ist ein wichtiges Teilziel zur Charakterisierung des städtischen Wirtschaftsverkehrs und Grundlage für weitere Analysen bezüglich Systemdienstleistungen und des Energiesystemmodells. Um den Verbrauch der verschiedenen Fahrzeuge abschätzen zu können, wurden das Fahrverhalten und die Fahrzyklen realer Fahrzeuge vermessen.

Abbildung 24: Datenlogger TU-veLOG



Quelle: Darstellung aus Linssen et al., 2012

Hinweis: Der Datenlogger wurde im Vergleich zur hier dargestellten Version leicht erweitert. Über ein Softwareupdate konnte die Zuverlässigkeit, sowie die mögliche Dauer einer autonomen Aufzeichnung erhöht werden und es sind Abtastraten bis 10 Hz möglich.

Als Messtechnik kamen hierbei die GPS-Datenlogger TU-veLOG zum Einsatz, welche bereits in anderen Projekten erprobt wurden (vgl. Abbildung 24).

Die TU-veLOG werden an der Windschutzscheibe angebracht und zeichnen – je nach Tagesfahrleistung – fünf bis zehn Tage lang die Geschwindigkeit-Zeit-Ort-Profile der Fahrzeuge auf. Dabei versorgen sie sich autark, um keinen zusätzlichen Eingriff in das Onboard-Energiesystem vornehmen zu müssen. Kern der Logger ist ein dreiaxiales Beschleunigungsmessgerät und eine GPS-Einheit. Es ist keine Bedienung durch den Fahrer erforderlich. Die Messdaten werden zunächst loggerintern gespeichert und können über einen USB-Port ausgelesen werden. Um die Funktionsdauer des internen Energiespeichers zu erhöhen, geht der Logger in einen Schlafmodus mit geringem Energieverbrauch über, sobald über längere Zeit keine Bewegungsänderung festgestellt wurde. Wird das Fahrzeug danach bewegt, kehrt er in den aktiven Modus zurück.

Die aus den GPS-Daten abgeleiteten Fahrzyklen (Geschwindigkeits-Zeit-Profile) wurden auf folgende Merkmale hin analysiert:

- Fahrweise – sportlich oder ökonomisch,
- Zahl der Stopps,
- Aktivität und Inaktivität der Fahrzeuge,
- Verteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten,
- Tagesfahrleistungen, Jahresfahrleistungen.

Diese Fahrzyklen dienen als Input für die Simulationsmodelle zur Bestimmung des Energie- und Kraftstoffverbrauchs.

### Probanden

Eine der größten Herausforderungen bei der Vermessung realer Fahrzyklen stellte die Auswahl und Akquise von Probanden dar. Trotz zahlreicher Anfragen von weit über hundert möglichen Probanden im Umkreis Berlins konnte am Ende des Projektes lediglich auf die Daten von sieben verschiedenen Probanden (Unternehmen) zurückgegriffen werden. Die auf diesen Daten basierenden Analysen zu Fahrprofilen und Verbrauchswerten sind deshalb als nicht repräsentativ anzusehen. Tabelle 13 zeigt die Übersicht der vermessenen Probanden. Insgesamt standen im Simulationsmodell zur Bestimmung des Energie- und Kraftstoffverbrauchs somit 255 aufgezeichnete Fahrzyklen zur Verfügung.

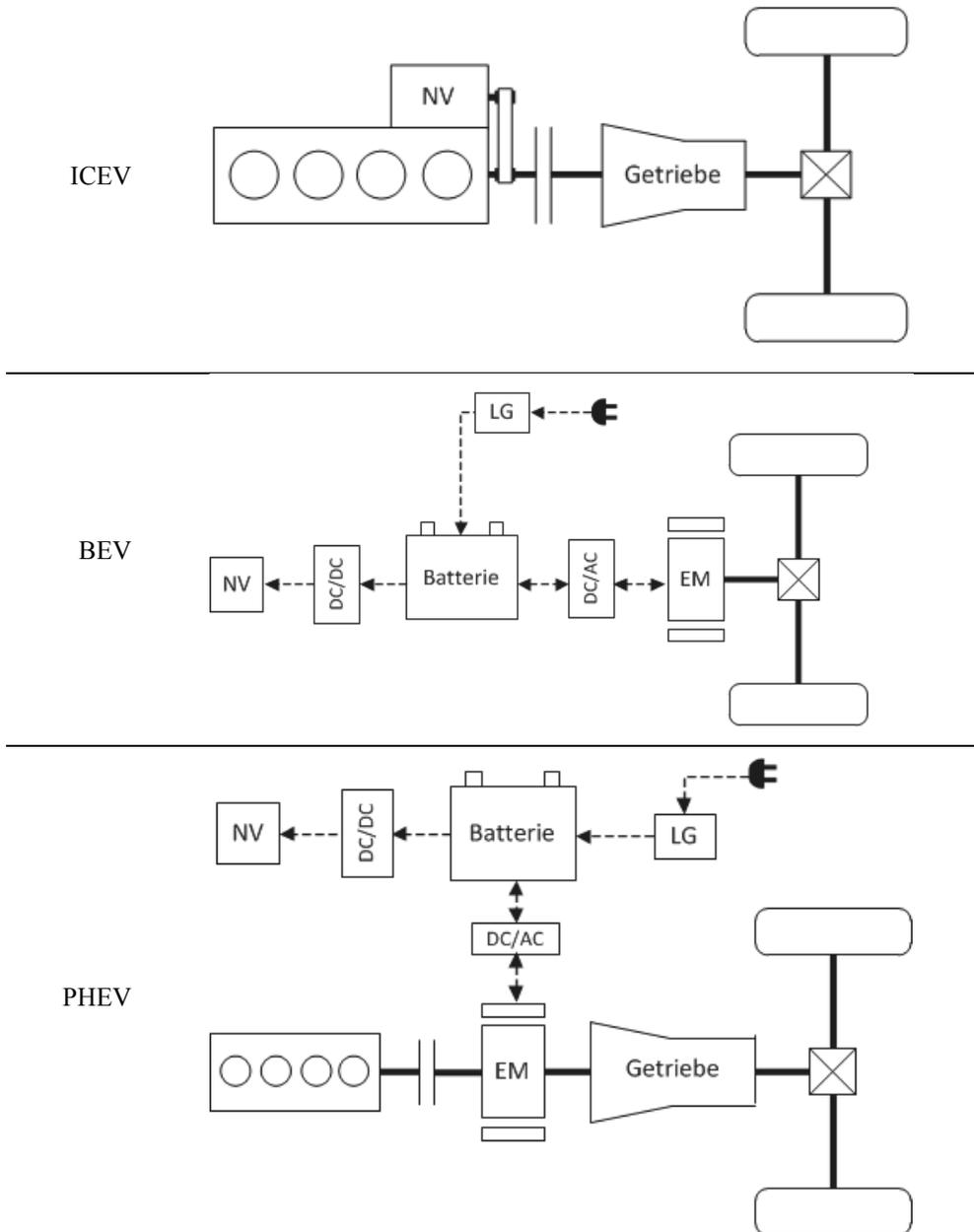
Tabelle 13: Übersicht der mit dem veLOG vermessenen Probanden

Fahrzeugkategorie	Anzahl Fahrzeuge	Messzeitraum	Anzahl verwertbarer Fahrzyklen	Einsatztage pro Woche
Pkw	1	51 Tage	38	Mo–So
Pkw	4	Je 2 Wochen	37	Mo–So
3,5 t Lkw	7	1–2 Wochen	47	Mo–Sa
3,5 t Lkw	4	je 2 Wochen	31	Mo–Sa
3,5 t Lkw	2	5–6 Wochen	36	Mo–So
5 t Lkw	2	je 2 Wochen	8	Mo–Fr
12 t Lkw	8	je 2 Wochen	58	Mo–Sa

Ausgangspunkt für die Simulationsmodelle zur Ableitung des Energie- und Kraftstoffverbrauchs stellte das Vorgängerprojekt, NET-ELAN dar. Die dort erstellten Modelle wurden jedoch maßgeblich erweitert, da in NET-ELAN ausschließlich der private Verkehr und somit Pkw betrachtet wurden. Mit dem Fokus auf dem Wirtschaftsverkehr waren jedoch entsprechende Simulationsmodelle für leichte und mittelschwere Lkw notwendig. Für die drei Fahrzeugklassen wurden jeweils die Antriebsvarianten konventionell (ICEV), batterieelektrisch (BEV) und Plug-In-Hybrid (PHEV) modelliert. Bei den beiden Lkw-Klassen fand zusätzlich eine Unterscheidung zwischen den Aufbauarten des geschlossenen Kastens und des offenen Kastens statt. Durch Variationen in den jeweiligen Parametersätzen wurden dabei die Verbrauchswerte bis zum Jahr 2030 berechnet. Abbildung 25 verdeutlicht den prinzipiellen Aufbau der unterschiedlichen Antriebsstränge. Der mit Verbrennungsmotor ausgestattete Triebstrang des ICEV wird als Referenz genutzt. Hier stellt der Verbrennungsmotor die notwendige Leistung für den Vortrieb und die Versorgung der Nebenverbraucher bereit. Der batterieelektrische Triebstrang des BEV (Battery Electric Vehicle) ist mit einem oder mehreren Elektromotoren ausgestattet, welche ebenso wie die Nebenverbraucher über einen Akkumulator energetisch versorgt werden. Das Wieder-aufladen erfolgt über das elektrische Netz, im Modell werden Lithium-Ionen-Batterien verwendet.

Der Triebstrang des PHEV ist in der Lage, Strecken von mehreren Kilometern Länge rein elektrisch zurückzulegen, ist aber zusätzlich mit einer Verbrennungskraftmaschine ausgestattet, die wahlweise direkten Durchtrieb zur Fahrbahn haben kann oder über die als Generator funktionierende elektrische Maschine die Batterie zu laden. Der Triebstrang kann im Charge Depleting Mode (CDM, Entladung der Batterie) oder im Charge Sustaining Mode (CSM, unter Zuschalten der Verbrennungskraftmaschine) betrieben werden. Fahrzeugkonzepte werden mit den messtechnisch aufgezeichneten Fahrprofilen gefüttert und daraus Fahrleistungs- und Verbrauchsmodelle erzeugt. Ein wesentlicher Teilaspekt der Modellierung äußerte sich zudem in der Analyse der Fahrzeuginvestitionskosten bis zum Jahr 2030, welche für eine ökonomische Bewertung von großer Bedeutung sind. Über ein entsprechend erstelltes Szenario wurden anhand der getroffenen Annahmen und Parametersätze die Kosten entsprechend simuliert. Weitere Details sowie die entsprechenden Ergebnisse finden sich in Kapitel 4.1.4–4.1.6.

Abbildung 25: Übersicht der unterschiedlichen Antriebsstrang-Konfigurationen



Quelle: Linssen. et al., 2012

## 3.2 Batteriealterung und Batteriekosten: Methodik

(M. Bauer, M.A. Danzer, C. Günther, M. Taumann)

Neben den volumetrischen und gravimetrischen Leistungs- und Energieanforderungen, gehören Sicherheit, Lebensdauer und Kosten zu den wichtigsten und meist diskutierten Eigenschaften elektrischer Energiespeicher in Fahrzeugen mit elektrischen Antriebskomponenten.

Das Lebensende von elektrischen Speichern wird neben dem Ausfall durch Defekt per Definition erreicht, wenn die für eine spezielle Anwendung erwartete Funktionalität nicht länger gegeben ist. Im Fahrzeug ist das der Fall, wenn durch Kapazitätsabnahme und Innenwiderstandsanstieg eine Mindestreichweite unterschritten wird, eine Leistungsanforderung nicht mehr erfüllt werden kann oder wenn der Kühlkreislauf eine erhöhte Abwärme nicht mehr abführen kann. In der vorliegenden Arbeit wird die Alterung von Lithium-Ionen-Batterien in Labortests untersucht und aus den Testergebnissen werden Alterungsmodelle abgeleitet.

In den letzten Jahren stellten sich selbst optimistische Prognosen der Kosten von Lithium-Ionen-Batterien nach einem Vergleich mit der tatsächlichen Kostenentwicklung als zu vorsichtig heraus (Anderman, 2009 und Anderman, 2014a). Dies ist massiven Investitionen in Forschung, Entwicklung und Produktionstechnik geschuldet, die zu einer veränderten Materialauswahl, einem optimierten Zelldesign, einer günstigeren Zellproduktion, einer Hochskalierung der Produktion und damit zu einer sehr steilen Lernkurve geführt haben. Beschleunigt wurde die Preisreduktion durch den Aufbau von Überkapazitäten und die Bildung von strategischen Partnerschaften. Daher ist ein fortwährendes Analysieren von Kostenstudien und Expertenaussagen unumgänglich, sollen Aussagen zur Batteriealterung und deren Kosten getroffen werden.

### 3.2.1 Alterungstests

Lithium-Ionen-Batterien sind elektrochemische Energiespeicher, bei welchen neben den für das Speichern und Abgeben elektrischer Energie notwendigen Hauptreaktionen in einer Batterie auch Nebenreaktionen ablaufen. Diese Nebenreaktionen sind von Spannung, Temperatur und Stromfluss abhängig (Arora et al., 1998).

Unter dem Begriff kalendarische Alterung werden Effekte zusammengefasst, welche ohne Stromfluss zur Degradation der Batterie führen. Während des Betriebs (Zyklisierung) der Batterie auftretende Degradationsmechanismen werden als Zyklentalterung oder auch betriebsbedingte Alterung bezeichnet. Bei tiefen Temperaturen ( $T < 23\text{ °C}$ ) ist das Lithium-Plating, die Abscheidung von metallischem Lithium auf der Anode, der dominierende Prozess (Vetter, 2005). Bei hohen Temperaturen ( $T \geq 23\text{ °C}$ ) können, wie in Vetter (2005) und Wohlfahrt-Mehrens (2004) beschrieben, unterschiedliche Alterungsmechanismen auftreten. Diese Prozesse werden nicht durch weitere Analysen bestimmt oder differenziert und werden im Folgenden unter den Begriffen Hochtemperatur-Zyklentalterung oder betriebsbedingte Hochtemperaturalterung zusammengefasst.

Die Batteriedegradation zeigt unter anderem Auswirkungen auf die Kapazität, die Impedanz und die geometrischen Abmessungen. Auf diese Eigenschaften wird während der Alterungs- und Referenztests besonderes Augenmerk gelegt.

Des Weiteren werden vier Module für eine Fallstudie aufgebaut. Die Module werden mit vier unterschiedlichen Belastungsszenarien betrieben. Ziel ist es, die durch unterschiedliches Ladeverhalten oder durch mögliche Systemdienstleistungen im Vergleich zu einem Basisfall zusätzlich verursachte Alterung zu quantifizieren.

Das Testobjekt ist die in Abbildung 26 dargestellte Lithium-Ionen-Batterie SLPB75106205 von Kokam™ mit einer Nennkapazität von  $C = 16$  Ah, einer Nennspannung von  $U = 3,7$  V und Abmessungen (L x B x H) von (205 x 106 x 7,5) mm. Es handelt sich um eine gestapelte Folienzelle (Pouchzelle). Elektrodenstapel, Elektrolyt und Stromableiter sind in einer flexiblen, mit Kunststoff beschichteten Alufolie verbaut.

Abbildung 26: Im Alterungstest verwendete Li-Ionen-Batterie



### Fallstudie an Batteriemodulen

Für die im Rahmen einer Fallstudie durchgeführten Alterungstests werden Batteriemodule aufgebaut. Gegenüber dem Kauf von Modulen ergeben sich Vorteile bezüglich des Zugriffs auf alle Messgrößen, der Kontrolle aller mechanischen Einflussparameter und der Durchführung weiterer Alterungstests mit denselben Modulen.

Wie in Abbildung 27 dargestellt, wird ein Stapel bestehend aus fünf der oben genauer beschriebenen Lithium-Ionen-Zellen und dazwischen liegenden Silikonschaummatten durch Hartpapier- und Aluminiumplatten sowie Gewindestangen fixiert. Für alle Module wird das lichte Maß zwischen den Hartpapierplatten mit Hilfe der Muttern an allen vier Ecken identisch eingestellt. Die Batterien werden in Serie geschaltet, so dass sich für jedes Modul eine Nennspannung von  $U_N = 18,5$  V bei einem Nennenergieinhalt von  $E_N = 296$  Wh ergibt. Des Weiteren werden fünf Temperatursensoren zwischen den Batterien an verschiedenen Positionen verbaut.

Abbildung 28 zeigt, wie die Module in die Testumgebung eingebunden werden. Von einem PC aus werden die Tests gesteuert und die Messdaten aufgezeichnet. Die Belastung der Module mit Testprofilen erfolgt durch das Batterietestgerät oder das Impedanz-spektrometer. In diesen Geräten werden Ströme und Spannungen gestellt und gemessen. Im Batteriemanagementsystem (BMS) und im Datenlogger werden die Einzelzellspannungen und in Letzterem zusätzlich diverse Temperaturen gemessen. Das BMS besteht aus einer Messplatine und einer so genannten Balancing-Platine. Letztere symmetriert die Ruhespannungen der Batterien auf ein einheitliches Niveau.

Die Angleichung der Einzelzellspannungen ist aus Gründen der optimierten Kapazitätsausnutzung erforderlich (Bentley, 1997) und sie wird vom PC aus über einen CAN-Bus gesteuert.

Abbildung 27: Schematische Darstellung der Seitenansicht eines Moduls

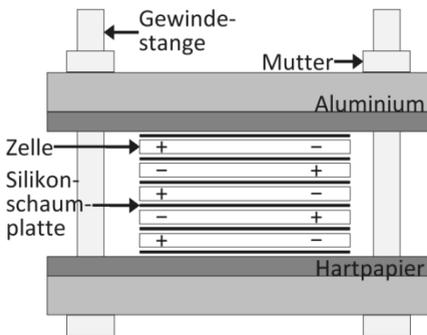
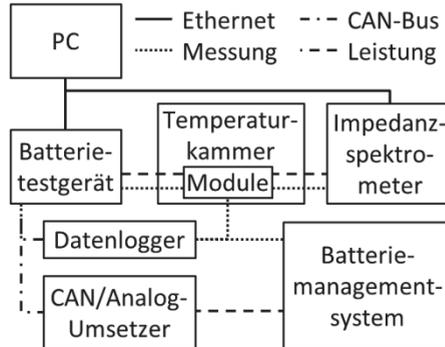


Abbildung 28: Schematische Darstellung des Messaufbaus



Die vier an den Modulen getesteten Fälle simulieren ungesteuertes Laden (L1) und gesteuertes Laden (L2) sowie die Teilnahme am Spotmarkt (Dayahead; L3) und am Regelenergiemarkt (Sekundärregelung; L4). In Tabelle 14 sind Zeiträume und Anschlussleistungen der getesteten Fälle L1 – L4 aufgeführt. Für alle Module gilt ein nutzbarer Ladezustandsbereich von 10 %–90 %. Der Grund hierfür ist, dass in Elektrofahrzeugen der nutzbare Ladezustandsbereich teilweise eingeschränkt wird, um schädliche Betriebszustände, wie beispielsweise einer Tiefentladung oder hohen Potentialen, vorzubeugen. Die Leistungsverläufe für die Marktteilnahmeszenarien in L3 und L4 werden mit Hilfe des in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Optimierungsalgorithmus berechnet. Hierbei ist zu beachten, dass durch eine spezielle Implementierung der Testabläufe der Verbleib einer Notreserve an Energie in der Fahrzeugbatterie während der Phasen der Strommarktteilnahme sichergestellt wird. Mit dieser Reserve können beispielsweise Notfallfahrten bis zu einer Distanz von 30 km zurückgelegt werden.

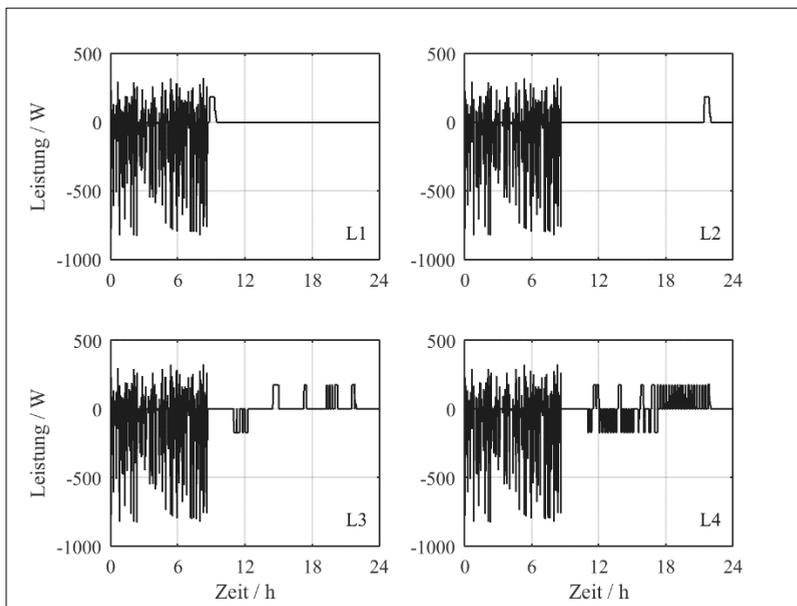
Tabelle 14: Zeitraum und Anschlussleistung der getesteten Ladevorgänge

Fall	Beschreibung	Zeitachse	Uhrzeit	Leistung
L1	Ungesteuertes Laden	9–11	17:00–19:00	183W
L2	Gesteuertes Laden	21–23	05:00–07.00	183W
L3	Spotmarkt	11–23	19:00–07:00	183W
L4	Regelenergiemarkt	11–23	19:00–07:00	183W

Für die Simulation der Batteriebelastung durch Fahrten werden alle Module mit demselben Fahrzyklus belastet. Diese basieren ursprünglich auf Messdaten. Mit einem GPS-Datenlogger werden vom Projektpartner FVB über sechs Tage hinweg die Fahrten eines im Verteildienst eingesetzten Fahrzeuges aufgezeichnet und anschließend wird das Signal für die benötigte Batterieleistung mit einem mathematischen Fahrzeugmodell (BEV Kleinlast, Batterie 36 kWh<sup>5</sup>) generiert. Schließlich liefert eine Markov-Ketten-Analyse ein synthetisches Leistungsprofil, welches eine identische Charakteristik aufweist. Dieser Fahrzyklus wird sowohl für die Fahrtensimulation im Modultest (in skaliertem Form) als auch für die Generierung der Energiemarktteilnahmeszenarien eingesetzt. Abbildung 29 zeigt die sich täglich wiederholenden Leistungsverläufe aller Module L1 – L4, bestehend aus Fahrzyklus und Ladeszenario, als Funktion der Zeit.

Die alterungsbedingte Änderung einiger Eigenschaften der Module, wie beispielsweise Kapazität oder Impedanz, werden in Referenztests gemessen. Diese Referenztests werden vor, während und nach dem Alterungstest bei 10 °C und 22.5 °C sowie etwas regelmäßiger bei 35 °C durchgeführt.

Abbildung 29: Zeitverlauf der Modulleistung für die Fälle L1 – L4



### Kalendarische Alterungstests

Kalendarische Alterungstests dienen der Charakterisierung und Quantifizierung von Alterungseffekten, die unabhängig von jeder Belastung innerhalb der Zelle auftreten.

---

<sup>5</sup> Diese Energiemenge entspricht sechshundert Lithium-Ionen-Batterien, respektive 120 Batteriemodulen, wie sie in den Alterungstests verwendet wurden.

Dem liegt die Anschauung zugrunde, dass die Alterung im Betrieb stets durch eine Summation von Alterungseffekten durch Belastung mit Lade- und Entladeströmen, sowie von kalendarischen Alterungseffekten, welche durch bloße Lagerung der Zelle entstehen, gegeben ist. Um letztere mit dem Ziel einer Modellbildung für Alterungseffekte zu quantifizieren werden insgesamt acht Zellen des genannten Zelltyps in temperaturgeregelten, isolierten Boxen gelagert und in regelmäßigen Abständen (analog zu den Szenarientests) vermessen. Die verwendete Testmatrix ist in der Tabelle 15 dargestellt, wobei den individuellen Testträgern zum Zwecke der Identifizierung die Kürzel Sx zugewiesen werden.

Tabelle 15: Testmatrix für kalendarische Batteriealterungstests

Kürzel	Temperatur $T/^\circ\text{C}$	Ladezustand $\text{SOC}$
S1	35	0,6
S2	40	0,3
S3		0,6
S4		0,9
S5	50	0,6

Für die Charakterisierungstests werden die Zellen zunächst dem zuvor beschriebenen Referenztest unterzogen. Darüber hinaus werden elektrochemische Impedanzspektren aufgezeichnet. Hierfür werden analog zu den Szenarientests Ladezustände von 10 %, 50 % und 90 % bezogen auf die aktuelle Gesamtkapazität angefahren und dort die Impedanzmessungen durchgeführt. Die Messungen werden mit Hilfe eines sinusförmigen Anregungssignals der Amplitude  $I = 0.8 \text{ A}$  für Frequenzen  $10 \text{ mHz} < f < 10 \text{ kHz}$  mit einer Frequenzabtastrung von 7 Frequenzen pro Dekade durchgeführt. Die Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses kalendarischer Alterung auf das Degradationsverhalten von Lithium-Ionen Traktionsbatterien werden in Abschnitt 4.2.1 vorgestellt und diskutiert.

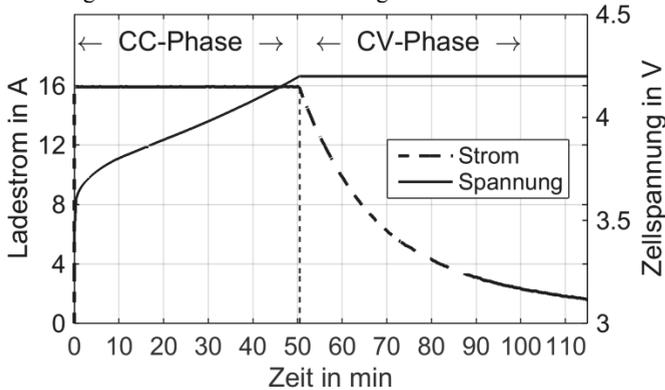
### Zyklische Alterungstests

Neben den Szenarialterungstests und den kalendarischen Alterungstests werden zusätzlich zyklische Alterungstests durchgeführt. Bei diesen Tests handelt es sich um ein repetitives Laden und Entladen mit Lade- bzw. Entladeströmen entsprechend einmal der Nennkapazität, d.h.

$$I^{\text{ch}} = I^{\text{dc}} = 16 \text{ A} =: 1 \text{ C.}$$

Dabei wird sowohl in Lade- als auch in Entladerichtung ein Konstantstrom-/ Konstantspannungsladen (CCCV für engl. Constant Current Constant Voltage) mit einer Ladeschlussspannung von  $U^{\text{oc}} = 4,2 \text{ V}$  und einer Entladeschlussspannung von  $U^{\text{od}} = 2,7 \text{ V}$  gewählt. Nachdem während der Konstantstromphase der jeweilige Spannungswert erreicht wird, wird daraufhin die Spannung konstant gehalten bis der Strom unter eine festgelegte Schwelle  $I^{\text{end}} = 0,8 \text{ A} = C/20$  abgefallen ist (Konstantspannungsphase). Für die Laderichtung ergeben sich hierbei charakteristische Stromprofile wie in Abbildung 30 gezeigt.

Abbildung 30: Schematische Darstellung des Konstantstrom-/Konstantspannungsladens



Beim Konstantstrom- und Konstantspannungsverfahren handelt es sich um das am weitesten verbreitete Ladeverfahren. Die zyklischen Alterungstests erlauben daher in guter Näherung die Charakterisierung von Alterungseffekten, welche beim Laden der Zellen auftreten. Die Alterungseffekte beim Entladen sind ohnehin als vergleichsweise unproblematisch einzustufen. Dadurch, dass bei der genannten zyklischen Alterung mit  $I = 1\text{ C}$  in kurzer Zeit eine sehr hohe Anzahl an Zyklen durchgeführt wird, können innerhalb einer verhältnismäßig kurzen Testdauer von einigen Monaten die zyklisch bedingten Degradationseffekte aus vielen Jahren des realen Zellbetriebs experimentell bestimmt werden.

Von besonderem Interesse ist hierbei die Abhängigkeit des Degradationsverhaltens von der Umgebungstemperatur. Wie wir in unserer Arbeit zeigen konnten Bauer (2015) und Waldmann (2014) treten bei konstanter Zyklisierung in den verschiedenen Temperaturbereichen grundsätzlich unterschiedliche Alterungsphänomene auf. Folglich muss ein weiterer Temperaturbereich experimentell erfasst werden, um alle notwendigen Informationen für eine vollständige Modellierung der Alterungsphänomene zu erfassen. Es wird daher eine Testmatrix gemäß Tabelle 16 gewählt. Den einzelnen Testzellen werden die entsprechenden Kürzel  $C_x$  ( $x \in \{1, 2, \dots, 5\}$ ) zugewiesen.

Tabelle 16: Testmatrix für zyklische Batteriealterungstests

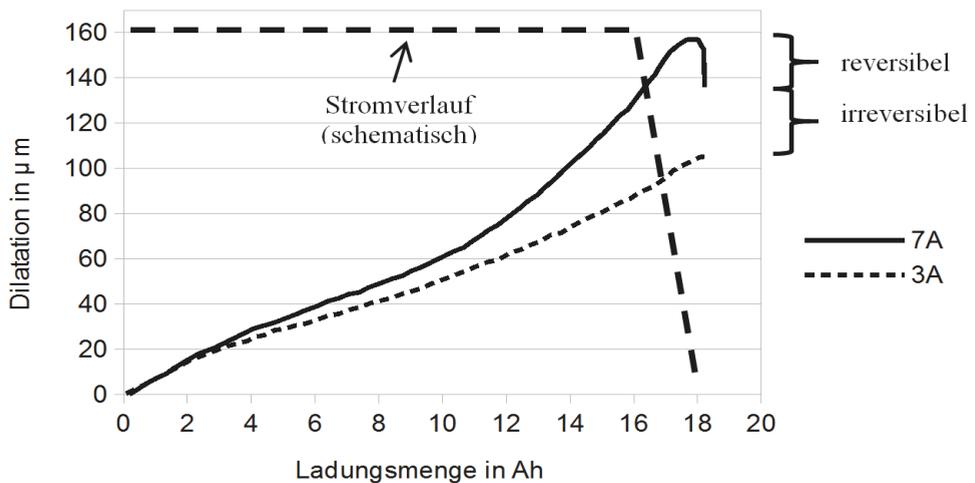
Kürzel	Temperatur $T/^\circ\text{C}$	Stromrate
C1	5	1 C
C2	12,5	
C3	17,5	
C4	22,5	
C5	40	
C6	50	

Es kommen wiederum die zuvor beschriebenen Charakterisierungstests (Referenztests und Impedanzspektren) zur Anwendung, um den Alterungszustand der Zellen in regelmäßigen Abständen zu beurteilen.

## Dilatometrie

Die messtechnische Erfassung und Auswertung der mechanischen Ausdehnung von Batteriezellen (sog. Dilatometrie) während des Betriebs hat sich in den letzten Jahren zu einer etablierten Methode der Alterungsanalyse entwickelt. Im Rahmen von komDRIVE wird die Methode eingesetzt um ein mechanistisches Verständnis der in den zyklischen Alterungstests festgestellten Degradation zu ermöglichen. Wie von Bitzer und Gruhle (2014) gezeigt, kommt es bei hohen Strömen zum Auftreten von Lithium-Plating und dadurch bedingt zu einem zusätzlichen Dickenwachstum. In Abbildung 31 zeigt die Zelle bei einem Strom von 7 A und ansonsten identischen Umgebungsbedingungen das charakteristische Platingverhalten.

Abbildung 31: Zusätzlicher Dickenzuwachs durch Lithium-Plating



Quelle: Bitzer et al., 2014

Folglich lassen sich durch Überwachung des Dickenverhaltens diagnostisch relevante Information über das Auftreten von Lithium-Plating gewinnen, wobei sogar irreversible und reversible Anteile des Platings unterschieden werden können. Dies steht in gutem Einklang mit der Modellvorstellung, dass metallisch abgeschiedenes Lithium während der Relaxation (Batteriezelle in Ruhe) teilweise wieder in die Graphit-Anode eingelagert wird.

Neben dem Plating wirkt sich vor allem das Graphit-Staging auf die Zelldicke aus. Hierunter werden die nichtkontinuierlichen Zustandsänderungen des Graphits verstanden, welche durch Veränderung der Lithiierung (mehr oder weniger eingelagertes Lithium) hervorgerufen werden. Die Dicke der negativen Elektrode steigt daher monoton, nichtlinear mit dem Grad der Lithiierung. So ist der durch die gestrichelte Kurve in Abbildung 31 repräsentierte Dickenzuwachs direkt auf die Erhöhung des Lithiierungsgrades des Graphits während des Ladens und die dadurch steigenden Abstände zwischen den einzelnen Schichten im Graphen zurückzuführen.

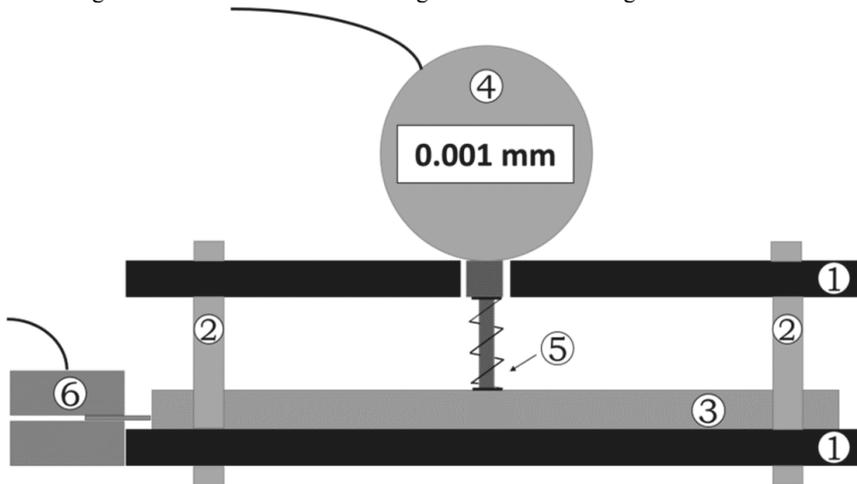
Da sich sowohl die direkte Detektion des Lithium-Platings, als auch die über das Graphit-Staging bedingten Signale in den Dilatometriedaten zur Beschreibung des Alterungsverhaltens der Zellen nutzen lassen, kann die Dilatometrie wertvolle Hinweise für den optimalen Einsatz von Zellen liefern. Insbesondere lässt sich exakt bestimmen, wie hoch mögliche Stromraten für Systemdienstleistungen zu wählen sind, um übermäßige Degradation zu vermeiden und die Zelle dennoch gewinnbringend einzusetzen.

Es kommt für die im Rahmen des Projektes durchgeführten Messungen ein Aufbau mit Dickenmessuhr wie in Abbildung 32 dargestellt, zum Einsatz. Der Aufbau besteht aus zwei gegenüberliegenden Aluminiumplatten, wobei die Messuhr in der oberen Platte fixiert wird. Die Messspitze liegt auf einem Metallplättchen ( $1 \text{ cm}^2$ ) auf der Zelloberfläche auf, wobei zusätzlich eine Feder eingebracht wird, um durch konstanten Druck Dilatationseffekte durch Gasbildung im Zellinneren zu vermeiden. Somit ist das Messsignal ausschließlich durch die Dilatation des Elektrodenstapels bestimmt.

Es handelt sich um eine Punktmessung in der Mitte der Zelloberfläche. Mögliche Inhomogenitäten im Ausdehnungsverhalten sind somit nicht darstellbar und wurden in dieser Arbeit nicht untersucht.

Während eines vollständigen Lade-/Entladezyklus treten bei der im Projekt untersuchten Zelle staging-bedingte Dickenänderungen im Bereich von ca.  $150 \text{ }\mu\text{m}$  auf, im Falle von Plating entsprechend höher. Die Auflösung der verwendeten Messuhr liegt bei  $1 \text{ }\mu\text{m}$ , was eine hinreichende Genauigkeit zur Beschreibung dieser Effekte darstellt.

Abbildung 32: Messaufbau zur Bestimmung von Dickenänderungen an Batteriezellen



(1) Aluminiumplatten, (2) Gewindestangen aus Stahl, (3) Zelle (Pouchzelltyp), (4) Digitale Messuhr für Dickenänderungen, (5) Messspitze, (6) Kontaktierungsplatten goldbeschichtet

Hinweis: In der Abbildung handelt es sich bei dem Punkt um ein Dezimaltrennzeichen.

### 3.2.2 Mathematische Modellierung der Batteriealterung

Bei Design und Auslegung von Batteriesystemen, Entwicklung modellbasierter Algorithmen für Batteriemanagementsysteme (BMS), Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen oder simulationsbasierten Untersuchungen ist die Berücksichtigung der Batteriealterung notwendig. Beispielsweise kann der Rückgang der Reichweite eines Elektrofahrzeuges durch Kapazitätsverlust der Batterie bei einer Wirtschaftlichkeitsanalyse oder der erhöhte Kühlleistungsbedarf durch Anstieg der Verlustleistung bei Auslegung eines Kühlkonzepts eine nicht vernachlässigbare Rolle spielen.

Da in der vorliegenden Arbeit die Reichweite der Fahrzeuge und nicht die Kühlkonzepte im Vordergrund stehen, wird ausschließlich die relative Kapazität  $C_{\text{Bat,r}}[k]$  der Fahrzeugbatterie

$$C_{\text{Bat,r}}[k] = \frac{C_{\text{Bat}}[k]}{C_{\text{Bat}}[0]} \frac{C_{\text{Bat}}[k]}{C_{\text{Bat}}[0]}$$

inklusive Kapazitätsverluste durch unterschiedliche Betriebszustände zu jedem Zeitpunkt  $k \in \mathbb{N}$  modelliert, wobei  $C_{\text{Bat}}[k=0]$  der Anfangskapazität entspricht. Die Alterung der Batterie  $A_{\text{Bat}}[k]$  ist eine Kenngröße, welche hier den Kapazitätsverlust widerspiegelt

$$A_{\text{Bat}}[k] = \frac{1}{0,2} \cdot (1 - C_{\text{Bat,r}}[k]).$$

Sie hat den Wert 0 zu Beginn der Nutzung, wenn die volle Kapazität zur Verfügung steht und den Wert 1, wenn die Batterie 20 % der ursprünglichen Kapazität verloren hat.

Die Fahrzeugbatterie ist am Ende der Nutzungsdauer bei  $C_{\text{Bat,r}}[k] = 0,8$  keineswegs defekt. In einer anderen Anwendung mit anderen Anforderungen ist die Batterie mit der ihr verbleibenden Restkapazität eventuell sehr gut einsetzbar.

Eine Grundannahme des hier dokumentierten Modells ist, dass sich die Alterung während der unterschiedlichen Betriebszustände in Submodellen beschreiben und gemäß dem Superpositionsprinzip

$$A_{\text{Bat}}[k] = A_{\text{kal}}[k] + A_{\text{pla}}[k] + A_{\text{bHT}}[k]$$

überlagern lässt. Wie in Abschnitt 3.2.1 bereits erwähnt, bezeichnet die kalendarische Alterung  $A_{\text{kal}}[k]$  Degradationsmechanismen, welche in der Batterie auch während Standzeiten ohne Stromfluss auftreten. Während des Betriebes sind unterschiedliche Effekte beobachtbar. Bei hohen Temperaturen über Raumtemperatur dominieren Mechanismen, welche mit steigender Temperatur einen exponentiell zunehmenden Kapazitätsverlust verursachen ( $A_{\text{bHT}}[k]$ ). Hierzu Gegenläufig ist das so genannte Lithium-Plating ( $A_{\text{pla}}[k]$ ). Dieser Mechanismus führt mit sinkenden Temperaturen zu verstärktem Kapazitätsverlust.

#### Mathematische Modellierung der kalendarischen Alterung

Die kalendarische Alterung einer Zelle wird überwiegend durch chemische Reaktionen zwischen dem Elektrolyt und den Elektroden getrieben, so dass im Wesentlichen zyklisierbares Lithium für die Speicherung von Energie verloren geht (Broussely et al., 2001). Diese Reaktionen werden überwiegend durch das elektrochemische Potenzial und die Temperatur in der Zelle beeinflusst.

Untersuchungen haben gezeigt, dass sich der Einfluss der Temperatur  $T$  exponentiell gemäß der Arrhenius-Gleichung verhält (Liaw et al., 2003; Ploehn et al., 2004; Wright et al., 2002). Auch der Einfluss des Ladezustandes SOC, welcher hier anstelle des Potenzials für die Modellierung verwendet wird, lässt sich mit Hilfe einer Exponentialfunktion beschreiben (Millner, 2010 und Sarasketa-Zabala et al., 2014). In Bloom et al. (2001); Ploehn et al. (2004); Thomas et al. (2008) und Yoshida et al. (2006) wird der Zeitverlauf der Alterung respektive des Lithiumverlustes proportional zu  $\alpha$  für  $0 < \alpha \leq 1$  beschrieben. Daher wird für die kalendarische Alterung in zeitdiskreter Nomenklatur ein Alterungsinkrement  $dA_{\text{kalendarisch}}$  [k] im Zeitschritt  $k \in \mathbb{N}$  mit dem Ansatz

$$dA_{\text{kalendarisch}}[k] = A \cdot e^{(B \cdot \text{SOC}[k])} \cdot e^{\left(\frac{-E_{A,\text{kal}}}{(R \cdot T[k])}\right)} \cdot \alpha_{\text{kal}} \cdot t_k^{(\alpha_{\text{kal}}-1)} \cdot dt_k$$

beschrieben. Das Formelzeichen  $E_{A,\text{kal}}$  steht für die Aktivierungsenergie und mit  $R$  ist die universelle Gaskonstante bezeichnet.

Die Modellparameter werden im Vektor  $\theta_{\text{kal}} = [A, B, E_{A,\text{kal}}, \alpha_{\text{kal}}]$  zusammengefasst und anhand der in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Messergebnisse aus den kalendarischen Lebensdauertests sowie mit Hilfe eines Parameterschätzers basierend auf der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt.

### **Mathematische Modellierung der betriebsbedingten Alterung bei erhöhten Temperaturen**

Wie bereits in den vorigen Abschnitten erwähnt, unterliegen Batterien jederzeit, sowohl während der Standzeiten als auch im Betrieb, diversen Degradationsmechanismen, wie beispielsweise Nebenreaktionen mit dem Elektrolyten oder irreversiblen Strukturänderungen. Die wesentlichen Treiber für diese Prozesse sind die Batterietemperatur  $T$ , der Ladezustand  $SOC$  beziehungsweise die Spannung, sowie die Stromstärke und die Zyklen-tiefe  $\Delta SOC$ .

So beschleunigt zum Beispiel eine erhöhte Temperatur das Wachstum einer Deckschicht auf der Anode (solid electrolyte interface, SEI), welche mit Lithiumverlust und somit dem Rückgang der Batteriekapazität einhergeht. Des Weiteren kann die während des Zyklisierens an der Anode auftretende Volumenänderung zu strukturellen Veränderungen und somit zu mechanischem Stress führen, welcher Brüche im Aktivmaterial und damit wiederum irreversiblen Kapazitätsverlust verursachen kann (Vetter et al., 2005). An der Kathode können strukturelle Änderungen, chemische Zersetzung und Auflösung zu Kapazitätsverlust führen. Ein Abbau des Aktivmaterials an der positiven Elektrode hängt unter anderem vom Ladezustand ab.

Die Belastung der Zelle durch Strom und Spannung während der Zyklisierung werden in der elektrischen Leistung zusammengefasst und über die Zeit der Belastung hinweg als Energiedurchsatz im hier verwendeten Modellansatz berücksichtigt. Ein ähnliches Vorgehen, ohne Berücksichtigung der Batteriespannung, ist in Referenz Wang et al. (2011) beschrieben. Die Abhängigkeit von der Temperatur wird analog zum kalendarischen Modell mit dem Arrhenius-Ansatz abgebildet.

Daher ergibt sich für die betriebsbedingte Alterung bei erhöhten Temperaturen  $A_{\text{bHT}}$  in zeitdiskreter Nomenklatur ein Alterungsinkrement  $dA_{\text{bHT}}[k]$  im Zeitschritt  $k \in \mathbb{N}$  mit dem Ansatz

$$dA_{\text{bHT}}[k] := K \cdot e^{\left(\frac{-E_{\text{A,HT}}}{R \cdot T[k]}\right)} \cdot \alpha_{\text{HT}} \cdot E[k]^{\left(\alpha_{\text{HT}}-1\right)} \cdot dE[k].$$

In der gezeigten Gleichung bezeichnet  $K$  einen skalaren Vorfaktor,  $E_{\text{A,HT}}$  die Aktivierungsenergie und  $\alpha_{\text{A,HT}}$  den exponentiellen Faktor des Energiedurchsatzes  $E[k]$ .

Wie zu Beginn des Abschnitts 3.2.2 erwähnt, wird angenommen, dass sich kalendarische und betriebsbedingte Alterung überlagern. Aus diesem Grund wird die kalendarische Alterung per Simulation aus den Messdaten der in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Zykluslebensdauertests heraus gerechnet, bevor diese Daten für die Optimierung des Parametervektors

$$\boldsymbol{\theta}_{\text{bHT}} = [K, E_{\text{A,HT}}, \alpha_{\text{HT}}],$$

des Modells der betriebsbedingten Batteriealterung bei erhöhten Temperaturen verwendet werden.

### Mathematische Modellierung der betriebsbedingten Alterung durch Lithium-Plating

Für die Simulation von Alterungseffekten durch Lithium-Plating wird das Alterungsmodell um ein zusätzliches Submodell ergänzt. In zeitdiskreter Nomenklatur wurde für ein platingbedingtes Alterungsinkrement  $dA_{\text{plating}}[k]$  im Zeitschritt  $k \in \mathbb{N}$  die Modellfunktion

$$dA_{\text{pla}}[k] := K \cdot f_1(I[k]) \cdot f_2(T[k]) \cdot f_3(SOC[k]) \cdot \alpha_p \cdot Q_{\text{lad}}[k]^{\left(\alpha_p-1\right)} \cdot dQ_{\text{lad}}[k]$$

festgelegt, wobei durch

$$f_1(I[k]) := \left( \arctan \left( \frac{I_{\text{lad}}[k]}{C_N \cdot D_{I0}} \right) \right)^\beta,$$

$$f_2(T[k]) = \exp \left( - \frac{E_{\text{A,p}}}{R \cdot T[k]} \right)$$

und

$$f_3(SOC[k]) := \left( \frac{1}{1 + \exp \left( - \frac{SOC[k] - SOC_{\text{th}}}{\Delta SOC_{\text{tr}}} \right)} \right)^{\alpha_p}$$

die Strom-, die Temperatur sowie die Ladezustandsabhängigkeit des Lithium-Platings beschrieben wird.  $K$  bezeichnet einen im Rahmen von Parametrierungsmessungen bestimmten Vorfaktor.

## Das differentielle Inkrement

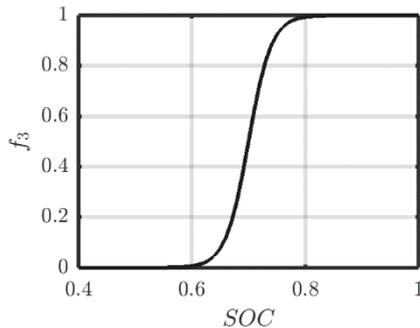
$$dQ_{\text{lad}}[k] = \begin{cases} dQ(t_k), & \text{für } I(t_k) > 0 \\ 0, & \text{für } I(t_k) \leq 0 \end{cases}$$

gibt für jeden Zeitschritt die eingebrachte Ladung an. Entladeströme müssen dabei nicht berücksichtigt werden, da Lithium-Plating ausschließlich beim Beladen der Graphitanode auftritt. Der exponentielle Faktor  $\alpha_p$  dient zur Modellierung der Auswirkung einer bereits bestehenden Voralterung zum Zeitpunkt  $t_k$ . Eine Belegung mit dem Wert  $\alpha = 0,5$  entspricht einem wurzelförmigen Verlauf der Degradation, wie es bei klassischem Schichtdickenwachstum zu erwarten ist (Peled, 1979). In der Realität werden durch Überlagerung verschiedener Prozesse und Effekte höhere Werte für  $\alpha$  erwartet.

Hinsichtlich der Stromabhängigkeit erweist sich der Ansatz über den Arkustangens als zielführend. Hohe Ladeströme  $I_{\text{lad}} [k]$  sind im für Lithium-Plating relevanten Ladezustandsbereich ein treibender Faktor für die metallische Lithium-Abscheidung, welche durch eine Limitation der Elektrodenkinetik bei hohen Ladezuständen und niedrigen Temperaturen maßgeblich gefördert wird. In  $f_1(I)$  stellt  $C_N$  die Nennkapazität der Batterie dar, während  $D_{10}$  und der exponentielle Faktor  $\beta$  Modellparameter sind, deren Werte anhand der von Laresgoiti et al. im Jahr 2015 veröffentlichten Daten geschätzt werden (Laresgoiti et al., 2015). In Anlehnung an gängige empirische Modelle wird der Temperatureinfluss  $f_2(T)$  auf das Lithium-Plating über einen Arrhenius-Ansatz mit negativer Aktivierungsenergie  $E_{A,p} < 0$  modelliert (Bauer et al., 2015 und Waldmann et al., 2014).

Bezüglich des Ladezustandes ist anhand von Ergebnissen aus den Dilatometriemessungen, sowie diversen Literaturdaten, ein Einsetzen von Lithium-Plating oberhalb eines gewissen Schwellwertes zu erwarten (Laresgoiti et al., 2015; Schuster et al., 2015; Bauer et al., 2015). Über die Funktion  $f_3$  wird hierbei das Einsetzkriterium für Lithium-Plating bei hohen Ladezuständen modelliert, wobei durch  $\Delta SOC_{tr}$  die positive  $SOC$ -Abweichung vom Einsetzpunkt  $SOC_{th}$  angegeben ist, bei der das Plating bereits auf einen Faktor von  $\frac{1}{1+e^{-1}} = 73\%$  der vollen Plating-Aktivität ansteigt. Der Einsetzpunkt für Plating wurde im Abgleich der Daten, sowie der im Rahmen des Projektes ermittelten Dilatometriedaten auf  $SOC_{th} \approx 0,7$  festgelegt (Laresgoiti et al., 2015). Auf Grundlage verschiedener Untersuchungen muss von einem schmalen Übergangsbereich (abruptes Einsetzverhalten) des Lithium-Platings ausgegangen werden, weshalb im Simulationsmodell ein Wert von  $\Delta SOC_{tr} = 0,02$  verwendet wird (Laresgoiti et al., 2015; Schuster et al., 2015; Bauer et al., 2015). Abbildung 33 zeigt das resultierende Modell des Einsetzverhaltens der Plating-Aktivität  $f_3$  über dem Ladezustand  $SOC$ .

Wie in Laresgoiti et al. (2015) gezeigt, ist der durch Plating verursachte Kapazitätsverlust im Bereich oberhalb des Einsetzpunktes nahezu unabhängig vom Ladezustand.

Abbildung 33: Plating-Aktivität  $f_3$  (SOC) normiert auf die maximale Aktivität bei SOC = 1

Hinweis: In der Abbildung handelt es sich bei dem Punkt um ein Dezimaltrennzeichen.

Zusammengefasst ergibt sich der nachfolgende Parametersatz für das Plating-Modell

$$\theta_{\text{pla}} = [K, D_{10}, \beta, E_{A,p}, SOC_{\text{th}}, \Delta SOC_{\text{tr}}, \alpha_p],$$

wobei aufgrund der Vorfestlegungen für  $SOC_{\text{th}}$ ,  $\Delta SOC_{\text{tr}}$ ,  $D_{10}$  und  $\beta$  lediglich drei Parameter zu bestimmen sind. Dies wird anhand geeigneter Messungen und mit Hilfe eines Kleinst-Quadrat-Parameterschätzers durchgeführt und die resultierenden Werte in das Simulationsmodell der Batteriealterung eingepflegt.

### 3.2.3 Batteriekostenstudie

Als Grundlage für die Abschätzung der Batteriekosten dienen verschiedene, möglichst aktuelle Literaturquellen (meist ab 2013), die hinsichtlich der folgenden Fragestellung ausgewertet wurden: Wie entwickeln sich die Batteriekosten auf Zell- und Systemebene für verschiedene Lithium-Ionen-Technologien, Zellformate und Leistung-Energie-Raten? Der zeitliche Untersuchungsrahmen wird dabei auf einen Zeitraum von 2013/2014 (Istzustand) bis 2025 (zukünftige Entwicklung) eingegrenzt.

Der Fokus der Literatursauswertung liegt auf Batteriesystemen, die in rein batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV: Battery Electric Vehicle) eingesetzt werden. Batterien, die für den Einsatz in Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen (PHEV: Plugin Hybrid Electric Vehicle) in Frage kommen, werden nur hinsichtlich der Leistung-Energie-Raten in die Analyse mit einbezogen, da diese sich für reine batterieelektrische Fahrzeuge und Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge deutlich unterscheiden.

Für die Abschätzung der Batteriekosten konnten viele verschiedene Quellen identifiziert werden, die sich nicht nur hinsichtlich der Detailtiefe unterscheiden, sondern auch in der Methode der Datenerhebung zu den Kosten. Die betrachteten Quellen lassen sich dabei in folgende drei Kategorien einteilen:

1. Studien von Batterieforschungsprogrammen, wissenschaftlichen Instituten, öffentlichen Einrichtungen und Industrieverbänden wie RECHARGE (RECHARGE 2013), der Cambridge Econometrics (CE et al., 2013), der Internationalen Energieagentur IEA (IEA, 2013), des U.S. Department of Energy DOE (Boyd, 2013);

Howell, 2012 und DOE, 2014) und der National Academy of Sciences (NAS et al., 2013). Sowohl Cambridge Econometrics als auch das DOE verwenden einen Bottom-Up-Ansatz, d.h. ausgehend von der Anwendung werden mit Hilfe eines Modells basierend auf detaillierten Inputdaten zu verschiedenen Technologien und Herstellungsverfahren Batteriezellen und -packs design und die Produktionskosten abgeleitet (näheres zu dem Bottom-Up Ansatz siehe Cluzel und Douglas, 2012). DOE verwendet kein eigenes Modell, sondern greift auf das BatPac-Modell des Argonne Instituts zurück (Nelson et al., 2012).

2. Studien und Arbeiten von Beratungsunternehmen und Finanzinstituten wie TIAX (Rempel et al., 2013), Avicenne (Pillot, 2014 und Pillot, 2013), Navigant Research (Navigant Research, 2013), Visual Capitalist (Desjardins, 2014), UBS (Humel et al., 2014), Advanced Automotive Batteries (Anderman, 2014a; Anderman, 2014b; Anderman, 2013), Horváth & Partners (Horváth & Partners, 2014), Bloomberg (Bloomberg, 2013), Lux Research (Frankel, 2014), Kienbaum (Kienbaum, 2014), McKinsey (McKinsey, 2014) und Applied Solar Expertise (Hoffmann, 2014). Einige dieser Studien beziehen die Annahmen für ihre Szenarien auf verschiedene Quellen oder verwenden einen Top-Down-Ansatz. Bei diesem Ansatz wird von einem Startreferenzjahr zu einem definierten Referenzpreis eine Lernrate, die z.B. aus historischen Daten der 18650er-Zellen oder aus einer Industriebefragung abgeleitet wurde, angewandt, um die zukünftige Kostenentwicklung von Elektrofahrzeugbatterien abzuschätzen. In vielen dieser Studien wurden auch Experteninterviews mit Batterieherstellern, -zulieferern und Wissenschaftlern durchgeführt. Andere Studien leiten ihre Ergebnisse aus der Expertise von einzelnen Batterieexperten ab, die sowohl einen guten Einblick in die Pläne der größeren Autohersteller und der wesentlichen Batterie- und Zellproduzenten haben, als auch die Entwicklung der regionalen Batteriemärkte weltweit kennen. Anzumerken bei dieser Kategorie von Studien ist, dass aufgrund der sehr hohen Bezugskosten nur einzelne Studien im Detail auswertbar waren. Alternativ wurden dann die Informationen aus den kostenlosen Zusammenfassungen der Studien abgeleitet.
3. Aussagen und Abschätzungen von führenden Managern aus der Automobilindustrie (Stadler, 2014; Kroeger, 2014; Winterkorn, 2014), die zwar eine geringe Detailtiefe aufweisen, aber trotzdem den zukünftigen Trend bei der Entwicklung der Batteriekosten aufweisen können.

Es wurden für die Ableitung einer möglichen Kostenentwicklung von Elektrofahrzeugbatterien die Studien aller drei obengenannten Kategorien ausgewertet. Hinsichtlich der Kostenentwicklung für verschiedene Lithium Technologien, Zellformate und Leistung-Energieraten wurden nur die Studien der beiden ersten Kategorien einbezogen.

### 3.3 Netzintegrationsmanagement

(F. Gromann, F. Becht, F. Winkelmann, K. Strunz)

Der folgende Abschnitt beschreibt die Integration kommerzieller Elektrofahrzeuge (EV) in das elektrische Energiesystem. Im Hinblick auf mögliche Synergieeffekte wird die Rolle von EV im elektrischen Energiesystem betrachtet. Im besten Fall führt dies zu einem stabileren Netzbetrieb, zur Entlastung der Verteilnetze und zur Steigerung der EV-Wirtschaftlichkeit.

Hierfür wird eine Methode für die Teilnahme von EV an den deutschen Energiemärkten entwickelt. In Abhängigkeit technischer und ökonomischer Randbedingungen wird im betrachteten Zeitraum jeden Tag eine Ladestrategie für den Folgetag berechnet.

Die Ladestrategie betrachtet die zeitliche Dimension der Beschaffung von Energie zur Deckung des mobilen Energiebedarfs und die Bereitstellung von netzdienlichen Anwendungen beziehungsweise Systemdienstleistungen (SDL). Die Minimierung der Energiebezugskosten und die Maximierung der Einnahmen durch die Bereitstellung von SDL stehen im Vordergrund.

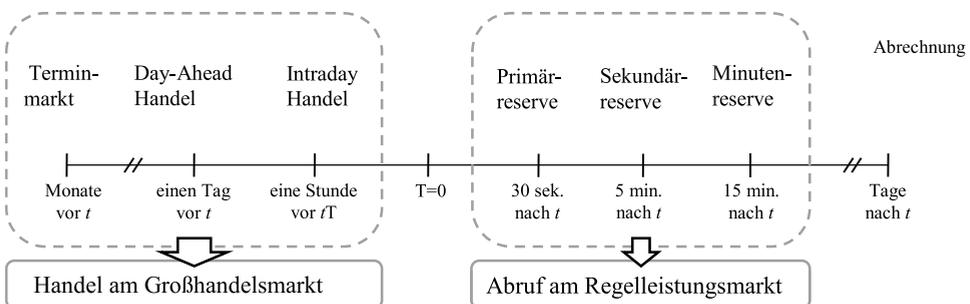
Sowohl die thermische Belastbarkeit von Betriebsmitteln als auch die Einhaltung des Spannungsbandes begrenzen die Integration von EV in heutige Verteilnetze. Zur Ermittlung der maximal möglichen EV-Durchdringung wird die Methode der Grenzkurvenanalyse Gwisdorf (2015) angewendet. Ziel ist es, typische Verteilnetze in Abhängigkeit der EV-Durchdringung zu analysieren und anschließend zu bewerten.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Methoden erläutert und in Kapitel 4.3 folgen die ökonomische und technische Auswertung bezüglich der Teilnahme von EV an den Energiemärkten und die Analyse von typischen Verteilnetzen.

### 3.3.1 Übersicht potentieller Märkte für EV im Energiesystem

Im Jahr 2014 betrug der Nettoenergiebedarf rund 511 TWh (AGEB, 2014). Der Strommarkt dient als Handelsplattform für das Angebot und die Nachfrage an elektrischer Energie. Dieser ist unterteilt in Großhandels- und Regelleistungsmarkt, dargestellt in Abbildung 34.

Abbildung 34: Übersicht des deutschen Strommarktes und Zeitpunkte  $t$  für den Handel und des Abrufs vor und nach der physikalischen Erfüllung bei  $t = 0$ .



Der Großhandelsmarkt deckt den prognostizierten Energiebedarf der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB). Zum Ausgleich von unerwarteten Leistungsschwankungen im Stromnetz wird Regelleistung (auch Regelenergie genannt) eingesetzt, welche am Regelleistungsmarkt gehandelt wird. Die Ausschreibung und der Abruf erfolgen über den ÜNB.

Am Großhandelsmarkt wird je nach Vertragslaufzeit und Vertragsabschluss zwischen drei verschiedenen Märkten unterschieden. Der Spotmarkt, oder auch Terminmarkt, beinhaltet Kontrakte mit Laufzeiten von mehreren Monaten bis zu sieben Jahren. Beim Day-Ahead-Handel erfolgt der Vertragsabschluss zwölf Stunden und beim Intraday-Handel bis zu 30 Minuten vor der Bereitstellung.

Die Preisbildung für den Day-Ahead-Handel erfolgt nach der Merit-Order mit einem markträumenden Preis. In der Regel werden jeweils volle Stunden gehandelt. Für den Folgetag werden Preiskurven für die nächsten 24 Stunden gebildet, von 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr. Die Mindestmenge, die gehandelt werden muss, beträgt 0,1 MW. In Abbildung 40 ist das Verteilungsdiagramm (Boxplot) der Preiskurven für das Jahr 2014 dargestellt. Ein Überblick der durchschnittlich gehandelten Preise am Day-Ahead-Markt für das Jahr 2014 ist in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Day-Ahead Marktdaten für das Jahr 2014.

	2014 (€/MWh)			
	Ø	median	min	max
<b>Day-Ahead</b>	32,76	33,20	-65,03	87,97

Quelle: EEX, 2014, eigene Berechnung

Im Jahr 2014 wurden für 64 Stunden negative Strompreise gehandelt. Eine Erklärung der negativen Strompreise liefert die Inflexibilität konventioneller Kraftwerke und die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, die in Summe zu einem Stromüberschuss und zu negativen Preisen geführt hat (Agora, 2014).

Der Regelleistungsmarkt dient dem Ausgleich von Prognosefehlern nach  $t$ , dargestellt in Abbildung 34. Ein Abruf von Regelleistung trägt dazu bei, die Netzfrequenz konstant zu halten, indem die Leistungsbilanz ausgeglichen wird. Es erfolgt eine Unterscheidung zwischen der Primärreserve, der Sekundärreserve und der Minutenreserve.

Die Erbringung der jeweiligen Reserveart bedarf einer Zulassung oder Präqualifikation. Dies ist für die Teilnahme am Ausschreibungsverfahren Voraussetzung. Grundlage ist der Anhang D im Transmission Code (TransmissionCode, 2007). Der Anbieter muss

- (i) die technische Kompetenz,
- (ii) die ordnungsgemäße Erbringung unter betrieblichen Bedingungen und
- (iii) seine wirtschaftliche Leistungsfähigkeit

nachweisen.

Die Preisbildung am Regelenenergiemarkt erfolgt nach dem Pay-as-Bid-Verfahren. Dabei wird zwischen Leistungs- und Arbeitspreis unterschieden. Vergütet werden der Leistungspreis für das Vorhalten und der Arbeitspreis bei einem tatsächlichen physikalischen Abruf. Ein präqualifizierter Anbieter kann für eine Reserveart je ein Gebot für den Leistungs- und für den Arbeitspreis abgeben. Das Zuschlagskriterium für die Teilnahme ist der Leistungspreis und ein Abruf erfolgt nach aufsteigender Reihenfolge der jeweils gebotenen Arbeitspreise.

Bei der Sekundär- und der Minutenreserve kann sowohl positive als auch negative Regelleistung bereitgestellt werden. Der ÜNB benötigt negative Regelleistung, wenn zum Zeitpunkt  $t$  ein Leistungsüberschuss und positive Regelleistung, wenn ein Leistungsdefizit im System vorliegt.

Der Ausschreibungszeitraum der Sekundärreserve erfolgt wöchentlich, unterteilt in zwei Zeitscheiben, dem Hochtarif (HT) und dem Niedertarif (NT). Die Mindestangebotsgröße beträgt 5MW und die schrittweise Erhöhung 1MW. Erfolgt ein Abruf von Sekundärreserve durch den ÜNB muss die abgerufene Leistung innerhalb von 5min vollständig aktivierbar sein. Weiter besteht die Möglichkeit, die Mindestangebotsgröße durch das so genannte „Poolen“ (Zusammenführen) von technischen Einheiten zu erreichen. Dies gilt nicht nur für die Sekundärreserve, sondern für alle Reservearten. In Tabelle 18 sind die wichtigsten Marktdaten der Sekundärreserve dargestellt.

Die angegebenen Marktdaten beschreiben das arithmetische Mittel des Jahres 2014. Hierzu wurden die Werte jedes Ausschreibungszeitraums ermittelt und der Durchschnitt dieser angegeben. Da eine Überbewertung einmalig erzielter Preise dadurch vermieden wird, ermöglicht diese Darstellung eine realistischere Markt Betrachtung. Die angegebenen Leistungspreise beziehen sich auf alle Gebote mit einem Zuschlag, also solche Gebote mit einer Vergütung für das Zurückhalten der gebotenen Leistung. Die Arbeitspreise beziehen sich auf die physikalischen Abrufe und beinhalten alle durch das Liefern von Energie entstandenen Zahlungen. Das arithmetische Mittel und der Median bilden demnach einen Durchschnitt der Preise aller vergüteten Abrufe.

Die Diskrepanz des arithmetischen Mittels und des Median ist beim Leistungspreis für negative Sekundärreserve aufgrund der vergleichsweise hohen Ausreißer besonders hoch. Auffällig ist jedoch der Unterschied der Leistungspreise im Haupt- und Niedertarif. Dabei übersteigen von 20–8 Uhr die Leistungspreise jene von 8–20 Uhr um mehr als das 1,5-fache. Bei Geboten negativer Sekundärreserve werden im Vergleich zur positiven Sekundärreserve negative Arbeitspreise erzielt. Der Anbieter muss im Falle eines Abrufes für die Entnahme von Energie den ÜNB vergüten.

Die Minutenreserve wird täglich ausgeschrieben und ist in sechs Zeitscheiben zu je vier Stunden unterteilt. Die Mindestangebotsgröße und die schrittweise Erhöhung beträgt 1 MW. Die Zeit zur vollständigen Aktivierung der Minutenreserve beträgt 15 min. Die wichtigsten Marktdaten der Minutenreserve sind in Tabelle 19 dargestellt. Analog zur Sekundärreserve handelt es sich bei den angegebenen Werten um die arithmetischen Mittel des Jahres 2014.

Im Vergleich zur Sekundärreserve fällt die Vergütung für das Zurückhalten von positiver und negativer Regelleistung um ein Vielfaches geringer aus. So wird die Bereitstellung von zwölf Stunden positiver Minutenreserve im Durchschnitt mit maximal 9,60 €/MW vergütet. Die Bereitstellung positiver Sekundärreserve für den gleichen Zeitraum wird hingegen im Durchschnitt mit mindestens 468 €/MW vergütet. Ein Gebot am Markt für Minutenreserve erzielt hingegen im Durchschnitt bei einem Abruf einen höheren Preis als ein Gebot am Markt für Sekundärreserve. Bei der Betrachtung der Arbeitspreise spielt jedoch für einen Anbieter die Abrufwahrscheinlichkeit ebenfalls eine große Rolle. Diese liegt bei der Sekundärreserve im Durchschnitt bei mindestens 21,1 %. Bei der Minutenreserve erhalten im Durchschnitt nur maximal 7,2 % der Gebote mindestens einen Abruf. Ein Gebot am Markt für Sekundärreserve wird demzufolge im Durchschnitt geringer vergütet, jedoch können aufgrund der höheren Abrufwahrscheinlichkeit mehr Abrufe erwarten werden.

Tabelle 18: Marktdaten der Sekundärreserve für das Jahr 2014

		Zeitscheiben (h)		
		HT	NT	
		8–20	20–8	
<b>Anzahl Gebote</b>	pos.	158	166	
	neg.	203	184	
<b>Zuschlag Wkt. (%)</b>	pos.	100	100	
	neg.	100	100	
<b>Abruf Wkt. (%)</b>	pos.	28,1	21,1	
	neg.	38,6	40,3	
<b>Leistungspreis (€/MW)</b>	pos.	Ø	468,0	807,0
		med	439,8	754,2
		min	343,9	603,4
		max	578,5	968,1
	neg.	Ø	348,1	529,5
		med	261,1	435,7
		min	160,3	301,4
		max	512,7	597,8
<b>Arbeitspreis (€/MWh)</b>	pos.	Ø	64,5	61,5
		med	65,3	61,9
		min	57,7	56,5
		max	336,5	248,6
	neg.	Ø	-5,4	3,0
		med	-5,7	3,6
		min	-11,5	-5,4
		max	611,6	662,4

Quelle: 50Hertz, 2015, eigene Berechnung

Anmerkung: Vergütet der ÜNB die Bereitstellung und den Abruf von Regelenergie ist der Arbeits- und Leistungspreis positiv dargestellt. Bei negativen Preisen ist es umgekehrt.

Der mobile Energiebedarf wird in den folgenden Anwendungen über den Day-Ahead-Markt gedeckt. Ein Lastmanagement bietet die Möglichkeit von schwankenden Strombezugspreisen am Day-Ahead-Markt zu profitieren und in Zeiten mit niedrigen Börsenpreisen zu laden. Zur Erbringung von SDL werden die Sekundärregelleistung und die Minutenreserve betrachtet.

Die Sekundärregelleistung hat gegenüber der Minutenreserve den Vorteil von höheren Leistungspreisen und einer höheren Abrufwahrscheinlichkeit. Diese führt zu mehr Abrufen und dadurch zu einer häufigeren Zahlung des gebotenen Arbeitspreises. Die Vorteile der Minutenreserve liegen in höheren Arbeitspreisen, wodurch im Falle eines Abrufs höhere Einnahmen erzielt werden, und den kürzeren Zeitscheiben von vier Stunden. Dadurch muss weniger Energie für das Bieten am Regelleistungsmarkt zurückgehalten werden, was eine kleinere Mindestgröße des Fuhrparks zur Folge hat. Im Folgenden wird die Annahme getroffen, dass ein Gebot bereits einen Zuschlag erhalten hat.

Dadurch ist der Vorteil einer hundertprozentigen Zuschlagswahrscheinlichkeit bei der Sekundärreserve hier zu vernachlässigen. Weitere potentielle Einsatzgebiete für EV zur Bereitstellung netzdienlicher Anwendungen könnten zum Beispiel die (i) Bereitstellung von Blindleistung zur Spannungshaltung oder (ii) das Spitzenlastmanagement beziehungsweise die Lastglättung sein. Für diese Anwendungsfälle gibt es derzeit keine Vergütungsmechanismen. Ein CO<sub>2</sub>-neutrales Laden kann durch die Eigenverbrauchsoptimierung garantiert werden. Dabei werden Synergien zwischen eigenen Solaranlagen und den EV ausgenutzt.

Tabelle 19: Marktdaten der Minutenreserve für das Jahr 2014

		Zeitscheiben (h)						
		0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24	
<b>Anzahl Gebote</b>	pos.	372	341	339	345	337	332	
	neg.	428	432	417	421	415	451	
<b>Zuschlag Wkt. (%)</b>	pos.	58,8	63,3	66,2	66,2	67,6	66,6	
	neg.	61,4	59,8	62,3	62,1	62,2	58,2	
<b>Abruf-Wkt. (%)</b>	pos.	1,2	1,3	6,4	5,2	4,7	2,9	
	neg.	1,3	2,9	5,1	7,2	5,2	1,8	
<b>Leistungspreis (€/MW)</b>	pos.	Ø	0,2	1,1	3,3	2,2	3,8	2,5
		med	0,2	1,0	3,2	2,2	3,8	2,5
		min	0,0	0,2	0,8	0,4	0,9	0,5
		max	0,3	1,7	5,0	3,5	5,9	3,8
	neg.	Ø	25,1	23,6	12,9	16,1	12,1	10,7
		med	23,0	21,6	11,6	14,5	10,8	9,3
		min	8,2	7,4	3,6	4,3	3,4	2,6
		max	31,3	29,7	18,0	22,5	16,8	13,8
<b>Arbeitspreis (€/MWh)</b>	pos.	Ø	105,7	131,9	167,1	156,8	158,0	159,5
		med	98,9	136,8	154,7	143,6	159,2	153,2
		min	73,7	91,0	106,6	103,7	105,1	105,3
		max	126,2	171,1	273,5	223,1	228,1	197,7
	neg.	Ø	32,7	42,1	34,9	39,0	31,9	29,7
		med	38,3	34,3	29,2	30,8	24,3	30,8
		min	12,0	9,3	6,4	-0,8	-9,7	-23,3
		max	50,9	57,6	65,6	80,6	97,7	61,5

Quelle: 50Hertz, 2015, eigene Berechnung

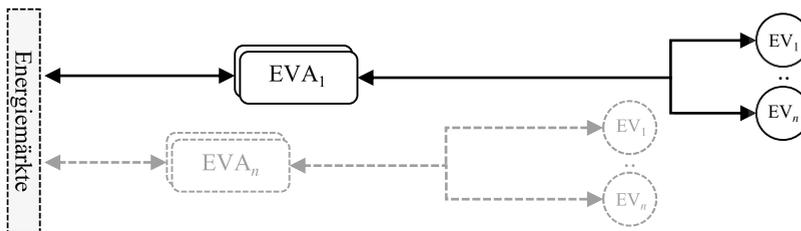
### 3.3.2 Management von EV-Flotten

Die Teilnahme einzelner EV am Energiemarkt schließt sich aufgrund von marktspezifischen Kriterien aus. Dies sind beispielsweise die Mindestangebotsgröße beim Day-Ahead-Handel sowie bei der Sekundär- und Minutenreserve. Um dennoch eine Teilnahme zu ermöglichen, werden einzelne EV zu größeren Einheiten, einer EV-Flotte, zusammengefasst. Der Elektrofahrzeug Aggregator (EVA) bildet die Schnittstelle zum Energiemarkt und koordiniert das tatsächliche Ladeverhalten einzelner EV. Ein solches Konzept ist in

Abbildung 35 abgebildet und beschreibt eine hierarchische Steuerungs-architektur für EV nach Raab (2011).

Weiter werden die EV hinsichtlich technischer und nutzerspezifischer Eigenschaften beziehungsweise Nebenbedingungen unterschieden. Wobei EV mit vergleichbaren Eigenschaften zu EV-Flotten zusammengefasst und einem EVA zugeordnet werden. Der EVA formuliert wiederum allgemeine Zielstellungen für die EV-Flotte unter Berücksichtigung gewisser Randbedingungen der Energiemärkte und der EV-Nutzer. Im Vordergrund stehen der optimale Einsatz der EV-Flotten und die Gewährleistung von Mobilität.

Abbildung 35: Konzept der hierarchischen Steuerung zur Teilnahme von EV am Energiemarkt



### 3.3.3 Methode des EV-Flottenmanagements

Ausgehend von dem Konzept der hierarchischen Steuerungsarchitektur für EV wurde eine Methode für den EVA zur Prognose und zur Koordination des Ladeverhaltens entwickelt, dargestellt in Abbildung 36. Die Prognose des Ladeverhaltens wird mit Hilfe der EV-Flottenoptimierung realisiert und berücksichtigt das Mobilitätsverhalten der EV-Nutzer, variable Strompreise am Energiemarkt und die Bereitstellung von NDL. Mit Hilfe des prognostizierten Ladeverhaltens erfolgt die Koordination des tatsächlichen Ladeverhaltens der einzelnen EV. Die wichtigsten Aspekte, die dabei berücksichtigt werden, sind:

- die Übereinstimmung des prognostizierten mit dem tatsächlichen Ladeverhalten,
- eine einfache Kommunikation zur Steuerung des Ladeverhaltens der EV innerhalb der Flotte,
- eine möglichst uneingeschränkte mobile Nutzung der EV beziehungsweise keine Einschränkung an die Mobilität des Nutzers.

Die EV-Flottenoptimierung basiert auf einem statistischen Ansatz auf der Basis des mobilen Verhaltens eines durchschnittlichen EV-Flottenmodells. Im Gegensatz zu einem deterministischen Ansatz erfordert dieser Ansatz nicht die Kenntnis des exakten Mobilitätsverhaltens der Einzelfahrzeuge, das heißt die gefahrene Strecke sowie die Anfangs- und Endzeit einer Fahrt. Auch der Informationsaustausch, welcher fortlaufend zwischen den Einzelfahrzeugen und einer zentralen Steuereinheit erfolgen müsste, lässt sich so vermeiden oder zumindest reduzieren. Einschränkung an den Nutzer, wie zum Beispiel das Laden der Batterie in einer festgelegten Zeit, ist durch diesen Ansatz ausgeschlossen.

Für den statistischen Ansatz ist eine Vermessung der betrachteten EV-Flotte beziehungsweise der einzelnen EV über einen längeren Zeitraum notwendig. Von den aufgezeichneten Daten können Informationen über typische Weglängen, Anfangs- und Endzeiten von Fahrten, sowie Standzeiten abgeleitet werden, um daraus das durchschnittliche Fahrverhalten abzubilden. Mit steigender Anzahl an EV innerhalb der Flotte verstetigt sich das Fahrverhalten. Die Verstetigung ist die Folge des stochastischen Fahrverhaltens der Einzelfahrzeuge, die sich untereinander ausgleichen. Die Methode setzt eine Mindestanzahl an EV innerhalb der Flotte voraus, um die Stochastik der Einzelprofile zu vernachlässigen. Für weiterführende Informationen sei auf Raab und Gromann (2015) verwiesen.

Die EV-Flottenoptimierung eines Ladeprofils erfolgt hinsichtlich einer Zielfunktion und unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen. Ein Überblick über mögliche Zielfunktionen sowie technische und nutzerspezifische Nebenbedingungen ist in der Tabelle 20 dargestellt. Für die Optimierung wird das durchschnittliche EV-Flottenmodell verwendet, um daraus das durchschnittliche Ladeprofil  $P_{\text{avg}}$  sowie das zugehörige Energiezustandsprofil des aggregierten Speichers<sup>6</sup>  $SoE_{\text{avg}}$  (engl. State of Energy) der EV-Flotte zu prognostizieren. Die Profile werden zu Beginn des Folgetages jedem Fahrzeug innerhalb der EV-Flotte übermittelt und steuern deren Ladeverhalten. Die Ladeleistung zum Zeitpunkt  $t$  eines Einzelfahrzeugs ist variabel und im Wesentlichen vom  $SoE_{\text{avg}}$ , vom Energiezustandsprofil  $SoE_{\text{ev},n}$  des Einzelfahrzeugs  $n$  und vom durchschnittlichen Ladeprofil  $P_{\text{avg}}$  abhängig.

Ordnet der ÜNB den Abruf von Regelleistung an, werden die Profile  $P_{\text{avg}}$  und  $SoE_{\text{avg}}$  neu berechnet und wiederum an die einzelnen Fahrzeuge übermittelt. Hierfür ist es notwendig, mögliche Abrufe in den Nebenbedingungen der EV-Flottenoptimierung mit aufzunehmen und die entsprechende aggregierte Ladeleistung<sup>7</sup>, sowie die Energie im aggregierten Speicher vorzuhalten. Für die Bereitstellung negativer Regelreserve muss ein Teil der Speicherkapazität, welche mindestens der maximal abrufbaren Energie entspricht in der aggregierten Batterie vorgehalten werden. Dies wird durch die Reduzierung des maximalen Energiegehalts  $SoE_{\text{max}}$  des aggregierten Speichers realisiert, dargestellt ist die Anpassung in Abbildung 37 in den Stunden 8 - 12 und 20 - 24, jeweils mit A gekennzeichnet.

Ein Abruf positiver Regelleistung kann durch das (i) Einspeisen von Energie aus den aggregierten Batterien in das öffentliche Netz (Rückspeisen) oder durch die (ii) Reduzierung der aggregierten Ladeleistung erfolgen. Für die Teilnahme mit positiver Reserveleistung nach (i) ist eine Erhöhung des  $SoE_{\text{min}}$  erforderlich, gekennzeichnet durch B in Abbildung 37 in den Stunden 4 - 8. Um im Falle eines Abrufs negativer oder positiver Regelleistung nach (i) die Bereitstellung der Leistung zu gewährleisten, muss die aggregierte Ladeleistung um den Betrag des möglichen Abrufs reduziert werden.

Wird positive Regelleistung nach (ii) realisiert, muss im entsprechenden Zeitintervall geladen werden. Leistung, die ursprünglich im Bilanzkreis fest eingeplant gewesen ist, wird vermindert und entspricht in der Leistungsbilanz des ÜNB dem Effekt der Einspeisung. Hierfür ist ebenfalls eine Erhöhung des  $SoE_{\text{min}}$  erforderlich. Dargestellt ist dieser Prozess durch C in Abbildung 37 in den Stunden 12–16 und 16–20.

---

<sup>6</sup> Der aggregierte Speicher wird aus der Summe der Einzelbatterien gebildet.

<sup>7</sup> Die Summe aus den Ladeleistungen der einzelnen EV.

Abbildung 36: Modell zur EV-Flottenoptimierung und Teilnahme am Reservemarkt

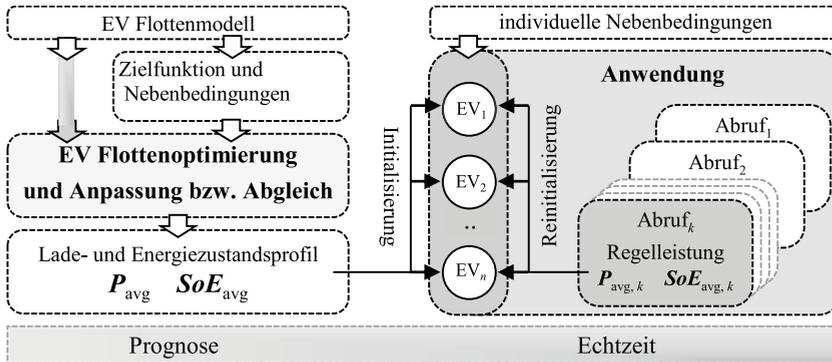
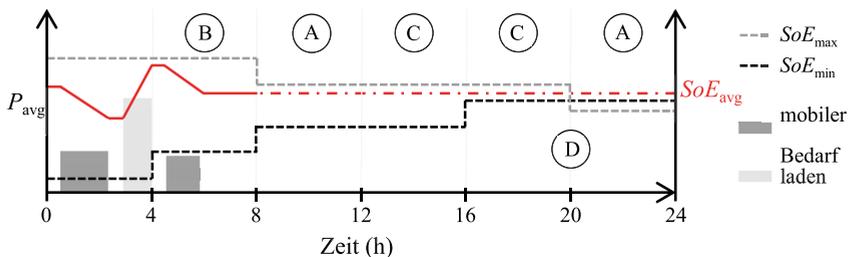


Tabelle 20: Technische und nutzerspezifische Nebenbedingungen und Zielfunktionen

	<b>Nebenbedingungen</b>	<b>Zielfunktion</b>
technisch	Maximale Ladeleistung	
	Ladewirkungsgrad	
	am Netz angeschlossen	
	Batteriekapazität	
EV-Nutzer	Mobilitätsbedarf (Tagesfahrleistung)	Minimierung der Ladekosten
	Mobilitätsverhalten (Start- und Endzeit der Fahrten)	Maximierung der Ladeenergie aus EE <sup>8</sup>
	Energiegehalt der Batterie zum Zeitpunkt t	Maximierung der Einnahmen aus NDL
	Unter- oder Überschreitung des Energiegehalts der Batterie	Minimierung der Batteriealterung
Energemarkt	Mindestangebotsgröße	
	Aktivierungszeit	

Abbildung 37: Anpassung der Nebenbedingungen für die Bereitstellung von Regelenergie



Wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben, gibt es unterschiedliche Reservearten, die wiederum in mehrere Zeitintervalle unterteilt sind. Eine Teilnahme am Reservemarkt kann grundsätzlich

<sup>8</sup> Erneuerbare Energien.

eine oder mehrere Reservearten und Zeitscheiben umfassen. Hierbei ist zu beachten, dass der  $SoE_{\min}$  stets kleiner als der  $SoE_{\max}$  sein muss. Findet eine Überschreitung dieser Grenze statt, dargestellt in Abbildung 37 in der Stunde 20, gekennzeichnet durch D, ist keine weitere Teilnahme am Reservemarkt möglich. Dies ist abhängig von der Flottengröße und der Kapazität, die am Reservemarkt bereitgestellt wird.

