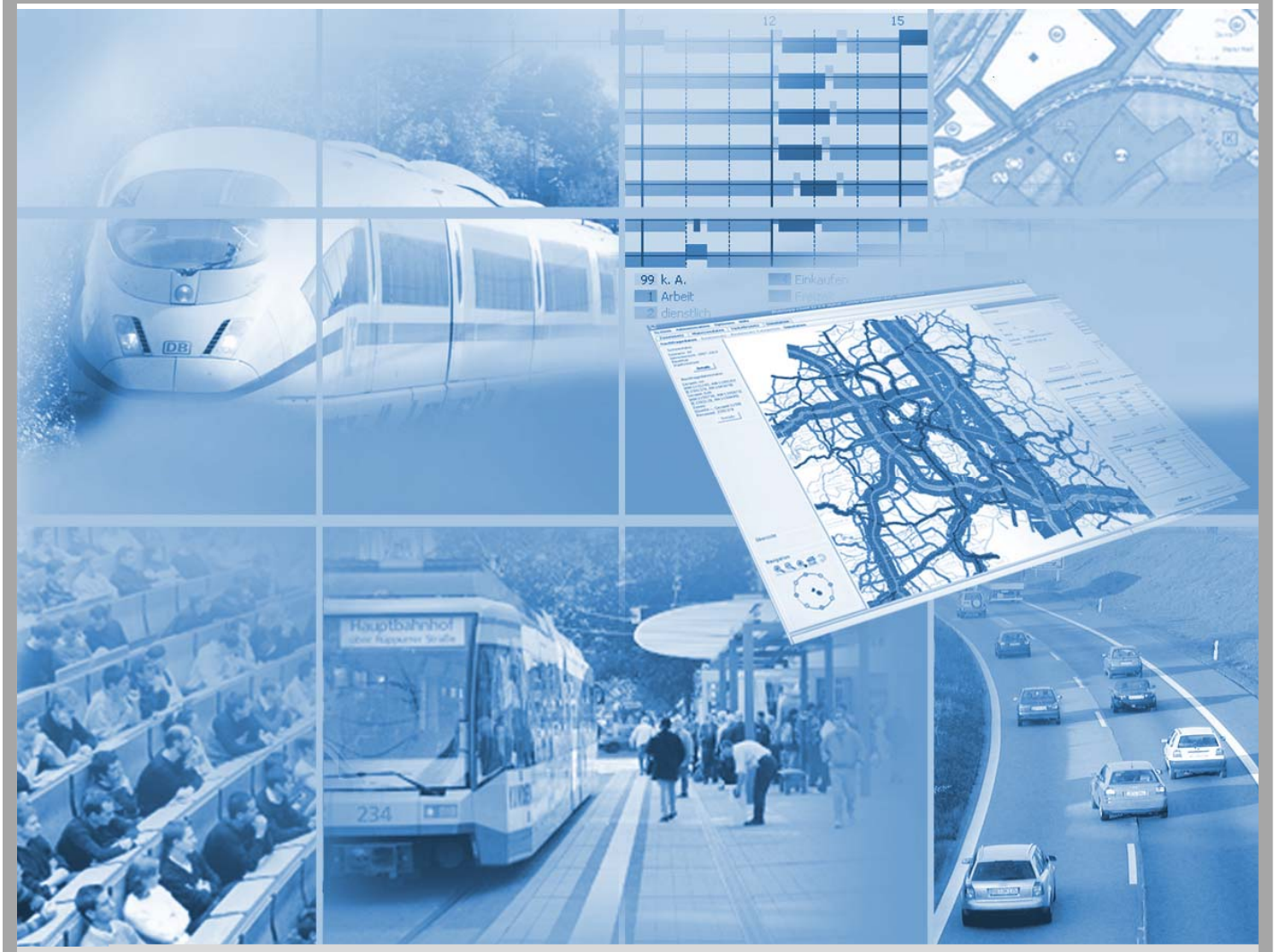
Karlsruher Institut für Technologie

Analyse und Klassifizierung der Nutzung der Deutschen Pkw-Flotte zur Ermittlung von Verlagerungs- und Substitutionspotenzialen auf umweltverträgliche Verkehrsträger

Abschlussbericht

Christine Eisenmann, Bastian Chlond (KIT - Institut für Verkehrswesen)
Fabian Bergk, Claudia Kämper, Wolfram Knörr, Jan Kräck (ifeu)

INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



Substitutionspotenziale der Pkw-Nutzung

Gefördert durch

Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

Hauptstätter Straße 67
70178 Stuttgart

Bearbeiter

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Verkehrswesen

Projektleiter: Bastian Chlond
Bearbeiter: Christine Eisenmann (geb. Weiß)

Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe
Tel.: +49 721-608-42251

E-Mail: bastian.chlond@kit.edu
christine.eisenmann@kit.edu

Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg (ifeu)

Projektleiter: Wolfram Knörr
Bearbeiter: Fabian Bergk, Claudia Kämper, Jan Kräck

Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg
Tel.: +49 6221-4767-38

E-Mail: wolfram.knoerr@ifeu.de
fabian.bergk@ifeu.de

Praxispartner

Stadtmobil Stuttgart AG
Edgar Augel

Tübinger Straße 15
70178 Stuttgart

Karlsruhe, 03.01.2018

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS **5**

ABBILDUNGSVERZEICHNIS **7**

TABELLENVERZEICHNIS **9**

1 PROBLEM- UND AUFGABENSTELLUNG **11**

2 MODELLIERUNG DER NUTZUNG DER DEUTSCHEN PKW-FLOTTE ALS EINZELFAHRTEN ÜBER EIN JAHR **13**

2.1 Stand der Forschung 14
2.2 Eingangsdaten der Modellierung und der Modellvalidierung 16
2.3 Modellaufbau 18
2.3.1 Grundlegende Annahmen und Vorüberlegungen der Modellierung 19
2.3.2 Schritt 1: MOP-Woche 20
2.3.3 Schritt 2: Typische Woche 22
2.3.4 Schritt 3: Tankbuchzeitraum 23
2.3.5 Schritt 4: Restliche Tage des Jahres 24
2.4 Zwischenergebnis: Pkw-Nutzungsprofile über ein Jahr 24
2.5 Ergänzung externer Informationen zu den modellierten Fahrprofilen 25
2.5.1 Ergänzung von Informationen zur Infrastrukturnutzung 25
2.5.2 Ergänzung von Wetterinformationen 26
2.5.3 Ergänzung von Pkw-Kosten 27
2.6 Gewichtung der Pkw-Flotte 29
2.7 Modellvalidierung 30

3 MODELLIERUNG VON ENERGIEVERBRAUCH UND EMISSIONEN **35**

3.1 Anpassung der Fahrzeuge 35
3.2 Modellierung der fahrtenfeinen Emissionen und Energieverbrauchs im warmen Betrieb 36
3.3 Modellierung der fahrtenfeinen Emissionen und Energieverbrauchs aufgrund des Kaltstarts37

4 PKW-ABHÄNGIGKEIT UND PKW-NOTWENDIGKEIT **41**

4.1 Das Konzept der Pkw-Abhängigkeit in der Literatur 41
4.1.1 Die Makroebene 41
4.1.2 Die Mesoebene 42
4.1.3 Die Mikroebene 43
4.2 Methodik 46

4.2.1 Pkw-Abhängigkeit des Haushalts ... 47
4.2.2 Notwendigkeit von einzelnen Pkw im Haushalt ... 49
4.3 Ergebnisse zu Pkw-Abhängigkeit und Pkw-Notwendigkeit ... 50
4.3.1 Pkw-Abhängigkeit ... 50
4.3.2 Pkw-Notwendigkeit ... 53

5 ANALYSE ÖKONOMISCHER SUBSTITUTIONSPOTENZIALE VON PRIVATEN PKW DURCH CARSHARING ... 57

5.1 Methodik ... 58
5.1.1 Aufstellung von Carsharing-Szenarien ... 58
5.1.2 Ermittlung der Carsharing-Kosten ... 60
5.1.3 Modellierung der Emissionen der CS-Nutzerprofile ... 63
5.2 Ergebnisse ... 63
5.2.1 Ökonomische Substitutionspotenziale durch Carsharing ... 64
5.2.2 Emissionsminderungspotenziale durch Carsharing ... 69
5.2.3 Soziodemografische Eigenschaften potenzieller Carsharing-Nutzer ... 71

6 ANALYSE REALISTISCHER SUBSTITUTIONSPOTENZIALE VON PKW DURCH PEDELECS ... 75

6.1 Nutzungsmuster von Pedelecs ... 76
6.2 Ökologische Bewertung von Pedelecs in der Verkehrsmittelnutzung ... 78
6.3 Ableitung von Szenarien zur Pkw-Substitution durch Pedelecs ... 79
6.3.1 Szenario „Maximal“ ... 80
6.3.2 Szenario „Mittlere Distanz“ ... 81
6.3.3 Szenario „Reiner Pendler“ ... 83
6.3.4 Szenario „Alltagsnutzer“ ... 83
6.3.5 Sensitivität „wettersensibel“ ... 83
6.4 Pkw-Substitutionspotenzial durch Pedelec-Nutzung ... 84
6.4.1 Anwendung der Pedelec-Szenarien auf den CUMILE-Datensatz ... 84
6.4.2 Ergebnisse ... 84
6.5 Diskussion geeigneter Maßnahmen und Handlungsempfehlungen ... 87
6.5.1 Infrastrukturelle Rahmenbedingungen verbessern ... 88
6.5.2 Verfügbarkeit erhöhen ... 89

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK ... 91

8 LITERATUR ... 95

9 ANHANG A: CARSHARING-BROSCHÜRE ... 103

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung des Ansatzes zur Modellierung von Nutzungsprofilen und resultierenden Umweltwirkungen der deutschen Pkw-Flotte über ein Jahr 13
Abbildung 2-2: Struktur des Pkw-Nutzungsmodells CUMILE, aufgezeigt anhand der Modellergebnisse eines Pkw 18
Abbildung 2-3: Zusammenfassung von Pkw-Wegen zu einem Ausgang 20
Abbildung 2-4: Initiale Zuordnungsheuristik von Pkw zu Pkw-Fahrern in der MOP-Erhebungswoche 21
Abbildung 2-5: Vorgehensweise der Pkw-Kostenergänzung an den CUMILE-Datensatz 28
Abbildung 3-1: Faktoren der NOx-Mehremissionen in Abhängigkeit der Außentemperatur gemäß (Keller, Hausberger, Matzer, Wüthrich, & Notter, 2017) 37
Abbildung 3-2: Darstellung der Interpolation von Zwischenwerten auf Basis des Regressionsmodells für die zusätzlichen Kohlenmonoxidemissionen beim Kaltstart dieselbetriebener Pkw der Abgasnormstufe Euro-1. 39
Abbildung 4-1: Differenzierung der Begriffe Pkw-Abhängigkeit und Pkw-Notwendigkeit ... 47
Abbildung 4-2: Kategorien für die Bestimmung des Pkw-Abhängigkeitsindikators 48
Abbildung 4-3: Kategorien für die Bestimmung des Pkw-Notwendigkeitsindikators 50
Abbildung 4-4: Verteilung des Pkw-Abhängigkeitsindikators 51
Abbildung 4-5: Pkw-Abhängigkeit, differenziert nach Haushaltstyp 52
Abbildung 4-6: Pkw-Abhängigkeit, differenziert nach Wohnortgröße 52
Abbildung 4-7: Verteilung des Pkw-Notwendigkeitsindikators 53
Abbildung 4-8: Pkw-Notwendigkeit, differenziert nach Pkw-Alter 54
Abbildung 4-9: Pkw-Notwendigkeit, differenziert nach Stellung des Pkw im Haushalt 55
Abbildung 5-1: Darstellung der jährlichen Kosten des Privat-Pkw-Besitzes im Vergleich zur Carsharing-Mitgliedschaft (Stadtmobil Karlsruhe 2017) 57
Abbildung 5-2: Spezifika des in der Modellierung hinterlegten CS-Tarifs (Stadtmobil Stuttgart 2017) 61
Abbildung 5-3: Zusammenhang zwischen Jahresfahrleistung und Pkw-Kosten als Privat-Pkw und als CS-Pkw unter verschiedenen Szenarien 65
Abbildung 5-4: Gegenüberstellung von Pkw-Kosten bei Privatnutzung und als CS-Fahrzeug unter verschiedenen Szenarien 67
Abbildung 5-5: Ökonomische Vorteilhaftigkeit von CS für verschiedene Jahresfahrleistungen, differenziert nach verschiedenen Szenarien 69

Abbildung 5-6: Zusammenhang zwischen dem ökonomischen Substitutionspotenzial von Privat-Pkw durch Carsharing und der Notwendigkeit dieser Pkw für deren Halter 73
Abbildung 6-1: Abgrenzung des Pedelec-Konzeptes zu anderen E-Bikes (verändert nach Lienhop et al. 2015) 75
Abbildung 6-2: Verlagerungspotenzial von anderen Verkehrsmitteln zum Pedelec (Lienhop et al. 2015) 77
Abbildung 6-3: Klimawirkung verschiedener Verkehrsmittel über den Lebensweg mit deutschem Strommix (Lienhop et al. 2015) 79
Abbildung 6-4: Anteile der Wegezwecke der Pkw-Fahrten in CUMILE 82

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Gewichtungsfaktoren auf Haushaltsebene. Fallzahlen der Stichprobe sind in Klammern ausgewiesen 30
Tabelle 2-2: Gegenüberstellung der Erhebungseigenschaften der MiD 2008 und KiD 2010 mit den Modelleigenschaften von CUMILE und die daraus resultierende Datenharmonisierung in der in der Validierung von CUMILE (Wermuth et al. 2012; infas und DLR 2010b) 32
Tabelle 2-3: Vergleich der in den Erhebungen MiD 2008 und KiD 2010 erhobenen Mobilitätseckewerten mit den in CUMILE modellierten Mobilitätseckwerten 33
Tabelle 3-1: Bestimmtheitsmaße und relative mittlere quadratische Fehler des Regressionsmodells zur Bestimmung der Kaltstartemissionen sowie der Zusatzverbräuche für die berücksichtigten Emissionsminderungskonzepte 38
Tabelle 4-1: Mittlere Emissionen der Pkw in den verschiedenen Pkw-Notwendigkeitsquartilen über ein Jahr 55
Tabelle 5-1: CS-Nutzungsszenarien 59
Tabelle 5-2: Zuordnung der KBA-Segmente an die CS-Fahrzeugtarifklassen 62
Tabelle 5-3: Zusammenstellung der CS-Ergebnisse (ökonomische und ökologische Analyse) unter verschiedenen Szenarien 70
Tabelle 5-4: Schätzergebnisse (und zugehörige Signifikanzniveaus) von fünf binären logistischen Regressionen. Wahrscheinlichkeit, dass es ökonomisch sinnvoll ist, einen Pkw durch CS zu ersetzen. 72
Tabelle 6-1: Zusammenfassung zentraler Wegedaten aus dem Feldtest in Pedelection 78
Tabelle 6-2: Annahmen der Szenarien zu Pkw-Substitutionspotenzialen durch Pedelecs 80
Tabelle 6-3: Substituierte Wege und Kilometer durch das Pedelec in den Szenarien 85
Tabelle 6-4: Verteilung der substituierte Wege der Szenarien auf Altersklassen 85
Tabelle 6-5: Verteilung der substituierte Wege der Szenarien auf Status der Erwerbstätigkeit 86
Tabelle 6-6: Verteilung der substituierten Wege der Szenarien auf die Jahresfahrleistung der Pkw 87

1 Problem- und Aufgabenstellung

Erklärtes politisches und gesellschaftliches Ziel in Deutschland ist eine deutliche Senkung der Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen. Hierzu muss der Verkehrssektor einen wesentlichen Beitrag leisten. Strategien sind dabei die „Verkehrswende“, unter der Verkehrsvermeidung und Verlagerung zusammengefasst sind, und die „Energiewende im Verkehr“, also der Umstieg auf treibhausgasarme und -freie Energieträger (Bergk et al. 2016a).

Zentral ist dabei die Emissionsreduktion beim Pkw, welcher der größte verkehrliche Emittent von Treibhausgasen und wesentlicher Verursacher der innerstädtischen Luftverschmutzung ist. Als realistische Minderungsoptionen im Personenverkehr werden „Elektromobilität“, die Förderung umweltfreundlicher Verkehrsträger und generell die Förderung „multimodalen Verhaltens“ angesehen. Letzteres bedeutet, dass die Nutzer befähigt werden, die unter den Anforderungen der jeweiligen Fahrt in Abwägung von Nutzer- und Umweltanforderungen optimale Mobilitätslösung auszuwählen. Alle genannten Minderungsoptionen setzten dabei bei intensiver Umsetzung eine hohe Akzeptanz der derzeitigen Pkw-Nutzer voraus. Um diese zu gewinnen, sollten die Nutzerbedürfnisse bei der Gestaltung umweltfreundlicherer Mobilitätskonzepte verstärkt Berücksichtigung finden.

Das Vorhaben zielt darauf ab, ein Werkzeug und eine Datengrundlage zu entwickeln, mit denen Minderungsoptionen im Personenverkehr explizit unter Einbezug des Nutzerverhaltens analysiert werden können. Um das Potential der Pkw-Substituierbarkeit überhaupt quantifizieren zu können, wird eine umfassende Datengrundlage zur Pkw-Nutzung, den daraus resultierenden Umweltwirkungen sowie den aus der Pkw-Nutzung resultierenden finanziellen Aufwände benötigt. Diese Analysen erfordern für die deutsche Pkw-Flotte repräsentative Nutzungsdaten über längere Zeiträume. Längere Zeiträume sind deshalb erforderlich, da üblicherweise Pkw nicht jeden Tag gleich genutzt werden, sondern die Nutzungscharakteristika über einen längeren Zeitraum stark variieren und in unterschiedlichen Zyklen erfolgen (z. B. alltägliches Pendeln versus seltene Urlaubsfernfahrten).

Originäre, repräsentative und längsschnittorientiere Daten zur Nutzung der Pkw-Flotte in Deutschland sind jedoch nicht verfügbar. Nationale Erhebungen zur Mobilität von Personen (z. B. Deutsches Mobilitätspanel (MOP), Mobilität in Deutschland (MiD)) und zur Nutzung von Kraftfahrzeugen (Kraftverkehr in Deutschland KiD) werden nur über kurze Zeiträume (z. B. ein Tag, eine Woche) durchgeführt oder andere Untersuchungen zur Fahrleistung beschränken sich auf die Messung von Kilometerständen (z. B. Fahrleistungserhebung) (Weiss et al. 2016b; infas und DLR 2010a; Wermuth et al. 2012; Hautzinger et al. 2005). Anhand der bestehenden Datenquellen kann jedoch nicht untersucht werden, wie sich Pkw-Jahresfahrleistungen auf einzelne Fahrten im Jahresverlauf verteilen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde ein Ansatz entwickelt, welcher diese Informations- und Datenlücken über Modellierungsansätze basierend auf empirischen Erhebungsdaten zum Mobilitätsverhalten und anderen statistischen Daten sowie über eine Zuordnung weiterer Informationen und Datenquellen schließt. Dabei werden bereits vorhandene Modelle oder Datengrundlagen sinnvoll miteinander verknüpft, was gänzlich neue Anwendungsmöglichkeiten erschließt. Liegen Daten zum Nutzerverhalten in einer entsprechenden Auflösung sowie in Verbindung zu anderen soziodemografischen Informationen der Halter und Nutzer vor, wird es möglich, neue Mobilitätslösungen und politische Instrumente zu entwickeln, die sich an den Eigenschaften des privaten Pkw orientieren. Zudem kann basierend auf dem Pkw-Nutzerverhalten ihr Emissionsminderungspotenzial abgeschätzt werden.

Neben der Entwicklung einer Datenbasis werden mit dem Vorhaben konkrete Fragestellungen und Anwendungsfälle für die Substituierbarkeit der Pkw-Nutzung betrachtet: Dies ist zum einen die Frage, wie „abhängig“ Haushalte von der Nutzung und dem Besitz eines eigenen Pkw sind (Kapitel 4). Des Weiteren werden Potenzialabschätzung der Nutzbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Carsharing durchgeführt (Kapitel 5). Das Minderungspotenzial von Carsharing wird dabei hinsichtlich einer angepasste Wahl des Fahrzeugtyps und hinsichtlich der sich ändernden Kostenstruktur der Pkw-Nutzung analysiert: Modalentscheidungen werden auf Seiten der Pkw-Option beim Carsharing auf Basis der Durchschnittskosten, nicht wie beim privaten Pkw auf Basis der Marginalkosten getroffen, wodurch „multimodales Verhalten“ gefördert werden kann (Kapitel 5). Eine weitere zu betrachtende Fragestellung ist das Verlagerungspotenzial auf das Pedelec: So werden typische Wege und Ausgänge von Pedelec-Nutzern analysiert und mit denen von Pkw-Nutzern verglichen. Daraus werden unterschiedliche Szenarien abgeleitet, die unter jeweiligen Annahmen Verlagerungspotenziale auf das Pedelec darstellen (Kapitel 0).

2 Modellierung der Nutzung der Deutschen Pkw-Flotte als Einzelfahrten über ein Jahr

Die unterschiedlichen Nutzungsintensitäten von Pkw (in Bezug auf Fahrthäufigkeiten, Fahrtweiten und Standdauern zwischen Fahrten) haben erhebliche Auswirkungen auf deren (kumulierte) Emissionen. Da repräsentative und längsschnittorientierte Daten (ein Jahr oder länger) zur Nutzung der Pkw-Flotte in Deutschland nicht vorliegen, können unterschiedliche Nutzungsintensitäten bei der Emissionsberechnung oftmals nicht ausreichend berücksichtigt werden. Zudem erfolgt die Abbildung und Zuordnung von Emissionen in konventionellen Betrachtungen häufig nur auf der Grundlage von Mittelwerten, die nicht den Spezifika einzelner Fahrten gerecht werden. Damit erfolgt in üblichen Potenzialanalysen von Maßnahmen die Abbildung von Pkw-Emissionen vielfach nur unzureichend.

Der vorgestellte Modellierungsansatz (Abbildung 2-1) schließt diese Forschungslücke. Basis sind das am Institut für Verkehrswesen (IfV) des Karlsruher Instituts für Technologie entwickelte Pkw-Nutzungsmodell CUMILE (Car Usage Model Integrating Long distance Events) (Chlond et al. 2014), welches Fahrten über ein ganzes Jahr für eine repräsentative Pkw-Flotte modelliert, und das am Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) entwickelte Emissionsberechnungsmodell TREMOD (Transport Emission Model). Den in CUMILE abgebildeten Fahrten werden Informationen zur Infrastrukturnutzung und Wetterbedingungen zugeordnet. Hiernach wird in TREMOD für jede einzelne Fahrt die Emissionen im warmen Betrieb und bei Kaltstart ermittelt.

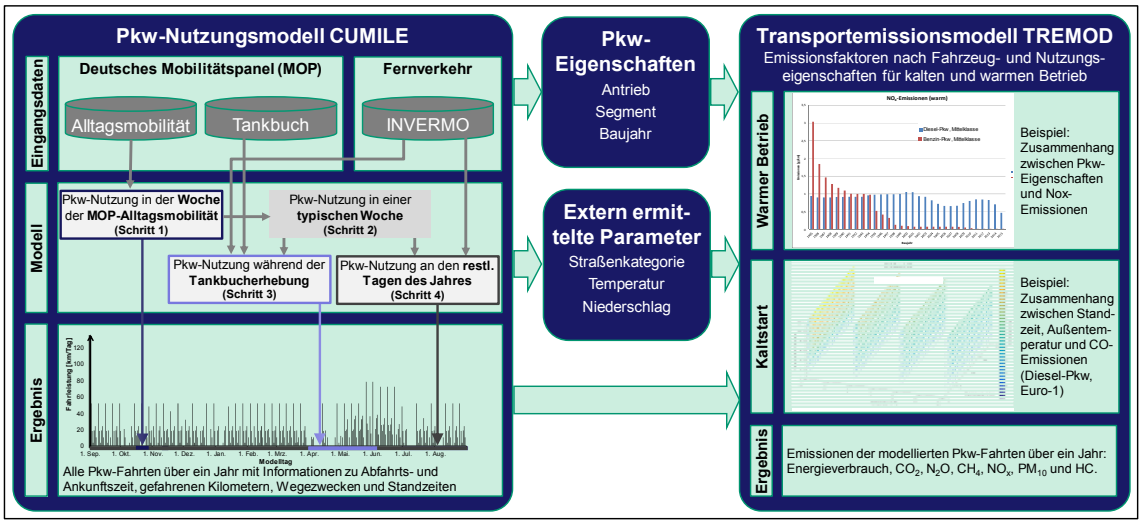


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung des Ansatzes zur Modellierung von Nutzungsprofilen und resultierenden Umweltwirkungen der deutschen Pkw-Flotte über ein Jahr

Die Modellierung der Pkw-Nutzung wird in Kapitel 2 erläutert. In den Abschnitten dieses Kapitels finden sich eine Zusammenfassung zum Stand der Forschung, zur Erhebung und Modellierung

der Pkw-Nutzung im Längsschnitt, ein Überblick über die genutzten Eingangsdaten der Modellierung, eine Beschreibung des Modellaufbaus sowie der Ergänzung von externen Fahrtinformationen. Außerdem wird die Gewichtung der modellierten Pkw-Flotte vorgestellt und das CUMILE-Modell validiert. Die Modellierung des Energieverbrauchs und der Emissionen der Pkw-Nutzung mit dem Modell TREMOD sowie die Kopplung der beiden Modelle wird in Kapitel 3 vorgestellt.

2.1 Stand der Forschung

Studien zur Pkw-Nutzung im Längsschnitt lassen sich in GPS-Studien und Studien zur Adaptierbarkeit von Mobilitätserhebungen unterteilen.

Die Durchführung von GPS-Erhebungen zur Pkw-Nutzung ist in der jüngeren Vergangenheit ein gangbarer Ansatz, um Pkw-Nutzungscharakteristika über längere Zeiträume zu untersuchen. Beispielsweise analysierten Pearre et al. (2011) GPS-Daten von Pkw in der Metropolregion Atlanta von bis zu zwei Jahre, um die Nutzung von Pkw im Fernverkehr und das Marktpotenzial von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) zu bewerten. Schönfelder (2006b) und Axhausen et al. (2004) nutzten eine GPS-Erhebung aus Borlänge, Schweden, die über bis zu 80 Wochen durchgeführt wurde, um Variabilität und Repetition in der Alltagsmobilität zu analysieren. Khan und Kockelman (2012) führten in Seattle, USA, über einen Zeitraum von einem Jahr eine GPS-Erhebung durch, um Pkw-Nutzungscharakteristika im Längsschnitt zu untersuchen und um das Marktpotenzial von Plug-in-Elektrofahrzeugen (PHEV) zu ermitteln. He et al. (2016) analysierten die GPS-Fahrzeugprofile in Peking, China, von ein bis sechs Monaten, um die Marktakzeptanz von BEV und Hybridelektrischen Fahrzeugen (HEV) in China zu bewerten.