Der neue Lösungsraum für die EV-Flottenoptimierung befindet sich zwischen den angepassten Werten für den  $SoE_{\max}$  und  $SoE_{\min}$  sowie den angepassten maximalen Ladeleistungen für jeden Zeitschritt. Der Lösungsraum beschränkt den Verlauf des  $SoE_{\text{avg}}$  und beeinflusst dadurch auch das Ladeprofil  $P_{\text{avg}}$ . Zum besseren Verständnis ist das elektrische Laden in Abhängigkeit des mobilen Bedarfs in den Stunden 0 - 8 in Abbildung 37 dargestellt. Das Nachladen in den Stunden 3 - 4 ist bedingt durch einen niedrigen Energiepreis am Day-Ahead-Markt, durch den mobilen Bedarf nach Stunde vier und die Erhöhung des  $SoE_{\min}$  aufgrund der Teilnahme an positiver Regelreserve. Das Nachladen der EV ist notwendig, um das Unterschreiten des  $SoE_{\text{avg}}$  zu vermeiden.

### 3.3.4 Maßnahmen zur Flottenelektrifizierung

Zur Flottenelektrifizierung sind mehrere Schritte notwendig, die im Folgenden genauer erläutert werden. In den meisten Fällen entscheiden sich Nutzer oder Flottenbetreiber dazu, eine konventionelle Flotte beziehungsweise einzelne Fahrzeuge innerhalb einer Flotte zu elektrifizieren. Dabei ist es wichtig, das Fahrverhalten bestehender konventioneller Fahrzeuge über eine längere Zeit zu untersuchen. Daraus können Fahrprofile abgeleitet werden, die wiederum Elektrofahrzeugklassen zugeordnet werden können. Dieser Prozess ist notwendig, um anschließend die Fahrzeuge auszuwählen, die sich für eine Elektrifizierung eignen.

Mit Hilfe der technischen Eigenschaften der EV, der Ladeinfrastruktur und des untersuchten Fahrverhaltens können EV-Flottenmodelle abgeleitet werden. Nun kann die Auswahl und Definition einer Ladestrategie erfolgen. Vorab muss geklärt werden, nach welchen Gesichtspunkten die Ladestrategie erfolgen soll. Zum Beispiel kann eine Ladestrategie möglichst kostenoptimal erfolgen, das heißt die elektrische Energie für das Wiederbeladen der Fahrzeuge möglichst günstig am Energiemarkt einzukaufen. Gegebenenfalls können netzdienliche Anwendungen bereitgestellt werden, um zusätzliche Einnahmen zu generieren. Eine weitere Variante ist die Definition einer möglichst CO<sub>2</sub>-neutralen Ladestrategie, mit dem Fokus in entsprechenden Zeiten mit hoher erneuerbarer Erzeugungsleistung zu laden.

Bevor eine Ladestrategie auf eine Flotte angewendet werden kann, muss sichergestellt werden, dass die Flotte die regulatorischen Rahmenbedingungen und die technischen Nebenbedingungen erfüllen kann. Dieser Evaluierungsprozess muss solange erfolgen bis die Bedingungen erfüllt sind.

### 3.3.5 Methode der Grenzkurvenanalyse für Verteilnetze

Durch die Bildung von Grenzkurven können kritische Betriebspunkte identifiziert werden, die sich bei anliegender Last beziehungsweise Erzeugung in einem Netz einstellen. Eine Grenzkurve gibt Aufschluss darüber, ob für einen bestimmten Betriebspunkt im Netz eine

thermische Überbelastung der Betriebsmittel oder eine Über- beziehungsweise Unterschreitung des Spannungsbands vorliegt. Auf diese Weise kann die maximal mögliche Anzahl ladender beziehungsweise einspeisender EV in einem Netzabschnitt bestimmt werden. Diese Betrachtung gilt für den stationären Fall.

An den Netzwerkknoten wird dazu zusätzlich zur Grundlast die Last ladender EV hinzugefügt. Für die Grenzkurvenanalyse wird die Last nach und nach um jeweils ein Elektrofahrzeug erhöht, bis das Netz diese zusätzliche Last nicht mehr bewältigt. Die Überprüfung, ob das Netz überlastet ist, erfolgt mittels einer Lastflussberechnung. Die Kriterien einer Überlastung sind in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Grenzwerte zur Überlastungsprüfung des Netzes

Kriterium	Grenzwert
Spannungsband	0,92 p.u. < V < 1,1 p.u.
Leitungsauslastung	70 % von $S_{\max}$

Es spielt eine Rolle, auf welche Weise die EV auf die Netzwerkknoten verteilt werden. Betrachtet werden eine (i) homogene und eine (ii) punktuelle Verteilung, dargestellt in Abbildung 38. Beide Verteilungen stellen jeweils Extremfälle dar, wobei (i) in Bezug auf die Netzverträglichkeit der günstigere von beiden ist. Es ist davon auszugehen, dass sich in der Realität die EV im Zwischenbereich beider Möglichkeiten verteilen. Im Fall (i) werden die zusätzlichen EV gleichmäßig den Netzwerkknoten zugeteilt. Begonnen wird an dem Knoten, welcher der Ortsnetzstation (ONS) am nächsten ist. Kann das Netz weitere EV aufnehmen, wird mit dem zweitnächsten Knoten in aufsteigender Reihenfolge der Knoten fortgefahren. Bei (ii) werden alle EV einem Knoten zugeordnet. Dies wird für jeden Knoten wiederholt, sodass sich für jeden eine maximale Anzahl an EV ergibt, die das Netz bewältigen kann, wenn die zusätzliche Last nur an diesem einen Knoten angeschlossen wird. Für das gesamte Netz ergibt sich für (ii) die maximale Anzahl an EV aus dem Minimum aller Knoten, also der Worst-Case. Im Falle der Einspeisung von EV wird analog vorgegangen. Die Einspeisung ist als negative Last an den Netzwerkknoten simuliert.

Abbildung 39 zeigt ein Beispiel für eine Grenzkurve, bei der die installierbare Wirkleistung an den Netzwerkknoten über die Distanz zur ONS abgetragen ist. Die installierbare Wirkleistung ergibt sich aus der Lade- bzw. Einspeiseleistung aller EV im Netz. Für Betriebspunkte, die von den punktuellen Grenzkurven eingeschlossen sind, werden die netzseitigen Kriterien aus Tabelle 21 erfüllt. Im Zwischenbereich der punktuellen und homogenen Grenzkurve kann darüber keine Aussage getroffen werden, da sich die EV in der Realität weder vollständig homogen noch vollständig punktuell verteilen. Betriebspunkte außerhalb des von den homogenen Grenzkurven eingeschlossenen Bereichs führen zu Instabilitäten im Netz.

Abbildung 38: (i) homogene und (ii) punktuelle Verteilung von EV im Niederspannungsnetz

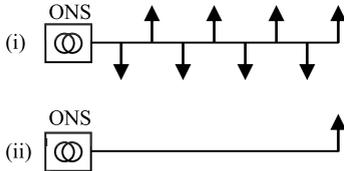
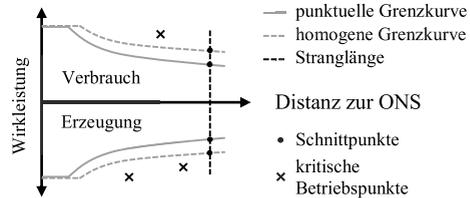
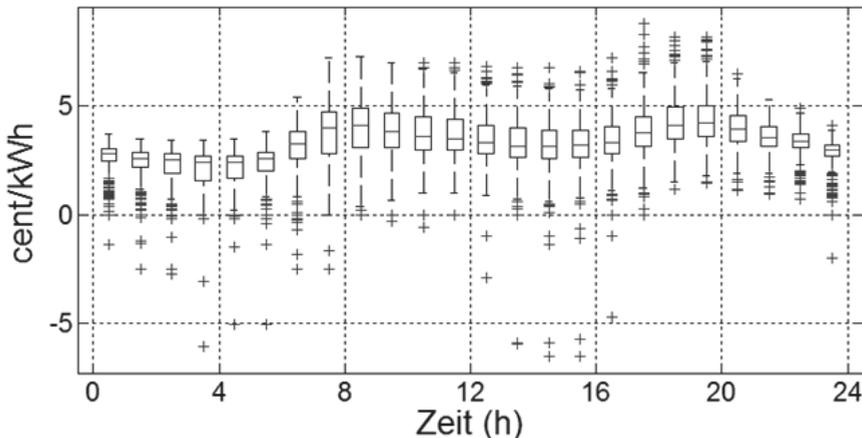


Abbildung 39: Beispiel einer Grenzkurve nach Distanz zur Ortsnetzstation (ONS)



Für geringe Distanzen ist die installierbare Wirkleistung von der Distanz zur ONS unabhängig. Da es sich bei den meisten Niederspannungsnetzen um Strahlennetze handelt, ist die Spannung an Knoten mit größerer Distanz zur ONS kleiner, sodass eine Verletzung des Spannungsbandes wahrscheinlicher ist. Im ONS-nahen Bereich ist es wahrscheinlicher, dass das Netz aufgrund der thermischen Überlastung der Leiter versagt, wohingegen das Spannungsband noch eingehalten wird.

Abbildung 40: Verteilungsdiagramm (Boxplot) der Preiskurven am Day-Ahead-Markt für das Jahr 2014



### 3.4 Modell zur lokalen Emissionsabschätzung

(N. Döge, G. Jamerson, R. Kämpfer, L. Lu)

Einer der größten Vorteile batterieelektrischer Fahrzeuge im Vergleich zu konventionell angetriebenen ist, dass sie keine direkten, durch einen Verbrennungsprozess verursachten, Schadstoff- und Lärmemissionen haben.

Eine Aufgabe innerhalb des Forschungsprojektes bestand darin, den Effekt größerer Anteile elektrisch angetriebener Fahrzeuge im städtischen Wirtschaftsverkehr auf die generierten Schadstoffemissionen zu quantifizieren.

Herkömmliche Modelle zur Abbildung des Wirtschaftsverkehrs haben das Problem, dass sie häufig makroskopischer Natur sind und in der überwiegenden Zahl der Fälle lediglich das Segment des Güterwirtschaftsverkehrs adressieren.

Gerade zur Abschätzung der auf Quartiersebene durch die unterschiedlichen Flächennutzungen generierten kleinräumigen Verkehre sind größer angelegte Verkehrsmodelle folglich ungeeignet bzw. stehen Aufwand und Nutzen in keinem Verhältnis zueinander. Somit ist es auf Quartiersebene vollkommen ausreichend, mittels der vorhandenen Flächennutzungen und deren Nutzungsintensitäten, Quell-, und Zielverkehre abzuschätzen, um eine Aussage über die durch das Gebiet induzierten Verkehrsemissionen machen zu können.

Bereits in den Vorgängerprojekten „Climate KIC Energy Atlas“ und „Climate KIC Neighborhood Demonstrators“, beide gefördert im Rahmen des 7. EU Forschungsrahmenprogramms, wurde am Zentrum Technik und Gesellschaft der TU Berlin das TEECT (Transport Energy and Emission Calculation Tool) entwickelt, mit dem Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistung und Emissionen auf Quartiersebene für den Personenverkehr abgeschätzt werden können.

Für die Quantifizierung der Emissionen im Wirtschaftsverkehr auf Quartiersebene wird das Werkzeug innerhalb des KomDRIVE-Projektes um einen Berechnungsalgorithmus für den Wirtschaftsverkehr erweitert werden. Durch diese Erweiterung sollten dann, mittels vorher festgelegter Szenarien, die lokalen Effekte von im zeitlichen Verlauf bis 2030 steigenden Anteilen elektrisch angetriebener Fahrzeuge innerhalb der für den Wirtschaftsverkehr typischen Fahrzeugklassen für das Beispielquartier berechnet werden. Die Berechnung fokussierte dabei beispielhaft auf die Gase Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Kohlenstoffmonoxid (CO) und die Partikelemissionen (PM).

### **3.4.1 Ansatz und Zielstellung**

Wie eingangs beschrieben, ist die erste Version des TEECT dazu in der Lage, Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistung und korrespondierende CO<sub>2</sub>-Emissionen für den Personenverkehr auf Quartiersebene zu berechnen. Als Berechnungsgrundlage sind hierfür zahlreiche statistische Basisdaten auf der Ebene möglichst kleinräumiger Gebietseinheiten notwendig. Für das Beispielquartier „Green Moabit“ in Berlin wurden statistische Blöcke genutzt. Der vereinfachte Berechnungsablauf ist in Abbildung 41 dargestellt

Die grundlegende Voraussetzung für den Berechnungsprozess ist die Angabe der Einwohneranzahl, die Anzahl der Arbeitsplätze sowie die Zuordnung des Straßennetzwerks. Sind jedoch die Parameter wie Einwohner und Arbeitsplätze nicht verfügbar, bietet das Tool dem Nutzer die Möglichkeit sie zu schätzen. Dafür muss dieser zum statistischen Block zusätzliche Angaben machen, wie z.B. die Fläche und Anteile der verschiedenen Nutzungen.

Mit Hilfe dieser Variablen ist der Algorithmus in der Lage Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistung und resultierende Emissionen auf der Ebene statistischer Blöcke zu berechnen. Das

Tool nutzt ein breites Portfolio an voreingestellten Default-Parametern, die das lokale Verkehrsverhalten sowie die lokale Fahrzeugflotte repräsentieren. Die Werte basieren auf deutschen Verkehrserhebungen (z.B. Follmer et al., 2010) als auch Empfehlungen (z.B. FGSV, 2006) und sind direkt als Excel-Mappe gespeichert. Aufgrund der Tatsache, dass die Parameter nur auf Durchschnittswerten basieren, kann der Benutzer auch alle Werte selbst anpassen. Dazu gehören insbesondere:

- Fahrtkosten für privat und wirtschaftlich motivierte Verkehre,
- Streckenlänge (Durchschnitt) je nach Verkehrsmodus und Zweck (in km),
- Modal Split,
- Fahrzeug-Segmente des motorisierten Individualverkehrs (MIV) und der Busse,
- Verkehrssituationen auf Grundlage der Straßennetzwerkzuordnung,
- Emissionsfaktoren für MIV und Busse und
- Fahrzeugzuladung

Zur Feinjustierung können sechs Variablen, die den Modal Split beeinflussen, angepasst werden, um die realen Bedingungen so weit wie möglich darzustellen. Diese Variablen sind, wie in Abbildung 41 ebenfalls ersichtlich:

- Erreichbarkeit des ÖPNV,
- Verfügbarkeit von Parkplätzen für den MIV,
- Verfügbarkeit von Fahrradinfrastruktur,
- Erreichbarkeit des Einzelhandels,
- Motorisierungsrate und
- Anteil der elektrischen Fahrzeuge im Verkehrsaufkommen.

Die Berechnung führt zu den durchschnittlichen verkehrsbasierten CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Einwohner oder Arbeitsplatz im statistischen Block. Um die Ergebnisse einem breiteren Publikum zur Verfügung zu stellen, ist es möglich, diese in die CityGML-Datenbank und nachfolgend als KML-Datei (Abbildung 42), die in Google Earth geöffnet wird, zu exportieren.

Abbildung 41: Berechnungsablauf des TEECT

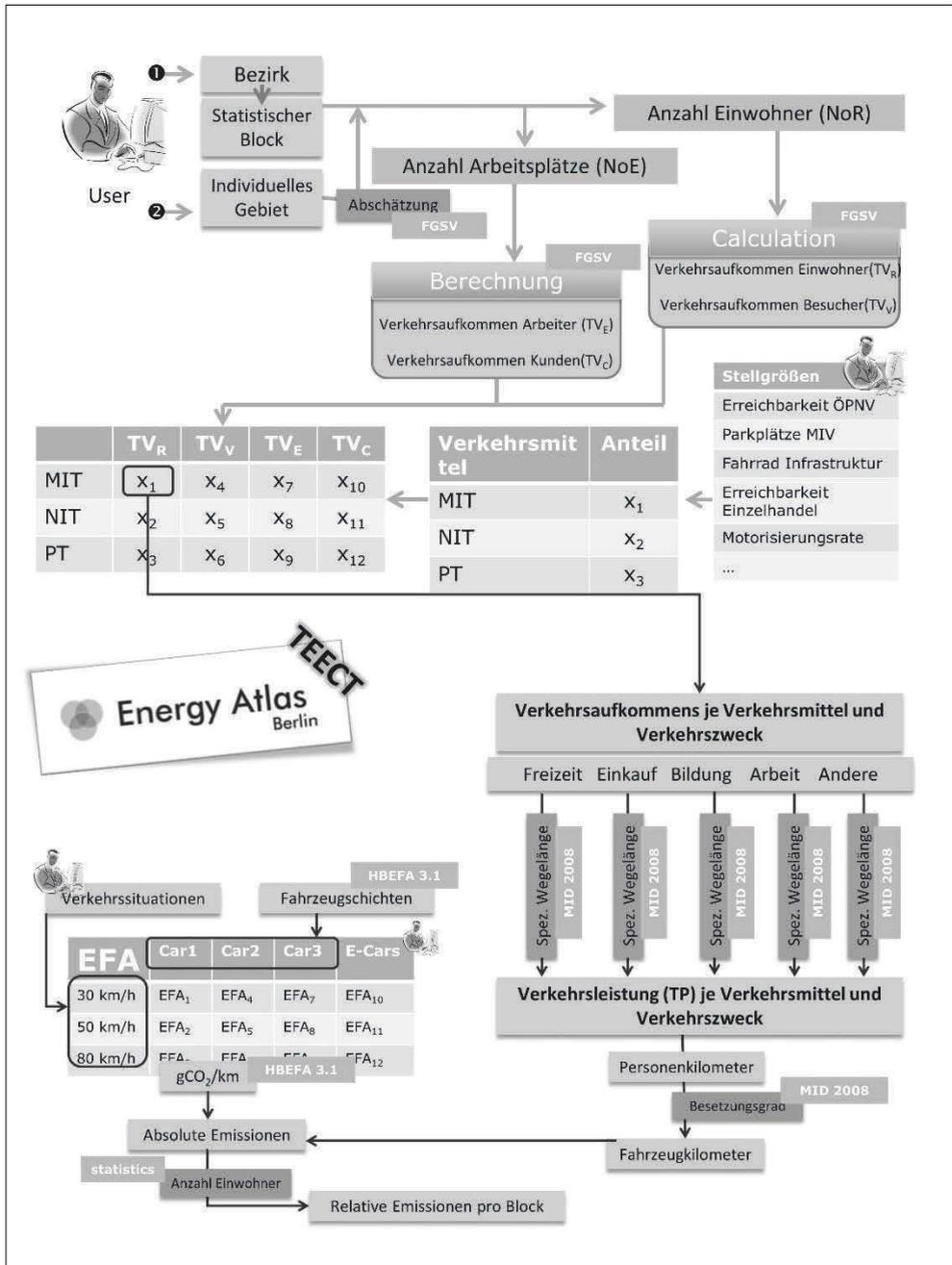


Abbildung 42: Darstellung der Ergebnisse in Google Earth



Quelle: Google Earth Export, 2014

Da für den spezifischen statistischen Block auf Basis seiner Flächennutzungsmischung und Nutzungsintensität generierte Quell- und Zielverkehre abgeschätzt werden, ist das Werkzeug natürlich nicht in der Lage, solch präzise Aussagen wie ein komplexes Verkehrsmodell zu treffen oder eine Verkehrsumlegung auf das Verkehrsnetz des Quartiers zu berechnen. Dies ist auch explizit nicht das vordergründige Entwicklungsziel. Vielmehr sollte eine effiziente Berechnungsmethode gefunden werden, die es erlauben sollte, auch für Stadtquartiere, Neuerschließungen oder Bestandänderungen Aussagen über die Auswirkungen von Planungsmaßnahmen auf die durch das Gebiet generierten Verkehre machen zu können, um den verantwortlichen Planer bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen.

Im Nachgang beider Climate-KIC Projekte wurde das Werkzeug in der Form aufbereitet, dass es in einer Microsoft Excel und ESRI ArcGIS Umgebung verwendet werden kann. Eine detaillierte Dokumentation zur Verwendung kann über das „YouTube“ Portal betrachtet werden:

- Introduction of Transport Energy and Emission Calculation Tool [TEECT] (Lu, 2014a);  
 YouTube-Link: <https://www.youtube.com/watch?v=RLXRmFO42Hg>
- TEECT User Guide (Lu, 2014b);  
 YouTube-Link: <https://www.youtube.com/watch?v=NMYsG-UiGjY>

Da es in einem Teil des komDRIVE Projektes um die Quantifizierung der Auswirkungen einer Elektrifizierung des WIV auf den städtischen Lebensraum ging, lag der Ansatz nahe,

das TEECT um Berechnungsalgorithmen für den Wirtschaftsverkehr und die Emissionen CO und PM zu erweitern. Anhand der städtebaulichen Struktur des Beispielgebietes „Green Moabit“, welches in Kapitel 3.4.2 eingehender beschrieben wird, sollten für jedes im Gebiet ansässige Unternehmen spezifische Angaben (z.B. Wirtschaftliche Ausrichtung, Fläche, Anzahl der Mitarbeiter) in die Berechnung einfließen. Hierbei sollten vor allem Daten zum Einsatz kommen, die auch im Sinne einer späteren Verwendung des Werkzeuges bzw. Übertragung auf einen anderen Untersuchungsraumes mit vergleichsweise geringem Aufwand zu beschaffen sind.

Unter Durchführung verschiedener Aggregationsschritte, die vorwiegend dem Zweck der Anonymisierung der Unternehmensdaten dienen, sowie unter zur Hilfenahme von Verkehrsabschätzungsmethoden, Daten zum Wirtschaftsverkehr und dem Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) sollten für das Gebiet folgende Verkehre abgeschätzt werden:

- **Übriger Wirtschaftsverkehr:** Fahrten der Beschäftigten in Ausübung ihrer beruflichen Tätigkeit,
- **Kunden-/Besucherverkehr:** Wege zum/vom Unternehmensstandort von Kunden oder Besuchern,
- **Beschäftigtenverkehr:** Wege von Beschäftigten zu/von ihrem Arbeitsplatz (privater Zu-/Abgang),
- **Lieferverkehr:** von außen eingetragener Wirtschaftsverkehr (An- und Ablieferungen etc.).

Das Ziel dieses Projektarbeitspaketes ist es somit das TEECT dahingehend weiter zu entwickeln, dass dieses in der Lage ist die Emissionen für obige durch das Gebiet generierte Verkehre abzuschätzen.

### 3.4.2 Das Projektgebiet – Green Moabit

#### Gründe zur Gebietswahl

Das Berliner Quartier „Green Moabit“ bietet hinsichtlich seiner städtebaulichen Struktur und Flächennutzung optimale Voraussetzungen als Testgebiet für die Weiterentwicklung des TEECT innerhalb des Projektes komDRIVE. Zum einen wurde das TEECT in den beiden Vorgängerprojekten auf Grundlage von Daten, die für das Gebiet erhoben wurden, entwickelt, zum anderen sind Wirtschaftsstruktur und ansässige Unternehmen für das Gebiet hervorragend dokumentiert. Folglich hätten bei einer anderen Gebietswahl umfangreiche Primärerhebungen stattfinden müssen, welche nicht Bestandteil des Forschungsprojektes waren. Aus diesem Grund wurde das Gebiet „Green Moabit“ von den Projektpartnern als Modellgebiet für die Quantifizierung der lokalen Emissionen ausgewählt.

#### Charakterisierung des Gebietes

Das in Abbildung 43 dargestellte 82.340 m<sup>2</sup> große Gebiet befindet sich im Westen Berlins und ist Teil des Bezirkes Mitte. Seinen Namen erhielt das gemischt genutzte Areal im Rahmen der Erstellung eines Stadtteilentwicklungskonzeptes, das im Jahre 2013 vollendet wurde und dessen Fokus auf der Ermittlung von Potentialen und der Entwicklung von Maßnahmen zum Klimaschutz sowie zur Anpassung an Klimaveränderungen lag (SUSTAINUM GmbH, 2014).

Wie in Abbildung 43 ersichtlich, wird das gesamte Gebiet vom Bahndamm im Norden, der Beusselstraße im Osten, der Spree im Süden und dem Charlottenburger Verbindungskanal im Westen begrenzt. Laut Flächennutzungsplan handelt es sich im westlichen Gebietsteil um gemischtgenutzte Flächen, während das Zentrum und der direkt am Bahndamm angrenzende Teil ausschließlich gewerblichen Nutzungen vorbehalten sind. Die östlichen Straßenzüge, sowie ein kleineres Areal südlich der Kaiserin-Augusta-Allee bestehen aus Wohnbebauung (W1) mit einer GFZ über 1,5 (SenStadtUm, 2015).

Im Projektgebiet „Green Moabit“ befinden sich über 400 Unternehmen, die ca. 10.000 Menschen beschäftigen (SUSTAINUM GmbH, 2014). Die ansässigen Unternehmen entstammen überwiegend den Wirtschaftszweigen Verkehr und Lagerei sowie dem Verarbeitenden Gewerbe.

Im Untersuchungsgebiet leben ca. 8.900 Menschen vorwiegend im östlichen Teil (Beusselstraße, Rostocker Straße, Wittstocker Straße, Berlichingenstraße und Erasmusstraße), ein geringer Teil im nordwestlichen Bereich (Neues Ufer-, Hutten-, Sickingenstraße) sowie im Südwesten (Klarenbachstraße, Kaiserin-Augusta-Allee). Bei den Gebäuden handelt es sich überwiegend um gründerzeitliche Häuser im typischen „Mietskasernen“ Stil. Kriegslücken wurden durch Wohngebäude im Stil der 1970er bzw. 80er Jahre geschlossen. Der überwiegende Anteil dieser Wohnungen ist vermietet, weshalb der Anteil selbstgenutzten Wohneigentums nicht signifikant ist (SUSTAINUM GmbH, 2014 und SenStadtUm, 2015).

### **3.4.3 Vorstudien und Berechnungsgrundlagen**

Wie eingangs erwähnt, wurde das TEECT ursprünglich zur Abschätzung des privaten Personenverkehrs entwickelt. Um es in Richtung einer Quantifizierung des Wirtschaftsverkehrs weiterzuentwickeln, mussten im Vorfeld Vorstudien recherchiert und mögliche Datenquellen identifiziert werden, auf die sich die Weiterentwicklungsarbeiten des Berechnungsalgorithmus stützen können. Dies sind insbesondere Studien und Datenquellen, die den Einfluss von Flächennutzung und Verkehrserzeugung für alle vier in Kapitel 3.4.1 zu betrachtenden Verkehre zum Thema hatten. Darüber hinaus wurden Quellen recherchiert, die sich mit der Charakterisierung/genaueren Beschreibung des Wirtschaftsverkehrs und seiner Bestandteile beschäftigten. Hier waren insbesondere statistische Kennwerte wie (Fahrzeugbestand, Wirtschaftszweige, Fahrzeugleistung, Antriebsarten etc.) in Tabelle 22 ist das Rechercheergebnis dargestellt.

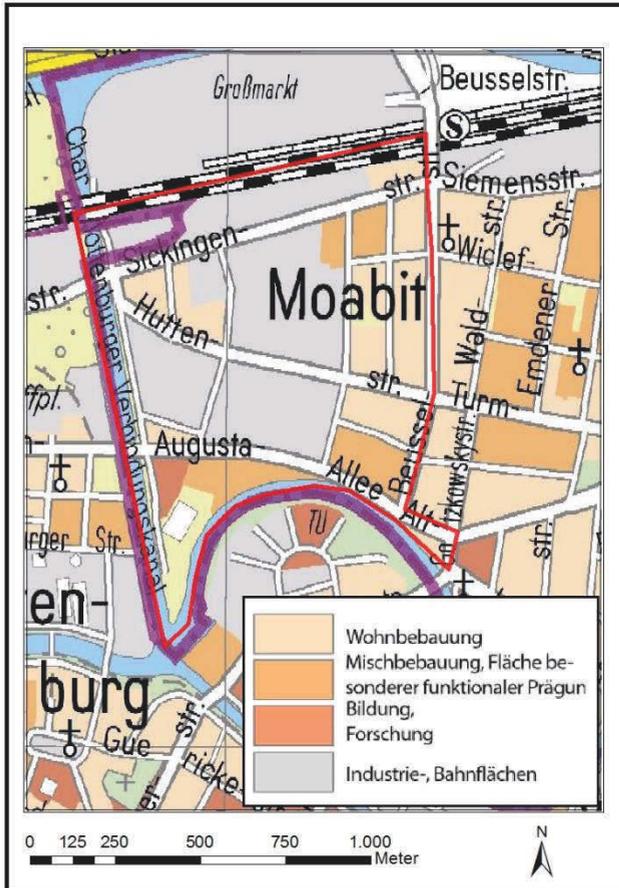
Tabelle 22: Für die Erweiterung des TEECT relevante Vorstudien/Datenquellen

<b>Daten- quelle/ Institution</b>	<b>Quellenbeschreibung</b>	<b>Jahr/ Ebene</b>	<b>Mögliche Funktion im TEECT</b>
SrV	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt: Daten zum Berliner Verkehr (SenStadtUm, 2013); Auswertung der SrV 2008 Daten für Berlin	2008 Berlin	Erkenntnisse bezüglich der Verkehrsmittel-nutzung für den Fahrzweck „Arbeit“
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrs-wesen - Hinweise zur Schätzung des Verkehrsaufkommens von Gebietstypen (FGSV-Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, 2006)	2006 Deutsch-land	Fahrten der Beschäftigten, Fahrten im Kunden-/Besucher-, Wirtschafts- und Lieferverkehr
Dornier Studie	Erfassung und Aufbereitung von Grundlagendaten des Wirtschaftsverkehrs in fünf ausgewählten Großstädten sowie Erarbeitung eines Handlungsrahmens (Dornier, 1994)	1994 Deutsch-land	Anzahl der Anlieferungen
KBA (FZ 23)	Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) - Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Haltern, Wirtschaftszeigen (Kraftfahrt-Bundesamt, 2014b)	2014 Berlin	Verteilung der Fahrzeuge auf die Fahrzeugklassen im Wirtschaftsverkehr
KiD	Statistische Auswertung der Daten zur Erhebung Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KiD) 2010; mehr Informationen unter: <a href="http://www.kid2010.de">http://www.kid2010.de</a>	2010 Deutsch-land	Tagesfahrleistung der Fahrzeug-klassen im Wirtschafts- und Lieferverkehr
MiD	Bericht Mobilität in Brandenburg und Berlin integrierte Auswertung (Follmer, 2010)	2008 Berlin	Tagesfahrleistung der Fahrzeug-klassen für Beschäftigten-, Kunden- und Besucherverkehr
HBEFA	Das Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 3.2	2014 Deutsch-land	Verkehrsemissionen

Auf Basis obiger Vorstudien/Datenquellen erfolgte die innerhalb des Projektes durchgeführte Weiterentwicklung des TEECT für eine Berechnung des Quell- und Zielwirtschaftsverkehrs sowie dessen Emissionen. Die genaue Funktionsweise des Berechnungsansatzes wird in

Kapitel 4.4.1 dargestellt. Hier finden sich zudem eine Auflistung der für die Berechnung notwendigen gebietsspezifischen Eingangsdaten, Szenarienbeschreibungen und eine Dokumentation der Berechnungsergebnisse für das Areal „Green Moabit“ für die drei gerechneten Szenarien.

Abbildung 43: Das Projektgebiet „Green Moabit“



Quelle: L. Lu, eigene Darstellung, Basiskarte: SensStadtUm (2015): Geoportail Berlin/Übersichtskarte von Berlin 1: 50 000 (ÜK50), 10-farbig

### 3.5 Energiesystemmodell und Szenario-Rahmen

(W.Hennings, J. Linssen)

Energiewirtschaftliche und politische Strategien sowie die Markteinführung neuer Techniken konkurrieren im Energieversorgungssystem um einen effizienten Beitrag zur Ressourcen-

schonung sowie Klima- und Umweltschutz. Eine vergleichende Bewertung nach ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Kriterien ist durch den Einsatz von vernetzten Energiesystemmodellen möglich.

Durch eine unterstellte Marktdurchdringung von EV sind Auswirkungen auf die Erzeugung, Transport und Verteilung der elektrischen Energie zu erwarten. So wird sich nicht nur die Stromnachfrage vergrößern, sondern man muss auch von einer Änderung des zeitlichen Nachfrageprofils ausgehen (vgl. Kapitel 3.3). Durch eine Teilelektrifizierung des städtischen Wirtschaftsverkehrs wird zusätzlich zur Änderung der privaten Nachfrage und deren Profile auch eine erweiterte und geänderte Stromnachfrage im Endverbrauchssektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) entstehen.

Durch eine Verschiebung der Endenergienachfrage der Mobilität hin zum Strom ergeben sich weitere Effekte im Energieversorgungssystem, die nur durch eine vernetzte Abbildung dargestellt werden können. So können mit Hilfe des eingesetzten Energiesystemmodells diese Wechselwirkungen innerhalb des vernetzten Energiesystems nachgebildet werden und so auch ein Nachfragerückgang nach mineralölbasierten Kraftstoffen und dessen Auswirkungen in der Verteilungs- und Herstellungsstruktur Berücksichtigung finden. Eine isolierte Betrachtung der Stromerzeugung und des Verkehrssektors wird der sektoralen Verflechtung im Energieversorgungssystem nicht gerecht.

In der vorliegenden Studie werden die Auswirkungen auf das vernetzte Energiesystem in Deutschland durch die Markteinführung von EV mit Schwerpunkt der Analyse auf den städtischen Wirtschaftsverkehr untersucht. Zur Anwendung kommt ein bestehendes Energiesystemmodell, welches speziell für die vorliegende Fragestellung angepasst wird.

Das Modell, dessen Anpassung und der angenommene Szenario-Rahmen werden in diesem Kapitel beschrieben und diskutiert. Basierend auf den Detailergebnissen und -erkenntnissen der Kapitel 3 und 4 werden für gewerbliche Nutzer die technischen und wirtschaftlichen Daten der Fahrzeuge, Kraftwerke und Netze aggregiert und – mit Blick auf die Szenarien – Entwicklungstrends hinterlegt. Da der Projektfokus auf der Elektromobilität im Wirtschaftsverkehr liegt, wird für die Abbildung nicht im Detail betrachteter Techniken im Energieversorgungssystem auf die vorhandene Datenbank des Energiesystemmodells zurückgegriffen.

### **3.5.1 Beschreibung des Energiesystemmodells**

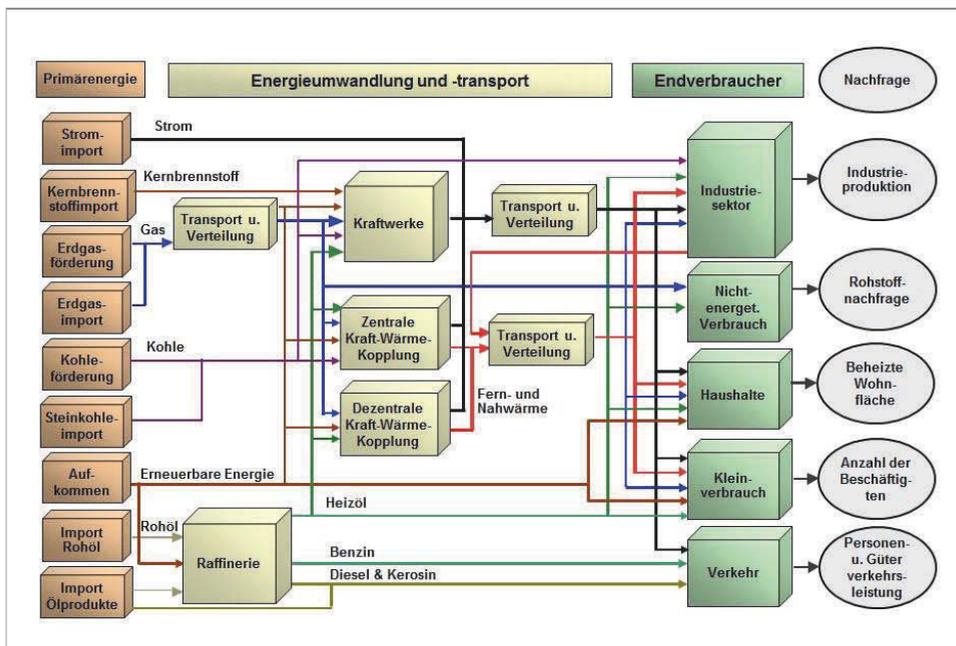
Das verwendete Energiesystemmodell bildet das deutsche Energiesystem durch vernetzte Energiewandlungs- und Energietransport-Prozesse sowie die Energienutzung beim Endverbraucher ab. Ein Austausch von Energieträgern mit der EU sowie weltweit ist im Modell durch Export- und Importenergieflüsse abgebildet. Unter gesetzten energie- und umweltpolitischen Zielen wird basierend auf der Nachfrage nach Energiedienstleistungen (Transport von Gütern und Personen, Industrieproduktion u.a.) ein kostenminimiertes Energieträger- und Technik-Portfolio berechnet, welches die Bereitstellung der nachgefragten Energie in den jeweiligen Sektoren ermöglicht.

Das verwendete Modell ist ein technikbasiertes Bottom-Up-Modell. Es zeichnet sich dadurch aus, dass alle notwendigen Einzeltechniken von der Nutzenergie- bzw. Energiedienstleistungsebene bis hin zur Primärenergie und deren Korrespondenz durch

Energieflüsse abgebildet werden. Für die jeweilige Energiewandlungsaufgabe sind mehrere konkurrierende Techniken in einer Datenbank abgebildet. Wirtschaftliche Einflussgrößen wie z. B. Investitionen, Kapitalkosten, Entwicklung von Primärenergieträgerpreisen, Außenhandel mit Energieträgern, Reinvestitionszyklen und verfügbare Kapazitäten (Leistungsgrenzen für bestehende Kraftwerke u.a.) können über Rahmenbedingungen von Szenarien berücksichtigt werden. Neben ökonomischen und technischen Daten können relevante energiepolitische Rahmenbedingungen (Kernenergieausstieg, Anteil erneuerbare Stromerzeugung, Primärenergie-Einsparung u.a.) berücksichtigt werden. Für jede Analyseperiode ist ein konsistenter Referenzdatensatz hinterlegt. Dieser beinhaltet u.a. die Datenbeschreibungen von ca. 2.000 Energiewandlungstechniken, die Nachfragen nach Energiedienstleistungen und die Importenergieträgerpreise. Die Modellstruktur des verwendeten Energiesystemmodells ist in Abbildung 44 dargestellt.

Die Bilanzierung der Kosten, Energieflüsse und klimarelevanter Emissionen erfolgt für das gesamte Energieversorgungssystem. Bei der Bilanzierung handelt es sich ausdrücklich nicht um eine lebenszyklusbasierte Analyse, sondern es werden die relevanten Emissionen und Kosten der Nutzungsphase berücksichtigt. Der Zeithorizont der Analysen ist in Perioden von fünf Jahren bis zum Jahr 2050 aufgeteilt. Für die vorliegende Analyse des städtischen Wirtschaftsverkehrs wird die Analyse mit dem Jahr 2030 beendet, da bei der Batterietechnik Technologiesprünge für den Zeitraum nach 2030 erwartet werden (vgl. Kapitel 4.2.3), die eine Trendfortschreibung von Batteriekenndaten und damit auch von EV-Kennwerten über diesen Zeitraum hinaus sehr unsicher machen.

Abbildung 44: Struktur des verwendeten Energiesystemmodells



Die kostenoptimale Lösung wird mit Hilfe der linearen Programmierung bestimmt, wobei die Zielfunktion die Minimierung der Gesamtsystemkosten ist. Das gewählte Energiesystemmodell basiert auf dem Energiesystemmodell IKARUS des FZJ. Es arbeitet als sogenanntes „Time-Step“-Modell. Die Optimierung erfolgt dabei nicht über einen mehrperiodischen Zeitraum, sondern getrennt für jede Zeitperiode. Die im Modell abgebildeten Perioden umfassen einen Zeitraum von fünf Jahren und ermöglichen eine Abbildung des deutschen Energiesystems bis zum Jahr 2050. Die Ergebnisse der vorangehenden Perioden werden jeweils als Startpunkt für die nächste Zeitperiode vererbt. Es handelt sich somit nicht um eine Optimierungsrechnung für den gesamten Szenariozeitraum (sogenannte „Perfect-Foresight“-Optimierung) sondern nur für die Aneinanderreihung der einzelnen Zeitschritte. Die ursprüngliche Modellstruktur wurde vor dem Hintergrund der Minderung von energiebedingten Klimagasemissionen konzipiert. Eine detaillierte Beschreibung des Modells findet sich u. a. in Markewitz und Stein (2003). Das Modell wird laufend den jeweiligen Fragenstellungen strukturell angepasst und der jeweils aktuelle Stand der Technik erfasst. Einsatzzwecke des Modells sind von Analysen energiepolitischer Gesamtkonzepte beginnend bis hin zur Untersuchung von Auswirkungen auf das Energieversorgungssystem bei Markteinführung einzelnen Techniken. Eine Auswahl zu bereits durchgeführten Analysen gestützt durch das Energiesystemmodell sind zum Beispiel in Martinsen et al. (2010); Matthes et al. (2013); Heinrichs und Markewitz (2015) sowie Linssen et al. (2012) veröffentlicht.

Ziel des Modelleinsatzes in der vorliegenden Analyse ist die Quantifizierung der Auswirkungen einer Markteinführung von EV mit Schwerpunkt städtischer Wirtschaftsverkehr unter Berücksichtigung der aktuellen Zielvorgaben der deutschen Energiewende. Neben der beschriebenen Methode der Emissionsabschätzungen im Kapitel 3.4 zählt die Analyse zur Quantifizierung der Auswirkungen auf den städtischen Lebensraums (Kap. 4.4) und der Einordnung der Bedeutung für Gesamtdeutschland (Kap. 4.5).

### **3.5.2 Abbildung des Wirtschaftsverkehrs**

Die Zusammenführung und Aufbereitung der technischen und ökonomischen Daten der Fahrzeuge, insbesondere der Nutzfahrzeuge, wird in konsistenter Weise aus den in der Analyse gewonnen Daten hergeleitet.

Im Projekt findet eine regionale Eingrenzung auf den städtischen Bereich durch eine Einschränkung auf die Kategorien Groß-, Mittel-, größere und kleinere Kleinstädte der Gemeindetypen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) statt. Landgemeinden bleiben bei der Analyse unberücksichtigt. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Strukturdaten am Fahrzeugstandort denen des Haupteinsatzstandortes entsprechen. Weiterhin wird im Projekt nur die Durchführung des Wirtschaftsverkehrs mit Kraftfahrzeugen auf der Straße betrachtet, da nur hier eine wesentliche Elektrifizierung des städtischen Wirtschaftsverkehrs zu erwarten ist. Lastenradverkehr wie auch Gütertransport durch den ÖPNV, urbaner Güterschienenverkehr (z.B. Cargotram), Wasser- oder Luftverkehr bleibt unberücksichtigt.

Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, wird vereinfachend für die Analyse die Verkehrsleistung der gewerblichen Halter als Wirtschaftsverkehr definiert. Die Vor- und Nachteile dieser Vereinfachung sind bereits dort beschrieben. Dieses Verfahren wird sowohl für den

dienstlichen bzw. gewerblichen Personen- und Gütertransport sowie deren Kombination angewendet. Zur Abschätzung der Verkehrsleistungen im Wirtschaftsverkehr wird ausgehend von dem Fahrzeugbestand, deren jährlichen Fahrleistungen sowie Besetzungs- und Beladungszahlen eine Aussage zur jeweiligen Verkehrsleistung des gesamten Wirtschaftsverkehrs und des Anteils in urbanen Gebieten gemacht. Für die Szenarien werden mit Hilfe historischer Daten des Fahrzeugregisters des Kraftfahrt-Bundesamtes (2014b und 2015b) und der Befragungen KiD (2010) und Wermuth (2012) zukünftige Trends abgeleitet und ein Szenario für eine mögliche Entwicklung des Wirtschaftsverkehrs generiert. Um die Bandbreite möglicher Auswirkungen aufzuzeigen, wird zu Vergleichszwecken eine Entwicklung ohne Elektrifizierung des Wirtschaftsverkehrs sowie ohne Elektrifizierung des gesamten Straßenverkehrs gerechnet (vgl. Kapitel 4.5).

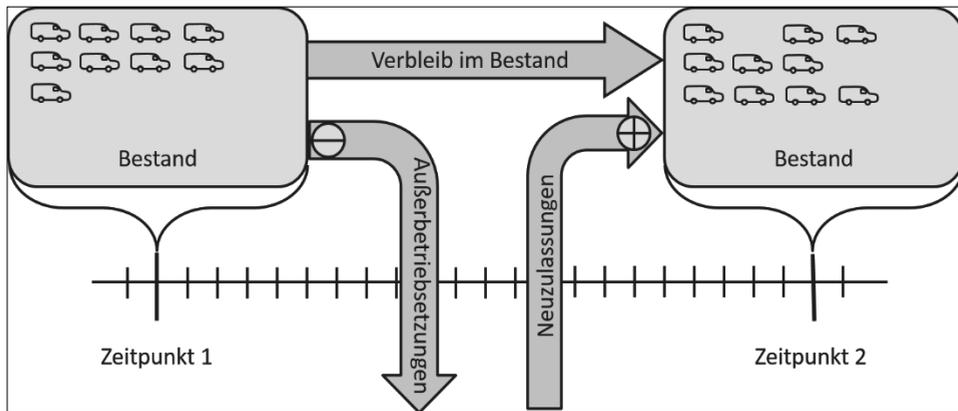
### **3.5.3 Bestandsmodellierung**

Um die Elektrifizierung des Straßen-Wirtschaftsverkehr mit Pkw und Lkw und dessen EV-Bestandsdurchdringung konsistent bewerten zu können, wurde ein Bestandsmodell für den Pkw und Lkw-Bereich entwickelt. Die Modelle bilden Szenarien der gewerblich zugelassenen Pkw und Lkw ab. Für die privat zugelassenen Pkw wurde auf Daten aus dem NET-ELAN-Projekt zurück gegriffen (Linszen et al., 2012).

#### **Modellansatz für den Pkw-Bereich**

Die Modelle simulieren aufgrund von Neuzulassungen und Außerbetriebsetzungen (bei gewerblichen Haltern der Übergang in Privateigentum) einen zukünftigen Bestand durch Saldierung der Zu- und Abgänge. Als Anfangsbestand wird die Bestandzahl gewerblicher Pkw vom 1. Januar 2015 verwendet. Sie ist Ausgangsgröße des Modells und stellt den Beginn des Szenario-Zeitraumes dar. Die zukünftigen Neuzulassungszahlen werden für das Szenario exogen gesetzt. Um konsistent mit den Statistiken des Kraftfahrt-Bundesamtes zu sein, werden die Neuzulassungen für ein ganzes Kalenderjahr zusammengefasst. Die Außerbetriebsetzungen werden ebenfalls für jedes Kalenderjahr saldiert. Der Stichtag für die Angabe der Bestandszahlen ist der 1. Januar eines jeden Jahres. Abbildung 45 verdeutlicht das Konzept beispielhaft ausgehend vom Jahr 2015 aus. Für die vorliegende Analyse wird der Bestand bis zum Jahr 2030 abgebildet.

Abbildung 45: Schematische Darstellung des Bestandsmodells



Das Modell wird parametrisiert durch die Neuzulassungen, Bestandsdaten und resultierende Außerbetriebsetzungen der letzten zehn Jahre. Fehlende Daten und Aufteilung der Statistiken werden durch entsprechende Szenarioannahmen ergänzt. Die erste Annahme betrifft die jährlichen Neuzulassungen an Pkw gewerblicher Halter je Antriebsklasse vor dem Jahr 2012. Das KBA unterscheidet in ihren Statistiken vor dem Jahr 2012 nicht zwischen Halterart (privat oder gewerblich) und gleichzeitig auch Antriebsart. Da diese Daten wichtig für ein funktionierendes Modell sind, werden sie aus den verfügbaren Werten der Jahre 2012 bis 2014 hergeleitet. Dies geschieht, indem man bei den Antriebsarten Diesel, Benzin und Sonstige einen linearen Trend bis zum Jahr 2009 unterstellt und so die fehlenden Werte entwickelt. Bei der Antriebsart „Elektro“ wird hingegen ein exponentielles Verhalten in der Entwicklung der Neuzulassungen für die Jahre 2009 bis 2014 angenommen. Dies ist damit zu begründen, dass die Technik vor dem Jahr 2009 minimal vertreten ist und somit ein Markteintritt erst 2009 startet. Aufgrund eines S-förmigen Verlaufs von Technologiediffusion am Markt wird ein linearer Verlauf als nicht gerechtfertigt gesehen (Hacker et al., 2011). Daher wird eine Neuzulassungskurve entlang einer e-Funktion mit steigenden Wachstumsraten gewählt. Dies steht außerdem im Einklang mit den Entwicklungskurven der NPE, die ähnliche Verlaufskurven annehmen (Nationale Plattform Elektromobilität, 2014). Durch diese Annahme ist es möglich, Neuzulassungszahlen der letzten sechs Jahre berechnen zu können. Weiterhin wird im Pkw-Bestandsmodell zwischen verschiedenen Antriebsarten Diesel, Benzin, Elektro und Sonstige unterschieden. Unter der Klasse „Elektro“ werden BEV und PHEV zusammengefasst. In der Gruppe „Sonstige“ werden alle Antriebsarten zusammengefasst, die nicht zu einer der anderen Antriebsarten gehören wie zum Beispiel LPG-Fahrzeuge (Liquefied Petrol Gas) oder CNG-Fahrzeuge (Compressed Natural Gas).

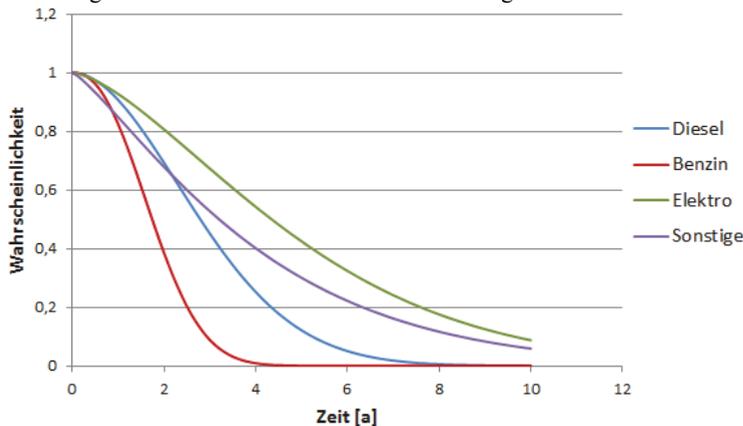
### Durchschnittliche gewerbliche Haltedauer von Pkw und Lkw

Die Sterbelinie der gewerblich genutzten Fahrzeuge (Überlebenswahrscheinlichkeit der Fahrzeuge über der Zeit im gewerblichen Bereich; nicht gleichzusetzen mit der technischen Lebensdauer) gibt an, wie wahrscheinlich das Fahrzeug nach einer bestimmten Zeit noch nicht außer Betrieb und im gewerblichen Betrieb ist sowie kein Übergang in Privatbesitz

stattgefunden hat. Bei einer genügend großen Zahl an Fahrzeugen konvergiert auch das arithmetische Mittel der Gesamtheit gegen diesen Wahrscheinlichkeitswert (vgl. Gesetz der großen Zahlen, Universität Ulm, 2012). Dadurch lassen sich mittels geeigneter Funktionen der Überlebenswahrscheinlichkeit die Ausfälle bzw. der Besitzwechsel von gewerblich nach privat genügend genau abbilden. In der vorliegenden Analyse wird die Überlebenswahrscheinlichkeit durch die Parametrierung einer Weibull-Verteilung abgebildet. Diese Funktion wird häufig in Technik und Wirtschaft zur Vorhersage von Lebensdauern und Ausfallhäufigkeit angewendet und kann an steigende, konstante und fallende Ausfallraten angepasst werden. Die Parameter der Weibullfunktion müssen jeweils für den Fahrzeugtyp Pkw oder Lkw und Antriebsklasse parametrisiert werden.

Die Abbildung 46 zeigt die Sterbelinien gewerblich zugelassener Pkw differenziert nach den verschiedenen Antriebsarten. Es kann ein deutlicher Unterschied im Verlauf der verschiedenen Antriebsarten erkannt werden. Während gewerblich genutzte Benzin-Pkw deutlich schneller aus der gewerblichen Nutzung herausfallen und außerbetrieb gesetzt werden oder in privaten Besitz übergehen, weisen Dieselfahrzeuge eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit für den Verbleib im Bestand über der Zeit auf. Die Überlebenswahrscheinlichkeit für EV weist die höchste Wahrscheinlichkeit basierend auf den Trends und Annahmen im Projekt auf. Dies kann durch die höheren Anfangsinvestitionen gepaart mit niedrigeren fixen und variablen Kosten begründet werden. Für die EV werden technische Lebensdauern in Anlehnung an Kapitel 4.2 angesetzt. Der Vergleich der Modellfunktion zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Kennwerten der historischen Überlebenswahrscheinlichkeiten.

Abbildung 46: Überlebenswahrscheinlichkeiten der gewerblichen Pkw nach Antriebsarten



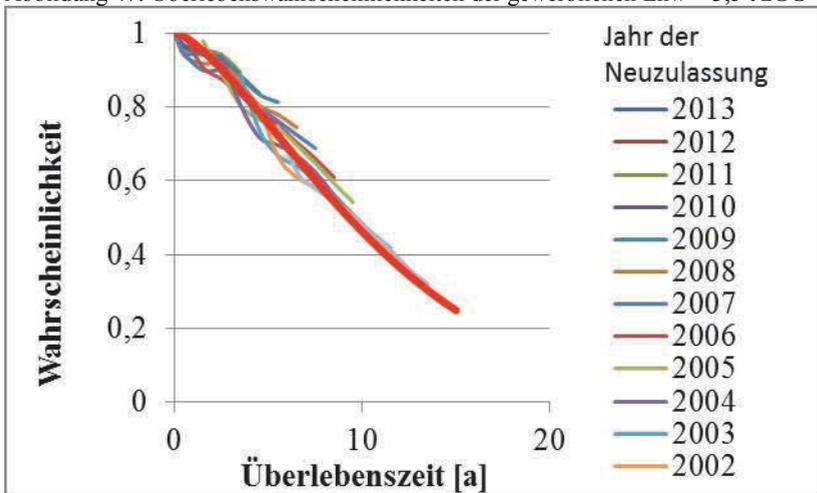
### Modellansatz für den Lkw-Bereich

Für den Lkw-Bereich wurde ebenfalls auf die bereits erwähnten Statistiken zurückgegriffen. Um die Daten nutzen zu können, wurde die Annahme getroffen, dass sämtliche im Bestand befindlichen Lkw gewerblich genutzt werden (vgl. Kapitel 2.1). Der Anteil der gewerblichen Halter überwiegt im Jahr 2013 deutlich mit über 87 %. Betrachtet man nur den Anteil der gewerblichen Nutzer von Lkw über 3,5 t zGG, so liegt deren Anteil bei über 93 % der Neuzulassungen im Jahr 2013 (Kraftfahrt-Bundesamt, 2013). Des Weiteren zeigt Wermuth (2012), dass gewerbliche Lkw-Halter in der Klasse bis 3,5 t zGG circa drei Viertel der

Fahrleistungen im Wirtschaftsverkehr verrichten. Weiterhin wird vereinfachend angenommen, dass im Lkw-Bereich ausschließlich Dieselmotoren als Antrieb eingesetzt werden. Dadurch entfällt eine Klassifizierung nach Antriebsarten. Laut Kraftfahrt-Bundesamt (2015a) waren 2014 ca. 95 % des Lkw-Bestandes dieselmotorisch angetrieben. Da derzeit davon ausgegangen wird, dass sich elektrisch angetriebene Lkw vornehmlich bei den leichten und mittelschweren Lkw durchsetzen werden und die Einsatzprofile der Fahrzeuge (Bestandszahl, Jahresfahrleistung, Überlebenswahrscheinlichkeit, Beladungszahl u.a.) sehr unterschiedlich sind, wird bei der Bestandsmodellierung eine Aufteilung der Lkw in die Klassen leichte Lkw (zGG < 3,5 t), mittelschwere Lkw (3,5 bis 12 t) und schwere Lkw (> 12 t) vorgenommen (vgl. Kapitel 4.1). Diese beiden Annahmen ermöglichen es, Sterbelinien für die verschiedenen Lkw-Klassen abzuleiten. Dabei werden die Statistiken FZ 15 und FZ 6 bis zurück ins Jahr 2001 zu Grunde gelegt (z.B. Kraftfahrtbundesamt, 2015b).

Exemplarisch zeigt die Abbildung 47 einen Vergleich der Überlebenswahrscheinlichkeiten von gewerblichen Lkw, welche mit Hilfe des Bestandsmodells (rote Linie) und der Statistikwerte des Kraftfahrt-Bundesamtes berechnet werden. Die parametrisierte Sterbelinie bildet die realen Daten mit ausreichender Genauigkeit ab. Die jährlichen Neuzulassungsstatistiken reichen bis zum Jahr 2001 zurück. Es wird wieder vereinfachend angenommen, dass sämtliche Neuzulassungen am 1. Juli eines jeden Jahres stattfinden (vgl. Pkw-Bestandsmodell). Das Bestandsmodell wird analog für die mittelschweren und schweren Lkw aufgebaut. Für die leichten Lkw ergibt sich ein Durchschnittsalter von ca. 10,5 Jahren, für mittelschwere Lkw von 10,6 und für schwere Lkw von 8,3 Jahre. Dies ist nicht gleichzusetzen mit der technischen Lebensdauer der Fahrzeuge, sondern entspricht der durchschnittlichen gewerblichen Nutzung in Deutschland.

Abbildung 47: Überlebenswahrscheinlichkeiten der gewerblichen Lkw < 3,5 t zGG



### Total Cost of Ownership (TCO)

Zentrale Fragestellung der ökonomischen Rahmenbedingungen ist, welche Kosten EV gegenüber konventionell betriebenen Fahrzeugen aufweisen. Diese sind signifikant für eine Marktdurchdringung von EV. Für den Wirtschaftsverkehr ist die Kostenfrage noch deutlich

ausgeprägter als im privaten Bereich. Die vorgestellten Kostenrechnungen dienen zur Einschätzung von möglichen Neuzulassungszahlen und sind damit wichtige Grundlage für die Szenarien der Neufahrzeugverkäufe und resultierende Bestandsanteile.

Zur Untersuchung dieser Fragestellung werden die Kosten von den im Projekt betrachteten und bereits beschriebenen Elektrofahrzeugen mit den Kosten von konventionell betriebenen Fahrzeugen mit dieselmotorischem Antrieb als Referenzfahrzeuge verglichen. Dazu werden alle Kosten eines jeweiligen Fahrzeugs über eine angenommene gewerbliche Haltedauer berücksichtigt. Fahrzeugdaten und -kosten beruhen auf den Berechnungen und Festlegungen der Fahrzeugauslegungen, wie in Kapitel 4.1 beschrieben.

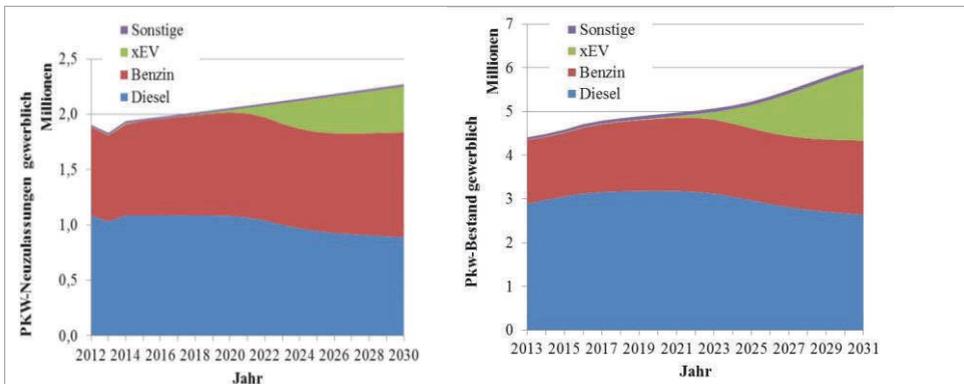
Basierend auf den angenommenen Energiepreisen (Endkundenpreise inklusive aller Abgaben ohne Mehrwertsteuer) werden für die Fahrzeuge TCO-Rechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.1 bereits dargestellt. Zur Ermittlung von Sensitivitäten werden sowohl die Haltedauer als auch die jährlichen Fahrleistungen in Anlehnung an Kapitel 4.1 variiert.

Die Kostenrechnungen berücksichtigen alle variablen und fixen Fahrzeugkosten inklusive Finanzierung, Steuern und Abgaben. Eine zwar vor kurzem von der Bundesregierung beschlossene aber noch nicht gesetzlich eingeführte Kaufprämie der Fahrzeuge ist nicht berücksichtigt. Basierend auf den Modellen zur Überlebenswahrscheinlichkeit der Fahrzeuge, der erwarteten wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit und daraus abgeleitetem Anteil an den gewerblichen Neuzulassungen wird eine Bestandsrechnung für ein Referenz-Szenario durchgeführt. Für die Überlebenswahrscheinlichkeit der EV wird die gemittelte Wahrscheinlichkeit der Antriebsarten Diesel und Benzin angenommen. Es sei an dieser Stelle nochmals angemerkt, dass dies nicht die technische Lebensdauer der EV sondern die gewerbliche Haltedauer repräsentiert. Für den Pkw-Bereich wird von einem moderaten jährlichem Wachstum von einem Prozent der Neuzulassungen ausgegangen. Der Anteil von EV an den Neuzulassungen wird ebenfalls angenommen. Dieser Anteil orientiert sich an den gezeigten TCO-Trends. Die Gruppe „Sonstige“ erfährt keine zeitliche Änderung ihres Anteils an den Neuzulassungen. Die EV-Neuzulassungen verdrängen sowohl Diesel- als auch gewerblich genutzte Benzin-Pkw. Für die privaten und gewerblichen EV wird für das Jahr 2030 (entsprechend dem Stichtag 1. Januar 2031) ein Bestand von 6 Millionen Fahrzeugen (entsprechend 12,1 % des Gesamtfahrzeugbestands an Pkw/Lkw) nach den politischen Zielvorgaben erreicht. Auf den Bereich privater Pkw entfallen dabei 4,1 Mio. Pkw (68 %), auf den gewerblichen 1,5 Mio. Pkw (25 %) und auf den Bereich der leichten und mittelschweren gewerblichen Lkw knapp 0,4 Mio. Fahrzeuge (7 %).

Die Abbildung 48 zeigt den zeitlichen Verlauf der Neuzulassungen und des resultierenden Bestandes für die gewerbliche Nutzung. Der Bestand an EV (70 % BEV und 30 % PHEV) erreicht im Jahr 2030 einen Anteil von 27 % und erreicht damit das Niveau der Benzinantriebsart. Es gehen im Jahr 2030 ungefähr 2,1 Mio. Fahrzeuge (EV-Anteil davon knapp 8 %) von gewerblichen zu privaten Haltern über.

Durch die Anwendung des entwickelten Modells ist auch eine Analyse der Bestandszusammensetzung nach Fahrzeugaltersklassen möglich. Diese Verteilung für die jeweiligen Analyseperioden ist für die Aggregation von Verbrauchs- und Emissionswerten notwendig. Die folgende Abbildung 49 zeigt am Beispiel des Diesel-Pkw-Bestandes die resultierende Verteilung der Fahrzeuge nach Neuzulassungsjahren.

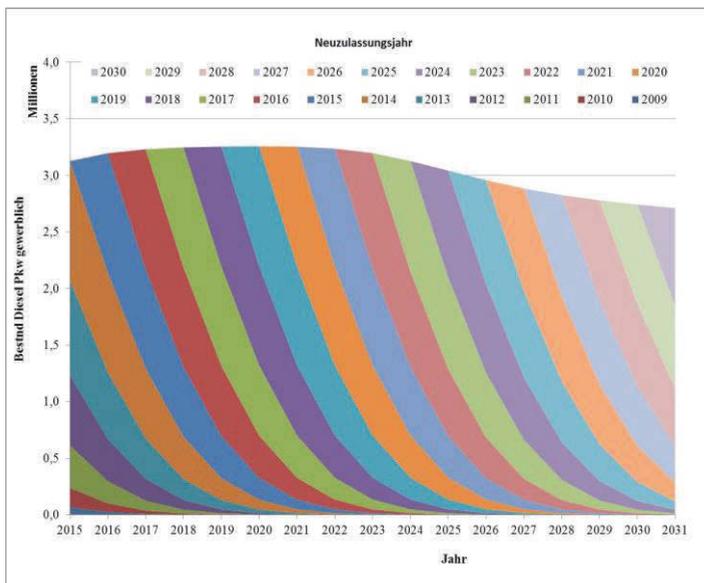
Abbildung 48: Entwicklung der Neufahrzeugverkäufe (links) und des Bestands (rechts) der gewerblich zugelassenen Pkw im **Referenzszenario**



Man erkennt deutlich die niedrige Haltedauer der gewerblichen Halter, so dass im Gegensatz zu privaten Haltern eine dynamischere Zusammensetzung über der betrachteten Periode mit hoher Neuzulassungsrate pro Jahr entsteht.

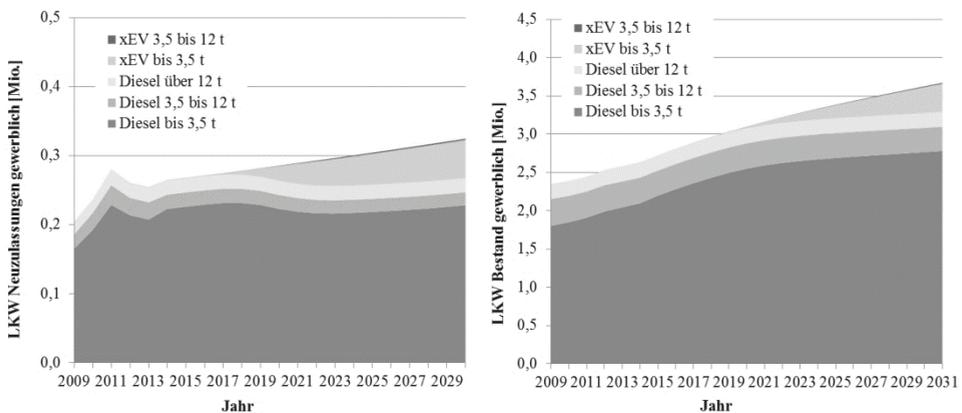
Für die Bestandentwicklung der Lkw wird analog zum bereits beschriebenen Verfahren das Bestandsszenario in Abbildung 50 entwickelt. Die Aufteilung der Lkw wird im Vergleich zum Pkw-Bereich um die Klasse des zulässigen Gesamtgewichtes ergänzt, da von einer signifikant unterschiedlichen Marktdurchdringung ausgegangen wird. Die Antriebsart „Benzin“ wird im Lkw-Bereich auf Grund der geringen derzeitigen Bedeutung vernachlässigt.

Abbildung 49: Entwicklung der Bestandszusammensetzung von Pkw mit Dieselantrieb und gewerblichen Haltern



Das Bestandsszenario zeigt einen signifikanten Zuwachs an Lkw bis zum Jahr 2030 um ca. 0,9 Mio. Fahrzeuge. Die Klasse der leichten Lkw gewinnt dabei klar an Bedeutung. Das basiert auf einer unterstellten starken Zunahme des Verteil- und Lieferverkehrs insbesondere im städtischen Bereich (vgl. Kapitel 2.1). Der angenommene Anteil der EV-Neufahrzeugverkäufe in der Klasse der leichten Lkw erreicht im Jahr 2030 knapp 20 %. Der EV-Bestandsaufbau bis 2030 beläuft sich auf knapp 0,4 Mio. bei einem Gesamtbestand aller Lkw von 3,7 Mio. Der Dieselantrieb wird nach diesem Szenario seine dominante Stellung trotz einem steigenden Elektrifizierungsgrad im betrachteten Szenario-Zeitraum behalten (knapp 90 %). Die Klasse der mittelschweren und schweren Lkw hat bezogen auf die Bestandszahlen nur einen Anteil von ca. 16 %. Da diese Klassen jedoch deutlich höhere Beladungszahlen und Jahresfahrleistungen aufweisen (vgl. Kapitel 2.1) ist der Anteil an der Verkehrsleistung wesentlich über den Tonnenkilometer der kleinen Lkw.

Abbildung 50: Entwicklung der Neufahrzeugverkäufe (links) und des Bestands (rechts) der gewerblich zugelassenen Lkw im Referenzszenario



### 3.5.4 Rahmendaten der Energieszenarien

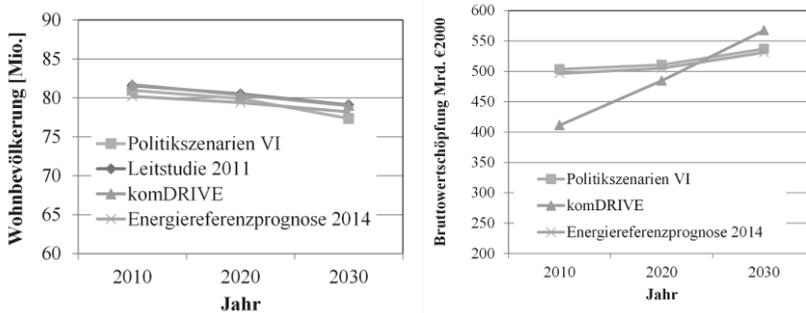
Die Prämisse der durchgeführten Szenarioanalyse der Energieversorgung mit einer Elektrifizierung des städtischen Wirtschaftsverkehrs ist, dass für die Energieversorgung die gesetzten Ziele der Energiewende auch zu den jeweiligen Zieljahren erreicht werden. Für Ziele, die nicht für 2030 terminiert werden sondern später, wird das Ziel linear interpoliert. Alle Ziele der Energiewende und der Status Quo sind dem aktuellen Monitoring-Bericht zur Energiewende entnommen (BMW, 2015). Folgend werden nur die Szenario-Annahmen zu politischen Zielen bis 2030 und allgemeine Trends angeführt, welche eine Relevanz für den Verkehrsbereich und Elektromobilität haben:

- Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 40 % bis 2020 und 55 % bis 2030 im Vergleich den Referenzemissionen des Jahres 1990,
- Absenkung des Primärenergiebedarfs um 50 % bis 2050; als Zwischenwert wird für das Jahr 2030 25 % interpoliert,

- Steigerung der Erneuerbaren Energien am Primärenergiebedarf auf mindestens 30 % bis 2030,
- Reduktion des Brutto-Stromverbrauchs um 10 % bis 2020; nicht berücksichtigt werden in den Szenarien bei diesem Ziel neue Stromverbraucher wie EV oder Wärmepumpenheizungen u.a.,
- Steigerung des Anteils der Erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung auf 35 % im Jahr 2020 und 50 % im Jahr 2030,
- Einhaltung des Kernenergie-Ausstiegsbeschlusses und keine Markteinführung von CO<sub>2</sub>-Abscheide-Kraftwerken mit Speicherung (Carbon Capture and Storage; CCS),
- Steigerung der Biokraftstoffquote am Endenergieverbrauch im Verkehr bis 2020 auf 10 %; Erfüllung der sogenannten Treibhausgasminderungsquote (Berücksichtigung von vorgelagerten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Biomasseanbau und der weiteren Verarbeitung) von 6 % bis 2020,
- Reduktion des Endenergiebedarfs im gesamten Verkehr um 10 % bis zum Jahr 2020 und 40 % bis 2050; für das Jahr 2030 wird ein interpolierter Zielwert von 20 % Reduktion angesetzt,
- EU-Neuwagen-Flottenverbräuche erreichen die gesetzten Ziele von 120 g/km bis 2014 und 95 g/km im Zeitraum zwischen 2022 bis 2024,
- Markteinführung von 1 Mio. EV bis 2020 und 6 Mio. EV bis 2030; im Szenario stellen die Zielgrößen die Werte für privat und gewerblich zugelassene Pkw und Lkw dar; der städtische Wirtschaftsverkehr ist dabei eine Teilmenge der Zielwerte.

Das beschriebene Energiesystemmodell benötigt zur Berechnung von kosteneffizienten Versorgungsstrategien auch die Vorgabe von ökonomischen und sozioökonomischen Daten sowie Annahmen zu Primärenergieträgerpreisen. Im Rahmen der betrachteten Szenarioanalyse wurde auf einem vorhandenen, konsistenten Datensatz aufgesetzt (vgl. Heinrichs und Markewitz, 2015). Zur Einordnung der im Projekt angenommenen Entwicklungen zu den Szenario-Rahmenparametern werden jeweils für die Studien „Politiksznarien VI“ Matthes et al. (2013), die „Leitstudie“ des BMU aus dem Jahr 2012 Nitsch et al. (2012) und die Energierferenzprognose aus dem Jahr 2014 Schlesinger et al. (2014) Vergleichswerte angegeben. So wird in den Szenarien von einer leicht sinkenden Bevölkerung bei einer moderat steigenden Bruttowertschöpfung ausgegangen. Dies deckt sich mit den Trends der zum Vergleich angeführten Energieszenarien (vgl. Abbildung 51). Die Bevölkerungsentwicklung entspricht der Variante „V1-W2“ der 13. koordinierten Bevölkerungsvorberechnung von DESTATIS mit einer Zuwanderung von 200.000 pro Jahr. Die Bruttowertschöpfung steigt mit durchschnittlich 1,2 % pro Jahr kontinuierlich an und ist als Trend über Fünfjahresperioden zu verstehen. Sie weist damit keine kurzzeitigen Schwankungen auf. Es werden noch weitere Trends im Szenario festgelegt die vertiefend in Linsen et al. (2012) sowie Heinrichs und Markewitz (2015) erläutert werden.

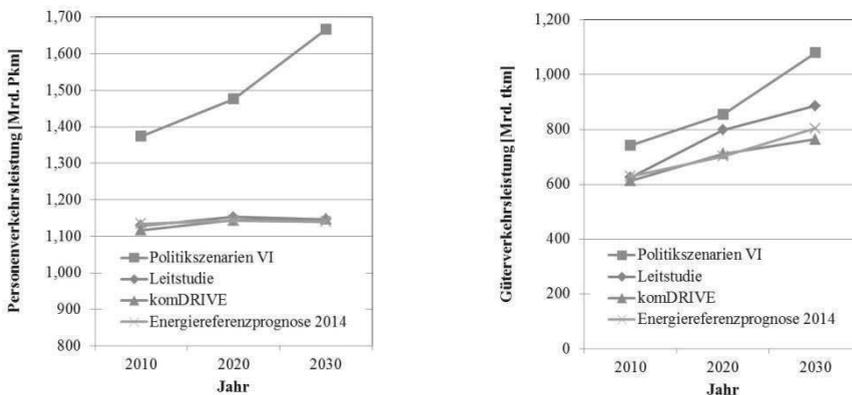
Abbildung 51: Auswahl an Trends zur Bevölkerung (links) und Bruttowertschöpfung (rechts) für Deutschland und Vergleich der komDRIVE-Annahmen zu anderen



Quelle: Energieszenarien Matthes et al., 2013; Nitsch et al., 2012; Schlesinger et al., 2014

Basierend auf den Annahmen zur wirtschaftlichen Entwicklung, der Bevölkerungsentwicklung und weiterer Trends wird die Nachfrage nach Verkehrsleistungen in konsistenter Weise abgeleitet. Die Entwicklung des Personen- und Güterverkehrs ist in Abbildung 52 dargestellt und den bereits genannten Energieszenarien gegenübergestellt. Im Personenverkehr wird noch bis 2020 von einer leicht steigenden Verkehrsleistung ausgegangen, welche nach 2020 bedingt durch den Bevölkerungsrückgang bei gleichzeitiger Sättigung der Pkw pro Einwohner stagniert. Beim Güterverkehr wird trotz steigender Logistikeffizienz von einem weiteren Wachstum ausgegangen. Dies maßgeblich ist bedingt durch die Entfernungszunahme durch zunehmende Arbeitsteilung und Digitalisierung damit stärker mögliches Global Sourcing sowie durch Bedienung distanzsteigernder, globaler Absatzmärkte. Zusätzlich bewirken der weiter wachsenden Anteil von Just-in-Time-Lieferungen sowie deutlich erhöhte Aufkommen im KEP-Bereich eine Steigerung der Güterverkehrsleistung.

Abbildung 52: Szenariotrend der Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr in Deutschland und Vergleich zu anderen Energieszenarien



Quelle: Matthes et al., 2013; Nitsch et al., 2012; Schlesinger et al., 2014

Die im vorigen Kapitel 3.5.2 vorgestellte Modellierung des städtischen Wirtschaftsverkehrs erlaubt mit den bereits gewonnenen Daten eine Berücksichtigung des Wirtschaftsverkehrs und dessen Entwicklung im Szenario.

Tabelle 23 gibt die errechneten Anteile des Wirtschaftsverkehrs und des Anteils des städtischen Verkehrs wieder. Die Anteile beziehen sich jeweils immer auf die gesamte Fahrleistung (Stadt- und Fernverkehr) der Pkw, Lkw sowie der Kombination. Der Güterverkehr mit Lkw wird in der Analyse definitionsgemäß zu 100 % dem Wirtschaftsverkehr zugerechnet. Dementsprechend sind die Anteile des städtischen Verkehrs und des städtischen Wirtschaftsverkehrs mit Lkw identisch. Sowohl die Anteile des gesamten Personenwirtschaftsverkehrs als auch des städtischen Anteils steigen in dem unterstellten Szenario an. Der Anteil des städtischen Personenwirtschaftsverkehrs mit Pkw liegt im Jahr 2030 bei 9,9 % und für den städtischen Güterwirtschaftsverkehr mit Lkw bei 73,6 % bezogen auf die Fahrleistungen. Bei letzterem machen sich insbesondere die niedrigere Auslastungsgrade des Straßengüterverkehrs i.V. zum Fernverkehr und die hohe Anzahl der leichten und mittleren Lkw bemerkbar, so dass der städtische Anteil an der Fahrleistung vergleichsweise hoch ausfällt. Unter den getroffenen Annahmen steigt der Anteil des Wirtschaftsverkehrs an der gesamten Fahrleistung mit Pkw und Lkw von 16,8 % im Jahr 2015 auf 19,5 % im Zeitraum 2030 an.

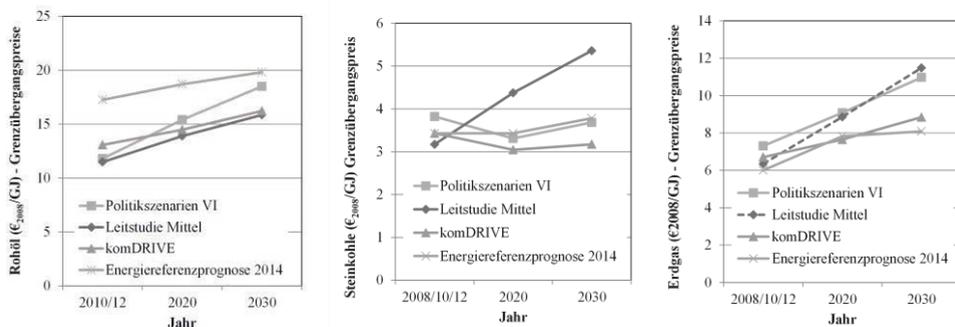
Weiterhin sind für die Energiesystemrechnung eine Festlegung der Energieträgerpreise und deren Trends notwendig. Die unterstellten Energieimportpreise für Erdöl, Erdgas und Kohle als wichtigste Primärenergieträger sind in Abbildung 53 dargestellt. Die unterstellten Energiepreise steigen moderat in den nächsten zwei Dekaden an. Alle dargestellten Preise sind auf das Jahr 2008 diskontiert. Anzumerken bleibt, dass die Energieträgerpreise bei den in der Analyse unterstellten sehr ambitionierten Klimaschutzziele eher nachrangig das Ergebnis beeinflussen, da sehr viele Maßnahmen zur Erreichung des CO<sub>2</sub>-Reduktionsziels von –55 % im Jahr 2030 getroffen werden müssen und Kostenkriterien teilweise nachrangig sind.

Tabelle 23: Errechner Anteil des städtischen Verkehrs, Wirtschaftsverkehrs und städtischen Wirtschaftsverkehrs an der jeweiligen Gesamtfahrleistung im Szenario

Angaben in %	Jahr	städtischer Verkehr	Wirtschaftsverkehr	städtischer Wirtschaftsverkehr
		% vom gesamten Straßenverkehr		
Anteil an der Pkw-Fahrleistung gesamt	2015	60,9	14,1	8,6
	2020	61,0	14,4	8,8
	2030	61,2	16,2	9,9
Anteil an der Lkw-Fahrleistung gesamt	2015	70,4	100	70,4
	2020	71,3	100	71,3
	2030	73,6	100	73,6
Anteil an der Pkw- und Lkw-Fahrleistung gesamt	2015	62,1	25,5	16,8
	2020	62,5	26,4	17,5
	2030	63,1	28,8	19,5

Zusammen mit den beschriebenen Rahmendaten und Trends kann unter Berücksichtigung der technischen und ökonomischen EV-Daten der Fahrzeuge und deren Aggregation zu Bestandsdaten eine Energiesystemmodellrechnung zur Bestimmung des Einflusses der Elektrifizierung des Wirtschaftsmodells erfolgen. Die Ergebnisse werden im Ergebnis-Kapitel 4.5 ausführlich beschrieben.

Abbildung 53: Unterstellte Energiekostenentwicklung in den Szenarien und Einordnung zu anderen Energieszenarien Vergleich zu anderen Energieszenarien



Quelle: Matthes et al., 2013; Nitsch et al., 2012; Schlesinger et al., 2014

## 4. Ergebnisse

(N. Döge)

Dieses Kapitel stellt die Zusammenstellung der Ergebnisse jener Forschungsarbeiten dar, deren Methodik im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurde. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in der Reihenfolge analog zum vorherigen Kapitel.

### 4.1 Fahrzeug- und Flottenebene

(N. Döge, S. Marker)

Dieser Abschnitt enthält alle durch das komDRIVE Projekt gewonnenen Ergebnisse auf Fahrzeug und Flottenebene. Dies umfasst Erkenntnisse aus einer vertiefenden Analyse der KiD 2010, der durchgeführten Nutzererhebung und des korrespondierenden Nutzerworkshops, des durchgeführten Expertenworkshops sowie der vertiefenden Analyse jener Fahrprofile, die mittels Datenlogger erhoben wurden.