GPS-Daten weisen jedoch verschiedene Nachteile auf: Die Stichprobe ist oft klein, nur auf eine einzelne Stadt oder Metropolregion zugeschnitten und damit nicht repräsentativ. Die Kosten für die GPS-Datenerfassung sind höher als bei traditionellen Mobilitätserhebungen mit Wegetagebüchern (Elango et al. 2007). Die Stichprobenabdeckung ist begrenzt und die Datenqualität ist aufgrund vorübergehender GPS-Signalverluste oder Signalreflexionen durch hohe Gebäude teilweise eingeschränkt (He et al. 2016). Ein weiterer Nachteil von passiven Datenerhebungsmethoden wie GPS ist, dass zusätzliche Wegeinformationen, wie Wegezweck oder Informationen zu den Pkw-Insassen, auf der einzelnen Fahrt nicht aufgezeichnet werden (Elango et al. 2007).

Eine weitere Möglichkeit, Pkw-Nutzungsprofile über längere Zeiträume zu generieren und zu analysieren, ist die Erstellung von Modellen, die Informationen aus bereits vorhandenen Mobilitätserhebungen nutzen. Hierbei unterscheiden sich die verschiedenen Ansätze stark

hinsichtlich den Eingangsdaten der Modellierung und den zu modellierenden Zielgrößen. Der erste derartige Ansatz wurde von Greene (1985) bereits vor über 30 Jahren entwickelt. Greene nutzte die Erhebung des National Family Opinion Poll Gasoline Diary Panels als Eingangsdaten der Modellierung. Eine Erhebung zu Pkw-Tankvorgängen über einen Zeitraum von 36 Monaten (der Erhebungsansatz ist vergleichbar mit der MOP-Erhebung zu Pkw-Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch, siehe Kapitel 2.2). Ziel des Modellansatzes von Greene ist es, die Tagesfahrleistungen zwischen jeweils zwei Tankvorgängen abzuleiten. Eine zentrale Modellannahme ist, dass die Tagesfahrleistungen eines Pkw über einen längeren Zeitraum als eine Reihe von unabhängigen Zufallswerten angeordnet sind und daher die Pkw-Fahrleistung an zwei aufeinander folgenden Tagen nicht korreliert; die zugrundeliegende Wahrscheinlichkeitsverteilung für Tagesfahrleistungen sei Gamma-verteilt. Andere Studien zum Mobilitätsverhalten zeigen, dass das Mobilitätsverhalten von Personen zumindest teilweise repetitiv ist, weil Personen bestimmte Ziele, wie den Arbeitsplatz, das Fitnessstudio oder den nächstgelegenen Supermarkt regelmäßig aufsuchen und für diese Wege häufig die gleichen Verkehrsmodi benutzen (Elango et al. 2007; Schönfelder 2006a; Susilo und Axhausen 2014). Plötz et al. (2017) haben verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Pkw-Tagesfahrleistungen verglichen und kamen zu dem Schluss, dass die Annahme von unabhängigen Tagesfahrleistungen akzeptabel ist, da die Autokorrelation der Pkw-Tagesfahrleistungen begrenzt ist.

He et al. (2016) nutzten einen ähnlichen Ansatz wie Greene (1985), um zu prognostizieren, wie häufig Pkw im Laufe eines Jahres im Fernverkehr genutzt werden. Eingangsdaten der Modellierung bilden die Daten der GPS-Erhebung von Pkw aus Peking, China über einen Zeitraum von ein bis sechs Monaten. Für diese Abschätzung wurde eine Funktion entwickelt, die sowohl aus einer exponentiellen Verteilung als auch aus einen Gaußschen Verteilung besteht. Der Gaußsche Anteil der Verteilung soll Pkw-Nutzung im Alltag und der exponentielle Teil der Verteilung seltene Pkw-Nutzungsmuster, beispielsweise Fernverkehr, repräsentieren.

Plötz (2014) entwickelte einen ähnlichen statistischen Ansatz, um die Anzahl der Tage pro Jahr zu bestimmen, an welchen der Pkw im Fernverkehr genutzt wird. Eingangsdaten der Modellierung sind Wegetagebücher des MOP über eine Woche. Die zentrale Annahme des statistischen Modells ist, dass Tagesfahrleistungen einzelner Pkw im Längsschnitt Log-normal verteilt sind.

Im Gegensatz zu anderen, bereits existierenden Modellen werden in CUMILE nicht nur Tagesfahrleistungen oder Häufigkeiten von Fernverkehrsnutzungen modelliert, sondern auch Pkw-Wegeketten in einem deutlich größeren Detailierungsgrad abgebildet. Ein weiterer Vorteil des CUMILE-Modells ist, dass bereits vorhandene Mobilitätserhebungen als Eingangsdaten der Modellierung genutzt werden und eine neue Datenerfassung aus diesem Grund nicht notwendig

ist. Darüber hinaus sind aufgrund des gewählten Modellierungsansatzes und der genutzten Eingangsdaten soziodemografische Informationen der Pkw-Nutzer bekannt, was eine Analyse der Pkw-Nutzungsmuster, differenziert nach soziodemografischen Merkmalen der Pkw-Nutzern, ermöglicht.

2.2 Eingangsdaten der Modellierung und der Modellvalidierung

Eingangsdaten des Modells CUMILE sind zwei Erhebungen zum Mobilitätsverhalten und zur Kfz-Nutzung in Deutschland: Das Deutsche Mobilitätspanel (MOP) sowie die Fernverkehrserhebung INVERMO.

Das MOP ist eine im Auftrag des Bundesverkehrsministeriums durchgeführte Längsschnitterhebung, die seit 1994 kontinuierlich das Mobilitätsverhalten in Deutschland untersucht (Weiss et al. 2016b). Im Mittelpunkt dieser Studie stehen die Alltagsmobilität von Personen sowie Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch von Pkw in Privathaushalten.

In der Erhebung zur Alltagsmobilität werden die Mitglieder (ab 10 Jahren) von Privathaushalten gebeten, über einen Zeitraum von einer Woche ein Wegetagebuch auszufüllen. Jedes Jahr nehmen 2.000 bis 2.700 Personen aus 1.000 bis 1.500 Haushalten am MOP teil. Mittels des Wegetagebuchs werden alle Wege der Personen mit Start- und Endzeiten, Zweck (z. B. Weg zum Einkaufen, zur Arbeit), benutzten Verkehrsmitteln (z. B. Fahrrad, Pkw) und zurückgelegter Entfernung erfasst. Zudem werden die Erhebungsteilnehmer gebeten, sozioökonomische Informationen zu ihrer Person (z. B. Alter, Berufstätigkeit) und zu ihrem Haushalt (z. B. Pkw-Besitz, Anzahl Personen im Haushalt) sowie zu möglichen Besonderheiten im Erhebungszeitraum (z. B. Urlaub, Krankheit, Pkw in der Werkstatt) anzugeben. Dieser Teil der Erhebung findet seit 1994 jedes Jahr im Herbst statt.

Haushalte, die an der Erhebung zur Alltagsmobilität teilnehmen und einen Pkw besitzen, werden im zweiten Erhebungsteil des MOP gebeten, auch an der Erhebung zu Pkw-Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch teilzunehmen. Im Rahmen dieses Erhebungsteils füllen die Teilnehmer für alle Pkw in ihrem Haushalt ein Tanktagebuch über einen Zeitraum von acht Wochen aus. Erfasst werden Informationen zu den im Erhebungszeitraum stattfindenden Tankvorgängen, wie Menge und Preis des getankten Kraftstoffs, Datum und Kilometerstand. Zudem werden Kilometerstände und Tankfüllstände der Pkw zu Beginn und Ende des Erhebungszeitraums sowie weitere Pkw-Eigenschaften (z. B. Baujahr, Hubraum, Marke) und Pkw-Nutzungscharakteristika (z. B. geschätzte Jahresfahrleistung, Nutzung als Privat- oder Dienstwagen) erhoben. Dieser Erhebungsteil findet seit 2002 jedes Jahr im Frühjahr statt.

INVERMO ist eine repräsentative Erhebung zum Mobilitätsverhalten der deutschen Bevölkerung im Fernverkehr (Chlond et al. 2004; Zumkeller et al. 2005). Grundgesamtheit der Erhebung INVERMO sind in Deutschland lebende Personen (ab 14 Jahren), die in Privathaushalten leben und deren Haushalt über einen Festnetzanschluss verfügt. Das Erhebungskonzept für INVERMO ist mehrstufig aufgebaut, um sowohl den Anforderungen an die Repräsentativität als auch an den Detailierungsgrad der erhobenen Informationen zum Fernverkehrsverhalten gerecht werden zu können. Hierfür wurde ein Panel-Ansatz mit wiederholter Befragung derselben Erhebungsteilnehmer erarbeitet, um intra-personell ausreichend lange Erhebungszeiträume generieren zu können und um die Saisonalität in der Erhebung berücksichtigen zu können. Die Erhebungsteilnehmer wurden gebeten, retrospektiv von ihren letzten drei Fernreisen zu berichten. Erhoben wurden Fernreisen einschließlich der genutzten Verkehrsmittel, die Entfernung zum Zielort, der Abfahrtstag sowie die Dauer der Reise. Fernreisen sind definiert als Wege von mindestens 100 km Länge. INVERMO wurde in den Jahren 2000-2002 durchgeführt und umfasst rund 17.000 Fernverkehrsereignisse.

Für die Modellvalidierung wurden die Erhebungen Mobilität in Deutschland 2008 und Kraftverkehr in Deutschland 2010 genutzt.

Die Erhebung *Mobilität in Deutschland (MiD) 2008* ist eine repräsentative Stichtagserhebung des Mobilitätsverhaltens der in Deutschland lebenden Bevölkerung (infas und DLR 2010a). MOP und MiD sind beides Erhebungen zum Mobilitätsverhalten von Personen in Privathaushalten, aber sie unterscheiden sich in Erhebungszeitraum, Stichprobengröße und Detaillierungsgrad der Wegeabfrage. Die Erhebungsteilnehmer der MiD füllen ein Wegetagebuch über einen Tag aus. Erhoben wird an allen Tagen des Jahres. Des Weiteren wird die Erhebung MiD nicht jährlich durchgeführt, sondern alle sechs bis acht Jahre. Die Stichprobengröße der MiD ist deutlich größer als die des MOP. Im Wegetagebuch geben die Erhebungsteilnehmer der MiD zusätzlich zu Start- und Endzeiten, Zweck, benutzten Verkehrsmitteln und zurückgelegter Entfernung auch – im Falle eines Pkw-Weges – an, welchen Pkw im Haushalt sie für diesen Weg genutzt haben.

Die Studie *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KiD) 2010* ist eine deutschlandweite Befragung von Kraftfahrzeughaltern zu Einsatz und Nutzung ihrer Fahrzeuge (Wermuth et al. 2012). Den Schwerpunkt der Erhebung bildet die empirische Analyse des Straßenwirtschaftsverkehrs der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge. Aus diesem Grund sind Pkw gewerblicher Halter und Lkw bis einschließlich 3,5 t Nutzlast überproportional in der Stichprobe vertreten, aber es nehmen auch Halter von rund 4.500 Privat-Pkw an der Erhebung teil. Im Rahmen der KiD werden Fahrzeugeigenschaften und halterbezogene Informationen erhoben. Zudem wird zu jedem Pkw in der Stichprobe für jeweils einen vorgegebenen Erhebungsstichtag ein Fahrtentagebuch ausgefüllt, welches alle an diesem Tag realisierten Fahrten sowie Fahrtinformationen (z. B. Start- und Endzeit der Fahrt, Zweck, zurückgelegte Strecke) enthält. Die Erhebung wurde das letzte

Mal zwischen November 2009 und Oktober 2010 mit insgesamt 112 Erhebungstagen in diesem Zeitraum durchgeführt.

2.3 Modellaufbau

Im Pkw-Nutzungsmodell CUMILE wird die Pkw-Nutzung einer repräsentativen Flotte über ein ganzes Jahr abgebildet. Modelliert werden die Nutzungscharakteristika von Pkw, deren Pkw-Besitzer sowohl an der Wochenerhebung des *MOP* als auch an der zusätzlichen Tankbucherhebung teilgenommen haben.

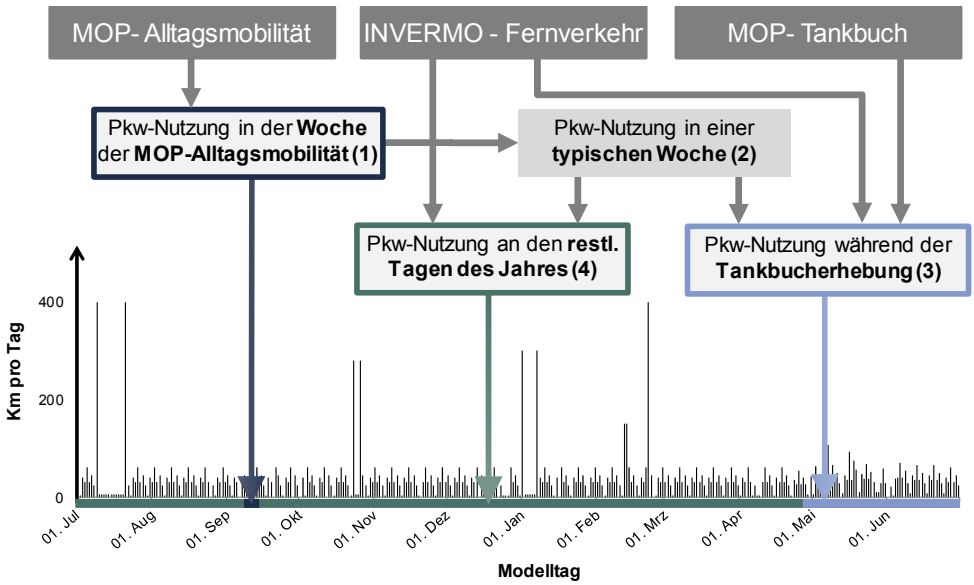


Abbildung 2-2: Struktur des Pkw-Nutzungsmodells CUMILE, aufgezeigt anhand der Modellergebnisse eines Pkw

Der Modellalgorithmus von CUMILE besteht aus vier Schritten (siehe Abbildung 2-2). Im ersten Schritt werden die Pkw-Wegeketten an den Tagen der *MOP-Alltagsmobilitätserhebung* anhand der Wegetagebücher von Personen bestimmt. Aufbauend darauf wird im zweiten Schritt die Pkw-Nutzung in einer Woche mit typischer Pkw-Nutzung ermittelt. In der Modellierung wird angenommen, dass die Nutzung von Pkw im Alltagsverkehr im Jahresverlauf ähnlich ist. Im dritten Schritt werden die Informationen zur typischen Pkw-Nutzung, zum Pkw-Fernverkehr sowie die Daten des *MOP-Tankbuches* genutzt, um Wegeketten der Pkw im Zeitraum der Erhebung des *MOP-Tankbuchs* über den Zeitraum von acht Wochen zu reproduzieren. Als Ergebnis von CUMILE liegen für jedes modellierte Fahrzeug Informationen zu Abfahrts- und Ankunftszeit, Wegezweck und die zurückgelegte Strecke der modellierten Wege vor.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die vier Modellschritte sowie die zugrundeliegenden Modellannahmen vorgestellt.

2.3.1 Grundlegende Annahmen und Vorüberlegungen der Modellierung

Eingangsdaten des hier vorgestellten CUMILE-Modells sind MOP-Daten, die zwischen 2002 und 2015 erhoben wurden. Die Bruttostichprobe umfasste 14.443 Haushalt (MOP-Alltagsmobilität) und 9.610 Pkw (MOP-Tankbuch). Es findet jedoch nicht die gesamte Bruttostichprobe Eingang in die Modellierung, sondern es können lediglich Haushalte berücksichtigt werden, welche die folgenden drei Kriterien erfüllen:

- In den Haushalten befindet sich ein oder mehrere Pkw,
- alle im Haushalt lebenden Pkw-Nutzer (d. h. Personen mit Pkw-Führerschein, die angegeben haben, dass sie zumindest ab und an einen Pkw nutzen) haben ein Wegetagebuch in der Alltagsmobilitätserhebung ausgefüllt, und
- es liegt zu jedem Pkw im Haushalte ein Tankbuch vor.

Die resultierende Nettostichprobe, die alle genannten Kriterien erfüllt, umfasst 4.834 Haushalte und 6.309 Pkw.

Modelliert werden Pkw-Fahrten, die Betrachtungsebene der Modellierung sind jedoch Pkw-Ausgänge. Ausgänge sind laut FGSV definiert als eine „Abfolge von Wegen, die an einem Ort (häufig zu Hause) beginnen und dort wieder enden“ (FGSV 2017). Diese sind Modellgrundlage, da eine Fahrt nicht als isoliertes Element angesehen werden kann, sondern immer Bestandteil eines Ausgangs ist. Beispielhaft zeigt Abbildung 2-3 die Zusammenfassung von zwei Pkw-Wegen bzw. Fahrten zu einem Ausgang.

Die Pkw-Jahresfahrleistung ist ein essenzielles Eingangsdatum der Modellierung, da das Ziel der Modellierung darin besteht, die Pkw-Jahresfahrleistung auf einzelne Pkw-Fahrten aufzuteilen. Die Information der Pkw-Jahresfahrleistung muss in den Eingangsdaten der Modellierung enthalten sein. In der MOP-Erhebung zu Pkw-Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch schätzen die Teilnehmer die Jahresfahrleistung ihres Pkw im letzten Jahr ab. Zudem kann, wenn von einem Pkw in zwei aufeinander folgenden Jahren ein Tankbuch vorliegt, die Jahresfahrleistung mittels der im Tankbuch berichteten Tachostände zum Ende des Berichtszeitraums exakt ermittelt werden. Dies ist bei 42% der Pkw in der CUMILE-Stichprobe der Fall. Bei den restlichen 58% der Pkw in der Nettostichprobe wurden die Jahresfahrleistungsangaben, die von den Erhebungsteilnehmern geschätzt wurden, als Eingangsdatum der Modellierung genutzt.

Abbildung 2-3: Zusammenfassung von Pkw-Wegen zu einem Ausgang

Ein Modelljahr beginnt jeweils am 1. September und endet am 31. August des Folgejahres. Der Modellierungszeitraum ergibt sich aus den Spezifika der Eingangsdaten. Eine Erhebungswelle des MOP beginnt jedes Jahr mit der Alltagsmobilitätserhebung im Herbst (Erhebungszeitraum zwischen September und November) und im darauffolgenden Frühjahr werden die Erhebungsteilnehmer der Alltagsmobilitätserhebung gebeten, für ihre Pkw ein Tankbuch zu führen (Erhebungszeitraum zwischen April und Juli). Ein Beginn des Modelljahres direkt nach der Tankbucherhebung im Juli/August bietet sich nicht an, da in diesem Zeitraum der Schulferien von Familien vermehrt Urlaubsreisen mit dem Pkw über mehrere Tage oder Wochen durchgeführt werden (Manz 2005), die dann nicht vollständig abgebildet wären.

2.3.2 Schritt 1: MOP-Woche

Im Gegensatz zu vielen anderen Verkehrsmodellen steht hier nicht die Mobilität von Personen, sondern die Nutzung von Pkw im Mittelpunkt der Betrachtung. Da die Information, welcher Pkw im Haushalt von den Erhebungsteilnehmern für ihre Pkw-Wege genutzt wurde, nicht in der MOP-Alltagsmobilitätserhebung erhoben wird, wurde eine Heuristik entwickelt, um die Pkw-Nutzung in der MOP-Woche abzubilden (Schritt 1). Ziel dieser Heuristik ist es, Pkw-Wegen von Einzelpersonen den jeweiligen Pkw des Haushalts zuzuweisen, um hieraus für jeden Pkw der Stichprobe Fahrt-Ketten der Erhebungswoche abzuleiten. Die Heuristik basiert auf drei Annahmen:

- Erhebungsteilnehmer nutzen für ihre im Wegetagebuch berichteten Pkw-Wege nur Pkw aus ihrem Haushalt,
- alle im MOP-Tankbuch enthaltenen Pkw werden nur von Haushaltsmitgliedern genutzt und
- wenn es im Haushalt mehr als einen Pkw gibt, dann hat jeder Pkw-Nutzer einen persönlichen Pkw, den er vorwiegend nutzt.

Wenn ein Haushalt nur über einen Pkw verfügt, wird angenommen, dass alle Pkw-Nutzer des Haushalts diesen Pkw für ihre Pkw-Fahrten benutzen. Wenn zwei oder mehr Autos im Haushalt

verfügbar sind, dann werden Pkw-Nutzer nach ihrer Pkw-Fahrleistung in der MOP-Alltagsmobilitätserhebung und Pkw nach ihrer in der MOP-Erhebung zu Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch gemessenen Frühjahrsmonatsfahrleistung sortiert. Eine umfassende Zuordnungstabelle mit möglichen Zuordnungen von Pkw-Nutzern und Pkw im Haushalt ist in Abbildung 2-4 zu finden. Die Pkw-Ausstattung in der vorliegenden Stichprobe stellt sich wie folgt dar: In 44% der Haushalte in der Netto-Stichprobe gibt es einen Pkw und einen Pkw-Nutzer, in 28% der Haushalte teilen sich mehrere Personen einen Pkw, in weiteren 22% der Haushalte leben genauso viele Pkw-Nutzer (hier: mindestens zwei Pkw-Nutzer) wie Pkw verfügbar sind; in seltenen Fällen sind im Haushalt mehr als ein Pkw vorhanden und die Zahl der Pkw-Nutzer ist größer als die Zahl der Pkw (3%) oder es gibt mehr Pkw im Haushalt als Pkw-Nutzer (2%).

		Anzahl der Pkw-Nutzer im Haushalt			
		1 Person	2 Personen	3 Personen	4 Personen
Anzahl Pkw im Haushalt	1 Pkw				
	2 Pkw				
	3 Pkw				
	4 Pkw				

Legende:

- Jede Person nutzt einen Pkw; Nutzungsrang des Pkw entspricht Nutzungsrang der Personen.
- Alle Personen des Haushalts teilen sich einen Pkw.
- Personen mit den niedrigeren Nutzungsrängen teilen sich den Pkw mit dem niedrigsten Nutzungsrang.
- Personen mit höchstem Nutzungsrang nutzt auch Pkw mit niedrigsten Nutzungsrängen, Aufteilung proportional zur Fahrleistung.

Abbildung 2-4: Initiale Zuordnungsheuristik von Pkw zu Pkw-Fahrern in der MOP-Erhebungswoche

Ausgehend von der oben eingeführten Zuweisungsheuristik wurden Pkw-Wegeketten für die MOP-Woche initial ermittelt und hinsichtlich Plausibilität überprüft. Mittels automatischer Prüfroutinen wurde beispielsweise untersucht

- ob sich zwei Pkw-Touren zeitlich überlagern,
- ob aufeinanderfolgende Fahrten den gleichen Zweck haben (im Falle von Wegen zur Arbeit, zur Ausbildung oder nach Hause ist dies nicht plausibel),
- ob die Geschwindigkeiten der Pkw-Fahrten plausibel sind,
- ob bei Touren mit zwei Wegen der Hin- und Rückweg gleich lang ist und

- ob die Aktivitätendauer nach Wegen zur Arbeit, Ausbildung, Freizeit oder Einkauf unplausibel lang ist.

97% aller Pkw-Ausgänge mit der in Abbildung 2-4 gebildeten Pkw-Heuristik waren hinsichtlich der oben dargestellten Prüfroutinen plausibel. Die verbleibenden 3% der Pkw-Touren wurden plausibilisiert. Wenn Unplausibilitäten vorliegen, wenn beispielsweise zwei Fahrten eines Pkw zur gleichen Zeit stattfänden, wird die Pkw-Zuordnungsheuristik angepasst. In diesem Beispiel könnte ein Pkw-Nutzer im Haushalt einen anderen im Haushalt verfügbaren Pkw für seinen Ausgang nutzen. Nach Durchführung der Plausibilisierungen sind alle Pkw-Ausgänge hinsichtlich der oben dargestellten Prüfroutinen plausibel.

Als Ergebnis des ersten Modellschrittes liegen für jeden Pkw plausible Fahrt-Ketten für die MOP-Erhebungswoche vor.

2.3.3 Schritt 2: Typische Woche

Aufbauend darauf wird im zweiten Schritt die Pkw-Nutzung in einer Woche mit typischer Pkw-Nutzung ermittelt. Der Erhebungszeitraum stellt einen Zeitraum mit typischer Pkw-Nutzung dar, sofern der Befragungsteilnehmer nicht berichtet, dass er krank, im Urlaub oder sein Pkw in der Werkstatt war. 85% der Erhebungsteilnehmer der Nettostichprobe berichteten in der Erhebungswoche keine Besonderheiten; bei 15% der Erhebungsteilnehmer lag an einem oder mehreren Tagen der Berichtswoche eine Besonderheit vor und deren Mobilitätsverhalten an diesen Tagen kann nicht als typisch angesehen werden.

Wenn der Befragungsteilnehmer ein solches Ereignis berichtet, der Erhebungstag also untypisch war, dann wird die typische Pkw-Nutzung an untypischen Tagen anhand von anderen typischen Wochentagen desselben Jahres oder gleichen typischen Wochentage eines anderen Jahres ermittelt. Wenn eine Person beispielsweise berichtet, dass sie an einem Tag des Berichtszeitraums, z. B. an einem Mittwoch, krank war, dann ist davon auszugehen, dass sie ihr Auto auch an diesem Tag nicht so genutzt hat, wie an einen typischen Mittwoch, da sie am Krankheitstag nicht mit dem Pkw zu ihrem Arbeitsplatz gefahren ist. Stattdessen wird angenommen, dass sie ihren Pkw an einen typischen Mittwoch ähnlich nutzt wie an einem typischen Donnerstag. Die resultierenden Fahrt-Ketten für eine Woche mit typischer Pkw-Nutzung werden, wie auch im ersten Schritt, hinsichtlich Plausibilität überprüft und gegebenenfalls angepasst.

Eine zentrale Annahme der Modellierung ist, dass sich die Pkw-Nutzung in typischen Wochen im Jahresverlauf ähnlich ist. Dies ist dadurch begründet, dass das Tätigkeitsspektrum und auch die alltägliche Mobilität gewissen Rhythmen unterworfen sind, beispielsweise pendeln in Vollzeit berufstätige Personen in den meisten Wochen Montag bis Freitag zur Arbeit und auch

Freizeitaktivitäten, beispielsweise Sport oder Treffen mit Freunden, werden üblicherweise mit einer bestimmten Zyklizität regelmäßig – oftmals im wöchentlichen Turnus – wiederholt (Bhat et al. 2005; Hilgert et al. 2018; Verreault und Morency 2011).

2.3.4 Schritt 3: Tankbuchzeitraum

In Schritt 3 werden die Informationen zur typischen Pkw-Nutzung, zum Pkw-Fernverkehr sowie die Daten des MOP-Tankbuches genutzt, um Fahrt-Ketten der Pkw im Zeitraum der Erhebung des MOP-Tankbuchs über den Zeitraum von acht Wochen zu reproduzieren. Ziel dieses Modellschrittes ist es, die tatsächlich zwischen zwei Tankvorgängen zurückgelegten Fahrleistungen auf einzelne Pkw-Fahrten aufzuteilen. Der Algorithmus prüft zunächst, ob die Summe der typischen Fahrleistungen zwischen zwei Tankvorgängen die gesamte berichtete Fahrleistung zwischen diesen erklärt. Lägen beispielsweise sieben Tage zwischen zwei Pkw-Tankvorgängen, dann wird zunächst geprüft, ob die zurückgelegte Strecke, wie im Tankbuch berichtet, der im zweiten Modellierungsschritt ermittelten Fahrleistung in einer typischen Woche entspricht.

Wenn die Fahrleistungen an typischen Wochentagen nicht die gesamten tatsächlichen Fahrleistungen erklären, prüft der Algorithmus, ob ein Fernverkehrsereignis vorliegen könnte und ergänzt dieses. Informationen zu diesen Fernverkehrsereignissen kommen aus der Erhebung INVERMO. Für diese Zuordnung werden zuerst alle für den Zeitraum zwischen den zwei betrachteten Tankvorgängen passenden Pkw-Fernreisen aus INVERMO bestimmt und hieraus mittels Monte-Carlo Simulation ein Fernverkehrsereignis ausgewählt. Kriterien für die Auswahl sind, dass die soziodemografischen Eigenschaften des in CUMILE modellierten Haushalts – Haushaltstyp (4 Ausprägungen), Haushaltseinkommen (4 Ausprägungen), Lage des Wohnorts (3 Ausprägungen) – den soziodemografischen Eigenschaften des INVERMO-Erhebungsteilnehmers, welcher das entsprechende Fernverkehrsereignis berichtet hat, entspricht. Weiterhin soll Monat und Wochentag des Reisebeginns des INVERMO-Fernverkehrsereignisses mit dem zugeordneten CUMILE-Reisezeitraum übereinstimmen. Wenn ein Fernverkehrsereignis ausgewählt wurde, dann ersetzt dies an den Tagen mit Fernverkehrsereignis die typischen Pkw-Ausgänge. Hiernach werden die im Zeitraum zwischen zwei Tankvorgängen modellierten Fahrleistungen mit den tatsächlichen Fahrleistungen verglichen. Wenn die modellierten Fahrleistungen deutlich größer als die tatsächlichen Fahrleistungen sind, wird das gezogene Fernverkehrsereignis verworfen und ein Neues zugeordnet. Dieser Schritt wird bis zu fünf Mal wiederholt. Wenn auch nach fünf Iterationsschritten kein Fernverkehrsereignis bestimmt werden konnte, dann wird angenommen, dass bei einzelnen typischen Ausgängen mit flexiblen Zielen ein weiter entferntes Ziel (z. B. ein weiter entfernt gelegener Supermarkt) erreicht wird.

Wenn die tatsächlichen Fahrleistungen zwischen zwei Tankvorgängen niedriger sind als die Fahrleistungen an den typischen Wochentagen während des gleichen Zeitraums, dann wird angenommen, dass einzelne Ausgänge wegfallen. Mittels Monte-Carlo Simulation werden einzelne typische Ausgänge ausgewählt, wo angenommen wird, dass diese im jeweiligen Zeitraum nicht stattfanden. Ausgänge ohne Pflichtaktivitäten (z. B. Freizeit, Einkaufen) wurden in der Monte-Carlo-Simulation höher gewichtet als Ausgänge mit Pflichtaktivität, da diese eine höhere Variabilität aufweisen (Schönfelder 2006a; Hilgert et al. 2018).

In diesem Schritt werden die Tankintervalle nacheinander modelliert. Schritt 3 ist abgeschlossen, wenn Pkw-Fahrprofile für den gesamten Erhebungszeitraum der MOP-Erhebung zu Pkw-Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch vorliegen.

2.3.5 Schritt 4: Restliche Tage des Jahres

Die Pkw-Nutzung für diejenigen Tage des Jahres, an denen weder die MOP-Alltagsmobilitätserhebung noch die Pkw-Fahrleistungs- und Kraftstoffverbraucherhebung stattfand, wird in Schritt 4 mit einem Algorithmus, ähnlich zu Schritt 3, reproduziert. Für diesen Modellschritt werden Informationen zu der Pkw-Nutzung an typischen Wochen (siehe Abschnitt 2.3.3), zur Pkw-Jahresfahrleistung (siehe Abschnitt 2.3.1) und Pkw-Fernverkehrsinformationen aus INVERMO benötigt.

Der Algorithmus prüft wiederrum, ob die typische Fahrleistung die gesamte berichtete Fahrleistung, d. h. die Jahresfahrleistung abzüglich der während der Erhebungszeiträume zurückgelegten Fahrten entspricht. Falls die Fahrleistung an typischen Tagen geringer ist als die gesamte berichtete Fahrleistung, dann prüft der Algorithmus wiederum, ob Urlaubs- und Ausflugsfahrten vorliegen und ergänzt diese. Ist die Pkw-Fahrleistung an typischen Tagen größer als die gesamte berichtete Fahrleistung, dann wird angenommen, dass einzelne Ausgänge wegfallen. Der Algorithmus ist beendet, wenn die gesamte aus dem MOP bekannte Pkw-Jahresfahrleistung auf einzelne Fahrten im Laufe des Jahres verteilt wurde. Das Vorgehen ist jeweils mit den in Schritt 3 umgesetzten Modellierungsschritten identisch.

2.4 Zwischenergebnis: Pkw-Nutzungsprofile über ein Jahr

Als Ergebnis von CUMILE liegen für jeden modellierten Pkw Informationen zu Abfahrts- und Ankunftszeit, Zweck und die zurückgelegte Strecke der modellierten Fahrt vor. Die Stichprobe umfasst rund 6.300 Pkw und 4,6 Millionen Fahrten. Zudem sind im MOP Informationen zur Soziodemografie der Pkw-Halter (z. B. Haushaltseinkommen) und Eigenschaften der Pkw (z. B. Segment und Treibstoffverbrauch) erfasst. Dieses Modell erlaubt es damit erstmals, die

Unterschiedlichkeit einer Fahrzeugnutzung aufgelöst auf Einzelfahrten repräsentativ für die deutsche Flotte über ein ganzes Jahr abzubilden.

2.5 Ergänzung externer Informationen zu den modellierten Fahrprofilen

Für die Modellierung von Energieverbrauch und Emissionen der Pkw-Nutzung werden fahrtenfeine Informationen zu den genutzten Straßenkategorien und zu Temperatur und Niederschlag während der Fahrt benötigt. Da diese Informationen nicht im MOP erhoben werden, wurden sie mittels Modellansätzen ergänzt.

Für die Analyse und Beurteilung der Substitutionspotenziale der Pkw-Nutzung sind Informationen zu den Pkw-Kosten von großer Bedeutung. Diese Informationen lagen bislang nicht im Dantesatz vor und wurden im Projekt über eine externe Pkw-Kostendatenbank zugeordnet.

Die Vorgehensweise bei der Ergänzung der genannten externen Informationen an die modellierten Fahrprofiele wird in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

2.5.1 Ergänzung von Informationen zur Infrastrukturnutzung

Bei der Ermittlung der Fahrleistung auf verschiedenen Straßenkategorien ist ein Problem, dass in CUMILE und auch in den Eingangsdaten des MOP keine Geoinformationen zu Start und Ziel der Fahrt vorliegen – diese Informationen wären notwendig, um eine explizite Routenwahl durchführen zu können und hieraus Informationen zu verschiedenen Straßenkategorien ableiten zu können. Da lediglich die Informationen zu Fahrtdistanzen der Pkw-Fahrprofile bekannt sind, wird für die Ermittlungen der Fahrleistung auf verschiedenen Straßenkategorien (auf Bundesautobahn, innerorts, außerorts) ein heuristischer Ansatz genutzt, bei welchem die Ergebnisse des deutschlandweiten Verkehrsnachfragemodells VALIDATE der PTV Group (Vortisch und Waßmuth 2007) in CUMILE integriert werden.

Das Straßennetz des Modells VALIDATE umfasst ganz Deutschland sowie große Teile des Europäischen Straßennetzes und wird jährlich aktualisiert. Für das Nachfragemodell wurde Deutschland in ca. 10.000 Verkehrszellen unterteilt. Die dem Modell zugrundeliegenden Verkehrsnachfragedaten wurden aus Verkehrserhebungen (hauptsächlich der MiD) abgeleitet. Die Verkehrsnachfragematrizen wurden mit einem weitestgehend konventionellen Nachfragemodellierungsansatz ermittelt. Die Kalibrierung der resultierenden Verkehrsnachfragematrizen erfolgte anhand des täglichen Verkehrsaufkommens aus den zur Verfügung stehenden empirischen Grundlagen aus Befragungs- und Zähldaten. Mit dieser

Grundlage stehen neben einer Abbildung aller Streckenbelastungen in Deutschland auch Routeninformationen zur Verfügung.

Aus der in VALIDATE vorgenommenen Umlegung wurden Nutzungshäufigkeiten und Nutzungsintensitäten verschiedener Straßenkategorien abgeleitet. Für die vorgestellte Anwendung sind der Anteil von Pkw-Fahrten einer bestimmten Länge, welche teilweise auf Bundesautobahnen (BAB) durchgeführt werden, sowie die auf BAB zurückgelegte Fahrleistung relevant. Unter der Annahme, dass die BAB-Nutzung hauptsächlich von der Länge des Pkw-Weges abhängt, können diese Informationen genutzt werden, um die Intensität und Häufigkeit einer BAB-Nutzung der Pkw in CUMILE zu bestimmten.

Für die Bestimmung der BAB-Fahrleistung von den in CUMILE modellierten Pkw-Fahrten werden verschiedene Annahmen getroffen:

- Pkw-Nutzer nutzen auf ihren Pendelwegen (d. h. Fahrten von zu Hause zur Arbeit/Ausbildungsstätte oder von der Arbeit/ Ausbildungsstätte nach Hause) immer die gleichen Routen. Daher ist der BAB-Streckenanteil eines Pkw-Nutzers auf allen Pendelwegen gleich.
- Wenn ein Ausgang aus zwei Wegen besteht, dann nutzt der Pkw-Nutzer auf diesen beiden Wegen die gleiche Route. Daher wird auf dem Rückweg der gleiche Streckenanteil auf der BAB zurückgelegt wie auf dem Hinweg.
- Da aufeinanderfolgende BAB-Anschlussstellen meist zumindest 2 km entfernt liegen, müssen die BAB-Anteile einzelner Fahrten mindestens 2 km betragen.

Anhand der aus der VALIDATE Verkehrsumlegung abgeleiteten Nutzungshäufigkeiten und Nutzungsintensitäten der BAB in Abhängigkeit der Fahrtlängen wird mittels einer Monte-Carlo-Simulation für alle in CUMILE abgebildeten Fahrten die auf der BAB zurückgelegte Fahrtstrecke bestimmt (Weiss et al. 2016a).

Für die Bestimmung der Fahrstrecken innerorts und außerorts wurde auf die Ergebnisse der Fahrleistungserhebung 2014 zurückgegriffen (Bäumer et al. 2017). Gemäß den Ergebnissen dieser Studie findet 37% der Fahrtstrecke, die nicht auf der BAB zurückgelegt wird, innerorts statt und die restlichen 63% außerorts. Diese Anteile wurden im CUMILE-Datensatz umgesetzt.

2.5.2 Ergänzung von Wetterinformationen

Informationen zu Außentemperatur und Regenmenge werden anhand der öffentlichen Daten für ausgewählte Messstationen des Climate Data Centers (CDC) des Deutschen Wetterdienstes an die Pkw-Nutzungsprofile ergänzt (DWD 2016). In dieser Datenbank stehen stundenfeine,

historische (teilweise ab dem Jahr 1950) Informationen zu Regenmenge und Außentemperatur von über 1.200 Wetterstationen im gesamten Bundesgebiet zur Verfügung.

Bei der Ergänzung der Wetterinformationen an die Fahrprofile sollen der Standort der Pkw sowie Datum und Uhrzeit der Fahrten berücksichtigt werden. Um den Standort der Pkw einzubeziehen, wird das Bundesgebiet in 90 Bereiche, gemäß der ersten beiden Ziffern der Postleitzahl (PLZ) aufgeteilt und es wird für jeden PLZ-Bereich eine charakteristische Wetterstation bestimmt. Für die CUMILE-Pkw liegen ebenfalls die PLZ-Bereiche sowie das Erhebungsjahr aus dem MOP vor. Hieraus werden jedem CUMILE-Fahrprofil die Niederschlags- und Tempertaturdaten der Wetterstation des jeweiligen PLZ-Bereichs stundenfein zugeordnet.

2.5.3 Ergänzung von Pkw-Kosten

Eine weitere Ergänzung erfolgt in Bezug auf die aus Fahrzeugbesitz und -nutzung resultierenden Kosten. Mit der Kenntnis der Pkw-Eigenschaften und der tatsächlichen Fahrleistung lassen sich die Gesamtkosten des Pkw kalkulieren (ADAC 2017) und sinnvoll auf die Einzelfahrten eines Jahres verteilen. Damit wird jeweils klar, wie hoch der Fixkostenanteil (Abschreibung, Wertverlust, Steuern, Versicherung) gegenüber den vergleichsweise geringen variablen Kosten (Treibstoffverbrauch) aussieht.

Für die Pkw-Kostenergänzung wurde im Rahmen dieses Projektes vom ADAC/DAT Kostendaten vom Allgemeinen Deutschen Automobilclub (ADAC) und den Deutschen Automobil Treuhand (DAT) für die Pkw, die an der Erhebung zu Pkw-Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch 2016 teilgenommen haben, erworben. Aus der Datenbank des ADAC stehen Informationen zu Pkw-Neupreis, Gebrauchtwagen-Verkaufspreis, Reparatur und Instandhaltung, Steuer und Versicherung zur Verfügung. Eine direkte Zuordnung der ADAC-Kostendaten an die CUMILE-Flotte war nicht möglich, da die Datenbank des ADAC erstens nur die Pkw-Kosten des aktuellen Jahres vorhält und da zweitens nur Gebrauchtwagen ab Baujahr 2004 in der Datenbank enthalten sind. Da CUMILE auf den MOP-Daten ab der Erhebung 2002/03 aufbaut, sind viele Pkw mit deutlich früherem Baujahr enthalten, was zu vielen fehlenden Informationen geführt hätte. Eine Zuordnung der Kosten in der ADAC-Datenbank an die Tankbuch-Pkw erfolgte über HSN-TSN Nummern, welche zuvor für die Pkw im Tankbuch-Datensatzes mittels eines KBA-Bestandsdatensatzes zugespielt wurden. Aufbauend darauf wurden Regressionsmodelle zur Abschätzung der verschiedenen Kostenkomponenten ermittelt. Diese Regressionen wurden dann auf die Pkw im CUMILE-Datensatz angewandt, um für diese die Pkw-Kosten, differenziert nach den verschiedenen Komponenten, zu ermitteln. Ausgehend von einem Abgleich der modellierten Kostenstrukturen mit den in der Erhebung der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe 2013 (Statistisches Bundesamt 2013) berichteten Pkw-Kosten wurden die

modellierten Versicherungskosten korrigiert (d. h. es wird angenommen, dass im ADAC-Datensatz die tatsächlichen Versicherungskosten um den Faktor drei überschätzt wurden). Das Vorgehen der Kostenergänzung an den CUMILE-Datensatz ist in Abbildung 2-5 schematisch dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise der Kostenergänzung ist in Kuhnimhof und Eisenmann (2017) zu finden.

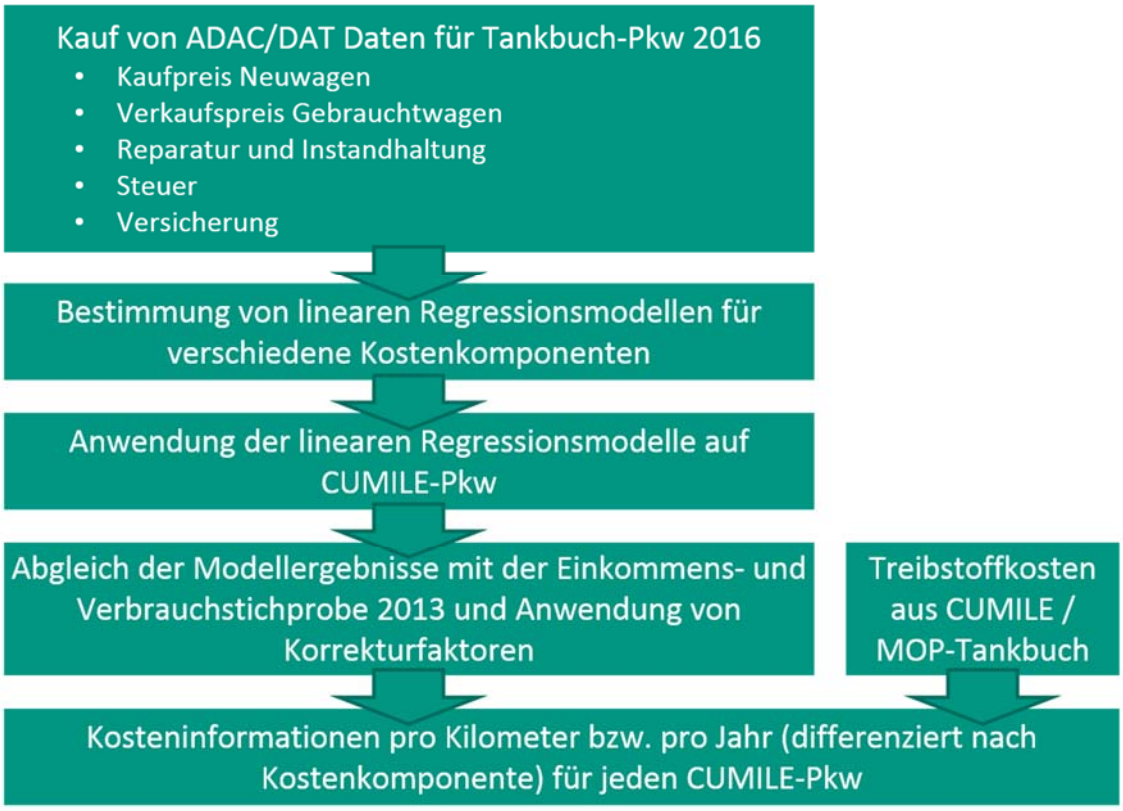


Abbildung 2-5: Vorgehensweise der Pkw-Kostenergänzung an den CUMILE-Datensatz

Im Durchschnitt liegen die Gesamtkosten von Privat-Pkw in Deutschland bei 315 Euro pro Monat. Dies entspricht etwa 31 Eurocent je Pkw-km. Etwa ein Drittel der Kosten sind Treibstoff, ein weiteres Drittel Abschreibungen und der Rest sind hauptsächlich Fixkosten (Versicherung, Steuern, Reparatur und Wartung). Die Kostenverteilung ist jedoch stark rechtsschief, d. h. die Mehrheit der Pkw-Halter gibt weniger als der Durchschnitt für ihre Privat-Pkw aus, während einige wenige deutlich mehr für ihre Pkw-Nutzung bezahlen. Im Durchschnitt kosten die Nutzung von Firmen- und Dienstwagen mehr als doppelt so viel wie die Nutzung von Privatwagen - meist, weil sie teurer in der Anschaffung waren, neuer sind und intensiver genutzt werden. Die privaten Haushalte tragen jedoch nur einen Bruchteil der Kosten für ihre Firmenwagen, da diese unter die Dienstwagenbesteuerung fallen (Kuhnimhof und Eisenmann 2017).

Anhand dieser Informationen ist es möglich, Substitutionspotenziale der privaten Pkw-Nutzung durch alternative Mobilitätsangebote (z. B. Carsharing, Pedelecs) unter ökonomischen Gesichtspunkten zu analysieren.

2.6 Gewichtung der Pkw-Flotte

Um zu gewährleisten, dass die CUMILE Stichprobe die in Deutschland privat genutzte Pkw-Flotte repräsentiert, werden die CUMILE Haushalte und Pkw entsprechend ihrer soziodemografischen Eigenschaften gewichtet. Diese Gewichtungsprozedur orientiert sich an der Gewichtung des MOP.

Die Haushaltsdaten werden nach den Merkmalen Ortsgröße, Haushaltsgröße und Anzahl Pkw im Haushalt jeweils gewichtet. Eingangsdaten der Sollverteilung für die Gewichtung auf Haushaltsebene sind der Mikrozensus 2015 (Statistisches Bundesamt 2015) zur Ermittlung von Haushalten nach Ortsgröße und Haushaltsgröße, die Einkommens- und Verbrauchsstichprobe 2013 (Statistisches Bundesamt 2013) zur Ermittlung der Pkw-Besitzquoten verschiedener Haushaltstypen, sowie Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes zum Pkw-Bestand (Kraftfahrt-Bundesamt 2015) zur Ermittlung der im Jahr 2015 zugelassenen Pkw in Deutschland.

Um die Gewichtungsfaktoren zu bestimmen, werden die Soll-Verteilungen der Haushalte in Deutschland mit der Ist-Verteilung der CUMILE-Stichprobe abgeglichen. Die Gewichtungsfaktoren auf Haushaltsebene sind in Tabelle 2-1 aufgelistet. Die Haushaltsgrößen sind in PHH (Personen im Haushalt) und die Ortsgrößen in TEW (Tausend Einwohner) angegeben. Wenn ein Gewichtungsfaktor gleich oder fast gleich 1 ist, dann zeigt dies, dass diese Gruppe von Haushalten gut in der CUMILE-Stichprobe repräsentiert ist; Gewichtungsfaktoren kleiner 1 weisen auf eine Überrepräsentation in der Stichprobe hin und Gewichtungsfaktoren größer 1 weisen darauf hin, dass diese Haushalte in der CUMILE-Stichprobe unterrepräsentiert sind. Größere Haushalte, die mehr als einen Pkw besitzen, sind in der CUMILE-Stichprobe leicht unterrepräsentiert. Grund hierfür ist die Tatsache, dass größere Haushalte nur dann in der Modellierung berücksichtigt werden können, wenn ein vollständiger Haushalt vorliegt (alle Wegetagebücher und alle Tankbücher).

Tabelle 2-1: Gewichtungsfaktoren auf Haushaltsebene. Fallzahlen der Stichprobe sind in Klammern ausgewiesen[1]

Pkw-Ausstattung	Haushalts-größe	Ortsgröße		
		0-20 TEW	20-100 TEW	100+ TEW
1 Pkw	1 PHH	1,129 (521)	1,111 (383)	0,856 (523)
	2 PHH	0,921 (574)	0,887 (433)	0,803 (475)
	3 PHH	1,008 (109)	1,231 (73)	0,948 (112)
	4+ PHH	0,965 (110)	0,966 (94)	1,128 (93)
2+ Pkw	1 PHH	1,253 (16)	0,944 (12)	0,944 (9)
	2 PHH	1,253 (255)	0,944 (178)	0,944 (111)
	3 PHH	1,135 (193)	1,351 (81)	1,045 (68)
	4+ PHH	1,070 (232)	1,199 (98)	0,899 (81)

Bei der Gewichtung auf Pkw-Ebene wird die Stichprobe anhand der Pkw-Merkmale Hubraum und Alter gewichtet. Außerdem wird das Haushaltsgewicht in die Pkw-Gewichtung einbezogen, um auch eine Repräsentativität der Pkw hinsichtlich der Soziodemografie der Pkw-Halter zu gewährleisten. Eingangsdaten für die Sollverteilung der Pkw-Flotte sind die Pkw-Bestandsstatistiken des KBA (Kraftfahrt-Bundesamt 2017b). Für die Gewichtung werden die Pkw in der CUMILE-Stichprobe anhand ihres Hubraums (bis 1.399 kWh, 1.400-1.599 kWh, 1.600-1.999 kWh, 2.000 kWh und mehr) und Alters (0-3 Jahre, 4-6 Jahre, 7-9 Jahre, 10 Jahre und älter) in 16 Gruppen unterteilt und für diese Gruppen Gewichtungsfaktoren ermittelt. Hiernach werden die erstellten Gewichtungsfaktoren mit den Gewichten der Pkw-besitzenden Haushalte multipliziert, um zu gewährleisten, dass auch die Haushaltseigenschaften in dem Pkw-Gewicht berücksichtigt werden. Die finalen Pkw-Gewichtungsfaktoren liegen zwischen 0,439 und 2,194.

2.7 Modellvalidierung

Um die Modellergebnisse zu validieren, werden Kennwerte des CUMILE-Modells mit den Erhebungen MiD 2008, KiD 2010 verglichen. Es werden die Mittelwerte und Standardabweichungen von Variablen auf Tagesebene (z. B. Tagesfahrleistung, Tage ohne Fahrleistung) und auf Wegeebene (z. B. Streckenlängen für verschiedene Fahrzwecke, Aktivitätenketten) gegenübergestellt und hinsichtlich Signifikanz untersucht.

[1] Aufgrund der niedrigen Stichprobengröße von Einpersonenhaushalten mit zwei Pkw wurde ein gemeinsamer Gewichtungsfaktor für Ein- und Zweipersonenhaushalte mit zwei Pkw ermittelt

Dieser Validierungsansatz basiert auf der Ergodizitätshypothese, die auf den Physiker Ludwig Boltzmann zurückgeht. Diese Hypothese besagt, dass das mittlere Verhalten eines Systems entweder bestimmt werden kann, indem man die Entwicklung über einen langen Zeitraum beobachtet und über diese Beobachtungen mittelt oder indem man alle möglichen Zustände eines Systems berücksichtigt und über diese mittelt (Walters 2000).

Die Ergodizitätshypothese findet auch in der Analyse und Modellierung der Verkehrsnachfrage und des Verkehrsverhaltens Anwendung (Wermuth 1978; Lipps 2001). Für diesen Anwendungsfall besagt die Ergodizitätshypothese, dass die Mobilitätseckwerte einer großen Stichprobe über einen kurzen Erhebungszeitraum mit denen einer kleinen Stichprobe über einen längeren Betrachtungszeitrum im Mittel vergleichbar sind, wenn ähnliche Bevölkerungsgruppen – sogenannte verhaltenshomogene Gruppen - befragt werden.

Die für die Validierung genutzten Datensätze der MiD und der KiD erfüllen die Voraussetzungen an einen Validierungsdatensatz gemäß der Ergodizitätshypothese, da in beiden Erhebungen Pkw-Nutzung am Stichtag (Querschnittserhebungen) für eine große Stichprobe erhoben wurde. Ein Vergleich der mittleren Mobilitätseckwerte von KiD und MiD gibt folglich einen guten Anhaltspunkt für die Validität der CUMILE-Ergebnisse.