#### 4.1.1 Ergebnisse der Nutzererhebung und Workshops (Erfahrungen, Akzeptanz, Probleme mit E-Mobilität)

(W.-H. Arndt, N. Döge, W. Siegert)

##### Durchführung/Rücklauf

Im November/Dezember 2014 und März/April 2015 wurde die in Kapitel 3.1.2 beschriebene Online-Nutzererhebung, die eine Befragung von Flottenbetreibern auf der einen Seite und Fahrern in WIV Flotten auf der anderen Seite vorsah, durchgeführt. Ursprünglich sollte die Erhebung nur eine Welle umfassen. Da der Rücklauf, trotz zweimaligen Erinnerns, jedoch hinter den Erwartungen zurückblieb, wurde eine zweite Erhebungswelle durchgeführt. Insgesamt wurden innerhalb von beiden Wellen 8.000 Unternehmen/Organisationen in Berlin und dem Berliner Umland per Email kontaktiert.

Den Flottenbetreiberfragebogen öffneten 214 Betreiber und 90 Betreiber füllten diesen vollständig aus, wodurch sich eine vergleichsweise geringe Rücklaufquote von 1,1 % ergibt.

Der Fahrerfragebogen wurde von 70 Personen geöffnet und von 36 Personen wurde mindestens eine Frage beantwortet, was 0,8 % der eingeladenen Personen entspricht.

Schon während der Befragung wurde deutlich, dass der Rücklauf vergleichsweise gering ausfallen würde. Bei Rücksprache mit den Probanden via Email oder telefonisch wurden zu allererst folgende Gründe für eine Nichtteilnahme angeführt:

- keine Zeit,
- keine Flotte, kein Fahrzeug,
- kein Interesse,
- Einzelunternehmer ohne Fahrzeug,
- zu viele parallele Anfragen.

Während des im Projekt durchgeführten Expertenworkshops wurde auch von Vertretern anderer Forschungsprojekte geäußert, dass die Teilnahmebereitschaft potentieller Probanden insbesondere im Zusammenhang mit Fragestellungen rund um das Thema Elektromobilität spürbar zurückgeht. Ein Ansatz, diesem Problem entgegen zu wirken, wäre eine bessere Abstimmung zwischen den Forschungsprojekten z.B. über die Clearingstelle Verkehr, um Erhebungen gemeinsam, nach einem einheitlichen Design durchzuführen oder bestimmte Fragen auch in die großen Standarderhebungen aufzunehmen. Auf diesem Wege ließen sich Mehrfacherhebungen zu ähnlichen Themen vermeiden, der Aufwand für die Probanden ließe sich reduzieren.

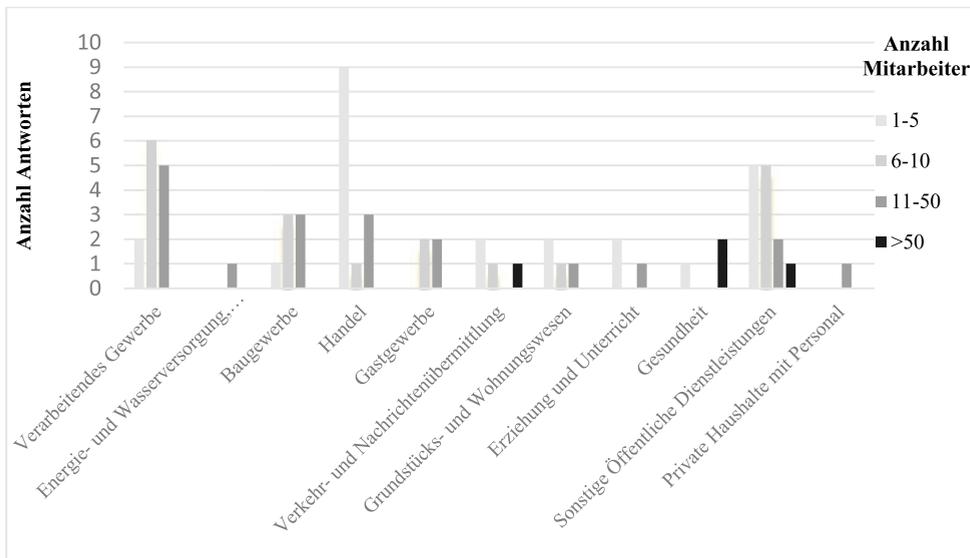
Auch wenn die komDRIVE-Erhebung nicht in der Lage gewesen ist, wie ursprünglich geplant, vertiefende branchenspezifische Flottencharakteristika mit einer für statistisch-analytische Zwecke hinreichenden Zahl an Fällen zu generieren, so konnten doch Erfahrungen, Einstellungen und Vorbehalte in Bezug auf Elektromobilität erfragt werden. Die Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

### Ergebnisse - Flottenbetreiber

Auf Seite der Flottenbetreiber entstammten die meisten antwortenden Betriebe den Wirtschaftszweigen „Verarbeitendes Gewerbe“, „Handel“ und „Sonstige Öffentliche Dienstleistungen“.

In Abbildung 54 ist zu sehen, dass sich der überwiegende Teil der Antwortenden auf Betriebe mit 1–50 Mitarbeitern verteilte. Nur in den Wirtschaftszweigen „Verkehr- und Nachrichtenübermittlung“, „Gesundheit“ und „Sonstige öffentliche Dienstleistungen“ antworteten auch Unternehmen und Organisationen mit mehr als 50 Mitarbeitern.

Abbildung 54: Absolute Rückläufe nach Mitarbeiterzahl und Wirtschaftszweig



In Bezug auf die Fuhrparkzusammensetzung antwortete mit 64 % der überwiegende Teil der Befragten, Pkw in ihren Fuhrparks zu besitzen, gefolgt von Lieferwagen (< 3,5 t) mit 20 %

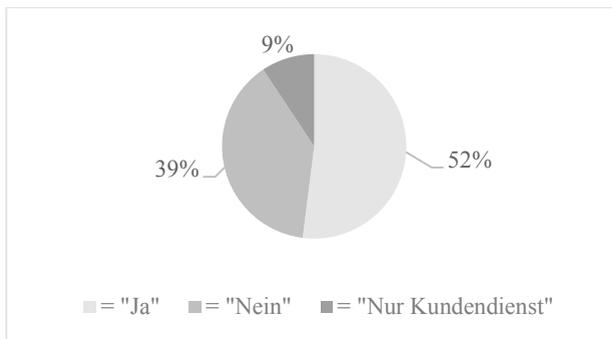
und kleinen Lkw (3,5 t–7 t) mit 11 %. Diese Anteile spiegeln auch in etwa jene der in Kapitel 3.1.1 dargestellten KiD (2010) Erhebung wider.

Die einzige größere Abweichung in der komDRIVE-Erhebung stellt der Umstand dar, dass etwa 20 % der Befragten angaben, auch ein oder mehrere Fahrräder in ihrem Fuhrpark zu haben. Dieses Merkmal wird in der KiD Erhebung nicht erfasst.

Um genauere Informationen bezüglich der Einsatzmuster zu gewinnen und daraus mögliche Zeitfenster ableiten zu können, wann die Fahrzeuge für die Teilnahme an Systemdienstleistungen (SDL) zur Verfügung stünden, wurden diese detailliert erfragt. Aufgrund der geringen Fallzahlen kann die Auswertung nicht branchenspezifisch erfolgen. Dennoch lassen die Fallergebnisse der Wirtschaftszweige mit den meisten Antwortenden (Verarbeitendes Gewerbe, Handel, Sonstige Öffentliche Dienstleistungen) vermuten, dass es auch innerhalb der Wirtschaftszweige keine homogenen Einsatzmuster gibt.

Wie Abbildung 55 zeigt, gab rund die Hälfte der Flottenbetreiber an, ihre Fahrzeuge auch am Wochenende einzusetzen. Ein geringerer Teil setzt am Wochenende keine Fahrzeuge und eine Minderheit nur für den Zweck des Kundendienstes ein.

Abbildung 55: Fahrzeugeinsatz am Wochenende (n = 90)



Bezüglich der Einsatzdauer lassen sich nur über die Fahrzeugklassen der Pkw und Lieferwagen (< 3,5 t zGG) verwertbare Aussagen treffen, da in beiden Fällen mehr als 20 Betreiber antworteten. So lässt sich für die Nutzung beider Fahrzeugklassen festhalten, dass mehr als die Hälfte der Befragten angab, dass die durchschnittliche Nutzungsdauer bei maximal bzw. unter vier Stunden lag. Zudem gab die Mehrheit der Befragten für beide Fahrzeugklassen an, in der Regel maximal eine Stunde nach oben bzw. unten von dieser Nutzungsdauer, in seltenen Fällen bis zu zwei Stunden davon abzuweichen.

Die Abfrage der Haupteinsatzzeiten (Mehrfachantwort von vier Stunden Zeitfenstern möglich) ergab, dass, wie Abbildung 56 aufzeigt, der Großteil der Flotten im Zeitraum zwischen 8 und 16 Uhr täglich operiert, wobei der Zeitraum zwischen 16 und 20 Uhr ebenfalls von großer Bedeutung ist. Eine genauere Aufschlüsselung nach Wirtschaftszweigen ist in Abbildung 57 zu sehen.

Hier wird deutlich, dass zwischen den Wirtschaftszweigen doch erhebliche Unterschiede bestehen. Während zum Beispiel die Betreiber aus dem Baugewerbe antworteten, dass ihre Fahrzeuge hauptsächlich zwischen 8 und 16 Uhr im Einsatz sind, gaben die Antwortenden

aus dem Wirtschaftszweig „Verkehr- und Nachrichtenübermittlung“ an, dass ihre Flotten über den ganzen Tag hinweg im Einsatz sind. Die am wenigsten genutzten Zeitfenster wären somit jene zwischen 20 Uhr–24 Uhr und 0 Uhr–4 Uhr.

In diesen Zeiträumen ist die Mehrzahl der Fahrzeuge der antwortenden Betreiber, mit Ausnahme der Wirtschaftszweige „Verkehrs- und Nachrichtenübermittlung“ und „Grundstücks- und Wohnungswesen“, nicht im Einsatz und stünde somit z.B. zur Teilnahme an SDL und zum Laden zur Verfügung.

Abbildung 56: Haupteinsatzzeiten der Fahrzeuge im eigenen Fuhrpark (n = 90, Mehrfachauswahl möglich)

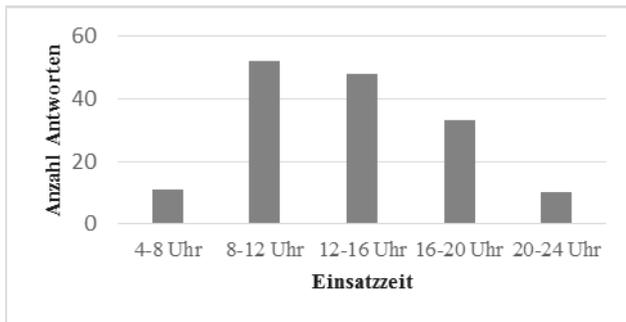
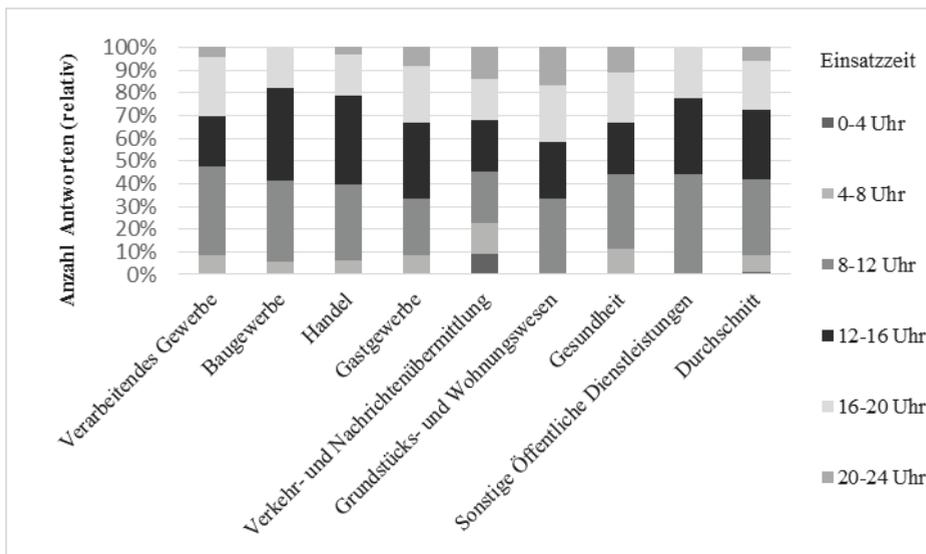


Abbildung 57: Haupteinsatzzeiten der Fahrzeuge im eigenen Fuhrpark nach Wirtschaftszweig (n = 90, Relative Auswahlhäufigkeit, Mehrfachauswahl möglich)



Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass auch innerhalb eines Wirtschaftszweiges, so zum Beispiel bei den KEP-Dienstleistern, die zeitlichen Einsatzprofile erheblich voneinander abweichen können.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Möglichkeit das Einzelfahrzeug bzw. die Flotte elektrifizieren zu können, ist der Zugang zu bzw. die notwendige Nachrüstung von Ladeinfrastruktur am Fahrzeugstandort nach Betriebsschluss und während der Standzeiten (z.B. zum Be- und Entladen).

Bezüglich des Fahrzeugstandortes nach Betriebsschluss gab eine geringe Mehrheit der Flottenbetreiber an, dass die Fahrzeuge nach dem Einsatz in der Nähe der Wohnung des Fahrers anstatt auf dem eigenen Betriebsgelände geparkt würden. Ein dezentrales Abstellen der Fahrzeuge würde, gerade im Innenstadtbereich, bedeuten, dass die Fahrer welche ihr Fahrzeug mit nach Hause nehmen und im öffentlichen Straßenraum parken, auf die Schaffung einer öffentlichen Ladeinfrastruktur angewiesen wären. Somit kann festgehalten werden, dass die Elektrifizierung einer Flotte, deren Fahrzeuge nach Betriebsschluss auf dem Firmengelände verbleiben weniger Barrieren gegenüberstehen. Hier ist insbesondere das Einrichten einer Ladeinfrastruktur mit weniger Aufwand (sowohl monetär als auch organisatorisch) umzusetzen. Zudem können die Fahrzeuge für das Anbieten von SDL ohne größeren Aufwand durch den Aggregator gepoolt werden. Außerdem kann dann davon ausgegangen werden, dass diese Fahrzeuge nach Dienstschluss nicht zusätzlich für private Fahrten genutzt wird, was das Zeitfenster, in dem SDL angeboten werden können, vergrößern würde. Folglich ist das Elektrifizierungspotential in jenen Wirtschaftszweigen größer, in denen das Fahrzeug nach Betriebsschluss auf dem Betriebshof verbleibt.

Um während des Einsatzes ein Zwischenladen realisieren zu können, ist es bei einem nicht ubiquitären Vorhandensein einer öffentlichen Ladeinfrastruktur von Bedeutung, dass die Fahrer konstante Routen zurücklegen, um hier ggf. gezielt an den Haltepunkten Ladeinfrastruktur schaffen zu können. Die insgesamt 63 antwortenden Betreiber gaben diesbezüglich an, dass mit Ausnahme von Fahrrädern die Mehrheit der Pkw, Lieferwagen (< 3,5 t zGG) und kleinen Lkw eher variable denn konstante Routen zurücklegen.

Die Betreiber, die angaben, dass ihre Fahrzeuge mehrheitlich auf konstanten Routen unterwegs sind, entstammten den Wirtschaftszweigen:

- Verarbeitendes Gewerbe,
- Handel,
- Gastgewerbe,
- Verkehr- und Nachrichtenübermittlung,
- Gesundheit,
- Sonstige öffentliche Dienstleistungen.

Aufgrund der geringen Fallzahlen kann jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, welches Einsatzmuster in der jeweiligen Branche das vorherrschende ist.

Für Fahrzeuge mit eher variablen Routen müssten an allen relevanten Abstellorten im städtischen Raum Lademöglichkeiten bereitgestellt werden. Zudem müsste es sich um einfach zu handhabende Schnelladeeinrichtungen handeln, da, wie die Umfrage ergab, die Fahrzeuge während des Einsatzes, nur in wenigen Fällen (was auch vom Wirtschaftszweig abhängt) länger als 60 Minuten am selben Ort still stehen.

In Bezug auf die Erfahrungen, die mit Elektromobilität gemacht wurden, gaben neun von 62 auf diese Frage antwortenden Betreiber an, bereits elektrische Fahrzeuge einzusetzen. Von diesen Betreibern hatte einer elektrische Krafträder, sechs hatten Pkw und zwei einen oder

mehrere Lieferwagen in der Flotte. Bei diesen handelte es sich mit zwei Ausnahmen um rein batterieelektrische Fahrzeuge.

Als Grund für die Anschaffung wählte die Mehrheit der neun Betreiber die Option „Ökologische Aspekte“ gefolgt von den Kategorien „Test“ und „Marketing/Promotion“. Hingegen wurde die Antwort „Ökonomische Aspekte“ nur zweimal ausgewählt.

Die positiven und negativen Erfahrungen, die mit Elektromobilität gemacht worden sind, wurden ebenfalls erfasst. Diese sind in Tabelle 24 dargestellt:

Tabelle 24: Positive und negative Erfahrungen der Flottenbetreiber mit Elektromobilität

Positiv	Negativ
Energieverbrauch, sparsam	Anschaffungskosten
Leise	Nicht genug Lademöglichkeiten
Wartungsarm, Verschleiß	Reichweite weicht von der Herstellerangabe ab
unkompliziert	Batteriekapazität temperaturabhängig
Bequem wie herkömmlicher Pkw	Unflexibel
Gute Straßenlage	Fahrzeugverfügbarkeit
Schnelle Beschleunigung	

Bei den antwortenden Betreibern wurden als positiv vor allem mehrmals der geringe Geräuschpegel beim Fahren, das gute Fahrgefühl und der geringe Wartungsaufwand hervorgehoben. Als negativ wurden in fast allen Fällen die hohen Anschaffungskosten bemängelt. Diese könnten zum Teil durch die im Frühjahr 2016 temporär eingeführte Kaufprämie kompensiert werden. Die Kaufprämie ist zum Zeitpunkt der Befragung nicht absehbar. Insgesamt gaben sechs der neun Betreiber mit Erfahrung an, dass sie planen, ihre Flotte an E-Fahrzeugen weiter auszubauen.

Dass die ökonomischen Rahmenbedingungen nach wie vor die größte Investitionsbarriere darstellen, zeigt auch das Ergebnis der Befragung derjenigen, die angaben, keine Erfahrungen mit Elektromobilität gemacht zu haben. Von den 55 antwortenden Betreibern sagten rund zwei Drittel aus, dass sie bereit wären, bei gegebener ökonomischer Rentabilität in E-Fahrzeuge zu investieren. Die Hälfte äußerte zudem einen zusätzlichen Informationsbedarf.

Die Frage nach den Gründen, welche die Betreiber momentan noch davon abhalten in E-Fahrzeuge zu investieren, wurde folgendermaßen beantwortet (da es sich um eine offene Frage handelte, sind hier jene Gründe wiedergegeben, die mindestens zweimal sinngemäß genannt wurden):

- Anschaffungskosten,
- Reichweitenbegrenzung,
- Lademöglichkeiten,
- Fahrzeugverfügbarkeit.

Von Netz- bzw. Systemdienstleistungen hatte nur weniger als die Hälfte der 59 auf diese Frage antwortenden Betreiber gehört. Die Mehrheit äußerte diesbezüglich auch, keinen Informationsbedarf zu haben.

### Fahrer in Flotten

Die Fahrer in Wirtschaftsverkehrsflotten wurden vor allem nach ihren Erfahrungen mit Elektromobilität im Betriebsalltag bzw. Vorbehalten bezüglich des Einsatzes von E-Fahrzeugen befragt.

Insgesamt gaben sieben der 35 antwortenden Fahrer an, schon Erfahrungen mit Elektrofahrzeugen gemacht zu haben. Von den Fahrern wurden die in Tabelle 25 dargestellten Aspekte positiv bzw. negativ bewertet.

Tabelle 25: Positive und negative Erfahrungen der Fahrer mit Elektromobilität

Positiv	Negativ
Energieverbrauch, sparsam, geräuscharm	Nicht genug bzw. defekte oder zugeparkte Lademöglichkeiten
Bequem, komfortabel	Begrenzte Reichweite
Schnelle Beschleunigung	

Zudem antwortete die große Mehrheit der Fahrer (22 von 27), dass sie in Zukunft gern ein Elektrofahrzeug im Alltag nutzen würden. Auf Seiten der Fahrer besteht zudem ein großes Interesse daran, mehr über das Thema Elektromobilität zu erfahren.

Die größten Probleme werden in folgenden Aspekten gesehen (da es sich um eine offene Frage handelte, sind hier jene Gründe wiedergegeben, die mindestens zweimal sinngemäß genannt wurden):

- Anschaffungskosten,
- mangelhafte Lademöglichkeiten (auch während des Einsatzes),
- Reichweitenbegrenzung.

Als positiv wurden vor allem folgende Aspekte bewertet:

- umweltschonend, emissionsarm,
- geräuscharm.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sowohl Fahrer als auch Betreiber, die bereits Erfahrungen mit E-Fahrzeugen in ihren Betrieben/Organisationen gemacht haben, mit dem positiven Fahrgefühl, dem geringen Energieverbrauch, der positiven Umweltwirkung (Lärm, Abgase) die gleichen Aspekte hervorheben.

Die Anschaffungskosten sind nach wie vor der Hauptgrund, nicht in den Ausbau des E-Fahrzeugbestandes zu investieren. Zudem besteht gerade bei den Betreibern und Fahrern, die keine Erfahrungen gesammelt haben, eine große Unsicherheit, ob sich das Fahrzeug mit seinen Charakteristika in den Betriebsalltag integrieren lässt. Hier ist zu beobachten, dass (natürlich) die Denkmuster von Fahrzeugnutzern konventionell angetriebener Fahrzeuge vorherrschend sind, die sich mit folgenden Fragen/Aussagen umschreiben lassen:

- Was mache ich, wenn die Batterie leer ist?
- Mit meinem E-Fahrzeug kann ich doch nicht überall „tanken“!

Diese miteinander verknüpften Aussagen wären nichtig, wenn die Fahrzeugreichweite ausreichte, um den täglichen Einsatzradius abzudecken.

Dass diese Bedingung in der Mehrzahl der Fälle erfüllt ist, das heißt, Pkw und leichte Nutzfahrzeuge nicht während des täglichen Einsatzes nachgeladen werden müssen, zeigen die in den folgenden Kapiteln angestellten statistischen Auswertungen.

Dennoch stellt die Verfügbarkeit von Ladestationen nach Betriebsschluss insbesondere für im Innenstadtgebiet wohnende Nutzer ein erhebliches Problem dar, da bei Mitnahme des Fahrzeuges an den Wohnort im öffentlichen Straßenraum Lademöglichkeiten geschaffen werden müssten. Die Nachrüstung von Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof stellt weniger eine technische, als eine finanzielle Hürde dar.

### **Ergebnisse des Nutzerworkshops**

Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, fand am 16.07.2015 zwischen 16 und 19 Uhr am ZTG der TU Berlin der Nutzerworkshop mit Fahrern und Betreibern in bzw. von Wirtschaftsverkehrsflotten statt. Insgesamt nahmen an der Veranstaltung neun Projektexterne (von 17 Angemeldeten) teil, um die bereits zuvor vorgestellten Fragestellungen zu diskutieren.

Bezüglich der positiven Erfahrungen, die im Zusammenhang mit Elektromobilität gemacht wurden, konnte festgehalten werden, dass insbesondere bei Kurierdiensten die Elektrifizierung von kleinen Fahrzeugen und Lastenrädern<sup>9</sup> kein Problem darstellt. Fehlerhaftem Laden kann vorgebeugt werden, wenn die Fahrzeuge im Depot geladen werden – zum Beispiel in einer gemieteten Halle mit fest installierten Ladepunkten, was sich allerdings kostenseitig negativ auf die Gesamtbilanz auswirkt. Erfahrungen hinsichtlich der Batteriekapazität wurden generell als gut erachtet. Die Reichweite nahm bei einem Betreiber bei verschiedenen Fahrzeugen ab, aber die Kapazität betrug nach drei Jahren noch durchschnittlich 95 % der ursprünglichen. Weitere positive Erfahrungen mit E-Fahrzeugen, die sich teilweise auch mit den Ergebnissen der Unternehmensbefragung decken, waren:

- Entspanntes Fahren durch geräuscharme Fahrzeuge,
- Ansporn zu sparsamen Fahren,
- Verlängerung der Einsatzdauer und höhere Lasten möglich (bei Fahrradkurieren),
- Sicherheit durch verstärkte Präsenz auf der Straße (bei Fahrradkurieren),
- Imagegewinn, da „umweltfreundlich unterwegs“.

Als negativ wurde zu allerforderst die Situation der Ladeinfrastruktur bewertet, da sich Unternehmen bislang nicht auf eine funktionierende öffentliche Ladestruktur verlassen können. So wurde von den Beteiligten bemängelt, dass es zu wenig Ladepunkte im Stadtgebiet gäbe. Auch bedarf es nach Umstellung der Fahrzeugflotte noch einer mentalen Anpassung der Fahrzeugführer, da zum Einen durch die Fahrer auf den Ladestand geachtet werden muss, da bei Ausfall des Fahrzeuges keine Rückfallebene gegeben ist. Zum anderen hätten die Fahrer ihren Fahrstil anzupassen, da dieser, erfahrungsgemäß, den Reichweiten-

---

<sup>9</sup> Es ist zu berücksichtigen, dass Lastenräder nur dann ökologisch sinnvoll einsetzbar sind, wenn sie ein ICEV ersetzen.

verlust der Fahrzeugbatterien beeinflussen würde. Als problematisch wurde auch bemängelt, dass bei der Nutzung von Car-Sharing-Angeboten (in diesem Buch im Rahmen der Betrachtung des WIV nicht berücksichtigt) das Ladeverhalten der Nutzer unberechenbar ist, diese Fahrzeuge somit nur schwer verlässlich einzuplanen sind.

Die zweite Fragestellung beschäftigte sich mit den Vorbehalten, Vorurteilen und Barrieren, die in Bezug auf Elektromobilität im Wirtschaftsverkehr von Seiten der Unternehmen und der Fahrer bestehen.

Hier kann resümiert werden, dass insbesondere in Bezug auf größere Fahrzeuge die meisten Unklarheiten/Wissenslücken bestehen.

Weitere Fragen waren unter anderem:

- Wie sollen Ladestrukturen für 18–20 m lange Busse oder für ganze Flotten geschaffen werden?
- Welche Kapazitäten bieten die Verteilernetze (insbesondere für das Laden von zuhause)?

Als im Zusammenhang mit Elektromobilität erwähnte Barrieren und Vorurteile wurden auch folgende Punkte genannt:

- Verringerung der Leistung durch Nebenverbrauch (z.B. Hydraulik, Klimaanlage, Heizung),
- Widerspruch zwischen der wirtschaftlich notwendigen hohen Fahrleistung und der geringen Reichweite der Fahrzeuge,
- Keine Informationen zum tatsächlichen Wertverfall (z.B. fehlender Gebrauchtwagenmarkt),
- Keine Informationen zu Ladesäulen (Anzahl, Standorte, Ausbaukonzept),
- Verifizierbarkeit der niedrigeren Wartungsintensität von Elektrofahrzeugen,
- Fahrzeugverfügbarkeit (besonders größere und Spezialfahrzeuge).

Aus dieser Sammlung von Vorurteilen aber auch klar formulierten Wissenslücken kann somit geschlussfolgert werden, dass unter den Unternehmen und Fahrern ein erheblicher Informationsbedarf besteht: Diese ungenügende Informationslage und die Unwissenheit um bestehende Informationsmöglichkeiten wurde von den Anwesenden zudem als einer der Hauptgründe für das Zögern vieler Unternehmen in Bezug auf eine Anschaffung von EV genannt.

Da dieser Sachverhalt sich bereits in der zuvor durchgeführten Nutzererhebung herausstellte, wurde zudem diskutiert, wie die Informationslage verbessert werden könnte, d.h. welche Informationen und welche Art der Zurverfügungstellung benötigt werden. Die Diskussion ergab folgende Informationsbedarfe:

- Kostenvergleiche (Verbrennungs- vs. Elektromotor),
- Übersichten über zur Verfügung stehende Modelle,
- Möglichkeit für Abgleich mit eigenem Unternehmensprofil/eigenen Anforderungen (Passt ein E-Fahrzeug in das Flottenprofil und wenn ja, welches?),
- Anforderungen und Schulungsbedarf seitens der Fahrer,
- Übersicht über mögliche Anschaffungsoptionen (Händler/Leasing/Neukauf),

- Informationen zu veränderten Anforderungen an das Flottenmanagement,
- Information zu den TCO (total costs of ownership),
- Checklisten für die Anschaffung,
- Information und Aufklärung der Fahrer und Nutzer,
- Vorführ- und Testmöglichkeiten.

Abschließend wurde diskutiert, welche konkreten Maßnahmen Flottenbetreiber motivieren würden, mehr Elektrofahrzeuge in ihre WIV Flotten zu integrieren.

Folgende Punkte wurden dabei genannt:

- Mehr neutrale Umschlag-Hubs (Räume für das Umsatteln auf kleinere E-Fahrzeuge),
- Ausleihmöglichkeiten zum Fahrzeugtest vor der Anschaffung,
- Leasing-Angebote (z.B. der Batterie) um Anschaffungskosten zu senken,
- Sonder-Afa,
- Busspurnutzung (wurde unter den Anwesenden sehr kontrovers diskutiert),
- Abstellmöglichkeiten für Elektro-Fahrräder,
- Orientierung der staatlichen Förderung an Betriebskosten (ganzheitliche Betrachtung/Kostentransparenz),
- Neuverteilung/Reorganisation des Straßenraums (z.B. Fahrradstreifen auf der Straße für E-Lastenräder),
- Öffentliche Flotten als Pioniere (Vorbildcharakter).

### **Zusammenfassung und diskutierte Lösungsansätze**

Es wurden im Kurierbereich überwiegend positive Erfahrungen mit Elektrofahrzeugen gemacht. Besonders das Fahrgefühl wird von den Nutzern als entspannend empfunden. Öffentliche Ladestrukturen und Informationen sind derzeit noch in zu geringem Umfang vorhanden. Vorurteile gibt es besonders bei großen Fahrzeugen, die noch von „Kinderkrankheiten“ geplagt sind. Es fehlen Informationen aus Langzeitanalysen (z.B. Wertverfall, Wartung) und einheitliche, realistische und individuell zugeschnittene Schätzungen zur Wirtschaftlichkeit von Elektroflotten. Um Elektromobilität zu fördern, werden neben Subventionierungs-/Abschreibungsmöglichkeiten, was durch die Politik nun aufgegriffen wurde, vor allem Ausleih- und Testmöglichkeiten gewünscht. Der Informationsbedarf ist groß (Kosten, Fahrzeuge, Anschaffung, usw.). Er sollte durch individuelle Aufklärung der Unternehmen und Nutzer gedeckt werden. Das bedeutet sowohl praktische Testmöglichkeiten als auch theoretische Überlegungen, ob und welche E-Fahrzeuge für spezielle Anforderungen Sinn machen z.B. in Form von Checklisten.

#### **4.1.2 Ergebnisse des Expertenworkshops zu Datenverfügbarkeit und Vergleichbarkeit**

(W.-H. Arndt, N. Döge, W. Siegert)

Am 16. April 2015 wurde ein Expertenworkshop, obige Thematik betreffend, erfolgreich am ZTG der TU Berlin durchgeführt. Das Projekt komDRIVE und Fragestellungen in Bezug auf Datenverfügbarkeit, Erhebungsprobleme und Datenverwertung in Bezug auf den städtischen

Wirtschaftsverkehr und seiner Elektrifizierung wurden den Teilnehmern, die den Bereichen Wissenschaft, Forschung und Verwaltung angehören, präsentiert. Danach folgten zwei weitere Inputvorträge des Öko-Instituts e.V. und der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin. Im Anschluss folgten zwei Gruppenarbeitsphasen und eine moderierte Gesamtdiskussion.

Als für eine Elektrifizierung des WIV bedeutende Forschungsansätze/-inhalte wurden folgende erachtet:

Nutzer/Fahrdaten:

- Bessere Kenntnis über Halter, Fahrleistung und Kosten,
- Technologie:
- Modulare Fahrzeuge,
- Gesicherte Lebensdauerprognosen,
- Marktreife Serienfahrzeuge (LNF),
- Verbesserung der Reichweite/Batteriegewicht,
- Batterietechnologie (günstig, lange Lebensdauer, hohe Energiedichte),
- Schnellladefähigkeit,

Anreize/Förderung Nutzerakzeptanz:

- Anreize für Elektrofahrzeuge,
- Aufklärung über Vorteile der Fahrzeuge (Rekuperation, Wartungsarmut),
- Kommunikation,

Umweltauswirkungen:

- monetäre Einschätzung der Umweltvorteile,
- Planung/Logistik:
- Umstrukturierung der Distributionsnetzwerke,
- Ökonomie:
- Zusammenführung von Wirtschaftlichkeits- und Akzeptanzstudien,
- Kostenverringerung Anschaffung,

Sonstiges:

- E-Mobilität und Smart Grids,
- E-Bikes/Lastenräder,
- Geschäftsmodelle,
- Bestandsmodelle.

In der Forschung kommen folgende methodische Ansätze zum Einsatz:

- explorative, empirische Forschungsansätze,
- erklärungsorientierte Ansätze,
- Leitfadeninterviews,
- Befragungen,
- Auswertung von Fahr- und Ladedaten,
- Typologisierung.

Bezüglich der Datenverfügbarkeit wurde von den Teilnehmenden berichtet, dass sich mit den bereits in Kapitel 2.1 dargestellten großen Erhebungen eine Vielzahl von Sachverhalten analysieren ließe, der Datenbestand allerdings oftmals, gerade wenn es um die Ableitung

spezifischer Anforderungen an E-Fahrzeuge geht, nicht ausreicht, sodass der überwiegende Teil von Projekten eigene Erhebungen durchführen muss.

So stellte sich schon bei der vergleichsweise geringen Zahl an Teilnehmern heraus, dass aktuell in vielen Forschungsprojekten zur Elektromobilität ähnliche Daten erhoben und vergleichbare Berechnungs- und Prognosemethoden zum Einsatz kommen, die allerdings häufig unabhängig voneinander konzipiert bzw. angewandt werden. Durch die unterschiedlichen Inhalte der Erhebungen, dem abweichenden Erhebungsdesign und den variierenden Auswertungsmethoden sind die gewonnenen Daten bzw. Ergebnisse häufig nicht miteinander vergleichbar. Ein zentrales Ergebnis des Workshops ist, dass durch eine bessere Quervernetzung bzw. die Einrichtung eines Datenportals, in das Untersuchungsergebnisse eingespeist werden können und durch eine Standardisierung der Fragebögen- und Frageninhalte sowie der Antwortkategorien potentielle Synergien zwischen den Forschungsvorhaben besser genutzt werden könnten. Dies wurde z.B. über die Begleitforschung zu den Schaufensterprojekten schon angestoßen, kann aber noch intensiviert betrieben und auf andere Forschungsprogramme ausgedehnt werden. Die Diskussion um notwendige Datenbedarfe, die gegenwärtig nicht in Sekundärquellen vorhanden sind, für die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten mit Fokus auf E-Mobilität im WIV aber von hoher Bedeutung sind, ergab folgende Liste:

- Verfügbarkeit und Eigenschaften von Ladestationen (Anzahl und Ort, öffentlicher oder privater Raum) und ökonomische Verhalten/Aktivitäten dort,
- Fahrverhalten über längeren Zeitraum – Zeitreihen (z.B. unterschiedliche Wege bei Pflegediensten) an Stelle unterschiedlicher Stichtage,
- Anteile der Fahrten in urbanen Räumen in Entfernungskategorien (eine Differenzierung von Nah- und Stadtverkehr, also ein Aufzeigen nicht nur des lokalen, sondern des tatsächlichen Verkehrs auf der Straße),
- valide Schätzung des Fahrzeugaufkommens (die Schätzungen der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [FGSV] sind hier zu ungenau),
- Details zum Stromverbrauch und zur Stromnutzung in welchen Netzen,
- Lärmemissionen.

Als im Umgang mit dem bestehenden Datenangebot weiter problematisch bewertete Sachverhalte waren folgende:

- häufig ist die Datentransparenz in der Sekundärliteratur nur ungenügend (z.B. bei den Fahrzeugverbräuchen),
- eine Vielzahl von Veröffentlichungen zur Preisentwicklung von Elektrofahrzeugen sind nicht nachvollziehbar berechnet. Wünschenswert wäre eine Preisprognose (z.B. zu Fahrzeugen für Trendentwicklung),
- Lastenräder als Kategorie z.B. in die KiD aufnehmen bzw. allgemein eine Differenzierung in kleinere Fahrzeuge.

Der Punkt bezüglich einheitlicher Grundelemente in Erhebungen zum Wirtschaftsverkehr wird in den FGSV Arbeitskreis AK 1.8.3 „Erhebungsmethoden im Wirtschaftsverkehr“ während der nächsten Sitzungen in diesen eingebracht.

Außerdem stellt das, in Kapitel 6 dargestellte und innerhalb des Forschungsprojektes erarbeitete Glossar einen ersten Schritt hin zu einer vereinheitlichten Verwendung von

Termini des Wirtschaftsverkehrs und zur Elektromobilität dar. Dies soll dazu beitragen einen nachvollziehbareren Austausch zwischen den Forschungsprojekten zu ermöglichen.

#### **4.1.3 Ergebnisse der KiD-Auswertung zum Elektrifizierungspotential der Flotten nach der Tagesfahrleistungen in Wirtschaftszweigen und Fahrzeugklassen**

(N. Döge, W. Siegert)

Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, wurden die Daten der KiD (2010) hinsichtlich der Tagesfahrleistungen im städtischen Wirtschaftsverkehr nach Wirtschaftszweigen für die Fahrzeugklassen Pkw und Lkw mit einer Nutzlast kleiner als 3,5 t (zGG 3,5 t) ausgewertet. Folgende Abbildungen zeigen die gesamte Spannweite der Tagesfahrleistung nach Wirtschaftszweigen. In der zugehörigen Tabelle 26 sind die Wirtschaftszweige aufgeführt sowie die zugehörigen Fallzahlen dargestellt. Es sind alle Wirtschaftszweige, auch jene mit geringen Fallzahlen aufgeführt. Es ist darauf zu achten, dass aufgrund der geringen Zahlen nicht alle Verteilungen als repräsentativ anzusehen sind. Dies betrifft insbesondere die Zweige B, I, K, L, M, P, R und U.

Wie bereits in der Methodik beschrieben, werden Referenzfahrzeuge herangezogen, um die Tagesfahrleistungen der Auswertungen mit dem aktuellen technischen Stand vergleichen zu können. Bei den Referenzfahrzeugen der Fahrzeugklasse Pkw ist eine elektrische Reichweite von 154 bzw. 170 km nach dem Neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) angegeben. Dieser Wert kann je nach Zuladung, Wetterverhältnissen und Nutzung von Nebenaggregaten wie Klimaanlage stark schwanken (Siegert, 2015). Als Referenz ist in den Abbildungen die häufig besprochene Grenze von 100 km eingezeichnet. Bei den LNF liegen die Reichweiten der Referenzfahrzeuge nach dem NEFZ jeweils bei 130 km.

Bei den Pkw liegt der Median der Tagesfahrleistung in allen Wirtschaftszweigen, teilweise deutlich, unter 100 km (vgl. Abbildung 58). Ausnahme ist der Zweig M (Erbringung von freiberuflichen, technischen und wissenschaftlichen Dienstleistungen). Allerdings kann diese Verteilung nicht als repräsentativ angesehen werden, da die Fallzahl bei diesem Zweig lediglich bei vier liegt. Geht man von einer elektrischen Reichweite von 100 km aus, ließen sich in allen Wirtschaftszweigen über 50 Prozent der Pkw durch Elektrofahrzeuge ersetzen. Zudem gibt es einige Zweige (A, D, E, I, K, N und Q) wo auch das obere Quartil unter der 100-km-Grenze liegt. In diesen Branchen ließe sich folglich ein noch größerer Anteil der Fahrten mit Elektrofahrzeugen bewältigen. Dabei ist die Vergleichsreichweite mit 100 km sehr niedrig angesetzt. Die größten Potentiale liegen in den Branchen D (Energieversorgung), E (Wasserversorgung etc.), N (Sonstige wirtschaftliche Dienstleistungen) und Q (Gesundheits- und Sozialwesen).

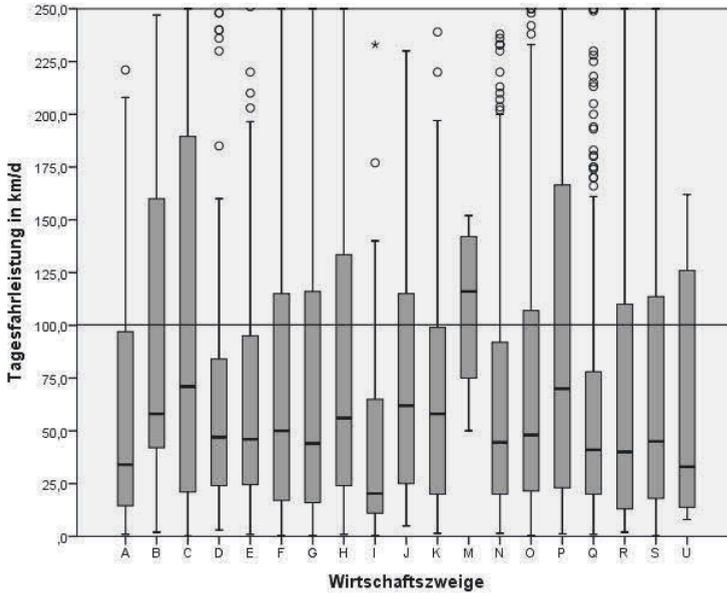
Tabelle 26: Kodierung der Wirtschaftszweige und Fallzahlen der ausgewerteten Fahrzeuge pro Wirtschaftszweig

Wirtschaftszweige		Häufigkeit Pkw	Häufigkeit LNF
A	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	75	255
B	Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden	21	36
C	Verarbeitendes Gewerbe / Herstellung von Waren	659	765
D	Energieversorgung	133	251
E	Wasserversorgung; Abwasser- und Abfallentsorgung und Beseitigung von Umweltverschmutzungen	157	279
F	Baugewerbe / Bau	751	1.351
G	Handel	734	885
H	Verkehr und Lagerei	255	1.198
I	Gastgewerbe / Beherbergung und Gastronomie	55	22
J	Information und Kommunikation	45	78
K	Erbringung von Finanz- und Versicherungsdienstleistungen	75	19
L	Grundstücks- und Wohnungswesen	0	17
M	Erbringung von freiberuflichen, wissenschaftlichen und technischen Dienstleistungen	4	4
N	Erbringung von sonstigen wirtschaftlichen Dienstleistungen	310	234
O	Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung	731	758
P	Erziehung und Unterricht	24	7
Q	Gesundheits- und Sozialwesen	439	121
R	Kunst, Unterhaltung und Erholung	33	16
S	Erbringung von sonstigen Dienstleistungen	2.648	3.262
U	Exterritoriale Organisation und Körperschaften	12	31
<b>Gesamt</b>		<b>7.161</b>	<b>9.589</b>

Bei den LNF lässt sich Ähnliches beobachten. Auch hier liegen alle Mediane deutlich unter der 100-km-Grenze (vgl. Abbildung 59). Zudem liegt das Quartil lediglich bei den Zweigen C, G, H, M, N, R und S über den 100 km Tagesfahrleistung. Auch in dieser Fahrzeugklasse ließen sich große Anteile von Fahrzeugen durch E-Fahrzeuge ersetzen. Die vielversprechendsten Zweige sind D (Energieversorgung), E (Wasserversorgung etc.), F (Baugewerbe/Bau), O (Öffentliche Verwaltung) und Q (Gesundheits- und Sozialwesen).

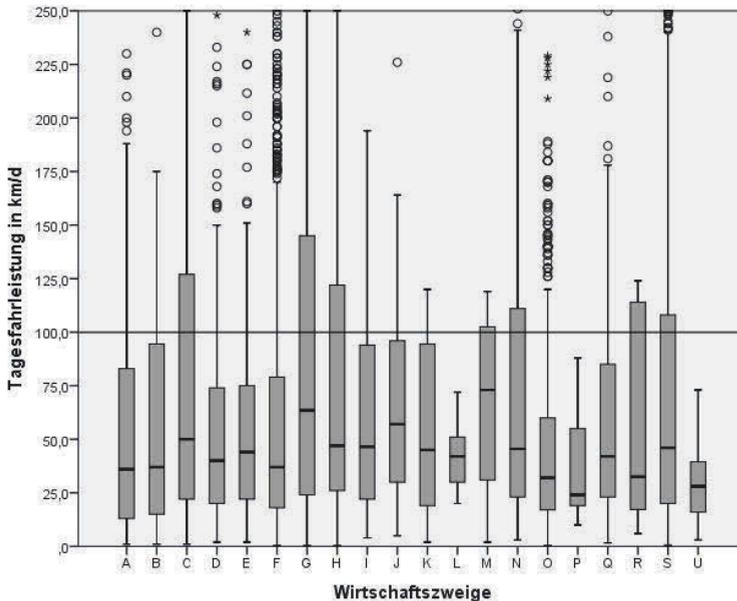
Insgesamt ist das Potential für den Einsatz von Elektrofahrzeugen im städtischen Wirtschaftsverkehr in nahezu allen Branchen als hoch zu bewerten.

Abbildung 58: Tagesfahrleistungen für Pkw im städtischen Wirtschaftsverkehr nach Wirtschaftszweigen



Quelle: Eigene Darstellung nach KiD, 2010

Abbildung 59: Tagesfahrleistungen für LNF (Lkw kleiner 3,5 t Nutzlast) im städtischen Wirtschaftsverkehr nach Wirtschaftszweigen



Quelle: Eigene Darstellung nach KiD, 2010

#### 4.1.4 Analyse der Fahrprofile (spezifisches Elektrifizierungspotential)

(D. Dreyhaupt, S. Marker)

Mit Hilfe des Fahrzeug- und Flottenmodells werden sowohl die Charakteristiken der Fahrzeugnutzung bestimmt als auch die Verbrauchswerte der betrachteten Fahrzeuge ermittelt. Zudem sind fahrzeuggesteuerte TCO-Berechnungen möglich. Schnittstellen existieren insbesondere zum Batteriemodell (Kapitel 4.2), welches in der energetischen Simulation eine wichtige Rolle einnimmt, sowie zum Netz- und Energiesystemmodell (Kapitel 4.3).

Die Grundlage zur Analyse der Fahrprofile bildet die in Kapitel 3.1.5 vorgestellte Vermessung von realen Fahrzeugen ausgewählter Probanden. Hierbei ermittelte Bewegungen über GPS-Daten wurden anschließend in anonymisierte tageweise Fahrzyklen (Geschwindigkeits-Zeit-Profile) transformiert. Tage, an denen die Fahrzeuge nicht bewegt werden, werden dabei nicht betrachtet. Die Fahrzyklen werden den drei Fahrzeugkategorien „Pkw“, „leichte Lkw mit 3,5 t zGG“ und „mittelschwere Lkw mit 12 t zGG“ zugeordnet. Die Fahrprofile des vermessenen 5-t-Lkw wurden dabei der Klasse der leichten Lkw zugeordnet, da diese eher den Fahrzeugen dieser Kategorie ähnlich sind als denen der nächsthöheren mit 12 t zGG.

Eine der wichtigsten Informationen stellt die Verteilung der täglichen Fahrtstrecken dar. Daraus lässt sich unter anderem ein möglicher technischer Elektrifizierungsgrad, der maßgeblich auf der Reichweitenbeschränkung batterieelektrischer Fahrzeuge beruht, ableiten. Diese Reichweitenbeschränkung wurde mit ca. 100 km angenommen. Zwar wird ein Großteil der aktuell verfügbaren BEV klassenunabhängig mit 130–150 km Reichweite angegeben, jedoch muss hier ein entsprechender Puffer berücksichtigt werden, da insbesondere im Winter zur Heizung, aber auch im Sommer zur Klimatisierung, die Batterie besonders beansprucht wird und somit die für den Antrieb zur Verfügung stehende Energie deutlich reduziert werden kann.

Weiterhin werden die Aktivität, die Geschwindigkeitsverteilungen und die Fahrweise analysiert. Vor allem für die weitergehenden Untersuchungen zu Systemdienstleistungen (SDL) liefert die Aktivität wichtige Aussagen, wann SDL eingeplant werden können und wie viele Fahrzeuge wann hierfür zur Verfügung stehen. Sie stellt damit einen von vielen Parametern dar, auf deren Basis die Belastung des elektrischen Verteilnetzes geschätzt werden kann.

Die Analysen zu Geschwindigkeitsverteilungen und Fahrweise sind eher als nützliche Nebeninformationen zum Beispiel für Fahrzeughersteller und Flottenbetreiber zu verstehen und könnten für die Fahrzeugauslegung bzw. Fahrzeugauswahl einbezogen werden.

##### **Pkw**

Betrachtet man nun die Verteilung der Wegstrecken für die vermessenen Pkw in Abbildung 60, so zeigt sich deutlich, dass tägliche Fahrtstrecken um 25 km mit einem Anteil von über 60 % an den Gesamtfahrten besonders häufig auftreten. Der Elektrifizierungsgrad ergibt sich hierbei zu etwa 96 % (vgl. Wert der kumulierten Häufigkeit bei 100 km). Das bedeutet, dass 96 % aller mit den vermessenen Pkw zurückgelegten Fahrten mit batterieelektrischen

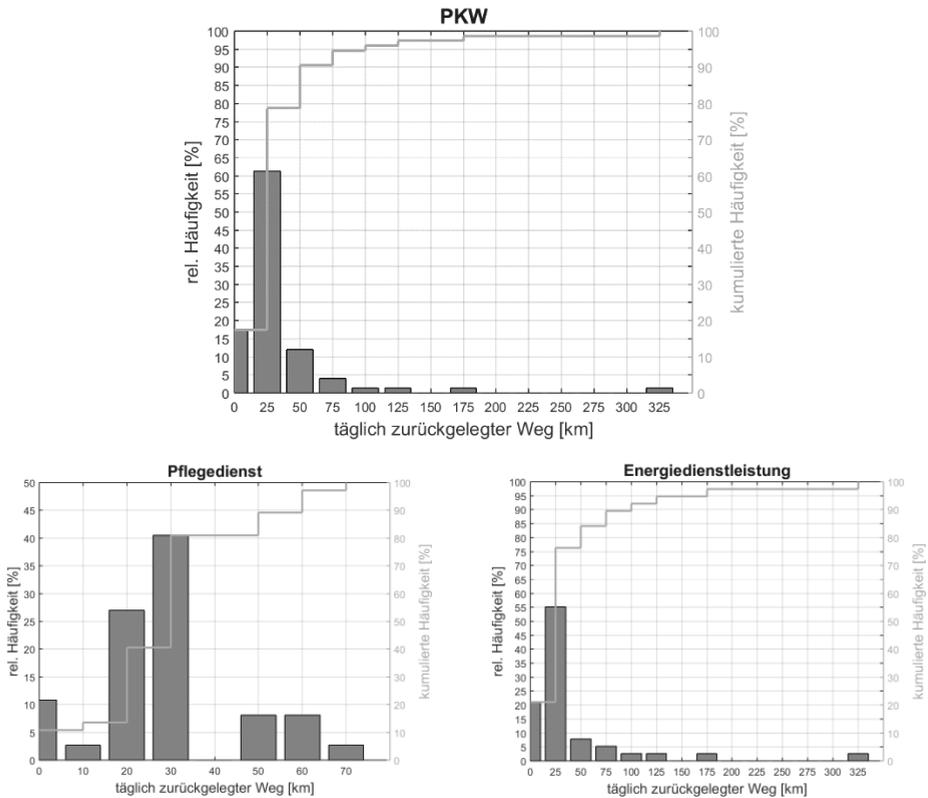
Fahrzeugen zurückgelegt werden könnten. Für die übrigen 4 % der Fahrten mit teilweise bis über 300 km täglicher Fahrtstrecke wären weiterhin konventionelle oder andere langstreckengeeignete Fahrzeuge (z.B. Plug-In Hybride, aber auch Brennstoffzellenfahrzeuge) erforderlich. In NET-ELAN wurde ein ähnlicher Elektrifizierungsgrad für private Pkw mit 96 % bei einer angenommenen sicheren Reichweite von 120 km ermittelt (Linssen, 2012). Das Elektrifizierungspotenzial gewerblicher Pkw befindet sich damit auf geringfügig höherem Niveau. Diese Betrachtung ermöglicht zwar grundsätzlich eine generelle Abschätzung des Elektrifizierungspotentials des innerstädtischen WIV, jedoch ist sie einerseits aufgrund der mäßigen Datenlage der vermessenen Fahrzeuge ungenau und andererseits für Fahrzeug- und Flottenbetreiber wenig hilfreich. Differenziert man an dieser Stelle beispielsweise nach den Einzelfahrzeugen bzw. -Flotten, so ergibt sich ein technischer Elektrifizierungsgrad von 100 % für die vermessene Pflegedienst-Flotte (vgl. Abbildung 60: (unten links)). Für das Fahrzeug im Bereich Energiedienstleistung konnte ein Elektrifizierungsgrad von etwa 92 % bestimmt werden (vgl. Abbildung 60: (unten rechts)). Da es sich dabei um ein Einzelfahrzeug handelt und unter der Prämisse, dass eine Elektrifizierung das Fahrprofil nicht beeinflussen sollte, könnte dieses Fahrzeug nicht durch ein BEV ersetzt werden.

Einen Einblick auf die Aktivität<sup>10</sup> der Fahrzeuge gibt die Abbildung 61. Daraus lässt sich ableiten, dass im Falle aller Pkw die Fahrzeuge zwischen ca. 5:30 Uhr und 21:00 Uhr im Einsatz sind und somit nicht in vollem Umfang für SDL zur Verfügung stehen. Dabei sind die Fahrzeuge vormittags in 40 % aller Fälle unterwegs. Nachmittags sinkt dieser Anteil auf etwa 20 %. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass vormittags etwa 60 % und nachmittags ca. 80 % der Fahrzeuge nicht bewegt werden und somit für SDL zur Verfügung stünden. Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass es sich dabei auch um zeitversetzte Pausen, welche länger als eine Zeitscheibe von 20 Minuten sind, handeln kann. Bei den oben genannten prozentualen Werten bezüglich des Anteils der nicht bewegten Fahrzeuge handelt es sich somit um eine Abschätzung nach oben.

---

<sup>10</sup> Jeder Datenpunkt beschreibt die Anzahl der bewegten Fahrzeuge in 20-minütigen äquidistanten Zeitscheiben.

Abbildung 60: Wegstreckenverteilung aller vermessenen Pkw (oben) und differenziert nach den unterschiedlichen Einsatzzwecken (unten)



Deutlich wird auch das unterschiedliche Einsatzprofil der Branchen. Im Falle des Pflegedienstes beträgt die Vormittags-Aktivität um 70 % und sinkt nachmittags auf ca. 10 %, was auf sehr ähnliche tägliche Einsatzprofile schließen lässt. Für das Kundendienst-Fahrzeug aus der Energie-Branche ergibt sich ein anderes Bild. Das Fahrzeug unterliegt einem stark variablen Einsatzmuster.

Ein ähnlich differenziertes Bild zeigt sich beim Vergleich der Geschwindigkeitsverteilungen in Abbildung 62. Während die Fahrzeuge des Pflegedienstes bis ca. max. 80 km/h unterwegs sind, was auf ein ausschließlich städtisches Einsatzprofil hindeutet, wird das Kundendienst-Fahrzeug des Energiedienstleisters auch häufig mit über 120 km/h bewegt. Es handelt sich somit um ein Fahrzeug mit gemischtem Einsatzprofil. Diese Analysen korrelieren mit den obigen Analysen der Tagesfahrleistungen.

Abbildung 61: Aktivität der vermessenen Pkw aufgeschlüsselt nach allen Pkw (schwarz) und den jeweiligen Branchen (Graustufen)

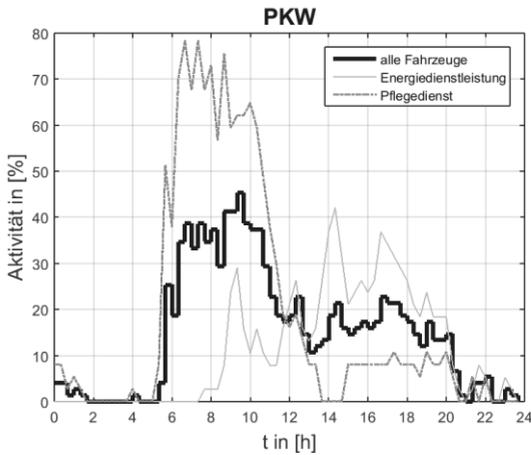
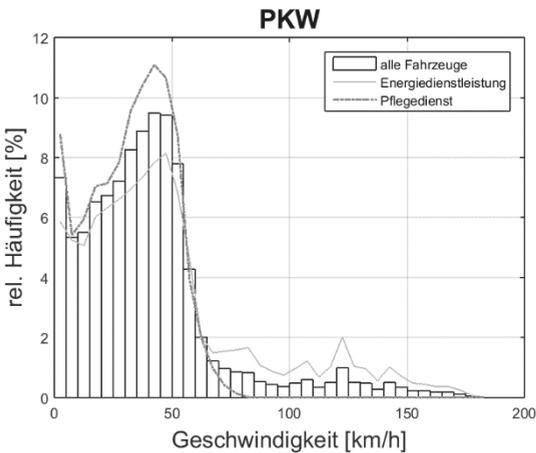


Abbildung 62: Häufigkeitsverteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten aufgeschlüsselt nach allen Pkw und für die jeweiligen Branchen



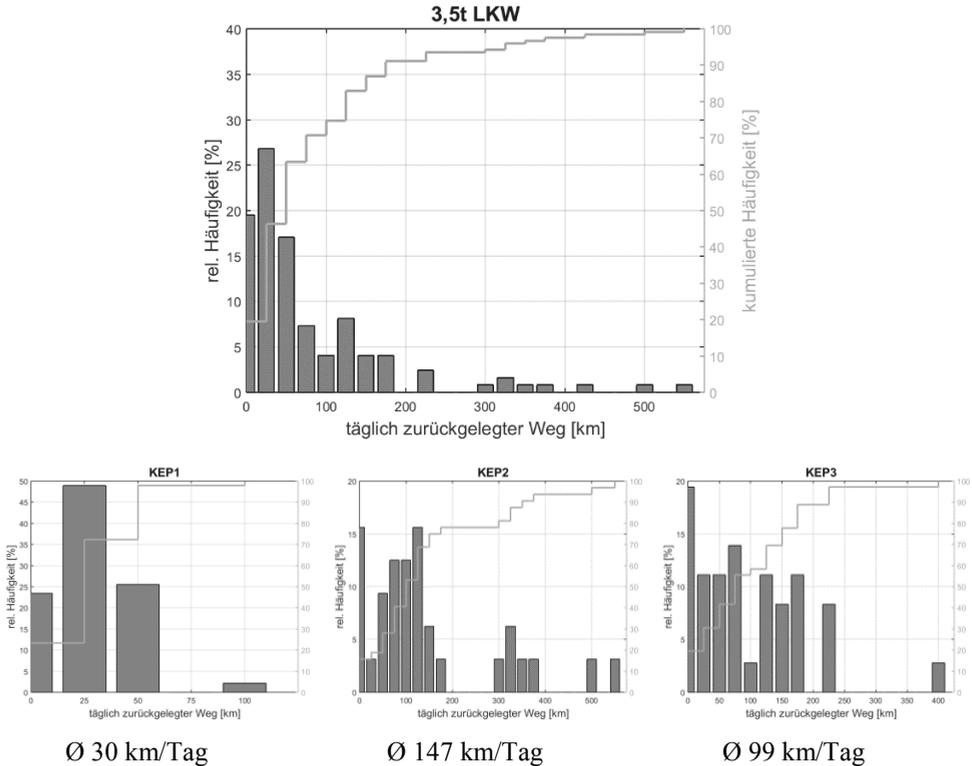
### Leichte Lkw

Die Analyse der Verteilung der Tagesfahrstrecken in Abbildung 63 erlaubt die Bestimmung des möglichen Elektrifizierungsgrades auf technischer Basis für die vermessenen leichten Lkw (hier zulässiges Gesamtgewicht (zGG) kleiner als 3.5 t). Bei Betrachtung aller vermessenen Fahrzeuge ergibt sich ein möglicher Elektrifizierungsgrad von ca. 75 %. Eine Differenzierung nach den unterschiedlichen Einzelflotten, insbesondere der drei unterschiedlichen KEP<sup>11</sup>-Dienstleistungs-Flotten, ergibt ein stark verändertes Bild. Während bei *KEP1* ein Elektrifizierungsgrad von 100 % möglich ist, so ergeben sich für die Flotten *KEP2*

<sup>11</sup> KEP = Kurier-Express-Paketdienst

und *KEP3* Elektrifizierungsgrade von knapp über 50 % bzw. knapp unter 60 %. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass branchenweise Betrachtungen zum technischen Elektrifizierungsgrad ebenfalls zu erheblichen Unsicherheiten führen können. Die Annahme zu Beginn des Projektes, dass sich insbesondere Fahrzeuge und Flotten aus dem Bereich der *KEP*-Dienstleistungen besonders für eine Elektrifizierung eignen, konnte nicht im realen Versuch bestätigt werden.

Abbildung 63: Wegstreckenverteilung aller vermessenen leichten Lkw (oben) und differenziert nach den unterschiedlichen *KEP*-Flotten (unten)



Dennoch scheint zumindest eine Teilsubstitution mit BEV möglich. Beispielsweise seien hier die vier Einzelfahrzeuge von *KEP2* einmal genauer analysiert. Während der Elektrifizierungsgrad der gesamten *KEP2*-Flotte bei etwa 50–52 % liegt und damit zwei von vier Fahrzeugen als BEV ausgeführt werden könnten, ergeben sich folgende Aussagen für die Einzelfahrzeuge:

*Fahrzeug 1*: Elektrifizierungsgrad  $\approx 62\%$  | max. um 125 km, Ø 68 km/Tag,

*Fahrzeug 2*: Elektrifizierungsgrad  $\approx 17\%$  | häufig Wege > 300 km, Ø 286 km/Tag,

*Fahrzeug 3*: Elektrifizierungsgrad  $\approx 100\%$  | Ø 54 km/Tag,

*Fahrzeug 4*: Elektrifizierungsgrad  $\approx 33\%$  | Ø 217 km/Tag.

Daraus lässt sich schließen, dass im Falle von *KEP2* ein Fahrzeug bereits als BEV betrieben werden könnte, während es bei den drei übrigen zusätzlicher Maßnahmen bedarf, um den ermittelten Flotten-Elektrifizierungsgrad von ca. 50 % zu erreichen. Möglich werden könnte dies zum Beispiel dadurch, dass innerhalb des Flottenmanagements die Routenplanung optimiert wird, sodass *Fahrzeug 1* die kurzen Touren von *Fahrzeug 4* übernehmen könnte und *Fahrzeug 4* dafür die langen Touren von *Fahrzeug 1*. Jedoch muss hierbei beachtet werden, dass sich eine solche Maßnahme erheblich auf den Tagesablauf auswirken kann und möglicherweise nicht umsetzbar ist. Es ist demnach zu erwarten, dass der tatsächlich erreichbare Elektrifizierungsgrad deutlich kleiner als der ermittelte Flotten-Elektrifizierungsgrad ist.

Insbesondere für *KEP2* und *KEP3* konnte zudem ein sehr gemischtes Einsatzprofil der Fahrzeuge beobachtet werden (vgl. Abbildung 64). Nahezu jedes Fahrzeug ist zu einem gewissen Anteil innerhalb der Stadt unterwegs. Jedoch konnte bei fast allen Fahrzeugen auch ein gewisser Überland-Anteil (weite Strecken mit Geschwindigkeiten über 80 km/h) beobachtet werden.

Bezüglich der Einsatzprofile ergibt sich entgegen den Beobachtungen bei Pkw ein eher homogenes Bild für die Einzelflotten, aber auch für die Gesamtheit aller leichten Lkw (Abbildung 65). Bei Betrachtung aller Fahrzeuge ergeben sich Einsatzzeiten von etwa 4:00 Uhr bis 20:00 Uhr, wobei die Aktivität kontinuierlich bis zur Mittagszeit zunimmt und anschließend wieder kontinuierlich abfällt. Auffällig ist dabei auch die Abweichung des Einsatzprofils von *KEP1* zu den beiden sich sehr ähnlichen Mustern von *KEP2* und *KEP3*. Zum einen ist eine Rechtsverschiebung des Profils um ca. drei Stunden zu beobachten – der Arbeitstag beginnt um etwa 7:00 Uhr und endet gegen 21:00 Uhr. Zum anderen bestätigt ein deutlicher Peak in den Morgenstunden die Erkenntnisse bei der Ausgabe der Datenlogger, dass sich die Fahrer nach Dienstschluss mit den Fahrzeugen zu ihren Wohn-orten bewegen. Der Peak in den Morgenstunden beschreibt damit die Fahrten von den Wohnorten zu den Dienststellen, an denen das Fahrzeug beladen wird, bevor die eigentliche Tour startet. Obwohl dies auch auf die Fahrzeuge von *KEP2* und *KEP3* zutrifft, ist ein solcher Peak nicht deutlich ausgeprägt. Würde man hingegen Einzelfahrzeuge statt der Einzelflotten betrachten, so wird die Ähnlichkeit zu *KEP1* deutlicher. Aufgrund variabler Startzeiten wird die Darstellung bei den Einzelflotten im Vergleich zu den Einzelfahrzeugen undeutlich.

### **Mittelschwere Lkw**

Da während des Projektes lediglich eine Flotte mit 12-t-Lkw (zGG.) vermessen werden konnte, sind bei dieser Fahrzeugklasse nur Einzelflotten- und Einzelfahrzeug-Betrachtungen möglich. Aus Abbildung 66 geht dabei hervor, dass die vermessenen Fahrzeuge einen Elektrifizierungsgrad von 100 % erreichen können. Die ermittelte durchschnittliche Tagesfahrleistung beträgt dabei etwa 24 km. Für die Einzel-Fahrzeuge ergeben sich dabei tägliche Wegstrecken von etwa 10 km bis 60 km, wodurch der erstgenannte Wert von 24 km über alle Fahrzeuge etwas relativiert wird. Dennoch weichen diese Werte stark von den statistischen Tagesfahrleistungen von über 100 km für 12-t-Lkw (Kapitel 4.5) ab.

Abbildung 64: Häufigkeitsverteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten aufgeschlüsselt nach allen leichten Lkw und nach Einzelflotten im KEP-Bereich

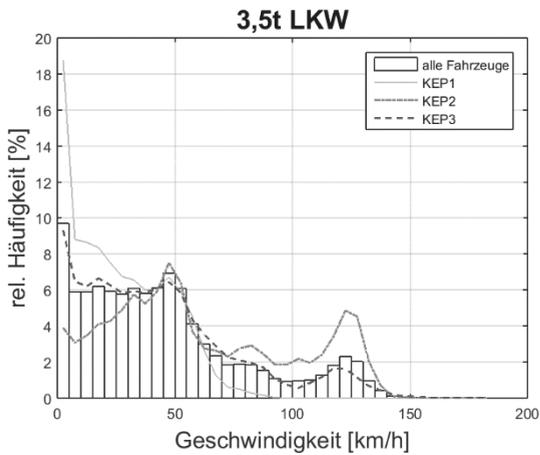


Abbildung 65: Aktivität der vermessenen leichten Lkw aufgeschlüsselt nach allen Fahrzeugen (schwarz) und den Einzelflotten (Graustufen)

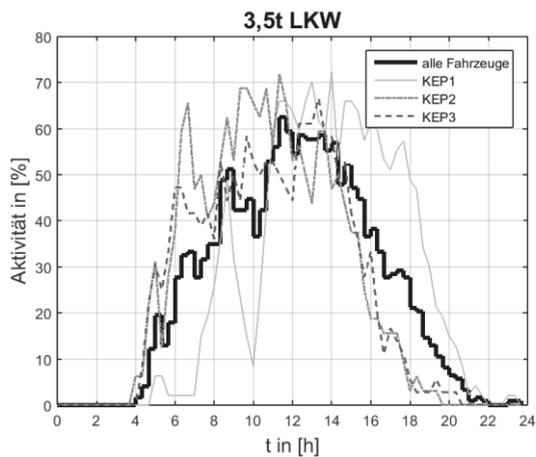
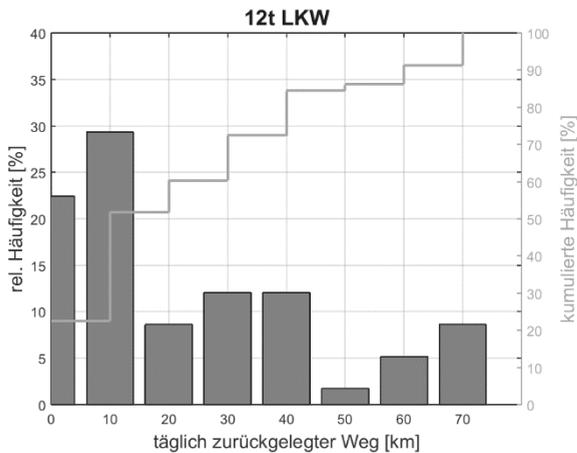
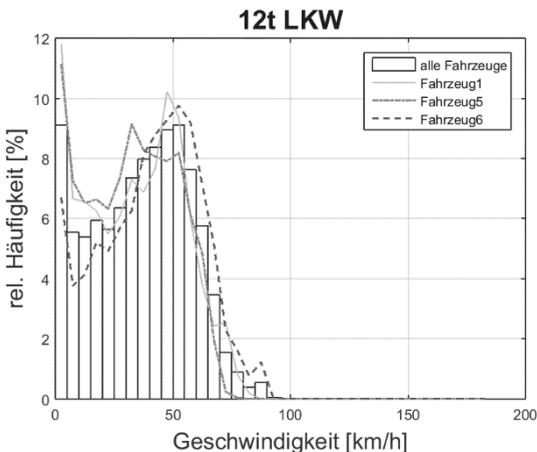


Abbildung 66: Wegstreckenverteilung aller vermessenen mittelschweren Lkw



Charakteristisch für die Fahrzeuge der vermessenen Flotte der mittelschweren Lkw ist das definierte Einsatzgebiet. Die Fahrzeuge werden stark nach innerstädtischen und Außerorts-Touren getrennt. Deutlich wird dies durch große Aufenthaltswahrscheinlichkeiten um 50 km/h in Abbildung 67. Dadurch konnte auch kein Überland-Anteil bei den Fahrzeugen beobachtet werden. Die Folge ist, dass der Elektrifizierungsgrad mit 100 % für die gesamte Flotte sehr wahrscheinlich zu hoch ermittelt wurde, bezogen auf die Fahrzeuge mit innerstädtischen Touren jedoch weiterhin gilt.

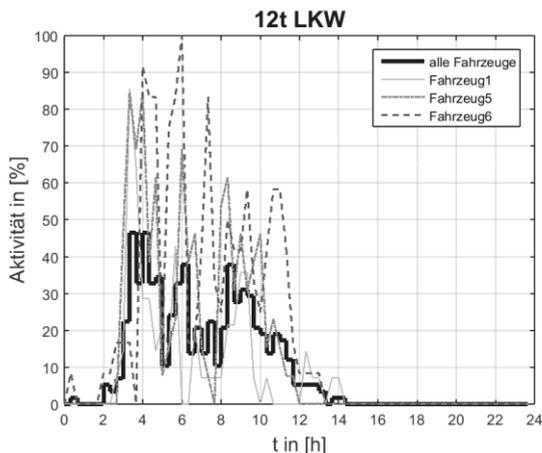
Abbildung 67: Häufigkeitsverteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten aufgeschlüsselt nach allen mittelschweren Lkw und nach ausgewählten Einzelfahrzeugen



Ebenfalls charakteristisch ist das Einsatzprofil dieser Fahrzeugklasse (Abbildung 68). Es ist geprägt von alternierenden Phasen hoher Aktivität (teilweise bis 100 %–, „das Fahrzeug ist in allen Zyklen zu dieser Zeit unterwegs“) und geringer Aktivität (bis 0 %–, „das Fahrzeug steht in allen Zyklen zu dieser Zeit“) der Einzelfahrzeuge. Eine mögliche Ursache hierfür könnten die langen Belade- und Entladezeiten der großen Fahrzeuge im Zusammenspiel mit täglich wenig variablen Touren darstellen. Diese unterschiedlichen Phasen treten für die

unterschiedlichen Fahrzeuge versetzt auf, sodass bezogen auf die gesamte Flotte ein verschwommenes Bild entsteht. Die Variationen in den Aktivitäten sind zwar erkennbar, die Anzahl der aktiven Fahrzeuge je Zeitscheibe sinkt jedoch auf 10–45 %. Allen Fahrzeugen ist gemeinsam, dass die Einsatzzeit gegen 3:00 Uhr beginnt und gegen ca. 12:00 Uhr endet. Dies wird auch an dem Flotten-Profil deutlich.

Abbildung 68: Aktivität der vermessenen mittelschweren Lkw aufgeschlüsselt nach allen Fahrzeugen (schwarz) und den Einzelfahrzeugen (Graustufen)

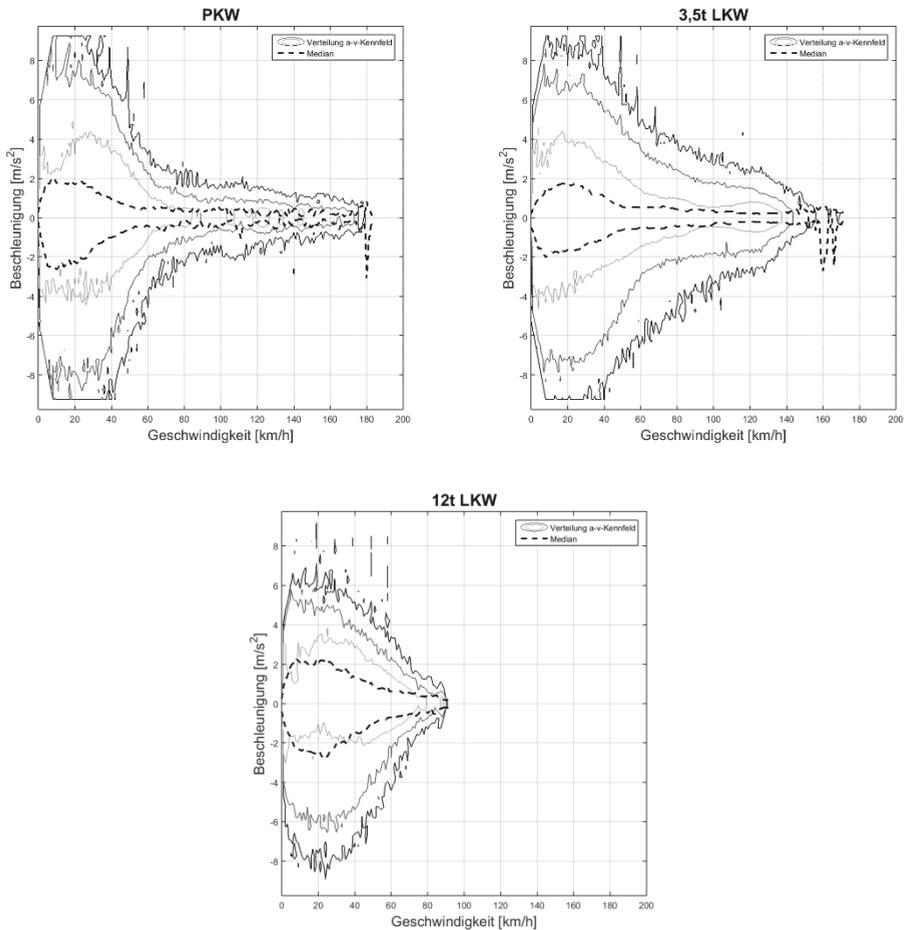


## Fahrweise

Abschließend wird kurz auf die Fahrweise der Fahrzeuge eingegangen. In Abbildung 69 sind die gemessenen Beschleunigungen über der Geschwindigkeit für Pkw, leichte Lkw und mittelschwere Lkw aufgetragen. Aus dem Vergleich der beiden oberen Darstellungen geht hervor, dass leichte Lkw über einen weiteren Geschwindigkeitsbereich mit größeren Beschleunigungen und Verzögerungen als Pkw bewegt werden. Dies lässt sich als eine offensivere Fahrweise bei diesen Fahrzeugen interpretieren, möglicherweise bedingt durch hohen Termindruck und einen engen Zeitplan. Angesichts der größeren Masse der Fahrzeuge wurde dieses Ergebnis zu Beginn der Arbeiten nicht erwartet. Es ist zu beachten, dass diese Aussagen anhand der gemessenen Fahrzyklen erstellt wurden und hierbei sehr unterschiedliche Einsatzprofile zugrunde liegen. Die Einsatzprofile des Pflegedienstes weisen keinen Autobahnanteil auf. Deshalb überwiegt bei der Gesamtheit aller Pkw der vordere Geschwindigkeitsbereich bis ca. 60 km/h. Doch auch bei einem Vergleich der Gruppe der leichten Lkw allein mit dem Kundendienstfahrzeug des Energiedienstleisters blieben die erwähnten Unterschiede deutlich ausgeprägt.

Bei den mittelschweren Lkw scheint es sich um eine ausgewogene Fahrweise zu handeln. Da diese Fahrzeuge deutlich schwerer sind, ist eine zu erwartende Stauchung in den Diagrammen zu beobachten. Weiterführende Aussagen hierzu gestalten sich allerdings als schwierig, da ein Vergleich mit den leichten Lkw aufgrund der großen Masseunterschiede nicht zielführend wäre und zudem lediglich eine Flotte vermessen wurde.

Abbildung 69: a-v-Diagramme der Fahrzyklen: Pkw (oben links), leichte Lkw (oben rechts), mittelschwere Lkw (unten)



### Zwischenfazit

Zusammenfassend lassen sich aus den Analysen der Fahrprofile folgende Schlussfolgerungen ableiten:

Hohe durchschnittliche Tagesfahrleistungen bedeuten auch eine große Streuung bei den täglichen Wegstrecken. Damit sinkt der Elektrifizierungsgrad für größere Werte, auch wenn diese noch kleiner sind als die mögliche Reichweite für BEV. Ein Elektrifizierungsgrad von 100 % konnte nur bei durchschnittlichen Tagesfahrleistungen von deutlich unterhalb der maximalen BEV-Reichweite beobachtet werden. Diese Erkenntnis ist insbesondere für spätere TCO-Berechnungen relevant, da eine Wirtschaftlichkeit der BEV bei großen durchschnittlichen Tagesfahrstrecken zu erwarten ist, diese dann aber durch BEV nicht

zwingend abgebildet werden können, obwohl die maximale Reichweite der Fahrzeuge dies zulassen würde.

Die Fahrprofile unterschiedlicher Branchen sind, trotz der Einschränkung auf den innerstädtischen Wirtschaftsverkehr, sehr differenziert (siehe Analysen bei Pkw). Der Elektrifizierungsgrad kann daher nur sehr grob für komplette Fahrzeugklassen bestimmt werden. Die Analysen der leichten Lkw haben zudem gezeigt, dass die Fahrprofile selbst innerhalb der Branchen (Beispiel KEP) sehr inhomogen ausfallen können, sodass selbst ein branchenweiser Elektrifizierungsgrad mit großen Unsicherheiten belastet ist.

Zur Bestimmung des Elektrifizierungsgrades ist mindestens eine Betrachtung von Einzel-*flotten* notwendig. Bei Hinzunahme der Erkenntnisse aus den Fahrprofilen der Einzel-*fahrzeuge* lässt sich ein mögliches Elektrifizierungspotential individuell bestimmen.

Es konnte eine tendenziell offensive Fahrweise mit großen Beschleunigungen und Verzögerungen über einen weiten Geschwindigkeitsbereich bei leichten Lkw beobachtet werden, deren Ursache in erhöhtem Termindruck und engen Zeitplänen vermutet wird. Aufgrund der eingeschränkten Datenlage sind diese Analysen jedoch nur beschränkt aussagekräftig.

#### **4.1.5 Erweiterung der Simulationsmodelle (Energiemodelle) und Berechnung des Energie- und Kraftstoffverbrauchs**

(D. Dreyhaupt, S. Marker)

##### **Physikalische Parameter (Referenzfahrzeuge, Parameterentwicklung)**

komDRIVE betrachtet drei unterschiedliche Fahrzeugklassen für den innerstädtischen Wirtschaftsverkehr - Pkw, leichte Lkw bis 3,5 t und mittelschwere Lkw bis 12 t jeweils in den Varianten mit konventionellem Dieselantrieb, rein elektrischem Antrieb und in der Ausführung als PHEV. Zusätzlich wird bei den beiden Lkw-Klassen zwischen den Aufbauarten *offener Kasten* und *geschlossener Kasten* unterschieden. Es werden also 15 Fahrzeugmodelle mit entsprechenden Parametern benötigt. Da Schätzungen über den Verbrauch zu den vier Stützjahren 2015, 2020, 2025 und 2030 erforderlich waren, wurde für diese relevanten Parameter ein Szenario entworfen, das einen entsprechenden zeitlichen Verlauf abbildet.

Für die drei Fahrzeugklassen wurden folgende Referenzfahrzeuge angenommen:

- Pkw: Kompakt-Pkw aus dem Projekt NET-ELAN  
Die Konfiguration des Kompakt-Pkw wurde aus dem Vorgängerprojekt NET-ELAN übernommen (Linssen, 2012).
- Leichte Lkw bis 3,5 t zGG: Mercedes Vito E-CELL  
Der Mercedes Vito E-CELL ist zwar nur für ein zulässiges Gesamtgewicht von maximal 3,05 t ausgelegt, jedoch ist es zum Beginn des Projektes das einzig verfügbare voll elektrische Fahrzeug in Serienfertigung, das der Klasse der leichten Lkw bis 3,5 t zugeordnet werden konnte (Daimler AG, 2011).

- Mittelschwere Lkw bis 12 t zGG: E-Force One. Der E-FORCE One stellt einen voll elektrischen Umbau eines Iveco Stralis dar. Das zulässige Gesamtgewicht beträgt zwar 18 t anstatt 12 t, jedoch waren zu Beginn des Projektes keine entsprechenden Fahrzeuge in Serienfertigung oder als Umbau vorhanden, sodass die Konfiguration des E-Force One entsprechend skaliert als Referenzfahrzeug für die Klasse der 12-t-Lkw diente (E-Force, 2015).

Die wesentlichen Parameter, die für energetische Betrachtungen von Bedeutung sind, werden im Folgenden dargestellt.

### Leistung

Die Leistung eines Fahrzeugs bestimmt maßgeblich die maximal mögliche Beschleunigung sowie die Höchstgeschwindigkeit. Es wird angenommen, dass die Leistung der Fahrzeuge bis zum Jahr 2030 konstant bleibt und sich nicht wesentlich verändern wird. Diese Annahme rührt daher, dass im gewerblichen Bereich die Fahrzeugklassen mit ihren maximalen zulässigen Gesamtgewichten und insbesondere für Lkw ab 3,5 t zGG. auch die Höchstgeschwindigkeiten gesetzlich vorgegeben sind. Stärkere Leistungen für höhere Geschwindigkeiten (die nicht gefahren werden dürfen) oder bessere Beschleunigungen (mit Mehrkosten) sind daher nicht notwendig.