Um einen solchen Kennwertvergleich zu sinnvoll gewährleisten zu können, wurden die einzelnen Datensätze modifiziert und teilweise reduziert. In Tabelle 2-2 sind die sich unterscheidenden Erhebungs- und Modelleigenschaften gegenübergestellt und das daraus resultierende Vorgehen der Datenharmonisierung dargestellt.

Tabelle 2-2: Gegenüberstellung der Erhebungseigenschaften der MiD 2008 und KiD 2010 mit den Modelleigenschaften von CUMILE und die daraus resultierende Datenharmonisierung in der in der Validierung von CUMILE (Wermuth et al. 2012; infas und DLR 2010b)

Betrachtungsebene		MiD 2008	KiD 2010	CUMILE	Resultierende Datenharmonisierung
Pkw	Grundgesamtheit	Privat-Pkw, privat genutzte Dienstwagen	Privat-Pkw, gewerbliche Pkw, andere Kfz-Arten	Privat-Pkw, privat genutzte Dienstwagen	Privat-Pkw
Wege	Vollständigkeit	Nicht alle Pkw-Wege am Stichtag (unvollständige Haushalte)	Alle Pkw-Wege am Stichtag	Alle Pkw-Wege im Modellierungszeitraum (Jahr)	Nur Pkw mit vollständiger Erfassung im Betrachtungszeitraum
	Wegeerfassung	Territorialprinzip (Wege >1000 km = 1000 km)	alle Weglängen	alle Weglängen	Territorialprinzip
	Weitere Datenanpassungen	Reduktion der berichteten Pkw-Fahrtstrecken um 5%	-	-	Rückrechnung der Fahrtstreckenreduktionen in der MiD

Diese Analysen wurden unter Einbeziehung der in den Erhebungsdaten zur Verfügung gestellten Gewichtungs- und Hochrechnungsfaktoren (MiD und KiD), bzw. der in Abschnitt 2.6 eingeführten Gewichtungsfaktoren zum Ausgleich soziodemografischer Schiefen durchgeführt.

Ein Vergleich der in den Erhebungen MiD 2008 und KiD 2010 erhobenen Mobilitätseckwerte mit den in CUMILE modellierten Mobilitätseckwerten findet sich in Tabelle 2-3. Dieser Vergleich zeigt, dass sowohl die Eckwerte auf Tagesebene als auch die Eckwerte auf Wegeebene aus CUMILE gut mit den Eckwerten der Erhebung zusammenpassen.

Tabelle 2-3: Vergleich der in den Erhebungen MiD 2008 und KiD 2010 erhobenen Mobilitätseckewerten mit den in CUMILE modellierten Mobilitätseckwerten

Merkmale	MiD 2008		KiD 2010		CUMILE	
	Mean	(StDev)	Mean	(StDev)	Mean	(StDev)
Kennwerte auf Tagesebene						
Tage ohne Pkw-Nutzung[%]	40	(45)	39	(29)	39	(26)
Pkw-Verkehrsleistung, alle Tage [km pro Tag]	28	(54)	31	(76)	32	(69)
Pkw-Verkehrsleistung, mobile Tage [km pro Tag]	47	(46)	51	(89)	53	(81)
Pkw-Verkehrsaufkommen, alle Tage [# Wege pro Tag]	2,08	(2,11)	1,80	(2,01)	1,92	(2,09)
Pkw-Verkehrsaufkommen, mobile Tage [# Wege pro Tag]	3,48	(1,81)	2,94	(1,75)	3,16	(1,76)
Pkw-Mobilitätszeit, alle Tage [Minuten pro Tag]	42,9	(54,6)	37,4	(65,3)	43,0	(59,6)
Pkw-Mobilitätszeit, mobile Tage [Minuten pro Tag]	71,3	(55,1)	61,1	(71,8)	70,8	(61,2)
# Tage mit Fahrleistungen über 100 km [%]	6	(21)	7	(29)	7	(9)
# Tage mit Fahrleistungen über 200 km [%]	2	(12)	2	(17)	2	(4)
Kennwerte auf Wegeebene						
Fahrtlänge, alle Wege [km]	18	(39)	17	(44)	17	(44)
Fahrtlänge, Pendelwege [km]	19	(38)	19	(31)	16	(18)
Fahrtlänge, Einkaufswege [km]	7	(20)	8	(12)	9	(16)
Fahrtlänge, Hol- und Bringwege	8	(16)	12	(18)	9	(15)

3 Modellierung von Energieverbrauch und Emissionen

Für die Modellierung des Energieverbrauchs und der Emissionen der in CUMILE enthaltenen Fahrten wird das Emissionsberechnungsmodell TREMOD verwendet. TREMOD bildet den motorisierten Verkehr in Deutschland hinsichtlich seiner Verkehrs- und Fahrleistungen, Energieverbräuche und den zugehörigen Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen retrospektiv bis 1960 und in Szenarien bis 2050 ab. Es wurde vom ifeu im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickelt und wird seit mehreren Jahren kontinuierlich fortgeschrieben (ifeu 2014). Mit TREMOD liegt ein Instrumentarium vor, welches es erlaubt, Emissionen und den Energieverbrauch differenziert nach einer Reihe verschiedener Einflussparameter zu berechnen. Es verwendet als Basis für die Emissionsberechnung das „Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ (HBEFA) (INFRAS 2014) in der aktuellen Version 3.3, welches im Wesentlichen auf europäischen Emissionsmessprogrammen und Modellierungen mit dem Modell PHEM (Hausberger et al. 2009) beruht. Ergänzt werden diese um für die deutsche Flotte abgeleitete spezifische Verbrauchswerte. Verkehrliche Grundlagen sind jährlich ermittelte differenzierte Bestands- und Fahrleistungsdaten für Deutschland, u.a. basierend auf den Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) und von Verkehr in Zahlen (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2015).

Wesentliche Einflussparameter auf Verbrauch und Emissionen sind die Außentemperatur, die Abstelldauer vor Fahrtbeginn, die Fahrtdistanz, die typischen Pkw-Merkmale wie Antrieb, Segment, Emissionsstandard sowie das Pkw-Alter und nicht zuletzt das Fahrverhalten (Fahrdynamik und Geschwindigkeit) auf den verschiedenen Straßenkategorien. Mit diesen mittels TREMOD und CUMILE bereitgestellten Parametern kann das spezifische Emissionsverhalten jeder einzelnen Fahrt ermittelt werden.

In TREMOD werden derzeit fahrtenfein folgende Parameter berechnet: Energieverbrauch, Emissionen von CO_2, N_2O, CH_4, NO_x, PM_{10} und HC. Dabei erfolgt dies getrennt nach den Emissionen im Kaltstart (Kapitel 3.3) und den Emissionen im warmen Betrieb (Kapitel 3.2). Kaltstartemissionen sind dabei gerade bei Kurzstreckenfahrten relevant. Um zu gewährleisten, dass die Emissionen der CUMILE-Flotte der aktuellen Flotte in Deutschland entsprechen, wurde zudem eine Heuristik für die Anpassung der fahrzeugspezifischen Eigenschaften entwickelt (Kapitel 3.1).

3.1 Anpassung der Fahrzeuge

CUMILE bildet das Pkw-Nutzungsverhalten für ein Modelljahr ab, wofür die Daten von derzeit 12 Erhebungsjahren kombiniert wurden. Zwar liegen für die abgefragten Wege detaillierte Daten zu den verwendeten Pkw vor, aufgrund des langen Erhebungszeitraumes und der im

Verhältnis schnellen Flottenumschichtung sind diese Daten jedoch nicht zur Emissions- und Energieverbrauchsberechnung der heutigen Flotte geeignet. Aus dieser Problematik wurde eine Heuristik entwickelt, die den in CUMILE enthaltenen Pkws neue Eigenschaften zuweist, so dass diese der TREMOD-Flotte für 2016 entsprechen. Dabei sind die wesentlichen für die Emissions- und Energieberechnung notwendigen, zeitvariablen Parameter das Baujahr und das Emissionskonzept. Für das Baujahr wurde dabei das Alter des Fahrzeuges konstant gehalten: So hat ein Fahrzeug mit dem Baujahr 2000 im Erhebungsjahr 2002 nach der Transformation auf 2016 das Baujahr 2014. Für die Transformation des Emissionskonzeptes ist zunächst bestimmt worden, welche Emissionskonzepte im Baujahr des Fahrzeuges vor und nach der Transformation (im Beispiel: 2000 und 2014) zugelassen wurden: In 2000 waren dies bei den Benzinern Euro 2 und Euro 3 Fahrzeuge, in 2014 Euro 5 und Euro 6. Dabei werden zunächst Fahrzeuge mit dem „alten“ älteren Emissionskonzept dem „neuen“ älteren Emissionskonzept zugeordnet. Mit den „neuen“ Konzepten wird ebenso verfahren. In einem zweiten Schritt wird geprüft, ob das Verhältnis zwischen älteren und neueren Emissionskonzept nach der Transformation dem in TREMOD entspricht. Sind hier Anpassungen notwendig, werden die jüngsten Fahrzeuge mit dem älteren Emissionskonzept dem jüngeren Konzept bzw. die ältesten Fahrzeuge des jüngeren Konzeptes dem älteren Konzept zugeordnet.

Die Veränderungen von Fahrzeuggrößen und Antriebsarten in der Flotte waren in den letzten 12 Jahren relativ stabil (siehe ifeu 2016) und wurden daher nicht angepasst.

3.2 Modellierung der fahrtenfeinen Emissionen und Energieverbrauchs im warmen Betrieb

Zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen Kohlendioxid (CO_2), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Lachgas (N_2O), Stickoxide (NO_x), Feinstaubpartikelmasse (PM) sowie Feinstaubpartikelanzahl (PN) je Fahrt im warmen Betriebszustand wurden kilometerspezifische Werte aus TREMOD straßenkategorie-fein für Innerorts-, Außerorts- und Fahrten auf Bundesautobahnen herangezogen. Ferner erfolgte die Berechnung der Fahrtemissionen der Pkw-Wege aus CUMILE unter Berücksichtigung der Korrekturfaktoren, die die Abhängigkeit der CO-, HC- und NOx-Emissionen von der kumulierten Fahrleistung der eingesetzten Pkw gemäß (Keller, Hausberger, Matzer, Wüthrich, & Notter, 2017) beschreiben. Es wurden zudem, ebenfalls aus dem Handbuch Emissionsfaktoren (HBEFA 3.3), die außentemperaturabhängigen Faktoren für die NOx-Mehremissionen der dieselbetriebenen Pkw mit den Abgasnormstufen EURO-4 bis EURO-6d2, wie sie in Abbildung 3-1 illustriert sind, angewandt.

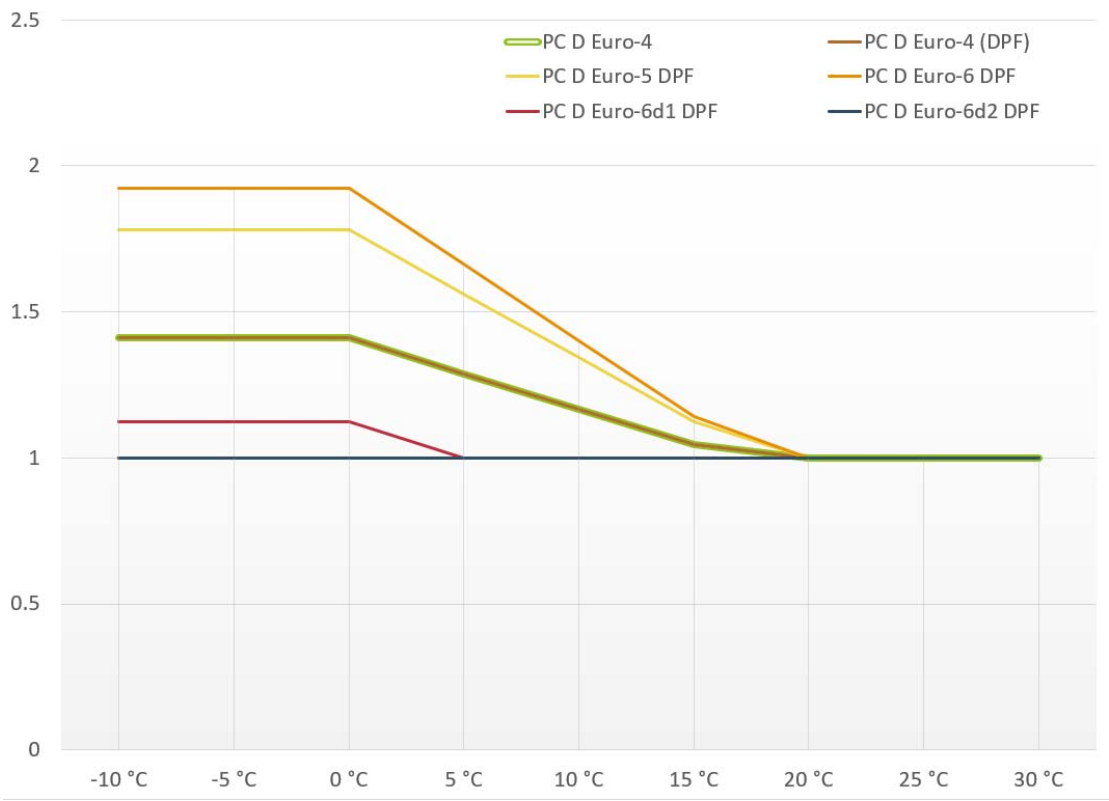


Abbildung 3-1: Faktoren der NOx-Mehremissionen in Abhängigkeit der Außentemperatur gemäß (Keller, Hausberger, Matzer, Wüthrich, & Notter, 2017)

Die höchsten relativen außentemperaturbedingten Abweichungen für NO_x liegen im Falle der EURO-6-Diesel vor, gefolgt von den EURO-5- und EURO-4-Diesel. In den Modellannahmen bleibt der Zuschlagsfaktor bis 0°C konstant und nimmt ab dann bis zur 15°C-Marke hin linear ab, um mit geringerer Steigung gegen 1 zu konvergieren. Lediglich für Dieselfahrzeuge, die für ihre Typgenehmigung unter realen Fahrbedingungen (RDE) geprüft werden (EURO-6d) werden geringere Abweichungen antizipiert. Diese Fahrzeuge spielen jedoch bei den Betrachtungen im Rahmen dieses Projektes keine Rolle.

3.3 Modellierung der fahrtenfeinen Emissionen und Energieverbrauchs aufgrund des Kaltstarts

Die höheren Emissionen zu Betriebsbeginn des Fahrzeuges (Kaltstart) werden in Form eines Zuschlags für die Emissionen Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide (NOx), Feinstaubpartikelmasse (PM), Feinstaubpartikelanzahl (PN) und dem Treibstoffverbrauch (FC) im Warmbetrieb berücksichtigt. Aus dem Treibstoffmehrverbrauch wird der Aufschlag für die CO_2-Emissionen abgleitet. Die Höhe des Zuschlags hängt von der Außentemperatur, der Stand-

zeit, der im Anschluss gefahrenen Strecke sowie des Emissionsminderungskonzeptes (Abgasnormstufe und Treibstoffart) ab. Um die individuellen Eingangswerte jeder Fahrt berücksichtigen zu können, wurde auf Basis tabellarisch gelisteter Emissionsaufschläge für Tupel der Eingangsgrößen (Temperatur, Standzeit, Strecke, Emissionsminderungskonzept) aus (Keller, Hausberger, Matzer, Wüthrich, & Notter, 2017) ein multivariates Regressionsmodell erstellt. Zum Güte der Modellberechnungen sei auf entsprechenden Bestimmtheitsmaße sowie die relativen mittleren quadratischen Fehler der Kreuzvalidierung in Tabelle 3-1 verwiesen.

Tabelle 3-1: Bestimmtheitsmaße und relative mittlere quadratische Fehler des Regressionsmodells zur Bestimmung der Kaltstartemissionen sowie der Zusatzverbräuche für die berücksichtigten Emissionsminderungskonzepte

	CO	FC	HC	NOx	PM	PN
Bestimmtheitsmaße						
PC D Euro-1	0.9923	0.9971	0.9928	0.9917	0.9953	0.9922
PC D Euro-2	0.9957	0.9970	0.9947	0.9917	0.9935	0.9915
PC D Euro-3	0.9976	0.9964	0.9916	0.9981	0.9928	0.9949
PC D Euro-4	0.9992	0.9964	0.9966	0.9939	0.9932	0.9913
PC D Euro-5	0.9992	0.9964	0.9966	0.9936	0.9981	0.9967
PC D Euro-6	0.9992	0.9964	0.9966	0.9936	0.9981	0.9967
PC D Euro-6d	0.9992	0.9964	0.9966	0.9936	0.9981	0.9967
PC P Euro-0	0.9992	0.9970	0.9988	0.9959	–	–
PC P Euro-1	0.9990	0.9970	0.9999	0.9971	–	–
PC P Euro-2	0.9990	0.9971	0.9999	0.9971	–	–
PC P Euro-3	0.9994	0.9984	0.9999	0.9981	–	–
PC P Euro-4	0.9995	0.9981	0.9998	0.9962	–	–
PC P Euro-5	0.9995	0.9981	0.9998	0.9962	–	–
PC P Euro-6	0.9995	0.9981	0.9998	0.9962	–	–
Relative mittlere quadratische Fehler						
PC D Euro-1	0.0875	0.0538	0.0847	0.0910	0.0688	0.0882
PC D Euro-2	0.0656	0.0551	0.0725	0.0909	0.0805	0.0922
PC D Euro-3	0.0493	0.0603	0.0917	0.0432	0.0851	0.0714
PC D Euro-4	0.0289	0.0601	0.0582	0.0780	0.0827	0.0935
PC D Euro-5	0.0289	0.0601	0.0581	0.0798	0.0432	0.0573
PC D Euro-6	0.0289	0.0601	0.0582	0.0798	0.0432	0.0573
PC D Euro-6d	0.0289	0.0601	0.0582	0.0798	0.0432	0.0573
PC P Euro-0	0.0290	0.0543	0.0341	0.0638	–	–
PC P Euro-1	0.0309	0.0547	0.0109	0.0538	–	–
PC P Euro-2	0.0320	0.0536	0.0089	0.0538	–	–
PC P Euro-3	0.0250	0.0395	0.0118	0.0434	–	–
PC P Euro-4	0.0214	0.0437	0.0146	0.0615	–	–
PC P Euro-5	0.0214	0.0437	0.0146	0.0615	–	–
PC P Euro-6	0.0214	0.0437	0.0146	0.0615	–	–

Dieses Regressionsmodell ermöglicht die Berücksichtigung von Zwischenwerten in Abhängigkeit der Außentemperatur, Standzeit vor Fahrtantritt und Streckenlänge der einzelnen Pkw-Fahrten des CUMILE-Modells. Beispielhaft wird dies anhand der CO-Kaltstart-Emissionen für dieselbetriebene Pkw der Abgasnormstufe EURO-1 in Abbildung 3-2 illustriert.

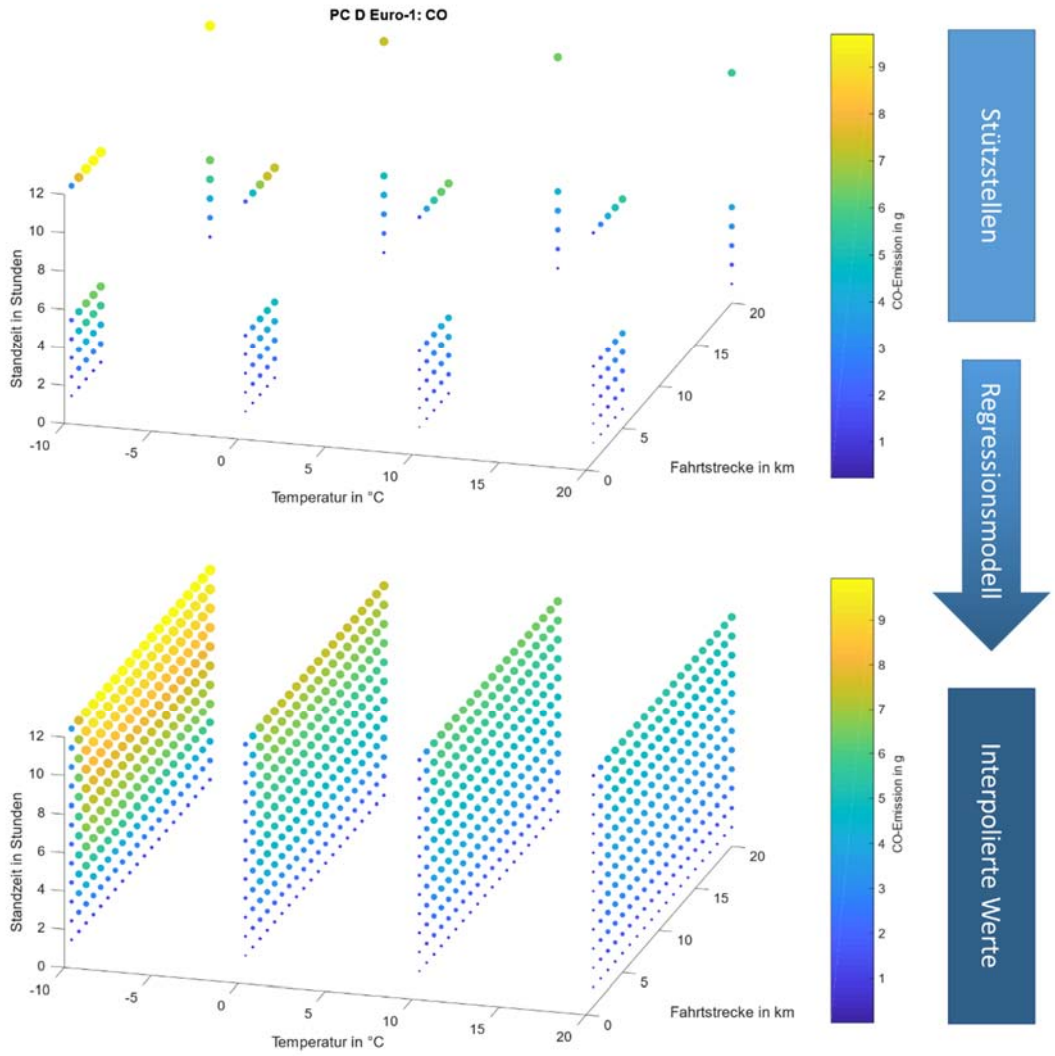


Abbildung 3-2: Darstellung der Interpolation von Zwischenwerten auf Basis des Regressionsmodells für die zusätzlichen Kohlenmonoxidemissionen beim Kaltstart dieselbetriebener Pkw der Abgasnormstufe Euro-1.

Es ist ersichtlich, dass die CO-Emissionen mit steigender Standzeit und abnehmenden Temperaturen bei gleicher zurückgelegter Fahrtstrecke zunehmen. Ferner nehmen die kumulierten Abgasmengen nach einer Fahrtstrecke über 20 km kaum noch zu und liegen bereits bei unter fünf Kilometern zurückgelegten Weges nahe ihrem Maximum aufgrund des warmgelaufenen Antriebs- und Abgasbehandlungssystems.

4 Pkw-Abhängigkeit und Pkw-Notwendigkeit

Für eine Identifizierung von Substitutionspotenzialen und die Entwicklung passgenauer Mobilitätslösungen werden grundsätzliche Informationen zum Mobilitätsverhalten der Pkw-Halter benötigt. Hierzu zählen neben den Charakteristika der Pkw-Nutzung auch, ob Pkw-Halter andere Verkehrsmittel nutzen, und welches Verkehrsangebot und welche Infrastruktur die Pkw-Halter überhaupt zur Verfügung haben. Um beispielsweise die Marktchancen von alternativen Mobilitätslösungen einordnen und abschätzen zu können wird ein Maß dafür benötigt, wie abhängig diese Haushalte von der dauerhaften Vorhaltung eines oder mehrerer Pkw sind bzw. wie notwendig die einzelnen Pkw für den Haushalt sind.

In den folgenden Abschnitten findet sich ein Überblick zu dem Konzept der Pkw-Abhängigkeit in der Literatur, die Beschreibung der Methodik zur Bestimmung von Pkw-Abhängigkeit und Pkw-Notwendigkeit und die Ergebnisse dieser Analyse.

4.1 Das Konzept der Pkw-Abhängigkeit in der Literatur

Die Pkw-Abhängigkeit wurde schon aus verschiedenen Perspektiven und in unterschiedlichen Zusammenhängen untersucht. Die bisherigen Forschungsansätze unterteilen Mattioli et al. (2016) in drei verschiedene Arten der Pkw-Abhängigkeit. Dabei bezieht sich die **Makroebene** auf die Gesellschaft (*„society“*) und die gebaute Umwelt (*„built environment“*). Autoabhängige Wege (*„trips“*), Aktionen (*„activities“*) und Tätigkeiten (*„practices“*) fassen sie unter dem Begriff der **Mesoebene** zusammen. Die Abhängigkeit von Personen (*„individuals“*) wird als **Mikroebene** bezeichnet (Mattioli et al. 2016).

4.1.1 Die Makroebene

Die Makroebene bezieht sich auf die Gesellschaft („society“) und die gebaute Umwelt („built environment“). Innerhalb dieser Betrachtung wird die Pkw-Abhängigkeit auf der Stadtebene analysiert und die Städte in unterschiedliche Kategorien unterteilt. Für die Einteilung nimmt die durchschnittliche Pkw-Nutzung der Bewohner als Grundlage zur Bestimmung der Abhängigkeit eine entscheidende Rolle ein. Insbesondere Pkw-abhängige Städte zeichnen sich durch einen hohen Benzinverbrauch pro Kopf, einen hohen Anteil des motorisierten Individualverkehrs (MIV) und geringen Anteil des öffentlichen Verkehrs (ÖV) am Modal Split bezüglich Verkehrsaufkommen und -leistung aus. In Pkw-abhängigen Städten kommen zudem auf jeden Einwohner mehr Meter Straße und mehr Parkplätze. Das heißt, es herrscht eine Pkw-orientierte Landnutzung. Die niedrige Einwohnerdichte einer Stadt ist ein weiteres Merkmal.

Newman/Kenworthy teilen Städte anhand von diesen Merkmalen in fünf Grade der Pkw-Abhängigkeit ein (Newman und Kenworthy 1989).

Die Studie des Institute for Mobility Research ifmo (2013) untersucht die Mobilität in Megacities. Die Autoren entwickelten eine Systematik, die sechs wesentliche Cluster unterteilt und dabei die ökonomische Entwicklung und kulturellen Gegebenheiten berücksichtigt. Die individuellen Rahmenbedingungen in jedem Cluster führen zu sehr unterschiedlichen Eigenschaften des Verkehrssystems und zu unterschiedlichem Mobilitätsverhalten (Institut für Mobilitätsforschung 2013).