### Leistungen batterieelektrischer Fahrzeuge

Tabelle 27 zeigt die Leistungen der entsprechenden Konfigurationen für batterieelektrische Fahrzeuge.

Tabelle 27: Übersicht der Motorleistungen in den Stützjahren für die unterschiedlichen Fahrzeugklassen in der Ausführung als BEV

BEV	Pkw				Leichte Lkw 3,5 t				Mittelschwere Lkw 12 t			
Jahr	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030
Leistung [kW]	50	50	50	50	60	60	60	60	200	200	200	200

### Leistungen konventioneller Diesel-Fahrzeuge

Die Bestimmung der Leistungen für Diesel-Fahrzeuge erfolgte nicht anhand von Referenzspezifikationen, sondern anhand vorhandener Motorkennfelder aus der Literatur. Dieser Weg ist notwendig, da für die Simulationsmodelle die Kennfelder erforderlich sind, um die einzelnen Betriebspunkte abbilden zu können. Konkret wurden zwei verschiedene Kennfelder verwendet – eines für Pkw und leichte Lkw und eines für mittelschwere Lkw – die über die Angabe des Hubraumes  $V_H$  entsprechend skaliert wurden. Dies ist vergleichsweise einfach möglich, da für Dieselmotoren fast ausschließlich Kennfelder in der Form „spezifischer Verbrauch  $b_e$  bei effektivem Mitteldruck  $p_{me}$  über der Drehzahl  $n$ “ angegeben werden. Der effektive Mitteldruck kann anschließend nach (van Basshuysen und Schäfer, 2015) über die Beziehung in Gleichung (1) in Drehmoment  $M_d$  umgerechnet werden.

$$p_{me} = \frac{M_d \cdot 2\pi}{V_H \cdot i} \quad (1)$$

mit:  $i$  ... Arbeitsspiele pro Umdrehung (0,5 für 4-Takt, 1 für 2-Takt (hier: Viertakt)).

Der sich damit ergebende Drehmoment-Drehzahl-Verlauf unter Vollast führt zur entsprechenden Maximalleistung. Die Leistung kann dabei nach Gleichung (2) berechnet werden.

$$P = M_d \cdot \omega = M_d \cdot 2\pi \cdot n \quad (2)$$

Zusätzlich kann der spezifische Verbrauch  $b_e$  über Gleichung (3) in den effektiven Wirkungsgrad  $\eta_e$  umgerechnet werden.

$$\eta_e = \frac{1}{b_e \cdot H_u} \quad (3)$$

Mit  $H_u$  ... unterer Heizwert des Kraftstoffs (für Diesel:  $H_u = 11,8 \frac{kWh}{kg}$ ).

Ausgangspunkt waren die Daten verschiedener Kennfelder für Dieselmotoren. Da für schwerere Lkw lediglich ein Kennfeld eines Motors mit  $V_H = 12$  Liter Hubraum zur Verfügung stand, musste dieses entsprechend skaliert werden. Die Skalierung erfolgte dabei ausschließlich über den Hubraum (gemäß Gleichung (1)). Als Referenz wurde hier der Mercedes Benz Atego als typischer Vertreter im Verteilerverkehr mit einem Hubraum von 5,1 Liter herangezogen. Dadurch ergibt sich das in Abbildung 73 dargestellte skalierte Motorkennfeld, sowie die entsprechenden Drehmoment- und Leistungs-Kurven. Das Fahrzeug erreicht demnach eine maximale Leistung von  $P_{max} \approx 130$  kW bei einem maximalen Wirkungsgrad von  $\eta_{max} \approx 43,5$  %. Das maximale Drehmoment  $M_{max} \approx 730$  Nm steht in einem weiten Bereich von  $n = 1200..1600 \frac{1}{min}$  zur Verfügung. Für Pkw und leichte Lkw bis 3,5 t zulässiger Gesamtmasse wurde analog verfahren. Der anzunehmende Hubraum  $V_H$  wurde über Analysen der Statistiken des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) bestimmt (Kraftfahrt-Bundesamt, 2014b). In Abbildung 70 wird deutlich, dass im gewerblichen Bereich die Hubvolumen größer gewählt werden als im privaten Bereich<sup>12</sup>. Außerdem ist der Anteil dieselbetriebener Fahrzeuge stark vom Hubraum abhängig (Datenbasis: (Kraftfahrt-Bundesamt, 2014a)).

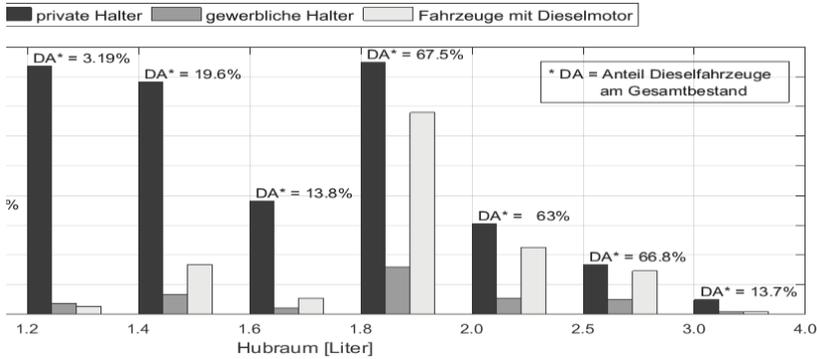
Werden jeweils alle Fahrzeuge unter 1,6 l Hubraum zusammengefasst (Gleiches auch für alle Fahrzeuge über 1,6 l), so ergibt sich ein größeres Bild (Abbildung 71). Es zeigt sich, dass im gewerblichen Bereich deutlich mehr Fahrzeuge mit mehr als 1,6 Litern Hubraum vorhanden

---

<sup>12</sup> Annahme: Die Haltergruppe „Arbeitnehmer und Nichterwerbspersonen“ beschreibt die Gruppe der privaten Halter, während die restlichen Haltergruppen als gewerblich angesehen werden.

sind. Im privaten Bereich ist es entgegengesetzt. Zudem ist der Anteil der dieselbetriebenen Fahrzeuge für Pkw mit mehr als 1,6 Litern Hubraum signifikant höher.

Abbildung 70: Anzahl der Pkw gewerblicher und privater Halter nach Hubraum



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Kraftfahrt-Bundesamt, 2014a; Kraftfahrt-Bundesamt, 2014b

Abbildung 71: Anzahl der Pkw gewerblicher und privater Halter nach Hubraum unter und über 1,6 l

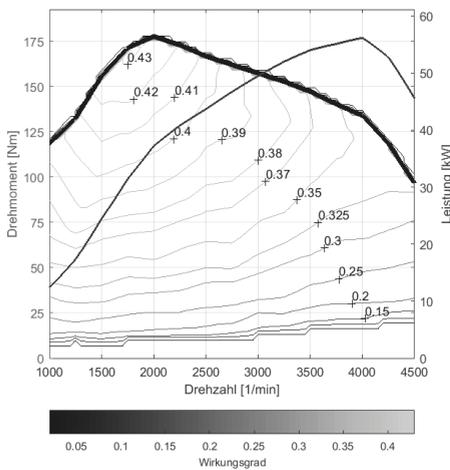


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Kraftfahrt-Bundesamt, 2014a; Kraftfahrt-Bundesamt, 2014b

Leider geben die Statistiken lediglich Auskunft über alle Fahrzeuge in Deutschland. Es wird dabei nur in Spezialauswertungen zwischen urbanen oder ländlichen Gegenden unterschieden. Auch fehlt die detaillierte Information über den Anteil von Diesel-Fahrzeugen bei gewerblicher Nutzung je nach Hubraum. Es bleiben somit nicht erfassbare statistische Unsicherheiten bei diesen Überlegungen zurück, die aufgrund der Datenlage jedoch nicht näher eingegrenzt werden können. Zum Beispiel könnten Fahrzeuge in urbanen Gegenden häufiger mit einem Otto-Motor ausgestattet sein und in ländlichen Gegenden eher mit einem Dieselmotor. Trotz der Unsicherheiten und auf Basis dieser statistischen Auswertungen wird der Hubraum des gewerblichen (Referenz-)Pkw mit  $V_H = 1,6$  l angenommen.

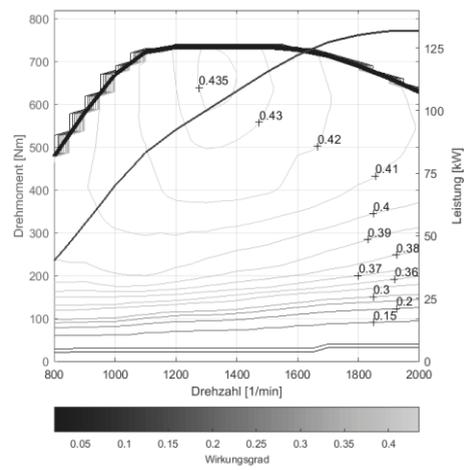
Über die oben erwähnten Zusammenhänge ergibt sich aus dem ursprünglichen Motorkennfeld (Merker, 2007) das in Abbildung 72 dargestellte Kennfeld mit den jeweiligen Drehmoment- und Leistungs-Kurven eines Pkw-Dieselmotors. Das Fahrzeug erreicht eine maximale Leistung von  $P_{\max} \approx 56 \text{ kW}$  bei einer Drehzahl von  $n = 4000 \frac{1}{\text{min}}$ . Der maximale Wirkungsgrad beträgt  $\eta_{\max} \approx 43 \%$ . Das maximale Drehmoment  $M_{\max} \approx 176 \text{ Nm}$  steht bei  $n = 2000 \frac{1}{\text{min}}$  zur Verfügung. Die Nennleistung des konventionellen Pkw befindet sich damit auf einem ähnlichen Niveau wie bei dem batterieelektrischen Pendant.

Abbildung 72: skaliertes Motorkennfeld eines Pkw mit  $V_H = 1,6 \text{ l}$



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Merker, 2007

Abbildung 73: skaliertes Motorkennfeld eines 12-t-Lkw mit  $V_H = 5,1 \text{ l}$



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von van Basshuysen und Schäfer, 2015

Im Falle des leichten Lkw mit 3,5 t zulässiger Gesamtmasse ist der Vergleich mit dem konventionellen Referenz-Fahrzeug des Mercedes Benz Vito nicht zielführend. Das in Abbildung 72 dargestellte Kennfeld unterscheidet sich zu stark von dem des realen konventionellen Fahrzeugs (Daimler AG, 2014a). Da der Mercedes Benz Vito jedoch ohnehin nur mit einem maximalen zulässigen Gesamtgewicht von 3,05 t verfügbar ist, bietet sich an dieser Stelle ein Vergleich mit einem typischen existierenden leichten Lkw mit 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht an. Die Wahl fiel hier auf den Mercedes Benz Sprinter als häufigen Vertreter dieser Klasse. Dieser erreicht laut Herstellerangaben (in der Variante 310 CDI als schwächste Motorisierung) bei einem Hubraum von  $V_H \approx 2,2 \text{ l}$  eine Nennleistung von  $P_{\max} = 70 \text{ kW}$  sowie ein maximales Drehmoment von  $M_{\max} = 250 \text{ Nm}$ . Eine Skalierung des generischen Kennfeldes mit dem angegebenen Hubraum führte zu einer Nennleistung von  $P_{\max} = 77 \text{ kW}$  und einem maximalen Drehmoment von  $M_{\max} = 244 \text{ Nm}$ . Die skalierten Daten liegen demnach relativ nah an den Daten des Mercedes Benz Sprinter mit der schwächsten Motorisierung. Jedoch weicht die Nennleistung des konventionellen Referenzfahrzeugs mit 77 kW nun von denen der batterieelektrischen Variante mit 60 kW um knapp

30 % ab. Diese Abweichung wird aufgrund der Tatsache hingenommen, dass das so erzeugte Referenzfahrzeug ein zulässiges Gesamtgewicht von 3,5 t aufweist, anstatt der 3,05 t des Referenzmodells des Mercedes Benz Vito E-CELL. Tabelle 28 zeigt die Leistungen der entsprechenden Konfigurationen für konventionelle Fahrzeuge.

Tabelle 28: Übersicht der Motorleistungen in den Stützjahren für die unterschiedlichen Fahrzeugklassen für konventionelle dieselbetriebene Fahrzeuge

Diesel	Pkw				Leichte Lkw 3,5 t				Mittelschwere Lkw 12 t			
	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030
Leistung [kW]	56	56	56	56	77	77	77	77	130	130	130	130

### Batteriekapazität E

Die Batteriekapazität ist ein Maß für die zur Verfügung stehende elektrische Energie im Fahrzeug. Diese Energie kann für den Hauptantrieb und den Betrieb von Nebenverbrauchern verwendet werden. Sie bestimmt damit maßgeblich die maximale Reichweite eines Fahrzeugs. Tabelle 29 zeigt die entsprechenden Werte der Referenzfahrzeuge.

Tabelle 29: Übersicht der Batteriekapazitäten der batterieelektrischen Fahrzeuge

BEV	Pkw				Leichte Lkw 3,5t				Mittelschwere Lkw 12t			
	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030
Batterie Kapazität E [kWh]	24,6	24,6	24,6	24,6	36	36	36	36	160	160	160	160

### Rollwiderstandsbeiwert $f_R$

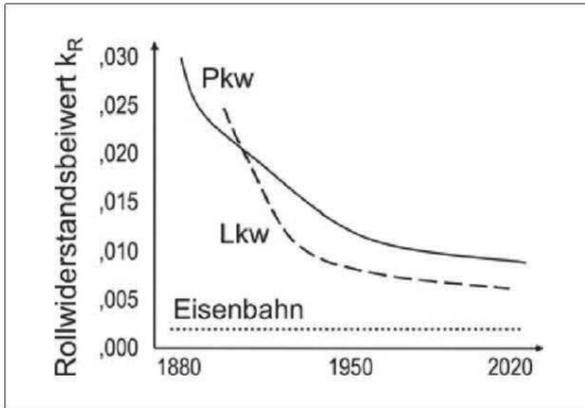
Ein großer Teil der im Fahrzeug verbrauchten Energie wird für die Überwindung des Rollwiderstandes benötigt. Die Rollwiderstandskraft berechnet sich entsprechend Gleichung (4).

$$F_R = m \cdot g \cdot f_R \quad (4)$$

Mit  $m$ ... Masse und  $g$ ... Erdbeschleunigung (9,81 m/s<sup>2</sup>)

Der Faktor  $f_R$  wird dabei als Rollwiderstandsbeiwert bezeichnet und ist abhängig von der Last, dem Innendruck des Reifens sowie der Zeit, Temperatur und der Geschwindigkeit (Heißling, 2013). Wesentlich ist dabei die Entwicklung und Prognose der Werte gemäß Abbildung 74. Im Zusammenhang mit der Aussage, dass sich der Wert von heute ca. 0,008 auf 0,004 im Jahr 2030 verbessern wird, wurde im komDRIVE-Szenario für alle Fahrzeugklassen eine Verringerung des Rollwiderstandsbeiwertes um  $\Delta f_{R,2015-2030} = 0,004$  bis zum Jahr 2030 angenommen. Da sich die genannte Aussage jedoch auf Pkw-Spezialreifen (Energiesparreifen) bezieht, ist der Ausgangswert (im Jahr 2015) etwas höher anzunehmen. Der Ausgangswert (im Jahr 2015) für Lkw liegt gemäß Abbildung 74 niedriger als der von Pkw, da  $f_R$  mit zunehmender Last sinkt. Zudem wird im Projekt ein linearer Verlauf angenommen.

Abbildung 74: Entwicklung des Rollwiderstandsbeiwertes



Quelle: Heißling, 2013

Tabelle 30 zeigt die Werte für  $f_R$  der unterschiedlichen Fahrzeugklassen in den entsprechenden Jahren für das komDRIVE-Szenario.

Tabelle 30: Übersicht der Rollwiderstandsbeiwerte der entsprechenden Fahrzeuge

	Pkw				Leichte Lkw 3,5 t				Mittelschwere Lkw 12 t			
Jahr	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030
$f_R$	0,010	0,0087	0,0073	0,006	0,009	0,0077	0,0063	0,005	0,008	0,0067	0,0053	0,004

### Luftwiderstandsbeiwert $c_W$ und Querschnittsfläche $A$

Neben dem Rollwiderstand spielt der Luftwiderstand eine entscheidende Rolle für den Energiebedarf zur Fortbewegung eines Fahrzeugs. Die Luftwiderstandskraft  $F_W$  berechnet sich entsprechend Gleichung (5) (Schütz und Hucho, 2013).

$$F_W = c_W \cdot A \cdot \frac{\rho_{Luft}}{2} \cdot v^2 \tag{5}$$

- $c_W$  ... Luftwiderstandsbeiwert
- $A$  ... Querschnittsfläche
- $\rho_{Luft}$  ... Luftdichte
- $v$  ... Geschwindigkeit

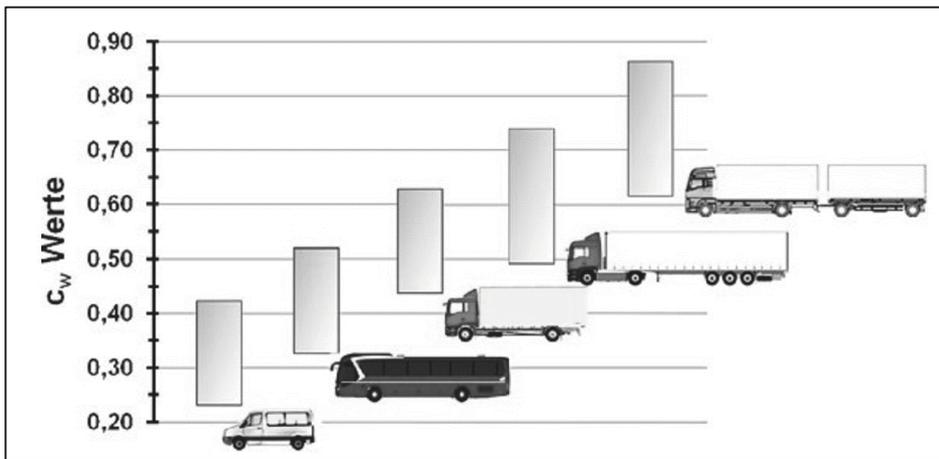
Entscheidende Größen zur Berechnung der Luftwiderstandskraft stellen dabei der dimensionslose  $c_W$ -Wert, sowie die Querschnittsfläche  $A$  des Fahrzeugs dar.

Der  $c_W$ -Wert für das Pkw-Referenz-Fahrzeug wurde gemäß Linsen (2012) mit 0,31 im Jahr 2015 angenommen und für das Jahr 2030 mit 0,26 bei einem linearen Trend. Die Querschnittsfläche von 2,25 m<sup>2</sup> bleibt dabei über die Jahre konstant.

Laut Herstellerangaben beträgt der  $c_W$ -Wert des Mercedes Benz Vito etwa 0,32 (Daimler AG, 2014b). Die Querschnittsfläche von 3,6 m<sup>2</sup> (Breite x Höhe nach Herstellerangaben (Daimler AG, 2011)) wurde dabei als konstant über die Jahre angenommen. Da keine genaueren Prognosen bzgl. der Entwicklungen des  $c_W$  - Wertes für leichte Lkw vorliegen,

wurde vereinfacht angenommen, dass analog den Pkw eine Verbesserung von  $\Delta c_w = 0,05$  vom Jahr 2015 bis zum Jahr 2030 erreicht werden kann. Der angegebene  $c_w$ -Wert gilt dabei für den Aufbau des *geschlossenen Kastens*. Nach den Statistiken des KBA, insbesondere der FZ 25, ist für die Klasse der Lkw bis 3,5 t neben der häufigsten Variante des *geschlossenen Kastens* auch die Variante des *offenen Kastens* (oft auch als Pritsche bezeichnet) relativ häufig vertreten (Kraftfahrt-Bundesamt, 2014c). Deshalb wurden bei der zu untersuchenden Fahrzeugklasse der leichten Lkw diese beiden Varianten betrachtet, die sich lediglich im  $c_w$ -Wert unterscheiden. Dabei wurde für die Aufbauart des *geschlossenen Kastens* ein  $c_w$ -Wert von 0,4 angesetzt Volkswagen AG (1996) und die Differenz im Jahr 2015 als Offset angesehen und bis zum Jahr 2030 beibehalten.

Abbildung 75:  $c_w$ -Werte unterschiedlicher Nutzfahrzeuge



Quelle: Schütz und Hucho, 2013

Für mittelschwere Lkw bis 12 t zulässigem Gesamtgewicht wurde die für Lkw größte Stirnfläche von 9 m<sup>2</sup> angenommen Heißling (2013) und als konstant bis zum Jahr 2030 angesehen. Analog zu den leichten Lkw existieren auch bei den mittelschweren Lkw unterschiedliche Aufbautypen. Die am häufigsten vertretenen Typen sind *geschlossener Kasten*, *Hakenlift/Ladegerät*, *offener Kasten* sowie *Kipper* (Kraftfahrt-Bundesamt, 2014c). Für das komDRIVE Szenario erfolgt eine grobe Unterteilung in die beiden Klassen *Kasten* und *Pritsche*. Da keine Prognosen für die Entwicklung der  $c_w$ -Werte bis zum Jahr 2030 vorliegen, wird angenommen, dass sich der Wert für den Aufbau *Kasten* von 0,5 auf das realistische Minimum von 0,45 (Abbildung 75) reduzieren wird. Diese Verbesserung um 0,05 von 2015 bis 2030 wird ebenfalls für die Gruppe *Pritsche* angenommen.

Tabelle 31 zeigt die im Projekt angenommenen Werte für  $c_w$  und  $A$  der unterschiedlichen Fahrzeugklassen in den entsprechenden Jahren.

### Leergewicht und Zuladung

Je leichter ein Fahrzeug ist, desto geringer ist der Energiebedarf für dessen Fortbewegung. Nach Antriebsart können sich die Leergewichte jedoch zum Teil erheblich unterscheiden.

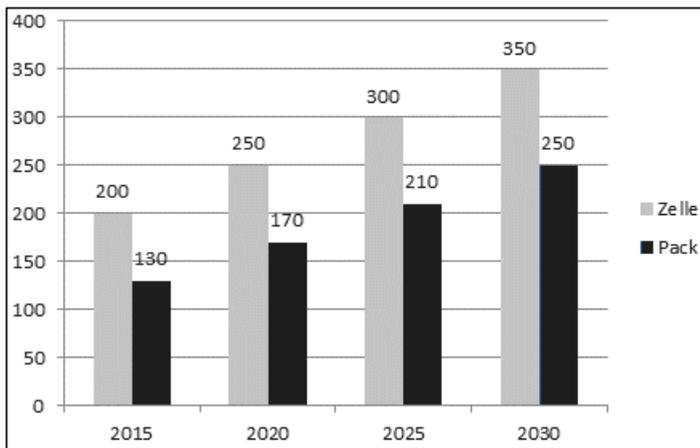
Tabelle 31: Übersicht der Luftwiderstandsbeiwerte und Stirflächen der entsprechenden Fahrzeuge

Jahr	Pkw				Leichte Lkw 3,5 t				Mittelschwere Lkw 12 t			
	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030
$c_w$ Kasten	0,31	0,293	0,277	0,26	0,32	0,303	0,287	0,27	0,5	0,483	0,467	0,45
$c_w$ Pritsche	-	-	-	-	0,4	0,383	0,366	0,35	0,6	0,583	0,567	0,55
A [m <sup>2</sup> ]	2,25	2,25	2,25	2,25	3,6	3,6	3,6	3,6	9	9	9	9

### Leergewicht batterieelektrischer Fahrzeuge

Nach Linssen (2012) beträgt das Leergewicht des batterieelektrischen Referenz-Pkw  $m_{0,\text{Pkw}} = 1522$  kg. Der batterieelektrische leichte Lkw hingegen wiegt  $m_0 = 2200$  kg (Daimler AG, 2011). Aufgrund der Skalierung des mittelschweren Lkw von 18 t zulässigen Gesamtgewichts auf 12 t sind hierbei weitere Überlegungen notwendig. Unter der Annahme, dass das Fahrzeugchassis unverändert bleibt, ergibt sich die Gewichts Differenz lediglich aus der geänderten Batteriegröße, sowie Elektromotor und Leistungselektronik des Referenzfahrzeugs. Die Differenz des Batteriegewichtes kann über die Energiedichte der Batterien (Batteriepacks) ermittelt werden (vgl. Abbildung 76).

Abbildung 76: Entwicklung der Energiedichte in Wh/kg von 2015 bis 2030



Quelle: Eigene Analyse im Rahmen von komDRIVE

Die Differenz der Gewichte für Elektromotoren und Leistungselektronik kann über die jeweiligen spezifischen Leistungen berechnet werden. Nach Plotkin und Singh (2009) wurden für den Elektromotor spezifische Leistungen von  $\Pi_{\text{Mot},2015} = 1250 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$  im Jahr 2015 und  $\Pi_{\text{Mot},2030} = 1500 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$  im Jahr 2030 angenommen, bzw. für die Leistungselektronik  $\Pi_{\text{LE},2015} = 10.000 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$  im Jahr 2015 und  $\Pi_{\text{LE},2030} = 13.000 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$  im Jahr 2030. Hierbei wurde – da keine genaueren Angaben zur Entwicklung der spezifischen Leistungen zwischen diesen

Jahren vorliegen – ein linearer Trend angenommen, wodurch sich die in Tabelle 32 dargestellten Werte für die Jahre  $j = 2015, 2020, 2025$  und  $2030$  ergeben. Des Weiteren wurden mögliche Gewichtseinsparungen des restlichen Fahrzeugs ohne Elektromotor, Leistungselektronik und Batterie, auch Glider genannt, über den Faktor  $k_m$  berücksichtigt. Diese wurde mit 3 % bis zum Jahr 2030 bei einem linearen Trend angesetzt (Zimmer und Fritsche, 2008). Zwar werden 3 % bis 5 % als realistisch angesehen, jedoch bezieht sich dies auf den gesamten konventionellen Lkw.

Tabelle 32: Entwicklung der Energiedichte der Batteriepacks, der spezifischen Leistung der Elektro- und Dieselmotoren sowie der spezifischen Leistung der Leistungselektronik in den Stützjahren von 2015 bis 2030

Jahr	2015	2020	2025	2030
(gravimetrische) Energiedichte $\Gamma_j$ [kWh/kg]	0,13	0,17	0,21	0,25
Spezifische Leistung E-Motor $\Pi_{Mot,j}$ [kW/kg]	1,25	1,3333	1,4167	1,5
Spezifische Leistung Leistungselektronik $\Pi_{LE,j}$ [kW/kg]	10	11	12	13
Spezifische Leistung Diesel-Motor $\Pi_{Diesel,j}$ [kW/kg]	0,46	0,466	0,4733	0,48
Gewichtseinsparungsfaktor Glider $k_{m,j}$	0	0,01	0,02	0,03

Das Leergewicht des E-FORCE ONE als 18-t-Version wird mit  $m_{0,18t} = 8$  t angegeben bei einer Leistung von  $P_{18t} = 300$  kW und einer Batteriekapazität von  $C_{18t} = 240$  kWh (E-Force, 2015). Mit dem Skalierungsfaktor  $a = \frac{12t}{18t} = \frac{2}{3}$  ergibt sich die Leermasse des 12-t-Referenzfahrzeugs im Jahr 2015  $m_{0,12t}$  zu:

$$m_{0,12t} = m_{0,18t} - (1 - a) * \left( \frac{P_{18t}}{\Pi_{Mot,2015}} + \frac{P_{18t}}{\Pi_{LE,2015}} + \frac{C_{18t}}{\Gamma_{2015}} \right) \approx 7,3 t$$

Mithilfe der in Tabelle 32 angegebenen Daten lassen sich ebenfalls die Leergewichte aller Fahrzeugklassen bis zum Jahr 2030 ausgehend vom Leergewicht im Jahr 2015 über die Gleichung (6) ermitteln.

$$m_{0,j} = m_{Glider,j} + m_{Mot,j} + m_{LE,j} + m_{Bat,j} \\ = m_{Glider,2015} \cdot (1 - k_{m,j}) + \left( \frac{P}{\Pi_{Mot,j}} \right) + \left( \frac{P}{\Pi_{LE,j}} \right) + \left( \frac{C}{\Gamma_j} \right) \quad (6)$$

Mit:

$$m_{Glider,2015} = m_{0,2015} - \frac{P}{\Pi_{Mot,2015}} - \frac{P}{\Pi_{LE,2015}} - \frac{C}{\Gamma_{2015}} \quad \dots \text{Masse des Gliders im Jahr 2015.}$$

Tabelle 33 zeigt die sich ergebenden Leergewichte  $m_0$  der unterschiedlichen batterieelektrischen Fahrzeugklassen in den entsprechenden Jahren, sowie die daraus resultierende maximale Zuladung  $m_Z$  für leichte und mittelschwere Lkw, die im komDRIVE-Szenario angenommen wurden.

### Leergewicht konventioneller Fahrzeuge

Für konventionelle Fahrzeuge wurde das Leergewicht anhand von komponentenweisen Vergleichen bestimmt. Über die eingangs abgeleiteten Nennleistungen der konventionellen Fahrzeuge, können über die spezifischen Leistungen der Dieselaggregate  $\Pi_{(Diesel,j)}$  (nach Plotkin und Singh, 2009) in Tabelle 33 die Gewichte der Motoren für die jeweiligen

Konfigurationen berechnet werden. Gleiches gilt entsprechend für die übrigen Komponenten. Umfangreiche Analysen sind in Dahremöller (2015) zu finden.

Tabelle 33: Übersicht der Leergewichte und max. Zuladungen der entsprechenden batterieelektrischen Fahrzeuge (gerundet auf volle 5)

	Pkw				Leichte Lkw 3,5 t				Mittelschwere Lkw 12 t			
Jahr	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030
$m_0$ [kg]	1.520	1.460	1.420	1.385	2.200	2.110	2.050	2.000	7.300	6.940	6.690	6.500
$m_z$ [kg]	–	–	–	–	1.300	1.390	1.450	1.500	4.700	5.060	5.310	5.500

Tabelle 34 zeigt die resultierenden Annahmen für die Leergewichte und maximale Zuladungen der entsprechenden Fahrzeuge für die unterschiedlichen Stützjahre.

Tabelle 34: Leergewicht und maximale Zuladung der konventionellen Fahrzeuge in kg

	Pkw				Leichte Lkw 3,5 t				Mittelschwere Lkw 12 t			
Jahr	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030
$m_0$ [kg]	1485	1469	1459	1444	2113	2089	2072	2048	6363	6301	6236	6174
$m_z$ [kg]	–	–	–	–	1387	1411	1428	1452	5637	5699	5764	5826

### Investitionskosten

Anhand der oben ermittelten Parameter lassen sich die Investitionskosten ebenfalls über eine komponentenweise Betrachtung ermitteln, idealerweise über leistungsbezogene Kosten in €/kW. Detaillierte Analysen sind in Dahremöller (2015) zu finden. Vereinfachend wurde angenommen, dass sich die Daten für leichte Lkw annähernd auf Pkw übertragen lassen. Lediglich beim Glider wurden für Pkw die Kostenangaben aus Linsen (2012) verwendet.

Der Batteriepreis wurde aufbauend auf spezifischen Kosten je kWh und der zeitlichen Entwicklung in Abbildung 96 bestimmt. Als Umrechnungsfaktor wurde der Wechselkurs vom 01.01.2015 mit 0,83 €/€ angenommen.

Damit ergeben sich die in Tabelle 35 dargestellten Daten je Komponente, Fahrzeugtyp und Jahr. Daraus können entsprechend die Gesamtinvestitionskosten der Fahrzeuge bestimmt werden. Ein relevanter Faktor ist hierbei der *RPE* (retail price equivalent), welcher für konventionelle Fahrzeuge mit 1,45 angenommen wurde und das Verhältnis von Verkaufspreis zu Herstellungspreis beschreibt. Unter der Annahme höherer Entwicklungskosten wurde ein um 33 % höherer *RPE* für BEV und PHEV für das komDRIVE-Szenario festgelegt, sodass sich die berechneten Investitionskosten den Kosten realer Fahrzeugkonfigurationen nähern.

Tabelle 35: Investitionskosten der Fahrzeugkomponenten in den jeweiligen Stützjahren in €2015

Jahr	Pkw				Leichte Lkw 3,5 t				Mittelschwere Lkw 12 t			
	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030
Glider	16.165	16.165	16.165	16.165	17.841	17.841	17.841	17.841	50.821	50.821	50.821	50.821
ICE (je kW)	<b>54,8</b>	<b>55,4</b>	<b>55,9</b>	<b>56,4</b>	<b>54,8</b>	<b>55,4</b>	<b>55,9</b>	<b>56,4</b>	<b>73,3</b>	<b>74,8</b>	<b>76,4</b>	<b>77,9</b>
CO <sub>2</sub> -Opt.	0	1.065	2131	3.196	0	1.065	2131	3.196	0	1.065	2131	3.196
Getriebe (je kW)	<b>11,4</b>	<b>11,4</b>	<b>11,4</b>	<b>11,4</b>	<b>11,4</b>	<b>11,4</b>	<b>11,4</b>	<b>11,4</b>	<b>11,4</b>	<b>11,4</b>	<b>11,4</b>	<b>11,4</b>
Tank	125	125	125	125	125	125	125	125	332	332	332	332
Starter- batterie	150	150	150	150	150	150	150	150	300	300	300	300
E-Motor (je kW)	<b>23,8</b>	<b>20,7</b>	<b>17,6</b>	<b>14,5</b>	<b>23,8</b>	<b>20,7</b>	<b>17,6</b>	<b>14,5</b>	<b>22,5</b>	<b>19,7</b>	<b>17,0</b>	<b>14,3</b>
Leistungs- elektronik (je kW)	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>13</b>	<b>10</b>	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>13</b>	<b>10</b>	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>13</b>	<b>10</b>
Batterie (je kWh)	<b>282</b>	<b>207,5</b>	<b>157,7</b>	<b>124,5</b>	<b>282</b>	<b>207,5</b>	<b>157,7</b>	<b>124,5</b>	<b>282</b>	<b>207,5</b>	<b>157,7</b>	<b>124,5</b>

Quelle: Linssen, 2012; Dahremöller, 2015

Tabelle 36 zeigt die im komDRIVE-Szenario verwendeten Werte für die Investitionskosten der jeweiligen Konfigurationen in den entsprechenden Stützjahren.

Tabelle 36: Investitionskosten der Gesamtfahrzeuge in den jeweiligen Stützjahren in €2015

Jahr	Pkw				Leichte Lkw 3,5 t				Mittelschwere Lkw 12 t			
	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030
ICEV	20.147	21.246	22.340	23.433	23.213	24.325	25.429	26.533	62.464	63.724	64.998	66.258
BEV	33.884	31.042	29.072	27.581	41.021	36.967	34.176	32.100	139.891	122.494	110.646	102.066

### Plug-In Hybride (PHEV)

Bei den Parametern der PHEV handelt sich lediglich um skalierte Zusammensetzungen der vorangegangenen rein konventionellen und rein elektrischen Fahrzeuge. Die notwendigen Faktoren wurden dabei anhand der Daten von Linssen bestimmt (Linssen, 2012). Dabei wurden Leistung und Kennfelder der jeweiligen Verbrennungsmotoren sowie die allgemeinen Fahrzeugparameter wie Luftwiderstandsbeiwert, Rollwiderstandsbeiwert und Stirnfläche wie oben beibehalten und lediglich die elektrischen Parameter variiert. Die elektromotorische Leistung der PHEV Konfigurationen ist dabei halb so groß wie die der BEV-Varianten. Die Batteriekapazität der PHEV beträgt nur ein Viertel der Kapazität der BEV-Varianten. Bei der Berechnung der Leergewichte und der Investitionskosten wurde weiterhin angenommen, dass für Plug-In-Hybride eine Starterbatterie entfallen kann. Einen detaillierten Überblick über die Fahrzeug-Konfigurationen liefern die Tabelle 37 bis Tabelle 39.

## Berechnung des Energie- und Kraftstoffverbrauchs und Beschreibung der Simulationsmodelle

Wie bereits in Kapitel 3.4.3 beschrieben, basieren die Simulationsmodelle der Fahrzeuge auf denen aus dem Vorgängerprojekt NET-ELAN (vgl. Abbildung 25), wobei die in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Fahrzyklen als Input dienen – die Berechnungen finden dabei immer auf Basis aller Fahrzyklen je Fahrzeugklasse statt. Der Energieverbrauch bzw. der Kraftstoffverbrauch stellt die wesentliche Ausgangsgröße dar. Dieser wird für die einzelnen Stützjahre (2015, 2020, 2025 und 2030) separat berechnet. Eine detaillierte Beschreibung ist in Linssen (2012) nachzulesen. Dabei werden die Fahrzeugparameter wie oben aufgeführt für die jeweiligen Fahrzeugkonfigurationen und Jahre angepasst. Es sei außerdem die Betriebsstrategie der Plug-In-Hybriden erwähnt. Diese arbeitet in den beiden Modi *charge depleting mode* (CDM-Ladezustand der Batterie sinkt) und *charge sustaining mode* (CSM-Ladezustand der Batterie wird gehalten). Daraus ergibt sich ein – wie später noch gezeigt wird – signifikanter Zusammenhang zwischen dem Verbrauch der jeweiligen Energiequelle und der gefahrenen Tagesfahrstrecke. Weiterhin wird angenommen, dass die Fahrzeugbatterien bei BEV und PHEV zu Beginn der ersten täglichen Fahrt voll aufgeladen sind (Ladezustand der Batterien bei  $SOC_0 = 90\%$ ).

Ein weiterer bisher noch nicht ausgeführter Parameter ist der Auslastungsgrad der Fahrzeuge. Dieser beschreibt die Höhe der Zuladung der Fahrzeuge in Relation zur maximal zulässigen Zuladung und ist nur für die leichten und mittelschweren Lkw von Bedeutung, da im komDRIVE Szenario davon ausgegangen wird, dass mit Pkw, abgesehen vom Fahrer, keine relevanten Massen zwischen zwei Orten bewegt werden. Ausführliche Analysen hierzu fanden am Forschungszentrum Jülich statt (siehe Kapitel 4.5), welche die in Tabelle 37 bis Tabelle 39 angegebenen Werte ergaben.

Weiterhin wurden die Verbrauchswerte für die beiden im Energiesystemmodell des FZJ festgelegten Gruppen des Nahverkehrs mit Tagesfahrleistungen unter 50 km und des Fernverkehrs mit Tagesfahrleistungen über 50 km eingeteilt. Bei den angegebenen Verbrauchswerten handelt es sich um fahrleistungsgewichtete Mittelwerte, die aus den Berechnungen der einzelnen Fahrzyklen ermittelt wurden.

### Auswertung der Verbrauchsberechnungen

Betrachtet man Tabelle 37 bis Tabelle 39, so fällt auf, dass bei konventionellen leichten Lkw sowie bei konventionellen und batterieelektrischen mittelschweren Lkw mehr Energie bzw. Kraftstoff für Nahverkehrs-Fahrten benötigt wird, als für solche im Fernverkehr. Die wesentliche Ursache hierfür findet sich in den Fahrprofilen der entsprechenden Strecken. Diese sind geprägt von zahlreichen Anfahrvorgängen und Stopps. Durch bessere Wirkungsgrade der Elektromotoren und die Möglichkeit zur Rekuperation verringert sich bei den BEV-Varianten der Mehrverbrauch bei den kurzen Strecken und wandelt sich bei den Fahrprofilen der leichten Lkw in einen Minderverbrauch. Der erwartete Mehrverbrauch durch höhere  $c_w$ -Werte bei den Lkw mit der Aufbauart des offenen Kastens bzw. Pritsche im Gegensatz zu denen mit geschlossenem Kasten konnte ebenfalls in den Berechnungen gezeigt werden.

Tabelle 37: Zusammenfassung konventioneller Fahrzeuge (ICE Diesel)

max. Zuladung $m_z$ [kg]	Leergewicht $m_0$ [kg]	Stirnfläche $A$ [m <sup>2</sup> ]	Luftwiderstandsbeiwert $c_w$ (Kasten / Pritsche)	Rollwiderstandsbeiwert $f_R$	Leistung $P$ [kW]	Jahr			
						2015	2020	2025	2030
-	1485	2,25	0,31	0,010	56	Pkw			
-	1469	2,25	0,293	0,0087	56				
-	1459	2,25	0,277	0,0073	56				
-	1444	2,25	0,26	0,006	56				
1387	2113	3,6	0,32	0,009	77	Leichte Lkw 3,5 t			
			0,4						
1411	2089	3,6	0,303	0,0077	77				
			0,383						
1428	2072	3,6	0,287	0,0063	77				
			0,366						
1452	2048	3,6	0,27	0,005	77				
			0,35						
5637	6363	9,0	0,5	0,008	130	Mittelschwere Lkw 12 t			
			0,6						
5699	6301	9,0	0,483	0,0067	130				
			0,583						
5764	6236	9,0	0,467	0,0053	130				
			0,567						
5826	6174	9,0	0,45	0,004	130				
			0,55						

> 50 [km]		≤ 50 [km]	Mehrverbrauch Pritsche [%]	> 50 [km]	≤ 50 [km]	Verbrauch Diesel [l/100 km]	Investitions-kosten [€ <sub>2015</sub> ]	Auslastungs-grad [%]
-	-	-	-	7,42	6,42	6,96	20.147	-
-	-	-	-	7,23	6,26	6,78	21.246	-
-	-	-	-	7,05	6,10	6,61	22.340	-
-	-	-	-	6,90	5,93	6,45	23.433	-
4,72	0,68	4,12	9,07	9,92	9,19	23.213	9,9	
4,47	0,67	3,91	8,80	9,68	8,92	24.325	10,3	
4,15	0,60	3,62	8,55	9,48	8,68	25.429	10,7	
3,75	0,40	3,24	8,33	9,28	8,46	26.533	11,16	
1,30	0,30	0,65	22,90	28,43	26,25	62.464	19,7	
1,26	0,24	0,59	22,52	28,19	25,96	63.724	20,5	
0,86	0,22	0,44	22,23	27,97	25,71	64.998	21,33	
0,79	0,06	0,31	21,94	27,79	25,49	66.258	22,2	

Tabelle 38: Zusammenfassung batterieelektrischer Fahrzeuge

max. Zuladung $m_z$	Leergewicht $m_0$ [kg]	Stirnfläche $A$ [m <sup>2</sup> ]	Luftwiderstandsbeiwert $c_w$	Rollwiderstandsbeiwert	Batteriekapazität $C$	Leistung $P$ [kW]	Jahr			
							2015	2020	2025	2030
-	1.520	2,25	0,31	0,010	24,6	50	Pkw			
-	1.460	2,25	0,293	0,0087	24,6	50				
-	1.420	2,25	0,277	0,0073	24,6	50				
-	1.385	2,25	0,26	0,006	24,6	50				
1.300	2.200	3,6	0,32	0,009	36	60	Leichte Lkw 3,5 t			
			0,4							
1.390	2.110	3,6	0,303	0,0077	36	60				
			0,383							
1.450	2.050	3,6	0,287	0,0063	36	60	Mittel- schwere Lkw 12 t			
			0,366							
1.500	2.000	3,6	0,27	0,005	36	60				
			0,35							
4.700	7.300	9,0	0,5	0,008	160	200				
			0,6							
5.060	6.940	9,0	0,483	0,0067	160	200				
			0,583							
5.310	6.690	9,0	0,467	0,0053	160	200				
			0,567							
5.500	6.500	9,0	0,45	0,004	160	200				
			0,55							

Mehrverbrauch Pritsche [%]		Verbrauch [kW/h/100km]		Investitionsk osten [€ <sub>2015</sub> ]	Auslastungs- grad [%]
> 50 [km]	≤ 50 [km]	> 50 [km]	≤ 50 [km]		
-	-	19,07	16,71	33.884	-
-	-	17,94	15,73	31.042	-
-	-	16,91	14,87	29.072	-
-	-	15,93	14,07	27.581	-
8,05	3,61	25,47	23,79	41.021	9,9
8,54	3,84	23,9	22,38	36.967	10,3
8,95	4,02	22,46	21,13	34.176	10,7
10,16	4,30	21,07	20,01	32.100	11,16
6,11	4,50	60,55	62,05	139.891	19,7
6,62	4,84	55,87	57,48	122.494	20,5
7,13	5,17	51,58	53,36	110.646	21,33
7,66	5,53	47,77	49,76	102.066	22,2

Tabelle 39: Zusammenfassung Plug-In Hybride

Stirnfläche $A$ [m <sup>2</sup> ]	Luftwiderstandsbeiwert $c_{iw}$ (Kasten / Pritsche)	Rollwiderstands- beiwert $f_R$	Batteriekapazität $C$ [kWh]	Leistung $P_{EM}$ [kW]	Leistung Verbren- nungsmotor $P_{ICE}$ [kW]	Jahr
2,25	0,31	0,010	6,1	25	56	<b>Pkw</b>
2,25	0,293	0,0087	6,1	25	56	
2,25	0,277	0,0073	6,1	25	56	
2,25	0,26	0,006	6,1	25	56	
3,6	0,32	0,009	9	30	77	<b>Leichte Lkw 3,5 t</b>
3,6	0,4	0,0077	9	30	77	
3,6	0,303	0,0063	9	30	77	
3,6	0,383	0,005	9	30	77	
3,6	0,287	0,0063	9	30	77	<b>Mittel- schwere Lkw 12 t</b>
3,6	0,366	0,005	9	30	77	
3,6	0,27	0,005	9	30	77	
3,6	0,35	0,005	9	30	77	
9,0	0,5	0,008	40	100	130	<b>Mittel- schwere Lkw 12 t</b>
9,0	0,6	0,0067	40	100	130	
9,0	0,483	0,0053	40	100	130	
9,0	0,583	0,004	40	100	130	
9,0	0,467	0,0053	40	100	130	<b>Mittel- schwere Lkw 12 t</b>
9,0	0,567	0,004	40	100	130	
9,0	0,45	0,004	40	100	130	<b>Mittel- schwere Lkw 12 t</b>
9,0	0,55	0,004	40	100	130	

Mehrverbrauch Pritsche [%]		Verbr. Diesel [l/100 km]		Investitions- kosten [€msl]	Auslastungs- grad [%]	max. Zuladung mz [kg]	Leergewicht m <sub>0</sub> [kg]
≤ 50 [km]	> 50 [km]	≤ 50 [km]	> 50 [km]				
-	-	3,24	0,53	30.273	-	-	1.540
-	-	3,08	0,47	29.511	-	-	1.510
-	-	2,92	0,43	28.975	-	-	1.490
-	-	2,79	0,38	28.540	-	-	1.470
6,45	8,86	5,00	0,85	35.717	9,9	1.310	2.190
7,01	9,13	4,73	0,75	34.643	10,3	1.340	2.160
7,30	9,51	4,44	0,66	33.895	10,7	1.380	2.120
9,14	10,12	4,17	0,56	33.306	11,16	1.410	2.090
10,09	6,73	3,36	1,20	103.067	19,7	5.280	6.720
12,11	7,34	3,18	1,01	98.592	20,5	5.420	6.580
15,97	9,67	2,95	0,83	95.594	21,33	5.530	6.470
15,33	10,23	2,70	0,66	93.329	22,2	5.630	6.370

Mehrverbrauch Pritsche [%]		Energieverbrauch [kWh/100 km]		> 50 [km]
> 50 [km]	≤ 50 [km]	> 50 [km]	≤ 50 [km]	> 50 [km]
-	-	4,65	12,15	-
-	-	4,58	11,69	-
-	-	4,53	11,24	-
-	-	4,50	10,81	-
1,12	2,34	3,85	15,08	9,02
1,38	2,57	3,78	14,35	9,26
1,49	2,95	3,69	13,61	9,62
1,13	3,02	3,62	12,89	10,18
0,01	3,05	46,53	68,06	4,90
0,00	3,49	46,49	64,48	5,00
0,13	3,71	46,40	60,63	6,93
0,41	4,59	46,01	56,68	8,34

Da die berechneten Werte einen Zusammenhang zwischen Tagesfahrleistung und mittlerem Verbrauch vermuten ließen, wurde dieser für die einzelnen Fahrzeugklassen und Antriebsarten näher analysiert. Unter dem mittleren Verbrauch wird hierbei der gewichtete Mittelwert (in den folgenden Abbildungen als *weighted mean* bezeichnet) aus den Verbräuchen einer Menge von Einzelzyklen verstanden. Es handelt sich nicht um den arithmetischen Mittelwert, der in den folgenden Abbildungen als *mean* bezeichnet wird. Der gewichtete Mittelwert beschreibt somit das Verhältnis aus Gesamtverbrauch in Litern bzw. Kilowattstunden zum Gesamtweg bezogen auf eine Strecke von 100 km.

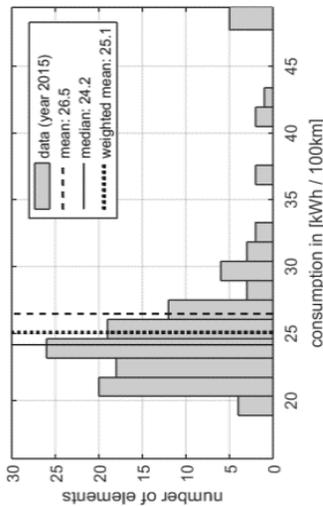
Vergleicht man die Ergebnisse für BEV und ICEV in Abbildung 77 am Beispiel leichter Lkw, so werden mehrere Eigenschaften der Fahrzeugantriebe sichtbar, die sich in den Verbrauchswerten niederschlagen. Die dargestellten Werte für Tagesfahrstrecken bis ca. 2–3 km kommen durch sehr viele Anfahr- und Stopp-Vorgänge bezogen auf den zurückgelegten Weg zustande und haben aufgrund der geringen Tagesfahrleistung kaum Einfluss auf den mittleren Verbrauch über alle Fahrzyklen. Die Tagesfahrstrecken erreichen bei BEV trotz identischer Fahrzyklen maximal ca. 140 km, obwohl die Fahrzeuge in den Zyklen auch deutlich längere Strecken zurücklegen (vgl. Abbildung für Diesel-Fahrzeuge).

Die Ursache dafür liegt darin, dass die Fahrt in den Simulationen beendet wird, sobald die Batterie leer ist und der *SOC* unter einen Wert von 10 % sinkt. Auf diese Weise kommen auch die in den Darstellungen zu sehenden sehr großen Abweichungen bei Tagesfahrstrecken von ca. 70 km bis 100 km zustande. Es handelt sich dabei fast ausschließlich um schnelle Autobahnfahrten, die einen deutlichen Anstieg der benötigten Antriebsenergie zur Folge haben. Gleichzeitig ist aber auch eine vorteilhafte Charakteristik der batterieelektrischen Fahrzeuge gegenüber den konventionellen Ausführungen für kurze Strecken bis ca. 50 km zu erkennen. Während bei BEV nur eine leichte Streuung zu beobachten ist, variieren die Verbrauchswerte der ICEV stärker und nehmen häufig deutlich höhere Werte an. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass BEV für kurze Strecken besonders effizient und geeignet sind. Hohe Geschwindigkeiten sollten mit diesen Fahrzeugen allerdings vermieden werden, um Reichweitereinbrüche zu verhindern.

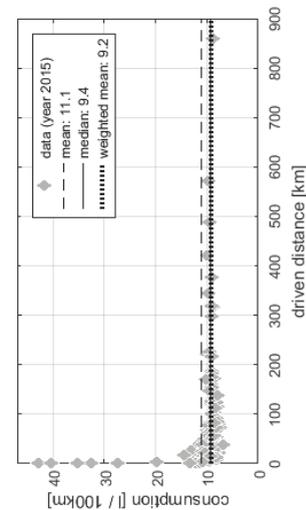
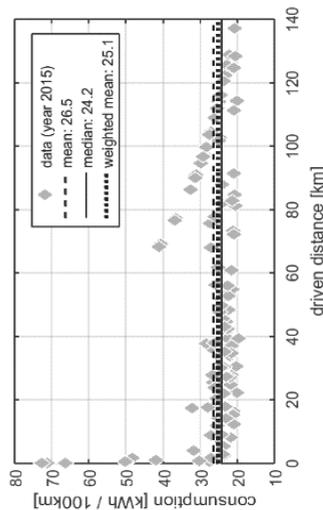
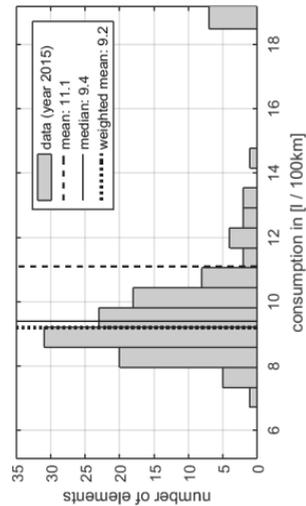
Insgesamt zeigen sich bei den beiden Antriebsarten mit nur einer Energiequelle normalverteilungsfähnliche Häufigkeitsverteilungen bzgl. der Verbrauchswerte. Zwar variieren diese abhängig vom Fahrprofil und der Fahrweise, die Abweichungen vom häufigsten Wert sind jedoch moderat. Für spätere TCO-Betrachtungen ist es deshalb im Rahmen der sonstigen Unsicherheiten unkritisch einen festen Wert für den Verbrauch zugrunde zu legen.

Abbildung 77: Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen Verbrauchswerte aller Fahrzyklen leichter Lkw (oben) und Korrelation des Verbrauchs mit Tagesfahrstrecken (unten) unterschieden nach batterieelektrischen Fahrzeugen (links) und konventionellen Diesel-Fahrzeugen (rechts)

**Leichte Lkw - BEV**



**Leichte Lkw - ICEV**



Betrachtet man hingegen die Verbrauchsdaten der PHEV in Abbildung 78, so ergibt sich ein deutlich verändertes Bild. Es besteht hier ein signifikanter Zusammenhang zwischen

Tagesfahrleistung und Verbrauch je Energiequelle, der unter anderem von der Betriebsstrategie beeinflusst wird. So ergibt sich ein hyperbelartiger Verlauf beim mittleren Verbrauch an elektrischer Energie dadurch, dass zu Beginn der Fahrt überwiegend rein elektrisch gefahren wird und der Verbrennungsmotor nur für Lastspitzen oder ab dem Zeitpunkt, wenn die Batterie leer ist zugeschaltet wird. Das heißt ab dem Zeitpunkt, wenn der Betriebsmodus von CDM auf CSM umgeschaltet wird, kann der Verbrauch an elektrischer Energie näherungsweise durch die Beziehung

$$\text{mittl. Verbrauch} = \frac{0,8 \cdot \text{Batterienennkapazität in [kWh]}}{\text{Weg in 100 [km]}}$$

beschrieben werden. Die nutzbare Batteriekapazität ergibt sich aus dem erlaubten *SOC*-Band (10 % bis 90 %) multipliziert mit der Nennkapazität. Der mittlere Verbrauch an elektrischer Energie sinkt demnach mit zunehmender Tagesfahrleistung. Genau umgekehrt verhält es sich bei dem mittleren Kraftstoffverbrauch. Dieser steigt mit zunehmender Tagesfahrleistung und geht allmählich in eine Sättigung über. Bei einer Aufteilung der Verbrauchsdaten in die Gruppen Nahverkehr und Fernverkehr ergeben sich somit gegensätzliche Werte. Diese grobe Unterteilung bildet jedoch nur ungenau den individuellen Verbrauch der Fahrzeuge ab, was unter anderem bei späteren TCO-Berechnungen zu beachten ist. Aus diesem Grund sind auch TCO-Berechnungen auf Basis von realen ermittelten Verbrauchsdaten z.B. über den NEFZ für PHEV nicht zielführend. Bei diesen an realen Fahrzeugen ermittelten Verbräuchen wird üblicherweise nur ein Wertepaar angegeben, häufig auch nur ein einziger Wert für den mittleren Kraftstoffverbrauch.

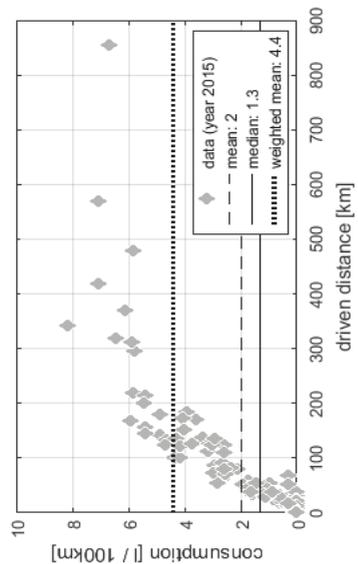
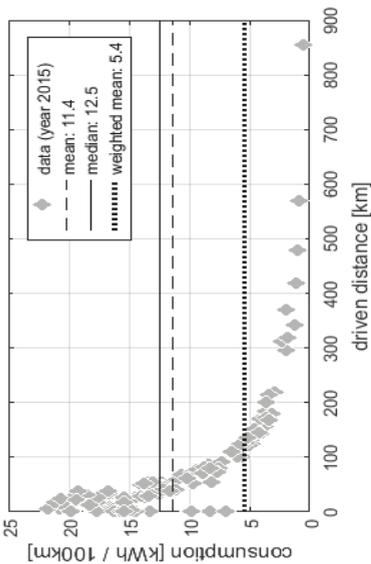
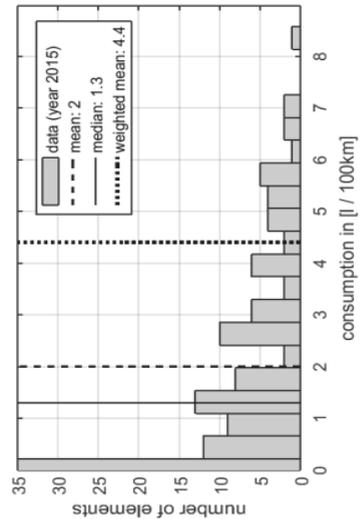
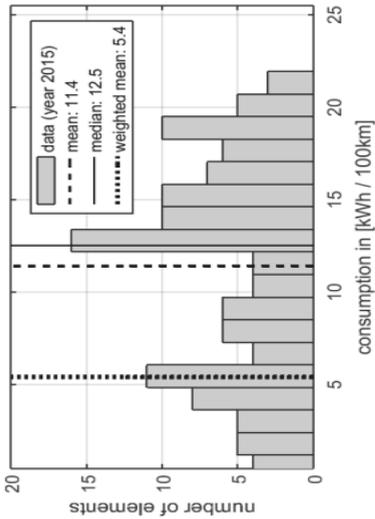
Insgesamt zeigt sich bei den PHEV im Gegensatz zu Dieselfahrzeugen ein deutlich geringerer Verbrauch auch bei sehr langen Strecken. Dies wird maßgeblich durch die Lastpunktverschiebung erreicht, wodurch der Verbrennungsmotor überwiegend im optimalen (verbrauchsgünstigsten) Betriebspunkt mit hohem Wirkungsgrad betrieben werden kann. Möglichkeiten zur Rekuperation und das elektromotorische Anfahren senken den Verbrauch bei kurzen Strecken mit zahlreichen Anfahr- und Stoppvorgängen. In diesen Teillastbereichen weisen die Verbrennungsmotoren nur geringe Wirkungsgrade auf.

Deutlich wird jedoch auch ein Konflikt in Bezug auf PHEV. Üblicherweise werden diese dann als Option diskutiert, wenn das Fahrprofil eher inhomogen ausfällt und zumindest vereinzelt große Strecken zurückgelegt werden. Einerseits sinkt dadurch der Elektrifizierungsgrad, da die Fahrzeuge im Vergleich zu BEV eine deutlich geringere rein elektrische Reichweite aufweisen. Andererseits beeinflussen große Strecken den mittleren Verbrauch sehr stark, da dieser eben über die Tagesfahrstrecken gewichtet wird. Dennoch sind das Kraftstoffeinsparungspotential und damit auch die Emissionsreduktionen erheblich. Der Umstieg von ICEV auf PHEV hätte gemäß Abbildung 78 und Abbildung 77 (rechts) eine Verringerung des Kraftstoffbedarfs von etwa 9,2 auf 7 bis 8 l/100 km, was einer Einsparung von 13 % bis 24 % entspricht, zur Folge.

Abbildung 78: Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen Verbrauchswerte aller Fahrzyklen leichter Lkw (oben) und Korrelation des Verbrauchs mit Tagesfahrstrecken (unten) für PHEV

**Leichte Lkw - PHEV (elektrische Energie)**

**Leichte Lkw - PHEV (Dieselkraftstoff)**



## 4.1.6 Gesamtkostenanalyse – TCO

(D. Dreyhaupt, S. Marker)

Zur Einschätzung der Wirtschaftlichkeit der modellierten Fahrzeuge wurde im Projekt ein einfaches TCO-Modell im Rahmen des komDRIVE-Szenarios erstellt. Da es sich hierbei um eine allgemeinere Betrachtung des innerstädtischen Wirtschaftsverkehrs mit den Parametern des Energiesystemmodells handeln sollte, wurden überwiegend statistische Daten (vgl. Kapitel 4.5) zugrunde gelegt. Folgende Daten sind für die Gesamtkostenanalyse relevant:

Investitionskosten der Fahrzeuge: Die Investitionskosten werden im Abschnitt 4.1.2 beschrieben und basieren überwiegend auf Dahremöller (2015). Der Kapitaldienst wurde anschließend über die Annuitätenmethode bei einem über das Energiesystemmodell festgelegten Zinssatz von 5 % p.a. berechnet.

Restwert: Der Restwert ist ein wichtiger Parameter, welcher die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge entscheidend beeinflussen kann. Detailliert wurde er in Linz (2003) für konventionelle Fahrzeuge analysiert. Hier wurde ein Wertverlust von etwa 15 % pro Jahr ermittelt. Für BEV und PHEV liegen nur wenig belastbare Analysen vor. Die Anzahl dieser Fahrzeuge am Gesamtbestand ist hierfür zu gering. Aus diesem Grund wurde für das TCO-Szenario die Annahme getroffen, dass sich der (prozentuale) Restwert für ICEV, BEV und PHEV auf gleichem Niveau befindet.

Jahresfahrleistung: Die statistischen Jahresfahrleistungen der unterschiedlichen Fahrzeugklassen basieren auf den Daten des Energiesystemmodells (vgl. hierzu Kapitel 4.5). Neben diesen statistischen Werten, wurden zum Vergleich auch die Daten aus den Fahrzeugvermessungen mit einbezogen.

Energie- und Kraftstoffpreise: Neben der Jahresfahrleistung flossen in die TCO-Berechnungen auch die Daten der Strom- und Kraftstoffpreise für den Bereich „Gewerbe und Handel“ aus dem Energiesystemmodell ein. Zusätzlich wurde das Potenzial der Systemdienstleistungen (vgl. Kapitel 4.3.2) mit einbezogen. Hierbei handelt es sich um optimistische Einschätzungen des Energiepreises, da Kosten für mögliche Aufwendungen, um diese Systemdienstleistungen anbieten zu können, noch nicht enthalten sind.

Kraftstoff- und Energieverbrauch: Als Kraftstoff- und Energieverbrauch wurden die in Kapitel 0 vorgestellten Simulationsergebnisse anhand realer Messdaten angenommen.

Haltedauer der Fahrzeuge: Die Haltedauer der Fahrzeuge wurde analog Hacker (2015) mit 8 Jahren angenommen.

Variable Betriebskosten: Hierzu zählen die Reifenkosten sowie die Kosten für die Wartung, die infolge der Fahrzeugnutzung entstehen. Im Rahmen des Projektes komDRIVE wurden diese Kosten von Dahremöller (2015) untersucht. Die Analyse ergab Reifenkosten für leichte Lkw von 0,0134 €/km im Jahr 2015 bei einem jährlichen linearen Wachstum von 1,6 %. Dieser Wert wurde ebenso für Pkw angenommen. Für mittelschwere Lkw betragen die Reifenkosten 0,02 €/km ebenfalls bei einem jährlichen linearen Wachstum von 1,6 %. Die Wartungskosten wurden für leichte Lkw in den Varianten ICEV und PHEV zu 0,04 €/km in 2015 bei einem linearen Wachstum von 2,5 % pro Jahr bestimmt, die im Rahmen der TCO-Analysen ebenso für Pkw (ICEV und PHEV) angenommen wurden. Für mittelschwere Lkw

(ICEV und PHEV) ergab sich ein Wert von 0,09 €/km im Jahr 2015 bei einem linearen Wachstum von 2,5 %. Bei den batterieelektrischen Pendants fallen Wartungskosten in Höhe von 75 % der Kosten für die konventionelle Varianten an.

Kraftfahrzeugsteuer: Gemäß Hacker (2015) wurde angenommen, dass die Kraftfahrzeugsteuer für Diesel-Pkw 193 € pro Jahr, für leichte Lkw 294 €/a und für mittelschwere Lkw 534 €/a beträgt. Weiterhin wurde angenommen, dass diese Werte gleichermaßen für die PHEV-Varianten gelten, wohingegen die BEV-Varianten von der Kraftfahrzeugsteuer befreit sind.

Versicherung: Ebenfalls aus Hacker (2015) wurden die Daten für die Kosten der Fahrzeugversicherung übernommen. Die Kosten für Pkw belaufen sich hiernach auf 901 €/a, für leichte Lkw auf 903 €/a und für mittelschwere Lkw auf 2936 €/a. Diese Werte gelten für alle Antriebsarten.

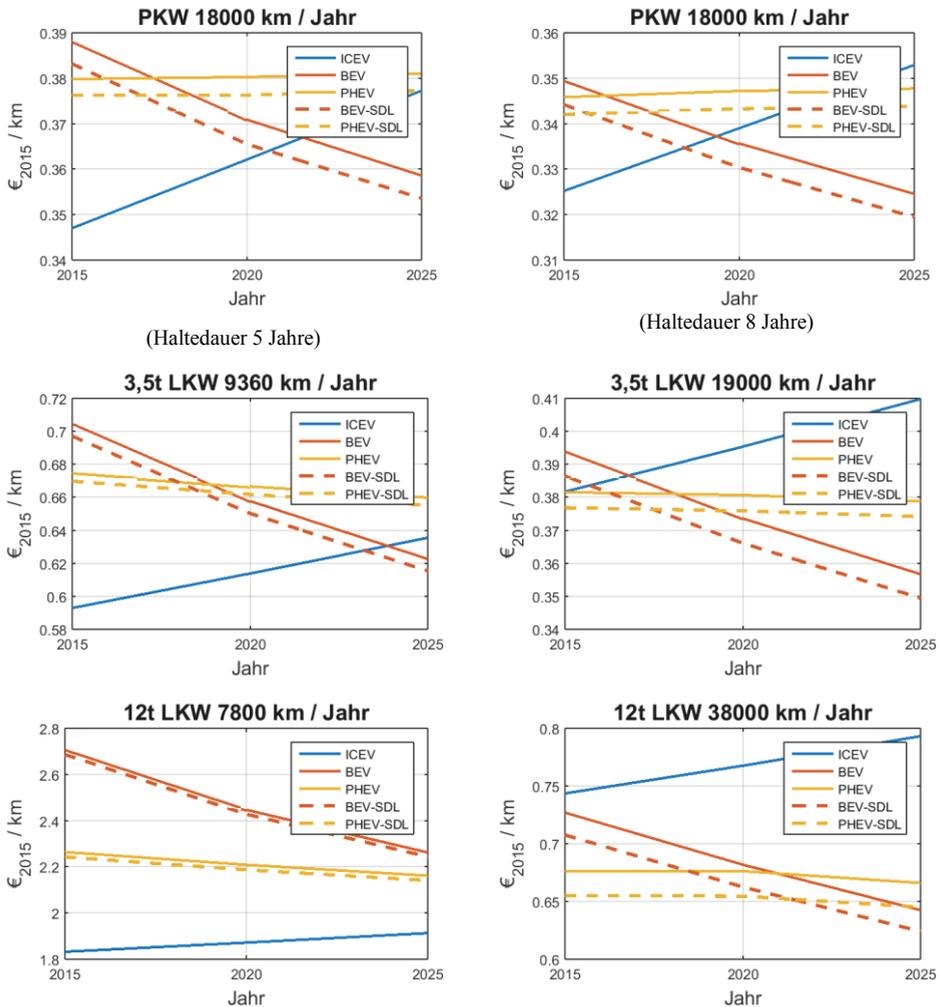
HU/AU: Eine eher untergeordnete Rolle bei den TCO-Analysen spielen die Kosten für Hauptuntersuchung und Abgasuntersuchung. Nach (TÜV SÜD AG, 2015) betragen die Kosten für die Hauptuntersuchung bei Pkw und leichten Lkw 53,50 € und für mittelschwere Lkw 91 €. Die Abgasuntersuchung verursacht bei Pkw und leichten Lkw Kosten in Höhe von 44,50 € und bei den mittelschweren Lkw 77,50 €. Dabei ist zu beachten, dass die Inspektionen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge alle zwei Jahre durchzuführen sind. Für mittelschwere Lkw gilt eine jährliche Untersuchungspflicht. Im Vergleich zu den übrigen Kostenbestandteilen der TCO sind die Kosten für HU und AU nahezu vernachlässigbar.

Abbildung 79 zeigt die Gesamtbetriebskosten für Pkw (oben), leichte Lkw (mittig) und mittelschwere Lkw (unten) jeweils mit einer Parametervariation. Während bei den Lkw die Jahresfahrleistungen variiert wurden, wurden bei Pkw beispielhaft die Auswirkungen bei Veränderung der Haltedauer von acht auf fünf Jahre analysiert.

Für Pkw (oben) mit unterschiedlichen Haltedauern sowie für leichte Lkw (mittig) und mittelschwere Lkw (unten) mit unterschiedlichen Jahresfahrleistungen. Aufgetragen sind die Gesamtkosten über die Haltedauer bei Kauf in den aufgetragenen Jahren.

Bezüglich der Pkw zeigt sich, dass mit den getroffenen Annahmen im Jahr 2015 keine Wirtschaftlichkeit für BEV und PHEV gegeben ist. Abhängig von der Haltedauer werden die batterieelektrischen Fahrzeuge bereits ca. 2017 (fünf Jahre Haltedauer) bzw. 2016 (acht Jahre Haltedauer) günstiger als die Plug-In Hybriden. Ein Schnittpunkt mit den konventionellen Fahrzeugen wird 2021 bzw. 2019 erreicht. Das Nutzen von Systemdienstleistungen verschiebt den Break-Even jeweils um ca. ein Jahr (BEV) nach vorn. Für PHEV fällt dieser Effekt etwas geringer aus.

Abbildung 79: Gesamtbetriebskosten pro Kilometer im komDRIVE-Szenario



Im Bereich der leichten Lkw wurden TCO-Berechnungen für zwei unterschiedliche Jahresfahrleistungen durchgeführt. Einerseits wurde hierbei das Fahrprofil der realen Fahrzeuge von *KEPI* (vgl. Abschnitt 0) herangezogen mit durchschnittlichen Wegstrecken von 30 km pro Tag bei sechs Tagen pro Woche, was einer Jahresfahrleistung von ca. 12.480 km entspricht. Andererseits wurde die statistische Jahresfahrleistung mit 19.000 km gegenübergestellt. Dies führt zu dem Ergebnis, dass im ersten Fall bei 12.480 km Jahresfahrleistung die konventionellen Varianten bis ca. 2024 die günstigste Option und die batterieelektrischen Varianten 2015 die teuerste Option darstellen. Für höhere Jahresfahrleistungen von 19.000 km verschiebt sich dieses Bild. Bei einer Anschaffung im Jahr 2015 befinden sich die Gesamtbetriebskosten der Fahrzeuge auf ähnlichem Niveau, wobei die

BEV geringfügig teurer sind als PHEV und ICEV. PHEV stellen hierbei bis ca. 2018 die kostengünstigste Alternative dar.

Eine Ausnutzung des vollen Potentials von Netzdienstleistungen würde auch hier zu einer Verschiebung der Break-Even-Punkte um sechs bis zwölf Monate nach vorne führen, wodurch die Fahrzeuge eher wirtschaftlich betrieben werden können.

Im Bereich der mittelschweren Lkw sind die Unterschiede zwischen den gemessenen und statistischen Jahresfahrleistungen besonders groß. Dementsprechend gegensätzlich fallen die TCO-Berechnungen aus. Für 7.800 km Jahresfahrleistung sind die Gesamtbetriebskosten der konventionellen Fahrzeuge deutlich geringer als die der PHEV und BEV. Zwar werden die elektrifizierten Alternativen im Laufe der Jahre deutlich günstiger, ein Break-Even wird jedoch nicht erreicht. Auch das Ausnutzen von Systemdienstleistungen würde dies nicht beeinflussen. Ein anderes Bild ergibt sich bei Jahresfahrleistungen von 38.000 km. Bei diesen hohen Fahrleistungen sind die konventionellen Fahrzeuge über alle Jahre teurer als die elektrifizierten Alternativen. Die PHEV verursachen die geringsten Kosten bis ca. 2021. Ab diesem Zeitpunkt werden die BEV zur günstigsten Option. Das Anbieten von Systemdienstleistungen hätte auf den Break-Even hierbei keinen Effekt, da die Kostenminderung sowohl für BEV als auch für PHEV in einer ähnlichen Größenordnung liegt. Hierbei bleibt aber zu beachten, dass für die hohen Jahresfahrleistungen, die umgerechnet eine mittlere Tagesfahrleistung von 120 km bedeuten, keine belastbaren Simulationsergebnisse bzgl. des Verbrauches vorliegen. Auch kann keine entsprechende Charakteristik des Fahrprofils abgeleitet werden. Es ist nach den Analysen aus Abschnitt 0 zu erwarten, dass die Streuung der einzelnen Tagesfahrleistungen deutlich höher ausfällt, sodass die Variante des BEV möglicherweise technisch nicht zu betreiben ist – es sei denn ein Zwischenladen an entsprechenden Ladestationen ist möglich. Diese Einschränkung trifft jedoch auch auf die leichten Lkw zu, bei denen für durchschnittliche 30 km Tagesfahrleistung auch einzelne tägliche Wegstrecken bis knapp über 100 km gemessen wurden. Es kann anhand der geringen Datenbasis nicht ausgeschlossen werden, dass es solche Fahrprofile mit relativ großen durchschnittlichen Tagesfahrleistungen und hoher Regelmäßigkeit ohne große Streuungen gibt.

Insgesamt zeigen sich unabhängig von der Fahrzeugart ähnliche Entwicklungen der Gesamtbetriebskosten. Während die BEV, maßgeblich beeinflusst durch die Batteriepreisentwicklung, bis zum Jahr 2030 deutlich günstiger werden, zeigt sich bei den konventionellen Fahrzeugen eine Kostensteigerung. Bei Plug-In-Hybriden ist in Summe ein gleichbleibender Trend zu beobachten, wobei dieser je nach Anwendungsart in leicht steigende oder leichtfallende Preisentwicklungen kippen kann.

Generell sind die vorliegenden Betrachtungen als grobe Trendabschätzung zu verstehen, da die zugrundeliegenden Parameter je nach Anwendungsfall und Nutzer erheblichen Schwankungen ausgesetzt sind. Zum Beispiel ist hierbei nicht einbezogen, dass bei der Beschaffung der Fahrzeuge für Großkunden von den Fahrzeugherstellern oftmals ein nicht zu vernachlässigender Rabatt auf Fahrzeuge gewährt wird. Ebenfalls können die zu zahlenden Energiepreise für Strom und Dieselkraftstoff je nach Nutzer, Abnahmemenge und allgemeiner Situation variieren. Dies bestätigt die Wichtigkeit der individuellen Herangehensweise.

Nicht berücksichtigt wurde ferner die (vorübergehend eingeführte) Kaufprämie für elektrifizierte Fahrzeuge (Bundesregierung, 2016). Der Auswertung zufolge liefert sie zwar einen entscheidenden Beitrag zur Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge im Vergleich zur konventionell angetriebenen Variante, jedoch fungiert sie im politischen Rahmen als kurzfristig eingesetztes Steuerungsinstrument und gilt nur für Fahrzeuge, die im Zeitraum Mai 2016 bis höchstens 2019 angeschafft werden und den Höchstpreis von 60.000 Euro in der Anschaffung nicht überschreiten (Bundesregierung, 2016).

## **4.2 Batteriealterung und Batteriekosten: Ergebnisse Elektrische Speicher**

(M. Bauer, M. A. Danzer, C. Günther, M. Taumann)

Die drei folgenden Unterkapitel behandeln die Ergebnisse der Arbeiten zur Alterung und den Kosten von Lithium-Ionen-Batterien. Die Arbeiten umfassen:

- eine vergleichende Fallstudie an Batteriemodulen zur Bewertung der zusätzlichen, durch Systemdienstleistungen verursachten Alterung von Traktionsbatterien,
- Labortests zum Alterungsverhalten der untersuchten Lithium-Ionen-Zellen im Ruhezustand sowie während des Betriebs bei hohen Temperaturen und unter Plating-Bedingungen,
- eine Analyse der auftretenden Alterungsmechanismen durch Auswertung des Zelldickenänderungsverhaltens mittels Dilatometrie und
- eine Studie zu den Kosten von Lithium-Ionen-Batterien und deren Differenzierung bezüglich Komplexität (Zelle und Batteriesystem), Technologie, Bauform und Leistungs-Energie-Rate.

### **4.2.1 Ergebnisse der Alterungstests an Lithium-Ionen-Batterien**

(M. Bauer, M. A. Danzer, C. Günther, M. Taumann)

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der oben beschriebenen Labortests zum Alterungsverhalten von Lithium-Ionen-Batterien vorgestellt und diskutiert. Im Fokus der Analysen steht neben Kapazität und Impedanz auch die Dickenzunahme der untersuchten Pouch-Zelle. Anhand der Ergebnisse der Fallstudie wird diskutiert unter welchen Betriebsbedingungen von Elektrofahrzeugen erbrachte Systemdienstleistungen möglichst wenig zusätzliche Alterung verursachen und somit unter möglichst guten wirtschaftlichen Voraussetzungen stattfinden können.

#### **Ergebnisse der Fallstudie an Batteriemodulen**

Wie bereits in Abschnitt 3.2.1 erwähnt, ist das Ziel der Fallstudie, die durch unterschiedliches Ladeverhalten oder durch mögliche Systemdienstleistungen im Vergleich zu einem Basisfall zusätzlich verursachte Alterung durch einen im selben Abschnitt beschriebenen Alterungstest an Batteriemodulen mittels des Kapazitätsverlustes zu quantifizieren und über die Änderung des Impedanzspektrums zu analysieren.

Abbildung 80: Normierter Kapazitätsverlust der vier Module für die Ladestrategien und Strommarktteilnahmeszenarien L1 – L4 als Funktion der Zeit in Tagen

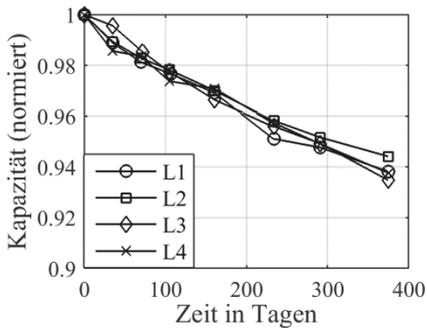
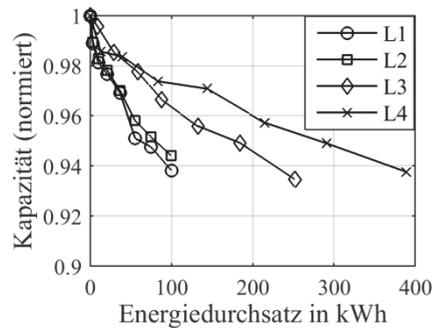


Abbildung 81: Normierter Kapazitätsverlust der vier Module für die Ladestrategien und Strommarktteilnahmeszenarien L1 – L4 als Funktion des Energiedurchsatzes pro Zelle



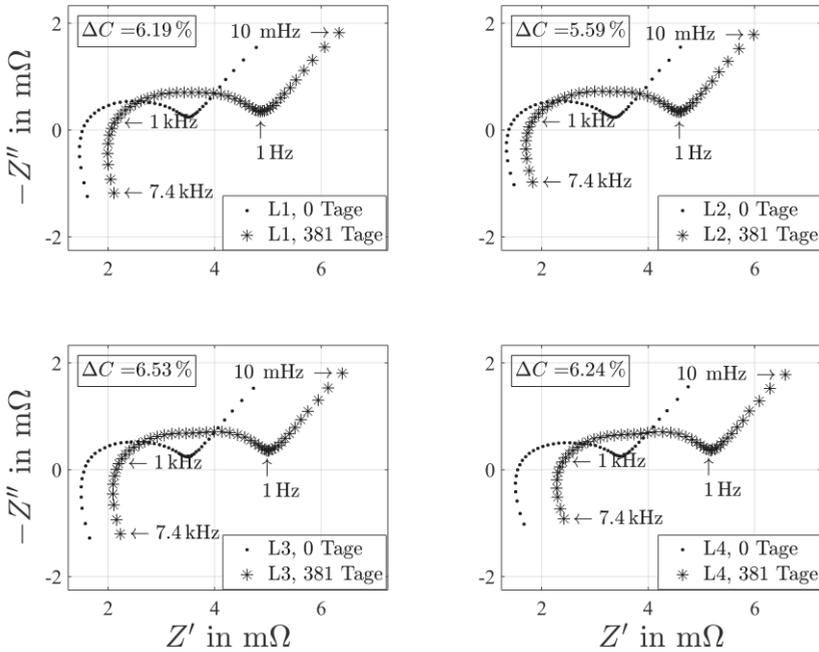
Hinweis: In der Abbildung handelt es sich bei dem Punkt um ein Dezimaltrennzeichen.

Die in Abbildung 80 gezeigten auf ihren Anfangswert normierten Kapazitäten der vier Module, die mit den Ladestrategien und Strommarktteilnahmeszenarien L1 – L4 bei 35 °C Umgebungstemperatur über einen Zeitraum von 381 Tagen getestet wurden, weisen keine signifikante Differenz auf. Der Rückgang der Kapazitäten liegt am Ende des Tests, wie in Abbildung 82 aufgeführt, zwischen 5,6 % und 6,5 %. Die in mehreren Referenztests (35 °C<sup>13</sup>) gemessenen Zeitverläufe der Kapazitäten weisen eine positive Krümmung auf, was eine leichte Abschwächung der Kapazitätsverlustrate mit fortschreitender Testdauer bedeutet. Abbildung 81 zeigt die normierten Kapazitäten der vier Module aufgetragen über dem Energiedurchsatz. Die Summen der Beträge von ge- und entladener Energiemenge in den unterschiedlichen Fällen weichen deutlich voneinander ab. So beträgt die Energiemenge in den Fällen L1 und L2 rund 20 kWh, in L3 konnten circa 50 kWh umgesetzt werden und in L4 konnte mit mehr als 77 kWh im Vergleich zu L1 und L2 fast die vierfache Energiemenge umgesetzt werden. In dieser Darstellung ist die positive Krümmung der Kapazitätsverläufe und die damit einhergehende, langsamere Alterung noch deutlicher zu erkennen als in Abbildung 81.

Abbildung 80 zeigt, dass die Module gleichmäßig altern, also bei gleicher Testdauer einen nahezu identischen Kapazitätsverlust aufweisen. Im Gegensatz hierzu zeigt Abbildung 81, dass bei gleicher Alterung sehr große Unterschiede bezüglich der umgesetzten Energie bestehen. Augenscheinlich ist die Zeit und nicht die Zyklisierung respektive der Energiedurchsatz der maßgebliche Einflussfaktor. Die in diesem Alterungstest vorgegebenen Testbedingungen, wie Ladezustandsbeschränkung und moderate Stromraten, rufen überwiegend kalendarische Alterungseffekte hervor.

<sup>13</sup> Hier werden Daten gezeigt, die bei 35 °C gemessen wurden, da lediglich vier Datensätze bei 22.5 °C zur Verfügung stehen und die vernachlässigbare Differenz zwischen den Kapazitäten 0.6% beträgt. Diese Abweichung entspricht etwa 10 mAh.

Abbildung 82: Vergleich der Impedanzspektren der Fälle L1 – L4 zu Beginn der Tests und nach 381 Tagen gemessen an je einer Zelle der Module bei 22,5 °C und 50 % SOC dargestellt in Nyquist-Diagrammen mit negativer Ordinate



In Abbildung 82 ist der Vergleich von Impedanzspektren der Fälle L1 – L4 vor Beginn (Begin of life, BOL) und nach Ende (End of Life, EOL) der Tests in Nyquist-Diagrammen mit negativer Ordinate dargestellt. Die Spektren wurden in einem Frequenzbereich von  $f = 10 \text{ mHz} - 7,4 \text{ kHz}$  jeweils an der mittleren Zelle der aus fünf übereinander gestapelten Zellen bestehenden Modul bei 22,5 °C und 50 % SOC gemessen. Die Impedanzspektren der Fälle L1–L4 zeigen zu Beginn der Tests qualitativ keine großen Unterschiede. Lediglich die Spektren der Zellen aus L1 und L3 weisen im induktiven Bereich ( $Z'' > 0 \text{ m}\Omega$ ) im Vergleich zu L2 und L4 eine leicht höhere Impedanz auf. Das Spektrum der Zelle aus L2 ist aufgrund eines etwas geringeren rein ohmschen Anteils der Impedanz ( $Z'' = 0 \text{ m}\Omega$ ) ein wenig nach links verschoben. In allen Fällen L1–L4 zeigt ein Vergleich der vor und nach dem Alterungstest gemessenen Impedanzspektren einen Anstieg der Impedanz über den gesamten Frequenzbereich. Wie in Tabelle 40 aufgelistet, wächst der rein ohmsche Anteil der Impedanz um 27 %–50 % an. Auch die Frequenz der Impedanz mit ausschließlich realen Anteilen verändert sich über den Testzeitraum und liegt im arithmetischen Mittel zu Beginn des Tests bei  $\bar{f}_{\Omega, \text{BOL}} = 1,29 \text{ kHz}$  und nach Testende bei  $\bar{f}_{\Omega, \text{EOL}} = 1,47 \text{ kHz}$ . Im Frequenzbereich  $f_{\Omega} > f \geq 1 \text{ Hz}$  wird die Impedanz der getesteten Zellen durch Ladungsdurchtrittswiderstände und Doppelschichtkapazitäten an Deckschichten dominiert (Aurbach et al., 1998).

Der Betrag der Impedanz in diesem Frequenzbereich nach der folgenden Formel  $\Delta Z_{1\text{Hz},\Omega,\text{rel}} = |Z_{1\text{Hz},\text{EOL}} - R_{\Omega,\text{EOL}}| / |Z_{1\text{Hz},\text{BOL}} - R_{\Omega,\text{BOL}}|$  nimmt in allen Fällen relativ gleichmäßig um 38 % – 43 % zu. Ebenso homogen aber weitaus geringer erhöht sich mit 12 %–16 % die Impedanz für Frequenzen im Bereich  $1\text{ Hz} > f \geq 1\text{ mHz}$   $\Delta Z_{10\text{mHz},1\text{Hz},\text{rel}} = |Z_{10\text{mHz},\text{EOL}} - Z_{1\text{Hz},\text{EOL}}| / |Z_{10\text{mHz},\text{BOL}} - Z_{1\text{Hz},\text{BOL}}|$ .

Tabelle 40: Relative Impedanzanstiege in bestimmten Frequenzbereichen

Fall	$R_{\Omega,\text{EOL}}/R_{\Omega,\text{BOL}}$	$\Delta Z_{1\text{Hz},\Omega,\text{rel}}$	$\Delta Z_{10\text{mHz},1\text{Hz},\text{rel}}$
L1	1,35	1,38	1,16
L2	1,27	1,40	1,14
L3	1,39	1,43	1,15
L4	1,50	1,42	1,12

Die Auswirkung der Zunahme der Impedanz, insbesondere des ohmschen Widerstandes, auf die Fahrleistung ist gering. Allerdings steigt die Verlustleistung linear mit dem ohmschen Widerstand an. Eine erhöhte Verlustleistung führt zu höheren Temperaturen in der Batterie und diese wiederum, wie im unten folgenden Absatz zu den zyklischen Alterungstests gezeigt, haben einen massiven Einfluss auf die Batteriealterung. Um die mit zunehmender Impedanz auftretende, erhöhte Selbsterwärmung ausgleichen zu können und somit temperaturgetriebene Alterung in einer Traktionsbatterie zu begrenzen, muss die Leistung des Kühlsystems in einem BEV auf Verlustleistungen ausgelegt werden, wie sie gegen Lebensende auftreten können. Dies gilt nicht zuletzt für Einsatzfelder wie Schnellladung, V2G und Strommarktteilnahme. In diesen Fällen sind die abgerufenen Leistungen bei entsprechendem Netzanschluss zwar (zum Teil deutlich) unter den maximal zulässigen Pulsleistungen, jedoch über erheblich längere Zeiträume als sie beispielsweise während eines Beschleunigungsvorgangs auftreten. Am stärksten erwärmten sich die getesteten Module nicht während der Fahrzyklen sondern während des Nachladens und während der Strommarktteilnahme.

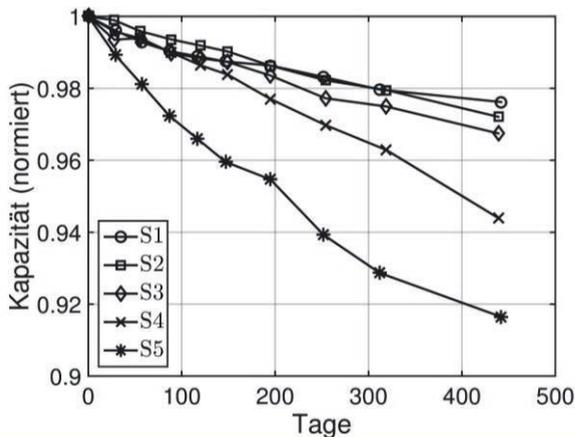
### Ergebnisse der kalendarischen Alterungstests

Abbildung 83 stellt die resultierenden Kapazitätsverläufe bei rein kalendarischer Alterung graphisch dar. Die Zellen wurden hierfür, abgesehen von den zur Kapazitätsermittlung und Charakterisierung durchgeführten Referenztests, keiner sonstigen Strombelastung ausgesetzt. Die einzelnen Kurven entsprechen, wie im Rahmen der zugehörigen Testmatrix (siehe Kapitel 3.2.1) definiert, unterschiedlichen Lagerungsbedingungen hinsichtlich Ladezustand und Umgebungstemperatur.

Anhand des Vergleichs von S1, S3, und S5 lässt sich eine große Sensitivität des Kapazitätsverlustes bezüglich erhöhter Temperaturen erkennen. Die signifikant verstärkte Alterung für sehr hohe Temperaturen (S5:  $T = 50\text{ °C}$ ) ist hierbei mit der Modellvorstellung eines Aktivierungsenergie-gesteuerten thermisch getriebenen chemischen Prozesses im Einklang. Mit Blick auf die Modellierung kalendarischer Alterungseffekte bietet sich daher die für viele chemische Prozesse charakteristische Beschreibung der Temperaturabhängigkeit mit Hilfe des sogenannten Arrhenius-Ansatzes an.

Bezüglich des Ladezustandes lässt sich durch Vergleich von S2–S4 eine analoge Aussage ableiten. Bedingt durch den hohen Ladezustand von 90 % kommt es für S4 zu einer gegenüber niedrigeren SOC's deutlich verstärkten kalendarischen Alterung.

Abbildung 83: kalendarische Alterung in Abhängigkeit von Temperatur und Ladezustand



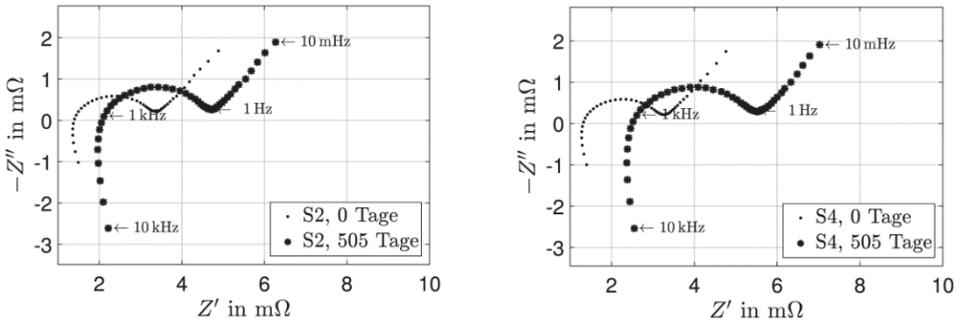
Die elektrochemische Impedanzspektroskopie ermöglicht ein tiefergehendes Verständnis der Degradationsprozesse. Die komplexwertige Zellimpedanz („dt. Wechselstromwiderstand“) wird hierbei im sog. Nyquist-Diagramm dargestellt. Auf der Ordinate ist hierbei der negative Imaginärteil und auf der Abszisse der Realteil der Impedanz aufgetragen.

In Abbildung 84 sind die Veränderungen der elektrischen Impedanz durch kalendarische Alterung bei moderater ( $T = 30\text{ °C}$ ) und hoher ( $T = 50\text{ °C}$ ) Umgebungstemperatur gezeigt. In beiden Fällen kommt es zu einer Rechtsverschiebung der Spektren. Dies lässt auf einen erhöhten ohmschen Innenwiderstand durch Deckschichtbildung auf den Elektroden schließen (Peled, 1979). Darüber hinaus ist eine geringfügige Verbreiterung des Ladungstransferbogens zu beobachten, allerdings treten keine zusätzlichen Bögen im Spektrum auf. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass neben dem schleichenden Deckschichtwachstum durch Elektrolytreaktion keine sonstigen, kritischen Degradationsprozesse stattfinden. Der durch die Deckschichtbildung bewirkte Innenwiderstandsanstieg liegt bei  $T = 50\text{ °C}$  nach 510 Tagen im Bereich von ca. 70 %, sodass durchaus signifikante Leistungseinbußen (verstärkte Selbsterwärmung, geringere Pulsleistung) zu erwarten sind.

Wie in Abbildung 84 gezeigt, wirkt neben der Temperatur auch der Ladezustand als Treiber für die angesprochene Deckschichtbildung. So führt eine Erhöhung des Ladezustandes von 30 % auf 60 % in etwa zu einer Verdoppelung des Innenwiderstandsanstieges.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Sinne eines alterungsminimalen Betriebes hohe Temperaturen und hohe Ladezustände vermieden werden sollten, soweit möglich. Insbesondere lässt sich die kalendarische Alterung vermindern, indem die Fahrzeuge erst kurz vor dem Bedarf, also beispielsweise früh morgens nachgeladen werden (gesteuertes Laden) und somit lange nächtliche Stillstandszeiten bei hohem SOC vermieden werden.

Abbildung 84: Impedanzspektroskopie zur SOC-Abhängigkeit der kalendarischen Alterung

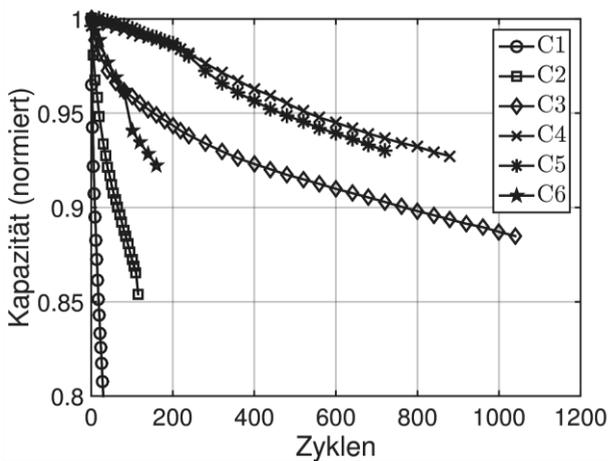


S2: SOC = 30 %, S4: SOC = 90 %

### Ergebnisse der zyklischen Alterungstests

Abbildung 85 zeigt die Entwicklung des Kapazitätsverlustes bei Durchführung von Vollzyklen (keine SOC-Band-Begrenzung, CCCV-Protokoll) im Spannungsbereich  $2,7 \text{ V} < U < 4,2 \text{ V}$  bei verschiedenen Umgebungstemperaturen.

Abbildung 85: Alterung durch Zyklisierung bei einer Stromrate von 1C für unterschiedliche Temperaturen (Dezimaltrennzeichen nach englischer Notation)

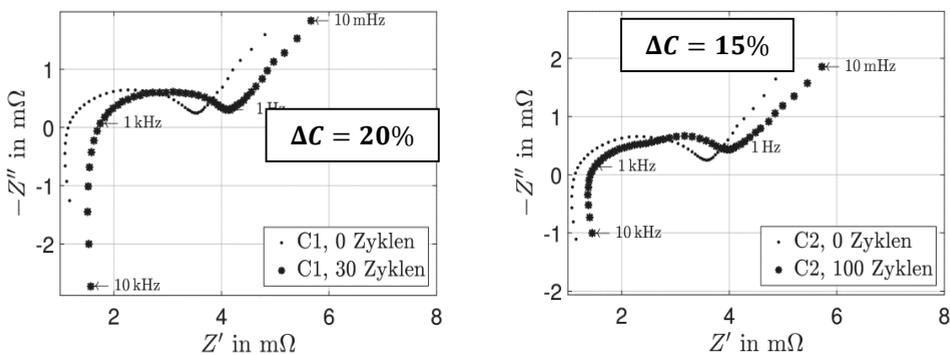


Bei niedrigen Temperaturen ( $5 \text{ }^\circ\text{C}$  (C1),  $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$  (C2), sowie  $17,5 \text{ }^\circ\text{C}$  (C3)) entspricht der Kapazitätsverlust in guter Näherung einer Wurzelfunktion über der Anzahl an Zyklen. Es sind keine Wendepunkte zu erkennen. Besonders bei  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$  ist der Kapazitätsverlust massiv und die Lebenserwartung der Zelle gegenüber moderaten Temperaturen stark vermindert. Bei Temperaturen ab  $22,5 \text{ }^\circ\text{C}$  tritt ein qualitativ verschiedenes Alterungsverhalten auf, was für unterschiedliche Prozesse in beiden Temperaturbereichen spricht (Bauer, 2015). Hier ist ein Wendepunkt zu erkennen, d.h. auf eine Phase mit niedriger Degradation zu Beginn der Zyklisierung folgt dann eine Phase mit verstärktem Kapazitätsverlust, der wiederum wurzelförmigen Charakter aufweist. Die in allen Fällen wurzel-

förmige Charakteristik des Kapazitätsverlustes im langfristigen Trend entspricht sich selbst abschwächenden Alterungsmechanismen, was sowohl im Hinblick auf eine verstärkte Nutzung der Zellen durch Netzdienstleistung im Fahrzeug, als auch im Hinblick auf eine eventuelle Zweitverwertung von ausgemusterten Fahrzeugbatterien in stationären Anwendungen („Second Life“) vorteilhaft ist. Sich selbst verstärkende Alterungsprozesse (negative Krümmung in Abbildung 85) nach langfristiger Nutzung sind zwar ebenfalls in der Literatur beschrieben (Schuster 2015), konnten jedoch an den gewählten großformatigen Zellen im Rahmen des Projektes nicht beobachtet werden.

In den Impedanzspektren lässt sich ebenfalls nachvollziehen, dass das Alterungsverhalten unterhalb und oberhalb von 17.5 °C durch unterschiedliche Mechanismen dominiert wird. Bei niedrigen Temperaturen ist trotz massiven Kapazitätsverlustes ( $\Delta C = 20\%$  in Abbildung 86 links) kaum eine Erhöhung der Zellimpedanz festzustellen. Dies hat unter anderem zur Folge, dass trotz des Kapazitätsverlustes die der Zelle maximal entnehmbare Leistung nur unwesentlich verringert wird.

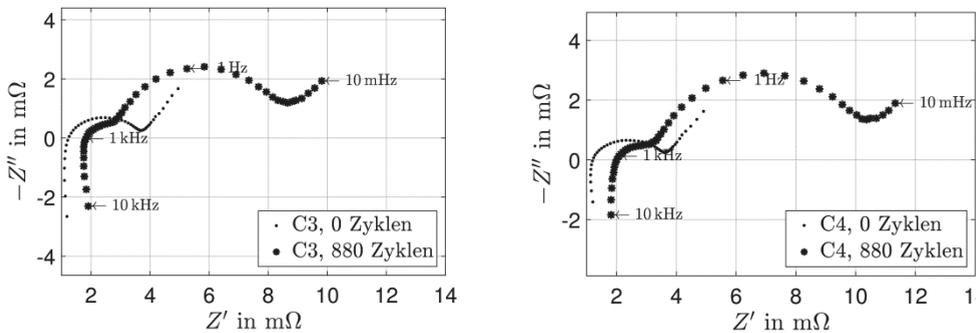
Abbildung 86: Impedanzspektroskopie zur zyklischen Alterung bei niedrigen Temperaturen



C1:  $T = 5\text{ °C}$ , C2:  $T = 12.5\text{ °C}$

Während der Alterung bei höheren Temperaturen bleibt die Zellkapazität über wesentlich längere Zyklenzahlen hinweg erhalten. Hier ist jedoch zu beachten, dass die Impedanz insbesondere bei sehr niedrigen Frequenzen (Gleichstrombetrieb) stark zunimmt wie in Abbildung 87 dargestellt. Da dieses mit verstärkter betrieblicher Selbsterwärmung und einer Verringerung der maximalen Leistungsfähigkeit der Zellen einhergeht, ist zwingend darauf zu achten, die betriebliche Belastung für gealterte Zellen zu begrenzen. Wird dies missachtet, so ist mit übermäßiger Selbsterwärmung, daraus resultierenden zusätzlichen Alterungserscheinungen und schließlich mit einem sich selbst verstärkenden Alterungsprozess zu rechnen, die unbedingt zu verhindern ist.

Abbildung 87: Impedanzspektroskopie zur zyklischen Alterung bei höheren Temperaturen, C3:  $T = 17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , C4:  $T = 22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

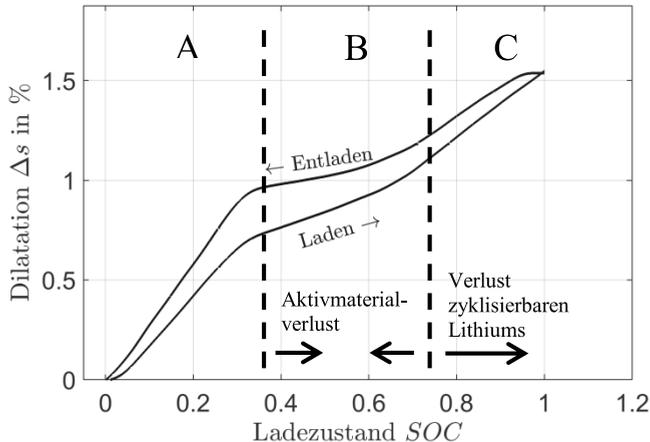


### Dilatometrie

Aufgrund der Umlagerung von Lithium-Ionen kommt es während jedes Lade/Entladezyklus zu einer mechanischen Ausdehnung und Schrumpfung der Batteriezellen. Dieses Phänomen wird auch als Zellatmung bezeichnet. Wie in Abbildung 88 dargestellt, liegt für die im Projekt untersuchte Zelle diese reversible Dickenänderung im Bereich von ca. 1.5 % bezogen auf die Zelldicke von 8 mm. Von besonderem Interesse ist hierbei der nichtlineare, hysteresebehaftete Verlauf der Dilatation über dem Ladezustand. Anhand der Steigung der  $\Delta s$ -Q-Kurve lassen sich phänomenologisch drei Steigungsbereiche A, B und C unterscheiden. Da es sich um eine bei sehr niedriger Stromrate aufgenommene Messkurve handelt, ist ein Dickenauftrag durch Lithium-Plating ausgeschlossen. Es lässt sich zeigen, dass die unterschiedlichen Steigungen auf die Eigenschaften der sequentiell befüllten Graphitphasen zurückzuführen sind (Bauer, 2016). Dies hat zur Folge, dass sowohl die Position des Überganges zwischen A und B, als auch des Überganges B zu C Hinweise auf die mikroskopische Lithiierung des Graphit geben. Namentlich entspricht der Übergang B/C gerade einer 50 %-igen Lithiierung des Graphit, d.h. hier ist jede zweite Schicht des Graphitgitters mit Lithium-Ionen befüllt. Für die neue Zelle in Abbildung 88 liegt dieser Übergang bei einem Ladezustand (SOC) von ca. 70 %. Die Lithiierung des Graphit im vollgeladenen Zustand liegt folglich bei ca. 71 %, d.h. die Graphitanode ist gegenüber der positiven Elektrode um ca. 41 % überdimensioniert. Verschieben sich nun während der Alterung die Positionen dieser Übergänge lässt dies eine Charakterisierung der zugrundeliegenden Alterungsprozesse zu:

Wird der Bereich C kleiner, bedeutet dies eine abnehmende Lithiierung der Graphitanode im vollgeladenen Zustand. Dieses deutet auf den Verlust zyklisierbaren Lithium hin, so dass durch den Mangel an Lithium die Ausnutzung der Anode weiter zurückgeht (Lithiierung im vollgeladenen Zustand sinkt unter 71 %). Dies ist insbesondere bei Auftreten von irreversiblen Lithium-Plating (niedertemperaturgetrieben) oder hochtemperaturgetriebene Elektrolytreduktion zu erwarten. Im Hinblick auf das Lithium Plating konnten wir zeigen, dass die abnehmende Ausnutzung der Anode einen selbstheilenden Effekt zur Folge hat (Petzl, 2015). Wird jedoch ein exzessiver Verlust von zyklisierbarem Lithium detektiert, sind Maßnahmen wie Reduktion der Leistung oder ein verbessertes Thermomanagement zu ergreifen.

Abbildung 88: Dilatation einer einzelnen Zelle während des Ladens und Entladens bei sehr geringer Stromrate ( $I = C/40$ ). Unterteilung der Kennlinie in 3 Bereiche A, B, C

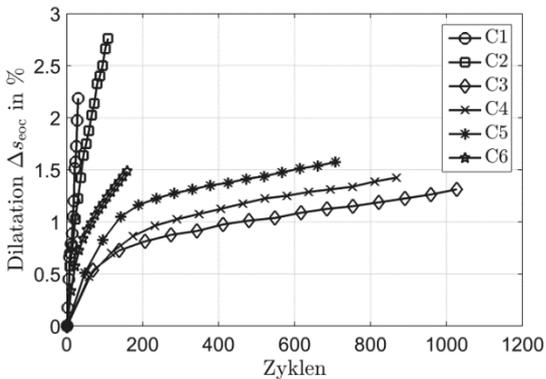


Schrumpft Bereich B deutet dies auf Aktivmaterialverlust an der negativen Elektrode hin (Safari, 2011). Ein solcher Aktivmaterialverlust führt zur erhöhten Belastung des verbleibenden elektrochemisch aktiven Aktivmaterials. Er reduziert unmittelbar die Stromtragfähigkeit sowie auch die relative Überdimensionierung der negativen Elektrode, und führt zu einem sich selbst verstärkenden Alterungsgeschehen. Das Batteriemangement kann hier mit Gegenmaßnahmen wie einer Einschränkung des SOC-Bandes oder Leistungsreduktion reagieren, um die problematische Überbeanspruchung der Grafitanode durch zu hohe Ströme oder zu hohe Lithiierung zu vermeiden.

Darüber hinaus kann anhand der Dilatometriedaten auch der langfristige Dickenauftrag analysiert werden. Zu diesem Zwecke ist in Abbildung 89 der prozentuale Dickenzuwachs im vollgeladenen Zustand gezeigt. Den Kurven liegen Alterungskurven mit Vollzyklen bei einer Stromrate von 1 C (vgl. Abschnitt 3.3.1) zugrunde.

Hier zeigt sich, dass der irreversible Dickenauftrag bei den moderaten Temperaturen (in der Nähe der Raumtemperatur) am geringsten ausfällt. Bei niedrigen Temperaturen kleiner 12,5 °C treten die extremsten Dickensteigerungen auf. Dies ist auf Lithium-Plating zurückzuführen. Jedoch zeigt sich auch bei den hohen Temperaturen größer 40 °C ein gegenüber den moderaten Temperaturen erhöhter Dickenauftrag. Dieses könnte durch exzessive Deckschichtbildung erklärt werden. Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass sowohl die niedertemperatur- als auch die hochtemperaturgetriebenen Kapazitätsverlustmechanismen mit zusätzlichen Dickenaufträgen einhergehen. Der messtechnisch gut zugängliche Dickenauftrag erlaubt somit eine betriebliche Bewertung des Alterungsfortschrittes im Batteriespeicher.

Abbildung 89: Prozentuale Dickenwachstum der Dilatation bei Ladeschluss ( $\Delta s_{\text{eoc}}$ ) über der Zyklenzahl bei verschiedenen Temperaturen gemäß der zyklischen Testmatrix in Abschnitt 3.2.1.



Übertragen auf den praktischen Betrieb von Batteriemodulen bedeutet dies, dass mit Hilfe von Dilatationsdaten Rückschlüsse auf die dominanten Alterungsmechanismen des zurückliegenden Betriebes gezogen werden können. Das Batteriemanagementsystem kann darauf mit einer Anpassung der Leistungsfreischaltung bzw. einer SOC-Bandbegrenzung reagieren und damit weitere Schädigungen am Speicher reduzieren. Wie anhand der bisherigen Untersuchungen deutlich wurde, kommt es immer dann zu massiven Alterungsphänomenen wenn ein durch Temperatur, Ladezustand und Strom abgegrenzter „Wohlfühlbereich“ des Speichers verlassen wird. Kann durch eine präzisere Beurteilung von Alterungsprozessen dafür Sorge getragen werden, dass die Betriebsparameter des Speichers stets im Rahmen dieses Wohlfühlbereiches gehalten werden, können Alterungsprozesse wirksam minimiert werden. Für die messtechnische Realisierung eines solchen auf Dilatometrie beruhenden Verfahrens in kommerziellen Fahrzeugspeichern kommen neben konventionellen Längengebern auch Dehnungsmessstreifen oder Kraftsensoren zwischen den einzelnen Zellen in Frage.

## 4.2.2 Validierung der parametrisierten Modellgleichungen

(M. Bauer, M. A. Danzer, C. Günther, M. Taumann)

In diesem Abschnitt werden die optimierten Parameter der einzelnen Modellgleichungen für den Kapazitätsverlust beziehungsweise die Alterung der Testobjekte in Ruhephasen  $A_{\text{kal}}[k]$  sowie im Betrieb bei hohen Temperaturen  $A_{\text{bHT}}[k]$  und unter Plating-Bedingungen  $A_{\text{pla}}[k]$  vorgestellt und diskutiert. Abschließend werden die Ergebnisse der Simulation der vollständigen Zyklentests mit dem Gesamtmodell  $A_{\text{Bat}}[k]$  vorgestellt und bewertet.

### Ergebnisse der Parameteroptimierung des kalendarischen Alterungsmodells

Wie oben beschrieben, wird der Parametervektor  $\theta_{\text{kal}}$  des mathematischen Modells für die kalendarische Alterung  $A_{\text{kal}}[k]$  mit Hilfe der aus Messdaten berechneten Batteriekapazitätsverläufe bestimmt.

Die Messdaten stammen aus den Referenzmessungen, welche in regelmäßigen Abständen während des Tests zum kalendarischen Alterungsverhalten der im Projekt verwendeten Batterien durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 4.2.1). Folgende Werte des Modellparametervektors

$$\theta_{\text{kal}} = [A, B, E_{A,\text{kal}}, \alpha_{\text{kal}}] = [1,1514 \cdot 10^8 \quad 0,8585 \quad 6,5160 \cdot 10^4 \quad 0,7077]$$

ergeben sich aus der Optimierung unter Verwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate.

In Abbildung 90 ist ein Vergleich von gemessenen Daten und parametrimtem Modell des Kapazitätsverlauf für kalendarische Batteriealterung bei einem Ladezustand von  $SOC = 60\%$  und Umgebungstemperaturen von  $T = 35\text{ °C}$ ,  $40\text{ °C}$  und  $50\text{ °C}$  dargestellt. Abbildung 91 zeigt für eine Umgebungstemperatur von  $T = 40\text{ °C}$  den Vergleich der gemessenen und modellierten Kapazitätsverläufe bei kalendarischer Alterung der Batterien mit Ladezuständen von  $SOC = 30\%$ ,  $60\%$  und  $90\%$ .

Abbildung 90: Vergleich von gemessenen Daten und parametrimtem Modell der kalendarischen Alterung bei  $SOC = 60\%$  für  $T = 35\text{ °C}$ ,  $40\text{ °C}$  und  $50\text{ °C}$

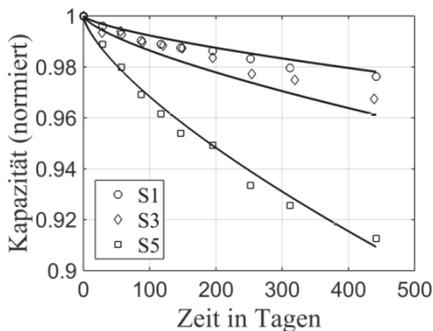
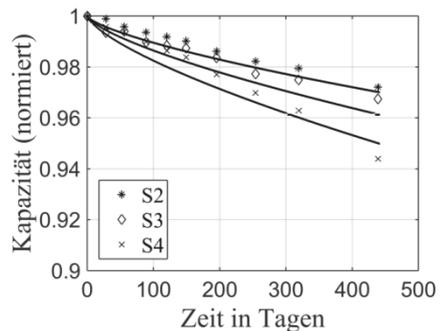


Abbildung 91: Vergleich von gemessenen Daten und parametrimtem Modell der kalendarischen Alterung für  $T = 40\text{ °C}$  bei  $SOC = 30\%$ ,  $60\%$  und  $90\%$



Die in Abschnitt 3.2.2 beschriebene Modellgleichung bietet den Vorteil, dass sich durch die Optimierung der Modellparameter mit Hilfe von gemessenen Daten ein semiempirisches Modell ergibt, dessen Modellgleichung auf bereits veröffentlichten Erkenntnissen über das kalendarische Alterungsverhalten von Lithium-Ionen-Batterien beruht und gleichzeitig mit Hilfe von Messdaten des untersuchten Testobjektes parametrimt werden kann. Bei Betrachten der Messdaten und Modellgraphen wird deutlich, dass die Abhängigkeit des Kapazitätsverlustes sowohl von der Umgebungstemperatur als auch vom Ladezustand qualitativ und quantitativ korrekt modelliert ist. Das heißt eine höhere Temperatur oder ein höherer Ladezustand haben größere Auswirkungen auf den Kapazitätsverlust als vergleichsweise geringere Werte von Temperatur oder Ladezustand. Auch spiegelt das Modell den im Vergleich zum Ladezustand stärkeren Einfluss der Temperatur auf die gemessene Batteriedegradation korrekt wieder. Eine simulative Extrapolation des Kapazitätsverlustes über den Testzeitraum hinaus gibt den sich in den Messdaten

abzeichnenden Trend nur teilweise, nämlich für S1, S2 und S5, in guter Näherung wieder. Für S3 wird der gemessene Kapazitätsverlust sowie dessen extrapolierte Trend vom Modell überschätzt. Für S4 hingegen wird der gemessene Kapazitätsverlust überschätzt, aber dessen extrapolierte Trend unterschätzt. Für S4 liegt also eine qualitativ andere Abhängigkeit des Kapazitätsverlustes von der Zeit vor, die das Modell nicht abbilden kann.

Die Verifizierung mit den Messdaten ergibt, dass einerseits der in Ruhephasen auftretende Kapazitätsverlust quantitativ und andererseits der zeitlich extrapolierte Trend qualitativ in guter Näherung mit dem vorgestellten Modell simuliert werden kann. Das Modell eignet sich insbesondere für vergleichende Simulationsstudien.

### Ergebnisse der Parameteroptimierung des Modells für betriebsbedingte Alterung

Wie oben beschrieben, wird der Parametervektor

$$\theta_{\text{btrb}} = \theta_{\text{bHT}} + \theta_{\text{pla}} = [K_{\text{HT}}, E_{\text{A,HT}}, \alpha_{\text{HT}}] + [K_{\text{p}}, E_{\text{A,p}}, \alpha_{\text{p}}, D_{10}, \beta, \Delta SOC_{\text{tr}}]$$

des mathematischen Modells für die betriebsbedingte Alterung  $A_{\text{btrb}}$  mit Hilfe der aus Messdaten berechneten Batteriekapazitätsverläufe bestimmt. Die Messdaten stammen aus Referenzmessungen, welche in regelmäßigen Abständen während des Tests zum betriebsbedingten Alterungsverhalten der im Projekt verwendeten Batterien durchgeführt werden. Folgende Werte des Modellparametervektors

$$\begin{aligned} \theta_{\text{btrb}} &= [K_{\text{HT}}, E_{\text{A,HT}}, \alpha_{\text{HT}}, K_{\text{p}}, E_{\text{A,p}}, \alpha_{\text{p}}, D_{10}, \beta, SOC_{\text{th}}, \Delta SOC_{\text{tr}}] \\ &= \begin{bmatrix} 2,5156 * 10^7 & 5,9427 * 10^4 & 0,3674 & \dots \\ 8,8056 * 10^{-22} & 9,8683 * 10^4 & 0,7437 & \dots \\ 0,0806 & 10,896 & 0,7 & 0,02 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ergeben sich aus der Optimierung unter Verwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate.

In Abbildung 92 und Abbildung 93 ist ein Vergleich von Datenpunkten ( $\square$ ) und parametrisiertem Modell des Kapazitätsverlaufs für die betriebsbedingte Alterung (—) mit Hochtemperatur- (---) und Plating-Anteil (⋯) dargestellt. Während Abbildung 92 die Alterung in Form des Kapazitätsverlustes als Funktionen der in die Module geladenen Ladungsmenge in kWh für Umgebungstemperaturen von  $T_{C1} = 5 \text{ °C}$ ,  $T_{C2} = 12,5 \text{ °C}$  und  $T_{C3} = 17,5 \text{ °C}$  zeigt, stellt Abbildung 93 den Kapazitätsverlust als Funktionen des kumulierten Energiedurchsatzes der Module bei Umgebungstemperaturen von  $T_{C4} = 22,5 \text{ °C}$ ,  $T_{C5} = 40 \text{ °C}$  und  $T_{C6} = 50 \text{ °C}$  dar. Die Datenpunkte für den durch die betriebsbedingte Alterung hervorgerufenen Kapazitätsverlauf beruhen auf den Messdaten der in den Abschnitten 3.2.1 und 4.2.1 detailliert beschriebenen zyklischen Alterungstests. Von diesen Messdaten wird der durch kalendarische Alterung verursachte Kapazitätsverlust simulativ subtrahiert, um die in Abbildung 92 und Abbildung 93 dargestellten Datenpunkte zu erzeugen.

Die in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Modellgleichungen werden gemäß  $A_{\text{btrb}} = A_{\text{bHT}} + A_{\text{pla}}$  zur mathematischen Abbildung der gesamten betriebsbedingten Alterung addiert. Der Modellansatz bietet den Vorteil, dass sich durch die Optimierung der Modellparameter mit Hilfe von gemessenen Daten ein semiempirisches Modell ergibt, dessen Modellgleichung

auf bereits veröffentlichten Erkenntnissen über das betriebsbedingte Hochtemperatur- und Plating-Alterungsverhalten von Lithium-Ionen-Batterien beruht.

Bei Betrachten der Messdaten und Modellgraphen wird deutlich, dass die gegenläufige Temperaturabhängigkeit der betriebsbedingten Alterung für die Simulation sowohl des durch Lithium-Plating verursachten Kapazitätsverlustes als auch der durch hohe Temperaturen bedingten Alterung qualitativ korrekt modelliert ist. Das heißt das Plating-Modell führt mit sinkender Temperatur zu einem ansteigenden Anteil an der gesamten betriebsbedingten Alterung und der durch hohe Temperaturen hervorgerufene Anteil nimmt mit steigenden Temperaturen zu. Des Weiteren trägt das Teilmodell nur bei Stromfluss (Hochtemperatur) beziehungsweise während der Ladung mit einer bestimmten Stromstärke oberhalb eines definierten Ladezustandes (Plating) zum Ansteigen der Gesamalterungsrate bei. Eine simulative Extrapolation des Kapazitätsverlustes über die geladene Ladungsmenge und den kumulierten Energiedurchsatz hinaus gibt den sich in den Messdaten abzeichnenden Trend mit zunehmender Abweichung wieder. Für C3 werden der gemessene Kapazitätsverlust sowie dessen extrapolierte Trend vom Modell kontinuierlich überschätzt. Alle anderen Testbedingungen hingegen führen in der Simulation nach einer anfänglichen Überschätzung des gemessenen Kapazitätsverlustes zu einer Unterschätzung des extrapolierten Trends.

Die Verifizierung mit den Messdaten ergibt, dass der bei Stromfluss auftretende Kapazitätsverlust und dessen extrapolierte Trend qualitativ mit dem vorgestellten Modell simuliert werden kann. Das Modell kann insbesondere für vergleichende Simulationsstudien eingesetzt werden.

### **4.2.3 Ergebnisse der Batteriekostenstudie**

(M. Bauer, M. A. Danzer, C. Günther, M. Taumann)

Bevor auf die Preisentwicklung für verschiedene Lithium-Ionen-Technologien, Zellformate und Leistung-Energie-Raten eingegangen wird, soll zuerst die sich aus den betrachteten Kostenstudien ergebende Preisentwicklung für Batteriepacks und -zellen dargestellt werden. Der Fokus der betrachteten Batteriesysteme liegt dabei auf den Einsatz in rein batterieelektrischen Fahrzeugen.

#### **Preisentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien auf Pack- und Zellebene**

Für die Ableitung der Preisentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien auf Pack- und Zellebene wurden die in Abschnitt 3.2.3 genannten Datenquellen verwendet. Bei denen in dieser Auswertung aufgeführten Preisangaben handelt es sich um Preise für den OEM (Original Equipment Manufacturer) bzw. den Endkunden. In einige Studien werden nicht Angaben zu den Preisen sondern Angaben zu den Kosten gemacht. Diese Kostenangaben wurden unter der Annahme einer 15-prozentigen Gewinnmarge auf Preise umgerechnet.

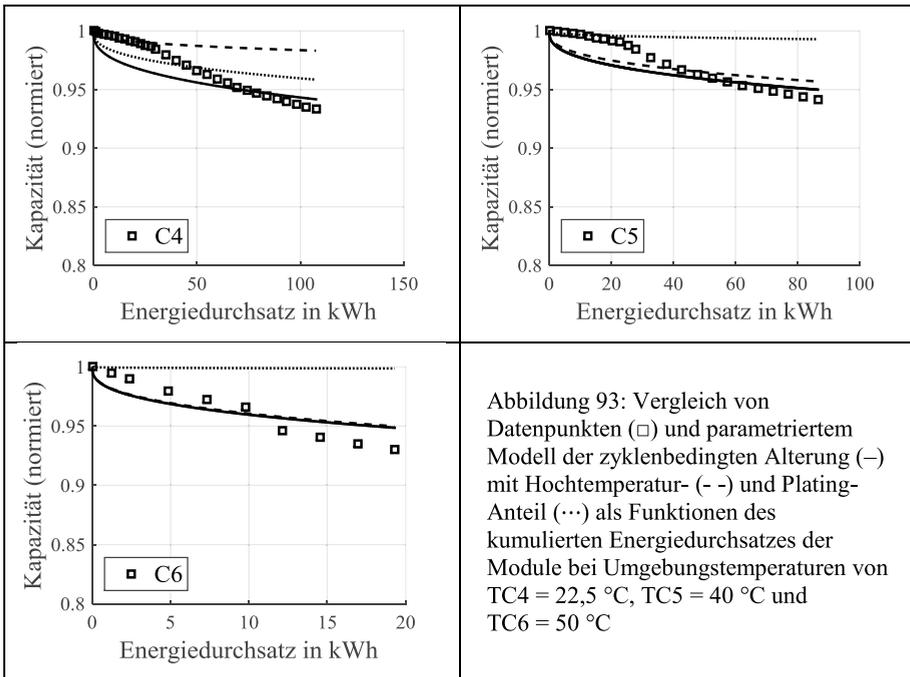
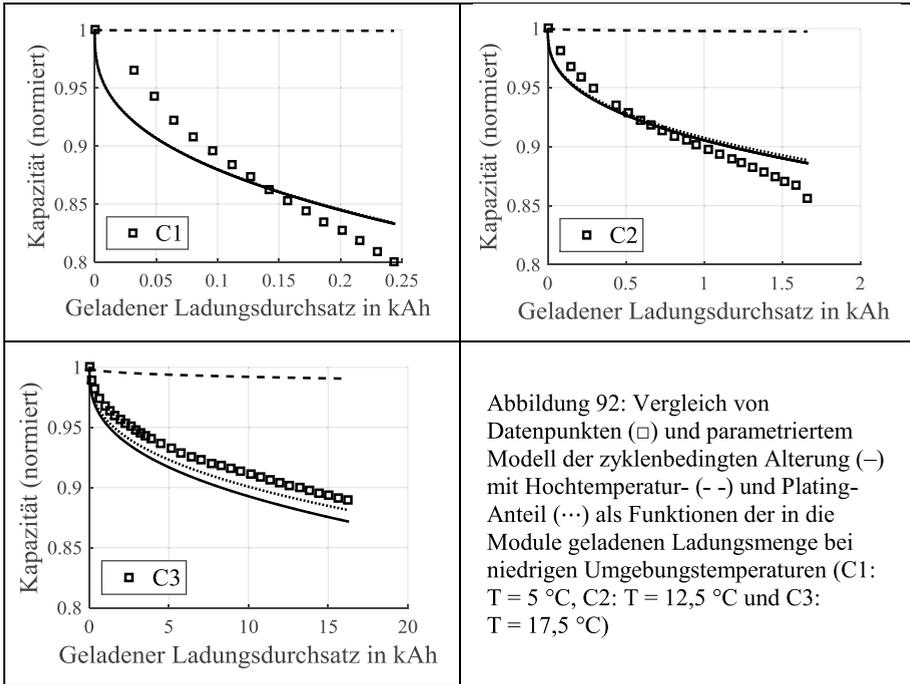


Abbildung 94 gibt einen Überblick der verschiedenen Studien zur Entwicklung der Preise von Lithium-Ionen-Batteriepacks für den Einsatz in BEV von 2012 bis 2025. Um die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen zu beschleunigen, spielen insbesondere die Batteriekosten eine wichtige Rolle. Deswegen haben einige Länder in ihren Batterieentwicklungs-Roadmaps Zielvorgaben bezüglich der Kosten festgelegt. Um einen Vergleich zu der zukünftigen Preisentwicklung von Batteriepacks zu haben, wurden diese Zielvorgaben mit den Datenpunkten der anderen Studien dargestellt. Das US Department of Energy (DOE) weist für die USA mit 125 \$/kWh für 2022 (in der Abbildung 94 als roter Punkt mit „Target DOE“ dargestellt) im Vergleich zu den prognostizierten Preisen eine sehr ambitionierte Zielvorgabe auf. Für die EU existiert keine offizielle politische Zielvorgabe, es gibt jedoch eine E-Mobilität Roadmap der EU Batterieindustrie, die mit 270 \$/kWh für 2020 und 190 \$/kWh für 2025 ein im Vergleich zu den USA weniger ehrgeiziges Ziel aufweist (in Abbildung 94 als gelbe Punkte mit der Benennung „Target Recharge“ gekennzeichnet).

Aus den ausgewerteten Kostenstudien lässt sich ein mittlerer Preisverlauf von 2012 bis 2025 ableiten, der in untenstehender Tabelle 41 dargestellt ist. Im Vergleich zu 2013 werden die mittleren Preise von Lithium-Ionen-Batteriepacks für den Einsatz in BEV bis 2020 um ca. 45 %, bis 2025 sogar um fast 60 % fallen. Das momentane mittlere Preisniveau (Stand 2014) liegt bei ca. 375 \$/kWh. Tatsächlich ist das Preisniveau bei bestimmten Herstellern schon niedriger. Nach Angaben von Lux Research (Frankel, 2014) kostet das Batteriepack von LG Chem momentan (Stand Oktober 2014) knapp über 300 \$/kWh, das an Renault (Renault Zoe) aber auch an Volvo und, aufgrund des Joint Ventures mit Volvo, auch an Nissan (Nissan Leaf) verkauft wird. Tesla liegt mit ca. 275 \$/kWh schon unter diesem Preis.

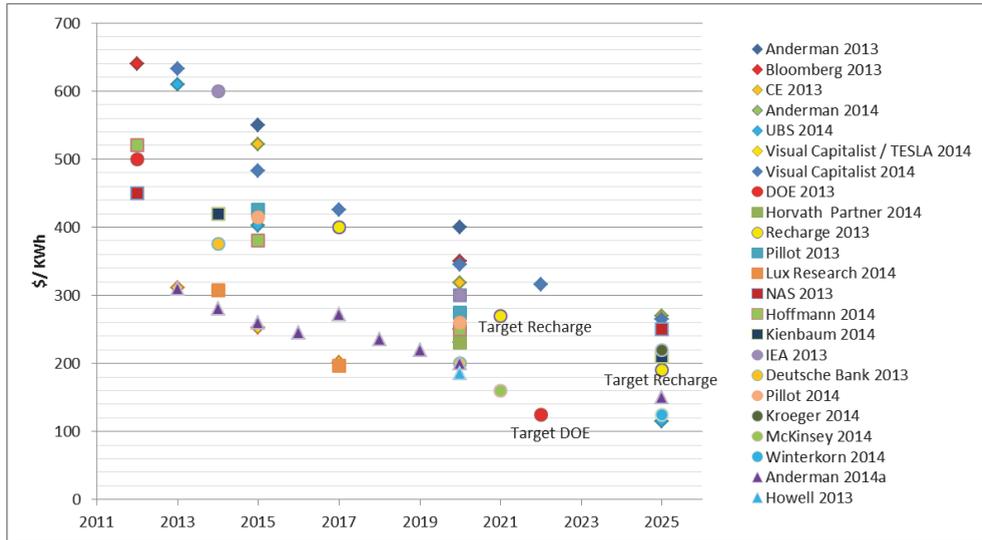
Tabelle 41: Zeitlicher Preisverlauf von Lithium-Ionen-Batteriepacks für den Einsatz in BEV abgeleitet aus den betrachteten Literaturstudien

Jahr	2012	2013	2014	2020	2025
Preise/BEV-Pack (\$/kWh)	510	460	375	250	190

Die von Tesla in Nevada geplante Gigafactory, die Anfang 2017 in Betrieb genommen werden soll, zielt darauf ab, die Produktionskapazität für BEV-Batterien mehr als zu verdoppeln und stellt einen wesentlichen Katalysator zur Stimulierung des Elektrofahrzeugbatteriemarktes dar. Ab 2020 sollen in der Gigafactory ca. 500.000 Batteriepacks hergestellt werden, was ungefähr einer Produktionskapazität von 35 GWh entspricht und damit gut zehnmal größer als bestehende Fabriken ist. Die erfolgreiche Realisierung hängt aber wesentlich von Panasonic ab, einer der Mitinvestoren der Batteriefabrik. Die Preise von (Anderman, 2014a) in Abbildung 94 spiegeln die Preise der in den Tesla-Modellen eingesetzten Batteriepacks dar, die aus 18650er-Zellen von Panasonic aufgebaut sind. Aufgrund der geplanten Kapazitätssteigerung im japanischen Werk von Panasonic ausgehend von 150 Millionen Zellen (2 GWh) im Jahre 2013 auf mehr als 500 Millionen Zellen (7 GWh) bis zum Jahre 2016 werden die Preise für Tesla Batteriepacks auf knapp unter 250 \$/kWh fallen. 2017 werden sie wieder aufgrund der Inbetriebnahme der Gigafactory und der damit verbundenen anfänglichen Abschreibung wieder leicht ansteigen, bevor sie aufgrund der zu erwartenden Skaleneffekte bis 2025 auf 167 \$/kWh fallen werden. Dieser Preis wird aber wahrscheinlich nicht erreicht werden, wenn die Fabrik nicht voll ausgelastet ist.

Die in der Gigafactory produzierten Zellen werden mit einem voraussichtlichen zylindrischen Zellformat von 20700 ein wenig größeres Format als die bisherigen 18650-Zellen haben.

Abbildung 94: Übersicht verschiedener Studien zur der Entwicklung der Preise von Lithium-Ionen-Batteriepacks für den Einsatz in BEV von 2012 bis 2025



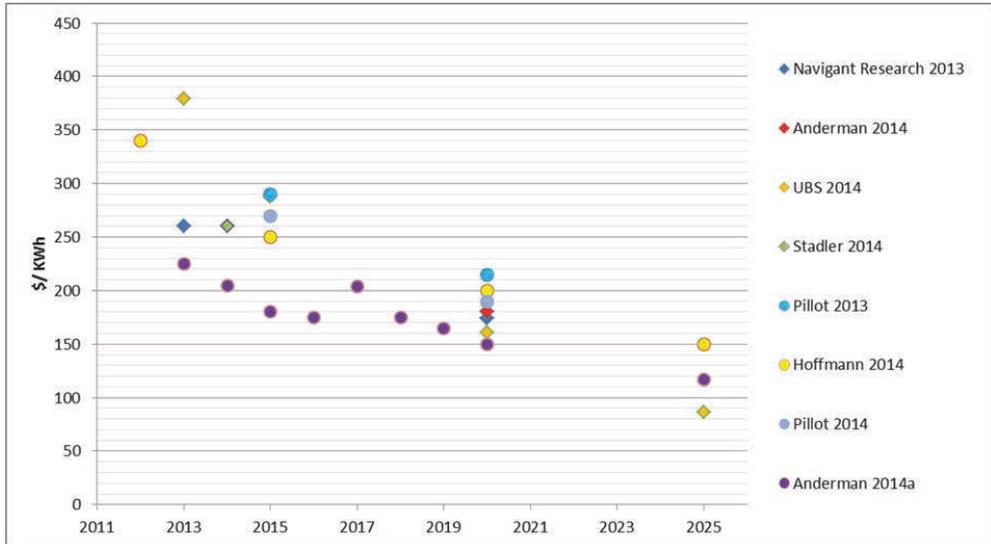
Quelle: Für die Preisangaben: siehe Kapitel 3.3.3

Auf **Zellebene** waren wesentlich weniger Studien verfügbar. Abbildung 95 gibt einen Überblick der betrachteten Studien zur der Entwicklung der Preise von Lithium-Ionen-Batteriezellen für den Einsatz in BEV von 2012 bis 2025. Im Vergleich zu 2013 werden die mittleren Preise von Lithium-Ionen-Batteriezellen für den Einsatz in BEV bis 2020 um ca. 30 %, bis 2025 um fast 50 % fallen (Tabelle 42). Dies stellt eine prozentual geringere Preisreduktion als bei den Batteriepacks dar. Damit tragen die Packkomponenten und Prozesse mehr zur Kostenreduktion als die Zelle bei. Das momentane mittlere Preisniveau (Stand 2014) liegt bei ca. 235 \$/kWh, das Preisniveau der Tesla liegt mit 220 \$/kWh darunter. So wie bei den Batteriepacks stellen die in den Tesla Fahrzeugen eingesetzten Zellen die untere Preisgrenze bei der Zellpreisentwicklung dar (verdeutlicht durch die Datenpunkte von Anderman, 2014b in Abbildung 95).

Tabelle 42: Zeitlicher Preisverlauf von Lithium-Ionen-Batteriezellen für den Einsatz in BEV abgeleitet aus den betrachteten Literaturstudien

Jahr	2012	2013	2014	2020	2025
Preise/BEV-Zelle (\$/kWh)	340	260	235	180	135

Abbildung 95: Übersicht verschiedener Studien zur der Entwicklung der Preise von Lithium-Ionen-Batteriezellen für den Einsatz in BEV von 2012 bis 2025



Quelle: Für die Preisangaben: siehe Kapitel 3.3.3

Sowohl auf Packebene als auch auf Zellebene ist die Studie von (Hoffmann, 2014) zu erwähnen, der eine Lernkurve für Batteriespeicher erstellt hat. Hoffmann ist vor allem in der Photovoltaikwelt sehr bekannt, der dort frühzeitig die Lernkurve für Photovoltaik-modulen analysiert und erstellt hat, die sich im Nachhinein als sehr zutreffend erwiesen hat. Die gleiche Methode hat er auf die Kostenentwicklung von Lithium-Ionen-Batteriezellen angewandt. Nach Hoffmann (2014) sind in der Vergangenheit die Preise für Elektrofahrzeugbatterien um 15 % gefallen, wenn die produzierte Menge gemessen in Wattstunden verdoppelt wurde. Damit ergibt sich ein ähnlicher Wert wie für die Erfahrungskurve bei den Photovoltaikmodulen. Nach der von Hoffmann (2014) abgeleiteten Lernkurve für Lithium-Ionen-Batteriezellen für Elektrofahrzeuge kann die Schallmauer von 100 \$/kWh durchbrochen werden, wenn Batterien mit einer kumulierten Kapazität von 1 TWh verbaut worden sind. Hoffmann (2014) nimmt weiterhin eine durchschnittliche Wachstumsrate von 31 % pro Jahr an, womit im Jahr 2030 die 100 \$/kWh erreicht werden könnten. Die von Hoffmann erstellte Lernkurve bezieht sich allerdings nur auf Zellen. Für die Abschätzung der zukünftigen Kosten des Packaging bezieht er sich auf eine Analyse von Avicenne, nach der die Packaging Kosten auf 50 \$/kWh fallen werden. Weiterhin hat Hofmann angenommen, dass diese bis 2030 um den Faktor 2 fallen werden. Dann würden bei einer angenommenen verbauten Kapazität von einer TWh die Batteriepacks 125 \$/kWh im Jahr 2030 kosten.

Weiterhin haben die Analysen der Studien gezeigt, dass es mehrere Kostenbestandteile für Lithium-Ionen-Batterien gibt. Dies sind im Einzelnen die Zellmaterialien mit der Anode, Kathode, Separator und Elektrolyt, die Zellherstellung, die Packkomponenten, die Packintegration, das Testen und die Qualitätskontrolle. Dazu kommen noch Gemeinkosten und die Gewinnmarge. Die Beratungsinstitute Avicenne (Pillot, 2014) und UBS (Hummel et al., 2014) haben dabei genauer analysiert wie sich diese Kostenbestandteile bis 2020 respektive bis 2025 entwickeln werden. Bei beiden Studien besteht die Gemeinsamkeit, dass

den größten Kostenanteil die Zellherstellung und das Packaging ausmachen. Erst danach folgen die Kosten für die Materialien der Batteriezelle. Davon macht dann die Kathode den größten Kostenanteil aus. Auffällig ist, dass die Kosten für die Zellherstellung und das Packaging stärker sinken als die Materialkosten, so dass ab 2020 die Anteile annähernd gleich sind und bis 2025 die Zellmaterialien den höchsten Anteil an den gesamten Kosten des Batteriepacks ausmachen werden.

Es wird erwartet, dass ab 2020 allein die Optimierung der Batteriematerialien voraussichtlich mehr als 50 % der zukünftigen Kostensenkungen von Lithium-Ionen-Batterie-zellen ausmachen wird. Wesentliche Kostensenker sind dabei die Optimierung der Energie-dichte, die Lebensdauer, die Sicherheit, die Ladezeit und Verlustleistung. Weiterführende Entwicklungen bei den Kathodenmaterialien sind ein wichtiger Schwerpunkt, aber in allen Bereichen der Batterie sollten die Kosten reduziert werden, um die Gesamtbatteriekosten zu senken. Nicht zu vernachlässigen sind die durch eine Massenproduktion verursachten Skaleneffekte, die zu signifikanten Kosteneinsparungen führen können. UBS (Hummel et al., 2014) geht davon aus, dass sich die wesentlichen Kosteneinsparungen aus der Massenproduktion ergeben und dass die wesentliche Zellchemie verstanden ist, um eine Optimierung der Batteriekosten zu erreichen.

Nach Anderman (2013) sind in Zukunft die wesentlichen Kostentreiber für Batteriepacks Sicherheitsmerkmale wie Verformungs- und Brandschutzmaßnahmen, komplexere Kühlsysteme, höhere Kosten für die Tests und zusätzliche Elektronik für höhere Sicherheitsanforderungen, Zuverlässigkeit und Diagnose. Niedrigere Kosten sind nach der Amortisation der Entwicklungs- und Werkzeugkosten zu erwarten.

Abbildung 96 zeigt zusammenfassend die aus den Studien ausgewertete mittlere Preisentwicklung für Lithium-Ionen-Batterien von 2012 bis 2025.

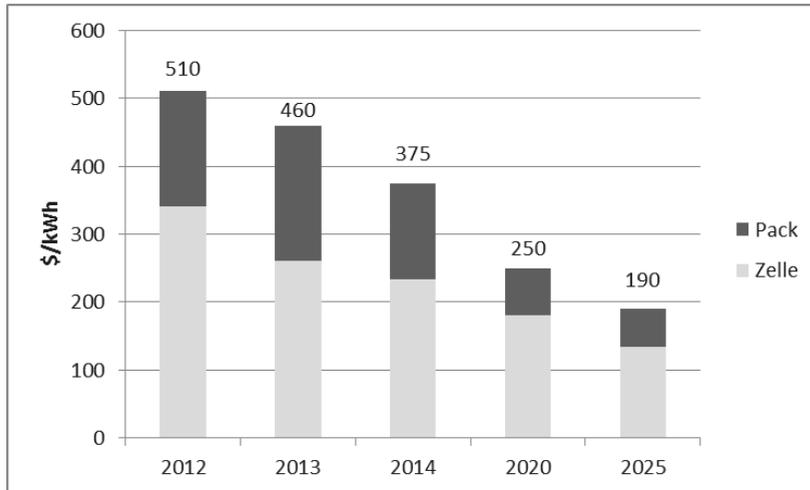
### **Preisentwicklung für verschiedene Lithium-Ionen-Technologien**

Zur zukünftigen Preisentwicklung für verschiedene Lithium-Ionen-Technologien wurden Studienergebnisse des amerikanischen Department of Energy (DOE) (Howell, 2012; DOE, 2014) und der amerikanischen Technologieberatungsfirma TIAX (Rempel et al., 2013) ausgewertet. Die Ergebnisse basieren bei beiden Einrichtungen auf ein Batteriekostenmodell, wobei das DOE das am Argonne National Laboratory entwickelte Battery Performance and Cost (BatPaC) Modell und TIAX ein hauseigenes Modell verwendet.

Ambitionierte Ziele, wie zum Beispiel das von DOE mit 125 \$/kWh auf Packebene für 2022, können nicht nur durch aufgrund einer Massenproduktion herbeigeführten Skaleneffekte und damit verbundenen Preisreduktionen erreicht werden, sondern müssen durch Einsatz anderer Lithium-Ionen-Technologien als die bisher verwendeten erreicht werden. Das Potential fortgeschrittener Lithium-Materialien und der Post-Lithium-Chemie hat das DOE durch den Einsatz des BatPaC Modells quantifiziert. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Kombination aus lithium- und manganreichem Kathodenmaterial (LMRNC) für Hochenergiezellen und Siliziumlegierung-(Komposit-)Anoden als auch die Lithium-Metall-Batterietechnologien in der Lage sind das Kostenziel von 125 \$/kWh zu erfüllen.

Um dieses Ziel tatsächlich zu erreichen, ist eine Anzahl von hohen technischen Hürden, die diese „fortgeschrittenen“ Lithium-Materialien mit sich bringen, zu überwinden. Zu nennen sind hier die Lebensdauer, Leistungsanforderungen und niedrige Temperaturen.

Abbildung 96: Mittlere Preisentwicklung für Lithium-Ionen-Batterien von 2012 bis 2025 abgeleitet aus der Auswertung der verschiedenen Studien



TIAX hat keine Kalkulationen zu BEV-Packs durchgeführt, sondern zu PHEVs. Die modellierte Produktionsfabrik ist auf Massenproduktion von PHEV-Zellen ausgelegt, in dem hier dargestellten Fall sind es 25 Millionen Zellen, was einer Packanzahl von 250.000 Stück entspricht. Die Kosten wurden für eine 300 V PHEV-Batterie mit einem 5,5 kWh nutzbaren Energieinhalt modelliert, der den Anforderungen des VRE- und BM-Fahrzyklus (20 Meilen Stadtfahrzyklus) genügt. Die Zellen wurden für unterschiedliche Elektrodenbeladungen (1,5–3 mAh/cm<sup>2</sup>) und Degradationscharakteristiken (0 und 30 %) entwickelt. Die Modellierungsergebnisse von TIAX haben gezeigt, dass die Materialkosten bei einer ausgelasteten Massenproduktion ungefähr 80 % der Gesamtkosten ausmachen, wobei das Kathodenmaterial mit 23 %–45 % den größten Kostenanteil bei den Zellmaterialien hat.

### Preisentwicklung für verschiedene Zellformate

Für das Zelldesign der Batterien für die Verwendung in BEV existieren verschiedene Bauformen, die von zylindrischen über prismatische Formen bis hin zu Pouch-Zellen reichen. Die Pouch-Zelle wird aufgrund ihrer flexiblen Aluminium-Kunststoff-Compoundfolie, die an die Folienverpackung von Kaffee erinnert, auch „Coffee-Bag-Zelle“ genannt, bei der die Elektroden-Separator-Einheiten gestapelt sind. Im Gegensatz dazu hat die prismatische Zelle ein festes Gehäuse, in dem die Elektroden-Separator-Einheiten gewickelt sind. Bei den zylindrischen Zellen vom Typ 18650 (18 mm Durchmesser, 65 mm Länge) handelt es sich um rundgewickelte Zellen. Diese Zellen werden auch „Consumer-Zellen“ genannt. Dessen Bauform wird nahezu in allen Batteriezellen von Geräten der Unterhaltungsindustrie eingesetzt, vereinzelt wird die zylindrische Zelle auch in BEV eingesetzt (z.B. Tesla).

Eine historische Preisentwicklung zu verschiedenen Zellformaten ab 2005 ist in (Pillot 2014) zu finden. Die Analyse dieser Preisentwicklung hat ergeben, dass die klassischen großformatigen Zellen (Pouch oder prismatisch), schneller gefallen sind als die Preise der zylindrischen Zellen. Das liegt daran, dass die großformatigen Zellen noch in kleinen

Stückzahlen produziert werden und deswegen der Lernkurveneffekt (Verringerung der Kosten um ca. 15 %–20 % bei Verdoppelung der Stückzahl) zu einer deutliche höheren Preisreduktion auswirkt als bei den zylindrischen Consumer-Zellen, die seit Ende der 90er Jahre in sehr hohen Stückzahlen für die Elektronikindustrie gefertigt werden.

Für Batterien in automobilen Anwendungen sind die Designtreiber zu einem die Sicherheit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer und zu anderem eine hohe volumetrische und gravimetrische Energiedichte bei möglichst geringen Kosten.

Da die automobiler Anwendung mit anspruchsvollen Sicherheitsanforderungen an die Batterien verbunden ist, wurden die großformatigen Zellen in 2010 bis 2012 aufgrund der hohen Anforderungen an die Lebensdauer und Sicherheit mit sehr konservativen Designs eingeführt. Da inzwischen die Batterieindustrie mehr Erfahrung in der Produktion von großformatigen Zellen gesammelt hat und deswegen mehr Vertrauen gewinnt, werden in der nächsten Zellengeneration der Jahre 2016/2017 energetisch hochwertigere Materialien in einem besser optimierten Packdesign verwendet werden. Die Energiedichte wird sich dabei um ca. 40 % verbessern (Anderman, 2014b).

Aktuelle Hochenergie-18650er-Zellen weisen eine um 50 % höhere spezifische Energie pro Gewichtseinheit als die momentan verfügbaren großformatigen Zellen auf. Bei der Konstruktion von 18650er-Zellen werden die größten Möglichkeiten in der Erhöhung der Energiedichte und in der Kostenreduktion durch den Einsatz von Materialien mit höherer Kapazität und/oder geringeren Kosten gesehen. Einen gewissen Nutzen könnte auch die Umstellung auf etwas größere Zellen wie zum Beispiel die 20700er sein (Anderman, 2014b).

In Anderman wird angenommen, dass zum Ende des Jahrzehnts sowohl für großformatige Zellen als auch für 18650er-Zellen eine ähnliche Zellchemie entwickelt werden wird. Weiterhin wird bis zum Jahr 2018 die Entwicklung bei den großformatigen Zellen soweit fortgeschritten sein, dass Zellen mit dem 18650er-Ansatz nur noch eine um eine 15 %–20 % höhere Energiedichte aufweisen. Über das Jahr 2018 hinausgesehen sieht Anderman aufgrund der Skaleneffekte bei den großformatigen Zellen eine höhere Kostenreduktion als bei den kleineren zylindrischen Zellen (Anderman, 2014b).

Viele Automobilhersteller haben sich gegen den Einbau der 18650er-Zelle in ihrem BEV entschieden. Dies gilt selbst für neue BEV mit Reichweiten von über 200 Meilen. Ein Vorteil der 18650er-Zellen ist die geringe Profilhöhe, welche es beispielsweise erlaubt die Traktionsbatterie unterhalb der Kraftfahrzeugachse zu integrieren. Die Analysen der meisten Autohersteller, gestützt von Schätzungen der koreanischen Batterieindustrie, zeigen, dass ein Batteriepack basierend auf dem großformatigen Pouch-Format die Kostenparität mit dem 18650er-Design in ungefähr zwei bis drei Jahren erreichen werden, mit einem größeren Kostensenkungspotenzial in den darauf folgenden Jahren (Anderman, 2014b).

Für das Jahr 2025 kalkuliert Anderman (2014b) für das Batteriepack aus Zellen mit einem zylindrischen Format, die in den Tesla-Fahrzeugen eingesetzt werden, einen Preis von 167 \$/kWh. Auf Zellebene kann mit einem Preis von 117 \$/kWh gerechnet werden, bei Zellmaterialkosten von ca. 75 \$/kWh und Kathodenkosten von 38 \$/kWh. Für eine klassischen großformatigen EV-Zelle mit einer 42 Ah Pouch-Zelle mit NMC-Kathode kalkuliert Anderman (2014b) bei einer jährlichen Stückzahl von 15 Millionen einen Preis von 238 \$/kWh, der nur knapp über den jetzigen Preisen der zylindrischen 18650er-Zellen

liegt. Allerdings wird es bis ca. 2017 dauern, bis es die Batterieindustrie schafft solche Mengen an Pouch-Zellen zu produzieren, um diesen Preis zu erreichen.

### **Preisentwicklung für verschiedene Leistungs-Energie-Raten**

Zur zukünftigen Preisentwicklung für verschiedene Leistungs-Energie-Raten konnte nur eine Datenquelle gefunden werden (Anderman, 2014a). Aufgrund fehlender Hintergrundinformationen ist diese nur begrenzt auswertbar. Es zeigt sich aber klar, dass sich die Preiskurve Richtung rein batterieelektrischen Fahrzeug hin deutlich abfällt und die Anwendung die Leistungs-Energie-Rate bestimmt. Um die Leistungsanforderungen in Hybridautos erfüllen zu können, werden überwiegend leistungsoptimierte Zelldesigns verwendet, aber zum Teil auch spezielle hochstromfähige Lithium-Technologien eingesetzt. Leistungsoptimierte Zelldesigns sind aufwändiger und somit teurer als die in BEVs eingesetzten Hochenergiezellen.

### **Zusammenfassende Ergebnisse**

In diesem Kapitel wurde eine Literaturrecherche zum Ist-Zustand von Lithium-Ionen-Batterien und zur zukünftigen Entwicklung der Batteriekosten auf Zell- und Systemebene für verschiedene Lithium-Technologien, Zellformate und Leistungs-Energie-Raten durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die mittleren Preise für BEV-Batteriepacks sinken 2014 von 375 \$/kWh auf 250 \$/kWh im Jahr 2020 und auf 190 \$/kWh im Jahr 2025.
- Die mittleren Preise für BEV-Batteriezellen sinken 2014 von 235 \$/kWh auf 180 \$/kWh im Jahr 2020 und auf 135 \$/kWh im Jahr 2025.
- Aufgrund des größeren Kostensenkungspotenzials werden sich die Preise der klassischen großformatigen Zellen (Pouch und prismatisch) denen der zylindrischen Zellen 18650 und 20700) annähern.
- Bis 2020 ergeben sich die größten Kostenreduktionen aus der Massenproduktion, ab 2020 liegt das Hauptaugenmerk der Kostenreduktionen auf einer Optimierung der Zellmaterialien.
- Ambitionierte Ziele, wie zum Beispiel die von DOE mit 125 \$/kWh auf Packebene für 2022, können nur durch den Einsatz fortgeschrittener Lithium-Materialien erreicht werden.
- Sowohl die Kombination aus lithium- und manganreichem Material für Hochenergiekathoden (LMRNC) und Siliziumlegierung-(Komposit-)Anoden als auch die Lithium-Metall-Batterietechnologien sind in der Lage das Kostenziel von 125 \$/kWh zu erfüllen.

## 4.2.4 Elektrische Speicher: Kernaussagen und Empfehlungen

(M. Bauer, M. A. Danzer, C. Günther, M. Taumann)

Aus den voranstehenden Analysen lässt sich eine Reihe von Aussagen über das betriebliche Verhalten von Fahrzeugbatterien ableiten.

- Wie aus den Alterungstests der Fallstudie hervorgeht, ist bei hinreichend begrenzter Strombelastung und Anwendung einer SOC-Band-Begrenzung die betriebsbedingte Alterung gegenüber einer rein kalendarischen Alterung gering.
- Die Batteriedegradation ist bezüglich der Betriebsbedingungen ein hochgradig nichtlineares Phänomen.
  - Bezüglich des zugelassenen SOC-Bandes sowie der Stromstärke: Durch die Wahl eines breiteren SOC-Bandes und höherer Stromraten kommt es bei den zyklischen Alterungstests auch bei vergleichsweise niedriger Kapazitätsabnahme (C4) zu einem gegenüber den Ergebnissen der Fallstudie verstärkten Anstieg der Impedanz und Auftreten eines zusätzlichen Bogens im Spektrum.
  - Bezüglich der Temperatur: Unterhalb eines kritischen Einsetzpunktes kommt es wie aus den zyklischen Alterungstests ersichtlich zu merklich erhöhter Kapazitätsdegradation aufgrund von Lithium Plating. Auch bei Erhöhung der Temperatur über  $\sim 40$  °C (z.B. durch starke Beanspruchung und mangelnde Kühlung), ist ein signifikanter Anstieg der Degradation die Folge.
- Bei niedrigen Temperaturen ist eine Begrenzung des Stromes erforderlich, um das Auftreten von Lithium-Plating zu vermeiden (vgl. Schindler, 2016).
- Aufgrund der stets vorhandenen kalendarischen Alterung kommt es auch ohne jede Belastung zur Degradation. Diese ist bei hohen Ladezuständen und hohen Temperaturen besonders ausgeprägt.

Aus den voranstehenden Aussagen ergeben sich die folgenden Empfehlungen für einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz der Fahrzeugspeicher kommerzieller Flottenfahrzeuge für Systemdienstleistungen.

- Werden die Belastungen für Systemdienstleistungen in einem aus Speichersicht moderaten Betriebsbereich gehalten, so ist die durch Netzdienstleistung verursachte zusätzliche Degradation vernachlässigbar. Für die im Projekt untersuchten Zellen konnte dies bei einer Strombelastung von 61,1 % des laut Datenblatt erlaubten maximalen Ladestroms (entsprechend einer Netzanschlussleistung von 22 kW bei einem Nennenergieinhalt des Speichers von 36 kWh) nachgewiesen werden. Folglich ist unter diesen Bedingungen im Sinne einer höheren Speichernutzung und verbesserter Wirtschaftlichkeit die Nutzung für Systemdienstleistungen zu empfehlen.
- Je nach Temperaturbereich treten klar unterscheidbare Alterungsprozesse auf. Nachweislich existiert bezüglich der Temperatur ein optimaler Betriebsbereich in einem Bereich um die Raumtemperatur herum. Durch hinreichendes Thermomanagement in beide Richtungen (Kühlung, Vorheizen) muss der Betrieb außerhalb dieses Bereiches auf ein Minimum beschränkt werden.

- Standzeiten bei hohem SOC sind zu vermeiden, so dass das Aufladen der Speicher in den frühen Morgenstunden einem sofortigen Wiederaufladen nach Dienstschluss vorzuziehen ist.
- Die voranstehende Aussage verliert bei kühlen Umgebungsbedingungen Ihre Gültigkeit. Es ist zwingend zu vermeiden, dass es durch das Nachladen bei ausgekühlter Batterie zu Lithium-Plating kommt. Das Auskühlen lässt sich wirksam durch stetige Netzdienstleistung während der Nacht (Dauerbetrieb des Speichers) vermeiden, andernfalls ist direkt im Anschluss an die letzte Fahrt nachzuladen.
- Die Dilatometrie kommt als Online-Methode zur Detektion kritischer Betriebszustände in Betracht, wobei übermäßiges Dickenwachstum oder die Veränderung der in eingeführten Kapazitätsbereiche A, B und C, Indikatoren für die jeweils vorliegenden Alterungsmechanismen darstellen. In Bezug auf kommerzielle Energiespeicher ist das Messverfahren z.B. durch Einbringen von Kraftsensoren, bzw. Dehnungsmessstreifen realisierbar.

## 4.3 Energieversorgungssystem und Systemdienstleistungen

(F. Gromann, F. Becht, F. Winkelmann und K. Strunz)

Das folgende Kapitel umfasst die Ergebnisse unterschiedlicher Ladestrategien bezüglich der Teilnahme von EV-Flotten an unterschiedlichen Segmenten des deutschen Energiemarktes. Weiterhin werden die technischen Auswirkungen der Ladestrategien auf typische Verteilernetztopologien untersucht.

### 4.3.1 Zusammensetzung des Strompreises für EV-Endverbraucher

(F. Gromann, F. Becht, F. Winkelmann)

Der Strompreis setzt sich aus den in Tabelle 43 aufgeführten Bestandteilen zusammen. Der Großhandelspreis (EEX-Preis), der am Day-Ahead-Markt erzielt werden kann, betrug 2015 durchschnittlich 4,96 Cent pro Kilowattstunde.

Es werden große Fuhrparks betrachtet, daher werden die Netzentgelte auf Grundlage der Preise für Lastgangkunden ermittelt. Lastgangkunden zahlen einen Arbeitspreis je verbrauchter Kilowattstunde sowie einen Jahresleistungspreis, der sich aus der höchsten gemessenen Leistung in einem Viertelstundenintervall eines Jahres ergibt. Jahresgebühren werden auf eine Kilowattstunde umgerechnet. Die Stromsteuer ist eine Mengensteuer, die für jede Kilowattstunde zu entrichten ist. Die Entwicklung der allgemeinen Verbraucherpreise für Strom in Tabelle 44 verzeichnet zunächst einen Anstieg, der vor allem durch die steigende EEG-Umlage zu erklären ist (Schlesinger, 2014).

In langer Frist wird der Verbraucherstrompreis aber wieder sinken. Der EEX-Preis selbst steigt von etwa fünf auf über neun Cent. Erklärt werden kann dieser Anstieg mit dem Auslaufen der EEG-Umlage und dem damit einhergehenden Abbau der Subventionierung von Erzeugern erneuerbarer Energien.

Tabelle 43: Zusammensetzung des Strompreises für EV-Endverbraucher 2015

		<b>Cent/kWh</b>
<b>EEX-Preis</b>		4,96
<b>Umlagen</b>	EEG-Umlage	6,17
	§19-Umlage	0,05
	KWK-Umlage	0,05
	Offshore-Haftungsumlage	0,04
<b>Stromsteuer</b>		2,05
<b>Netzentgelt</b>	Arbeitspreis	4,54
	Jahresleistungspreis/kWh	0,72
	Konzessionsabgabe	0,61
<b>Handelsentgelt</b>	Jahresgebühr/kWh	0,1
	Handelsgebühr	0,04
	technische Jahresgebühr/kWh	0,08
<b>Strompreis EV-Endverbraucher</b>		<b>19,41</b>

Quelle: EPEX, 2015; Stromnetz Berlin, 2015

Tabelle 44: Inflationsbereinigte Verbraucherpreise für Strom in Cent/kWh

	<b>Jahr</b>						
	<b>2011</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
<b>Haushalte</b>	27,31	28,85	30,78	32,89	29,94	29,10	28,25
<b>Handel &amp; Gewerbe</b>	19,82	21,23	22,98	24,67	22,24	21,40	20,56
<b>Industrie</b>	12,55	14,42	16,76	18,66	16,55	16,02	15,50
<b>stromintensive Industrie</b>	5,80	5,52	5,17	7,27	8,22	9,91	10,54
<b>EEG-Umlage</b>	3,69	6,54	7,06	6,85	3,80	1,58	0,84
<b>EEX Preis</b>	5,38	4,96	4,43	6,33	7,06	8,75	9,17

Quelle: Schlesinger, 2014

### 4.3.2 Nutzeranalyse und EV-Flottendefinition

(F. Gromann)

Die untersuchten Szenarien im nachfolgenden Unterkapitel umfassen die Analyse des Fahrverhaltens (i) kommerziell genutzter Pkw und (ii) Transporter bis einschließlich 3,5 t Nutzlast. Die deutschen Mobilitätsstudien MiD (2008) und KiD (2010), sowie vermessene Fahrprofile innerhalb des komDRIVE-Projektes bilden die Datengrundlage für die nachfolgende Betrachtung.

In Tabelle 46 sind die technischen Nebenbedingungen der Fahrzeuge definiert, bezüglich der Ladeinfrastruktur beziehungsweise der maximalen Ladeleistung und fahrzeugspezifischer Nebenbedingungen, wie Batteriekapazitäten und elektrischer Verbrauch. Im Unterschied zu einem Fuhrpark aus Transportern ist der Pkw-Fuhrpark in drei verschiedene Fahrzeugklassen unterteilt, für die jeweils eine unterschiedliche Ladeleistung und Batteriekapazität definiert wurde.

In Abhängigkeit der technischen Nebenbedingungen und unter Berücksichtigung des Fahrverhaltens kommerziell genutzter Pkw und Transporter kann das Elektrifizierungspotential sowie die Anteile der einzelnen Fahrzeugklassen innerhalb der Flotte ermittelt werden. Die Fahrzeugklassen werden anhand der Tagesfahrleistung und der zur Verfügung stehenden Batteriekapazität gebildet. Unter Berücksichtigung der technischen Nebenbedingungen ergibt sich ein Elektrifizierungspotential von 85 % für kommerziell genutzte Pkw und 57 % für Transporter. Die durchschnittliche Anzahl an Fahrten sowie die durchschnittliche Tagesfahrleistung der untersuchten kommerziellen EV-Flotten sind in der Tabelle 47 zusammengefasst. Ein wesentlicher Unterschied bezüglich der durchschnittlichen Anzahl an Fahrten sowie der Tagesfahrleistung besteht zwischen den Tagen von Montag bis Freitag und den Tagen am Wochenende.

In den Abbildung 97 ist das mobile Fahrverhalten einer kommerziell genutzten Pkw- und Transporter-Flotte für 1.000 aggregierte Fahrzeuge an einem Wochentag exemplarisch für verschiedene Standzeiten dargestellt. Wichtige Größen sind die (i) durchschnittliche Netzkopplung und der (ii) aggregierte mobile Energiebedarf.

Die Netzkopplung ist in Abbildung 97 für unterschiedliche Standzeiten aufgetragen. Wird für die Standzeiten ein Wert von zwei Stunden definiert, bedeutet dies, dass ein Fahrzeug erst dann ans Netz angeschlossen ist und dem Energieversorgungssystem zur Verfügung steht, sobald die Pausenzeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrten mehr als zwei Stunden beträgt.

Ein wichtiges Merkmal, sowohl für die Pkw als auch für die Transporter, ist die geringe Aktivität in den Nachtstunden, ab 20 Uhr abends bis ca. 5 Uhr morgens, welches sich für Standzeiten von null Stunden in einer hohen Netzkopplung mit Werten von  $> 0,9$  p.u. und in einem geringen mobilen Energiebedarf von  $< 0,1$  MWh widerspiegelt. In den Morgenstunden von ca. 5 bis 9 Uhr finden die meisten Fahrten statt, wodurch die Netzkopplung auf Werte unterhalb von  $0,4$  p.u. sinkt und der mobile Energiebedarf sein Maximum von 293 MWh erreicht. Nach 9 Uhr ist bis 20 Uhr ein leichter Anstieg des mobilen Energiebedarfs zu verzeichnen. Nach 20 Uhr sinkt dieser wieder stark ab. Die Veränderung der Standzeiten

beeinflusst die Netzkopplung in den Morgen-, Mittags- und Abendstunden stark und in den Nachtstunden schwach.

### 4.3.3 Ökonomische und technische Analyse von EV im Energiemarkt

(F. Gromann, F. Becht)

Insgesamt umfasst die ökonomische Analyse vier Szenarien, das Referenzszenario, das SRL-Szenario, das MRL-Szenario und das Zukunftsszenario. Da es sich um kommerzielle Flotten handelt, wird für das Referenzszenario ein Strompreis von 21,23 Cent/kWh angenommen, siehe Tabelle 44. Diesen Strompreis müssen Kunden im Segment Handel & Gewerbe für das ungesteuerte Laden von Elektrofahrzeugen entrichten. Das SRL-Szenario betrachtet die Teilnahme am Day-Ahead-Markt und es wird zusätzlich Sekundärregelleistung bereitgestellt. Im MRL-Szenario wird anstatt der Sekundär- die Minutenreserve betrachtet. Im Zukunftsszenario werden die Ladestrategien auf die Sensitivität gegenüber den EEX-Preisen und der EEG-Umlage untersucht.

Darüber hinaus werden beim SRL- und MRL-Szenario unterschiedliche Zeitscheiben und Realisierungsarten untersucht. Somit ergibt sich eine Vielzahl an zulässigen Kombinationen, die als Ladestrategien bezeichnet werden, dargestellt in Tabelle 45. Als zulässige Kombinationen gelten alle Szenarien, welche eine maximale Fuhrparkgröße von 3.259 Pkw oder 3.509 Transportern nicht überschreiten.

Tabelle 45: Anzahl möglicher Kombination bei der Teilnahme am Reservemarkt

	<b>Sekundärreserve</b>	<b>Minutenreserve</b>
Anzahl an Kombinationen	6	135

Die maximale Fuhrparkgröße der Kombinationen berechnet sich aus der Batteriekapazität der EV und der Ladeleistung. Zum einen muss gewährleistet sein, dass die gebotene Regelleistung abgerufen werden kann. Zum anderen muss zu jedem Zeitpunkt ein Abruf über die am Regelenergiemarkt gebotene Leistung möglich sein. Aufgrund der in Tabelle 46 dargestellten, unterschiedlichen Batteriekapazität und Ladeleistungen der Pkw und Transporter entsteht die Diskrepanz der maximalen Fuhrparkgröße.

Alle gehandelten Preise in der Untersuchung beziehen sich auf das Bezugsjahr 2014. Die EV-Flottenoptimierung findet tageweise in der Zeit von 0–24 Uhr statt und umfasst eine durchschnittliche Woche im Jahr 2014. Um den EV-Nutzern am Morgen einen möglichst hohen Energiezustand der Batterie zu gewährleisten, gilt für die Ladestrategien um 6 Uhr ein Mindest-SoE von 0,8. Das SoE-Band wurde zwischen 0,1 und 0,9 eingeschränkt, um die Alterungseffekte der Batterien zu verringern.