Siedentop et al. (2013) untersuchten Pkw-Abhängigkeit ebenfalls im räumlichen Kontext. Dabei wurde die Abhängigkeit für eine Region rein qualitativ anhand von Entfernungen und Erreichbarkeiten bestimmt. Zur Beurteilung der Pkw-Abhängigkeit eines Ortes wurden die vorhandenen Alternativen qualitativ beurteilt. Dazu wurde die Qualität des ÖVs und die Erreichbarkeit bestimmter Ziele (Hausarzt, Supermarkt, Grundschule, etc.) zu Fuß oder mit dem Fahrrad bewertet. Zudem wurde für alle Wohnhäuser die Entfernung zur nächstgelegenen ÖV-Haltestelle und den Zielen bestimmt. Aus den Daten wurden Karten erstellt, die den Grad der Pkw-Abhängigkeit der Bewohner darstellen (Siedentop et al. 2013).

4.1.2 Die Mesoebene

Die detailliertere Ebene bildet die Mesoebene. Hierbei werden Pkw-abhängige Wege (*„trips“*), Aktionen (*„activities“*) und Tätigkeiten (*„practices“*) untersucht. Pkw-abhängige Wege sind beispielsweise Wege in Zusammenhang mit der Begleitung von Kindern, dem Transport von schweren Einkäufen oder unhandlichen Gegenständen sowie Hol- und Bringdienste (Mattioli et al. 2016).

Die Mesoebene wird von Lucas und Jones (2009) noch weiter untergliedert. Sie unterscheiden nach objektiven und subjektiven Gründen der Pkw-Nutzung. Objektive Gründe liegen vor, wenn der Pkw das einzige verfügbare Verkehrsmittel ist. Subjektive Gründe liegen dann vor, wenn noch andere Optionen zur Auswahl stehen, diese aber nicht genutzt werden. Strukturell bedingt können nicht alle theoretisch möglichen Alternativen in Betracht gezogen werden, weil etwa die Verkehrsmittel nicht zur gefragten Zeit verkehren, der Zielort nicht angebunden ist oder die Fahrt unzumutbare Umstände bereitet. Situationsbedingt kann die Alternative nicht genutzt werden, wenn die Personen schwere Gegenstände transportieren oder gesundheitlich eingeschränkt sind (Lucas und Jones 2009). Auf dieselbe Definition kommt auch Haag (1996) über die Betrachtung des notwendigen Pkw-Verkehrs (Haag 1996).

Häufig werden Wege miteinander verknüpft und mehrere Ziele nacheinander angelaufen. Dabei kann es vorkommen, dass nur einer dieser Wege den Pkw wirklich erfordert. Das Verkehrsmittel Pkw kann aber nicht während einer Wegekette gewechselt werden. Somit ist die ganze Wegekette Pkw-abhängig, wenn ein Teilweg Pkw-abhängig ist.

4.1.3 Die Mikroebene

Die Abhängigkeit von Personen (*„individuals“*) bezeichnen Mattioli et al. als die Mikroebene. Diese Ebene wird am häufigsten untersucht. Es wird dabei zwischen bewusster (*„conscious“*) und struktureller (*„structural“*) Abhängigkeit unterschieden. Unter „bewusst abhängig“ fallen Personen, die für ihre Wege den Pkw nutzen, obwohl auch andere Verkehrsmittel vorhanden sind. Strukturell abhängig sind all jene, für die es keine Alternative zum Pkw gibt (Mattioli et al. 2016).

Handy et al. differenzieren diese Unterscheidung durch die Betrachtung von notwendigem (*„required driving“*) und zusätzlichem (*„excess driving“*) Fahren. Notwendiges Fahren beschreibt die minimale Anzahl Fahrten, die zur Aufrechterhaltung des Haushalts notwendig sind. Diese finden auf den kürzesten Wegen zum nächsten Ziel statt, wenn möglich ohne Pkw, und sind beeinflusst von vorausgehenden Langzeitentscheidungen wie dem Wohnort, dem Arbeitsplatz oder der Teilnahme an Freizeitaktivitäten (Handy et al. 2005). Zusätzliches Fahren kann absichtlich und unabsichtlich geschehen. Absichtlich mehr fahren Personen, die Spaß am Autofahren haben, die gerne Zeit im Pkw verbringen („Gedanken ordnen“, Privatsphäre) oder auf der Suche nach Abwechslung sind. Unbeabsichtigtes, zusätzliches Fahren ist eine Folge von Gewohnheit, schlechter Planung, Fehleinschätzungen oder mangelnder Information. Wenn es für die absichtlichen Fahrten gute Gründe gibt, wie zum Beispiel schweres Gepäck, werden sie als rational eingestuft, wenn nicht als irrational (Handy et al. 2005).

Bei Untersuchungen auf Mikroebene, die hier weiter betrachtet werden soll, werden die Versuchspersonen entweder persönlich oder per Fragebögen interviewt, führen Reisetagebücher oder ihre Wege werden mittels GPS-Tracking aufgezeichnet. Aus diesen Wegedaten in Verbindung mit soziodemografischen Angaben wird danach die Pkw-Abhängigkeit in Zusammenhang mit verschiedenen Merkmalen bestimmt.

Goodwin et al. (1995) bestimmten in Großbritannien Einflussparameter auf die Pkw-Abhängigkeit anhand der Frage: „Mit dem eigenen Auto zu fahren ist zu praktisch um es wegen der Umwelt aufzugeben“. Über alle Einkommensklassen wurde die Aussage von aktuellen Autofahrern ähnlich stark unterstützt. Daraus geht hervor, dass das Einkommen keinen großen Einfluss auf die Pkw-Abhängigkeit hat. Bei einer Betrachtung nach Wohnorten ist bei Bewohnern großer Städte eine deutlich geringere Zustimmung zu erkennen als bei Personen im ländlichen

Raum (33,8% zu 62,9%). Personen, die entweder zusätzlich zum Pkw oder ausschließlich andere Verkehrsmittel benutzen, stimmen der Äußerung seltener zu als welche, die ausschließlich Pkw fahren. Bei den aktuellen Pkw-Fahrern ist eine leichte Tendenz dahin zu erkennen, dass gebildetere Personen weniger Pkw-abhängig sind. Die Analyse bezüglich des Alters ist nicht eindeutig. Aber es lässt sich erkennen, dass bei jüngeren (18-24 Jahre) und älteren (60+) die Bindung an den Pkw stärker ist (Goodwin et al. 1995).

Verma (2015) konnte in einer Studie in Indien nachweisen, dass Pkw-Abhängigkeit nicht wächst, sondern mit der Anschaffung des Pkw entsteht. Der Pkw wird vom ersten Tag an intensiv genutzt. Die Vorteile werden mit den Leistungen des Öffentlichen Verkehrs verglichen. Die Unzufriedenheit mit dem Öffentlichen Verkehr hängt mit der Pkw-Abhängigkeit der Person und ihrer PKW-Besitzdauer zusammen (Verma 2015).

Gray et al. (2001) untersuchten die Pkw-Abhängigkeit ausschließlich im ländlichen Raum. Dabei wurde analysiert, welche Haushalte strukturell Pkw-abhängig und welche Pkw-fixiert sind. Dafür wurden fünf Gebiete untersucht, die sich in sozialen, ökonomischen und geografischen Merkmalen unterschieden (Gray et al. 2001).

Wie Cullinane und Cullinane (2003) in Hong Kong herausfanden, besteht Pkw-Abhängigkeit auch in Städten mit gutem ÖV-Angebot,. Dort ist der Modal Split Anteil des öffentlichen Verkehrs groß und die Pkw-Besitzquote niedrig. 38% der Befragten halten den Pkw für absolut notwendig für eine individuelle Lebensführung, 46% ziemlich notwendig. Die Autoren konnten zeigen, dass die Jahresfahrleistung und die Besitzdauer des Pkw die subjektive Pkw-abhängigkeit deutlich stärker determinieren als Geschlecht, Einkommen, Wohnort, Anzahl der Erwachsenen in einem Haushalt oder der Anwesenheit von Kindern (Cullinane und Cullinane 2003).

Mobilitätstypen

Die Untersuchung kann weiter verfeinert werden, wenn zu den soziodemographischen Daten noch Angaben zu Werten, Normen und Einstellungen erhoben werden. So lassen sich bei der Auswertung von Mobilitätsstudien verschiedene Verkehrstypen klassifizieren. Dies kann nach verschiedenen Ansätzen geschehen. Hunecke (2015) unterteilt vier Ansätze: (1) Geographische Ansätze, die sich an der Raum-, Siedlungs- und Verkehrsinfrastruktur orientieren, (2) verhaltensbasierte Ansätze, welche sich auf das Verkehrsverhalten stützen, (3) soziodemographische Ansätze, die sich auf soziodemographische Merkmale stützen und (4) psychographische Ansätze, die innerpsychische Merkmale der Informationsbewertung und -verarbeitung betrachten. Lebensstile beziehen Wert-, Einstellungs- und Verhaltensmuster mit ein. Bei der Erstellung von Mobilitätsstilen werden die Lebensstil-Merkmale, das Mobilitätsverhalten und die mobilitätsbezogene Einstellung berücksichtigt (Hunecke 2015).

Dies wurde erstmals von Götz et al. (1998) in der Studie CITY:mobil erarbeitet. Für die Identifizierung von Mobilitätsstile wurden neben Fragen zum Verkehrsverhalten auch Fragen nach Orientierung und Motive der Probanden gestellt. Aus den Daten der Mobilitätsorientierung wurden zunächst Cluster gebildet. Anschließend wurden Lebensstil- und Lebenslage durch eine qualitative Phänomenologie mit quantitativen Mitteln mit den Mobilitätsclustern verknüpft. Nach einer Zusammenhangsanalyse konnten jedem Cluster soziodemographische Merkmale und Lebensstile zugeordnet werden. Das Verkehrsverhalten ging dabei als abhängige Variable in das Modell ein. Daraus konnten verschiedene Mobilitätsstile identifiziert werden. Die Studie wurde in Freiburg und in Schwerin durchgeführt. Für beide Städte wurden Mobilitätsprofile erstellt und verglichen (Götz et al. 1998).

Anable (2005) untersuchte die Verkehrsmittelwahl bei Freizeitwegen. Dazu wurden 666 Besucher eines National Trust[2] Geländes im Nordwesten von Großbritannien befragt. Der Fragebogen enthält Fragen, um die Einstellung der Teilnehmer zur Umwelt, Natur, dem Radfahren und zum Pkw einschätzen zu können. Um aus den Antworten psychologische Profile zu erstellen, wendet Anable die Theorie des geplanten Verhaltens (TPB) von Ajzen (1991) mit zusätzlichen Variablen an, welche die Verkehrsmittelwahl besser beschreiben. So konnten sechs verschiedene Gruppen identifiziert werden. In dieser Studie lassen sich bei den soziodemografischen Merkmalen zwischen den Gruppen keine großen Unterschiede ausmachen. Es ist festzuhalten, dass Personen mit hohem Wechselpotenzial eine positivere Einstellung gegenüber alternativen Verkehrsmitteln haben, wenig psychologische Bindung an den Pkw haben und strengere moralische Vorstellungen und eine stärker wahrgenommene Kontrolle haben (Anable 2005).

Auch Hunecke et al. (2010) stützen die entwickelten Mobilitätstypen auf eine erweiterte Version von Ajzens Theorie des geplanten Verhaltens (Ajzen 1991). Durch Clusteranalysen konnten in der Studie fünf verschiedene Gruppen identifiziert werden, die sich in Verhalten, Normen und Werten unterscheiden. Im Gegensatz zu Anable (Anable 2005) schließen die Gruppen auch Radfahrer mit ein (Hunecke et al. 2010).

Für die Erstellung von Bewohnertypen in Städten wurde in einer Studie des BMVBS (2012a) die verkehrsmittelbezogene Einstellung erhoben. Es wurden 13 psychologische Merkmale erfasst, darunter die Einstellung und Bewertung des ÖV, die Pkw-Orientierung, Wetterresistenz und Routine. Hier wurden keine Gruppen gebildet, sondern die Auswertungen der einzelnen Kategorien direkt mit Werten aus anderen Städten verglichen (BMVBS 2012a).

[2] Gemeinnützige Organisation, die Objekte des Denkmalschutzes und des Naturschutzes betreut

In Studien von InnoZ und LSE Cities (2015) wurden ebenfalls Gruppen mit gleicher mobilitätsbezogener Einstellung erstellt. Es wurden computergestützte Telefoninterviews in London und Berlin durchgeführt. Aus den Daten zu Verkehrsmittelnutzung (modes), mobility services, Trendführerschaft (innovativeness), Nutzung von IKT (technology), Umwelt (environment) und Wohnvorlieben (residential preferences) wurden zunächst Verhaltensprofile der verschiedenen Gruppen erzeugt. Nach einer Faktorenanalyse und einer Clusteranalyse entstanden sechs Gruppen mit gleicher Einstellung, wobei sich für London und Berlin der Anteil der Befragten an den Gruppen unterscheidet (LSE Cities und InnoZ 2015).

Zhao (2011) unterscheidet die objektive Pkw-Nutzung und das Gefühl der Abhängigkeit. Er schlägt in seinem Paper ein subjektives Maß der Pkw-Abhängigkeit vor. Dieses beruht auf der eigenen Einschätzung der Pkw-Bezogenheit der Testpersonen. Aus drei Fragen ermittelt er die subjektive Pkw-Abhängigkeit der Befragten. Die von ihm vorgeschlagene subjektive Pkw-Abhängigkeit ergänzt die Auswertung der tatsächlichen Pkw-Nutzung. Somit kann Pkw-Abhängigkeit bestehend aus drei Komponenten gesehen werden. Der subjektiven Pkw-Abhängigkeit, der tatsächlichen Pkw-Nutzung und dem Vorsatz, die Pkw-Nutzung zu reduzieren (Zhao 2011).

Auch von Behren et al. (2017) schlagen eine Unterteilung der Pkw-Abhängigkeit in zwei Parameter vor. Die objektive Abhängigkeit beschreibt unter anderem die Häufigkeit und die Art der Pkw-Nutzung und die vorhandenen Pkw im Haushalt. Die subjektive Pkw-Abhängigkeit leitet sich aus den Einstellungen und Normen der Befragten ab. Aus diesen Indikatoren wird dann ein zusammenfassender Indikator für die Pkw-Abhängigkeit ermittelt, der sowohl die objektive als auch die subjektive Abhängigkeit berücksichtigt.

4.2 Methodik

Im Rahmen dieses Projektes wurden die Ergebnisse der entwickelten Modellumgebung zu Pkw-Nutzung über ein Jahr genutzt, um Analysen zur Pkw-Abhängigkeit durchzuführen. Gerade Informationen zur Pkw-Nutzung über einen längeren Zeitraum, beispielsweise eines ganzen Jahres, sind vorteilhaft gegenüber den vorhandenen Studien, da hierdurch bei der Analyse der Pkw-Abhängigkeit gerade auch die Variabilität der Pkw-Nutzung über längere Zeiträume berücksichtigt werden kann.

Die Fragestellung der Nutzenstiftung des Pkw für einen Haushalt lässt sich jedoch von zwei Seiten betrachten, siehe Abbildung 4-1. Bei der ersten Betrachtung steht der Haushalt im Mittelpunkt. Die Frage ist, wie abhängig ein Haushalt von seinem bzw. seinen Pkw ist. Hieraus lassen sich Aussagen zur Pkw-Abhängigkeit des Haushalts ableiten. Die zweite Seite stellt die

Betrachtungsebene der Pkw in den Mittelpunkt. Dies ist im Vergleich zu den Studien in der Literatur mit der in diesem Projekt geschaffenen Modellumgebung möglich, da nicht nur Informationen zur Pkw-Nutzung von Personen vorliegen. Die Fragestellung lautet, wie notwendig der einzelne Pkw im Haushalt überhaupt ist. Aus diesen beiden Fragestellungen ergeben sich durchaus Differenzen: so ist denkbar, dass ein Haushalt Pkw-abhängig ist, aber dass nicht alle Pkw im Haushalt notwendig sind, um die dieser Abhängigkeit Genüge zu tun und die Mobilitätsbedürfnisse zu befriedigen.

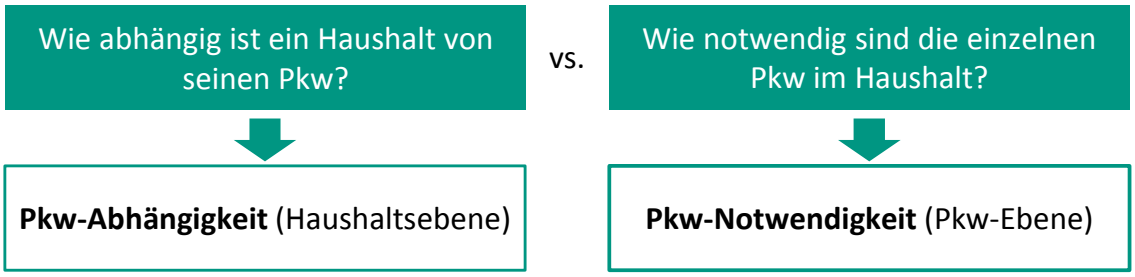


Abbildung 4-1: Differenzierung der Begriffe Pkw-Abhängigkeit und Pkw-Notwendigkeit

Im Rahmen dieses Projektes wurden Indikatoren zur Pkw-Abhängigkeit auf Haushaltsebene und Pkw-Notwendigkeit auf Pkw-Ebene bestimmt. Die Methodik der Indikatorenermittlung ist an die Methodik einer Nutzwertanalyse angelehnt. Generell einhalten die entwickelten Indikatoren lediglich eine objektive Einschätzung, in welche Informationen zu Mobilitätsverhalten, verfügbaren Verkehrsangebot und Infrastruktur einfließen. Einstellungen, Normen und Werte der Pkw-Halter hinsichtlich Pkw-Besitz und Pkw-Nutzung, aus denen eine subjektive Pkw-Abhängigkeit abgeleitet werden könnte (wie beispielsweise in von Behren et al. 2018) liegen nicht vor. Eine Beschreibung der Vorgehensweise bei der Ermittlung der Indikatoren findet sich in den nachfolgenden Abschnitten.

4.2.1 Pkw-Abhängigkeit des Haushalts

Für die Ermittlung der Pkw-Abhängigkeit auf Haushaltsebene wurden verschiedene Kategorien, die sowohl das Verkehrsverhalten als auch die Verkehrsinfrastruktur bzw. das Verkehrsangebot beschreiben, berücksichtigt. Hierbei wird sowohl betrachtet, wie Pkw-abhängig die einzelnen Personen des Haushaltes sind als auch wie Pkw-abhängig der Haushalt als Ganzes ist. Eine schematische Auflistung der verschiedenen Kategorien findet sich in Abbildung 4-2.

Für die Betrachtung auf Personenebene wird die Pkw-Nutzung von Personen im Laufe eines Jahres betrachtet. Dies ist mit dem vorhandenen CUMILE-Ergebnissen möglich, da für jede einzelne Pkw-Fahrt Informationen zum Pkw-Fahrer vorliegen. Anhand dieser detaillierten

Informationen kann auch abgebildet werden, wenn eine Person im Laufe des Jahres verschiedene Pkw des Haushaltes nutzt.

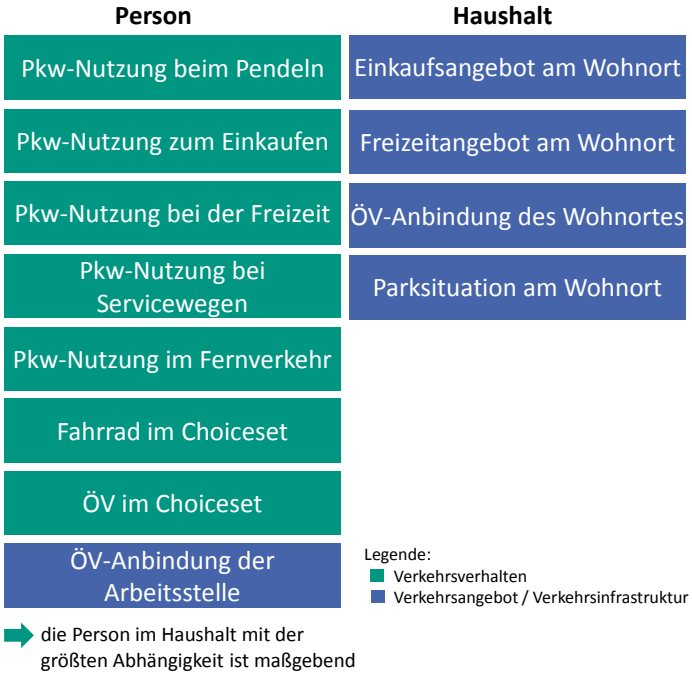


Abbildung 4-2: Kategorien für die Bestimmung des Pkw-Abhängigkeitsindikators

Für die Ermittlung des Pkw-Abhängigkeitsindikators werden verschiedene Kategorien der Nutzung berücksichtig. So wird zwischen der Pkw-Nutzung beim Pendeln, zum Einkaufen, in der Freizeit, bei Service-Wegen (z. B. abholen von Kindern aus den Kindergarten mit dem Pkw) und im Fernverkehr unterschiedenen. Aus den Wegetagebüchern der MOP-Erhebung ist außerdem bekannt, ob die Personen das Fahrrad oder den ÖV im Choiceset haben, d.h. ob sie im Laufe einer Woche zumindest ab und an einen Pkw nutzen. Dies ist dahingehend von Bedeutung, welche alternativen Verkehrsmittel diese Personen überhaut nutzen könnten. Als weitere Kategorie auf Personenebene ist außerdem aus der MOP-Erhebung bekannt, wie gut die Anbindung des Arbeitsplatzes an den öffentlichen Verkehr ist, um beurteilen zu können, ob eine Personen auch auf ihrem Pendelweg den öffentlichen Verkehr als eine Alternative nutzen könnte. Im Fall von Mehr-Personen-Haushalten wurde der Indikatorenteil auf Personenebene für jede Person im Haushalt einzeln ermitteln. Für die Bestimmung des Gesamtindikators ist jedoch die Person im Haushalt mit der größten Abhängigkeit maßgebend, da diese die Abhängigkeit des Haushalts determiniert.

Auf Haushaltebene spielen das Verkehrsangebot und die Infrastruktur am Wohnort eine entscheidende Rolle. Dies gilt beispielsweise für das Einkaufs- und Freizeitangebot am Wohnort. Wenn Haushaltsmitglieder die Möglichkeit haben, ihre Einkäufe und auch ihre

Freizeitbedürfnisse (z. B. Vorhandensein von Restaurants, Kneipen, Kino, Sportangeboten) wohnortnahe erledigen können, dann sind die Distanzen zu diesen Aktivitäten kurz. Gerade für kurze Distanzen sind aktive Verkehrsmittel wie das Fahrrad oder zu Fuß gehen oftmals gute Verkehrsmittelalternativen zum Pkw. Weiterhin fließen auch die ÖV-Anbindung des Haushalts und die Pkw-Parkplatzverfügbarkeit in die Betrachtung ein.

Der Abhängigkeitsindikator ist als Zahl zwischen 0 und 1 angegeben (siehe von Behren et al. 2017). 0 bedeutet, dass der Haushalt überhaupt nicht Pkw-abhängig ist, 1 bedeutet, dass der Haushalt sehr stark Pkw-abhängig ist. Jede der oben genannten Kategorein fließt mit dem gleichen Gewicht in den Indikator ein. Bei den verschiedenen Kategorien der Pkw-Nutzung wird betrachtet, wie häufig pro Jahr Personen den Pkw für die verschiedenen Aktivitäten nutzen.

4.2.2 Notwendigkeit von einzelnen Pkw im Haushalt

Der Indikator zur Pkw-Notwendigkeit auf Pkw-Ebene wird ganz ähnlich bestimmt wie der Indikator zur Pkw-Abhängigkeit auf Haushaltsebene. Wie in Abbildung 4-3 dargestellt, fließen in den Indikator der Pkw-Notwendigkeit die gleichen Elemente des Verkehrsverhaltens und des Verkehrsangebots, bzw. der Verkehrsinfrastruktur ein, jedoch verläuft die Ausgestaltung der einzelnen Kriterien etwas anders. So wird die Pkw-Nutzung bei diesem Indikator nicht mehr auf Ebene der Personen betrachtet, sondern auf Ebene der Pkw. In diesen Indikator fließt beispielsweise ein, wie häufig pro Jahr ein Pkw zum Einkaufen genutzt wird, unabhängig davon welche Person im Haushalt diesen Pkw zum Einkaufen genutzt wird. Die Kategorien auf Haushaltsebene werden identisch zum Pkw-Abhängigkeitsindikator ermitteln. Aus dem CUMILE-Datensatz ist bekannt, welche Person im Haushalt der Hauptnutzer des jeweiligen Pkw ist. Die Kategorien Fahrrad und ÖV im Choiceset und ÖV-Anbindung der Arbeitsstelle werden für den jeweiligen Pkw-Hauptnutzer bestimmt.

Auch der Pkw-Notwendigkeitsindikator ist als Zahl zwischen 0 und 1 angegeben. 0 bedeutet, dass der Pkw für den Haushalt überhaupt nicht notwendig ist, 1 bedeutet, dass der Pkw für die Befriedigung der Mobilitätsbedürfnisse des Haushalts unverzichtbar ist. Jede der oben genannten Kategorein fließt mit dem gleichen Gewicht in den Indikator ein.

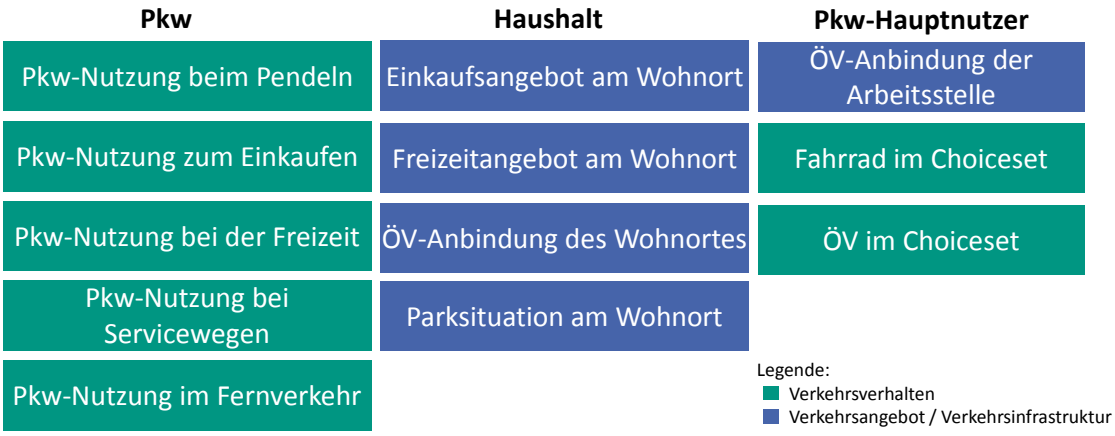


Abbildung 4-3: Kategorien für die Bestimmung des Pkw-Notwendigkeitsindikators

4.3 Ergebnisse zu Pkw-Abhängigkeit und Pkw-Notwendigkeit

In den folgenden Abschnitten werden Ergebnisse zu Pkw-Abhängigkeit von Privathaushalten in Deutschland und zu Notwendigkeit von einzelnen Pkw in diesen Haushalten vorgestellt.