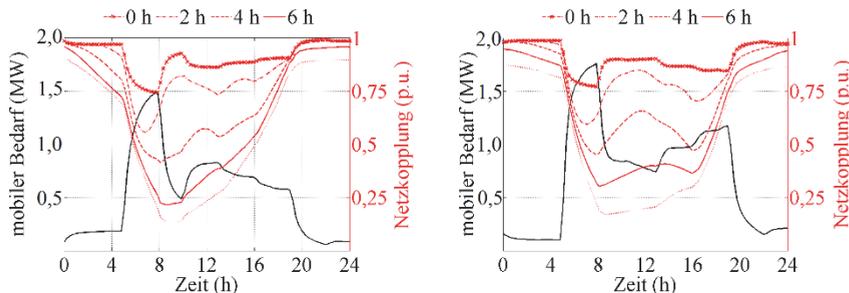
Tabelle 46: Nebenbedingungen der EV-Flottenoptimierung für die jeweils untersuchten kommerziellen EV-Flotten

	Pkw			Transporter
Maximale Ladeleistung (kW)	3,7	7,4	11,4	11,4
Maximale Batteriekapazität (kWh)	17,6	24,4	60	36,0
Ø-Verbrauch (kWh/100 km) <sup>14</sup>	17,8			25,1
Anteil der Fahrzeugklassen (p.u.)	0,30	0,22	0,48	1,0
Elektrifizierungspotential	85 %			57 %

Tabelle 47: Anzahl an Fahrten und Tagesfahrleistung der untersuchten kommerziellen EV-Flotten

	Ø Anzahl an Fahrten		Ø Tagesfahrleistung (km)	
	Pkw	Transporter	Pkw	Transporter
<b>Montag</b>	4,02	4,33	70,24	48,77
<b>Dienstag</b>	4,59	4,03	71,15	45,79
<b>Mittwoch</b>	4,56	4,23	70,92	47,79
<b>Donnerstag</b>	4,29	4,04	70,06	46,27
<b>Freitag</b>	4,00	3,79	68,08	44,30
<b>Samstag</b>	1,10	1,00	20,08	13,82
<b>Sonntag</b>	0,79	0,38	14,11	5,39
<b>Ø-Woche</b>	3,34	3,12	54,95	36,02

Abbildung 97: Mobiles Fahrverhalten unterschiedlicher elektrifizierter Fahrzeugflotten für eine Flottengröße von 1.000 Fahrzeugen



(a) kommerzielle Pkw.

(b) Transporter.

<sup>14</sup> Gemäß den elektrische Verbrauchswerten aus Tabelle 28.

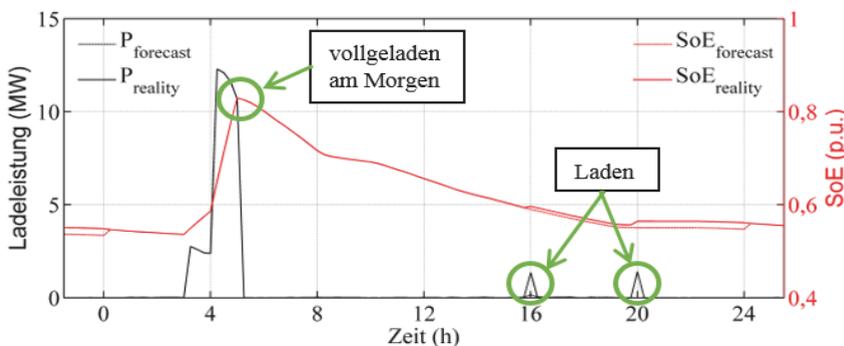
Tabelle 48: Nebenbedingungen der EV-Flottenoptimierung für unterschiedliche kommerzielle EV-Flotten

	Pkw	Transporter
$SoE_{max}$ (p.u.)	0,9	0,9
$SoE_{min}$ (p.u.)	0,1	0,1
SoE um 5 Uhr (p.u.)	> 0,8	> 0,8
Anteil für Systemdienstleistungen (p.u.)	0,2	0,2

Zur Veranschaulichung der Ladestrategien mit (i) unterschiedlichen Realisierungsarten, (ii) unterschiedlichen Zeitscheiben und in (iii) unterschiedlichen Kombinationen mit dem Day-Ahead-Markt, ist beispielhaft die Bereitstellung von Minutenreserveleistung einer Flotte von Transportern dargestellt und erläutert. Wichtige Eingangsgrößen zur Berechnung einer Ladestrategie sind der mobile Bedarf, die daraus resultierende Netzkopplung, dargestellt in Abbildung 98 und Abbildung 99 und ein Preissignal (vgl. Abbildung 22).

Aus dem Ziel die Gesamtladekosten zu minimieren, morgens um 6 Uhr einen Energiegehalt > 0,8 p.u. zu erzielen und zusätzlich negative Minutenreserveleistung in den Stunden von 12 bis 16 und von 16 bis 20 Uhr bereitzustellen, ergibt sich ein Ladeprofil nach Abbildung 98. Dargestellt sind jeweils die Prognose (gestrichelte Linie) und der tatsächliche Verlauf in der Anwendung für den Folgetag (durchgezogene Linie). Der minimale Preis wird um 5 Uhr erreicht. Zu dieser Zeit findet jedoch kaum mehr eine Ladung statt. Dies ist mit der Festlegung des Energiegehalts von 0,8 p.u. um 6 Uhr morgens begründet. Weiter wird in diesem Beispiel negative Reserveleistung jeweils einmal in jeder Zeitscheibe, um 16 Uhr und 19 Uhr, abgerufen. Somit unterscheidet sich der prognostizierte von dem tatsächlichen Verlauf der Ladeleistung und des Energiegehalts, sichtbar an der Abweichung des Energiegehalts in Stunde 24, dargestellt in Abbildung 98.

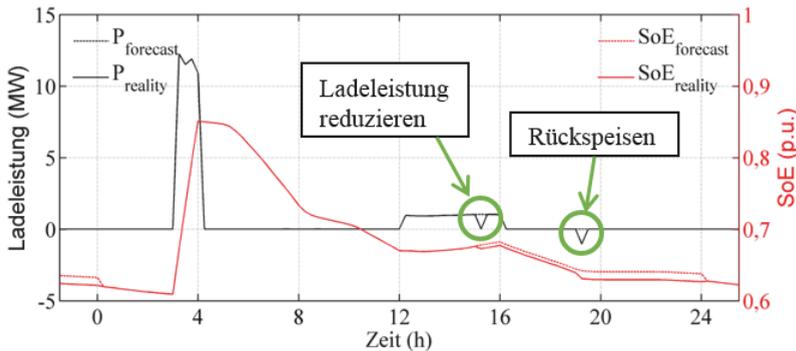
Abbildung 98: Ladestrategie zur Bereitstellung negativer Minutenreserveleistung



Positive Reserveleistung kann auf zwei unterschiedliche Realisierungsarten bereitgestellt werden, dargestellt in Abbildung 99. Wie im vorigen Beispiel findet, zur Einhaltung der Nebenbedingungen, der Hauptenergiebezug in den Morgenstunden statt. In den Stunden von 12 bis 16 Uhr wird positive Reserveleistung durch das Reduzieren der Ladeleistung bereitgestellt. Hierfür muss in der gesamten Zeitscheibe geladen werden. Kommt es zu einem

Abruf, wird die Ladeleistung reduziert und im Vergleich zur Prognose ändern sich das Ladeprofil und der Energiegehalt. Weiter ist das klassische Rückspeisen in den Stunden von 16 bis 20 Uhr in Abbildung 99 dargestellt. Aus der Ladeleistung kann im Weiteren die Gleichzeitigkeit der Ladung  $\gamma$  für unterschiedliche Zeitpunkte abgeleitet werden. Der erzielte Energiegehalt in der Anwendung am Ende eines Tages wird für die Prognose beziehungsweise zur Optimierung des Folgetages verwendet.

Abbildung 99: Ladestrategie zur Bereitstellung positiver Minutenreserveleistung mit unterschiedlichen Realisierungsarten



In Tabelle 49 sind die technischen und ökonomischen Ergebnisse für kommerziell genutzte Pkw-Flotten für verschiedene Reservearten zu unterschiedlichen Zeitscheiben und Realisierungsarten zusammengefasst.

Die dargestellten Ergebnisse geben den Maximalwert der Gleichzeitigkeit der Ladung  $\gamma$  und die Extremwerte der Mobilitätseinschränkung und der Energiepreise an. Diese sind entsprechend markiert. Ein Mobilitätsverlust tritt ein, wenn mindestens eine Fahrt aufgrund eines zu niedrigen *SoE* nicht oder nur zu einem Teil durchgeführt werden kann. Die Netzkopplung wurde für Standzeiten größer als zwei Stunden angenommen.

Die Tabelle 50 umfasst die technischen und ökonomischen Ergebnisse einer Transporter-Flotte. Die dargestellten Werte folgen der Analyse der Pkw-Flotte. Aufgrund regulatorischer Rahmenbedingungen des Reservemarktes, der Batteriekapazität und dem Anteil an vorgehaltener Energie im Speicher für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen ergeben sich unterschiedliche Flottengrößen. Eine Flottengröße von 3.509 Fahrzeugen wird für die Ladestrategie (LS) mit der Nummer 1 benötigt und ist mit 15,42 Cent/kWh die kostengünstigste. Diese Ladestrategie umfasst die Bereitstellung positiver Sekundärregelleistung mit der Realisierungsart (i) Rückspeisen. Die Auswahl der Zeitscheiben für positive SRL ist nur unter der Woche möglich. Am Wochenende muss über den gesamten Tag die Reserveart bereitgestellt werden. Somit steigt auch die Kapazität, die vorgehalten werden muss. Als Folge steigt die Anzahl an EV, die zur Realisierung der Ladestrategie benötigt werden.

Tabelle 49: Ökonomische Auswertung kommerziell genutzter Pkw mit der Bereitstellung von Reserveleistung und der Teilnahme am Day-Ahead-Markt

LS	SRL	MRL	Zeitscheiben (h)						Flottengröße	γ (%)				ME (pro 100 EV)	Energiepreis (Cent/kWh)
			0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24		Laden		Rückspeisen			
										Tag	Nacht	Tag	Nacht		
1	x		i	i				I	3259	0,3	93,8	3,7	3,8	0,96	<b>15,52</b>
2	x				i	i	i		1630	0,5	95,8	7,6	0,0	1,05	<b>15,58</b>
3		x	n	n					947	7,3	88,5	0,0	0,0	0,78	<b>15,74</b>
..															
81		x					i		610	0,4	95,2	<b>19,6</b>	0,0	0,88	16,19
..															
87		x						I	610	0,4	95,1	0,0	<b>19,9</b>	0,97	16,22
..															
115		x	ii						610	3,4	<b>97,1</b>	0,0	0,0	<b>5,49</b>	16,37
..															
136		x			ii			li	947	14,7	93,6	0,0	0,0	<b>0,09</b>	16,81
..															
141		x					ii		610	<b>25,6</b>	95,8	0,0	0,0	0,38	<b>16,93</b>

ii: positive Reserveleistung mit der Realisierungsart Reduzierung der Ladeleistung  
 n: negative Reserveleistung  
 x: getroffene Auswahl

Die Flottengröße für Pkw ist für dieselbe Ladestrategie geringer und kann mit der durchschnittlich höheren Batteriekapazität der Einzelfahrzeuge erklärt werden. Allerdings sind die Kosten etwas höher im Vergleich zu den Ergebnissen der Transporter-Flotte. Dies liegt am Energiebezug für das Laden. Da der mobile Tagesenergiebedarf der Transporter-Flotte geringer ist, kann die Zeitspanne der Stunden von niedrigen Preisen am Energiemarkt besser genutzt werden. Dieses Verhalten spiegelt sich auch in den Gleichzeitigkeitsfaktoren wider, welche im Durchschnitt bei den Pkw höher sind.

Zur Bestimmung der Sensitivität der betrachteten Ladestrategien in Abhängigkeit der Netzkopplung wurden die Szenarien für Pkw- und Transporter-Flotten für unterschiedliche Standzeiten simuliert. Bedingt durch den fest definierten  $SoE > 0,8$  p.u. um 6 Uhr morgens und die niedrigen Energiepreise in der Nacht beziehungsweise in den Morgenstunden findet ein Großteil der Ladung der Elektrofahrzeuge entweder in der Nacht oder am frühen Morgen statt. Da die Variation der Standzeiten nur einen geringen Einfluss auf die Netzkopplung hat, ändern sich die Werte für die Gleichzeitigkeit der Ladung  $\gamma$  und die Energiebeschaffungskosten für verschiedene Ladestrategien nur unwesentlich. Somit ändert sich auch die Rangfolge der Ladestrategien nicht. Allerdings hat die Variation der Standzeiten Einfluss auf die Mobilitätseinschränkung ME.

Tabelle 50: Ökonomische Auswertung kommerziell genutzter Transporter bis 3,5 t mit der Bereitstellung von Reserveleistung und der Teilnahme am Day-Ahead-Markt

LS	SRL	MRL	Zeitscheiben (h)					Flottengröße	γ (%)				ME (pro 100 EV)	Energiepreis (Cent/kWh)	
			0-4	4-8	8-12	12-16	16-20		20-24	Laden		Rückspeisen			
										Tag	Nacht	Tag			Nacht
1	x		i	i			i	3509	0,3	90,9	2,5	2,5	0,51	<b>15,42</b>	
2	x				i	i	i	1755	0,2	93,4	5,1	0,0	0,51	<b>15,52</b>	
3		x	n	n				1056	6,2	89,9	0,0	0,0	2,43	<b>15,70</b>	
..															
72		x		n				528	11,7	<b>93,5</b>	0,0	0,0	<b>2,91</b>	16,28	
..															
84		x					i	585	0,3	92,0	<b>15,3</b>	0,0	1,62	16,46	
..															
91		x					i	585	0,3	91,7	0	<b>15,2</b>	0,57	16,50	
..															
139		x					ii	528	<b>19,6</b>	<b>39,4</b>	0,0	0,0	<b>0,01</b>	17,61	
..															
141		x					ii	528	18,1	46,4	0,0	0,0	0,04	<b>17,87</b>	

- i: positive Reserveleistung mit der Realisierungsart Rückspeisen
- ii: positive Reserveleistung mit der Realisierungsart Reduzierung der Ladeleistung
- n: negative Reserveleistung
- x: getroffene Auswahl

In Tabelle 51 ist die Veränderung der ME, gebildet aus dem Durchschnitt aller betrachteten Ladestrategien, für unterschiedliche Standzeiten dargestellt. Bedingt durch den geringeren mobilen Tagesenergiebedarf der Transporter-Flotte ist die ME im Vergleich zur Pkw-Flotte im Durchschnitt für verschiedene Werte der Standzeit um rund 60 % geringer.

Tabelle 51: Nebenbedingungen der EV-Flottenoptimierung für die jeweils untersuchten kommerziellen EV-Flotten

		Netzkopplung für Standzeiten > x Stunden			
		0	2	4	6
<b>Pkw</b>	<b>ME (pro 100 EV)</b>	0,79	<b>1,57</b>	1,74	3,65
<b>Transporter</b>	<b>ME (pro 100 EV)</b>	0,20	<b>0,54</b>	0,66	1,30

Beim Zukunftsszenario wurde die Sensitivität der Energiepreise bezüglich der EEG-Umlage und des EEX-Strompreises untersucht. Die Verdienste am Regelenergiemarkt bleiben dabei konstant. Die Entwicklungen der EEG-Umlage und des EEX-Strompreises können Tabelle 44 entnommen werden.

Da es sich bei dem gezeigten EEX-Strompreis um einen Durchschnittswert handelt, wurden die EEX-Preise der Szenarien prozentual angepasst. In Tabelle 52 werden exemplarisch die prognostizierten Energiepreise der kostengünstigsten Szenarien der ökonomischen Auswertung kommerziell genutzter Pkw und Transporter bis 3,5 t dargestellt. Die Preisentwicklung aller Kombinationen folgt diesem Trend.

Tabelle 52: Zukunftsprognose des Energiepreises der Best-Case-Szenarien kommerziell genutzter Pkw und Transporter bis 3,5 t

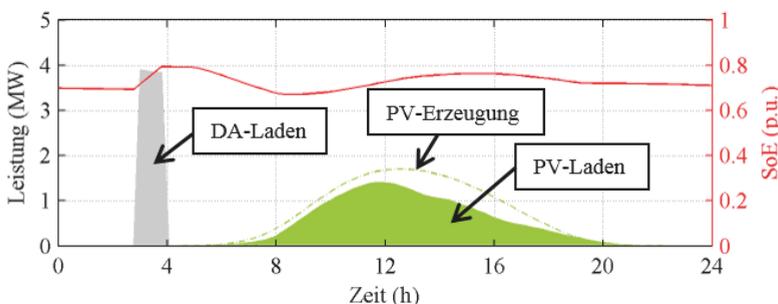
	2014	2020	2025	2030	2040	2050
Pkw	15,52	15,88	17,57	15,25	14,72	14,40
Transporter bis 3,5 t	15,42	15,78	17,47	15,15	14,62	14,30

### 4.3.4 Grünstrommaximierung mit EV-Flotten

(F. Gromann)

Die Ladestrategie zur Grünstrommaximierung betrachtet die Integration von erzeugter Energie aus Photovoltaik (PV) zur Deckung des mobilen Energiebedarfs. Somit lässt sich eine möglichst CO<sub>2</sub>-neutrale Ladestrategie realisieren. Das Erzeugungsprofil aus PV entspricht einem sonnigen Sommertag und ist in Abbildung 100 durch die grüne Linie dargestellt.

Abbildung 100: Ladeprofil für die Ladestrategie zur Erhöhung des Grünstromanteils



Zur Maximierung der Energie aus PV betragen die Grenzkosten der PV-Erzeugung, in Anlehnung an die Merit-Order, null Cent/kWh. Als weitere Nebenbedingung ist die Energie aus der PV-Erzeugung mit der Energie des mobilen Energiebedarfs flächengleich. Dadurch stellt sich die maximale Ladeleistung in jedem Zeitpunkt auf den Wert der PV-Einspeiseleistung ein. Somit kann theoretisch der mobile Energiebedarf zu 100 % mit der erzeugten Energie aus PV gedeckt werden. Der Ladevorgang der EV folgt somit dem Erzeugungsprofil aus PV. Abbildung 101 zeigt die Netzkopplung für Standzeiten > 2 Stunden und die

Verteilungsfunktion des Energiegehalts jeweils für die Prognose, grau dargestellt, und für die Anwendung am Folgetag, schwarz dargestellt. Der vorgegebene untere Wert des Energiegehalts von 0,1 wird zu keiner Zeit, weder in der Prognose noch in der Anwendung am Folgetag, unterschritten.

Die begrenzende Größe der PV-Integration ist die Netzkopplung In Tabelle 53 ist der PV-Anteil (PVA) in Abhängigkeit der Netzkopplung für unterschiedliche Standzeiten dargestellt. Die obere Grenze liegt bei 85 % PVA für Pkw und bei 89 % PVA für Transporter. Dieser Wert wird für eine Standzeit > 0 Stunden erreicht und bedeutet, dass die Fahrzeuge immer dann mit dem Netz verbunden sind solange sie nicht mobil sind. Dieser Wert kann derzeit nur schwer erreicht werden, weil die benötigte Ladeinfrastruktur nicht ausreichend vorhanden ist. Für Standzeiten größer sechs Stunden sinkt der PVA um rund 45 % bei den kommerziell genutzten Pkw und um rund 33,7 % bei den Transportern.

Durch die Integration von Erzeugungsleistung aus PV verteilt sich das Laden auf die Morgen-, Mittags- und Abendstunden und konzentriert sich nicht auf wenige Morgenstunden, wie beim Laden ausschließlich am Day-Ahead-Markt (vgl. Unterkapitel 4.3.2). Somit ergibt sich, im Vergleich zu den betrachteten Ladestrategien aus Unterkapitel 4.3.2, keine ME für alle Werte der Standzeiten und es stellen sich durchschnittlich geringere Werte für die Gleichzeitigkeit der Ladung  $\gamma$  ein.

Abbildung 101: Energiegehalt und Netzkopplung für die Ladestrategie zur Erhöhung des Grünstromanteils

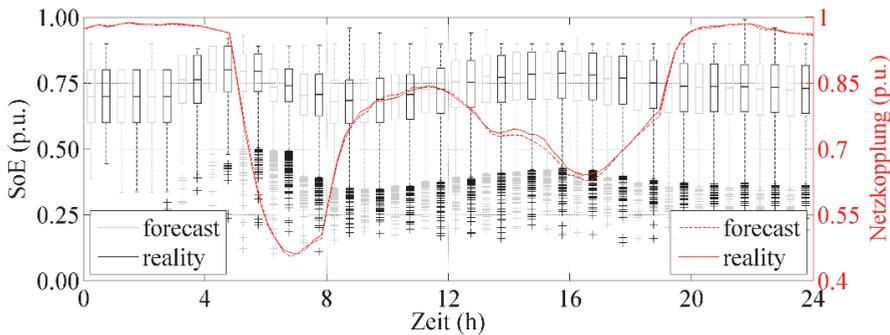


Tabelle 53: Nebenbedingungen der EV-Flottenoptimierung für die jeweils untersuchten kommerziellen EV-Flotten

	Netzkopplung für Standzeiten > x Stunden							
	0		2		4		6	
	PVA	$\gamma$	PVA	$\gamma$	PVA	$\gamma$	PVA	$\gamma$
Pkw	85,23	44,12	71,68	50,08	56,68	50,55	39,85	52,49
Transporter	89,62	28,34	79,75	31,77	69,88	33,35	55,92	33,39

### 4.3.5 EV-Durchdringung unterschiedlicher Netztypologien

(F. Gromann, F. Winkelmann)

Im Folgenden werden die technischen Auswirkungen der Integration von Elektrofahrzeugen in Verteilnetze untersucht. Dazu werden Niederspannungsnetze verschiedener Topologien einer Grenzkurvenanalyse unterzogen. Verwendet werden CIGRE-Referenz-netze der Niederspannungsebene aus CIGRE (2014), die sich in Wohn-, Industrie- und Gewerbegebiet untergliedern.

Das Netz ist nicht immer gleichermaßen belastet, da die Grundlast tageszeitlichen Schwankungen unterliegt. Abbildung 102 zeigt die Lastprofile der Grundlast für das Wohn-, Gewerbe- und Industriegebietsnetz von CIGRE. Die maximale Grundlast  $S_{max}$ , die sich aus allen Netzwerknoten ergibt, beträgt im Wohngebiet 404 kVA, im Industriegebiet 100 kVA und im Gewerbegebiet 242 kVA.

Für jeden Tageszeitpunkt kann mit Hilfe der in Kapitel 3.3.5 beschriebenen Grenzkurvenanalyse die maximale Anzahl ladender EV bestimmt werden, die sich in die CIGRE-NS-Netze integrieren lassen. Tabelle 54 zeigt die Ergebnisse bei einer Grundlast von 50 %, die beispielsweise im Gewerbegebiet um 8 Uhr morgens anliegt. Die Ladeleistung eines EV beträgt in diesem Beispiel 7,4 kW. Durch Ladeprofiloptimierung lässt sich die Last der EV-Ladevorgänge in unkritische Zeitintervalle verschieben, sodass sich in die vorhandene Netzinfrastruktur mehr EV integrieren lassen.

Abbildung 102: Lastprofile der Grundlast für verschiedene CIGRE-NS-Netze

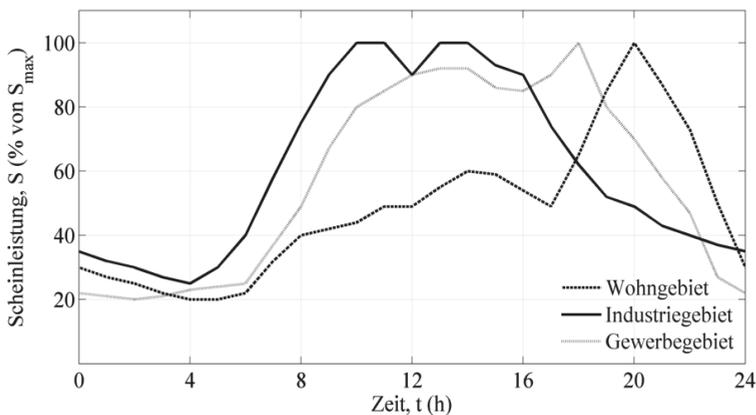


Tabelle 54: Maximale Anzahl an EV in unterschiedlichen Netztopologien

	maximale Anzahl an EV	
	punktueller Verteilung	homogene Verteilung
CIGRE-NS-Wohngebiet	10	13
CIGRE-NS-Industriegebiet	8	8
CIGRE-NS-Gewerbegebiet	12	13

Aus den Ergebnissen der Grenzkurvenanalyse können für die unterschiedlichen Netzgebiete Grenzwerte der relativen Marktdurchdringung  $MD_{rel,max}$  von Elektrofahrzeugen ermittelt werden.

$$MD_{rel,max} = \frac{n_{EV,max}}{n_{Kfz}} \tag{4.3.1}$$

mit der Gesamtanzahl aller Fahrzeuge,  $n_{Kfz}$  die sich im Netzgebiet bewegen, und der netzseitig zulässigen maximalen Anzahl von ladenden Elektrofahrzeugen  $n_{EV,max}$ . Letztere ergibt sich aus dem Ergebnis der Grenzkurvenanalyse und ist von der Ladeleistung der einzelnen Elektrofahrzeuge  $P_{Laden}$  sowie von der Tageszeit abhängig. Darüber hinaus ist die Marktdurchdringung umgekehrt proportional vom Gleichzeitigkeitsfaktor  $\gamma$  abhängig. Der Gleichzeitigkeitsfaktor berücksichtigt, dass nicht immer alle Elektrofahrzeuge gleichzeitig laden. Bei  $\gamma < 1$  können in das Netz folglich mehr als  $n_{EV,max}$  EV integriert werden.

$$MD_{rel,max}(P_{Laden}, \gamma) = \frac{n_{EV,max}(P_{Laden})}{n_{Kfz}} \cdot \frac{1}{\gamma} \tag{4.3.2}$$

Der Wert für  $n_{Kfz}$  wurde auf Grundlage der Beschaffenheit der Referenznetze berechnet. Die Anzahl der Pkw in einem Wohngebietsnetz kann über die Anzahl der in diesem Netzgebiet lebenden Personen bestimmt werden. Die Pkw-Dichte beträgt 532 Kfz auf 1.000 Personen (Statista, 2015).

Die Anzahl der Personen kann über die im Netz anliegende Spitzenwirkleistung  $P_{max}$  bestimmt werden. Diese ist abhängig vom Haushaltstyp, in dem eine oder mehrere Personen leben. Aufgrund gemeinsamer Gerätenutzung und der Tatsache, dass nie alle Geräte zur gleichen Zeit in Betrieb sind, besteht zwischen der Anzahl der im Haushalt lebenden Personen und der Spitzenwirkleistung ein nichtlinearer Zusammenhang. Es werden daher Haushaltstypen anhand der im Haushalt lebenden Personen definiert. In Tabelle 55 sind die Anteile der Haushaltstypen in Deutschland und die Spitzenwirkleistung dargestellt.

Tabelle 55: Verteilung der Haushaltstypen mit anliegender Spitzenlast

Haushaltstyp	Personen			
	1	2	3	4 oder mehr
Anteil a (%)	53,9	28,4	9,5	8,2
Spitzenwirkleistung $P_{max}$ (kW)	2,4	2,6	4,5	6,5

Quelle: Schwartze, 2014

Die Grundlastverteilung der Scheinleistung auf die einzelnen Netzwerknuten kann Tabelle 56 entnommen werden. Für jeden Netzwerknuten ist der Leistungsfaktor bekannt. Daraus kann die Spitzenwirkleistung  $P_{max}$  bestimmt werden, die insgesamt im Netz anliegt.

Tabelle 56: Grundlastverteilung auf einzelne Netzwerkknoten im CIGRE-NS-Wohngebietsnetz

<b>Knotennummer</b>	<b>1</b>	<b>11</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>Summe</b>
$S_{\max}$ (kVA)	200	15	52	55	35	47	<b>404</b>
Leistungsfaktor	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	
$P_{\max}$ (kW) (kW)	190	14,25	49,4	52,25	33,25	44,65	<b>383,8</b>

Quelle: CIGRE, 2015

Diese gesamte Spitzenwirkleistung  $P_{\max,ges}$  kann als Summe aller Spitzenwirkleistungen  $P_{\max,j}$  der Haushaltstypen dargestellt werden, mit dem Anteil  $a_j$  eines jeden Haushaltstyps. Daraus kann die Anzahl der Haushalte bestimmt werden. Es ergibt sich eine Anzahl von  $n_{HH} = 128$  Haushalten.

$$P_{\max,ges} = n_{HH} \cdot \sum_j (a_j \cdot P_{\max,j}) \quad (4.3.3)$$

Die Anzahl der im Netzgebiet lebenden Personen setzt sich aus den in den jeweiligen Haushaltstypen lebenden Personen zusammen.

$$n_{Pers} = n_{HH} \cdot \sum_j (a_j \cdot n_{Pers,j}) \quad (4.3.4)$$

mit der Anzahl der in jedem Haushalt lebenden Personen  $n_{Pers,j}$ . Für Haushalte mit vier oder mehr Personen werden  $n_{Pers,4} = 5$  angenommen. Es ergeben sich  $n_{Pers} = 231$  Personen im Wohngebietsnetz und damit eine Anzahl von 123 Kfz.

Für das Gewerbegebietsnetz ergibt sich die Anzahl der Fahrzeuge im Netzgebiet aus der Anzahl an Unternehmen, die in diesem Netzgebiet ansässig sind. Unternehmen lassen sich dabei nach der Mitarbeiteranzahl in die in Tabelle 57 aufgetragenen Typen einteilen.

Tabelle 57: Anteile Unternehmenstypen und ihre Anzahl an Kfz

<b>Unternehmenstyp</b>	<b>(a)</b>	<b>(b)</b>	<b>(c)</b>	<b>(d)</b>
Anzahl Mitarbeiter	< 10	10 - 100	100 – 1000	>1000
Anteil $a$ (%)	33	20	27	20
Anzahl Kfz	1	10,81	54,76	204,79
Spitzenwirkleistung $P_{\max}$ (kW)	1,07	11,76	117,61	213,83

Die Anteile sowie die Anzahl der Kfz sind aus der Studie von Arval (2014) abgeleitet. Die Anzahl an Kraftfahrzeugen errechnet sich nach

$$n_{\text{Kfz}} = n_U \cdot \sum_j (a_j \cdot n_{\text{Kfz},j}) \tag{4.3.5}$$

mit dem Anteil des Unternehmenstyps an alle Unternehmen  $a_j$ , der Anzahl an Kraftfahrzeugen des jeweiligen Unternehmenstyps  $n_{\text{Kfz},j}$  der Anzahl an Unternehmen im Netzgebiet  $n_U$ . Letztere kann mit Hilfe der anliegenden Spitzenwirkleistung  $P_{\text{ges}}$  über

$$P_{\text{ges}} = n_U \cdot \sum_j (a_j \cdot P_{\text{max},j}) \tag{4.3.6}$$

bestimmt werden.

Tabelle 58: Anliegende Lasten im CIGRE-NS-Gewerbegebietsnetz

<b>Knotennummer</b>	<b>1</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>Summe</b>
$S_{\text{max}}$ (kVA)	120	20	20	25	25	8	16	8	<b>242</b>
Leistungsfaktor	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	
$P_{\text{max}}$ (kW)	108	18	18	22,5	22,5	7,2	14,4	7,2	<b>217,8</b>

Quelle: CIGRE, 2015

Die Berechnung der Spitzenwirkleistung für jeden Unternehmenstyp erfolgt über den jährlichen Energieverbrauch, der unter Berücksichtigung des Gleichzeitigkeitsfaktors auf einen Leistungswert in Kilowatt zurückgerechnet werden kann. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gibt Auskunft über den jährlichen Energieverbrauch je beschäftigten Mitarbeiter verschiedener Branchen (BMW, 2013). Der zur Berechnung verwendete Gleichzeitigkeitsfaktor ist der Mittelwert des Tageslastprofils in CIGRE (2014) und beträgt 0,58. Für die Branchenenergieverbräuche je Mitarbeiter wurde über alle Branchen ein gewichteter Mittelwert gebildet. Die Gewichte ergeben sich aus dem Anteil des Vorkommens der Branchen im REM2030-Datensatz von Fraunhofer (2015). Es wurde so ein durchschnittlicher jährlicher Energieverbrauch von 3229 kWh je Mitarbeiter ermittelt. Über die Anzahl der Mitarbeiter konnte für jeden Unternehmenstypen die maximal anliegende Wirkleistung bestimmt werden, die in Tabelle 58 abgetragen sind. Damit lässt sich Formel 4.3.6 anwenden. Es ergeben sich  $n_U = 2,84$  Unternehmen und unter Verwendung von Formel 4.3.5  $n_{\text{Kfz}} = 165$  Fahrzeuge im Gewerbegebietsnetz.

Das Industriegebietsnetz besteht aus nur einem Knoten mit 100 MVA bzw. 85 MW Leistung, an dem sich ein Unternehmen befindet. Es wird weiterhin genauso vorgegangen wie für das Gewerbegebiet. Die Verteilung der Unternehmenstypen wurde ebenfalls der Arval-Studie entnommen. Es ergeben sich 13 Fahrzeuge im Industriegebietsnetz.

In Abbildung 103 bis Abbildung 106 sind ausgewählte Grenzkurven für das Gewerbegebietsnetz dargestellt. Der Grenzwert der EV-Durchdringung ergibt sich aus der Anwendung von Formel 4.3.2 und ist abhängig von der Ladeleistung und dem Gleichzeitigkeitsfaktor. Der Wert für die netzseitig zulässige maximale Anzahl von Elektrofahrzeugen  $n_{\text{EV,max}}$  ist das Ergebnis der Grenzkurvenberechnung auf Grundlage verschiedener

Ladeleistungen. Diese sind der Referenz Rönisch (2012) entnommen und decken ein- und dreiphasiges Laden ab. Nach TAB (2007) sind Einzelgeräte mit einer Nennleistung von mehr als 12 kW beim Verteilnetzbetreiber anmeldepflichtig. Aus diesem Grund wurden höhere Ladeleistungen in der Ladeprofiloptimierung nicht betrachtet, zumal es in diesem Fall dem Netzbetreiber obliegt die Integrationsmöglichkeit von EV zu überprüfen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen. Die Bereiche zwischen den verwendeten Ladeleistungen, die in den Abbildungen an der Achse abgetragen sind, wurden interpoliert. In Kombination mit einem Gleichzeitigkeitsfaktor zwischen 0 und 100 % ergibt sich für das untersuchte Netz der Grenzwert der EV-Durchdringung, welcher als graue Fläche dargestellt ist. Außerdem werden für die integrierten EV die beiden Betriebsarten Laden und Rückspeisen betrachtet. Für jeweils beide Betriebsarten werden dabei eigene Grenzkurven erstellt.

In den ausgewählten Grenzkurven der EV-Durchdringung für Gewerbegebiete wird der Einfluss des Grundlastprofils, der Verteilungs- sowie der Betriebsart deutlich. Die ersten beiden Abbildungen zeigen, dass die Tageszeit und die damit in Verbindung stehende Gleichzeitigkeit der Grundlast einen großen Einfluss auf die Integrierbarkeit von EV haben. Es sind 80 % und 50 % Grundlast gegenübergestellt, die im Gewerbegebiet um 10 Uhr beziehungsweise 8 Uhr eintreten. Der Vergleich der Abbildung 104 und Abbildung 105 zeigt, dass die Betriebsart keine große Rolle spielt. Beim Rückspeisen können nur geringfügig mehr EV integriert werden. In Abbildung 106 ist darüber hinaus der Einfluss der Verteilungsart erfasst. Beim Rückspeisen können bei homogener Verteilung wesentlich mehr Fahrzeuge integriert werden als bei punktueller. Für das Laden ist der Einfluss der Verteilung geringer, allerdings erweist sich die punktuelle Verteilung stets als kritischer für das Netz.

In den Ergebnissen sind als Anhaltspunkt auch die erwarteten EV-Durchdringungen für die Jahre 2020 und 2030 abgetragen. Diese beruhen auf im Rahmen des komDRIVE-Projektes hochgerechneten Bestandsdaten an Kraftfahrzeugen in Deutschland (KBA, 2014).

Grund für die Netzüberlastung durch die Integration der EV ist in dieser Analyse die thermische Überlastung der Betriebsmittel. Diese tritt immer bereits vor einer Verletzung des Spannungsbandes ein. Auch die Anhebung der Knotenspannung aufgrund der EV-Einspeisung ist nie groß genug, um das Spannungsband zu verletzen. Da die Einspeiseleistung vieler EV betragsmäßig größer ist als die Grundlast durch die Haushalte, transportieren die Leitungen diese zusätzliche Leistung, was zu einer thermischen Überlastung führt.

Da es möglich ist, dass kommerziell genutzte Fahrzeuge in Wohngebieten laden, wurden auch Wohngebiete analysiert. Dies ist beispielsweise bei privat genutzten Firmenwagen oder bei betrieblichen Fahrzeugen, die nachts nicht auf dem Firmengelände, sondern bei der Wohnung eines Mitarbeiters geladen werden, der Fall. Im Vergleich ist das Wohngebietsnetz hinsichtlich der Integration von EV robuster als das Gewerbegebietsnetz. Eine Auswahl der Ergebnisse für das Wohngebietsnetz ist in den Abbildung 107 bis Abbildung 110, im Anschluss an diese Ausführungen, dargestellt.

Abbildung 103: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Gewerbegebiet bei 80 % Grundlast, Laden von EV bei punktueller Verteilung

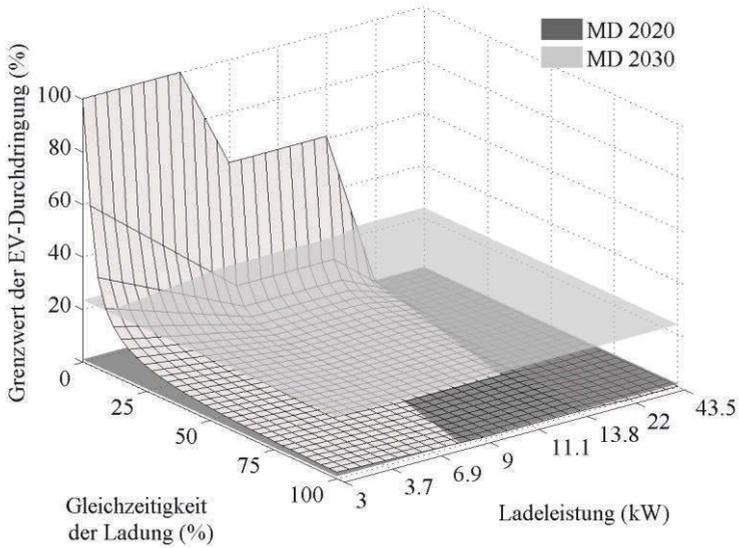


Abbildung 104: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Gewerbegebiet bei 50 % Grundlast, Laden von EV bei punktueller Verteilung

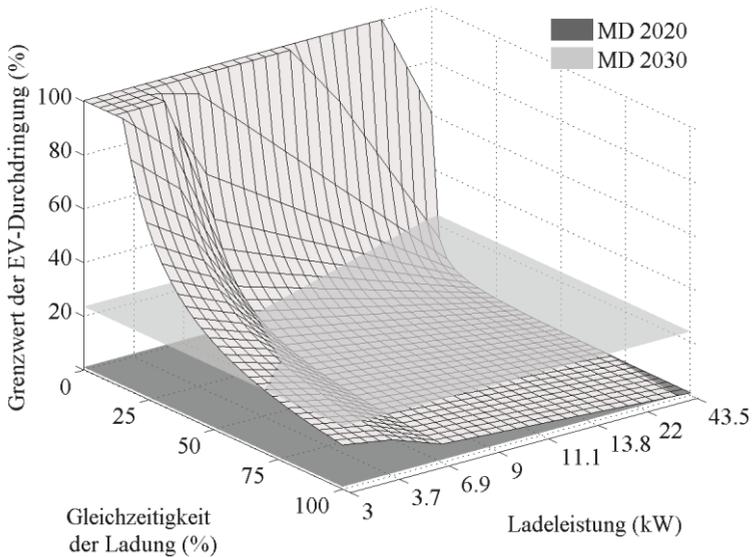


Abbildung 105: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Gewerbegebiet bei 50 % Grundlast, Rückspeisen der EV bei punktueller Verteilung

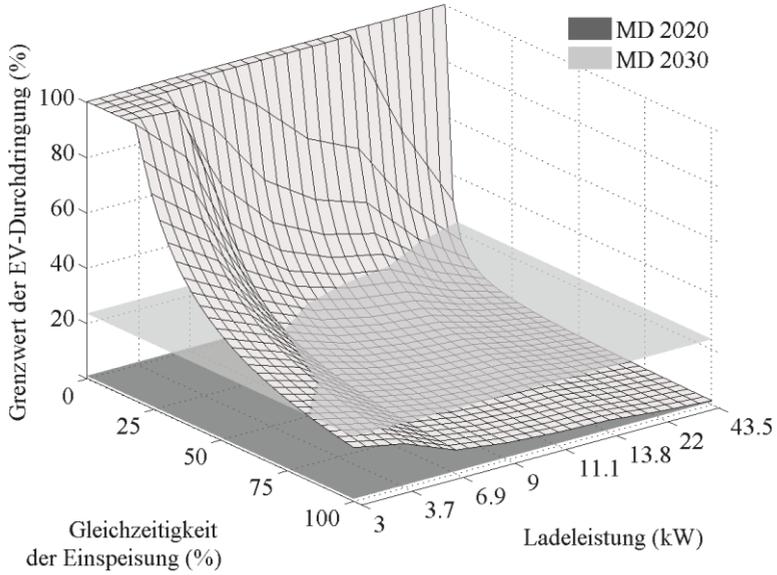
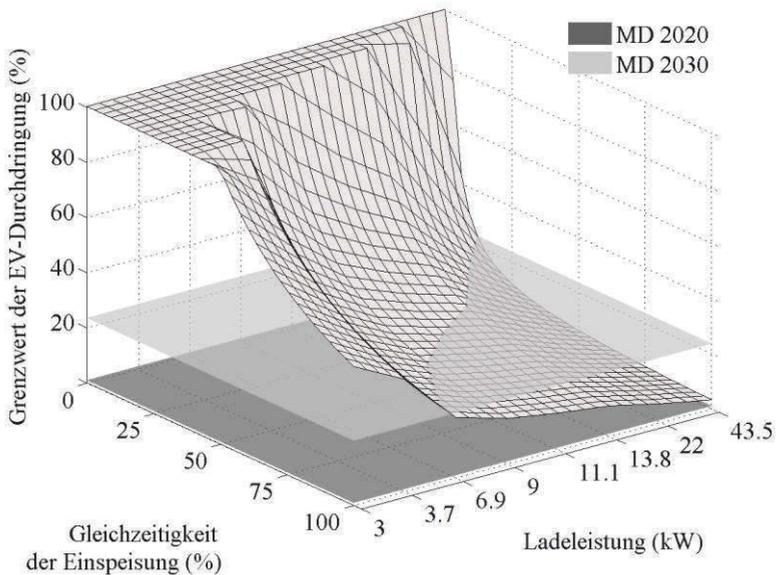


Abbildung 106: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Gewerbegebiet bei 50 % Grundlast, Rückspeisen der EV bei homogener Verteilung



Mithilfe der Grenzkurven kann für jede der Ladestrategien aus Kapitel 4.3.2 der Grenzwert der EV-Durchdringung bestimmt werden, siehe Tabelle 59 und Tabelle 60. Diese ist anhand der für die Ladestrategien charakteristischen Ladeleistungen und Gleichzeitigkeitsfaktoren für ein jeweiliges Netzgebiet bestimmbar. Anschaulich werden Punkte auf der grauen Fläche der Grenzkurven angesteuert. Es ist dabei für jeden Zeitpunkt des Tages eine eigene Grenzkurve zu betrachten, da die Gleichzeitigkeit der Grundlast, wie das Lastprofil in Abbildung 102 zeigt, erheblich schwankt und sich in einem Netzgebiet daher auch unterschiedlich viele EV integrieren lassen. Auch die Gleichzeitigkeitsfaktoren des Ladens und des Rückspeisens sind zeitlich unterschiedlich gelagert. Aus der Simulation der Ladestrategien ergibt sich über eine durchschnittliche Woche jeweils die maximale Gleichzeitigkeit für jede Stunde. Um den kritischsten Betriebsfall zu erfassen, sind die niedrigsten EV-Durchdringungen angegeben, die sich aus dem zeitlichen Zusammenspiel des Lastprofils der Grundlast und den Gleichzeitigkeitsfaktoren des Ladens beziehungsweise des Rückspeisens in einer durchschnittlichen Woche ergeben.

Da die Grenzkurvenanalyse gezeigt hat, dass eine punktuelle Verteilung der Elektrofahrzeuge kritischer ist als eine homogene, wurden die Grenzwerte der EV-Durchdringung auf Grundlage dieser Verteilung ermittelt. Die verwendete Ladeleistung beträgt bei Pkw 8 kW, dem gewichteten Mittel aus den drei Fahrzeugtypen, und bei Transportern 11,4 kW.

Die Analyse hat ergeben, dass die CIGRE-NS-Netze bei Anliegen der Spitzengrundlast auch ohne integrierte EV bereits eine thermische Belastung des Transformators von über 70 % des zulässigen Wertes für eine Langzeitbelastung aufweisen. Im Wohn- und Gewerbegebietsnetz ist der Transformator jeweils mit über 82 % belastet. Für den Fall des Rückspeisens wird die anliegende Grundlast durch die rückgespeiste Leistung der EV lokal kompensiert, sodass der Trafo sowie die ONS-nahen Leitungen entlastet werden, wenn rückspeisende EV integriert sind. Für Ladestrategien, die in Zeiträumen mit Spitzengrundlast ein Rückspeisen vorsehen, ist daher die Integration auch dann fortgesetzt worden, wenn der Transformator überlastet ist. Bei Erreichen der Grenzzahl an EV tritt eine Netzüberlastung in diesem Fall an der Leitung auf, die von demjenigen Netzknoten abgeht, an dem die EV bei der verwendeten punktuellen Verteilung integriert werden. Die rückgespeiste Leistung übersteigt die Grundlast an diesem Netzknoten, sodass sich die Richtung des Leistungsflusses umkehrt.

Die Vermeidung des Ladens in Zeiten hoher Spitzengrundlast kann innerhalb der Ladeoptimierung berücksichtigt werden. Dies ist jedoch nicht bei allen Ladestrategien möglich, da einige Ladestrategien, wie beispielsweise die Ladestrategie 136 für Pkw, ein Angebot an Regelleistung zu Zeiten in, denen Spitzengrundlast anliegt, fest vorsehen. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, jede Ladestrategie in der vorhandenen Netzinfrastruktur umzusetzen.

Um eine Ladestrategie hinsichtlich ihrer Netzauswirkung bewerten zu können, ist das Minimum der EV-Durchdringungen entscheidend (vgl. Tabelle 61). Bei Pkw ermöglichen die Ladestrategien eine EV-Durchdringung von mehr als 6 %, bei Transportern sind es mehr als 15 %. Bei unkontrolliertem Laden können unter Einhaltung der zulässigen Werte für eine Langzeitbelastung keine EV integriert werden, weil auch zu Zeiten geladen werden würde, in denen im Netz bereits die Spitzengrundlast anliegt.

Tabelle 59: Grenzwert der EV-Durchdringung in CIGRE-Niederspannungsnetzen für verschiedene Ladestrategien von Pkw

Lade-strategie	Netz	Laden		Rückspeisen	
		MD (%)	n	MD (%)	n
1	W	8,2	10,1	100,0	282,1
	I	71,7	9,3	100,0	384,6
	G	6,3	10,4	100,0	275,6
2	W	8,1	9,9	100,0	155,8
	I	70,2	9,1	100,0	224,0
	G	6,2	10,2	89,9	152,6
3	W	8,7	10,7	100,0	– <sup>1</sup>
	I	76,0	9,9	100,0	– <sup>1</sup>
	G	6,7	11,0	100,0	– <sup>1</sup>
81	W	8,1	10,0	49,5	60,9
	I	70,6	9,2	100,0	87,6
	G	6,2	10,2	36,1	59,6
87	W	8,1	10,0	47,8	58,8
	I	70,7	9,2	100,0	76,3
	G	6,2	10,2	32,6	53,8
115	W	7,9	9,8	100,0	– <sup>1</sup>
	I	69,2	9,0	100,0	– <sup>1</sup>
	G	6,1	10,0	100,0	– <sup>1</sup>
136	W	0,0	0,0	100,0	– <sup>1</sup>
	I	0,0	0,0	100,0	– <sup>1</sup>
	G	0,0	0,0	100,0	– <sup>1</sup>
141	W	0,0	0,0	100,0	– <sup>1</sup>
	I	70,2	9,1	100,0	– <sup>1</sup>
	G	6,2	10,2	100,0	– <sup>1</sup>

MD: maximale Marktdurchdringung EV  
n: maximale Anzahl EV im Netzgebiet  
W: CIGRE-NS-Wohngebietsnetz  
I: CIGRE-NS-Industriegebietsnetz  
G: CIGRE-NS-Gewerbegebietsnetz

<sup>1</sup> Rückspeisen findet in einigen Ladestrategien nicht statt.

Tabelle 60: Grenzwert der EV-Durchdringung in CIGRE-Niederspannungsnetzen für verschiedene Ladestrategien von Transportern

Lade- strategie	Netz	Laden		Rückspeisen	
		MD (%)	n	MD (%)	N
1	W	20,2	24,8	100,0	316,0
	I	100,0	24,8	100,0	453,8
	G	15,3	25,2	100,0	303,8
2	W	19,7	24,2	100,0	169,2
	I	100,0	24,2	100,0	244,2
	G	14,9	24,6	98,2	169,2
3	W	20,4	25,1	100,0	– <sup>1</sup>
	I	100,0	25,1	100,0	– <sup>1</sup>
	G	15,4	25,5	100,0	– <sup>1</sup>
72	W	19,7	24,2	100,0	– <sup>1</sup>
	I	100,0	24,2	100,0	– <sup>1</sup>
	G	14,9	24,6	100,0	– <sup>1</sup>
84	W	20,0	24,5	46,5	57,1
	I	100,0	24,5	100,0	82,5
	G	15,1	24,9	34,6	57,1
91	W	20,0	24,6	100,0	187,2
	I	100,0	24,6	100,0	248,9
	G	15,2	25,0	97,7	166,0
139	W	0,0	0,0	100,0	– <sup>1</sup>
	I	100,0	24,9	100,0	– <sup>1</sup>
	G	8,9	14,7	100,0	– <sup>1</sup>
141	W	0,0	0,0	100,0	– <sup>1</sup>
	I	43,2	5,6	100,0	– <sup>1</sup>
	G	0,0	0,0	100,0	– <sup>1</sup>

MD: maximale Marktdurchdringung EV  
n: maximale Anzahl EV im Netzgebiet  
W: CIGRE-NS-Wohngebietsnetz  
I: CIGRE-NS-Industriegebietsnetz  
G: CIGRE-NS-Gewerbegebietsnetz

<sup>1</sup> Rückspeisen findet in einigen Ladestrategien nicht statt.

Tabelle 61: Grenzwert der EV-Durchdringung in CIGRE-Niederspannungsnetzen für verschiedene Ladestrategien von Transportern

Lade- strategie	Netz	Laden		Rückspeisen	
		MD (%)	n	MD (%)	N
1	W	20,2	24,8	100,0	316,0
	I	100,0	24,8	100,0	453,8
	G	<b>15,3</b>	25,2	100,0	303,8
2	W	19,7	24,2	100,0	169,2
	I	100,0	24,2	100,0	244,2
	G	<b>14,9</b>	24,6	98,2	169,2
3	W	20,4	25,1	100,0	– <sup>1</sup>
	I	100,0	25,1	100,0	– <sup>1</sup>
	G	<b>15,4</b>	25,5	100,0	– <sup>1</sup>
72	W	19,7	24,2	100,0	– <sup>1</sup>
	I	100,0	24,2	100,0	– <sup>1</sup>
	G	<b>14,9</b>	24,6	100,0	– <sup>1</sup>
84	W	20,0	24,5	46,5	57,1
	I	100,0	24,5	100,0	82,5
	G	<b>15,1</b>	24,9	34,6	57,1
91	W	20,0	24,6	100,0	187,2
	I	100,0	24,6	100,0	248,9
	G	<b>15,2</b>	25,0	97,7	166,0
139	W	<b>0,0</b>	0,0	100,0	– <sup>1</sup>
	I	100,0	24,9	100,0	– <sup>1</sup>
	G	8,9	14,7	100,0	– <sup>1</sup>
141	W	<b>0,0</b>	0,0	100,0	– <sup>1</sup>
	I	43,2	5,6	100,0	– <sup>1</sup>
	G	<b>0,0</b>	0,0	100,0	– <sup>1</sup>

MD: maximale Marktdurchdringung EV

n: maximale Anzahl EV im Netzgebiet

W: CIGRE-NS-Wohngebietsnetz

I: CIGRE-NS-Industriegebietsnetz

G: CIGRE-NS-Gewerbegebietsnetz

<sup>1</sup> Rückspeisen findet in einigen Ladestrategien nicht statt.

### 4.3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

(F. Gromann, F. Becht, F. Winkelmann und K. Strunz)

Unter der Annahme, dass 20 % der Batteriekapazität der Flotte für Systemdienstleitungen (SDL) vorgesehen werden und die Teilnahme für SDL eine Zeitscheibe und eine Realisierungsart umfasst, ergibt sich eine Mindestanzahl an EV um an der SDL teilzunehmen. Bei der Pkw-Flotte sind es mindestens ca. 3.300 EV für die Sekundärreserve. Da am Sekundärregel- und Minutenreservemarkt die gleiche Menge an Regelleistung angeboten wurde, muss aufgrund der kürzeren Zeitscheiben bei der Minutenreserve weniger Kapazität als bei der Sekundärreserve zurückgehalten, jedoch die gleiche Ladeleistung zur Verfügung gestellt werden. Die Pkw-Flotte für die Minutenreserve sind nur ca. 600 EV notwendig. Durch die kleinere Batteriekapazität in der 3,5-t-Flotte sind ca. 3.500 EV für die Sekundärreserve ausreichend. Aufgrund der höheren Ladeleistung der Transporter, verringert sich jedoch die Größe der Flotte bei der Minutenreserve im Vergleich zur Pkw-Flotte auf ca. 600 EV.

Die Erlöspotentiale sind sowohl für kommerzielle Pkw als auch für Transporter bis 3,5 t bei der Bereitstellung positiver Regelleistung mit Rückspeisen am höchsten. Aufgrund der Preise am Markt für Sekundärreserve ist ein Gebot positiver Sekundärreserve mit Rückspeisen ins Netz besonders attraktiv. Im Vergleich zum Energiepreis von Handel & Gewerbe können maximale Mehreinnahmen in Höhe von 5,81 Cent/kWh erzielt werden.

Die hohen Strombezugskosten am Day-Ahead-Markt während des Tages führen zu hohen Kosten bei Geboten positiver Regelleistung mit Anpassen der Ladeleistung in den Zeitscheiben zwischen 4 und 24 Uhr. Bei Geboten positiver Regelleistung mit Rückspeisen und negativer Regelleistung handelt es sich oftmals nur um marginale Änderungen des Preises. Demzufolge können in der Realität geringe Abweichungen vom Fahrplan, wie zum Beispiel schwankende Preise an der Strombörse, bereits zu einer Verschiebung des Rankings führen.

Der Mobilitätsverlust korreliert weder bei den Pkw noch bei Transportern bis 3,5 t mit den Energiepreisen. Von wenigen Ausnahmen abgesehen beträgt der Mobilitätsverlust bei Transportern bis 3,5 t weniger als ein Prozent und bei Pkw weniger als zwei Prozent. Der bei Transportern niedrigere Mobilitätsverlust ist besonders auf die geringere Tagesfahrleistung zurückzuführen.

Die Preise am Day-Ahead-Markt nehmen zwischen 4 Uhr nachts und 6 Uhr morgens ihr Minimum an. Dies führt in Kombination mit der großen Anzahl ans Netz angeschlossener EV zu einer hohen Ladeleistung und demzufolge zu einer hohen Gleichzeitigkeit von über 90 %. Die hohen Preise tagsüber führen im Gegensatz dazu zu einer niedrigen Gleichzeitigkeit von unter 10 %.

Das Ziel der Bundesregierung bis zu 6 Millionen EV im Jahr 2030 deutschlandweit zu integrieren, ist mit Hilfe der Ladeprofiloptimierung in Verteilnetzen, die eine durchschnittliche Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen aufweisen, ohne Netzbau durchführbar. Allerdings ist nicht davon auszugehen, dass sich die Marktdurchdringung räumlich gleichverteilt entwickelt. Gebiete mit einer hohen Zahl an Early Adopters könnten eine deutlich überdurchschnittliche Entwicklung der Marktdurchdringung verzeichnen,

sodass in solchen Gebieten trotz einer geringen gesamtdeutschen Marktdurchdringung ein Ausbau des Verteilnetzes notwendig wird.

Abbildung 107: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Wohngebiet bei 80 % Grundlast, Laden von EV bei punktueller Verteilung

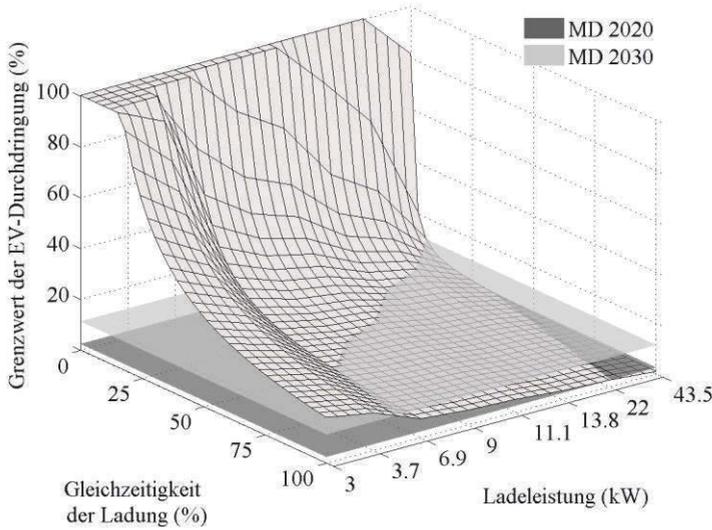


Abbildung 108: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Wohngebiet bei 50 % Grundlast, Laden von EV bei punktueller Verteilung

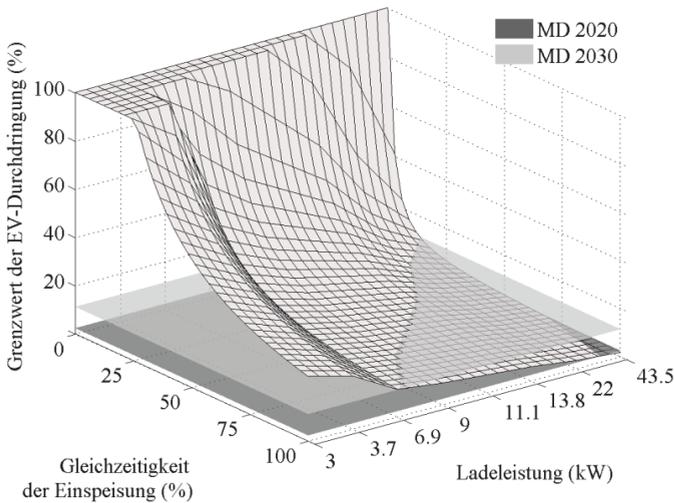


Abbildung 109: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Wohngebiet bei 50 % Grundlast, Rückspeisen durch EV bei punktueller Verteilung

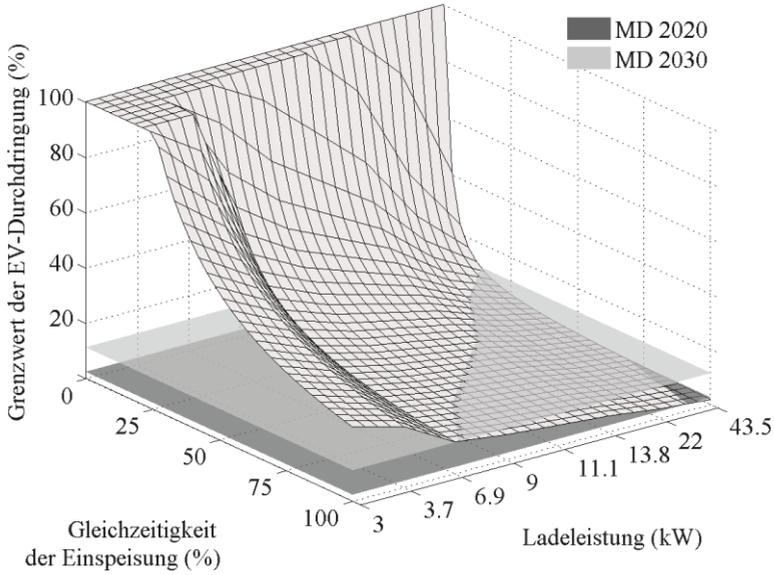
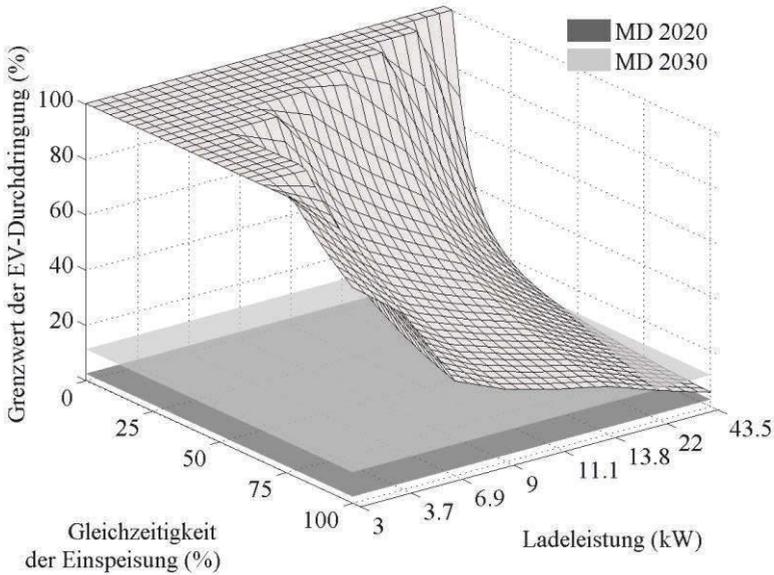


Abbildung 110: Grenzwert der EV-Durchdringung für das CIGRE-NS-Wohngebiet bei 50 % Grundlast, Rückspeisen durch EV bei homogener Verteilung



## 4.4 Lokale Emissionsbelastung – Ergebnisse

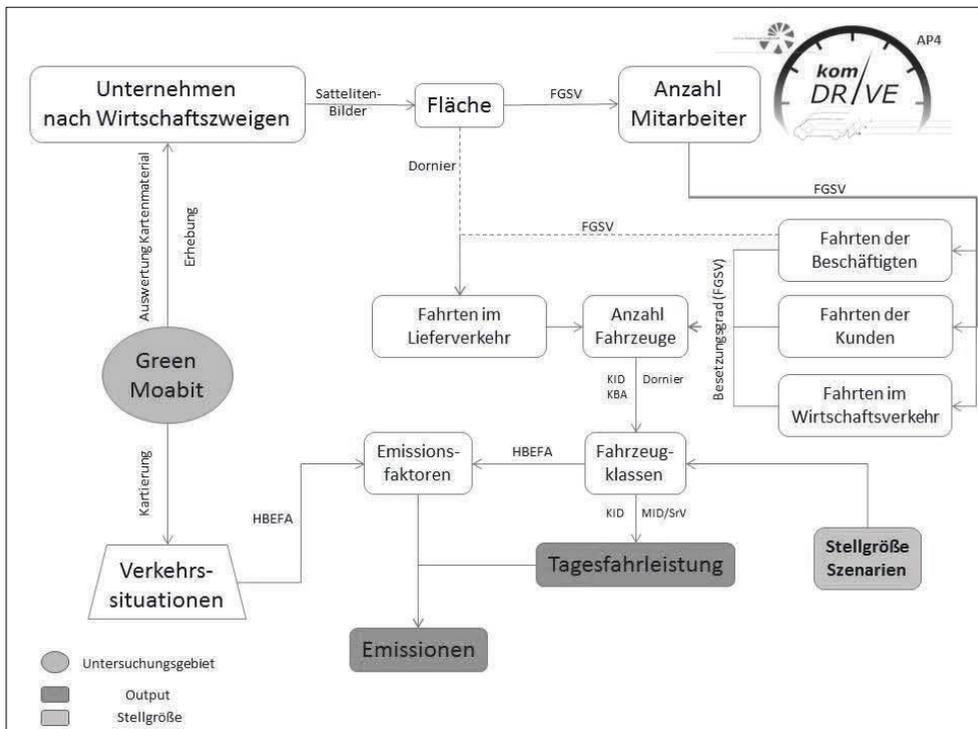
(N. Döge, G. Jamerson, R. Kämpfer, L. Lu, W.-H. Arndt)

In Kapitel 2 wurde beschrieben, dass es eines der Ziele des komDRIVE Projektes ist, die durch eine zunehmende Elektrifizierung des Wirtschaftsverkehrs eintretende Veränderung der lokalen Emissionen zu quantifizieren. Hierzu wurde das eingangs beschriebene TEECT um einen Berechnungsalgorithmus für den Wirtschaftsverkehr erweitert. Diese Weiterentwicklung geschah auf Basis der für das ebenfalls eingangs beschriebene Berliner Quartier Green Moabit erhobenen Daten.

### 4.4.1 Berechnungsschema und Weiterentwicklung des TEECT

Der gesamte Ansatz zur Weiterentwicklung des Berechnungsschemas für die Quantifizierung der lokalen Emissionen im WIV ist zusammen mit relevanten Quellen in Abbildung 111 dargestellt.

Abbildung 111: Berechnungsschema des TEECT



Wie in Abbildung 111 zu sehen, wird versucht den Berechnungsalgorithmus in der Form so anzulegen, dass nur ein Minimum an gebietsspezifischen Informationen nötig ist und diese wenigen Daten mit geringstmöglichem Aufwand erhoben werden können oder bereits verfügbar sind. Dieser Ansatz soll eine mögliche spätere Übertragung auf einen anderen

Untersuchungsraum vereinfachen. Aus diesen Minimalinformationen können mittels Sekundärquellen alle weiteren Berechnungsgrößen abgeleitet werden. Trotzdem ist es, im Sinne einer Steigerung der Berechnungsqualität, während der Primäreingabe möglich, erhobene anstatt der errechneten Daten einzufügen. Um diese Eingabemöglichkeit offen zu halten, werden die unternehmensspezifischen Emissionen aus Gründen der Anonymisierung erst am Ende der Berechnungsprozedur in aggregierter Form ausgegeben.

Zu den gebietsspezifischen Minimalinformationen gehören:

- eine Aufstellung der im Gebiet ansässigen Unternehmen nach Wirtschaftszweigen,
- Informationen über Produktionsfläche, Größe der genutzten Räumlichkeiten, Geschosse (Satellitenbilder, Erhebung, Statistikportale),
- Kartierung der Verkehrsinfrastruktur (Straßenkategorien und zulässige Höchstgeschwindigkeiten) des Gebietes zur späteren Ableitung der Verkehrssituationen.

Die Anzahl der Mitarbeiter ist eine für die Ableitung des Verkehrsaufkommens ebenfalls wichtige Eingabegröße. Wenn sie nicht verfügbar ist, kann sie auch der Publikation „Hinweise zur Schätzung des Verkehrsaufkommens von Gebietstypen“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Beschäftigte pro 100 m<sup>2</sup> Grundfläche) entnommen werden (FGSV-Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, 2006). Zur Berechnung der Gesamtemissionen für den Wirtschaftsverkehr werden alle Fahrten in vier Gruppen entsprechend ihrer unterschiedlichen Zwecke unterteilt. Diese sind:

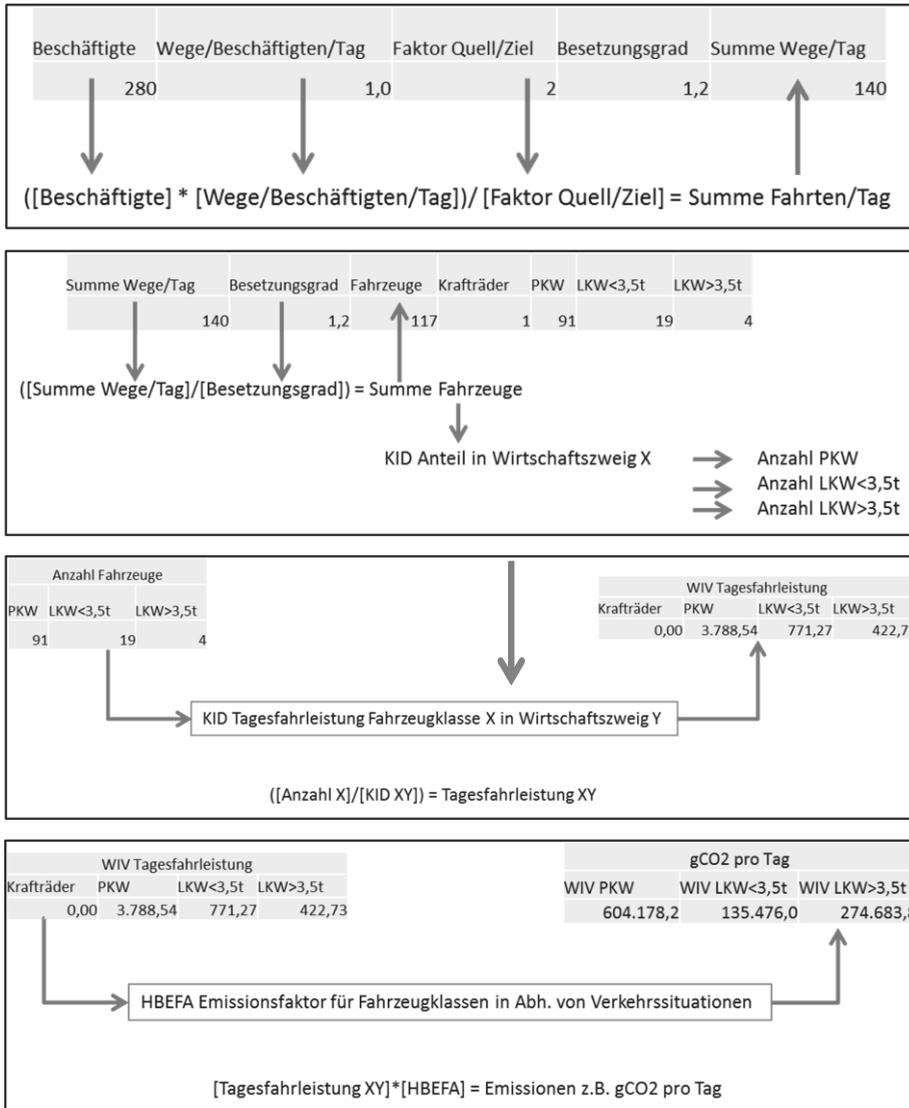
- Beschäftigtenverkehr,
- Kunden-/Besucherverkehr,
- Wirtschaftsverkehr,
- Lieferverkehr.

Die Definition jeder Gruppe ist Kapitel 3.4.2 zu entnehmen.

Hierbei sei noch einmal darauf verwiesen, dass der Lieferverkehr per Definition Bestandteil des Wirtschaftsverkehrs ist, dieser aufgrund des abweichenden Berechnungsansatzes im Modell hier aber separat ausgewiesen wird.

Die Fahrten pro Tag im Wirtschaftsverkehr werden aus „Hinweise zur Schätzung des Verkehrsaufkommens von Gebietstypen“ der FGSV entnommen. Die Anzahl der Fahrzeuge ergibt sich aus der Zahl der Fahrten (Quell- bzw. Zielverkehr) und dem Besetzungsgrad der Fahrzeuge. Die Verteilung der Fahrzeuge auf die Fahrzeugklassen erfolgt in Abhängigkeit des Wirtschaftszweiges auf Grundlage der in Kapitel 3.1.1 aufgeführten Erhebung KiD (2010) – „Mittelwerte der Tagesfahrleistungen im Wirtschaftsverkehr“. Die Berechnung der Tagesfahrleistung erfolgt in Abhängigkeit des Wirtschaftszweiges und der Fahrzeugklassen auf Grundlage der KiD (2010). Aufbauend auf Abbildung 111 zeigt Abbildung 112 einen gesamten Berechnungsdurchlauf am Beispiel des Wirtschaftsverkehrs.

Abbildung 112: Beispiel für Emissionsberechnungen des Wirtschaftsverkehrs

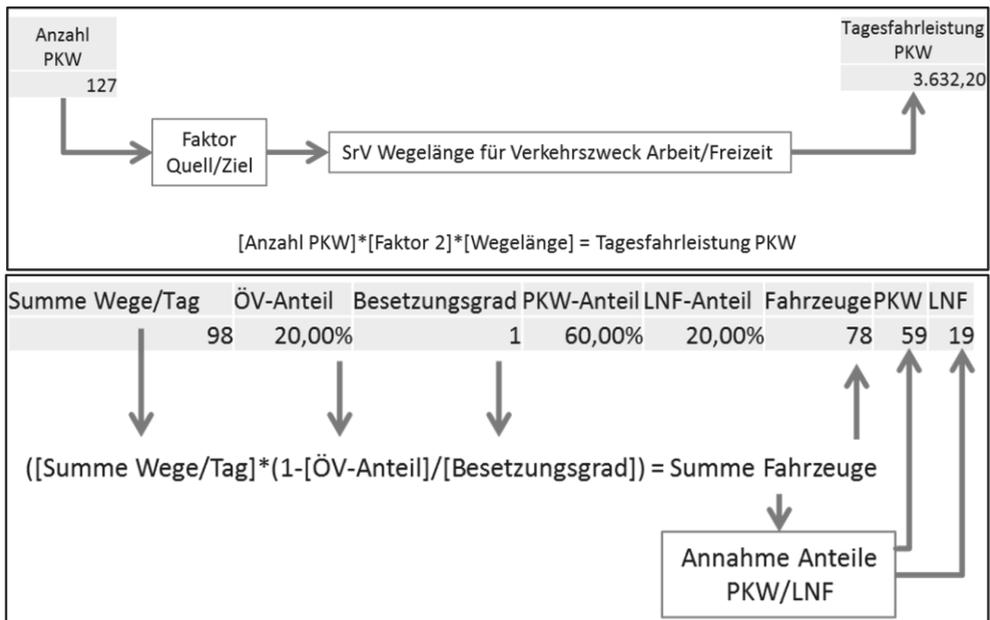


Die Berechnungsprozesse für Kunden-, Besucher- und Beschäftigtenverkehre orientieren sich an dem für den Wirtschaftsverkehr. Die Fahrten pro Tag folgen dem Berechnungsansatz der FGSV. Die Anzahl der Fahrzeuge ergibt sich wiederum aus der Zahl der Fahrten (Quell- bzw. Zielverkehr) und dem Besetzungsgrad der Fahrzeuge. Während im Wirtschaftsverkehr alle Wege auf Fahrzeuge verteilt wurden, müssen im Kunden-, Besucher-, und Beschäftigtenverkehr jeweils Anteile von ÖPNV sowie Rad- und Fußverkehr berücksichtigt werden. Außerdem wird angenommen, dass alle Fahrzeuge der Beschäftigten Pkw sind.

Für den Kunden- und Besucherverkehr wurden Annahmen für die Anteile von ÖPNV, Pkw und Lkw < 3,5 t, zGG, (LNF) in Abhängigkeit des Wirtschaftszweiges getroffen. Für die

Tagesfahrleistung haben Kunden/Besucher und Beschäftigte jeweils eine An- und Abfahrt täglich zum Unternehmensstandort (zwei Wege). Entsprechend erfolgt die Multiplikation mit dem Faktor 2. Für jeden Weg wird für obige Verkehre die durchschnittliche Wegelänge der SrV (2008) Erhebung für Berlin aus der Broschüre „Mobilität der Stadt – Daten zum Berliner Verkehr“ für den Verkehrszweck Arbeit in Berlin angesetzt (SenStadtUm, 2013). Das in Green Moabit ansässige Museum stellt einen Sonderfall dar. Hier wird für Kunden und Besucher die durchschnittliche Wegelänge der SrV (2008) für den Verkehrszweck Freizeit angesetzt. Hier wurden die Emissionen mit dem gleichen Ansatz wie für den Wirtschaftsverkehr berechnet. Die Beispielrechnung ist in Abbildung 113 dargestellt.

Abbildung 113: Beispiel für Emissionsberechnung des Kunden-, Besucher- und Beschäftigtenverkehrs



Um die Fahrten des Lieferverkehrs zu berechnen, stehen zwei Ansätze zur Verfügung. Dies sind die folgenden:

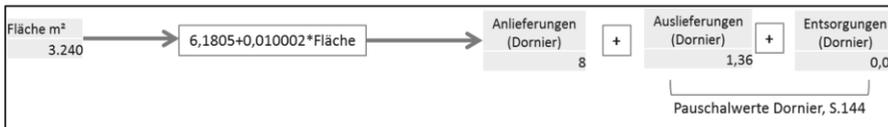
- Ansatz nach Dornier GmbH Planungsberatung „Erfassung und Aufbereitung von Grundlegenden Daten des Wirtschaftsverkehrs in fünf ausgewählten Großstädten sowie die Erarbeitung eines Handlungsrahmens“ (Dornier, 1994),
- Ansatz nach „FGSV Arbeitsgruppe „Verkehrsplanung“, die „vereinfachend“ einen Zuschlag von 5 bis 30 % zu den für das Gebiet ermittelten Fahrten der Beschäftigten vorsieht (siehe Abbildung 114),
  - 5 % = eher kleingewerbliche Strukturen, Einzelhandel, kleine Flächengrößen,
  - 30 % = größere, kleinteilige, nicht monostrukturierte Gebiete (FGSV, 2006).

Abbildung 114: Adaptierter FGSV-Ansatz zur Berechnung der Fahrten des Lieferverkehrs



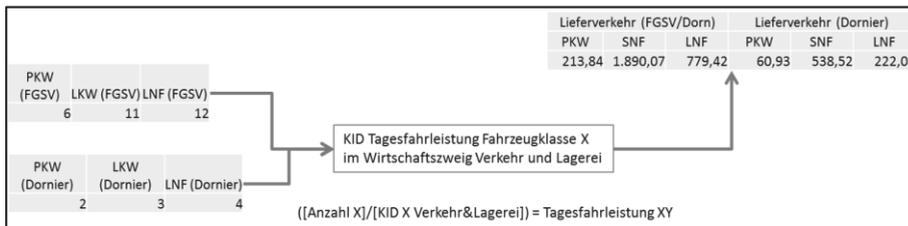
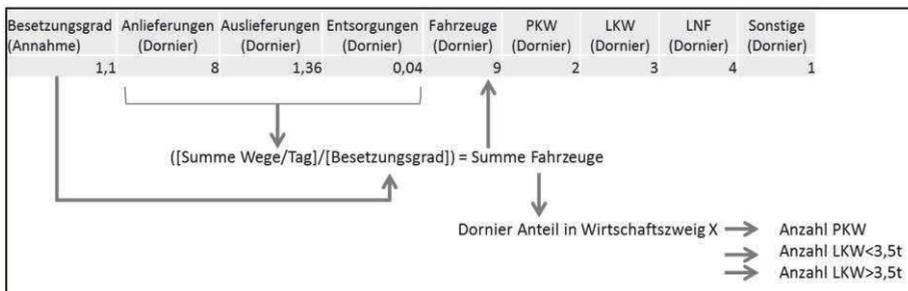
Der Dornier Studie folgend besteht ein Zusammenhang zwischen der Branche, Geschäftsfläche und der Anzahl der Anlieferungen (Abbildung 115) (Dornier, 1994). Kein signifikanter Zusammenhang besteht hingegen bei den Ablieferungen. Diese werden pauschal angenommen.

Abbildung 115: Adaptierter Ansatz Dornier für Berechnung der Lieferverkehr Fahrten



Die Anzahl der Fahrzeuge ergibt sich aus der Zahl der Fahrten (Quell- bzw. Zielverkehr) und dem Besetzungsgrad der Fahrzeuge. Die Verteilung der Fahrzeuge auf die Fahrzeugklassen erfolgt in Abhängigkeit der für die Zulieferung zuständigen Transportunternehmen nach dem Ansatz der Dornier-Studie. Die Berechnung der Tagesfahrleistung erfolgt in Abhängigkeit von den jeweiligen Fahrzeugklassen über die mittlere Tagesfahrleistung im Wirtschaftszweig Verkehr und Lagerei (beinhaltet Spedition und KEP) der KiD (2010). Die Emissionsberechnung folgt denen der anderen Gruppen (Abbildung 116).

Abbildung 116: Beispiel der Emissionsberechnung des Lieferverkehrs



Der letzte Schritt ist die Emissionsberechnung der Verkehrsleistung, dargestellt in Abbildung 117. Für alle vier nach Verkehrszweck unterteilten Gruppen wird die Verkehrsleistung in drei Fahrzeugklassen unterteilt: Pkw, Lkw < 3,5 t (LNF) und Lkw > 3,5 t (SNF) [beides

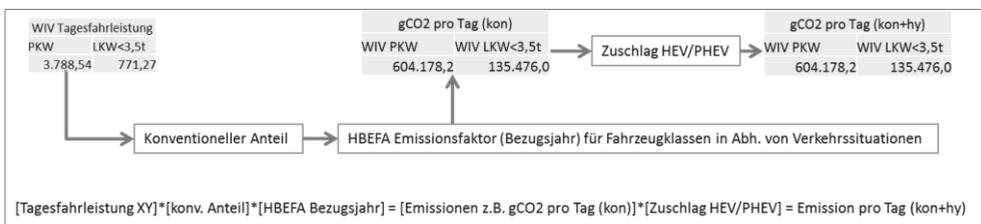
zGG]. Da die Emissionen durch die verschiedenen Fahrzeugklassen und das genutzte Antriebssystem und die verwendete Abgasbehandlungstechnologie bestimmt werden, wird die Verkehrsleistung über die Fahrzeugklassen in die verschiedenen Antriebssysteme (Diesel, Benzin, BEV, PHEV, LPG und CNG) unterteilt. Die Emissionen (CO<sub>2</sub>, CO und Feinstaub [PM]) werden mit den Emissionsfaktoren für das Referenzjahr aus dem „Handbook Emission Factors for Road Transport 3.2“ (HBEFA) für jede Fahrzeugklasse mit unterschiedlichem Antriebssystem berechnet.

Problematisch ist in diesem Fall der Umstand, dass die Emissionswerte für PHEV, LPG- und CNG-Fahrzeuge in der HBEFA 3.2 nur für das Jahr 2010 einzeln ausgegeben werden konnten, nicht aber für die Jahre 2020 und 2030.