4.3.1 Pkw-Abhängigkeit

Der Abhängigkeitsindikator der Haushalte im CUMILE-Datensatz liegt zwischen 0.14 und 0.91. Der Mittelwert beträgt 0.45 und der Median 0.44. In Abbildung 4-4 ist die Verteilung des Pkw-Abhängigkeitsindikators dargestellt. Der Großteil der Haushalte befindet sich im mittleren Bereich, aber es existieren durchaus Haushalte die einen sehr niedrigen Pkw-Abhängigkeitsindikator aufweisen, obwohl sie einen Pkw besitzen. In dem genutzten Datensatz sind Pkw-lose Haushalte nicht enthalten.

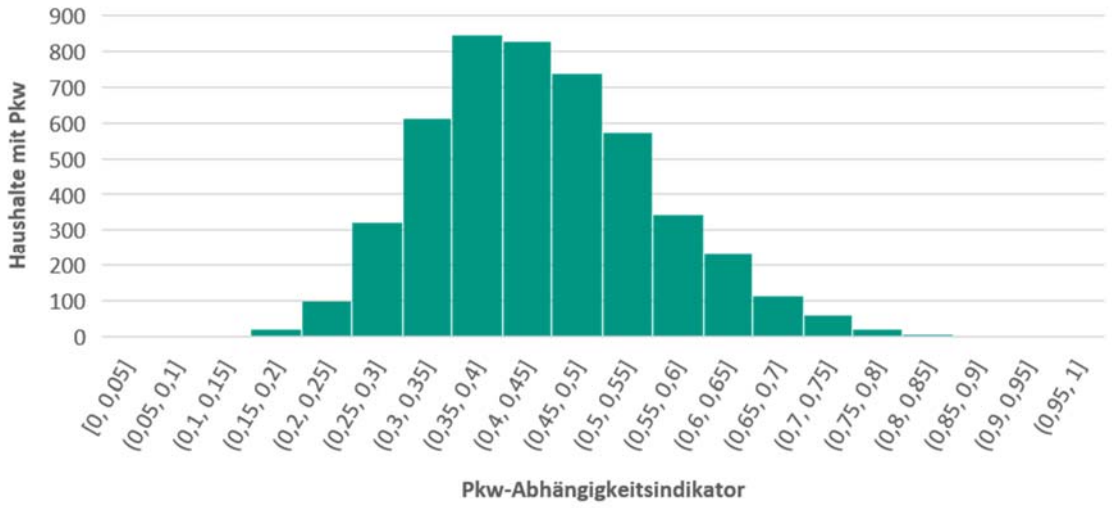


Abbildung 4-4: Verteilung des Pkw-Abhängigkeitsindikators

Für die weiteren Analysen wurden die Haushalte in der Stichprobe in vier gleich große Gruppen (d. h. Quartil) gemäß ihrem Abhängigkeitsindikator unterteilt:

- Haushalte mit sehr geringer Pkw-Abhängigkeit (Pkw-Abhängigkeitsindikator zwischen 0,14 und 0,36; 25% der Stichprobe)
- Haushalte mit geringer Pkw-Abhängigkeit (Pkw-Abhängigkeitsindikator zwischen 0,37 und 0,43; 25% der Stichprobe)
- Haushalte mit hoher Pkw-Abhängigkeit (Pkw-Abhängigkeitsindikator zwischen 0,44 und 0,51; 25% der Stichprobe)
- Haushalte mit sehr hoher Pkw-Abhängigkeit (Pkw-Abhängigkeitsindikator zwischen 0,52 und 0,91; 25% der Stichprobe)

Abbildung 4-5 zeigt wie abhängig verschiedene Haushaltstypen von ihrem Pkw sind. Aus dieser Analyse geht hervor, dass Kleinhaushalte ohne Berufstätige (z. B. Rentnerhaushalte) deutlich häufiger eine sehr geringe Pkw-Abhängigkeit aufweisen (41,6%) als die anderen Haushaltstypen (9,5% bis 17,8%). Hingegen ist der Anteil der Haushalte mit sehr hoher Pkw-Abhängigkeit bei den Haushalten mit Kindern unter 18 am höchsten: 42,9% dieser Haushalte haben eine sehr hohe Pkw-Abhängigkeit und weitere 29,3% haben eine hohe Pkw-Abhängigkeit.

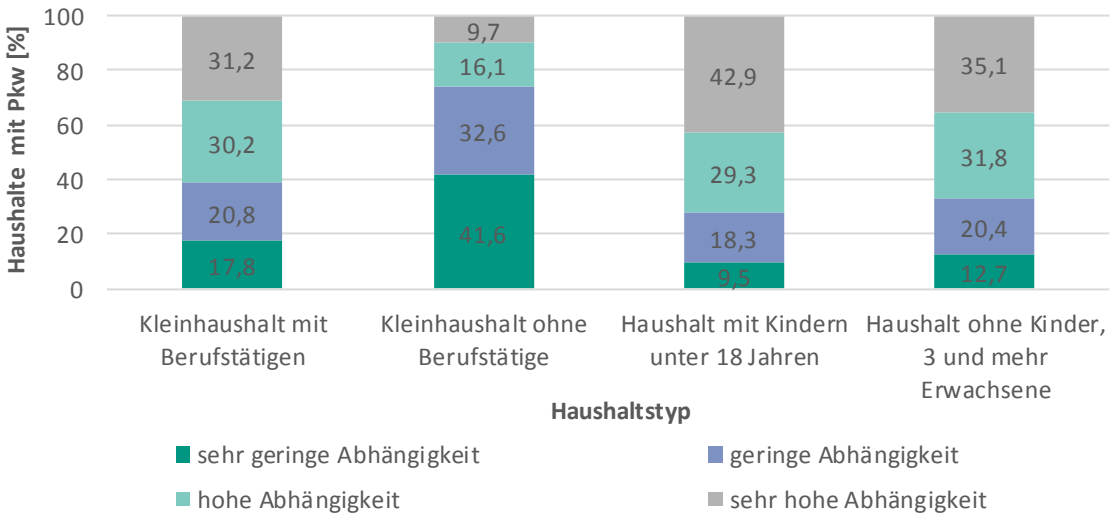


Abbildung 4-5: Pkw-Abhängigkeit, differenziert nach Haushaltstyp

Aus Abbildung 4-6 geht hervor, dass auch die Wohnortgröße die Pkw-Abhängigkeit determiniert. Einwohner von kleinen Orten bis 19.999 Einwohner haben den höchsten Anteil an Haushalten mit hoher und sehr hoher Pkw-Abhängigkeit und in diesen Raumtypen sind vergleichsweise wenige Haushalte mit einer geringen und sehr geringen Pkw-Abhängigkeit zu finden. Dieses Bild ändert sich mit steigender Wohnortgröße. In Metropolen ab 500.000 Einwohnern ist der Anteil der Haushalte mit sehr geringer Pkw-Abhängigkeit am größten (44,4%).

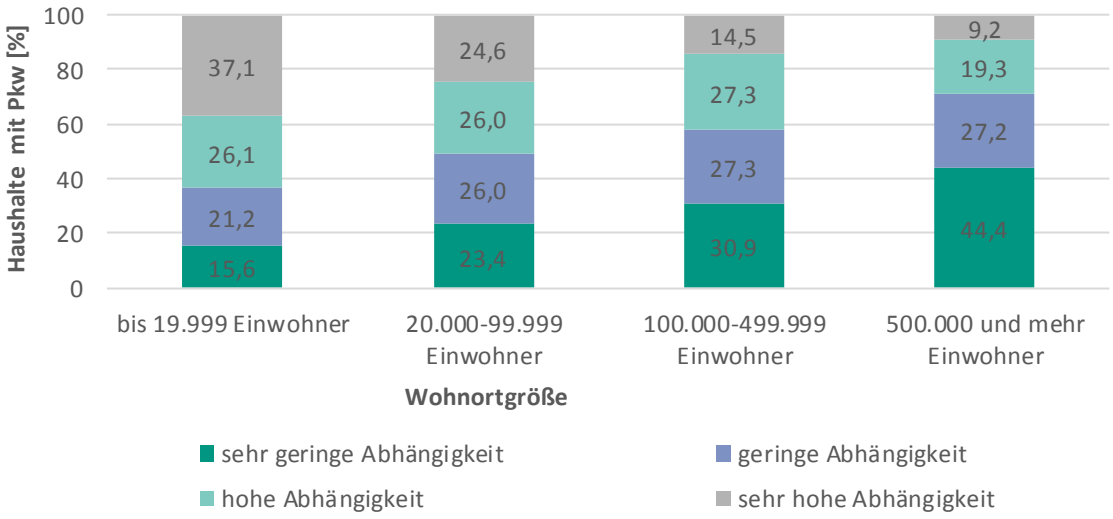


Abbildung 4-6: Pkw-Abhängigkeit, differenziert nach Wohnortgröße

4.3.2 Pkw-Notwendigkeit

Der Pkw-Notwendigkeitsindikator auf Pkw-Ebene (Abbildung 4-7) weist eine ähnliche Verteilung auf wie der Pkw-Abhängigkeitsindikator auf Haushaltsebene. Auch hier sind Pkw mit einem Notwendigkeitsindikator zwischen 0,14 und 0,91 zu finden und der Mittelwert beträgt 0,45.

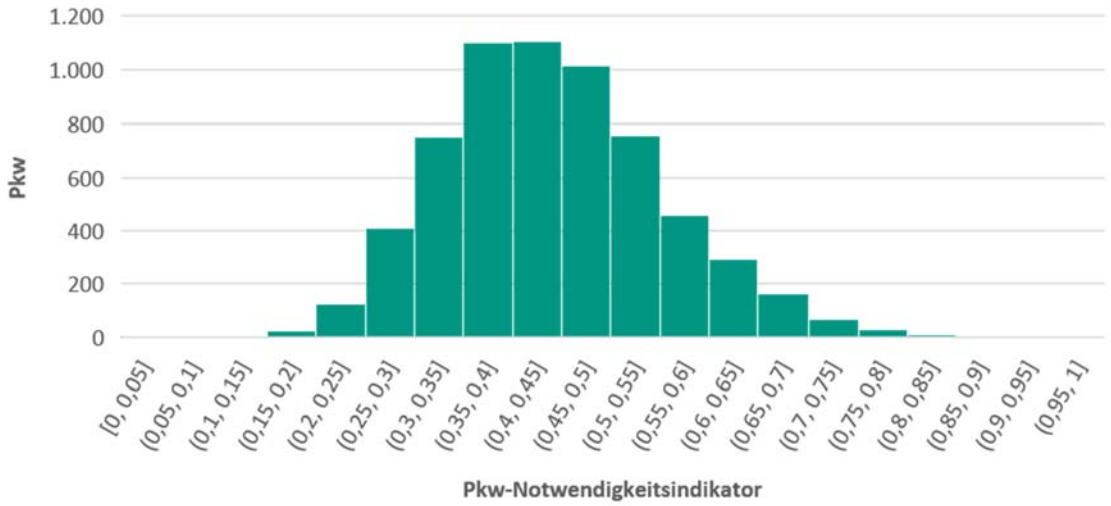


Abbildung 4-7: Verteilung des Pkw-Notwendigkeitsindikators

Für die weiteren Analysen wurden die Pkw in der Stichprobe in vier gleich große Gruppen (d. h. Quartil) gemäß ihrem Pkw-Notwendigkeitsindikator unterteilt:

- Pkw mit sehr geringer Pkw-Notwendigkeit (Pkw-Abhängigkeitsindikator zwischen 0,14 und 0,36; 25% der Stichprobe)
- Pkw mit geringer Pkw-Notwendigkeit (Pkw-Abhängigkeitsindikator zwischen 0,37 und 0,44; 25% der Stichprobe)
- Pkw mit hoher Pkw-Notwendigkeit (Pkw-Abhängigkeitsindikator zwischen 0,45 und 0,51; 25% der Stichprobe)
- Pkw mit sehr hoher Pkw-Notwendigkeit (Pkw-Abhängigkeitsindikator zwischen 0,52 und 0,91; 25% der Stichprobe)

Aus Abbildung 4-8 ist zu ersehen, dass neuere Fahrzeuge eine höhere Pkw-Notwendigkeit aufweisen als ältere Fahrzeuge. So beträgt der Anteil der Pkw mit sehr geringer Notwendigkeit bei Neuwagen bis zu drei Jahren 16,2% und steigt auf 30,1% bei älteren Fahrzeugen, ab 10 Jahren. Dies könnte einen Hinweis darauf geben, dass gerade neue Pkw oft angeschafft werden, weil sie benötigt werden, um die Mobilitätsbedürfnisse der Haushaltsmitglieder zu befriedigen – die Pkw-Notwendigkeit ist also relativ hoch. Durch sich ändernde Lebensumstände der Haushaltsmitglieder ändern sich jedoch auch deren Mobilitätsbedürfnisse. Beispielsweise nimmt,

wenn Personen in die Rente eintreten, deren Verkehrsleistung, gerade mit dem Pkw, ab (Weiss et al. 2016b) und die Notwendigkeit dieses Pkw sinkt.

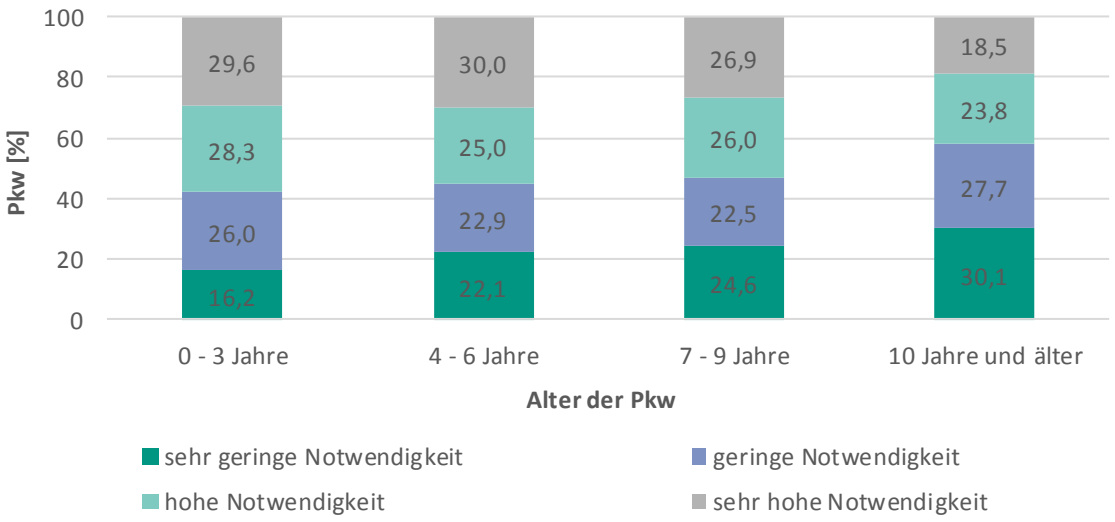


Abbildung 4-8: Pkw-Notwendigkeit, differenziert nach Pkw-Alter

Abbildung 4-9 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Pkw-Notwendigkeitsindikator und der Stellung des Pkw im Haushalt. In Mehr-Pkw-Haushalten wurde die Stellung des Pkw – Erstwagen, Zweitwagen oder Drittwagen – über einen Vergleich der Jahresfahrleistungen der unterschiedlichen im Haushalt vorhandenen Pkw ermittelt. Generell sind Haushalte, die mehr als einen Pkw besitzen Pkw-abhängiger als Haushalte mit nur einem Pkw. Die Notwendigkeit dieser Pkw für die Befriedigung der Mobilitätsbedürfnisse ist jedoch unterschiedlich. 38,4% der Erstwagen in Mehr-Pkw-Haushalten haben eine sehr hohe Pkw-Notwendigkeit und weitere 29,5% eine hohe Pkw-Notwendigkeit. In Ein-Pkw-Haushalten ist der Anteil der Pkw mit sehr geringer Notwendigkeit mit 31,5% am höchsten. Auch wenn diese Pkw aus objektiven Gründen gut substituierbar sind, müssen sinnvolle Anreize für eine Abschaffung des Pkw geschaffen werden, da die Haushaltsmitglieder nicht auf einem anderen Pkw im Haushalt zurückgreifen können. Die Möglichkeit des Carsharing könnte hier eine gute Alternative bieten.

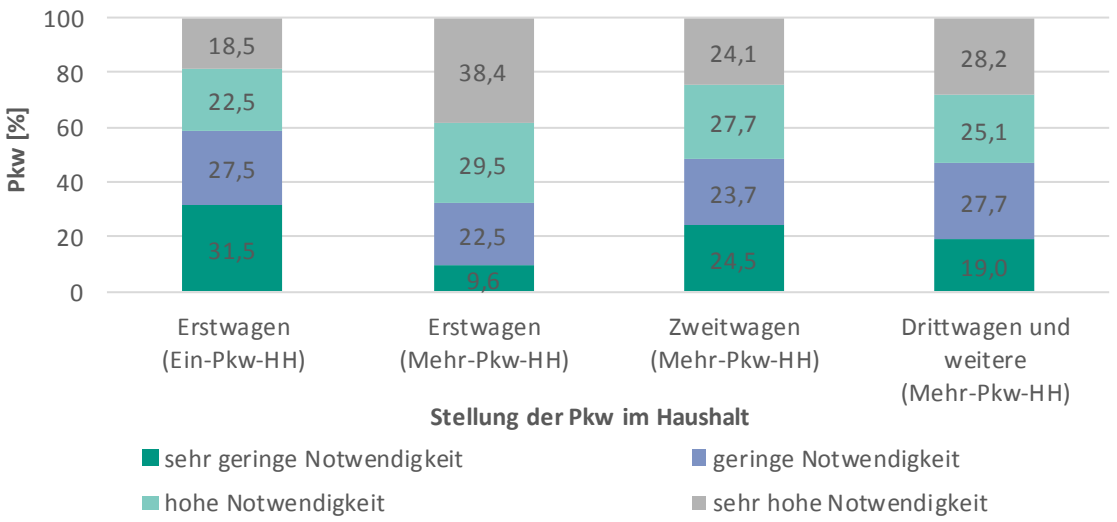


Abbildung 4-9: Pkw-Notwendigkeit, differenziert nach Stellung des Pkw im Haushalt

Tabelle 4-1 zeigt die mittleren jährlichen Emissionen der Pkw in der verschiedenen Pkw-Notwendigkeitsquartilen. Die Emissionen pro Jahr sind bei Pkw mit einer sehr niedrigen Notwendigkeit deutlich geringer als bei Pkw mit einer hohen oder sehr hohen Notwendigkeit. So steigen die mittleren Kohlenmonoxidemissionen pro Jahr und Pkw von 10,26 kg für Pkw mit sehr geringer Notwendigkeit auf 18,25 kg für Pkw mit sehr hoher Notwendigkeit. Die mittleren Stickoxidwerte unterschieden sich gar um Faktor vier zwischen den verschiedenen Notwendigkeitsquartilen (1,99 kg/Jahr – 8,03 kg/Jahr).

Tabelle 4-1: Mittlere Emissionen der Pkw in den verschiedenen Pkw-Notwendigkeitsquartilen über ein Jahr

	Sehr geringe Notwendigkeit	Geringe Notwendigkeit	Hohe Notwendigkeit	Sehr hohe Notwendigkeit
Emissionen je Pkw über ein Jahr, arithmetisches Mittel [kg/Jahr]				
Kohlendioxid CO_2	1362,33	2021,12	2533,06	3136,78
Kohlenmonoxid CO	10,26	14,56	16,46	18,25
Kohlenwasserstoffe HC	0,91	1,48	1,71	1,99
Stickoxide NOx	1,99	3,28	5,10	8,03
Feinstaub PM	0,04	0,07	0,08	0,11

Zusammenfassend geht aus der Analyse hervor, dass gerade Rentner-Haushalte und Haushalte in größeren Städten häufiger unabhängiger von ihrem Pkw sind. Die Pkw mit einer geringen Notwendigkeit sind vielfach die einzigen im Haushalt vorhandenen Pkw und auch oftmals ältere

Fahrzeuge. Diese Pkw werden also häufig als „So-da-Autos“ gehalten. Ziel einer bedarfsgerechten, nachhaltigen Verkehrspolitik sollte daher sein, für diese Pkw-Halter Anreize zu schaffen, ihre Mobilitätsbedürfnisse anders als mit ihrem eigenen Pkw zu befriedigen. Die Kombination aus Fahrrad, Pedelec, dem öffentlichem Verkehr sowie Carsharing bieten hierfür gute Möglichkeiten.

5 Analyse ökonomischer Substitutionspotenziale von privaten Pkw durch Carsharing

Es wird vielfach argumentiert, dass stationsbasiertes Carsharing unterhalb einer bestimmten Fahrleistung vernünftig und aus der Sicht der Haushalte ökonomisch sinnvoll ist (siehe beispielsweise Abbildung 5-1). Diese Argumentation berücksichtigt aber nicht die unterschiedliche Nutzung (selten viel oder häufig wenig) sowie die Variation und Planbarkeit einer Nutzung vor dem Hintergrund sonstiger Rahmenbedingungen sowie die Tarifbildung (Zeitmiete, Kilometertarife) oder die Pkw-Eigenschaften des Privatfahrzeuges (Alter, Segment): Mit der Betrachtung der Pkw-Nutzung eines Jahres unter Berücksichtigung sonstiger Parameter wie modaler Affinitäten kann dargestellt werden, für welche Pkw-Nutzungsprofile eine Substitution von Carsharing denkbar ist, sowie möglicherweise die Identifikation fehlender Elemente zur Loslösung einer Pkw-Abhängigkeit.

Abbildung 5-1: Darstellung der jährlichen Kosten des Privat-Pkw-Besitzes im Vergleich zur Carsharing-Mitgliedschaft (Stadtmobil Karlsruhe 2017)

So verfügen die Anbieter von Carsharing (CS) zwar über die Kenntnis ihrer eigenen Kunden (Sozio-demographie und Intensität der Nutzung von Carsharing-Pkw sowie das Nutzungsverhalten). Sie haben aber nur begrenzte Vorstellungen über die soziodemographischen Eigenschaften und die Pkw-Nutzung von potenziell für Carsharing geeigneten Kunden, die bislang einen eigenen Pkw im Haushalt haben. Mit der Kenntnis der Pkw-gestützten Mobilitätsbedürfnisse potenzieller CS-Nutzer können CS-Anbieter passgenauere Konzepte für die Gewinnung neuer Kunden entwickeln. Um hiermit die theoretischen Ergebnisse des Vorhabens in eine praktische Anwendung zu überführen, wurden die Ergebnisse mit dem Carsharing Anbieter stadtmobil Stuttgart AG im Rahmen von Workshops diskutiert und analysiert. Im Ergebnis wurden unter Einbeziehung verschiedener Szenarien Zielgruppen (Personen mit einer spezifischen für CS-geeigneten Pkw-Nutzung) für stationsgebundenes CS identifiziert und deren Pkw-Verhalten und Soziodemografie analysiert und es wurden szenarienhaft Überlegungen angestellt, in welcher Form (unter Zugrundelegung vorliegender Erfahrungen zur CS-Nutzung und bekannter Adaptionsprozesse) sich positive Auswirkungen in Bezug auf die Klimaschonung ergeben dürften.

Die in diesem Projekt vorgenommenen Analysen beschränken sich auf stationsgebundenes Carsharing. Kunden des stationsgebundenen CS können Fahrzeuge an festen Stationen entleihen und geben die Fahrzeuge nach Beendigung ihrer Fahrten an derselben Station zurück. Tarifstrukturen, Fahrzeugklassen und weitere Informationen des Praxispartners Stadtmobil Stuttgart AG wurden in der Modellierung übernommen.

Es wurde zudem eine Broschüre für CS-Anbieter erarbeitet, welche die Ergebnisse dieses Arbeitspakets enthält und zur Kundenberatung und -akquise eingesetzt werden kann. Ein Abdruck der Broschüre findet sich in Anhang 9.

5.1 Methodik

Um Pkw-Halter identifizieren zu können, für die eine Substitution ihres Privat-Pkw durch eine CS-Mitgliedschaft ökonomisch sinnvoll ist, wurden für jeden Pkw im Datensatz die jährlichen Kosten der Privat-Pkw-Nutzung ermittelt und mit den jährlichen Pkw-Kosten als stationsgebundener CS-Pkw unter verschiedenen Nutzungsszenarien verglichen.

Grundgesamtheit dieser Auswertung sind Pkw von privaten Haltern (Privat-Pkw). Dienstwagen und Firmenwagen werden in dieser Analyse nicht betrachtet, da diese Pkw oftmals aus beruflichen Gründen (d. h. diese Pkw werden teilweise zur Ausübung der beruflichen Tätigkeit benötigt) angeschafft wurden und sich eine Substitution durch CS teilweise schwierig gestaltet, sich die Kostenstrukturen eines Dienstwagens aufgrund der Dienstwagenbesteuerung von den Kosten eines Privat-Pkw unterscheiden und diese unterschiedlichen Kostenstrukturen auch auf das Mobilitätsverhalten im Privaten auswirken könnten (Diekmann et al. 2011; Shiftan et al. 2012).

5.1.1 Aufstellung von Carsharing-Szenarien

Für die Abschätzung des Substitutionspotenzials durch CS wurden verschiedene CS-Szenarien im Austausch mit dem Praxispartner Stadtmobil Stuttgart entwickelt, welche in Abbildung 5-1 dargestellt sind.

Szenario 1 stellt den Status-Quo-Fall dar: im Rahmen einer Stadtmobil-Mitgliedschaft würde ein früherer Pkw-Halter alle Fahrten, die er mit seinem Privat-Pkw zurückgelegt hat, auch mit CS realisieren und hierfür CS-Fahrzeuge, die der Pkw-Klasse seines Privatwagens entsprechen, buchen.

Da aber das Ausliehen des CS-Pkw mit einem gewissen Aufwand – Online-Buchung, Zugangsweg zur CS-Station, Ausleihen des Pkw – verbunden ist, wird in den Szenarien 2, 4 und 5

angenommen, CS-Mitglieder bei kurzen Ausgängen bis 5 km Länge, für welche sie zuvor ihren Privat-Pkw nutzten, auf andere Verkehrsmittel umsteigen, z. B. auf das Fahrrad oder Pedelec. Eine Analyse der Buchungsdaten von Stadtmobil Stuttgart bestätigt diese Annahme: Der Anteil der Buchungen mit einer Ausgangslänge bis 5 km Länge ist vernachlässigbar.

Tabelle 5-1: CS-Nutzungsszenarien

	Szenario 1	**Szenario 2**	**Szenario 3**	**Szenario 4**	**Szenario 5**
Pkw-Klasse	Gleich wie Privat-Pkw	Gleich wie Privat-Pkw	Nächstkleinere Fzg.-Klasse	Nächstkleinere Fzg.-Klasse	Nächstkleinere Fzg.-Klasse
Pkw-Nutzung	Gleich wie Privat-Pkw	Ausgänge ≤ 5 km nicht mehr mit dem Pkw	Gleich wie Privat-Pkw	Ausgänge ≤ 5 km nicht mehr mit dem Pkw	Ausgänge ≤ 5 km & Pendel-touren nicht mehr mit dem Pkw*

* sofern eine sinnvolle ÖV-Alternative vorhanden ist

Beim Kauf eines Privat-Pkw wird meist ein Pkw-Typ gewählt, mit dem möglichst alle Mobilitätsbedürfnisse des Haushalts befriedigt werden können. Der eigene Pkw wird dann so ausgewählt, dass man mit diesem sowohl zur Arbeit pendeln kann, zum Sport fahren kann und er soll auch über so viel Stauraum verfügen, dass man mit ihm in den Sommerurlaub nach Spanien oder zum Skifahren in die Berge fahren kann – er ist ein Allzweck-Verkehrsmittel. CS-Mitglieder können dagegen jeweils die Fahrzeug-Klasse wählen, die zu ihren Mobilitätsbedürfnissen für den jeweiligen Ausgang passt und die Kostenunterschiede der verschiedenen Pkw-Klassen sind unmittelbar sichtbar. Somit kann davon ausgegangen werden, dass CS-Mitglieder im Vergleich zu ihren Privat-Pkw oftmals kleinere Fahrzeugklassen buchen. Ein Vergleich der CS-Flotten mit dem in Deutschland zugelassenen Pkw-Bestand (Kraftfahrt-Bundesamt 2017a) hinsichtlich Pkw-Segment bestätigt diese Vermutung: die Pkw in Flotten von CS-Anbietern, wie die von Stadtmobil Stuttgart sind oftmals kleiner als im Gesamtbestand. Um diesen Umstand Rechnung zu tragen, wird in den Szenarien 3, 4 und 5 angenommen, dass die CS-Mitglieder im Vergleich zu ihrem Privat-Pkw die nächstkleinere Fahrzeugklasse wählen.

Auf Pendelwegen ist CS oftmals nicht geeignet, da die Fahrzeuge bei stationsgebundenen CS-Anbietern über den ganzen Arbeitstag ausgeliehen werden müssten und damit die Zeitkosten der Buchung sehr hoch wären. Oftmals ist gerade der öffentliche Verkehr auf Pendelwegen eine sehr gute Alternative, insbesondere, wenn sowohl die Wohnung als auch die Arbeitsstelle über eine Haltestelle des öffentlichen Verkehrs (ÖV) verfügen und eine geeignete schnelle ÖV-Verbindung besteht. Um die Vernetzung des ÖV mit CS zu intensivieren, befinden sich CS-Stationen auch oftmals an Haltestellen des schienengebundenen ÖV. Dieser Umstand wird in

Szenario 5 berücksichtigt: in diesem Szenario wird angenommen, dass Ausgänge mit dem Hauptzweck Pendeln nicht mehr mit dem Pkw zurückgelegt werden, sofern eine sinnvolle ÖV-Alternative vorhanden ist.

5.1.2 Ermittlung der Carsharing-Kosten

Die CS-Kosten wurden auf Grundlage des Tarifsystems von Stadtmobil Stuttgart berechnet (Stadtmobil Stuttgart 2017). Die Spezifika der in der Modellierung hinterlegten CS-Tarifs sind dem Handbuch von Stadtmobil Stuttgart entnommen, siehe Abbildung 5-2. Die Methodik für die Zuordnung der CS-Kosten umfasst fünf Schritte:

1) Wahl eines Tarifs
2) Bestimmung der jährlichen Fixkosten des Haushalts
3) Ermittlung von CS-Fahrzeugtarifklasse für CUMILE-Fahrzeuge
4) Ableitung von CS-Nutzungskosten für jeden Ausgang
5) Summierung der Fixkosten und Nutzungskosten, um die CS-Kosten pro Jahr und Pkw zu bestimmen

Als CS Tarif wurde der Tarif „Classic“ ohne Kaution gewählt (Schritt 1). Bei der Bestimmung der jährlichen Fixkosten wurde die Monatsgebühr eines Haushalts (15,00 €) auf ein Jahr hochgerechnet (Schritt 2).

1. Tarif Classic

	mit Kaution	*ohne Kaution*
Kaution	**550,00 €**	**0,00 €**
Aufnahmegebühr einmalig	50,00 €	50,00 €
Monatsgebühr Einzelpersonen	7,50 €	9,50 €
Monatsgebühr Haushalte[1)2)]	11,00 €	15,00 €
Monatsgebühr Juristische Personen[2)]	14,00 €	nicht möglich

Nutzungs-kosten €	Zeit				Kilometer		
Fahrzeugklasse	pro Std. 0-7 Uhr	pro Std. 7-24 Uhr	24 Std. Beginn beliebig	Woche Beginn beliebig	pro km bis 100 km	pro km ab 101. km	pro km ab 701. km[3)]
A	0,00	1,40	21,00	125,00	0,20	0,18	0,18
B	0,00	2,20	25,00	140,00	0,22	0,19	0,16
C	0,00	2,80	32,00	160,00	0,26	0,21	0,17
D	1,00	3,20	35,00	190,00	0,29	0,25	0,25
F	2,00	4,20	44,00	245,00	0,33	0,27	0,27

Alle Preise inklusive Kraftstoff und 19% Mehrwertsteuer.

Fahrzeug-tarifklasse	A	B	C	D	F
Fahrzeug-typ	Toyota Aygo	Opel Corsa Opel Agila Opel Adam Opel Combo Kastenw. Renault Kangoo Kastenw. Renault Wind Cabrio Renault ZOE Toyota Yaris Fiat 500 C	Opel Astra Ford Tourneo MINI ONE	Opel Vivaro Kleinbus Ford Custom Kleinbus Mazda MX5 Cabrio Audi A3 BMW 116	Ford Transit Transporter

Zuordnung der Fahrzeugtypen zu Tarifklassen bei Fahrzeugen des Stadtmobil-Quernutzungspools siehe Seite G-6.3

[1)] Ein Haushalt kann aus bis zu drei Personen bestehen.
[2)] Inklusive zwei Zugangskarten. Weitere Zugangskarten je 10,00 €.
[3)] Der Langstrecken-Tarif gilt nur für Fahrzeuge von stadtmobil carsharing AG, Stuttgart.

Tarifstand 1. Januar 2016

Abbildung 5-2: Spezifika des in der Modellierung hinterlegten CS-Tarifs (Stadtmobil Stuttgart 2017)

In Schritt 3 werden den Pkw der CUMILE-Flotte Fahrzeugtarifklassen zugeordnet. Diese Zuordnung gestaltete sich schwierig, da Stadtmobil nur eine begrenzte Anzahl an Pkw-Marken und Fahrzeugtypen besitzt. In der CUMILE-Flotte ist hingegen die Bandbreite der deutschen Pkw-Flotte enthalten. Diese Zuordnung wurde daher über das KBA-Segment abschätzig vorgenommen. Die im Modell hinterlegte Zuordnung der KBA-Segmente an die Fahrzeugtarifklassen ist in Tabelle 5-2 dargestellt.

Tabelle 5-2: Zuordnung der KBA-Segmente an die CS-Fahrzeugtarifklassen

Fahrzeug-tarifklasse	A	B	C	D	F
Pkw-Segment gemäß KBA-Klassifikation	Mini	Kleinwagen	Kompaktklasse	(Obere) Mittel-klasse, Ober-klasse, Gelän-dewagen, Sportwagen, Mini-Van, Großraum-Van, SUV	Utility

Die Zuordnung der CS-Fahrzeugtarifklasse an die CUMILE Fahrzeugflotte wird für die Ableitung der CS-Nutzungskosten je Ausgang (Schritt 4) benötigt. Da Stadtmobil ein stationsbasiertes System ist, ist es nicht sinnhaft, die einzelne Fahrt als Ausgangslage für die Berechnung der CS-Nutzungskosten heranzuziehen, sondern den gesamten Ausgang, z. B. die Fahrt zum Supermarkt sowie die Rückfahrt inklusive der Aufenthaltszeit im Supermarkt. Für diese Ausgänge liegen Informationen zu Start- und Endzeit, zurückgelegter Distanz, sowie der hauptsächliche Zweck des Ausgangs (z. B. Arbeit, Einkaufen, Freizeit) vor. Ausgehend davon werden die Zeitkosten und die Kilometerkosten der Nutzung bestimmt. Unter Einbeziehung der unterschiedlichen Zeittarife vor und nach sieben Uhr morgens wird in Abhängigkeit von der Tageszeit des Ausgangs ein stundenfeiner Zeittarif bestimmt und dieser Tarif mit dem Tages- und Wochentarif verglichen und der günstigste Tarif gewählt. Die Tatsache, dass CS-Kunden den Pkw für ihren jeweiligen Ausgang nicht minutengenau buchen, sondern einen Zeitpuffer dazu buchen, wurde im Modell dadurch umgesetzt, dass der jeweilige Ausgang auf volle Stunden aufgerundet wurde. Beispielsweise wird für einen Ausgang von 4 Stunden, 20 Minuten Zeitkosten von 5 Stunden angenommen. Die Kilometerkosten wurden kilometergenau berechnet, wobei die unterschiedlichen Kostensätze ab dem 101. Und ab dem 701. Kilometer berücksichtigt wurden.

Im Schritt 5 wurden die CS-Kosten je Pkw und Jahr bestimmt. Hierfür wurden die in Schritt 4 ermittelten CS-Nutzungskosten je Ausgang über alle Ausgänge eines Pkw im Laufe eines Jahres aufaddiert. Zu diesen jährlichen Nutzungskosten wurden die in Schritt 2 ermittelten Fixkosten der CS-Mitgliedschaft aufaddiert.

Diese Berechnung wurde separat für die verschiedenen Szenarien vorgenommen und für die weitere Analyse wurden für jeden Pkw die CS-Kosten unter den verschiedenen Szenarien mit den entsprechenden Pkw-Kosten als Privatfahrzeug (siehe Abschnitt 2.5.3) verglichen.

5.1.3 Modellierung der Emissionen der CS-Nutzerprofile

Die Modellierung der Emissionen der CS-Szenarien baut auf der allgemeinen Modellierung von Energieverbrauch und Emissionen auf (siehe Kapitel 0). Abweichend zu dem für den Basisfall verwendeten Datensatz werden dabei folgende Änderungen berücksichtigt:

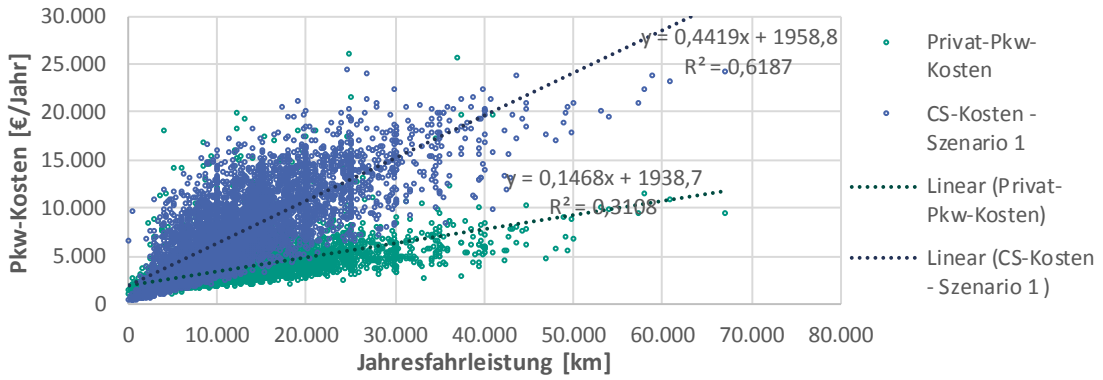
- Emissionsänderungen durch veränderte Verkehrsmittelwahl: Werden Fahrten nicht mehr mit dem Auto durchgeführt, entfallen die Pkw-Emissionen der jeweiligen Fahrten. Mit dem Wechsel können aber an anderer Stelle neue Emissionen entstehen. Dabei werden in dem gewählten Modellansatz nur die Emissionen des Betriebs betrachtet und es wird mit den durchschnittlichen Emissionen der Verkehrsträger, auf die verlagert wird, gerechnet. Konkret bedeutet dies, dass Verkehrsträger der aktiven Mobilität als emissionsfrei angenommen werden. In den Szenarien werden dabei alle vermiedenen Pkw-Wege mit der Bedingung kleiner gleich 5 km als auf aktive Verkehrsträger verlagert angenommen. Beim Szenario 5 wird zusätzlich angenommen, dass gut mit dem ÖV machbare Pendelwege auf eben diesen verlagert werden (siehe Kapitel 5.1.1). Bei den mit dem ÖV zurückgelegt Wegen wird mit den verkehrsmittelspezifischen durchschnittlichen Emissionen je Personenkilometer des Jahres 2016 gerechnet.
- Emissionsänderungen beim Pkw durch veränderte Standzeiten: Durch die in einigen Szenarien angenommene Verlagerung von Pkw-Fahrten kleiner gleich 5 km bzw. von Pendelwegen verlängern sich die Standzeiten der Pkw. Dies macht eine Neuberechnung der Kaltstartemissionen der Pkw-Fahrten nach den substituierten Wegen notwendig. Die angewandte Methodik entspricht dabei der in Kapitel 3.3 beschriebenen Methodik.
- Emissionsänderung durch veränderte Pkw-Wahl: Emissionseinsparungen ergeben sich auch durch die Wahl kleinerer Fahrzeuge. Dabei wird den Fahrzeugen in den entsprechenden Szenarien jeweils eine TREMOD-Größenklasse (siehe Bergk et al. 2016b) kleiner zugeordnet und die Warm- und Kaltstartemissionen mit den veränderten Größenklassen neu berechnet . Ferner wird im Falle des Wechsels zu Car-Sharing-Fahrzeugen das Fahrzeugalter vermindert, d.h. bei ursprünglich älteren Fahrzeugen der Nutzer wird die Abgasnormklasse auf mindestens EURO-5 oder EURO-6 angehoben.

5.2 Ergebnisse

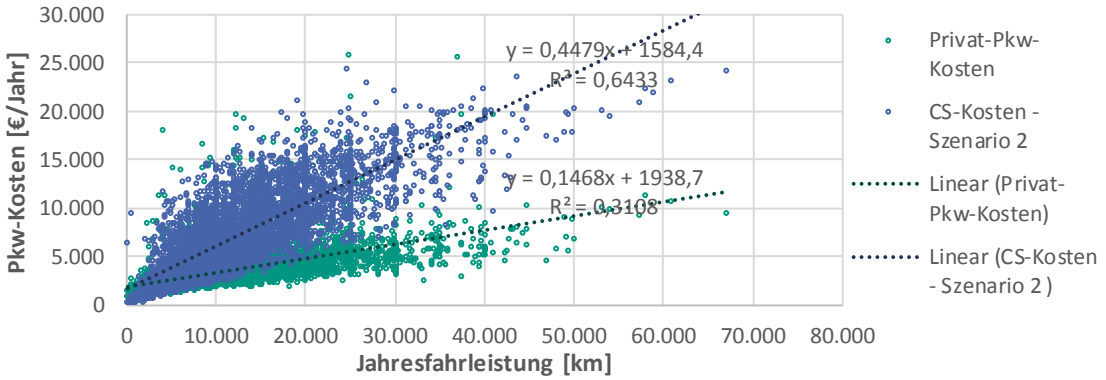
In den nachfolgenden Abschnitten sind Analysen zur Substituierbarkeit von Privat-Pkw durch CS und zu den resultierenden Emissionsminderungspotenzialen aufgeführt.

5.2.1 Ökonomische Substitutionspotenziale durch Carsharing

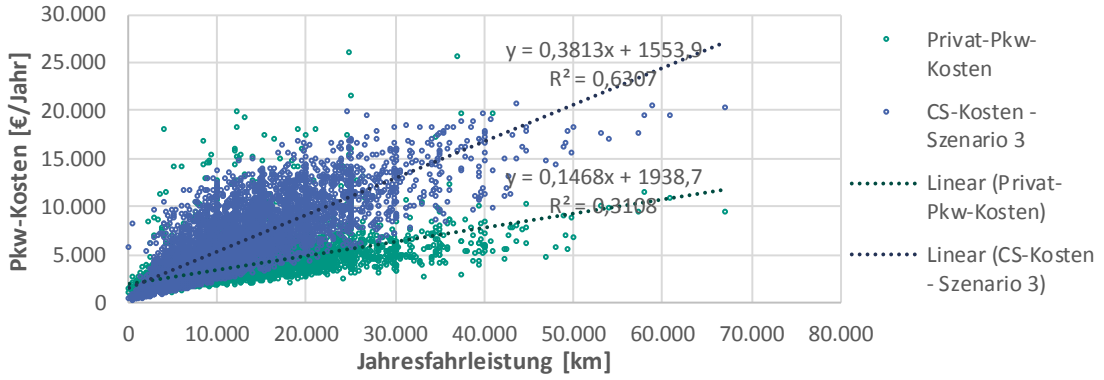
Im ersten Schritt wird untersucht, ob, wenn man detaillierte Pkw-Nutzungsprofile über ein ganzes Jahr vorliegen hat, die in Abbildung 5-1 suggerierten Zusammenhang zwischen Pkw-Jahresfahrleistung und Pkw-Kosten, bestätigt werden kann. Ein solcher Vergleich wurde für die verschiedenen CS-Szenarien durchgeführt, siehe Abbildung 5-3. Aus diesen Analysen geht hervor, dass der suggerierte Zusammenhang so nicht besteht. Dies liegt zum einen daran, dass die Pkw-Kosten als Privatfahrzeug nur teilweise von der Jahresfahrleistung determiniert werden. Pkw-Alter, Motorleistung, Hubraum, Antrieb, Marke, Kraftstoffverbrauch spielen ebenfalls eine wichtige Rolle (Kuhnimhof und Eisenmann 2017). Das Bestimmtheitsmaß von 0,3108 bestätigt, dass nur ein geringer linearerer Zusammenhang zwischen Jahresfahrleistung und Pkw-Kosten vorliegt.



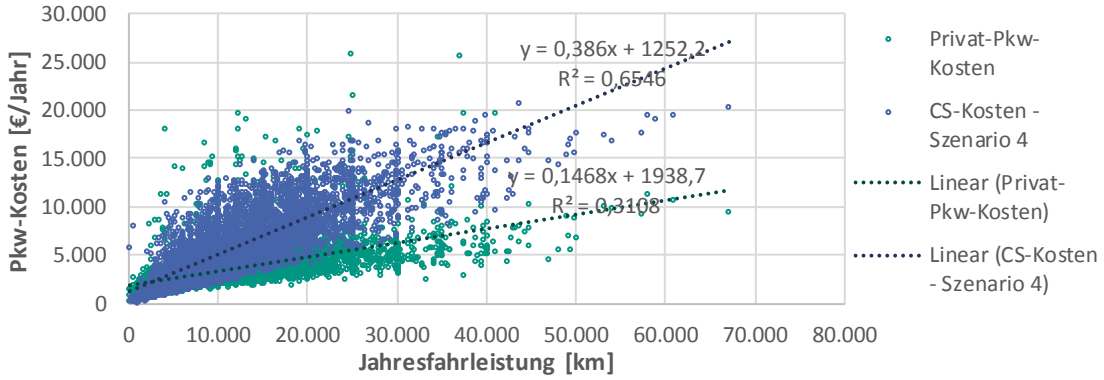
a) Szenario 1



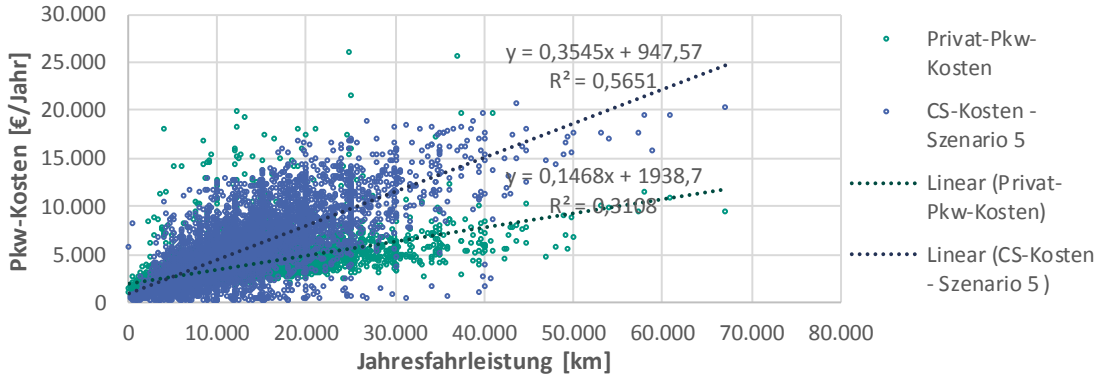
b) Szenario 2



c) Szenario 3



d) Szenario 4



e) Szenario 5

Abbildung 5-3: Zusammenhang zwischen Jahresfahrleistung und Pkw-Kosten als Privat-Pkw und als CS-Pkw unter verschiedenen Szenarien

Bei den jährlichen CS-Kosten ist das Bestimmheitsmaß deutlich besser (0,5651 – 0,6546). Aber auch hier sind für die Realisierung der gleichen Pkw-Jahresfahrleistung deutlich unterschiedliche CS-Kosten denkbar. Beispielsweise können die jährlichen CS-Kosten bei einer Jahresfahrleistung von 10.000 km zwischen 3.000 € und 16.000 € liegen. Diese Diskrepanzen sind verschiedene Pkw-Nutzungscharakteristika, die in sehr unterschiedliche variable Kostensätze führen, die

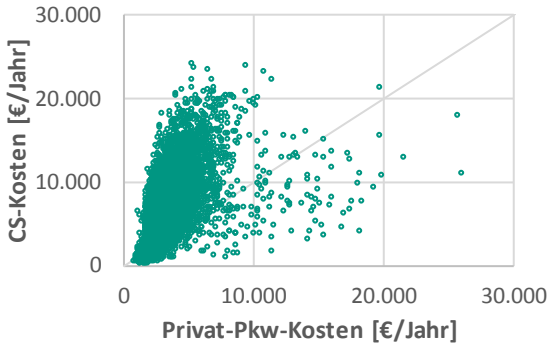
insbesondere durch verschiedene Buchungsdauern der Ausgänge zurückzuführen sind. Aber auch die Fahrzeugklasse spielt hier eine Rolle.

Die in Abbildung 5-3 dargestellten Analysen zeigen zusammenfassend, dass keine eindeutige Break-Even-Fahrleistung bestimmt werden kann, bei der die CS-Mitgliedschaft immer kostengünstiger als das eigene Fahrzeug ist. Dies wird im Folgenden weiter untersucht.

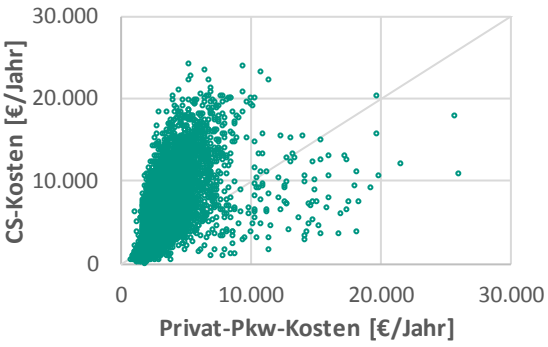
In Abbildung 5-4 werden die Pkw-Kosten bei Privatnutzung und als CS-Fahrzeug unter verschiedenen Szenarien gegenübergestellt. Ein Punkt in der Grafik stellt jeweils ein Fahrzeug dar. Liegen die Punkte unterhalb der Winkelhalbierenden, dann ist eine CS-Mitgliedschaft ökonomisch vorteilhafter; liegen sie oberhalb der Winkelhalbierenden, dann ist es für die Pkw-Halter dieser Fahrzeuge ökonomisch vorteilhafter, ihren Privat-Pkw zu behalten.

Der Anteil der Pkw-Flotte welche aus ökonomischer Sicht durch CS ersetzt werden könnte, liegt je nach Szenario zwischen 11,7% (Szenario 1) und 30,5% (Szenario 5). Eine Zusammenstellung der Ergebnisse für jedes Szenario findet sich in Tabelle 5-3.

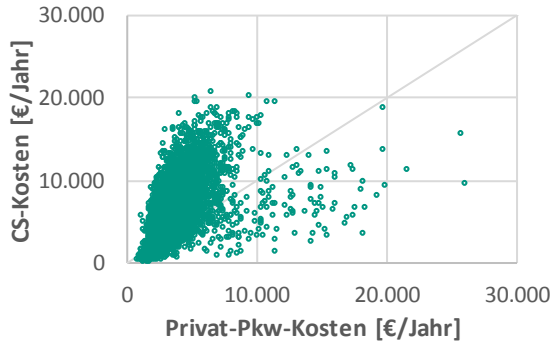
Diese Analyse zeigt, dass die meisten Fahrzeuge, die unterhalb der Winkelhalbierenden liegen, jährliche Kosten von unter 10.000 € aufweisen. Aber in allen Szenarien gibt es durchaus auch Pkw mit deutlichen höheren jährlichen Kosten, bei denen CS ökonomisch vorteilhaft ist. Dies könnte auch durch die verschiedenen Nutzungscharakteristika der Pkw determiniert werden.