Für die Emissionsberechnung der PHEV wird auf die Ergebnisse der durch die Minnesota Pollution Control Agency durchgeführten Studien zu Plug-in Hybriden zurückgegriffen. Die Control Agency hat für die PHEV Flotte in Minnesota ermittelt, dass diese im Mittel bei einer batterieelektrischen Reichweite von 32 km circa 73 g CO<sub>2</sub>, 4,1 g CO und 0,005 g PM auf jedem gefahrenen Kilometer erzeugt, was 35 %, 60 % und 81 % der Werte konventionell angetriebener Fahrzeuge entspricht (Minnesota Pollution Control Agency, 2007). In Ermangelung weiterer belastbarer Daten wurden auf dieser Basis für das Modell diese Werte für die Szenarien 2020 und 2030 übernommen. Dem zur Folge entsprechen beispielsweise 2030 die CO<sub>2</sub> Emissionen eines PHEV 35 % des HBEFA Tabellenwertes eines konventionell angetriebenen Fahrzeuges, was einer sehr konservativen Abschätzung entspräche.

Um einen zeitlich konsistenten Berechnungsansatz auch für die Emissionsfaktoren von LPG und CNG-Fahrzeugen sicher zu stellen, wurden die in der Publikation „CNG und LPG-Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs“ aufgeführten Werte genutzt (Heidt, 2013).

Abbildung 117: Schritte der Emissionsberechnung im Wirtschaftsverkehr (dieses Modell)



#### 4.4.2 Erweiterung des TEECT zur Abbildung von lokalen Emissionswerten auf Grundlage von Zukunftsszenarien für den Wirtschaftsverkehr

Mit Hilfe der oben beschriebenen Erweiterung des TEECT Algorithmus ist es nun möglich, die durch das Modellgebiet generierten durchschnittlichen täglichen Wirtschaftsverkehrsemissionen für das Jahr 2015 zu quantifizieren. Da das Forschungsprojekt insbesondere darauf abzielt, lokale Emissionsveränderungen durch eine Bestandszunahme an elektrischen Fahrzeugen im städtischen WIV zu quantifizieren, wurden in einem weiteren Schritt die im Kapitel 3.5 beschriebenen Bestandsszenarien für 2020 und 2030 übernommen

und auf das untersuchte Quartier angepasst. Diese Abstimmung stellt sicher, dass innerhalb des Forschungsprojektes die lokale Emissionsberechnung und das auf die nationale räumliche Ebene ausgerichtete Energiesystemmodell von den gleichen Grundannahmen ausgehen. Die antizipierte steigende Bestandsdurchdringung von EV der bislang überwiegend konventionell angetriebenen städtischen Wirtschaftsverkehrsflotte ist für die verschiedenen Fahrzeugklassen in untenstehender Tabelle 62 für die einzelnen Szenarien (2015, 2020, 2030) dargestellt. Zur genaueren Beschreibung der einzelnen Verkehre wird bei den Pkw zudem nach Bestandveränderungen innerhalb der Gesamtflotte und der gewerblichen Flotte differenziert.

Tabelle 62: Veränderung der Anteile unterschiedlicher Antriebsarten bezogen auf den Gesamtbestand aller Fahrzeuge in der jeweiligen Fahrzeugklasse

Anteil EV [%]	Antriebsart	2015	2020	2030
Pkw Gesamt	BEV	0,1 %	0,7 %	4,3 %
	PHEV	0,2 %	1,4 %	8,6 %
	Sonstige (LPG, Erdgas)	1,1 %	1,1 %	1,1 %
	Diesel und Benzin	98,6 %	96,8 %	86 %
Pkw Gewerbe	BEV	0,1 %	0,2 %	8,5 %
	PHEV	0,2 %	0,3 %	16,9 %
	Sonstige (LPG, Erdgas)	1,4 %	1,6 %	1,4 %
	Diesel und Benzin	98,3 %	98 %	73,2 %
Lkw < 3,5 t	BEV	0,1 %	0,6 %	7,2 %
	PHEV	0,1 %	0,3 %	3,6 %
	Diesel	99,9 %	99,1 %	89,1 %
Lkw > 3,5 t	BEV	0,0 %	0,1 %	0,8 %
	PHEV	0,1 %	0,1 %	1,5 %
	Diesel	99,9 %	99,8 %	97,7 %

Quelle: vgl. Kapitel 3.5.3

Wie Tabelle 62 ebenfalls zu entnehmen ist, wurde für die LPG und mit Erdgas angetriebenen Fahrzeuge von einem konstanten Anteil von 1 % an allen in Nutzung befindlichen Fahrzeugen ausgegangen. Bei den gewerblich zugelassenen, konventionell angetriebenen Pkw erfolgt somit bis 2030 ein Anteilrückgang auf 73 %. 2030 werden insgesamt 25 % aller gewerblich zugelassenen Pkw BEV oder PEHV sein. Bei den größeren Fahrzeugklassen, insbesondere bei den Lkw > 3,5 t, wurde wegen fehlender Neufahrzeugangebote und einer schlechter Wirtschaftlichkeit (vgl. Kapitel 4.1) für 2030 lediglich von einer Bestandsdurchdringung von 2,3 % ausgegangen.

Um diese Modellszenarien auf das TEECT anzuwenden, mussten die Werte für die in Tabelle 62 dargestellten Fahrzeugklassen und -flotten auf die einzelnen in Kapitel 3.1.1 definierten Verkehre verteilt werden. Am eindeutigsten zuzuordnen waren die Fahrzeugklassen der Lkw  $< 3,5$  t und der Lkw  $> 3,5$  t [beides zGG]. Diese waren in allen vier Verkehren den LNF bzw. SNF zuzuordnen. Da Pkw im Wirtschaftsverkehr und Lieferverkehr hauptsächlich größeren gewerblichen Flotten angehören, wurde für diese Verkehre von gewerblich gehaltenen Pkw ausgegangen. Beim Beschäftigtenverkehr handelt es sich um private Fahrten, die aber auch mit gewerblich zugelassenen Pkw bestritten werden können. Beim Kunden-/Besucherverkehr konnte ebenfalls von privaten und gewerblichen Verkehren ausgegangen werden, weshalb hier auf die Werte für die Pkw Gesamtflotte zurückgegriffen wurde.

Für das Untersuchungsgebiet wird für die Prognosejahre eine gleichbleibende Anzahl von Fahrten angesetzt, was auf der Ebene des Gesamtmodells zu einer zeitlich konstanten Gesamtzahl an Fahrzeugen für den WIV des Gebietes führt. Diese Festsetzung einer konstanten Randbedingung ist dem Umstand geschuldet, dass die Fahrtenhäufigkeitsableitung und somit die Herleitung der Fahrzeugflottengröße im Modell branchenspezifisch erfolgt. Folglich hätten Annahmen über die Fahrtenhäufigkeit für jede Branche für jedes Szenario getroffen werden müssen. Dies hätte einerseits in einem erheblichen zusätzlichen Aufwand gemündet und andererseits wäre der Effekt, den die Bestandsdurchdringung auf die Emissionen hat, schwieriger aus den Ergebnissen herauszulesen gewesen.

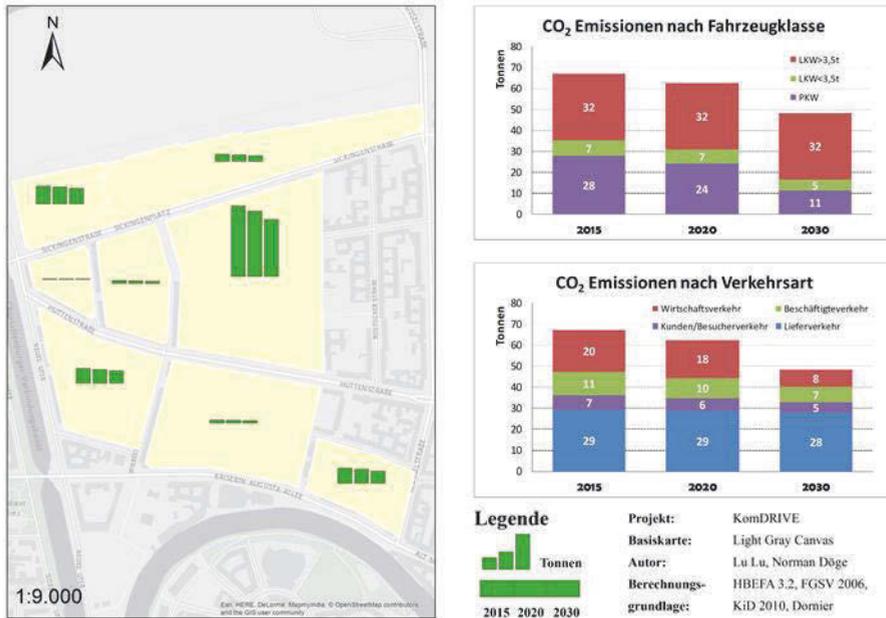
Die Emissionsfaktoren für konventionelle Fahrzeuge sind für die abzubildenden Szenarien im HBEFA verfügbar. Für die Emissionen der LPG- und CNG-Fahrzeuge für 2020 und 2030 werden, wie bereits dargestellt, die Werte der Publikation „CNG und LPG- Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs“ des BMVI herangezogen (vgl. Heidt, 2013).

### 4.4.3 Ergebnisse der Emissionsberechnung

Im Ergebnis berechnete das TEECT drei verschiedene Arten von täglichen Emissionen für den Wirtschaftsverkehr im Modellgebiet Green-Moabit für die Jahre 2015, 2020 und 2030. Dazu gehören CO<sub>2</sub>, CO und Feinstaub (Abbildung 118, Abbildung 119 und Abbildung 120). Die drei Abbildungen stellen nicht nur die Verteilung der Emissionen aggregiert pro frei gewählte Blockebene dar, sondern auch die Gesamtmenge der Emissionen in verschiedenen Jahren und den Emissionsanteil nach Fahrzeugklasse und Verkehrsart.

Die Gesamtmenge der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Green Moabit folgt einem abnehmenden Trend: 2015 sind es 67 t pro Tag, die auf 62 t im Jahr 2020 und 48 t im Jahr 2030 sinken (Abbildung 118). Wenn die CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Fahrzeugklasse betrachtet werden, entstammt die Hälfte der CO<sub>2</sub>-Emissionen (32 Tonnen) Schwerlastfahrzeugen (Lkw  $> 3,5$  t zGG) – auch in den Jahren 2020 und 2030. Es gibt zwei Erklärungen für diesen stabilen Trend. Die erste ist der Emissionsfaktor: Im HBEFA 3.2 ist der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor für SNF 649,7 g<sub>CO2</sub>/km in 2015. Er sinkt im Jahr 2020 auf 646,5 g<sub>CO2</sub>/km, aber steigt bis 2030 wieder auf 657,3 g<sub>CO2</sub>/km an. Die zweite Erklärung ist, dass 2015 der Anteil elektrischer Fahrzeuge von 0,1 % auf nur 1,5 % im Jahr 2030 zunimmt. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die 2030 vom Pkw erzeugt werden (11 Tonnen), sind weniger als halb so hoch wie 2015 (28 Tonnen). Die größte Reduktion entsteht durch den Wechsel von konventionellen zu elektrischen Fahrzeugen. Nahezu 25 % der konventionellen Fahrzeuge werden 2030 durch elektrische ersetzt.

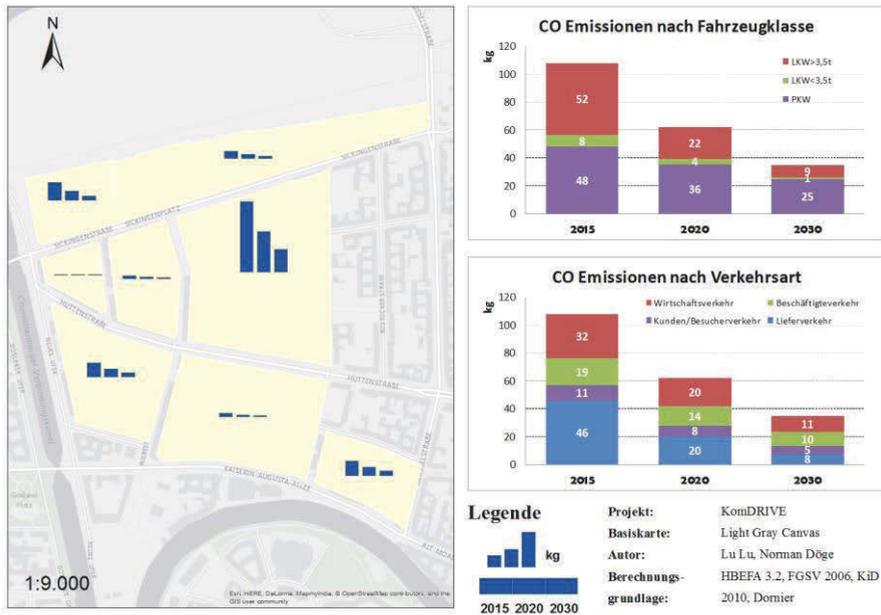
Abbildung 118: Durchschnittliche tägliche CO<sub>2</sub>-Emissionen von Unternehmen in Green-Moabit für die Jahre 2015, 2020, 2030



Die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Pkw sinken von 28 t im Jahr 2015 auf 11 t im Jahr 2030. Was die Verkehrsart betrifft, ist der Hauptfaktor der Wirtschaftsverkehr, welcher 2015 von 20 t pro Tag auf 8 t pro Tag im Jahr 2030 sinkt, da hier prozentual die meisten Pkw anzutreffen sind. Die Hauptemissionen stammen vom Lieferverkehr und nehmen von 2015 bis 2030 um nur ca. eine Tonne ab, da fast 90 % des Lieferverkehrs durch Schwerlastfahrzeuge abgewickelt werden.

Abbildung 119 zeigt einen starken Rückgang der täglichen CO-Emissionen von 108 kg/d im Jahr 2015 auf 50 kg/d im Jahr 2020 und 35 kg/d im Jahr 2030. Anders als die CO<sub>2</sub>-Emissionen, sinken die CO-Emissionen der Schwerlastfahrzeuge (Lkw > 3,5 t) signifikant im Vergleich zum Pkw: Es sind nur fast halb so viel CO-Emissionen wie 2015, aber der Anteil an den Gesamtemissionen beträgt 2030 nur 27 %. Die Emissionen im Lieferverkehr gehen 2015 mit 46 kg/d auf 8 kg/d im Jahr 2030 stark zurück. Ein Grund ist, dass eine Korrelation zwischen Schwerlastfahrzeugen (Lkw > 3,5 t zGG) und dem Lieferverkehr besteht, da der größte Teil des Lieferverkehrs mit diesen Fahrzeugen abgewickelt wird. Der CO-Emissionsfaktor für Schwerlastfahrzeuge sinkt 2015 von 1,05 g/km auf 0,17 g/km im Jahr 2030. Dieselben Trends werden bei den Feinstaubemissionen deutlich: Sie nehmen 2015 von 5 kg pro Tag auf 0,8 kg pro Tag im Jahr 2030 ab. Im Ergebnis gehen im zeitlichen Verlauf alle in verschiedenen Fahrzeugklassen und Verkehrsarten generierten Feinstaubemissionen drastisch zurück.

Abbildung 119: Durchschnittliche tägliche CO-Emissionen von Unternehmen in Green-Moabit für die Jahre 2015, 2020, 2030

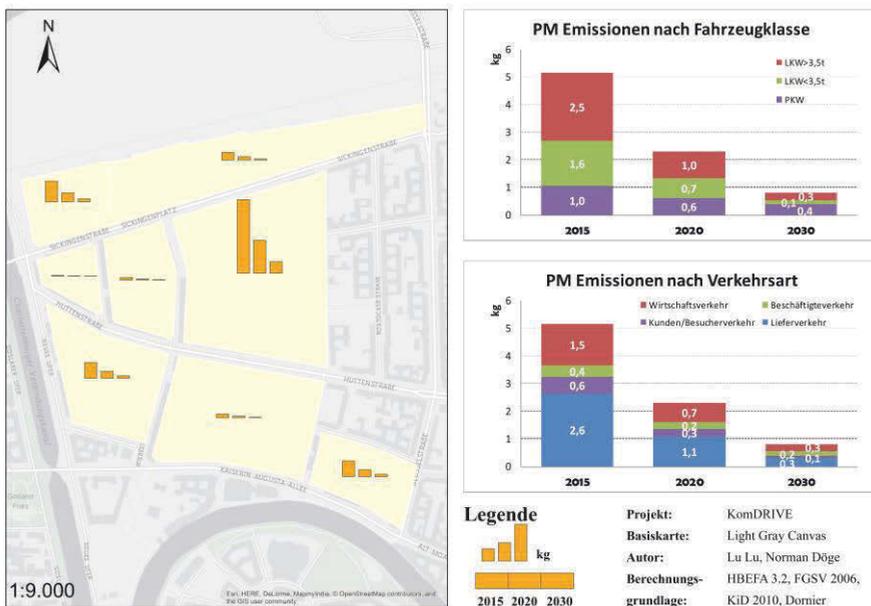


Zum Beispiel sinken die Feinstaubemissionen von Lkw > 3,5 t von 2,5 kg/d im Jahr 2015 auf 1,0 kg/d im Jahr 2020 und 0,3 kg/d im Jahr 2030. Laut HBEFA 3.2 beträgt der Emissionsfaktor für Feinstaub von LNF und SNF 2030 nur ca. 10 % im Vergleich zu dem Wert von 2015. Der Feinstaub-Emissionsfaktor für Pkw sinkt 2030 auf etwa 1/3 und der Anteil konventioneller Fahrzeuge sinkt 2030 auf 73 % mit 17 % PHEV und 8 % BEV. All dies führt zur drastischen Abnahme der Feinstaubemissionen.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich in Bezug auf die Emissionsbelastung durch die Partikel- und CO-Emissionen die größten Einsparpotenziale im Schwerlastverkehr realisieren ließen, diese im Szenario 2030 allerdings nicht durch eine vermehrte Anzahl von Elektrofahrzeugen sondern durch eine Verbesserung der Filtertechnologie bzw. Nachrüstung von Katalysatoren/Filtern erreicht wird.

Im Bereich der Pkw und Lkw < 3,5 t schlägt sich der steigende Anteil an Elektrofahrzeugen innerhalb der WIV-Flotten mittel- bis langfristig in sinkenden CO<sub>2</sub>- und CO-Emissionen nieder und kann hier einen signifikanten Beitrag zur Verringerung der lokalen Emissionsbelastung leisten. Zudem wird gerade in diesen Fahrzeugklassen bis 2030 eine nennenswerte Bestandsdurchdringung erwartet. Somit kann Elektromobilität einen Beitrag leisten um lokale Emissionen im städtischen Wirtschaftsverkehr nachhaltig zu senken. Sie stellt allerdings nicht die Universallösung dar. Insbesondere im Schwerlastverkehr führen weitere Anstrengungen zur Verbesserung/Nachrüstung von Filtern/Katalysatoren am ehesten zu nennenswerten Reduktionseffekten.

Abbildung 120: Durchschnittliche tägliche Feinstaub-Emissionen von Unternehmen in Green-Moabit für die Jahre 2015, 2020, 2030



## 4.5 Ergebnisse der Energiesystem-Modellrechnungen

(J. Linssen)

Ziel des Kapitels ist die Zusammenführung der Einzelergebnisse aus den bereits in Kapitel 4.1 bis 4.4 vorgestellten Detailanalysen zu einer in sich geschlossenen Energiesystem-Szenario-Rechnung für das nationale Versorgungssystem in Deutschland. Mit Hilfe der abgeleiteten Trends werden mögliche Entwicklungen der Elektrifizierung des Privat- und Wirtschaftsverkehrs nachgebildet und deren Auswirkungen auf die Energieversorgung quantifiziert.

### 4.5.1 Definition der Szenarien

Das entworfene Referenz-Szenario entspricht den bereits beschriebenen Annahmen und Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel 2.1 und 3.5). Das Referenz-Szenario beinhaltet die in Kapitel 3.5 beschriebenen energiepolitischen Zielvorgaben der Bundesregierung und die im Projekt erarbeiteten technischen und ökonomischen Annahmen zu EV, Kraftwerken und Transport- und Verteilnetzen. Für im Projekt nicht im Detail analysierte Umwandlungs-, Energietransport- und Endverbrauchstechniken werden die im Energiesystemmodell hinterlegten Daten herangezogen (Heinrichs und Markewitz, 2015 sowie Linssen et al., 2012). Weiterhin wird von einer erfolgreichen Markteinführung von EV im Privat- und Wirtschaftsverkehr ausgegangen. Der Bestand an EV-Pkw und EV-Lkw zusammen wird zu 1 Million Fahrzeugen im Jahr 2020 und 6 Millionen im Jahr 2030 angenommen. Die Ladeleistung der EV wird durch eine nicht gesteuerte Strategie mit Ladung des EV nach der

letzten Fahrt am privaten Stellplatz oder nach Rückkehr zum Betriebshof am dortigen Abstellplatz nachgebildet. Eine Berücksichtigung der Ladesteuerungsmöglichkeiten aus Kapitel 4.3 erfolgt aus Gründen der Vereinfachung nicht. Die dargestellten Rechenergebnisse sind daher bezüglich Kraftwerkspark und dessen Optimierung als Worst-Case-Rechnungen anzusehen und stellen damit die maximalen Auswirkungen dar. Durch angepasste Ladestrategien können die Stromerzeugung, der Transport und die Verteilung noch deutlich optimiert werden und dementsprechend weitere Emissionen und Kosten reduziert werden.

Die Szenario-Variante „ohne EV“ ermöglicht durch den Vergleich mit dem Referenz-Szenario die Quantifizierung der Wirkungen des EV-Einsatzes zu alternativen Strategien. Ein sogenanntes „Business-as-Usual“-Szenario (BAU) wird zur Quantifizierung der Effekte ohne den Einsatz von Elektromobilität oder anderen alternativen Antriebstechniken herangezogen. Dieses Szenario bildet somit eine zukünftige Entwicklung unter der Voraussetzung ab, dass keine Marktdurchdringung von alternativen Antrieben erfolgt und die weitere Entwicklung auf Grundlage der historischen Trends fortgeschrieben wird.

## 4.5.2 Szenario-Ergebnisse

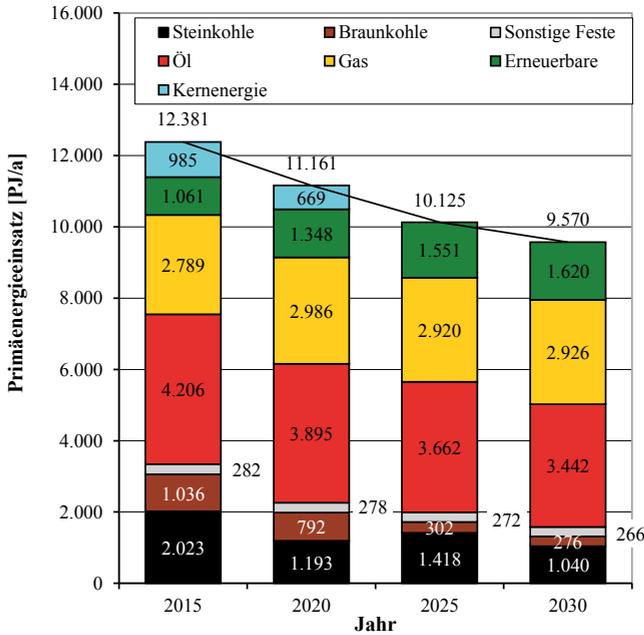
Die Detaillierung des Referenz-Szenarios werden in der zeitlichen Entwicklung von 2015 bis 2030 dargestellt. Für das Energieversorgungssystem werden alle notwendigen Energieströme berechnet und die Kosten und Emissionen bilanziert. In diesem Kapitel erfolgt eine Fokussierung auf Kenngrößen, die eine Quantifizierung der Effekte des EV-Einsatzes ermöglichen. Daher werden der Primärenergiebedarf, der Endenergiebedarf im Verkehr, die installierten Stromerzeugungskapazitäten und Strommengen, die CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Sektoren und die Entwicklung der Systemkosten diskutiert.

Die zeitliche Entwicklung der Primärenergieträgerbilanz im Referenzszenario zeigt die folgende Abbildung 121. Hierzu zählt neben Importen von Kohlen, Erdöl und Erdgas auch die heimische Gewinnung fossiler und erneuerbarer Primärenergieträger.

Aus den Primärenergieträgern werden in den Umwandlungsbereichen Kraftwerke, Raffinerien u.a. Endenergieträger wie zum Beispiel Strom oder Kraftstoffe gewonnen. Trotz zum größten Teil steigender bzw. stagnierender Nachfragen nach Energiedienstleistungen wird der in der Energiewende vorgegebene Zielwert der Einsparung an Primärenergie von 30 % im Jahr 2030 im Vergleich zu 2008 erreicht. Die Primärenergieeinsparung findet maßgeblich in den Umwandlungsbereichen durch Steigerung der Umwandlungseffizienz statt. Der Kernenergieausstieg bis 2022 wird wie vorgegeben eingehalten. Der geforderte Anteil erneuerbarer Energien an der Primärenergie von 30 % wird ebenfalls erreicht. Der Bedarf an Erdgas steigt aufgrund eines deutlichen Mehreinsatzes in gasbefeuerten, dynamischen Kraftwerken ab dem Jahr 2025 deutlich an. Die Steigerung kann nur teilweise durch steigende Wirkungsgrade in der Umwandlungs- und Endverbrauchstechnik sowie einer wesentlich verbesserten Dämmung des Gebäudebestands und Neubauten abgefedert werden. Bedingt durch die ambitionierten Klimaschutzziele wird unter den getroffenen Energiepreisrelationen ein deutlicher Rückgang der Primärenergienachfrage nach Steinkohle- sowie Braunkohle errechnet. Die un stetige Entwicklung bei der Steinkohle ist durch den Ausgleich der wegfallenden Kernenergie-Kraftwerkskapazitäten erklärt. Der Primärenergiebedarf an Mineralöl fällt von 2015 bis 2030 um ca. 18 %. Der Mineralöl-Anteil an der gesamten Primärenergie steigt trotz deutlicher Effizienzsteigerungen und

Elektromobilität um 2 Prozentpunkte auf knapp 36 %. Der Vergleich mit dem Szenario „ohne EV“ (Einsatz von Biokraftstoffen und Wasserstoff) zeigt jedoch keine signifikante Einsparung an Primärenergie sondern nur eine sehr leichte Verschiebung der Zusammensetzung in Richtung Erdgas und Erneuerbare.

Abbildung 121: Primärenergiebilanz im Referenz-Szenario



Die Szenariorechnung weist für den Endenergieverbrauch aller Sektoren im Jahr 2030 einen Rückgang um knapp 17 % im Vergleich zu 2015 auf. Der Verkehrsbereich trägt mit einer Einsparung von ca. 14 % unterproportional bei. Das interpolierte Energieeinsparziel von 20 % im Verkehr wird jedoch erreicht. Überproportional mit über 32 % Einsparung an der Endenergie trägt der Haushaltssektor bei. Dort machen sich die sehr ambitionierten Ziele der Energiewende bezüglich Energieeffizienz im Gebäudebereich bemerkbar.

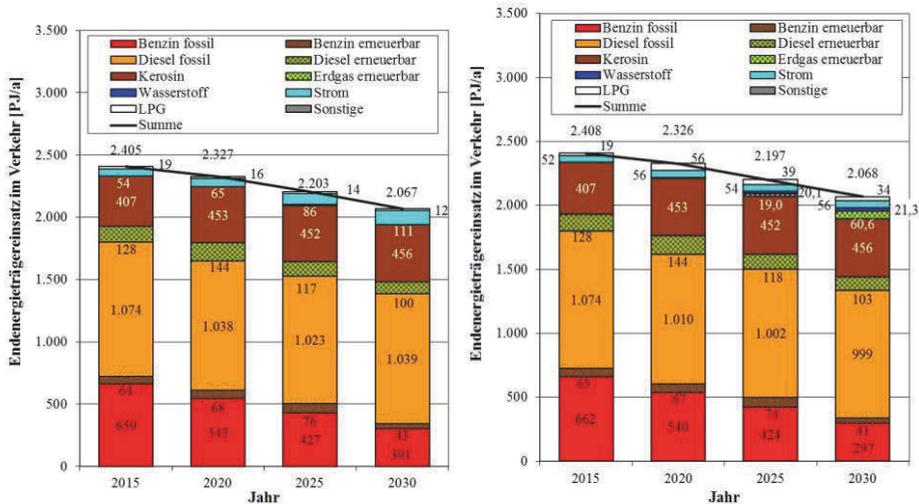
Abbildung 122 zeigt die Entwicklung des Bedarfs an Endenergieträgern für den gesamten Personen- und Güterverkehr für das Referenzszenario (linke Darstellung) und das Szenario ohne EV-Marktdurchdringung. Für das Referenzszenario wird ein Gesamtverbrauch an fossilen Mineralölkraftstoffen (Diesel, Benzin und Kerosin) von 1.796 PJ im Jahr 2030 erreicht, wobei der Anteil der Dieselmotoren deutlich auf einen Anteil von fast 58 % steigt. Dies ist maßgeblich auf den stark steigenden Straßengüterverkehr zurück zu führen – trotz einer teilweisen Elektrifizierung und trotz deutlicher Effizienzsteigerungen. Der deutliche Rückgang des Benzinbedarfs ist durch eine deutlich gesteigerte Effizienz der Pkw (Reduktion der Neufahrzeug-Flottenverbrauchswerte laut EU-Vorgabe) und der angenommenen Elektrifizierung (maßgeblich Ersatz von Ottomotor-Fahrzeugen) im privaten und im Wirtschaftsverkehr hervorgerufen. Der Einsatz von beigemischten Biokraftstoffen unter Einhaltung der geforderten Klimawirksamkeit der gesamten Kette und der Anteil des LPG gehen ebenfalls zurück. Der Anteil an fossilem Erdgas (Kategorie Sonstige) und

erneuerbarem Erdgas sowie Wasserstoff bleibt im Referenzszenario unter 1 % des gesamten Kraftstoffbedarfs. Der Stromverbrauch des gesamten Verkehrs (inklusive öffentlicher Personennahverkehr mit Straßenbahn, S- und U-Bahn sowie Personenfernverkehr der Bahn) erhöht sich von 2015 bis 2030 um 105 % auf 111 PJ (ca. 31 TWh) für das Referenz-Szenario. Der Anteil aller EV am verkehrsbedingten Stromverbrauch in 2030 liegt bei 48 % (knapp 15 TWh). Trotz hoher Zuwachsraten bleibt 2030 der Anteil des Stroms am Energieverbrauch im gesamten Verkehrsbereich mit ca. 5,4 % gering. Der Wirtschaftsverkehr mit Pkw und Lkw hat mit den bereits beschriebenen Beständen und Annahmen einen Anteil von ca. 36 % am Kraftstoffverbrauch im Jahr 2030; der Anteil des städtischen Wirtschaftsverkehrs wird mit gut 18 % bezogen auf den gesamten Kraftstoffbedarf des gesamten Verkehrs abgeschätzt. Für die angenommene Elektrifizierung der Wirtschaftsflotte (Pkw, leichte und mittelschwere Lkw) wird ein Strombedarf von 5,4 TWh für den gesamten Wirtschaftsverkehr bzw. 4,3 TWh für den städtischen Anteil im Jahr 2030 errechnet. Wie bereits beschrieben wird für 2030 ein Bestand von 6 Mio. EV an privaten und gewerblichen Pkw und Lkw unterstellt. Der Anteil der Wirtschaftsflotte an den EV beträgt dabei 31,5 % im Jahr 2030. Die Einsparung an fossilen Kraftstoffen zum BAU-Szenario (maßgeblich Ersatz von Diesel- und Ottomotor-Fahrzeugen) ergibt eine Einsparung von ca. 2,2 Mio. t Ottokraftstoff und 0,9 Mio. t Dieselloststoff. Dieser Fall ist nicht gleichzusetzen mit dem Szenario „ohne EV“, da hier andere alternative Antriebe als EV gewählt werden, um die geforderten Einsparziele erreichen zu können.

Die Ergebnisse des Endenergiebedarfs im Szenario „ohne EV“ zeigt die linke Darstellung in Abbildung 122. Um die Anforderungen an die Energieeffizienz im Verkehr und der CO<sub>2</sub>-Reduktion zu erfüllen, wählt das Modell den Einsatz von Erdgas und Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen massgeblich für den Pkw-Bereich. Es kommt daher zu einer ähnlich großen Verdrängung von fossilen Kraftstoffen wie im Referenzszenario.

Ein Vergleich des errechneten Kraftstoffbedarfs für den gesamten Verkehrsbereich zu anderen Energie-Szenarien (vgl. Kapitel 3.5) liefert eine Einordnung der hier gezeigten Ergebnisse. Für den Endenergieverbrauch des gesamten Verkehrs wird im Basisfall der Energierferenzprognose (Schlesinger et al., 2014) ein Wert von 2.219 PJ ermittelt. Der Strombedarf für die EV fällt jedoch deutlich niedriger mit ca. 12 PJ aus, da die Studie für 2030 nur von einem Bestand von knapp 3 Mio. EV ausgeht. Im Szenario „Aktuelle Politik“ der Studie (Matthes et al., 2013) errechnen die Autoren für den Kraftstoffbedarf im Jahr 2030 einen Wert von 1.877 PJ. Der Strombedarf für den gesamten Verkehr ist mit 77 PJ angegeben. Auch hier ist von einem niedrigeren Bestand an EV ausgegangen worden. Der Vergleich zeigt die Bandbreite der Szenario-Ergebnisse, die maßgeblich durch die Annahmen zur Technik und Kostenentwicklung sowie unterstellten Maßnahmen beeinflusst werden.

Abbildung 122: Endenergiebedarf des Personen- und Güterverkehrs

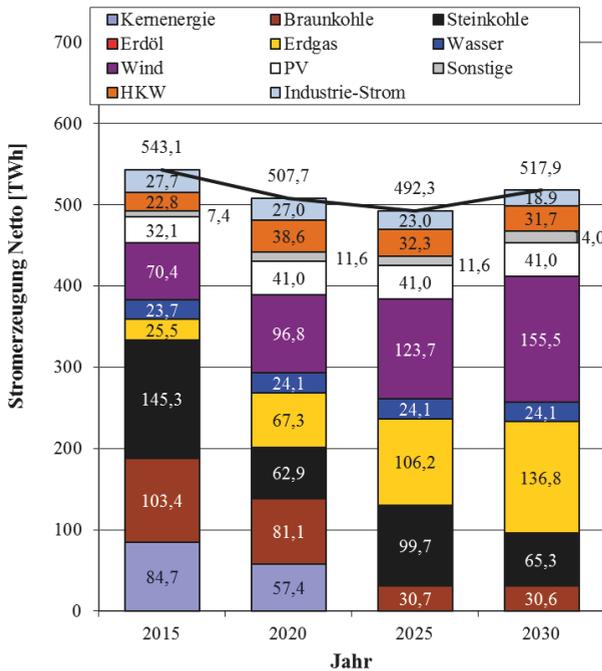
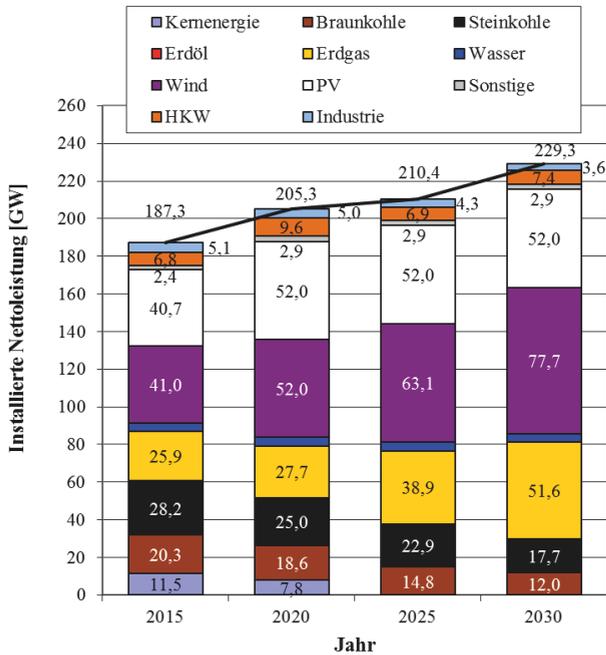


Auf der linken Seite „Referenzszenario“, auf der rechten Seite Szenario „ohne EV“.

Die Struktur der Stromerzeugung für das Referenzszenario ist in Abbildung 123 dargestellt. Die installierten Erzeugungskapazitäten (linke Darstellung) setzen den Ausbaukorridor der erneuerbaren Erzeugung bis zum Jahr 2030 fort. Die Erzeugungskapazität der Erneuerbaren erreicht im Jahr 2030 einen Anteil von knapp 60 %. In dem Szenario wird dem Bereich Wind-Onshore und -Offshore die größte Kapazität zugewiesen. Der PV-Ausbau wird bedingt durch die unterstellte Kostenstruktur und ohne steuernde Instrumente in einem geringeren Maße zur kostenoptimalen Ausgestaltung der Energieversorgung beitragen. Die Erdgasverstromung, insbesondere dynamische betriebene Gasturbinen mit niedriger jährlicher Auslastung, entwickelt sich zur größten fossilen Stromerzeugungskapazität. Weiterhin lässt der Kernenergieausstieg bis zum Jahr 2022 die Kapazität der Erdgasverstromung deutlich ansteigen. Aufgrund der ambitionierten CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele werden ab dem Jahr 2025 die Erzeugungskapazitäten der Braun- und Steinkohle verdrängt. Ein derzeit diskutierter vorzeitiger Ausstieg aus der Kohleverstromung ist nicht im Szenario berücksichtigt.

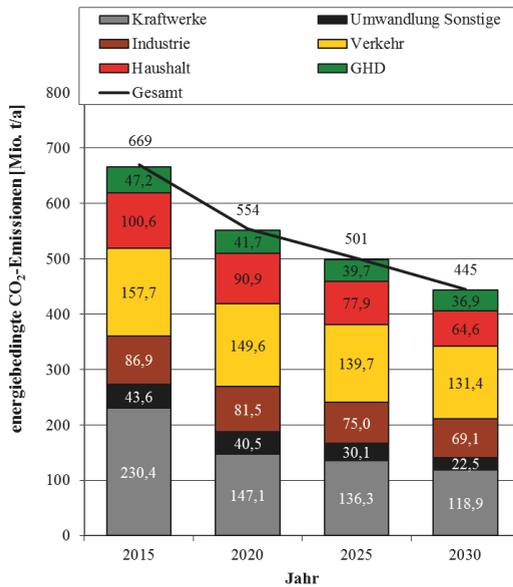
Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen im Szenario erreicht 2030 den politisch gesetzten Anteil von mindestens 50 %. Da im Referenz-Szenario unterstellt wird, dass die Stromeinsparung sich nur auf derzeitige Verbraucher bezieht und neue Verbraucher wie Wärmepumpen-Heizungen und EV ausgenommen sind, findet ab 2025 ein leichter Anstieg des Stromverbrauchs statt. Der Mehrverbrauch der EV liegt vergleichsweise gering bei ca. 15 TWh (vgl. Abbildung 122).

Abbildung 123: Installierte Stromerzeugungskapazitäten (oben) und Netto-Stromerzeugungen (unten) im Referenz-Szenario



Die Auslastung der fossilen Kraftwerke, insbesondere Erdgas, sinkt zwischen 2025 und 2030 deutlich. Der sprunghafte Anstieg der Kohlestromerzeugung kann durch den kurzzeitig notwendigen Ausgleich der wegfallenden Kapazitäten des Kernenergieausstiegs erklärt werden. Die Auslastung der öffentlichen Kraftwerke (inklusive erneuerbare Erzeugung) sinkt von ca. 42 % im Jahr 2015 auf ca. 24 % im Jahr 2030. Die Auslastung der Kraftwerke unterscheidet sich hierbei stark. Der Vergleich mit dem Szenario „ohne EV“ zeigt nur eine leichte Verschiebung der installierten Kapazitäten und der erzeugten Strommengen. Die EV-Nachfrage wird durch eine geringe Mehrauslastung vorwiegend der Erdgaskraftwerke und durch eine um 4 % höhere installierte Windstromerzeugung abgefangen.

Das Energiesystemmodell berechnet neben den Kosten und Energieströmen auch die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Gesamtsystems und der Sektoren (keine Emissionen aus stofflich bedingten Produktionsprozessen wie zum Beispiel der nicht energetische bedingte Anteil der Zementherstellung). Abbildung 124 zeigt den errechneten Trend der Emissionen im Referenzszenario bei Einsatz der Elektromobilität im Privat- und Wirtschaftsverkehr. Die festgelegte CO<sub>2</sub>-Minderung der Energieversorgung mit einer Reduktion von 55 % bis 2030 (im Vergleich zu 1990) wird im Szenario maßgeblich durch die Umwandlungsbereiche getragen, wobei der Kraftwerksbereich mit 49 % und der sonstige Umwandlungsbereich (z.B. Raffinerien) mit 51 % zur Einsparung beitragen. Die verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen sinken von 2015 bis 2030 unterproportional zu den anderen Sektoren um nur knapp 17 %. Der Verkehrssektor wird damit bereits ab 2020 zum größten Emittent von CO<sub>2</sub>-Emissionen trotz des bereits gezeigten Einsatzes von EV sowie Biokraftstoffen und steigert seinen Anteil an den Emissionen bis zum Jahr 2030 auf knapp 30 %. Der Vergleich zum BAU-Szenario unter Beibehaltung der derzeitig implementierten Antriebstechniken ergibt eine Einsparung im Privat- und Wirtschaftsverkehr von knapp 6 Mio. t pro Jahr. Das Szenario ohne EV und damit mit anderen alternativen Antrieben wie Wasserstoff und erneuerbares Erdgas kommt auf knapp 134 Mio. t pro Jahr und somit zu ähnlichen Emissionen im Verkehrsbereich. Der Anteil des Wirtschaftsverkehrs an den gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen beträgt mit den getroffenen Annahmen im Referenzszenario im Jahr 2030 43,8 % und der städtische Anteil ca. 22 % bezogen auf die Gesamtemissionen. Durch die unterstellte Elektrifizierungsstrategie des Wirtschaftsverkehrs vornehmlich bei Pkw sowie leichte und mittelschwere Lkw können im Wirtschaftsverkehr insgesamt im Vergleich zu einem BAU-Szenario 3,2 Mio. t pro Jahr eingespart werden; davon städtisch bedingt 2,9 Mio. t. Der Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Einsparung durch die Elektrifizierung der EV-Wirtschaftsflotte ist nennenswert und stellt einen Baustein für eine Reduktionsstrategie im Verkehrssektor dar.

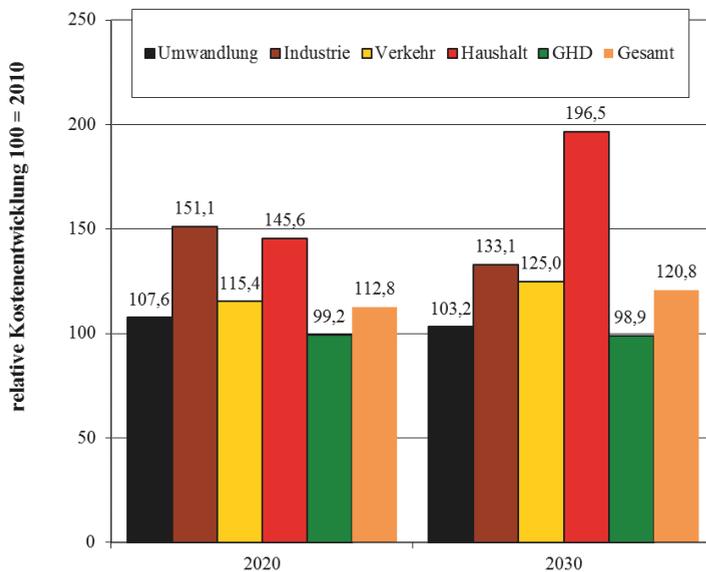
Abbildung 124: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland

Die Emissionen der Stromerzeugung durch die zusätzliche Stromnachfrage der EV werden durch eine Ladung nach der letzten Fahrt nach Hause oder zum Betriebshof abgebildet. Durch optimierte Ladeverfahren und oder Systemdienstleistungen kann die Emissionsbilanz der zusätzlichen Stromerzeugung noch weiter positiv beeinflusst werden (vgl. Linssen et al., 2012). Die hier dargestellte Ladestrategie stellt damit, wie in Kapitel 4.5.1 bereits beschrieben, eine Worst-Case-Abschätzung für die CO<sub>2</sub>-Emissionsberechnung der Elektromobilität dar.

Mit Hilfe des Energiesystemmodells kann die Kosteneffizienz von Reduktionsstrategien bewertet und verglichen werden. Der Vergleich der bilanzierten Kosten im Modell ermöglicht dabei die Betrachtung der Konkurrenzsituation technischer Maßnahmen in den verschiedenen Sektoren. So konkurrieren z. B. Maßnahmen zur Gebäudedämmung mit dem Einsatz von EV in kostenoptimalen CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategien.

Die Abbildung 125 zeigt die relative Kostenentwicklung in den gezeigten Sektoren der Energieversorgung bezogen auf das Jahr 2010. Man erkennt eine Kostensteigerung in allen Sektoren außer dem GHD-Sektor. Hier werden die Kosten für eine gesteigerte Energieeffizienz durch Brennstoffeinsparungen relativiert. Am höchsten ist die Zunahme der Systemkosten im Haushaltsbereich. Dafür verantwortlich sind die sehr ambitionierten Ziele der Energiewende zur Energieeffizienz von Gebäuden, die teilweise zu sehr teuren Maßnahmen führen, welche zum Beispiel eine beschleunigte Isolierung von Gebäudehüllen außerhalb von normalen Renovierungszyklen erforderlich macht.

Abbildung 125: Relative Entwicklung der Systemkosten bezogen auf das Jahr 2010 für das Referenz-Szenario



Die gesamten Systemkosten steigen um 20,8 Prozentpunkte von 2010 auf das Jahr 2030 unter den getroffenen Annahmen. Beim Verkehrsbereich führt der Einsatz von Biokraftstoffen, effizienten Antrieben und EV zu einer überdurchschnittlichen Kostensteigerung von 25 Prozentpunkten. Im Vergleich mit dem Szenario „ohne EV“ und dem gezeigten Einsatz von erneuerbaren Erdgas und Wasserstoff, weist das Referenzszenario im Verkehrsbereich niedrigere Systemkosten um knapp 1 % im Jahr 2030 auf.

### 4.5.3 Zusammenfassung

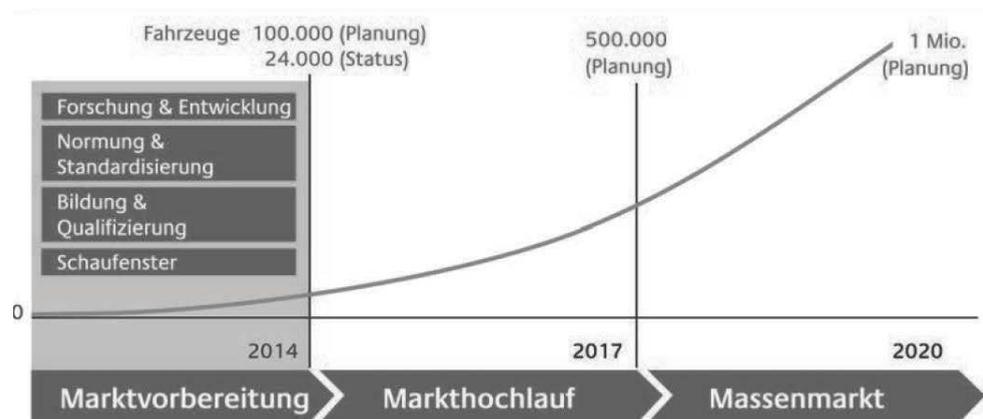
Die Auswirkungen des angenommenen EV-Bestands im Wirtschaftsverkehr auf das gesamte Energieversorgungssystem in Deutschland sind nicht signifikant. Der Primärenergieverbrauch durch den Einsatz von EV sinkt 2030 sehr geringfügig. Der Einsatz von Mineralölprodukten sinkt im Vergleich zum Szenario „BAU“ um 8,4 % im Jahr 2030. Es findet kein signifikanter Zubau an Kraftwerksleistung für EV-Nutzung im WIV statt, sondern eine Mehrauslastung bestehender Kapazitäten. Die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion des unterstellten EV-Bestandes liegt bei 6 Mio. t<sub>CO2</sub> im Jahr 2030; der angenommene EV-Bestand im städtischen WIV trägt dazu mit knapp 3 Mio. t<sub>CO2</sub> bei. Die CO<sub>2</sub>-Einsparung wird durch Ladeszenarien, Windcharakteristiken etc. beeinflusst. EV können bei den gesetzten Zielen der Energiewende Bestandteil von kostenoptimalen Reduktionsstrategien sein. Insbesondere das Ziel zur Endenergieeinsparung im Verkehr (40 % bis 2050) erweist sich als wichtiger Treiber für den EV-Einsatz im Privat- und Wirtschaftsverkehr.

## 4.6 Steuerungsinstrumente und deren Auswirkung auf eine Elektrifizierung des städtischen Wirtschaftsverkehrs

(J. Linssen; W.-H. Arndt)

Das Ziel der Bundesregierung, bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge im Bestand zu haben, wird bei den derzeitigen Neuverkaufszahlen von EV und erwarteten Steigerungsraten nicht zu halten sein. Am Stichtag 1. Januar 2016 waren 25.502 EV und 130.365 HEV im Bestand der Personenkraftwagen in Deutschland zugelassen (Kraftfahrt-Bundesamt, 2016). In der Fahrzeugklasse der Lkw waren es zum 1. Januar 2015 knapp 4.000 Lastkraftwagen; maßgebliche Lastkraftwagen mit Nutzlasten kleiner einer Tonne (Kraftfahrt-Bundesamt, 2015a). Die nationale Plattform Elektromobilität, ein Beratungsgremium der Bundesregierung mit ca. 150 Vertretern aus Industrie, Wissenschaft, Politik, Gewerkschaften und Verbänden, hat im Jahr 2014 eine Zielkurve für einen denkbaren Markthochlauf veröffentlicht (vgl. Abbildung 126). Es lässt sich derzeit eine deutliche Diskrepanz zwischen den Zielen und dem tatsächlichen Markthochlauf feststellen. Die Zielerreichung der Bundesregierung ist somit fraglich, falls der aktuelle Trendfortschritt anhält. Die Zielerreichung der Bundesregierung ist somit fraglich, falls der aktuelle Trendfortschritt anhält. Die Zielerreichung der Bundesregierung ist somit fraglich, falls der aktuelle Trendfortschritt anhält. Die Zielerreichung der Bundesregierung ist somit fraglich, falls der aktuelle Trendfortschritt anhält.

Abbildung 126: Zielkurve Marktentwicklung



Quelle: Nationale Plattform Elektromobilität, 2014

In diesem Kapitel werden mögliche Maßnahmen zur Förderung des Einsatzes elektrischer Straßenfahrzeuge zuerst detailliert beschrieben und anschließend Klassifizierungsmethoden vorgestellt und angewendet. Insbesondere wird der Schwerpunkt auf Maßnahmen gelegt, welche die Elektrifizierung des Wirtschaftsverkehrs gezielt fördern können. Die Liste der Maßnahmen erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, sondern repräsentiert den Status quo bis Ende April des Jahres 2016.

## 4.6.1 Übersicht der Maßnahmen

### Sonder-AfA

Die geplante Sonderregelung bei der Abschreibung (Sonderregelung zur Absetzung für Abnutzungen – kurz Sonder-AfA) von EV erlaubt den Abschreibungsverlauf für Käufer positiv zu verändern. Damit richtet sich diese Maßnahme ausschließlich an gewerbliche Halter, die die zeitliche Minderung des Fahrzeugwerts steuerlich geltend machen können. Normalerweise werden Fahrzeuge linear abgeschrieben, sodass jedes Jahr der gleiche Betrag über einen bestimmten Zeitraum als Aufwand mit dem Gewinn verrechnet werden darf. Durch die diskutierte Sonder-AfA soll es für Elektrofahrzeuge möglich sein, im ersten Jahr 50 % der Anschaffungskosten abzuschreiben (Nationale Plattform Elektromobilität, 2011). Dadurch ergeben sich für den Käufer zwei Vorteile:

- Das Unternehmen hat einen Liquiditätsvorteil im Jahr der Anschaffung.
- Es bleibt auf Grund des Zinseffektes ein Barwertvorteil im Vergleich zur normalen Abschreibungsvariante.

Die geplante Sonderabschreibung soll nur für die Anschaffung von neuen EV inklusive deren Ladeinfrastruktur am Unternehmensort gelten, welche ab der Anschaffung zum Anlagevermögen des Unternehmens gehören.

Insgesamt werden über die Abschreibungsjahre keine Ertragssteuern gespart, da die Abschreibungssumme unverändert bleibt. Die Steuerlast von Unternehmen werden somit zeitlich nach hinten verschoben, so dass über die Abschreibungsdauer keine Ertragssteuerausfälle für die öffentliche Hand entstehen (Nationale Plattform Elektromobilität, 2011). Die geplante Sonder-AfA wird von vielen Quellen als wirksames und wichtiges Mittel angesehen. Die NPE sieht es zusammen mit einem weiteren Infrastrukturaufbau als „den größten Hebel zur Erhöhung der Zulassungszahlen“ (Nationale Plattform Elektromobilität, 2014) im gewerblichen Bereich. Ähnlich schätzen Plötz et al. (2013) die Sonder-AfA ein. Es wird zusätzlich angemerkt, dass diese Politikmaßnahme „besonders hervorzuheben“ ist, da sie im Vergleich zu Steuerungsinstrumenten mit ähnlichen Bestandsprognosen „deutlich geringere Mitnahmeeffekte aufweist“. Zu einer differenzierten Sichtweise kommt eine andere unabhängige Analyse (Dudenhöffer, 2015). Der Artikel erkennt an, dass die Maßnahme wirkt. Doch dieser positive Effekt wird nur als kurzfristig eingeschätzt.

Zum Redaktionsschluss ist das Gesetz zur steuerlichen Förderung der Elektromobilität in der parlamentarischen Beratung. Eine detaillierte Beschreibung der Ausgestaltung dieser Maßnahme ist daher in diesem Buch noch nicht möglich.

### Kaufpreisminderung

Eine Kaufpreisreduktion oder Investitionszuschuss kann in verschiedenen Varianten ausgestaltet werden. So kann es sich um eine direkte Minderung des Kaufpreises handeln oder in Form von zinsvergünstigten Darlehen mit Tilgungszuschüssen, so dass nur ein Teil der Kreditsumme zurückgezahlt werden muss. Letzteres findet zum Beispiel derzeit Anwendung beim PV-Batteriespeicher-Förderprogramm der KfW Bankengruppe. Der im Mai 2016 verabschiedete Gesetzesentwurf der Bundesregierung sieht eine Kaufprämie für EV mit einer direkten Minderung des Kaufpreises vor. Seit mehreren Jahren wurde bereits

intensiv über die Einführung einer Kaufprämie für Elektrofahrzeuge zwischen der Bundesregierung und den Automobilvertretern verhandelt. Im Februar 2016 fand dann ein erneutes Spitzentreffen zwischen Automobilindustrie und Bundesregierung statt. Strittigster Punkt eines möglichen Marktanreizprogramms ist die Aufteilung der Kosten zwischen Industrie und öffentlicher Hand. Am 18. Mai 2016 hat die Bundesregierung die Einführung der Kaufprämie zusammen mit weiteren Maßnahmen beschlossen. Käufer eines BEV bekommen demnach 4.000 Euro Prämie, für PHEV sind 3.000 Euro vorgesehen. Es ist eine Obergrenze für den Kaufpreis in der Basisvariante von 60.000 € vorgesehen, bei deren Überschreitung keine Förderung mehr stattfindet. Die Kosten der Kaufprämie werden jeweils zur Hälfte vom Bund sowie der Automobilindustrie getragen. Die Gesamtförderung ist auf 1,2 Mrd. € gedeckelt. Weiterhin enthält das Maßnahmen-Paket eine Förderung der öffentlichen Ladeinfrastruktur und des teilöffentlichen Ladens am Arbeitsplatz. Ob mit dieser Maßnahme eine deutliche Steigerung des deutschen Elektrofahrzeugabsatzes erreicht werden kann, bleibt abzuwarten.

In verschiedenen Studien wird versucht, die Wirkung einer Kaufpreisminderung sowie deren Vor- und Nachteile zu untersuchen. In der Untersuchung von Plötz et al. (2013) werden direkte Kaufpreisminderungen von 1.000 € und 2.000 € untersucht. Das Ergebnis der Analyse zeigt, dass unter den getroffenen Annahmen der Rechnungen bei einer Zugabe von 2.000 € einen Bestand von über 1,8 Mio. Elektrofahrzeugen bis 2020 generiert werden könnte. Die Studie weist eine große Sensitivität gegenüber der Höhe des Subventionsbetrages aus. Bei 1.000 Euro staatlich gewährten Neupreisnachlass sinkt laut der Analyse der erzielbare Effekt um über 50 % auf ca. 800.000 EV im Jahr 2020 ab. Im Vergleich zu anderen Anreizmaßnahmen zeigt die Pauschalsubvention den größten Einfluss auf die erreichbaren EV-Bestandszahlen. Es ist zu beachten, dass eine Pauschalsubvention nicht nur gewerbliche Halter erreicht, sondern alle Haltergruppen anspricht. Dieser Umstand erklärt den größeren Effekt im Vergleich zur Sonder-AfA. Es wird außerdem erwähnt, dass im Besonderen die „kleineren, gewerblich genutzten Fahrzeuge mit niedrigeren Kaufpreisen“ profitieren. In der Studie wird eine degressive Komponente der Kaufprämie unterstellt, um eine Anpassung an erwartete sinkende Anschaffungspreise vorzunehmen. Im Vergleich zur Sonder-AfA verursacht die Kaufpreissubvention deutlich höhere Mitnahmeeffekte. Dies ist damit zu erklären, dass auch jene Käufer subventioniert werden, die sich auch ohne Kaufprämie für ein Elektrofahrzeug entschieden hätten. Ein weiteres Argument gegen pauschale Kaufanreize ist die negative Beeinflussung von Kostensenkungen aufgrund von Lernkurven und Skaleneffekten in einem startenden Markt. Dies kann dazu führen, dass Produkte künstlich verteuert werden, da Pauschalsubventionen über den Preisdifferenzen von herkömmlichen und neuartigen Techniken liegen. Bezüglich der gewerblichen Nutzung von EV kommt die Studie zum Ergebnis, dass bei Pauschalsubventionen schon „geringe finanzielle Anreize im gewerblichen Bereich ausreichen, um den Bestand deutlich zu steigern“.

Eine weitere Analyse zu Kaufpreisminderungen ist in Peters et al. (2013) zu finden. Die Studie zeigt ein Bonus-Malus-System als Weiterentwicklung einer starren Kaufprämie auf, welches sich an dem französischen Modell beim Fahrzeugneukauf orientiert. Bei diesem System erhalten Autokäufer in Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Emissionen ihrer Fahrzeuge entweder einen Zuschuss oder zahlen einen Aufschlag auf den Kaufpreis. Beispielsweise beträgt der Malus in Frankreich 8.000 € bei einem CO<sub>2</sub>-Ausstoß von mehr als 201 g/km (Französische Botschaft, 2015). Dieses Fördersystem kann so ausgestaltet werden, dass es sich steueraufkommensneutral verhält. Da die in der EU neu verkauften EV aufgrund der Tank-

to-Wheel-Bilanzierung des Verbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen (im Vergleich zur Well-to-Wheel-Bilanzierung exklusive direkte vorgelagerten Emissionen der Kraftstoff- bzw. Stromproduktion) als Null-Emissions-Fahrzeuge gelten, würden die Käufer dementsprechend einen Bonus für den EV-Neukauf bekommen. Peters et al. betonen, dass die Zielsetzung die Höhe der monetären Förderung festlegt (Peters et al., 2013). Diese sind beispielsweise positive Umweltwirkungen, volkswirtschaftliche Wachstumsimpulse oder die politische Forderung nach Bestandszielen. Bei positiven Umweltwirkungen ist zu beachten, dass Rebound-Effekte bei zu hoher Subvention auftreten. Dies bedeutet, dass zwar verhältnismäßig viele Elektrofahrzeuge in den Markt kommen, jedoch auch in „großem Maße Personen zum Kauf motiviert werden, welche sich ansonsten kein Auto angeschafft hätten“. Das Bonus-System sollte daher genau an die politischen Ziele angepasst sein.

### **Dienstwagenbesteuerung**

Die Dienstwagenbesteuerung betrifft die private Nutzung von gewerblich angeschafften Fahrzeugen (sogenannte Dienstwagen). Dienstwagen müssen bei privater Nutzung nach dem Einkommensteuergesetz (EStG) versteuert werden, da sie einen geldwerten Vorteil darstellen. Bei der monatlichen Besteuerung kann entweder ein Pauschalbetrag angesetzt werden oder mittels eines Fahrtbuches nur der private Fahranteil besteuert werden.

Der Pauschalbetrag des geldwerten Vorteils bestimmt sich durch die sog. Ein-Prozent-Regelung. Es muss ein Prozent des angesetzten Bruttolistenpreises versteuert werden, unabhängig der Kaufsumme. Dazu addiert sich ein Zuschlag in Höhe von 0,03 % des Bruttolistenpreises je Entfernungskilometer zwischen Wohnung und Arbeitsplatz. Die Regelung wirkt sich nachteilig auf die Anschaffung und Besteuerung von EV-Dienstwagen aus, da die im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen höheren Listenpreise sich durch höhere zu versteuernde geldwerte Vorteile auswirken. Ein Kauf von EV-Dienstwagen erscheint bei privater Nutzung daher nachteilig.

Die Dienstwagenbesteuerung für EV wurde im Jahr 2013 (veröffentlicht am 29.06.2013 im Bundesgesetzblatt) dementsprechend angepasst. Sie reduziert den Listenpreis um einen gestaffelten Pauschalbetrag in Abhängigkeit der Batteriegröße und dem Erstzulassungsjahr. Der Listenpreis von EV reduziert sich mit Erstzulassungsjahr 2013 um 500 Euro pro installierte kWh Batterie-Nennkapazität (vgl. § 6 Abs. 1 Nr. 4 S. 2 EStG). Die Minderungsbeiträge steigen dabei linear mit der Batteriegröße bis zum festgelegten Maximalbetrag von 10.000 €. Die Reduktion des Listenpreises nimmt für Fahrzeuge mit späteren Zulassungsjahren um 50 €/kWh pro Jahr ab und der Maximalbetrag wird um 500 Euro pro Jahr abgesenkt. Die Neuregelung ist auf BEV, REEV und PHEV anwendbar. Eine umfassende Bewertung der Effektivität dieser Maßnahme steht derzeit noch aus. Für den gewerblichen Bereich dürfte sich diese Maßnahme nur mäßig auswirken, da sich für die gewerblichen Besitzer keine monetären Vorteile ergeben. Für den privaten Nutzer von gewerblichen Fahrzeugen dürfte die Maßnahme zur Steigerung der ökonomischen Attraktivität beitragen.

### **Nicht monetäre Maßnahmen**

Im Jahr 2015 wurde das Elektromobilitätsgesetz (EmoG) verabschiedet. Ziel des Gesetzes ist der Aufbau von Privilegien für die Nutzung von EV, um die Markteinführung der Technik positiv zu beeinflussen. Es wird mit diesem Bundesgesetz der Rechtsraum sowohl für nicht-

monetäre Anreize wie zum Beispiel Sonderparkrechte für EV oder die Freigabe von Sonderfahrspuren (sogenannte Busspuren) für EV als auch für monetäre Anreize (z.B. die Befreiung von Parkgebühren) geschaffen. Die nicht monetären Maßnahmen zielen darauf ab, die Nutzer von EV im Alltag zu begünstigen. Die jeweilige Planung und Umsetzung der Maßnahmen obliegt jeweils den Kommunen vor Ort (Matthies et al., 2016).

Die Gewährung von nicht direkt monetären Anreizen durch die Privilegierung von EV im Straßenverkehr ist meist nicht mit einer Belastung des Haushaltes von Kommunen verbunden. Sehr wohl können jedoch indirekte Ausgaben z.B. durch wegfallende Parkgebühren entstehen. Je nach Maßnahme kann das individuelle Interesse am Kauf von EV erhöht werden. Jedoch entfalten diese Maßnahmen mit differenter Ausprägung des persönlichen Nutzens sehr unterschiedliche Wirkungen. Dies muss bei Umsetzung nicht monetärer Anreize beachtet werden. Eine Steuerbarkeit der Anreize und der gesetzten politischen Ziele ist dadurch mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet (Matthies et al., 2016).

Bezogen auf die Nutzung von EV im Wirtschaftsverkehr kann beispielsweise die Nutzung von Busspuren sich positiv durch das schnellere Zurücklegen von insbesondere innerstädtischen Fahrten bemerkbar machen (Kuhr, 2014). Ein weiterer Vorschlag zielt besonders auf die KEP-Branche ab. EV können längere Zufahrtszeiten für Innenstädte erhalten und so einen Teil der Lieferungen aufgrund von geringerer Lärmemissionen in den Nachstunden zustellen und dadurch produktiver arbeiten (Aichinger, 2014). Weitere Anreize sind Parkplatzprivilegien für gewerblich genutzte EV. Dies kann den Vorteil von kürzeren Güterentladezeiten oder sonst nicht möglichen Belieferungen bringen.

Peters et al. machen zusätzlich deutlich, dass nicht monetäre Maßnahmen nicht der Förderung des Öffentlichen Personennahverkehrs hinderlich sein dürfen bzw. „einer Verlagerung auf den ÖPNV entgegenstehen“ (Peters et al., 2013). Dies ist vor allem in Verbindung mit dem Vorschlag zur Nutzung von Busspuren zu sehen. Gleichzeitig macht die Studie deutlich, dass nicht monetäre Anreize Mehrpreise von Elektrofahrzeugen weniger kompensieren können als monetäre Anreize. Insbesondere bei gewerblichen Kunden ist davon auszugehen, dass diese Ungleichgewichtung zwischen nicht monetären und monetären Maßnahmen noch ausgeprägter ist. Mit der Erkenntnis, dass bei gewerblichen Käufern das Kostenkriterium über die Fahrzeugwahl entscheidet, lässt sich folgern, dass nicht-monetäre Anreize bei der Kaufentscheidung im Wirtschaftsverkehr eher eine untergeordnete Rolle spielen werden.

Bezüglich des nicht-monetären Anreizes zur Nutzung von Sonderfahrspuren weisen der Deutsche Städtetag und der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV) sowie zahlreiche Fachexperten auf „den marginalen Nutzen für eine Marktdurchdringung im Verhältnis zu der Verschlechterung des Verkehrsablaufes, den entstehenden Kosten für temporäre Umgestaltungen, den kontraproduktiven Auswirkungen auf eine ressourcenschonende Verkehrsbewältigung und die netzweite ÖPNV-Betriebsqualität, von einer Freigabe von Busspuren für Elektroautos“ hin (DST/VDV, 2015).

Häufig zielen die nicht monetären Anreize auf Ballungsräume ab und sind dadurch häufig nur auf Städte, besonders Innenstädte, fokussiert. Auch bleibt die Frage offen, ob Städte und Kommunen ein ernsthaftes Interesse an der Gewährung von Sonderrechten haben. Die derzeitig eher auf einige wenige Kommunen fokussierte Umsetzung deutet darauf hin, dass die mit den Maßnahmen verbundenen Kosten von einigen Kommunen nicht getragen werden können oder getragen werden wollen.

Es lässt sich also festhalten, dass nicht monetäre Anreize zwar die Attraktivität von Elektromobilität steigern. Im Vergleich zu monetären Maßnahmen erzielen sie aber insbesondere für gewerbliche Käufer keine analogen Wirkungen. Sie ersetzen keine monetären Steuerungsinstrumente, sondern sind vielmehr als zusätzliche Maßnahmen einzuschätzen. Daneben kann die aktuelle Umsetzung der nicht monetären Anreize hinterfragt werden, da das Elektromobilitätsgesetz in seiner jetzigen Form kaum zu effektiven Maßnahmen führt.

### **Ladeinfrastruktur**

Im Zusammenhang mit dem Erfolg von Elektromobilität wird immer wieder das Fehlen einer ausgebauten öffentlichen Ladeinfrastruktur bemängelt, die der Elektromobilität zum Durchbruch fehlt. Es wird ein deutlicher Ausbau von Ladesäulen im öffentlichen Raum gefordert. Aufgrund der eingeschränkten Reichweite von Elektrofahrzeugen entsteht subjektiv das Gefühl, dass ein Fehlen weiterer Ladesäulen ein großes Hemmnis darstellt. Beispielsweise fordert die Nationale Plattform Elektromobilität den „Aufbau einer bedarfsgerechten, flächendeckend verfügbaren und komfortablen öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur“ (Nationale Plattform Elektromobilität, 2014).

Für den Wirtschaftsverkehr ist der Ausbau der Ladeinfrastruktur als weniger relevant einzuschätzen. Dies hängt mit der Art der Fahrzeugverwendung zusammen. Die vorliegende Studie Ketelaer (2012) zeigt, dass die meisten Wirtschaftsbereiche genügend nächtliche Standzeiten haben, um die Batterie in den Standzeiten aufzuladen. Aufgrund der guten Vorhersehbarkeit und Planbarkeit der gewerblichen Fahrten kann davon ausgegangen werden, dass gewerbliche Fahrzeuge zum überwiegenden Anteil auf Firmengeländen, Betriebshöfen oder beim Fahrer zu Hause geladen werden können. Eine öffentliche Ladeinfrastruktur für gewerbliche Fahrer scheint daher eher eine untergeordnete Rolle zu spielen. Ein Nachladen am Tage kann durch abgestimmte Tourenplanung und an die Transportaufgaben angepasste Reichweiten vermieden werden. Die öffentlichen Ladesäulen verbleiben also nur für einen geringen Teil der gewerblichen Elektrofahrzeuge von Bedeutung. Abschätzungen in Ketelaer (2012) zeigen, dass ein Großteil des Fahrstroms der EV im Wirtschaftsverkehr aus gewerblichen (auf Betriebshöfen oder Firmengeländen) oder halböffentlichen Ladestationen stammen wird.

Für den Privatverkehr spielt eine flächendeckende Ladeinfrastruktur durchaus eine wichtige Rolle, da private Nutzer von Elektrofahrzeugen ein weniger planbares Fahrverhalten aufzeigen und teilweise über keine Heimlademöglichkeiten verfügen. Im Einkommensteuergesetz werden nach dem Regierungsbeschluss vom 18. Mai 2016 die vom Arbeitgeber gewährten Vorteile des Ladens eines privaten genutzten EV am Arbeitsplatz und der privaten Nutzung zeitweise überlassene betriebliche Ladevorrichtung steuerbefreit.

## **4.6.2 Klassifizierung von Maßnahmen**

Weltweit sind die Marktanziehmeechanismen zur Elektromobilität sehr vielfältig, von den jeweiligen politischen Zielen, gesellschaftlichen Leitbildern, Marktssystemen, ökologischen Vorgaben und weiteren Faktoren abhängig. Eine Priorisierung von Maßnahmen kann daher nur vor dem jeweiligen nationalen Rahmen und für bestimmte Zeitperioden getroffen werden. Eine Übersicht über die in der EU angewendeten Anreize kann zum Beispiel aus Linssen et al. (2012); Bernhart et al. (2012) und Farhan (2016) entnommen werden. Da die

Dynamik in dem jungen Markt der EV sehr hoch ist, kann immer nur eine punktuelle Aufnahme des Status Quo der Anreizsysteme gemacht werden. Die Vielzahl von Maßnahmen zum Kaufanreiz von Elektrofahrzeugen im privaten und gewerblichen Bereich, deren Wirkmechanismen, deren Steuerbarkeit, deren Wirksamkeit (kurz- und langfristig) und insbesondere deren Finanzierung macht eine Übersicht und Einteilung notwendig. Im Folgenden werden anhand von Literatur kurz verschiedene Möglichkeiten der Einordnung von EV-Marktanreizmechanismen diskutiert.

Nach Proff (2012) gibt es drei Arten des Anreizes: „indirect technology support“, „direct technology support“ und „public purchasing incentives“. Indirekte Hilfen sind Steuervergünstigungen; direkte Unterstützung sind z.B. Investitionszuschüsse und die dritte Klasse der indirekten Anreizsysteme umfasst z.B. die Benutzung von Sonderfahrspuren.

Einer anderen Einteilung der Maßnahmen gehen Peters et al. (2013) nach. Die möglichen Maßnahmen werden in ihren Wirkungseigenschaften und der Art, wie sie auf den Markt wirken, eingeteilt. Die einzelnen Maßnahmen können auf „Synergien bzw. Konflikte“, „Privat- und Wirtschaftsverkehr“ und „weitere alternative Technologien“ untersucht werden. Der erste Parameter („Synergien & Konflikte“) soll aufzeigen, inwiefern verschiedene Maßnahmen sich gegenseitig beeinflussen. Sie können ein zusätzliches Potenzial entfalten oder aber ein gegenseitiger Konflikt behindert einzelne Maßnahmen. Die Wirkungseigenschaft „Privat- und Wirtschaftsverkehr“ identifiziert die Zielgruppen von Maßnahmen. Steuerungsinstrumente stellen einen Anreiz für den Privatverkehr, den Wirtschaftsverkehr oder den gesamten Straßenverkehr dar, je nachdem wie sie ausgestaltet sind. Das Merkmal „weitere alternative Technologien“ schätzt die Technologieoffenheit von Anreizmaßnahmen ein. Damit sind technologieübergreifende Maßnahmen gemeint, die nicht exklusiv nur die Elektromobilität fördern. Dahinter steht der Gedanke, dass auch andere Antriebsarten, wie beispielsweise das Brennstoffzellenfahrzeug, einen positiven Beitrag zur Emissionsreduktion leisten können und somit auch Klimaschutzziele unterstützen (Peters et al., 2013).

Eine weitere Klassifizierung von Steuerungsinstrumenten differenziert nach dem Merkmal der Kostenentstehung. Die Einordnung orientiert sich daran, ob Maßnahmen staatliche Kosten verursachen oder ohne die Aufbringung von staatlichen Geldmitteln umsetzbar sind. Es werden nur die Ausgaben betrachtet. Mögliche Folgeeinnahmen werden nicht mit berücksichtigt. Anschaulich bedeutet dies, dass ein Instrument, welches im späteren Verlauf über seine Wirkungskette für Staatseinnahmen sorgt und eine positive Gesamtbilanz aufweist, als monetärer Mehraufwand bewertet wird. Diese Art der Einteilung findet bei der NPE Anwendung (Nationale Plattform Elektromobilität, 2014; Nationale Plattform Elektromobilität, 2011) und wird ebenso von Peters et al. (2013) genutzt doch lediglich, um die Maßnahmen danach zu strukturieren.

## 5. Ausblick

(S. Marker unter Zuarbeit aller Partner)

Es konnte gezeigt werden, dass die Elektrifizierung von Flotten im Wirtschaftsverkehr und die daraus resultierende Netzbelastung technisch unproblematisch ist. In den meisten Fällen ist die im Vergleich zu ICEV geringere verfügbare Reichweite zwischen zwei Ladefenstern kein limitierender Faktor. Die notwendigen zukünftigen Entwicklungen sollten vor allem in folgenden Bereichen liegen:

- Optimierung des Flottenmanagements: Der Einsatz rein batterieelektrisch angetriebener Fahrzeuge erfordert möglichst festgelegte, planbare Routen von gleicher oder ähnlicher Streckenlänge je Entladezyklus. Innerhalb einer Flotte wäre es vorteilhaft, die einzelnen Fahrzeuge so zu disponieren, dass die Abweichungen von der mittleren täglichen Wegstrecke gering sind, also jedes Fahrzeug ein möglichst homogenes Fahrprofil hat.
- Optimierung des Strommixes: EV sind zwar lokal emissionsfrei, für die Gesamtenergiebilanz kommt dem jeweiligen Strommix jedoch eine entscheidende Bedeutung zu. Je mehr regenerativ erzeugte Energie eingespeist wird, desto günstiger fällt die Gesamtenergiebilanz der elektrifizierten Flotte aus.
- Systemdienstleistungen und Fahrzeugmodelle: Die Bereitstellung von Regelleistung ist für Flottenbetreiber besonders dann interessant, wenn große Flotten (ab 500 Fahrzeuge) beteiligt sind und in der Lage sind, positive Sekundärregelleistung bereitzustellen. Dafür müssen geeignete Geschäftsmodelle entwickelt und notwendige Infrastruktur bereitgestellt werden. Ähnliches gilt für die Verfügbarkeit auf dem Fahrzeugmarkt für EV-Flotten. Bislang existieren gerade für größere Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebstrang nur wenige Modelle in geringen Stückzahlen. Ebenso gibt es keinen etablierten Zweitmarkt, obwohl der Wiederverkaufswert im traditionellen Geschäftsmodell ein entscheidender Faktor für eine Kaufentscheidung des Flottenbetreibers ist.
- Verbesserung der elektrischen Speicher: Um einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz der Fahrzeugspeicher kommerzieller Flottenfahrzeuge für Systemdienstleistungen zu realisieren, ist ein Betrieb in einem moderaten Betriebsbereich (Strombelastung von 61,1 % des erlaubten maximalen Ladestroms) und in einem raumtemperaturähnlichen Temperaturbereich vorteilhaft. Die Ladestrategie sollte außerdem einen Kompromiss finden zwischen möglichst geringen Standzeiten bei hohem SOC und möglichst wenig Ladevorgängen bei ausgekühlter Batterie. Hier ist wegen der Wetterabhängigkeit ein flexibles Modell gefragt, womöglich in Kombination mit Systemdienstleistungen während der Standzeit, die zum Beispiel das Auskühlen der Batterie vermeiden können.
- Gesamtenergieerzeugung im Verkehrssektor: Mit Fokus auf die CO<sub>2</sub>-Reduktion ist ein komplexes Geflecht an Randbedingungen zu beachten, z.B. die Ladestrategie und die Wettersituation. Gemäß den Zielen der Energiewende können EV Bestandteil kostenoptimaler Reduktionsstrategien sein. Insbesondere das Ziel zur Endenergieeinsparung im Verkehr (40 % bis 2050) erweist sich als wichtiger Treiber

für EV im Privat- und Wirtschaftsverkehr. Das größte Einsparpotenzial an PM- und CO-Emission ist allerdings im Schwerlastverkehr zu erwarten. Inzwischen gibt es Ansätze, größere Nutzfahrzeuge zu elektrifizieren (z.B. E-Force), der Rückgang der Belastung ist aber mittelfristig eher bei der Verbesserung der Filtertechnik bzw. Nachrüstung von Katalysatoren zu sehen. Elektrofahrzeuge spielen eine sekundäre Rolle.

- Ladeinfrastruktur: Bislang wurden nur Lademöglichkeiten am Betriebshof und eventuell am Zielort einbezogen. Eine größere Zahl an Lademöglichkeiten kann die Bereiche Flottenmanagement und Kostenoptimierung der Flotte positiv beeinflussen.

## 5.1 Schlussfolgerung

Das Projekt komDRIVE verfolgte einen modellbasierten Ansatz, um die Frage zu beantworten, unter welchen Randbedingungen der Einsatz von Elektrofahrzeugen im städtischen Wirtschaftsverkehr vorteilhaft für die Energieversorgung und technisch, ökonomisch und ökologisch sinnvoll für Flottenbetreiber, Stromerzeuger und Verteilnetzbetreiber ist. Es griff dabei das zentrale Ergebnis des Vorgängerprojektes NET-ELAN (Linssen, 2012) auf, dass sich Flottenfahrzeuge prinzipiell gut für die Elektrifizierung eignen.

Die Analyse von 74 Pkw-, 123 3,5-t-Lkw- und 58 12-t-Lkw-Fahrzyklen, sowie eine vertiefende Auswertung existierender Erhebungsdaten zeigte, dass der Anteil an rein elektrisch zurücklegbaren Streckenanteilen im städtischen Wirtschaftsverkehr zwischen 70 % (alle 3,5-t-Lkw) und 100 % (alle 12-t-Lkw) liegt. Daraus wurde geschlossen, dass es viele Einzelfahrzeuge innerhalb verschiedener Flotten gibt, die als BEV fahren könnten. Es sind allerdings sowohl allgemeine als auch individuelle Randbedingungen zu berücksichtigen: So ist die Inhomogenität der individuellen Fahrprofile innerhalb einer Branche oft sehr hoch. Es kann also kein einzelner Zweig des Wirtschaftsverkehrs als besonders (un-)geeignet identifiziert werden. Darüber hinaus ist der individuelle Fahrstil direkt für den Energieverbrauch relevant, wie die längsdynamische Verbrauchssimulation von insgesamt drei Triebstrang-, drei Fahrzeugklassenvariationen sowie sechs Aufbauarten bei Lkw zeigte. Obwohl die Simulationsergebnisse auf eine Verbrauchsreduzierung um 8 %-15 % bis 2030 für alle Fahrzeugkonfigurationen gegenüber aktuellen Fahrzeugen mit Dieselantrieb hinweisen, müssen weitere Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion ergriffen werden, um das von der EU postulierte Emissionsziel von 95 g/km CO<sub>2</sub> im Zeitraum zwischen 2022 bis 2024 zu erreichen.

In diesem Zusammenhang interessant ist das Simulationsergebnis, dass zwar die Höhe der Zuladung einen entscheidenden Einfluss auf den Verbrauch hat, das Zuladeprofil jedoch nicht. Es macht also – zumindest bei Berliner Topographie – keinen Unterschied, ob die Flotte 50 % der Strecke voll beladen und 50 % der Strecke leer unterwegs ist oder ob die gesamte Strecke mit etwa gleichbleibender Zuladung absolviert wird. Dieses Ergebnis ist für die Routenplan-Optimierung relevant.

Die Nutzerbefragung ergab, dass aus Sicht des Fahrers und/oder Flottenbetreibers besonders wichtig zu wissen ist, ob die Batteriekapazität für das Absolvieren der Tagesfahrstrecke ausreicht, welche Ladeinfrastruktur genutzt werden kann und ob/welche Fahrzeugmodelle verfügbar sind. Insbesondere für größere Nutzfahrzeuge gibt es nur wenige verfügbare Modelle. Es kann gefolgert werden, dass die in der Befragung zum Ausdruck gekommene

mangelhafte Informationslage bzw. die Unwissenheit bezüglich möglicher neuer Informationsquellen ein großes Hemmnis für die Elektrifizierung von Flotten des städtischen Wirtschaftsverkehrs darstellt.

Im Rahmen des Netzmodells wurde das Zusammenspiel von Ladestrategie, technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, unter der Bedingung, möglichst CO<sub>2</sub>-neutral und kostenoptimal zu fahren und zu laden, dass die Entwicklung kostenoptimaler Ladestrategien forciert werden sollte. Sowohl die Energiebezugskosten können so gesenkt als auch die EV-Durchdringung im Netz gesteigert werden. Der Mehrbedarf der Einspeisung von Energie aus regenerativen Quellen stellt für die Ladestrategie auf der Fahrzeug- und Flottenebene kein Hindernis dar, ist aber sehr stark von der Netzverfügbarkeit abhängig. Daraus kann gefolgert werden, dass der Fokus für die zukünftige Entwicklung im Bereich des Netzausbaus und geeigneter Ladestrategien liegen sollte. Parallel kann das Angebot an Systemdienstleistungen auf- und ausgebaut werden.

Als größtem Kostenfaktor im Elektrofahrzeug kommt der Batterie eine besondere Bedeutung zu. Die Ergebnisse der Batterieanalyse (Messung, Simulation) zeigen, dass die Batteriegesundheit durch zusätzliche Systemdienstleistungen (vor allem gesteuertes Laden) im passenden Betriebsbereich (Raumtemperatur, keine langen Standzeiten bei hohem SOC) kaum durch zusätzliche Degradation geschädigt wird. Dementsprechend sollte ein gutes Thermomanagement ebenso entwickelt werden wie eine praktikable Ladestrategie, die die wohltemperierte Batterie erst möglichst kurz vor der nächsten Fahrt auflädt.

Die angesprochenen Teilgebiete liefern für sich stehend deutliche und auf einen Großteil der betrachteten Flotten übertragbare Ergebnisse. Projektziel ist, diese auch transdisziplinär und ganzheitlich zu betrachten. Deshalb wurden die einzelnen Modellbereiche vernetzt, also eine (fiktive) EV-Flotte des städtischen Wirtschaftsverkehrs angenommen und deren lokale und nationale Auswirkungen auf Ökologie und Energieversorgung betrachtet. Mit diesem Testfeld-Modell-Ansatz konnte zudem eine vom Güterverkehr losgelöste Variante des Wirtschaftsverkehrs einbezogen werden. Er zeigt, dass zwar eine signifikante Verbesserung der lokalen Emissionsbelastung im Wirtschaftsverkehr bis 2030 erwartet werden kann, diese aber zum Großteil auf bessere Filter und Katalysatoren in konventionell angetriebenen, größeren Nutzfahrzeugen zurückgeht. Elektrofahrzeuge spielen aufgrund ihrer auch für die Zukunft als gering angenommenen Stückzahl in der entsprechenden Fahrzeugkategorie (Lkw > 3,5 t) eine untergeordnete Rolle. Folglich kann die Elektrifizierung gewerblicher Flotten allenfalls einen Beitrag zur Verringerung der Luftschadstoffemissionsbelastung leisten.

Betrachtet man die Situation aus Sicht des Energieversorgungssystems über die Region hinaus für ganz Deutschland, stellt sich heraus, dass die angenommene Stückzahl zusätzlicher Elektrofahrzeuge aus WIV-Flotten keine signifikanten Auswirkungen auf das Energieversorgungssystem in Deutschland hat. Es muss entsprechend keine Kraftwerksleistung zugebaut werden. Eine Mehrauslastung bestehender Kapazitäten genügt. Elektrofahrzeuge können im Rahmen der Energiewende Bestandteil kostenoptimaler CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategien sein. Insbesondere das Ziel zur Endenergieeinsparung im Verkehr (40 % bis 2050) ist ein wichtiger Treiber für den Einsatz von Elektrofahrzeugen im Wirtschaftsverkehr.

Für die wissenschaftliche Methodik kann festgehalten werden, dass die wenigen existierenden EV-Nutzer sehr häufig für wissenschaftliche Studien, insbesondere

Befragungen, angefragt werden, was in einer gewissen Antwortmüdigkeit resultiert. Hier wäre eine verbesserte Koordination, z.B. durch eine übergeordnete Begleitforschung oder einen mehrfach nutzbaren allgemeinen Teil und einen sehr spezifischen speziellen Teil womöglich eine Option.

## 5.2 Zukünftiger Forschungsbedarf

Es lässt sich zusammenfassend feststellen, dass der Einsatz von Elektrofahrzeugen im städtischen Wirtschaftsverkehr technisch realisierbar und je nach Fahrzeugklasse und geplanter Route 70 %–100 % der Tagesfahrstrecke rein elektrisch zurückgelegt werden kann. Legt man die gewünschten EV-Zuwachsraten der Bundesregierung zu Grunde, wird kein Kraftwerkszubau für den Betrieb dieser Fahrzeuge benötigt. Sie sind eine zusätzliche Last im Verteilnetz bzw. Energiesystem, die bei ungesteuertem Laden ab einer Marktdurchdringung von 2 % kritische Betriebspunkte im Verteilnetz hervorrufen können. Für den aus ökologischer Sicht wertvollen Zuwachs an eingespeicherter Energie aus regenerativen Quellen ist die Anbindung von Elektrofahrzeugen als Abnehmer vorteilhaft. An einem Sommertag können bis zu 70 % des mobilen Bedarfs durch PV gedeckt werden. Limitierender Faktor ist hier die Netzverfügbarkeit.

Aus Nutzersicht steht die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge im Vordergrund. Diese ist aus betriebswirtschaftlicher Perspektive eng an das Vorhandensein innovativer Fahrzeugbeschaffungs- und Betreibermodelle und das Wissen darum geknüpft. Vom technischen Standpunkt her betrachtet, stellt nach wie vor die Batteriebensdauer den wichtigsten Faktor im Zusammenhang mit der Wirtschaftlichkeitsbewertung dar. Zusätzliche Alterungsprozesse bei der Nutzung der Batterie für Systemdienstleistungen, wie sie für Stromerzeuger und Verteilnetzbetreiber wünschenswert sind, wirken sich nur in vernachlässigbar geringem Maß auf die Batteriegesundheit aus, wenn die Batterie durch ein durchdachtes Thermo- und Lademanagement in einem optimalen Betriebsbereich gehalten werden kann.

In komDRIVE konnte gezeigt werden, dass sich der Schwerpunkt weg von der Machbarkeit hin zur Umsetzbarkeit der praktischen Anwendung im Alltag verschiebt. Dazu ist weiterer Forschungsbedarf in den nachstehend kumulierten Themenfeldern notwendig:

- Maßnahmen zur Schaffung fundierter Informationsmöglichkeiten für Interessierte,
- signifikante Stückzahl/Auswahl an verfügbaren Fahrzeugmodellen, auch für den Aufbau eines Zweitmarktes,
- intelligentes Flottenmanagement zur optimalen Tourenplanung,
- Ausbaumöglichkeiten von Verteil- und Übertragungsnetz sowie Sicherstellung der Netzverfügbarkeit,
- ideale Verteilung der Lademöglichkeiten, auch außerhalb des Betriebshofs,
- angepasstes Thermo- und Lademanagement zur Förderung der Batteriegesundheit,
- Ableitung des konkreten Emissionsminderungspotenzials auf lokaler und nationaler Ebene.

## 6. Glossar Wirtschaftsverkehr/Elektromobilität

<b>Fachbegriff</b>	<b>Erklärung</b>
Abrufwahrscheinlichkeit	Beschreibt die Wahrscheinlichkeit für einen Zuschlag für ein abgegebenes Angebot.
Aktivmaterialverlust	Verringerung des elektrochemisch aktiven Elektrodenmaterials
Alterung einer Batterie	Abnahme der Batterieperformance durch elektrochemische Degradationsmechanismen in der Zelle
Anschlussleistungen	die maximale Leistung, die ein Verbraucher beziehen oder ein Anschluss liefern kann
Arbeitspreis	Im Zusammenhang mit dem Strompreis ist der Arbeitspreis das Entgelt für die verbrauchte Strommenge. Er gibt an, wie viel jede verbrauchte Kilowattstunde (kWh) Strom kostet. Im Zusammenhang mit dem Regelenergiemarkt ist der Arbeitspreis die Vergütung für die physikalisch gelieferte Energie im Falle eines Abrufs in Euro je kWh.
Asynchronmotor	Drehstrommaschine mit dem Statorfeld nachlaufenden Läufer bei Nutzung als Motor
Batteriemanagementsystem (BMS)	Das BMS überwacht Zellspannung und -temperatur der einzelnen Batteriezellen einer Li-Ionen-Batterie und sorgt für eine gleichmäßige Belastung der Zellen.
Battery Electric Vehicle (BEV)	Rein elektrisch betriebenes Fahrzeug mit Batterie als Energiespeicher zum Beispiel ein Mercedes-Benz Vito E-CELL.
Batteriebetriebener Elektrolastkraftwagen (BE-Lkw)	Ein batteriebetriebener Elektro-Lastkraftwagen ist ein elektrisch angetriebener Lastkraftwagen, der durch eine Batterie mit Energie versorgt wird.
Belastungsprofil	Betriebsart eines Fahrzeugs zum Beispiel Dauer- oder Kurzzeitbetrieb.
Beschäftigtenverkehr	Fahrten von Arbeitnehmern zu ihrem Arbeitsplatz und von dort nach Hause. (privater Zu-/Abgang)
betriebsbedingte Alterung	Degradation während des Betriebs i. W. getrieben durch das komplexe Zusammenspiel von Temperatur, Spannung, und Strom

C	symbolische Einheit der Stromrate. 1 C ist die Stromrate, bei der nach einer Stunde die Nennkapazität eines Batteriespeichers erreicht wird. Beispiel: Bezogen auf einen Speicher mit der Nennkapazität 16 Ah entspricht 1 C gerade 16 A.
Controller Area Network (CAN)	Das Controller Area Network entspricht einem echtzeitfähigen Feldbus, das serielle Datenübertragung in der Automotiven-Technik ermöglicht.
Constant Current Constant Voltage (CCCV)	Konstantstrom-Konstantspannungs-Ladeprotokoll, Ladeverfahren.
Charge Depleting Mode (CDM)	Batterieabhängige Betriebsart, bei der die Batterie sukzessiv entladen wird.
Charge Sustaining Mode (CSM)	Betriebsart, bei der die Batterie während des Betriebs wieder geladen wird (siehe PHEV).
Conventional Vehicle (CV)	Fahrzeuge, deren Antriebskonzept auf Verbrennungsmotoren beruht, im Buch →ICEV (Internal Combustion Engine Vehicle)
Day-Ahead Markt	Marktplatz für kurzfristigen Handel mit Strom für den nächsten Tag.
DER	Distributed Energy Resources
dezentrale Erzeugungseinheit	Lokal verteilte technische Einheiten, die vorwiegend Energie ins Verteilnetz einspeisen.
Dienstleistungswirtschaftsverkehr	Fahrten zur Erbringung beruflicher Leistungen zum Beispiel die Fahrten eines Klempners.
Diskriminierungsfreiheit	die Freiheit, Ladesäulen nutzen zu können ohne dem Zwang einer Registrierung o.ä.
Durchgangsverkehr	Fahrten, die ein bestimmtes Gebiet durchqueren dort aber weder beginnen noch enden.
Electric Vehicle (EV)	Elektrofahrzeug
Electric Vehicle Aggregator (EVA)	Schnittstelle zum Energiemarkt und koordiniert das tatsächliche Ladeverhalten einzelner EV.
Elektrische Stromstärke (I)	Bezeichnet eine physikalische Größe, die den elektrischen Strom definiert. Es ist das Maß für die Anzahl der Elektronen, die in einer Sekunde durch einen Leiterquerschnitt fließen.

Elektroabfallentsorgungssysteme (AES)	Elektrisch betriebene Entsorgungsfahrzeuge, die für die Beseitigung von Müll zuständig sind z.B. Elektrifizierte Müllsammelfahrzeuge.
Elektrifizierungspotential	Mögliches Potential, eine Fahrzeugflotte, ein Fahrzeug oder ein Gerät zu elektrifizieren.
Elektrifizierung von Mercedes-Benz Kleintransportern in Entwicklung und Produktion (EMKEP)	Forschungsprojekt über den Einsatz von batteriebetriebenen Transportern und deren Alltagstauglichkeit.
Elektroantriebsnachsätze (EleNa)	Projekt zur Entwicklung eines Elektroantriebsnachsatzes für Diesel-Lieferwagen.
Elektrolytreduktion (SEI)	Bildung von Lithiumsalzen mit den Lösemittelmolekülen aus der Elektrolytreduktion. Als Folge ergibt sich ein Verlust zyklisierbaren Lithiums, sowie ein Wachstum der Solid-Electrolyte Interphase (SEI), einer Deckschicht auf der negativen Elektrode. Letzteres führt zu Impedanzsteigerungen, welche in der EIS erkennbar werden.
Emissionen	Allgemein die Abgabe / der Ausstoß von Energie in Form von Gasen (z.B. CO <sub>2</sub> ), thermischer Energie (Wärme), Schall usw..
eoc	Zeitpunkt des Erreichens eines vollgeladenen Zustandes (end of charge)
EV-Durchdringung	Anteil elektrisch betriebener Fahrzeuge an allen Fahrzeugen
Fahrplanenergie	Regelbare Energie und Leistung, die von Energiehändlern zur Einhaltung ihrer Fahrpläne gesteuert werden kann. Der gesamte Energieumsatz konventioneller Kraftwerke und großer Industriebetriebe kann als Fahrplanenergie angesehen werden.
Fahrprofil	Das Einsatzprofil (Geschwindigkeits-Zeit-Profil) eines Fahrzeuges für einen Tag (von 00:00:00 Uhr bis 23:59:59 Uhr).
Fahrverhaltensbeobachtung (FVB)	Forschungsmethode, die auf das individuelle Verhalten des Systems Fahrer-Fahrzeug abzielt
Fahrzeugklasse	Einteilung von Fahrzeugen unter verschiedenen Gesichtspunkten zum Beispiel nach Größe (z.B. Lkw <3.5 t, Lkw >3.5 t).

Fahrzyklus	→Fahrprofil
Flotte-Flotte-Kommunikation	Automatische Interaktion zwischen Fahrzeuggruppen im Netzwerk zur Optimierung / Abstimmung von Ladevorgängen.
Fluktuationseffekte	Überschüssige Stromproduktion für regenerative Energieerzeuger günstigen Bedingungen (viel Wind, viel Sonne)
ganzheitliche elektromobile Transportkette des kombinierten Verkehrs (KV-E-Chain)	Demonstration einer vollelektrischen Lieferkette im Fernverkehr.
Geschossflächenzahl (GFZ)	Das Verhältnis der vollständigen Geschossfläche aller Vollgeschosse zu der Fläche des Baugrundstücks.
Global Positioning System (GPS)	Bezeichnet das globale Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung auf der Erde.
Güterwirtschaftsverkehr	Fahrten zum Holen, Bringen oder Transportieren von Gütern zum Beispiel eines Möbellieferdienstes
Haupttarif (HT)	Zeitscheibe der Sekundärreserve für Mo-Fr zwischen 8 und 20 Uhr
Hybrid Electric Vehicle (HEV)	Fahrzeug, das einen konventionellen verbrennungsmotorischen Antrieb mit einem elektromotorischen Antrieb, gespeist von einer wieder aufladbaren Batterie, kombiniert. Falls die elektrische Komponente nur einen kleinen Anteil am Antriebskonzept hat, spricht man von einem „Mild Hybrid“.
Intelligente Netzanbindung von Elektrofahrzeugen zur Erbringung von Systemdienstleistungen (INEES)	Die Batterien von Elektrofahrzeugen können im gesamten Stromnetz einen wichtigen Beitrag zum Lastenmanagement des Stromnetzes beitragen. Sie können zu Zeiten hoher Stromerzeugung und geringem Energiebedarf Strom speichern und bei Lastspitzen wieder freigeben.
Internal Combustion Engine Vehicle (ICEV)	Ein mit Verbrennungsmotor betriebenes Fahrzeug.
Interoperabilität	Schaffung einheitlicher Ladebedingungen mit dem Ziel, jedem EV zu ermöglichen an jeder Ladesäule laden zu können
kalendarische Alterung	Degradation während Lagerung i. W. getrieben durch hohe Temperatur und hohe Spannung

Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KiD)	Standarderhebung über die Befragung von Kfz-Haltern zu Einsatz und Nutzung von Kraftfahrzeugen.
Kraftstoffstrategie	Beitrag des Verkehrsbereichs, um die im Energiekonzept der Bundesrepublik festgelegten Ziele umzusetzen
Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)	Fungiert als dezentrale Stromerzeugung (Heizkraftwerk), die mechanische Energie in elektrischen Strom umwandelt. Es kann als Ergänzung zu den zentralen Kraftwerken angesehen werden.
Kraftwerksmix	auch Strommix, Energiemix. Verwendung verschiedener Primärenergieformen.
Kreislaufwirtschaft	In der Kreislaufwirtschaft sollen die benutzten Rohstoffe über den Lebenszyklus eines Produkts hinaus wieder vollständig in den Produktionsprozess zurückgeführt werden.
Kunden/Besucherverkehr	Fahrten von Kunden oder Besuchern zu und von einem Unternehmensstandort zum Beispiel eine Einkaufsfahrt.
Ladeleistung	Von Ladestrom, Batteriekapazität und -füllgrad abhängige Leistung, die u.a. die Batterieladedauer beeinflusst
Ladestrategie	Vorgehen, um Batterien unter Abwägung verschiedener Gesichtspunkte zu laden
Lastgangkunden	Kunden mit großer Jahresarbeit für die eine Leistungsmessung erfolgt, d.h. dass das tatsächliche und kein standardisiertes Lastprofil zugrunde gelegt wird. Lastgangkunden entrichten einen Leistungspreis.
Lastmanagement	Steuerung der Stromproduktion durch Verschiebung von Lasten auf Nachfrageseite entsprechend der aktuellen Erzeugungssituation. Auch als Demand Side Management (DSM) bekannt.
Leistungsklasse	Einordnung von Elektromotoren in Klassen abhängig von ihrer Leistung in kW
Leistungspreis	Preis für die Verfügungsstellung der Regelleistung unabhängig von einem Abruf
Lieferverkehr	Von außen eingetragener Wirtschaftsverkehr (An- und Ablieferungen etc.) zum Beispiel ein Paketlieferdienst.

Lithium-Ionen-Batterie	Batterie auf Basis von Lithium-Ionen mit vergleichsweise sehr hoher Energiekapazität.
Lithium-Plating	metallische Abscheidung von Lithium auf dem Grafit der negativen Elektrode. Treibende Faktoren sind hohe Ströme in Laderichtung und niedrige Temperaturen. Durch Bildung passivierter Partikel metallischen Lithiums ist dieser Prozess stets mit Verlust zyklisierbaren Lithiums verbunden.
Markov-Ketten-Analyse	stochastischer Prozess zur Prognose zukünftiger Ereignisse
Marktdurchdringung (MD)	Bezeichnet eine Strategie des Wachstums, d.h. der Gewinn neuer Marktanteile mit einem bereits vorhandenen Produkt.
Markträumungspreis	Preis, bei dem die angebotene und nachgefragte Strommenge auf dem Markt übereinstimmen. Auch als Gleichgewichtspreis bekannt.
Minutenreserveleistung (MRL)	Wird durch negative und positive Regelernergie unterschieden, die in Kraftwerken innerhalb von 15 Minuten erbracht werden müssen.
Mobilitätsanbieter	Anbieter von multimodaler Dienstleistungen
Mobilitätskultur	"Mobilitätskultur geht über Infrastruktur und Beweglichkeit [...] hinaus und umfasst insbesondere auch die Einstellungen, Motivationen und das Verhalten der Verkehrsteilnehmer zueinander."
Mobilitätsverlust	Mobilitätsverlust tritt auf, wenn es aufgrund von Ladesteuerung zu einer Reichweitereinschränkung einzelner EV innerhalb einer Flotte kommt.
Negativer Strompreis	Preis, der ein Stromproduzent einem Verbraucher zahlt, um an Tagen mit hoher Stromproduktion und niedrigem Verbrauch Strom abzunehmen, um die Stromlast im Netz auszugleichen.
Netzdienstleistung (NDL)	Für die einwandfreie Funktion eines Stromnetzes notwendige Dienste. Auch als Systemdienstleistungen bekannt. (Leistungen, die rein auf der technischen Ebene erfolgen werden auch als Netzdienstleistungen bezeichnet.)
Netzspeicherkomponente	siehe vehicle-to-grid
Netzkopplung	Anteil der Elektrofahrzeuge, die zu einem bestimmten Zeitpunkt an das Netz angeschlossen sind.

Neuer europäischer Fahrzyklus (NEFZ)	Der Fahrzyklus bezeichnet die bei Fahrzeugen abgegebenen CO <sub>2</sub> Emissionen, den Kraftstoffverbrauch sowie den Energieverbrauch eines Verbrennungsmotors. 1992 wurde von der Europäischen Kommission ein neuer Fahrzyklus festgelegt, der auch für den Stadtverkehr gültig ist.
Niederspannung (NS)	Die Niederspannung berücksichtigt Wechselspannungen und Gleichspannungen bis maximal 1.500 Volt.
Niedertarif (NT)	Zeitscheibe der Sekundärreserve für Mo-Fr zwischen 20 und 8 Uhr und Wochenende und Feiertage
Ortsnetzstation (ONS)	Eine Ortsnetzstation bezeichnet eine Transformationenstation, bei der die elektrische Spannung transformiert wird.
Partikelemissionen (PM)	Sind die durch den Motor eines Fahrzeuges ausgestoßenen Abgase der Gesamt-Partikelmasse.
Pay-as-Bid Verfahren	Strom-Auktionen, in dem die Gewinner Strom zu unterschiedlichen, von ihren Geboten abhängigen, Preisen beziehen.
Personenwirtschaftsverkehr	Fahrten im Personenwirtschaftsverkehr zum Holen, Bringen oder Befördern von Personen (dienstlich/geschäftlich) zum Beispiel Fahrten im Rahmen der eigenen dienstlichen Tätigkeit.
„per unit“ (p.u)	Angabe einer (physikalischen) Größe als Teil eines Nennwerts oder eines Ganzen
Photovoltaikanteil (PVA)	Anteil an Energie aus PV zur Deckung des mobilen Energiebedarfs von EV-Flotten.
Plating	Verschleißerscheinung einer Batterie, bei der besonders durch Kälte die Kapazität und Funktionsfähigkeit vermindert wird.
Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)	Ein sowohl elektrisch als auch mit Verbrennungsmotor betriebenes Fahrzeug mit einer Batterie als Energiespeicher, die aus dem Stromnetz aufgeladen werden kann.
Poolen	Zusammenführen einzelner technischer Einheiten zu einer aggregierten Einheit.
Quellverkehr	Fahrten, die von einem bestimmten Ort, Ortsteil ausgehen.

Range-Extended Electric Vehicle (REEV)	Ein elektrisch als auch mit Verbrennungsmotor betriebenes Fahrzeug mit einer Batterie als Energiespeicher, die durch mit dem Verbrennungsmotor erzeugten Strom geladen wird.
Regelenergie	Energie- und Leistungsbedarf, der kurzfristig [innerhalb von Sekunden ("Primärreserve"), fünf Minuten ("Sekundärreserve") oder Viertelstunden ("Minutenreserve")] zum Ausgleich unvorhersehbarer Abweichungen von Erzeugung und Verbrauch im Netz benötigt wird. Auch als Reserveleistung bekannt.
Rekuperationsfähigkeit	Eignung zur Rückgewinnung elektrischer Energie zum Beispiel beim Bremsvorgang.
Reserveleistung	→Regelenergie
Rückspeisen	Leistungsabgabe von Technischen Einheiten an das Netz.
Sekundärregelleistung (SRL)	Bezeichnet die Sekundärreserve, die der Netzfrequenzstabilität dient. Diese wird eingesetzt, wenn die Lastschwankungen im Netz nicht gehalten werden kann.
Smart Grid	Bezeichnung für den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie in Komponenten eines Energieverteilensystems, um Betrieb, Wartung und Planung des Energienetzes zu verbessern und zu automatisieren.
Solid Electrolyte Interface (SEI)	Bezeichnet eine Grenzflächenschicht, die aus einer teilweisen Zersetzung von Batterieelektrolyten in der Gegenwart von Lithium resultiert.
SOC-Band	Während des Betriebes zugelassener Bereich für den Ladezustand
Spannung (U)	Gibt an, wie viel Energie notwendig ist, um eine elektrische Ladung innerhalb eines elektrischen Feldes zu bewegen.
Spannungsband	Toleranzbereich um die Referenzspannung.
Speicherverfahren	Die Art und Weise der Speicherung; in Form von elektro-chemischer Energie (Batterien), in Form von mechanischer Energie (z. B. Pumpspeicherkraftwerk), in Form von elektrischer Energie (z.B. Kondensatoren)

Spotmarkt	Markt der Warenbörsen, an dem Geschäfte gegen sofortige Bezahlung und alsbaldige Lieferung (Effektivgeschäfte) getätigt werden.
State of Energy (SOE)	relativer Energieinhalt der Zelle bezogen auf den Nennenergieinhalt
Stickstoffoxid (NO <sub>x</sub> )	Stickstoffoxide sind Bezeichnungen für gasförmige Oxide des Stickstoffs. Die Abkürzung NO <sub>x</sub> resultiert aus den unterschiedlichen Oxidationsstufen des Stickstoffs, die mehrere Stickstoff-Sauerstoffverbindungen eingehen kann.
Systemdienstleistungen (SDL)	Dienste zur Stabilisierung der Stromversorgung wie die Frequenzhaltung, Spannungshaltung, Versorgungswiederaufbau, Betriebsführung / Netzengpassmanagement
Topologie (Verteilnetztopologien)	Aufbau und Struktur von Verteilnetzen der elektrischen Energieversorgung
Total cost of ownership (TCO)	Ganzheitlich betrachtete und auf die komplette Lebensdauer einer Investition bezogenen Kosten mit der Unterscheidung direkter und indirekter Kosten. Auch als Gesamtbetriebskosten bekannt.
Traktionsbatterie	Energiespeicher, der dem Antrieb von Elektrofahrzeugen dient.
Transversalflussmaschine	Sondermaschine- Antriebstechnik; Bei einer Transversalflussmaschine verläuft der magnetische Fluss axial und radial und je nach Ausführung über eine Polteilung tangential. Diese Topologie erlaubt den Einsatz einer zur Achse konzentrischen Ankerwicklung, bei der es keine Wickelköpfe gibt.
Triebstrangauslegung	Einbauart der Komponenten, die der Triebkraft des Fahrzeugs dienen.
Übertragungsnetz	Stromnetz, das dem überregionalen Stromtransport von zentralen Großkraftwerken und sonstigen großen Erzeugungsanlagen zu Verbrauchsschwerpunkten dient.
Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB)	Dienstleistungsunternehmen, welche die →Übertragungsnetze betreiben.
Uniform-Pricing	Strom-Auktionen, in dem die Gewinner Strom zum festen Markträumungspreis beziehen.
vehicle-to-grid (V2G)	Nutzung von EV als Speicher überschüssiger Energie in Spitzenzeiten

Verkehrsaufkommen	Verkehrsmenge, ausgedrückt als Zahl der beförderten Personen bzw. der beförderten Gütertonnen.
Verkehrsleistung	Für die Inanspruchnahme von Ressourcen wichtige Kennzahl des Verkehrs in Personen- oder Tonnenkilometern. (Beförderte Personen oder Güter * zurückgelegte Entfernung)
Verlust zyklisierbaren Lithiums	Verringerung der Menge an Lithium, die zur wechselnden Interkalation in der negativen, bzw. der positiven Elektrode zur Verfügung steht
Verteilnetz	Stromnetz, welches der Verteilung von elektrischer Energie an einzelne Verbraucher dient.
Wirtschaftsverkehr	Alle Ortsveränderungen von Personen und Gütern, die erwerbswirtschaftlichen oder dienstlichen Zwecken dienen zum Beispiel → Liefer-, Beschäftigten-, und Kunden-/Besucherverkehr.
Zielverkehr	Fahrten, die in einem bestimmten Ort, Ortsteil enden.
Zuladung	Masse an Gütern (Angaben üblicherweise in Kilogramm), die ein Fahrzeug mit sich führt.
Zuladungsprofil	Zeitlicher Verlauf der Höhe der Zuladung während einer Fahrt.
Zuschlag Wahrscheinlichkeit	Beschreibt die Wahrscheinlichkeit für mindestens einen Abruf in einem Zeitintervall.
Zyklen- oder zyklische Alterung	→betriebsbedingte Alterung
Zyklusfestigkeit	Die Angabe, wie oft ein Akku ent- und beladen werden kann, ehe seine Kapazität einen gewissen Wert unterschreitet.

## 7. Autorenübersicht

Die Hauptautoren der jeweiligen Kapitel sind im Text unter der Überschrift auf der ersten Ebene angegeben. Für den Fall, dass die Autoren der darunterliegenden Ebenen von der jeweils oberen abweichen, erfolgt eine erneute Ausweisung der Autoren.

### **Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE),**

<b>Autor</b>	<b>Kontakt</b>	<b>Beteiligt an Kapitel</b>
Linßen, Jochen	j.linssen@fz-juelich.de	2.1; 3.5; 4.5; 4.6
Hennings, Wilfried	w.hennings@fz-juelich.de	2.1; 3.5

### **Technische Universität Berlin**

Institut für Land- und Seeverkehr (ILS)

Fachgebiet Kraftfahrzeuge, später Fachgebiet Fahrerverhaltensbeobachtung für energetische Optimierung und Unfallvermeidung (FVB) (Koordination)

<b>Autor</b>	<b>Kontakt</b>	<b>Beteiligt an Kapitel</b>
Marker, Stefanie (Prof. Dr.)	stefanie.marker@tu-berlin.de	2; 2.2; 2.3; 3; 3.1; 3.1.5; 4.1.5; 4.1.4; 4.1.5; 4.1.6; 5
Dreyhaupt, Daniel (ehemals am Fachgebiet)	-	2.2; 2.3; 3; 3.1; 3.1.5; 4.1.4; 4.1.5; 4.1.6

Fakultät Elektrotechnik und Informatik,

Fachgebiet Energieversorgungsnetze und Integration erneuerbarer Energien (SENSE),

<b>Autor</b>	<b>Kontakt</b>	<b>Beteiligt an Kapitel</b>
Strunz, Kai (Prof. Dr.)	kai.strunz@tu-berlin.de	3.3; 4.3; 4.3.6
Gromann, Flavio	flavio.gomann@tu-berlin.de	3.3; 4.3; 4.3.1; 4.3.2; 4.3.3; 4.3.4; 4.3.5; 4.3.6
Becht, Florian	florian.becht@campus.tu-berlin.de	3.3; 4.3; 4.3.1; 4.3.3; 4.3.6
Winkelmann, Frithjof	fr.winkelmann@mailbox.tu-berlin.de	3.3; 4.3; 4.3.1; 4.3.5; 4.3.6

## Zentrum Technik und Gesellschaft (ZTG)

<b>Autor</b>	<b>Kontakt</b>	<b>Beteiligt an Kapitel</b>
Arndt, Wulf-Holger (Dr.-Ing.)	wulf-holger.arndt@tu-berlin.de	2.1; 4.1.1; 4.1.2; 4.4; 4.6
Döge, Norman	doege@ztg.tu-berlin.de	2; 2.1; 3; 3.1; 3.1.1; 3.1.2; 3.1.3; 3.1.4; 3.4; 4; 4.1; 4.1.1; 4.1.2; 4.1.3; 4.4
Lu, Lu	lu@ztg.tu-berlin.de	3.4; 4.4
Jamerson, Gordon	jamerson@ztg.tu-berlin.de	3.4; 4.4
Siegert, Wassili (ehemals am Zentrum)	-	2.1; 3.1.1; 3.1.2; 4.1.1; 4.1.2; 4.1.3
Kämpfer, René (ehemals am Zentrum)	-	3.4; 4.4

## Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

<b>Autor (Kontakt)</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Beteiligt an Kapitel</b>
Danzer, Michael A. (Dr.-Ing.)	michael.danzer@zsw-bw.de	3.2; 4.2; 4.2.1; 4.2.2; 4.2.3; 4.2.4
Günther, Clemens	clemens.guenther@zsw-bw.de	3.2; 4.2; 4.2.1; 4.2.2; 4.2.3; 4.2.4
Bauer, Marius	marius.bauer@zsw-bw.de	3.2; 4.2; 4.2.1; 4.2.2; 4.2.3; 4.2.4
Taumann, Michael	Michael.taumann@zsw-bw.de	3.2; 4.2; 4.2.1; 4.2.2; 4.2.3

## Literatur

- AECC (2015): Motor- und Fahrzeugemissionen. [www.aecc.eu/en/Air\\_Quality\\_and\\_Health\\_Effects.html](http://www.aecc.eu/en/Air_Quality_and_Health_Effects.html). Zugriff: 06.11.2015.
- AGEB (2014): Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2014. [www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=ageb\\_jahresbericht2014.pdf](http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_jahresbericht2014.pdf). Zugriff: 09.09.2016
- Agora (2014): Negative Strompreise werden häufiger - Studie zeigt: Ein Teil der konventionellen Kraftwerke reagiert nicht auf Überangebot von Strom, <http://www.agora-energiewende.de/de/presse/agoranews/news-detail/news/negative-strompreise-werden-haeufiger/>. Zugriff: 09.09.2016
- Aichinger, W. (2014): Elektromobilität im städtischen Wirtschaftsverkehr - Chancen und Handlungsspielräume in den Kommunen. <http://www.difu.de/publikationen/2014/elektromobilitaet-im-staedtischen-wirtschaftsverkehr.html>. Zugriff: 21.08.2015.
- Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC) (2013): Elektroautos: Marktübersicht/Kenndaten - Stand 01/2013. [http://www.ocintern.de/uploads/tx\\_downloads/27373\\_01.pdf](http://www.ocintern.de/uploads/tx_downloads/27373_01.pdf). Zugriff: 03.04.2016.
- Altenkirch, C. et al. (2011): Konzipierung und Gestaltung elektromobiler Dienstleistungen im innerstädtischen Raum. HBK Braunschweig, Braunschweig.
- Anderman, M. (2009): Value Proposition Analysis for Lithium-Ion Batteries in Automotive Applications, in: Large Lithium Ion Battery Technology and Application Symposium. Long Beach, California, USA.
- Anderman, M. / Advance Automotive Batteries (2013): The EV Industry Insider Report, 2014 Edition. Advanced Automotive Batteries. Executive Summary Selections. <http://www.advancedautobat.com/industry-reports/2014-EV-Industry-report/Executive-Summary-Selections.pdf>. Zugriff: 13.11.2004.
- Anderman, M. / Advance Automotive Batteries (2014a): Battery Technology Advances and the Path and Pace of EV Market Expansion. Präsentation gehalten auf der Kraftwerk Batterie, Münster, Deutschland.
- Anderman, M., Total Battery Consulting, (2014b): The Tesla Battery Report – Tesla Motors: Battery Technology, Analysis of the Gigafactory, and the Automakers' Perspectives. <http://www.totalbatteryconsulting.com/industry-reports/Tesla-report/index.html>. Zugriff: 12.02.2016.
- Arndt, W.-H. (Hrsg.) (2007): Wirtschaftsverkehr in der Verkehrsplanung. Beiträge aus dem Verkehrsplanungsseminar 2005/2006 ; [Referate im Rahmen des Kolloquiums "Verkehrsplanungsseminar 2005/2006" des Fachgebietes Integrierte Verkehrsplanung des Institutes für Land- und Seeverkehr der Technischen Universität Berlin]. Univ.-Verl. der TU, Univ.-Bibliothek, Berlin.
- Arndt, Wulf-Holger (2010): Optimierungspotenziale im Wirtschaftsverkehr durch bestellerseitige Kooperation, Technische Universität Berlin, Berlin 2010.
- Arndt, W.-H. (2013a): Entwicklung des städtischen Wirtschaftsverkehrs und Herausforderungen für die Stadtverkehrsplanung. In: Arndt, W.-H. (Hrsg.) Städtischer Wirtschaftsverkehr - Commercial/Goods Transportation in Urban Areas - Transports Commerciaux/Marchandises en Ville. Dokumentation der Internationalen Konferenz 2012 in Berlin. Difu-Impulse, 3, 2013.

- Arndt, Wulf-Holger (2013b): Wirtschaftsverkehr, Ursachen, Folgen, Modelle, Lösungen. Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung, Wichmann-Fachmedien Offenbach 2013.
- Arndt (2015): Umweltverträglicher Wirtschaftsverkehr in Städten. Wer oder was bringt's wirklich? Dokumentation der Fachtagung "kommunal mobil 2015" am 18./19.6.2015 in Dessau-Roßlau, Difu-Impulse Bd. 6/2015
- Arora, P., White, R.E., Doyle, M., (1998): Capacity Fade Mechanisms and Side Reactions in Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society* 145, 3647. doi:10.1149/1.1838857
- Arval (2014): "CVO Fuhrpark-Barometer Deutschland 2014"
- Atteslander, P. (2010): Methoden der empirischen Sozialforschung. Erich Schmidt Verlag. Berlin.
- Aurbach, D., Levi, M.D., Levi, E., Teller, H., Markovsky, B., Salitra, G., Heider, U., Heider, L., (1998): Common Electroanalytical Behavior of Li Intercalation Processes into Graphite and Transition Metal Oxides. *J. Electrochem. Soc.* 145, 3024–3034. doi:10.1149/1.1838758
- BAG (o.J.): Marktbeobachtung Güterverkehr div. Jahrgänge, Bundesamt für Güterverkehr, Köln 2000 bis 2015.
- BAG (2012): Statistische Mitteilungen des Bundesamtes für Güterverkehr und des Kraftfahrt-Bundesamtes, Bundesamt für Güterverkehr und Kraftfahrt-Bundesamt, Köln 2012.
- Basshuysen, R. van.; Schäfer, F. (2015): Handbuch Verbrennungsmotor; Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. Springer Vieweg. Wiesbaden.
- Bauer, M., Guenther, C., Kasper, M., Petzl, M., & Danzer, M. A.a. (2015). Discrimination of degradation processes in lithium-ion cells based on the sensitivity of aging indicators towards capacity loss. *Journal of Power Sources*, 283, 494–504.
- Bauer, M., Wachtler, M, Stöwe, H, Persson, J.V., Danzer, M. A. (2016). Characterization of Graphite Anode Behavior in Lithium-Ion Cells Using Dilatometry. Unpublished.
- Beckmann, K.J. (2013): Güter- und Wirtschaftsverkehr in Städten und Stadtregionen - Megatrends und Konsequenzen für Handlungsstrategien und Handlungsansätze. In: Arndt, W.-H. (Hrsg.) Städtischer Wirtschaftsverkehr – Commercial / Goods Transportation in Urban Areas - Transports Commerciaux / Marchandises en Ville. Dokumentation der Internationalen Konferenz 2012 in Berlin. Difu-Impulse, 3, 2013.
- Bentley, W.F. (1997): Cell balancing considerations for lithium-ion battery systems, in: The Twelfth Annual Battery Conference on Applications and Advances. Presented at the The Twelfth Annual Battery Conference on Applications and Advances, Long Beach, CA, USA, pp. 223–226. doi:10.1109/BCAA.1997.574107
- Bernhart, W., Schlick, T., Olschewski, I. & Thoennes, M. (2012): Quartalsindex Elektromobilität. Studie von Roland Berger Strategy Consultants – Automotive Competence Center & Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen. Stuttgart, Frankfurt, Aachen, Roland Berger.
- Bieling, Nobert (1998): Analyse und Entwicklung des Wirtschaftsverkehrs am Beispiel des Ballungsraums München, in Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung, 7/98, S. 31.
- Bitzer, B., Gruhle, A. (2014): A new method for detecting lithium plating by measuring the cell thickness. *Journal of Power Sources*, 262, 297–302.

- Bloom, I., Cole, B.W., Sohn, J.J., Jones, S.A., Polzin, E.G., Battaglia, V.S., Henriksen, G.L., Motloch, C., Richardson, R., Unkelhaeuser, T., Ingersoll, D., Case, H.L. (2001): An accelerated calendar and cycle life study of Li-ion cells. *Journal of Power Sources* 101, 238–247. doi:10.1016/S0378-7753(01)00783-2
- Bloomberg (2013) in Shahan, Z. / CleanTechnica: 40% Drop In EV Battery Prices From 2010 To 2012. Mitteilung von CleanTechnica. <http://cleantechnica.com/2013/07/08/40-drop-in-ev-battery-prices-from-2010-to-2012/>. Zugriff: 03.09.2014.
- BMVI (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030, Schlussbericht, 2014
- BMWi (2011): Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. Silber Druck oHG, Niesetal.
- BMWi (2013): „Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010“.
- BMWi (2015): Vierter Monitoring-Bericht der Energiewende. Berlin. <http://www.bmwi.de/DE/Mediathek/publikationen,did=739122.html>.
- Boyd, S./DOE (U.S. Department of Energy) (2013): U.S. DOE Battery and Electric Drive Technology R&D Strategy to Achieve EV Everywhere Goals. [http://www.a3ps.at/site/sites/default/files/conferences/2013\\_10\\_03\\_ecomobility2013/1\\_01\\_Douba\\_ANL.pdf](http://www.a3ps.at/site/sites/default/files/conferences/2013_10_03_ecomobility2013/1_01_Douba_ANL.pdf). Zugriff: 02.09.2014.
- Broussely, M., Herreyre, S., Biensan, P., Kasztejna, P., Nechev, K., Staniewicz, R. Aging mechanism in Li ion cells and calendar life predictions, *J. Power Sources*. 97-98 (2001) 13–21. doi:10.1016/S0378-7753(01)00722-4.
- BUND (2006): Flyer „Wahnsinn Güterverkehr Natürlich effizient“.  
[https://www.vcd.org/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Themen/Gueterverkehr/Lkw-w-Maut/BUND\\_VCD-Flyer\\_Gueterverkehr\\_klein\\_1.pdf](https://www.vcd.org/fileadmin/user_upload/Redaktion/Themen/Gueterverkehr/Lkw-w-Maut/BUND_VCD-Flyer_Gueterverkehr_klein_1.pdf). Zugriff: 09.09.2016.
- Bundesregierung (2016): Einigung auf Kaufprämie für E-Autos.  
<https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2016/04/2016-04-27-foerderung-fuer-elektroautos-beschlossen.html>. Zugriff: 04.05.2016.
- Burkert, A. (2013): Elektro-Lkw aus der Schweiz: 18-Tonner E-Force One schafft 300 Kilometer. <https://www.springerprofessional.de/automobil---motoren/nutzfahrzeuge/elektro-Lkw-aus-der-schweiz-18-tonner-e-force-one-schafft-300-ki/6586220?redirect=1>. Zugriff: 11.02.2016.
- Busse, M., Horch, F. (2016): Systemforschung Elektromobilität. (Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung). <http://www.elektromobilitaet.fraunhofer.de/>. Zugriff: 11.02.2016.
- CE (Cambridge Econometrics), Ricardo-AEA und Element Energy (2013): Fuelling Europe’s Future. [http://www.camecon.com/Libraries/Downloadable\\_Files/Fuelling\\_Europe\\_s\\_Future-How\\_auto\\_innovation\\_leads\\_to\\_EU\\_jobs.sflb.ashx](http://www.camecon.com/Libraries/Downloadable_Files/Fuelling_Europe_s_Future-How_auto_innovation_leads_to_EU_jobs.sflb.ashx). Zugriff: 12.11.2014.
- Cigre (2014): C. K. S. De, E. A. De, C. A. Ca, C. A. Fr, F. G. Cn, T. G. Za, A. G. Ca, N. H. Gr, and R. I. Ca, Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources, no. 273, pp. 4–6, 2014.
- Cluzel, C., Douglas, D./Element Energy (2012): Cost and performance of EV batteries. Final Report for the Committee on Climate Change. [https://www.theccc.org.uk/archive/aws/IA&S/CCC%20battery%20cost\\_%20Element%20Energy%20report\\_March2012\\_Public.pdf](https://www.theccc.org.uk/archive/aws/IA&S/CCC%20battery%20cost_%20Element%20Energy%20report_March2012_Public.pdf). Zugriff: 15.10.2014.

- Dahremöller, J. (2015): Prognos der Investitions- und Betriebskosten elektrifizierter Nutzfahrzeuge, Masterarbeit, FG FVB, Technische Universität Berlin
- Daimler AG (2011): Der Vito E-CELL - Bewusst effizient von heute nach morgen (Produktflyer). Daimler AG. Stuttgart.
- Daimler AG (2014a): Der neue Vito - Kastenwagen und Mixto (Produktflyer). Daimler AG. Stuttgart.
- Daimler AG (2014b): Der neue Mercedes-Benz Vito - Kostenzweig, Nutzlastriese und Sicherheitsexperte. Daimler AG. Stuttgart.
- Deffner, J. et al. (2012): Elektrofahrzeuge in betrieblichen Fahrzeugflotten - Akzeptanz, Attraktivität und Nutzungsverhalten. Ergebnisbericht im Rahmen des Projekts Future Fleet, Arbeitsschritte 2.1 bis 2.4. ISOE (ISOE-Studientexte, 17), Frankfurt am Main.
- Degner, T. et al. (2016): INEES-Projektflyer. <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderung-von-vorhaben-im-bereich-der-elektromobilitaet-ab-2012/kopplung-der-elektromobilitaet-an-erneuerbare-energien-und-deren-netzintegration/projektflyer-netzintegration/flyer-inees.pdf>, Zugriff: 28.01.2016.
- Desjardins, J./Visual Capitalist (2014): Inside Tesla's \$5 Billion Gigafactory. <http://www.visualcapitalist.com/inside-teslas-5-billion-gigafactory/>. Zugriff: 01.09.2014.
- Deutsches Dialog Institut (2014): Die Begleit- und Wirkungsforschung. [http://schaufenster-elektromobilitaet.org/de/content/ueber\\_das\\_programm/begleit\\_und\\_wirkungsforschung/begleit\\_und\\_wirkungsforschung\\_1.html](http://schaufenster-elektromobilitaet.org/de/content/ueber_das_programm/begleit_und_wirkungsforschung/begleit_und_wirkungsforschung_1.html). Zugriff: 22.06.2016.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2014): Systemdienstleitungen 2030 – Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromerzeugung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien, Berlin.
- Destatis (2015): Fachserie 8 Reihe 1.1 div. Jahrgänge, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2000 bis 2015.
- DOE (U.S. Department of Energy) (2014): EV Everywhere Grand Challenge. Road to Success. [http://energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/everywhere\\_road\\_to\\_success.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/everywhere_road_to_success.pdf). Zugriff: 03.09.2014.
- Dornier GmbH Planungsberatung (Hrsg.) (1994): Erfassung und Aufbereitung von Grundlagendaten des Wirtschaftsverkehrs in fünf ausgewählten Großstädten sowie Erarbeitung eines Handlungsrahmen, Abschlußbericht. Friedrichshafen.
- Dst/Vdv (2015): EmoG – Freigabemöglichkeit von Busspuren für private Elektroautos Technischer Entscheidungseleitfaden als Arbeitshilfe für zuständige Behörden. 06/2015.
- Dudenhöffer, F. (2015): Warum die Sonderabschreibung für Elektroautos ein Strohfeuer werden könnte. <https://www.uni-due.de/~hk0378/publikationen/2015/20150624-ifo-Schnelldienst-Heft%2011.pdf>. Zugriff: 19.08.2015.
- eCars (2016): Von S-HyBus zur HyLinie S – Dieselhybridbusse im Alltagsbetrieb, Elektromobilität in der Region Stuttgart. <http://ecars.region-stuttgart.de/2013/04/von-s-hybus-zur-hylinie-s-dieselhybridbusse-im-alltagsbetrieb/>. Zugriff: 11.02.2016.
- Eden, P. (2016): Demonstrationseinsatz von Abfallsammelfahrzeugen mit Hybrid-Antrieb & Entwicklung einer für den Hybridfahrzeugeinsatz optimierten Tourenplanungssoftware. <http://www.elektromobilitaet->

- verbindet.de/projekte/demonstrationseinsatz-von-abfallsammelfahrzeugen.html.  
Zugriff: 11.02.2016.
- EEX (2014) European Energy Exchange (EEX) - Marktplatz für Energie und energienahe Produkte, online: <https://www.eex.com/en/>. Zugriff: 09.09.2016
- E-Force (2015): E-FORCE - Der bessere Lastwagen - Spezifikation.  
<http://eforce.ch/eforce/leistungsdaten/>. Zugriff: 17.06.2015.
- E-Force (2016): E-FORCE - Der bessere Lastwagen: Praxistauglichkeit.  
<http://eforce.ch/eforce/praxistauglichkeit/>. Zugriff: 10.02.2016.
- Electrosuisse. e`mobile (2014): Übersicht Elektro-Liefer- und Lastwagen. <http://www.e-mobile.ch/index.php?pid=de,2,125>. Zugriff: 03.04.2016.
- EMKEP (Oktober 2011): Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Elektrifizierung von Mercedes-Benz Kleintransporter. <http://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/wirtschaftsverkehr-feldversuche/abschlussberichte-wirtschaftsverkehr/abschlussbericht-emkep.pdf>. Zugriff: 21.01.2014.
- EPEX Spot Handelsbedingungen (2015): pp. 47-49
- Erneuerbar Mobil (2014): Ecargo-Förderprogramm Elektromobilität des BMU.  
<http://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/foerderung-von-vorhaben-im-bereich-der-elektromobilitaet-ab-2012/ermittlung-der-umwelt-und-klimafaktoren-der-elektromobilitaet/co-2-emissionseinsparungen-durch-den-einsatz-von-e-fahrzeugen-in-nutzfahrzeugflotten-eca>. Zugriff: 20.02.2014.
- Erneuerbar Mobil (2016): PREMIUM-Förderprogramm Elektromobilität des BMU.  
<http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/vorhaben-im-bereich-der-elektromobilitaet-von-2013/markteinfuehrung-mit-oekologischen-standards/PREMIUM>. Zugriff: 08.02.2016.
- e-wolf: eWOLF GmbH (2015): Technisches Datenblatt – Omega 0.7 Cargo.  
<http://www.ewolf-car.com/omegacargo/omega07/technische-daten.html>. Zugriff: 03.04.2016.
- Farhan, M. (2016): Marketing of Electric Cars, Analysis of Barriers, Policies and Markets for Electric Cars. The cases of the countries China, Germany, Japan, Norway and United States and the cities Beijing, Oslo and San Francisco, . Science in Urban Management Technische Universität Berlin.
- FGSV-Arbeitsgruppe Verkehrsplanung (Hrsg.) (2006): Hinweise zur Schätzung des Verkehrsaufkommens von Gebietstypen.  
<http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/372969/>. Zugriff: 09.10.2015.
- Follmer, R. et al. (2010): Mobilität in Brandenburg und Berlin. Integrierte Auswertung MiD und SrV 2008.  
[http://www.mil.brandenburg.de/media\\_fast/4055/MiDSrVBericht.pdf](http://www.mil.brandenburg.de/media_fast/4055/MiDSrVBericht.pdf). Zugriff: 09.10.2015.
- Follmer, R., Lenz, B., Jesske, B., Quandt, S. (2008): Mobilität in Deutschland 2008. Tempo, 214.
- Forschungszentrum Jülich (2015): Netzintegration mobiler Energiespeicher: Testbasierte Evaluierung, technische Potentiale und Bereitschaft von Fahrzeughaltern (NET-INES). [http://www.fz-juelich.de/iek/iek-ste/DE/NET-INES/\\_node.html](http://www.fz-juelich.de/iek/iek-ste/DE/NET-INES/_node.html), Zugriff: 27.01.2016.

- Frankel, D./Lux Research (2014) in Colthorpe, A./PVTechStorage: Inside the Gigafactory: Tesla's big plan. Nachricht von PVTechStorage vom 14.10.2014. <http://storage.pv-tech.org/interviews/inside-the-gigafactory-teslas-big-plan>. Zugriff: 12.11.2014.
- Fraunhofer (2015): "Regional Eco Mobility 2030"
- Französische Botschaft (2015) Klimaschutz: Das französische Bonus-Malusssystem beim Neuwagenkauf. <http://www.ambafrance-de.org/Klimaschutz-Das-franzosische-Bonus>. Zugriff: 03.09.2015.
- Google Inc. (2014): Bildexport aus Google Earth mit selbstkreiertem TEECT Informationslayer.
- Gwisdorf, B. (2015): Methodik und Anwendung der Grenzkurvenanalyse zur Bewertung von elektrischen Energieverteilnetzen, 1. Auflage, Juli 2015, Deutsch, 245 Seiten, ISBN: 978-3-86844-730-9, Band 15
- Hacker, F. et al. (2011): Betrachtung der Umweltentlastungspotenziale durch den verstärkten Einsatz von kleinen, batterieelektrischen Fahrzeugen im Rahmen des Projekts "E-Mobility". Öko-Institut e.V., Berlin.
- Hacker, F. et al. (2015): Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO<sub>2</sub>-Minderung. Öko-Institut e.V. Berlin.
- Hacker, F., Harthan, R., Hermann, H., Kasten, P., Loreck, C., Seebach, D., Timpe, C. & Zimmer, D. W. (2011): Betrachtung der Umweltentlastungspotenziale durch verstärkten Einsatz von kleinen, batterieelektrischen Fahrzeugen im Rahmen des Projekts "E-Mobility" - Schlussbericht. <http://www.oeko.de/oekodoc/1344/2011-007-de.pdf>. Zugriff: 18.08.2015.
- Hacker, F., Harthan, R., Kasten, P., Loreck, C., Zimmer, W. (2011): Marktpotenziale und CO<sub>2</sub>-Bilanz von Elektromobilität. Arbeitspakete 2 bis 5 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Hrsg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Öko Institut e.V., Berlin.
- Heidt, C. et al. (2013): CNG und LPG–Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs. Heidelberg. <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-kurzstudie-cng-lpg.pdf>. Zugriff: 09.10.2015.
- Heinrichs, H. & Markewitz, P. (2015): A Coal Phase-out in Germany – Clean, Efficient and Affordable? Energy procedia, 75, 2541 - 2547. Journal Article
- Heißing, B. et al. (2013): Fahrwerkhandbuch. Springer Vieweg. Wiesbaden.
- Helms, H. et al. (2011): Ergebnisbericht UMBReLA - Umweltbilanzen Elektromobilität. Ifeu, Heidelberg.
- Hoffmann, P. (2010): Hybridfahrzeuge - Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft. Springer-Verlag, Wien.
- Hoffmann, W./Applied Solar Expertise (2014) in Fuhs, M./pv magazine Deutschland: Prognose 2030: Speicherstrom für fünf Cent pro Kilowattstunde. Nachricht von pv magazine Deutschland vom 26.09.2014. [http://www.pv-magazine.de/index.php?id=9&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=16727&noMobile=1&cHash=25ae60da1b18d78c381859865ec1f616](http://www.pv-magazine.de/index.php?id=9&tx_ttnews%5Btt_news%5D=16727&noMobile=1&cHash=25ae60da1b18d78c381859865ec1f616). Zugriff: 12.11.2014.
- Horváth & Partners (2014): Fakten-Check Mobilität 3.0. <http://www.horvath-partners.com/de/publikationen/studien/detail/publication/fakten-check-mobilitaet-30/>. Zugriff: 03.11.2014.

- Howell, D./DOE (U.S. Department of Energy) (2012): 6th US-China Electric Vehicle and Battery Technology Workshop. Update on US DOE Electric Drive Vehicle R&D and Deployment Activities. [http://www.cse.anl.gov/us-china-workshop-2012/pdfs/session1\\_plenary/howell\\_US-China%20Bilateral%20mtg%20August%2020%202012.pdf](http://www.cse.anl.gov/us-china-workshop-2012/pdfs/session1_plenary/howell_US-China%20Bilateral%20mtg%20August%2020%202012.pdf). Zugriff: 11.11.2014.
- Humel, P., Hochois, P., Dewhurst, J. und Gandolfi, A. /UBS Global Research (2014): Will solar, batteries and electric cars re-shape the electricity system? Zugriff: 02.09.2014.
- Ich ersetze ein Auto (2016): Ich ersetze ein Auto – Elektro-Lastenräder im Kurier- und Expressdienst. <http://www.ich-ersetze-ein-auto.de/>. Zugriff: 11.02.2016.
- IEA (International Energy Agency) (2013): Global EV Outlook. Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020.
- ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (2010): IFEU HBEFA-Vergleich. Auswirkungen der neuen Erkenntnisse des Handbuch Emissionsfaktoren 3.1 auf die Höhe der berechneten Partikel- und NOx - Emissionen des Straßenverkehrs. [http://www.iea.org/publications/globalevoutlook\\_2013.pdf](http://www.iea.org/publications/globalevoutlook_2013.pdf). Zugriff: 12.11.2014.
- infas & DLR (2009). Mobilität in Deutschland 2008. Datensätze. Bonn und Berlin: infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Verkehrsforschung. <http://daten.clearingstelle-verkehr.de/223/>. Zugriff: 09.09.2016
- Kempton, W., Letendre, S. E. (1997): Electric vehicles as a new power source for electric utilities, Transport. Res. D-Tr. E. 2 (1997) 157–175. doi:10.1016/S1361-9209(97)00001-1.
- Ketelaer, T. (2012): Untersuchungen zu Einsatzmöglichkeiten von Elektrofahrzeugen im Wirtschaftsverkehr. KIT.
- KiD 2010, WVI GmbH Braunschweig (2012): FE 70.0829/2008 - Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD 2010) – Schlussbericht.
- Kiele, J. (2016): Pilotlinie 64 – effiziente Elektromobilität in Dresden. <http://www.elektromobilitaet-verbindet.de/projekte/pilotlinie-64-effiziente-elektromobilitaet-in-dresden.html>. Zugriff: 10.02.2016
- Kienbaum in: Sahay, D. /WiWo Green (2014): Elektroautos in Deutschland: 2020 könnten 750.000 auf der Straße sein. Nachricht von WiWo Green vom 19.03.2014. <http://green.wiwo.de/elektroautos-in-deutschland-2020-koennten-750-000-auf-der-strasse-sein/>. Zugriff: 12.11.2014.
- Knoblauch, B. (2013): Energieversorgung aus 100% regenerativen Energiequellen: Möglichkeiten der Energiespeicherung und der Netzstruktur: Diplomica Verlag. Online verfügbar unter <http://books.google.de/books?id=8QrbaQAAQBAJ>.
- Knörr, W. (2012): Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMODO) für die Emissionsberichterstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011). Unter Mitarbeit von Christoph Heidt und Alexander Schacht. Hrsg. v. Umweltbundesamt. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg.
- Knote, T. (2016): SaxHybrid PLUS – Energiespeichersysteme für Hybridbusse mit qualifiziertem Energiemanagement. <http://www.elektromobilitaet-verbindet.de/projekte/saxhybrid-plus.html>. Zugriff: 10.02.2016.

- Kraftfahrt-Bundesamt (2013): FZ 24 - Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Haltern, Wirtschaftszweigen Jahr 2013. [http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2013/fz24\\_2013\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2013/fz24_2013_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2), Zugriff: 10.08.2015.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2014a): FZ 21 - Fahrzeugzulassungen (FZ), Bestand an Personenkraftwagen und Krafträdern nach Motorisierung, 1. Januar 2014. Kraftfahrt-Bundesamt. Flensburg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2014b): FZ 23 - Fahrzeugzulassungen (FZ), Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Haltern, Wirtschaftszweigen, 1. Januar 2014. Kraftfahrt-Bundesamt. Flensburg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2014c): FZ 25 - Fahrzeugzulassungen (FZ), Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten), 1. Januar 2014. Kraftfahrt-Bundesamt. Flensburg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2015a): FZ 13 - Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen [http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2015/fz13\\_2015\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2015/fz13_2015_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2). Zugriff: 08.08.2015.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2015b): FZ 15 - Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter. [http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2015/fz15\\_2015\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2015/fz15_2015_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3). Zugriff: 25.08.2015.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2016): Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2016. Flensburg. [http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b\\_jahresbilanz.html?nn=644526](http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b_jahresbilanz.html?nn=644526), 26.05.2016.
- Kroeger, H. in: Murphy, T. /Wardsauto (2014): Why \$3 Gasoline Problematic. Nachricht von Wardsauto vom 27.10.2014. <http://wardsauto.com/north-america/why-3-gasoline-problematic>. Zugriff: 12.11.2014.
- Kuhr, D. (2014): Im Porsche auf der Busspur. Süddeutsche Zeitung. Deutschland. <http://www.sueddeutsche.de/auto/elektromobilitaetsgesetz-im-porsche-auf-der-busspur-1.2142713>. Zugriff: 12.08.2015.
- Laresgoiti, I., Ecker, M., Shafiei Sabet, P., Sauer, D. U., (2015): Experimental Investigation of Lithium-Plating in Lithium-Ion Batteries, 7th International Symposium Advanced Battery Power, Aachen, Germany.
- Liaw, B.Y., Roth, E.P., Jungst, R.G., Nagasubramanian, G., Case, H.L., Doughty, D.H. (2003): Correlation of Arrhenius behaviors in power and capacity fades with cell impedance and heat generation in cylindrical lithium-ion cells. *J. Power Sources* 119-121, 874–886. doi:10.1016/S0378-7753(03)00196-4.
- Linssen, J. et al. (2012): Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen (NET-ELAN). [Endbericht]; *Advances in Systems Analyses* 1. Jülich: Forschungszentrum Jülich, Zentralbibliothek (Schriften des Forschungszentrums Jülich: Reihe Energie & Umwelt, Bd. 150), Jülich.
- Linz, S.; Dexheimer, V.; Kathe, A. (2003): Hedonische Preismessung bei Gebrauchtwagen, (In: *Wirtschaft und Statistik* (6)). Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Lu, L. (2014a): Introduction of Transport Energy and Emission Calculation Tool [TEECT]. <https://www.youtube.com/watch?v=RLXRmFO42Hg>. Zugriff: 17.05.2016.

- Lu, L. (2014b): TEECT User Guide. <https://www.youtube.com/watch?v=NMYsG-UiGjY>. Zugriff: 17.05.2016.
- Markewitz, P., & Stein, G. (Hrsg.) (2003). Das IKARUS-Projekt: Energietechnische Perspektiven für Deutschland. Abschlussbericht des Projekts IKARUS. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH.
- Martinsen, D., Funk, C. & Linsen, J. (2010): Biomass for transportation fuels-A cost-effective option for the German energy supply? *Energy Policy*, 38:1, 128-140.
- Matthes, F., et al. (2013): Politikszenerarien für den Klimaschutz VI Berlin. <http://www.uba.de/uba-info-medien/4412.html>. Zugriff: 09.09.2016
- Matthies, E., Bobeth, S., Klöckner, C. & Schippl, J. (2016): Zur besseren Verbreitung von Elektroautos – Was können wir in Deutschland von Norwegen lernen? *Policy Brief Ausgabe*, 01/2016 [https://www.energy-trans.de/1087\\_1578.php](https://www.energy-trans.de/1087_1578.php). Zugriff: 09.09.2016
- McKinsey in Vollmer, P. /WiWo Green (2014): Elektroautos: So sieht die Batteriewelt in sieben Jahren aus. Nachricht von WiWo Green vom 31.07.2014. <http://green.wiwo.de/elektroautos-so-sieht-batteriewelt-in-sieben-jahren-aus/>. Zugriff: 12.11.2014.
- Merker, G. (2007): *Verbrennungsmotoren*. Springer Fachmedien. Wiesbaden.
- Millner, A. (2010): Modeling Lithium Ion battery degradation in electric vehicles, in: Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES). IEEE, Waltham, MA, USA, pp. 349–356. doi:10.1109/CITRES.2010.5619782
- Minnesota Pollution Control Agency (Hrsg.) (2007): Air Emissions Impacts of Plug-In Hybrid Vehicles in Minnesota's Passenger Fleet. Minnesota. <http://www.pca.state.mn.us/index.php/view-document.html?gid=9242>. Zugriff: 09.10.2015.
- Munder, E., Neumann, H. (2013): *Lautloser Sammler – innovative Hybridtechnik*. amkDRUCK Potsdam, Potsdam.
- NAS (National Academies of Science), Committee on Transitions to Alternative Vehicles and Fuels, Board on Energy and Environmental Systems, Division on Engineering and Physical Sciences und National Research Council (2013): *Transitions to Alternative Vehicles and Fuels*. National Academies Press. Washington, D.C. <http://www.nap.edu/catalog/18264/transitions-to-alternative-vehicles-and-fuels>. Zugriff: 12.11.2014.
- Nationale Plattform Elektromobilität (2011): *Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität*. [http://www.elektromobilitaet.din.de/sixcms\\_upload/media/3310/RZ\\_0905\\_NPE\\_Zweiter%20Bericht\\_Final\\_Print.pdf](http://www.elektromobilitaet.din.de/sixcms_upload/media/3310/RZ_0905_NPE_Zweiter%20Bericht_Final_Print.pdf). Zugriff: 19.08.2015.
- Nationale Plattform Elektromobilität (2014): *Fortschrittsbericht 2014 - Bilanz der Marktvorbereitung*. [http://www.bmbf.de/pubRD/NPE\\_Fortschrittsbericht\\_2014\\_barrierefrei.pdf](http://www.bmbf.de/pubRD/NPE_Fortschrittsbericht_2014_barrierefrei.pdf). Zugriff: 19.08.2015.
- Navigant Research in: *Mein Elektroauto* (2013): Die Preise für Lithium-Ionen Akkuzellen fallen bis zum Jahr 2020 auf 134 Euro pro kWh. Meldung von Mein Elektroauto vom 09.11.2013. <http://www.mein-elektroauto.com/2013/11/die-preise-fuer-lithium-ionen-akkuzellen-fallen-bis-zum-jahr-2020-auf-134-euro-pro-kwh/11660/>. Zugriff: 01.09.2014.

- Nelson, P., Gallagher, K.G., Bloom, I., Dees, D.W. /Argonne National Laboratory (2012): Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles – Second Edition. [http://www.cse.anl.gov/batpac/files/BatPaC%20ANL-12\\_55.pdf](http://www.cse.anl.gov/batpac/files/BatPaC%20ANL-12_55.pdf). Zugriff: 13.11.2014.
- Nitsch, J., Pregger, T., Naegler, T., Heide, D., Tena, D. L. D., Trieb, F., Scholz, Y. & Nienhaus, K. (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global Berlin. [http://www.fvee.de/publikationen/publikation/?sb\\_damorder\[uid\]=4636&cHash=06b2c3f1ab6b2757a44b77db72802b87](http://www.fvee.de/publikationen/publikation/?sb_damorder[uid]=4636&cHash=06b2c3f1ab6b2757a44b77db72802b87).
- Oehsen, A. von., Saint-Drenan, Y.-M., Stetz, T., Braun, M. (2012): “Vorstudie zur Integration großer Anteile Photovoltaik in die elektrische Energieversorgung”. Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Kassel.
- Peled, E. (1979). The electrochemical behavior of alkali and alkaline earth metals in nonaqueous battery systems—the solid electrolyte interphase model. *Journal of The Electrochemical Society*, 2047–2051.
- Peters, A., Doll, C., Plötz, P., Sauer, A., Schade, W., Thielmann, A., Wietschel, M. & Zanker, C. (2013): Konzepte der Elektromobilität - Ihre Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt.
- Petzl, M., Kasper, M., & Danzer, M. A.a. (2015). Lithium plating in a commercial lithium-ion battery – A low-temperature aging study. *Journal of Power Sources*, 275, 799–807. doi:10.1016/j.jpowsour.2014.11.065
- Pillot, C. /Avicenne (2013): The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2012-2025“. Präsentation gehalten auf der 30th International Battery Seminar & Exhibit, Fort Lauderdale, Florida, USA. [http://www.avicenne.com/articles\\_energy.php](http://www.avicenne.com/articles_energy.php). Zugriff: 12.11.2014.
- Pillot, C. /Avicenne (2014): Battery Market Development for Consumer Electronics, Automotive, and Industrial: Materials Requirements and Trends. Präsentation gehalten auf der AABC 2014, Atlanta, USA. [http://www.avicenne.com/articles\\_energy.php](http://www.avicenne.com/articles_energy.php). Zugriff: 12.11.2014.
- Ploehn, H.J., Ramadass, P., White, R.E. (2004): Solvent Diffusion Model for Aging of Lithium-Ion Battery Cells. *Journal of The Electrochemical Society* 151, A456. doi:10.1149/1.1644601
- Plotkin, S.; Singh, M. (2009): Multi-Path Transportation Futures Study - Vehicle Characterization and Szenario Analyses. Argonne National Laboratory. Argonne.
- Plötz, P., Gnann, T., Kühn, A. & Wietschel, M. (2013): Markthochlaufszzenarien für Elektrofahrzeuge - Langfassung. <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/Fraunhofer-ISI-Markthochlaufszzenarien-Elektrofahrzeuge-Langfassung.pdf>. Zugriff: 05.08.2015.
- Popp, M. (2010): Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien. Springer, Berlin.
- Proff, H. (2012): Competitiveness of the EU Automotive Industry in Electric Vehicles - Final Report. [http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/automotive/files/projects/report-duisburg-essen-electric-vehicles\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/automotive/files/projects/report-duisburg-essen-electric-vehicles_en.pdf). Zugriff: 15.08.2015.
- Projekt-Ampere (2016): Projekt Ampere – Allgemeiner Praxistest für Elektrofahrzeuge mit verlängerter Reichweite E-REV. <http://www.projekt-ampere.de/?topic=1&lang=0>. Zugriff: 11.01.2016.

- RECHARGE/The European Association for Advanced Rechargeable Batteries (2013): E-mobility Roadmap for the EU battery industry. <http://www.rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2013/04/Battery-Roadmap-RECHARGE-05-July-2013.pdf>. Zugriff: 03.09.2014.
- Ratzenberger, R. (2014): Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr. Mittelfristprognose Winter 2013/14. Hrsg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Intraplan Consult GmbH. München, Köln.
- Raab, A.F.; Ferdowsi, M.; Karfopoulos, E.; Unda, I.G.; Skarvelis-Kazakos, S.; Papadopoulos, P.; Abbasi, E.; Cipcigan, L.M.; Jenkins, N.; Hatzigiorgiou, N.; Strunz, K. (2011): "Virtual Power Plant Control concepts with Electric Vehicles," in Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), 2011 16th International Conference on , vol., no., pp.1-6, 25-28 Sept. 2011
- Raab, A.; Gromann, F.; Strunz, K. (2015): Multi-Level Cluster Optimization for Electric Vehicle Fleets Based on Standard Driving Profiles. Entwurf vom 13. Mai 2016 (Raab & Gromann, 2015)
- Radke, S. (2015): Verkehr in Zahlen 2014/2015. Hamburg, DVV Media Group.
- Rempel, J., Barnett, B. und Hyung, Y. /TIAX (2013). PHEV Battery Cost Assessment, TIAX LLC. [http://www4.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/resources/merit-review/sites/default/files/es001\\_barnett\\_2013\\_o.pdf](http://www4.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/resources/merit-review/sites/default/files/es001_barnett_2013_o.pdf). Zugriff: 19.11.2014.
- Renault Deutschland (2015): Renault Deutschland – Preise und technische Daten Renault Kangoo Z.E. <http://www.renault.de/renault-modellpalette/ze-elektrofahrzeuge/kangoo-ze/kangoo-ze/preise-und-technische-daten.jsp>. Zugriff: 03.04.2016.
- Rönisch, M. (2012): „Fit werden für Elektromobilität – Roll out“.
- Rupp, A. (2016): E-Lieferungen im Allgäu. <http://www.elektromobilitaet-verbundet.de/projekte/e-lieferungen-allgaeu.html>. Zugriff: 11.02.2016.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (Hrsg.) (2012): Umweltgutachten 2012 - Verantwortung in einer begrenzten Welt. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Safari, M., & Delacourt, C. (2011). Aging of a Commercial Graphite/LiFePO<sub>4</sub> Cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 158(10), A1123–A1135. doi:10.1149/1.3614529
- Sarasketa-Zabala, E., Gandiaga, I., Rodriguez-Martinez, L.M., Villarreal, I. (2014): Calendar ageing analysis of a LiFePO<sub>4</sub>/graphite cell with dynamic model validations: Towards realistic lifetime predictions. *Journal of Power Sources* 272, 45–57. doi:10.1016/j.jpowsour.2014.08.051
- Schaufenster-Elektromobilität (2014a): ELENA II – Elektroantrieb-Nachrüstätze für Diesel-Lieferwagen. [http://schaufenster-elektromobilitaet.org/de/content/projekte\\_im\\_ueberblick/projektsteckbriefe/projekt\\_896.html](http://schaufenster-elektromobilitaet.org/de/content/projekte_im_ueberblick/projektsteckbriefe/projekt_896.html). Zugriff: 21.02.2014.
- Schaufenster-Elektromobilität (2014b): Urbaner Logistischer Wirtschaftsverkehr. [http://schaufenster-elektromobilitaet.org/de/content/projekte\\_im\\_ueberblick/projektsteckbriefe/projekt\\_4036.html](http://schaufenster-elektromobilitaet.org/de/content/projekte_im_ueberblick/projektsteckbriefe/projekt_4036.html). Zugriff: 25.02.2014.
- Scheffler, (2012): Scheffler, “Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten”, *Qucosa.De*, no. November, pp. 1–146, 2002.
- Schindler, S., Bauer, M., Petzl, M., & Danzer, M. A.a. (2016). Voltage relaxation and impedance spectroscopy as in-operando methods for the detection of lithium

- plating on graphitic anodes in commercial lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*, 304, 170–180. doi:10.1016/j.jpowsour.2015.11.044
- Schlesinger, M. et al. (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose (Endbericht). BMWi-Projekt, Projekt Nr. 57/12
- Schuster, S. F., Bach, T., Fleder, E., Müller, J., Brand, M., SEXTL, G., Jossen, A. (2015): Nonlinear aging characteristics of lithium-ion cells under different operational conditions. *Journal of Energy Storage*, 1, 44–53. doi:10.1016/j.est.2015.05.003
- Schütz, T.; Hucho, W.-H. (2013): Hucho - Aerodynamik des Automobils; Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik. Springer Vieweg. Wiesbaden.
- Schwartz (2014): “Statistischer Bericht, Ergebnisse des Mikrozensus im Land Berlin 2014”, Statistik Berlin Brandenburg.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin [SenStadtUm] (2015): Flächennutzungsplan von Berlin 2015. Online Zugriff über FIS Broker. <http://fbinter.stadt-berlin.de/fb/index.jsp>. Zugriff: 11.11.2015.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin [SenStadtUm] (2015): Übersichtskarte von Berlin 1: 50 000 (ÜK50). Online Zugriff über FIS Broker. <http://fbinter.stadt-berlin.de/fb/index.jsp>. Zugriff: 11.11.2015.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin [SenStadtUm] (2013): Daten zum Berliner Verkehr. Kenndaten zur Mobilität. [http://www.stadtentwicklung.berlin.de/verkehr/politik\\_planung/zahlen\\_fakten/download/Mobilitaet\\_dt\\_Kap-1-2.pdf](http://www.stadtentwicklung.berlin.de/verkehr/politik_planung/zahlen_fakten/download/Mobilitaet_dt_Kap-1-2.pdf). Zugriff: 11.11.2015.
- Shell (2010): Shell Lkw-Studie. [http://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/portal\\_news/newsarchiv2010\\_3/Shell\\_Lkw\\_Studie\\_FIN\\_17042010.pdf](http://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/portal_news/newsarchiv2010_3/Shell_Lkw_Studie_FIN_17042010.pdf). Zugriff: 13.07.2016.
- Siegert, W. (2015): Transition in Richtung Elektromobilität?. Identifikation von potentiellen Marktnischen im städtischen Wirtschaftsverkehr auf Basis statistischer Auswertungen der Studie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“ 2010. Bachelorarbeit am Institut für Geographische Wissenschaften der FU Berlin in Kooperation mit dem komDRIVE Projekt.
- Sonntag, Herbert; Bertram Meimbresse; Uwe Castendiek (1996): Entwicklung eines Wirtschaftsverkehrsmodells für Städte, BAST V 33, 1996.
- Sonntag, H. (2016): KV-E-CHAIN. <http://www.th-wildau.de/index.php?id=6795>. Zugriff: 09.02.2016.
- SRU (2012): Sachverständigenrat für Umweltfragen, Umweltgutachten 2012: Verantwortung in einer begrenzten Welt. [http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01\\_Umweltgutachten/2012\\_06\\_04\\_Umweltgutachten\\_HD.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2012_06_04_Umweltgutachten_HD.pdf?__blob=publicationFile). Zugriff: 10.07.2016.
- Stadler, R. in: Batterie Zukunft (2014): Nissan bietet Fahrzeugbatterien für 5.499 US-Dollar an - Audi-Chef Stadler: Systempreis bei 200 Euro/kWh. Nachricht vom 01.09.2014. <http://www.batterie Zukunft.de/news/nissan-bietet-fahrzeugbatterien-f%C3%BCr-5499-us-dollar-audi-chef-stadler-systempreis-bei-200-euro>. Zugriff: 01.09.2014.
- Statista (2016): <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/163407/umfrage/Pkw-dichte-in-ausgewaehlten-laendern/> Zugriff: 15.01.2016
- Stromnetz Berlin GmbH (2015): „Preisblatt Entgelte für den Netzzugang“
- Strunz, K. et al. (2014): “Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources,” no. 273, pp. 4–6

- SUSTAINUM - GmbH (Hrsg.) (2014): Stadtentwicklungskonzept Green Moabit - Bericht. Potenzialanalyse, Handlungskonzept und Aktionsplan zu Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Unter Mitarbeit von Frieder Rock, Matthias Teller, Jörg Longmuß, Johanna Fink und Jana Milosovicova.  
[http://www.sustainum.de/fileadmin/user\\_upload/documents/Green\\_Moabit/Green\\_Moabit\\_Bericht.pdf](http://www.sustainum.de/fileadmin/user_upload/documents/Green_Moabit/Green_Moabit_Bericht.pdf). Zugriff: 11.11.2015.
- Thomas, E.V., Bloom, I., Christophersen, J.P., Battaglia, V.S., (2008): Statistical methodology for predicting the life of lithium-ion cells via accelerated degradation testing. *J. Power Sources* 184, 312–317. doi:10.1016/j.jpowsour.2008.06.017
- TransmissionCode, (2007) Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, online:  
[https://www.bdew.de/internet.nsf/id/A2A0475F2FAE8F44C12578300047C92F/\\$file/TransmissionCode2007.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/A2A0475F2FAE8F44C12578300047C92F/$file/TransmissionCode2007.pdf). Zugriff: 09.09.2016
- Trautewig, K. (2016): Elektromobilität in Bereichen der Abfallwirtschaft der Landeshauptstadt Dresden. <http://www.elektromobilitaet-verbindet.de/projekte/abfallwirtschaft-dresden.html>. Zugriff: 09.02.2016.
- TÜV SÜD AG (2015): Auto & Fahrzeug / Hauptuntersuchung / 4 Gebühren. Preise in Baden-Württemberg und Bayern. [http://www.tuev-sued.de/hauptuntersuchung/4-gebuehren#tab\\_1431075632784904060308](http://www.tuev-sued.de/hauptuntersuchung/4-gebuehren#tab_1431075632784904060308). Zugriff: 04.11.2015.
- UBA 2013: Daten zur Umwelt. <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2854>. Zugriff: 2013.
- Universität Ulm (2012): Kapitel 10 - Gesetz der großen Zahlen. [https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website\\_uni\\_ulm/mawi.inst.110/lehre/ws12/WR/Skript\\_10.pdf](https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/mawi.inst.110/lehre/ws12/WR/Skript_10.pdf).
- VDE (2011): „Technische Anschlussbedingungen TAB 2007“.
- VEM (2014): Forschungsprojekt VEM: Projekt.  
<http://www.ftm.mw.tum.de/forschungsfelder/smartemobilitaet/virtuelle-elektromobilitaet-fuer-den-taxi-und-handwerksverkehr-muenchen/>. Zugriff 14.06.2016.
- Verband der Elektrotechnik VDE (Hrsg.) (2015): Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene - Anwendungen und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze, VDE-Studie.
- Vetter, J., Novák, P., Wagner, M.R., Veit, C., Möller, K.-C., Besenhard, J.O., Winter, M., Wohlfahrt-Mehrens, M., Vogler, C., Hammouche, A. (2005): Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources* 147, 269–281.  
doi:10.1016/j.jpowsour.2005.01.006
- Volkswagen AG (1996): Volkswagen CADDY PICKUP 07/96; Konstruktion und Funktion, Selbststudienprogramm. Volkswagen AG. Wolfsburg.
- Waldmann, T., Wilka, M., Kasper, M., Fleischhammer, M., Wohlfahrt-Mehrens, M. (2014). Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries – A Post-Mortem study. *Journal of Power Sources*, 262, 129–135.  
doi:10.1016/j.jpowsour.2014.03.112
- Wang, J., Liu, P., Hicks-Garner, J., Sherman, E., Soukiazian, S., Verbrugge, M., Tataria, H., Musser, J., Finamore, P. (2011): Cycle-life model for graphite-LiFePO<sub>4</sub> cells. *Journal of Power Sources* 196, 3942–3948. doi:10.1016/j.jpowsour.2010.11.134
- Wermuth, M., Neef, C., Wirth, R., Hanitz, I., Löhner, H. (2012): Mobilitätsstudie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ (KiD 2010) – Ergebnisse im Überblick, (70), 40.

- Winterkorn, M. in Harvey, D. /Green Car Congress (2014): Green Car Congress: Volkswagen's Winterkorn: "great potential" in solid-state batteries, with possible 1,000 Wh/l, or 700 km range". Nachricht von Green Car Congress vom 07.11.2014. <http://www.greencarcongress.com/2014/11/20141107-winterkorn.html>. Zugriff: 12.11.2014.
- Wohlfahrt-Mehrens, M., Vogler, C., Garche, J. (2004): Aging mechanisms of lithium cathode materials. *J. Power Sources* 127, 58–64. doi:10.1016/j.jpowsour.2003.09.034
- Wright, R.B., Motloch, C.G., Belt, J.R., Christophersen, J.P., Ho, C.D., Richardson, R.A., Bloom, I., Jones, S.A., Battaglia, V.S., Henriksen, G.L., Unkelhaeuser, T., Ingersoll, D., Case, H.L., Rogers, S.A., Sutula, R.A. (2002): Calendar- and cycle-life studies of advanced technology development program generation 1 lithium-ion batteries. *J. Power Sources* 110, 445–470. doi:10.1016/S0378-7753(02)00210-0
- WVI GmbH Braunschweig (2012): Informationsseite zur Erhebung - KiD 2010. <http://www.kid2010.de/de/page&id=5&navid=305>. Zugriff: 31.03.2016.
- Yoshida, T., Takahashi, M., Morikawa, S., Ihara, C., Katsukawa, H., Shiratsuchi, T., Yamaki, J. (2006): Degradation Mechanism and Life Prediction of Lithium-Ion Batteries. *J. Electrochem. Soc.* 153, A576. doi:10.1149/1.2162467
- Zimmer, W.; Fritsche, U. (2008): Klimaschutz und Straßenverkehr; Effizienzsteigerung und Biokraftstoffe und deren Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen. Friedrich-Ebert-Stiftung. Bonn.
- 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TransnetBW GmbH, TenneT TSO GmbH (Hrsg.) (2015): [regelleistung.net](http://www.regelleistung.net) – Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung. – URL <https://www.regelleistung.net/>. Zugriff: 17.07.2015.

Weltweit werden elektrisch angetriebene Fahrzeuge entwickelt, die einen ersten Einblick in eine vermeintlich postfossile Mobilität der Zukunft geben. Auch wenn der Wirtschaftsverkehr in Hinblick auf sein Elektrifizierungspotenzial zunehmend häufiger untersucht wird, werden hier immer noch weniger Alternativen diskutiert als beim Personenverkehr.

Dabei erfüllt der Betrieb elektrischer Fahrzeuge in Flotten im Gegensatz zur privaten Nutzung viele Anforderungen idealer Erstnutzer: Aufgrund bekannter Fahrprofile, Tourenplanung, regel-mäßiger Einsätze und Ladeinfrastruktur auf dem Firmengelände können Betriebe die Vorteile elektrischer Fahrzeuge effizient ausnutzen.

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderte Forschungsprojekt „komDRIVE“, dessen Forschungsansatz und Ergebnisse in dieser Publikation dargestellt sind, hatte zum Ziel, der einseitigen Betrachtung von privater Nutzung elektrischer Kraftfahrzeuge entgegen zu wirken, indem es speziell den Einsatz im Wirtschaftsverkehr am Beispiel gewerblicher Fahrzeugflotten untersuchte. Das Forschungsprojekt befasste sich mit dem Elektrifizierungspotenzial kommerzieller Kraftfahrzeugflotten im Wirtschaftsverkehr als dezentrale Energie-Ressource in städtischen Verteilnetzen. Darin wurde eine ganzheitliche Lösungsstrategie für das Zusammenspiel von fortlaufender Dominanz CO<sub>2</sub>-intensiver Dieselantriebe im städtischen Wirtschaftsverkehr in Kombination mit einer erwarteten Zunahme der Verkehrsleistung auf der einen Seite und der Problematik der Energiespeicherung bei Zunahme des Anteils dezentral erzeugter Energie auf der anderen Seite, entwickelt.