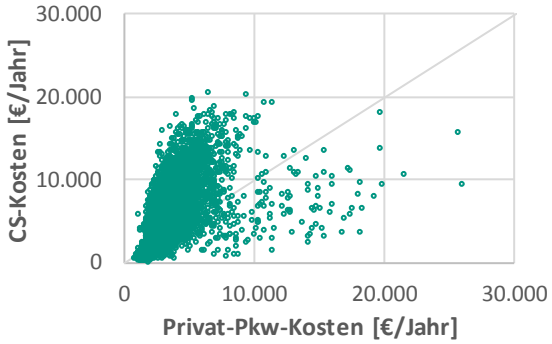
a) Szenario 1



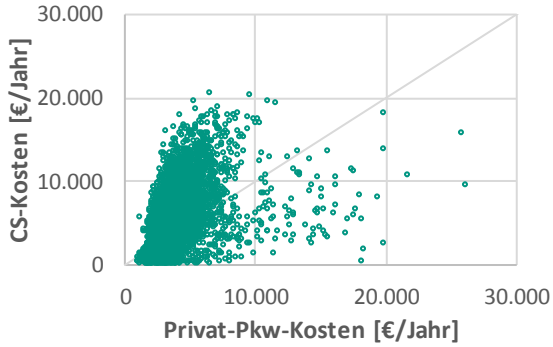
b) Szenario 2



c) Szenario 3



d) Szenario 4

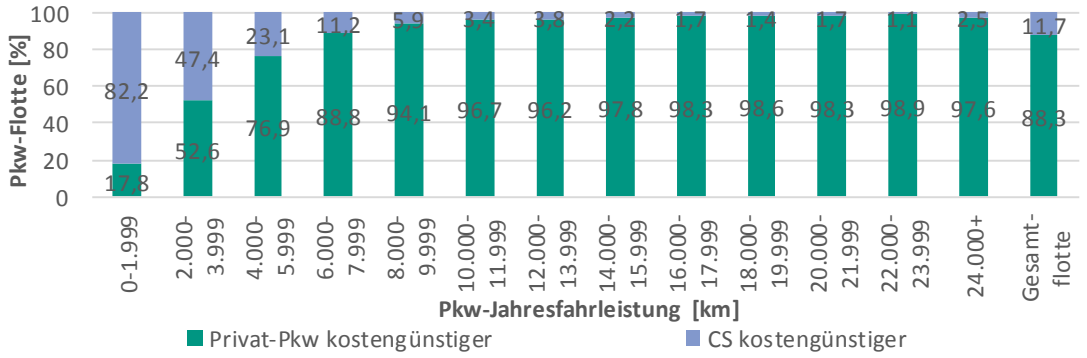


e) Szenario 5

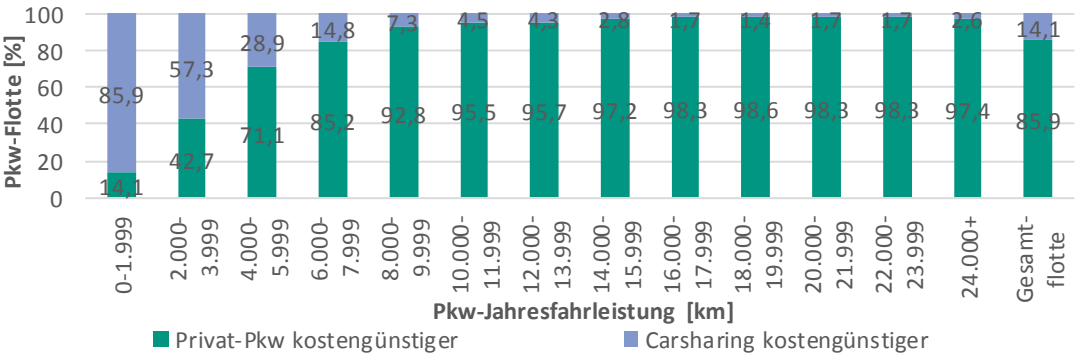
Abbildung 5-4: Gegenüberstellung von Pkw-Kosten bei Privatnutzung und als CS-Fahrzeug unter verschiedenen Szenarien

Bezogen auf die Jahresfahrleistung zeigt sich, dass eine CS-Mitgliedschaft gerade dann sinnvoll ist, wenn die Jahresfahrleistung niedrig ist (Abbildung 5-5). So ist es bei 82,2% (Szenario 1) bis 93,2% (Szenario 5) der Pkw mit einer Jahresfahrleistung von weniger als 2.000 km sinnvoll. Aber in dieser Gruppe gibt es Pkw, bei denen aus ökonomischen Gründen eine Abschaffung nicht sinnvoll ist, entweder, weil diese Fahrzeuge aufgrund ihres Pkw-Typs sehr günstig sind oder aufgrund ihrer Pkw-Nutzungscharakteristika. Der Anteil der Pkw, bei denen CS ökonomisch sinnvoll ist, sinkt mit steigenden Jahresfahrleistung. Dennoch finden sich in allen Jahresfahrleistungskategorein Fahrzeuge, für diese eine Substitution ökonomisch sinnvoll erscheint.

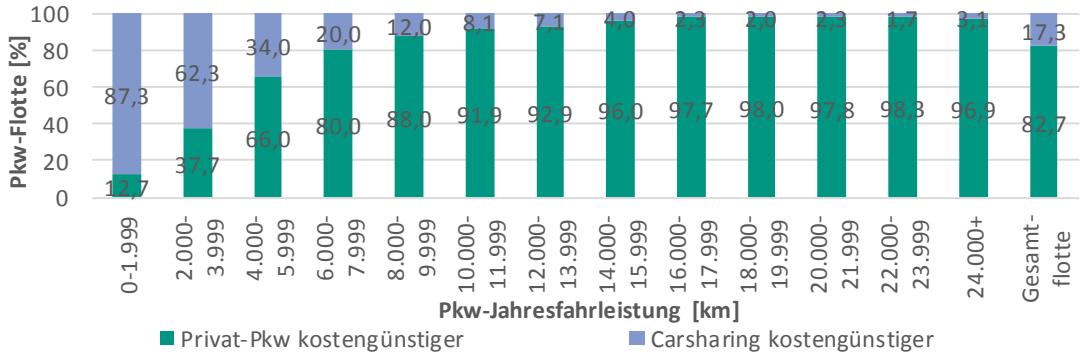
Als Kennwert wurde die Jahresfahrleistung ermittelt, bei welcher CS für 70% der Pkw die kostengünstigere Alternative ist. Diese Jahresfahrleistung liegt je nach Szenario zwischen 3.000 km (Szenario 1) und 5.400 km (Szenario 5).



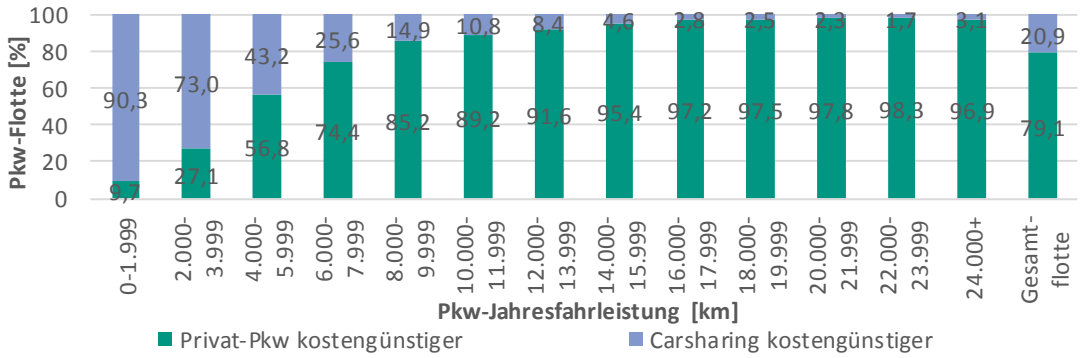
a) Szenario 1



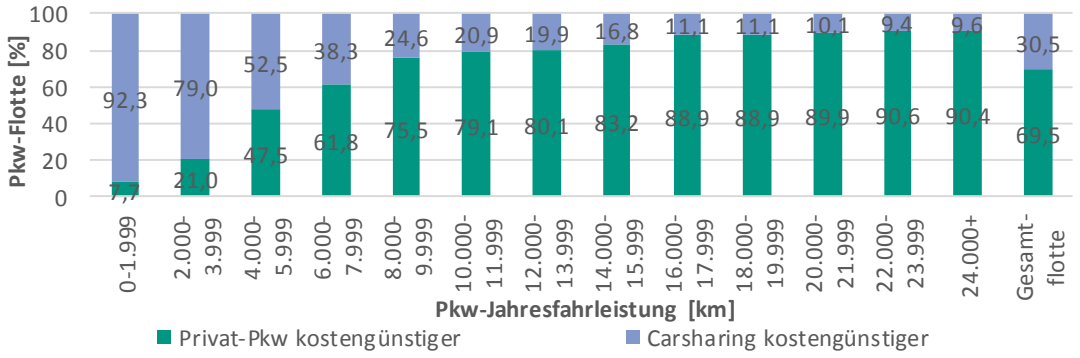
b) Szenario 2



c) Szenario 3



d) Szenario 4



e) Szenario 5

Abbildung 5-5: Ökonomische Vorteilhaftigkeit von CS für verschiedene Jahresfahrleistungen, differenziert nach verschiedenen Szenarien

5.2.2 Emissionsminderungspotenziale durch Carsharing

Neben der ökonomischen Bewertung des stationsgebundenen CS wurden im Rahmen dieses Projektes auch die Emissionsminderungspotenziale unter verschiedenen CS-Szenarien bestimmt. Diese Emissionsminderungspotenziale – je ersetzter Pkw und bezogen auf die Auswirkungen auf die Gesamtflotte – sind in Tabelle 5-3 dargestellt.

Die CO_2-Emissionsminderungspotenziale steigen von Szenario zu Szenario an und betragen zwischen 0,1% und 7% bezogen auf die Gesamtflotte. Pro substituiertem Pkw liegen diese zwischen 2,4% bis 34,3%.

Die Emissionsminderungspotenziale von CO und HC sind in den Szenarien ohne kurze Ausgänge (< 5 km) besonders prägnant, denn diese beiden Emissionskomponenten sind gerade in den ersten Kilometern bei Kaltstart relativ hoch..

Aufgrund der relativ neuen Fahrzeugflotte im Carsharing verringern sich die Feinstaubemissionen im Schnitt pro substituiertem Pkw zwischen rund 43% und knapp 53% vor allem durch den Ersatz der Diesel-Pkw mit Emissionsminderungskonzepten vor EURO-5 und in geringerem Ausmaß der Benzin-Pkw vor EURO-4.

Die Betrachtung der Umweltauswirkungen zeigt auch, dass aus emissionsgesichtspunkten eine Abgabe des eigenen Pkw und eine zusätzliche Verlagerung des Pendelweges auf den öffentlichen Verkehr (Szenario 5) besonders vorteilhaft ist. Unter diesem Szenario entstehen beispielsweise Emissionsminderungspotenziale je ersetztem Pkw von 34% CO_2 und 39% NO_X.

Tabelle 5-3: Zusammenstellung der CS-Ergebnisse (ökonomische und ökologische Analyse) unter verschiedenen Szenarien

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5
Szenarienbeschreibung					
Pkw-Klasse	Gleich wie Privat-Pkw	Gleich wie Privat-Pkw	Nächstkleinere Fzg.-Klasse	Nächstkleinere Fzg.-Klasse	Nächstkleinere Fzg.-Klasse
Pkw-Nutzung	Gleich wie Privat-Pkw	Ausgänge ≤ 5 km nicht mehr mit dem Pkw	Gleich wie Privat-Pkw	Ausgänge ≤ 5 km nicht mehr mit dem Pkw	Ausgänge ≤ 5 km & Pendeltouren nicht mehr mit dem Pkw
Ökonomische Betrachtung					
Anteil Pkw-Flotte, für die CS ökonomisch sinnvoll ist	11,7%	14,1%	17,3%	20,9%	30,5%
Jahresfahrleistung, bis zu der CS für 70% der Pkw die kostengünstiger ist	3.000	3.400	3.500	4.900	5.400
Emissionsminderungspotenziale je ersetzter Pkw, relativ**					
Kohlendioxid CO_2	2,4%	5,5%	20,3%	23,4%	34,3%
Kohlenmonoxid CO	17,2%	25,0%	17,6%	26,0%	48,7%
Kohlenwasserstoffe HC	19,8%	37,4%	19,7%	37,7%	62,4%
Stickoxide NOx	14,1%	18,5%	15,6%	18,2%	39,4%
Feinstaub PM	44,7%	42,9%	45,8%	53,0%	51,0%
Emissionsminderungspotenziale Gesamtflotte, relativ**					
Kohlendioxid CO_2	0,1%	0,4%	1,8%	2,6%	7,0%
Kohlenmonoxid CO	1,0%	1,8%	1,7%	3,1%	11,2%
Kohlenwasserstoffe HC	0,9%	2,4%	1,5%	4,1%	14,4%
Stickoxide NOx	0,5%	0,9%	1,0%	1,4%	6,4%
Feinstaub PM	1,7%	1,8%	2,8%	4,5%	8,5%

* sofern eine sinnvolle ÖV-Alternative vorhanden ist

** wenn die Halter aller Privat-Pkw, bei denen CS ökonomisch sinnvoll wäre, ihren Privat-Pkw abgeben und CS-Mitglied werden würden.

5.2.3 Soziodemografische Eigenschaften potenzieller Carsharing-Nutzer

In den vorherigen Kapiteln wurde untersucht, wie viele Pkw man aus ökonomischen Gesichtspunkten durch CS ersetzen könnte und welche Emissionsminderungspotenziale sich hieraus ergeben. Ein weiterer wichtiger Baustein ist, wer die Pkw-Halter sind, bei denen CS ökonomisch vorteilhafter ist als der eigene Pkw. Ergebnisse dieser Analyse sind insbesondere für CS-Anbieter von Bedeutung, da diese mit derartigen Erkenntnissen, potenzielle Kunden zielgerichteter ansprechen können und eventuelle spezielle Angebote auf diese Kunden zuschneiden können.

Um diese Fragestellung zu untersuchen, wurde für jedes Szenario eine binäre logistische Regression durchgeführt, siehe Tabelle 5-4. Die Regressionsergebnisse zeigen, ob ein Zusammenhang zwischen der Wahrscheinlichkeit, dass die Substitution des Privat-Pkw durch eine CS-Mitgliedschaft ökonomisch sinnvoll ist und der Soziodemografie der Pkw-Halter besteht. Außerdem geben die Ergebnisse darüber Aufschluss welche Eigenschaften der Halter einen besonders starken Einfluss haben. Das Modell wurde für Szenario 1 optimiert und auf die anderen Szenarien angewandt.

Die Regressionsergebnisse zeigen, dass die Substitution des Privat-Pkw durch eine CS-Mitgliedschaft insbesondere für Pkw-Halter aus Ein-Personen-Haushalten und anderen Kleinhaushalten ohne Kinder mit Wohnung im Stadtbereich tendenziell ökonomisch vorteilhaft ist. Pkw, die nie zum Pendeln eigesetzt werden, und die als Zweit- oder Drittwagen in einem Mehr-Pkw-Haushalt zu finden sich, eigenen sich besonders gut für eine Abschaffung. Der Erstwagen in einem Mehr-Pkw-Haushalt ist gegenüber dem Erstwagen in einem Ein-Pkw-Haushalt in den Szenarien 1 bis 3 leicht vorteilhaft und in den Szenarien 4 und 5 leicht nachteilig, wobei diese Ergebnisse nicht signifikant sind. Wenn Pkw hauptsächlich von Personen genutzt werden, die außerdem eine Zeitkarte des Öffentlichen Verkehrs besitzen oder die älter als 65 Jahre sind, dann steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Substitution des Privat-Pkw durch CS ökonomisch vorteilhafter ist.

In Tabelle 5-4 ist zudem das Pseudo-R^2 nach McFadden als Maß für die Modellgüte angegeben. Das Pseudo-R^2 nach McFadden gibt an, wie sich die Erklärungskraft des Modells unter Einbeziehung der abhängigen Variablen gegenüber dem Nullmodell erhöht, wobei Ergebnisse ab 0,2 bereits für eine exzellente Modellgüte stehen (Lois 2015). Die Regressionsmodelle der Szenarien 1 bis 4 weisen eine hohe Modellgüte auf (Pseudo-R^2 zwischen 0,162 und 0,183); dagegen gibt der Pseudo-R^2 nach McFadden für Szenario 5 eine deutlich geringere Erklärungskraft an.

Tabelle 5-4: Schätzergebnisse (und zugehörige Signifikanzniveaus) von fünf binären logistischen Regressionen. Wahrscheinlichkeit, dass es ökonomisch sinnvoll ist, einen Pkw durch CS zu ersetzen.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5
Achsenabschnitt	-4,547***	-4,147***	-3,982***	-3,328***	-1,650***
Haushaltsgröße: Einpersonenhaushalt	0,519***	0,441***	0,431***	0,337***	0,478***
Kinder im Haushalt: nein	0,321*	0,367**	0,422***	0,328*	0,355***
Wohnlage: Innenstadtbereich einer Stadt	0,200	0,050	0,189*	0,086	0,084
Wohnlage: Auf dem Land	-0,265**	-0,335***	-0,408***	-0,421***	-0,379***
Pkw-Nutzung: keine Pendel-Fahrten	2,126***	1,987***	2,189***	2,010***	0,439
Erstwagen im Mehr-Pkw-Haushalt	0,114	0,039	0,028	-0,160	-0,051
Zweitwagen in Mehr-Pkw-Haushalt	1,244***	1,216***	1,081***	0,974***	0,765***
Drittwagen und weitere in Mehr-Pkw-Haushalt	1,891***	1,756***	1,681***	1,363***	1,011***
ÖV-Zeitkartenbesitz: Ja	0,512***	0,483***	0,515***	0,376**	0,241**
Alter des Pkw-Hauptnutzers: 50-64 Jahre	0,223*	0,169	0,169	0,123	0,089
Alter des Pkw-Hauptnutzers: 65+ Jahre	0,495***	0,521***	0,420***	0,363***	0,125
McFadden R^2 (nur Konstanten)	*0,164*	*0,162*	*0,183*	*0,170*	*0,039*

*Stichprobengröße: 5.932 Pkw; Signifikanzniveaus: *** 1%, **5%, *10%*

Weitere sozio-demografische Variablen, z. B. Geschlecht des Pkw-Hauptnutzers, Haushaltseinkommen, wurden bei der Optimierung des Regressionsmodells berücksichtigt, erwiesen sich aber als nicht signifikant.

Unter Einbeziehung des in Kapitel 4 erarbeiteten Pkw-Notwendigkeitsindikators wird zudem untersucht, wie notwendig die Pkw, die sich aus ökonomischer Sicht für eine Substitution durch eine CS-Mitgliedschaft eignen für die Befriedigung der Mobilitätsbedürfnisse des Haushalts sind. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5-6 dargestellt. Diese Analyse zeigt, dass je nach Szenario 43,1% bis 65,2% der Pkw, die sich für eine Substitution durch CS eigenen, die Notwendigkeit dieser Pkw im Haushalt als sehr gering eingestuft werden kann. Weitere 19,6% bis 28,4% der

Pkw weisen eine geringe Pkw-Notwendigkeit auf. Geraden in diesen Hausalten wird der eigene Pkw aus objektiven Gründen nicht benötigt, sondern oftmals nur als Option vorgehalten. Ziel von CS-Anbietern sollte sein, gerade diese Haushalte für eine CS-Mitgliedschaft zu animieren, da gerade bei diesen Haushalten das CS-Angebot seine Rolle als integrierteer Baustein im Umweltverbund ausspielen kann. Diese Haushalte könnten durch eine CS-Mitgliedschaft zudem ihre verkehrsbezogenen Emissionen vermindern, ohne dass sie ihre Mobilitätsbedürfnisse einschränken müssten.

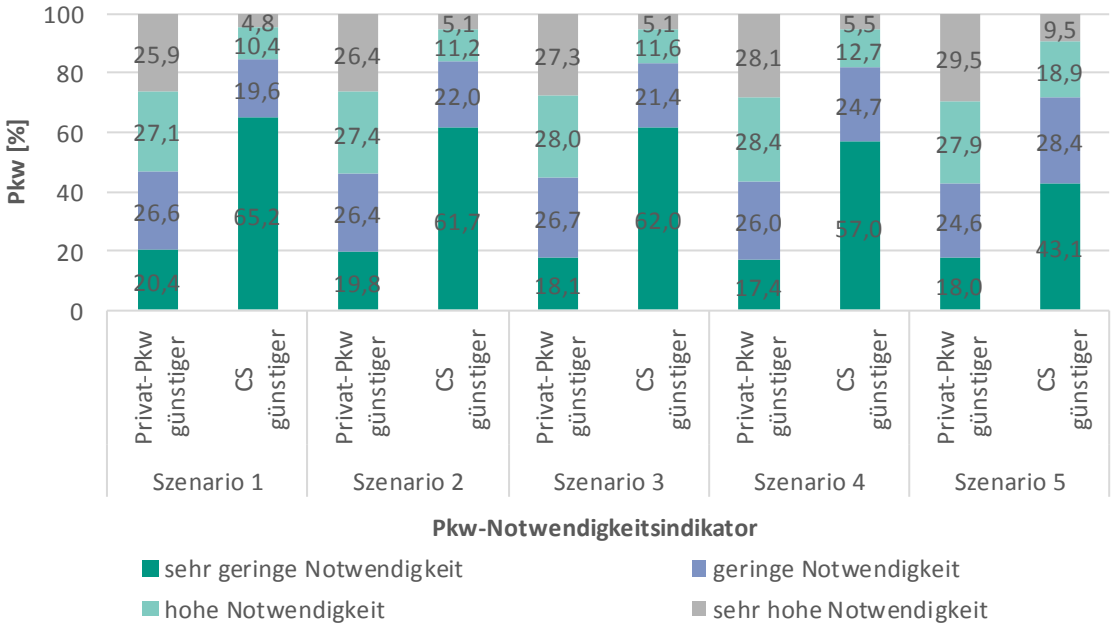


Abbildung 5-6: Zusammenhang zwischen dem ökonomischen Substitutionspotenzial von Privat-Pkw durch Carsharing und der Notwendigkeit dieser Pkw für deren Halter

6 Analyse realistischer Substitutionspotenziale von Pkw durch Pedelecs

E-Bikes haben in den letzten Jahren eine bedeutende Marktentwicklung erlebt. Die Verkaufszahlen sind im ersten Halbjahr 2017 auf rund 540.000 Räder angestiegen und erreichen damit einen Marktanteil von rund 20 % im Fahrradmarkt (ZIV 2017). Langfristig wird von Marktteilnehmern ein Anteil von 50 % als realistisch eingeschätzt (Bosch Ebike Systems 2017). Bezogen auf den heutigen Fahrrad-Gesamtbestand würde dies bei kompletter Flotten-durchdringung etwa 36 Millionen E-Bikes entsprechen und damit ein zentrales Verkehrsmittel im Individualverkehr darstellen.

Diese Studie fokussiert auf das Pedelec 25, da dieses zum einen den mit Abstand am häufigsten verkauften Typ E-Bike darstellt, zum anderen die weiteren E-Bike-Varianten (Elektrokrafträder und Pedelec 45) rechtlich wie Kleinkrafträder zu behandeln sind und damit einige Einschränkungen in der flexiblen Nutzung einhergehen (z. B. Verbot der Nutzung von ausschließlichen Fahrradwegen, Helmpflicht, etc.). Weitere Unterschiede der E-Bike-Typen sind in Abbildung 6-1 dargestellt.

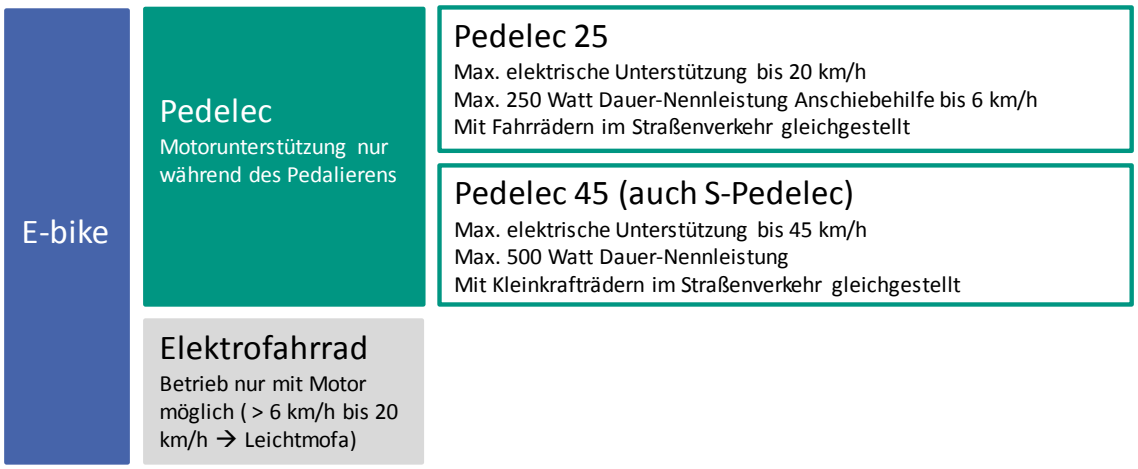


Abbildung 6-1: Abgrenzung des Pedelec-Konzeptes zu anderen E-Bikes (verändert nach Lienhop et al. 2015)

Pedelecs sind dabei aus Umweltsicht bereits vorteilhaft, wenn diese nur wenige Pkw-Fahrten im Mobilitätsprofil der Nutzer ersetzen. Um das Pkw-Substitutionspotential durch Pedelecs abzuschätzen, ist eine Kenntnis der Mobilitätsprofile der Personen, sowie von soziodemographischen und geographischen Rahmenbedingungen notwendig. CUMILE erlaubt es, die vorliegenden Erkenntnisse zur Pedelec-Nutzung auf eine repräsentative Stichprobe der deutschen Gesamtbevölkerung anzuwenden und so realistische Substitutionspotenziale für verschiedene Szenarien abzubilden.

Im Folgenden soll zunächst in Kapitel 6.1 erläutert werden, welche Erkenntnisse zu Nutzungsmustern in der Forschung vorliegen. In Kapitel 6.2 wird die ökologische Bewertung von Pedelecs in ihrer Nutzung gegenüber Pkw beschrieben. Kapitel 6.3 leitet die Annahmen der Szenarien zur Pkw-Substitution durch Pedelecs ab und Kapitel 6.4 stellt die Ergebnisse vor. Abschließend werden in Kapitel 6.5 anhand der Ergebnisse geeignete Maßnahmen und Handlungsempfehlungen diskutiert.

6.1 Nutzungsmuster von Pedelecs

Aufgrund der technischen Hybridposition des Pedelecs zwischen dem konventionellen Fahrrad und Kleinkraftrad ist das Nutzungsmuster nicht direkt mit dem von Fahrrädern bzw. Kleinkrafträdern gleichzusetzen. Zum einen ist das Zurücklegen von Distanzen mit weniger Krafteinsatz und einer unter Umständen höheren Durchschnittsgeschwindigkeit verbunden und zum anderen werden Höhenunterschiede leichter bewältigt. Dies hat zur Folge, dass die Bereitschaft, größere Distanzen oder Steigungen zurückzulegen, tendenziell ansteigt. Weiterhin kann das Pedelec immer auch als „normales“ Fahrrad genutzt werden, auch wenn der Akku leer ist, sodass Einschränkungen in der Reichweite eine untergeordnete Rolle spielen. Da aber die elektrische Unterstützung nur während des aktiven Pedalierens einsetzt, ist eine komplett bewegungspassive Nutzung wie bei typischen Kleinkrafträdern nicht möglich.

Bei der Betrachtung von Angaben zu privaten Pedelec-Nutzern bisheriger deutscher Studien (Verkehrsclub Deutschland e. V. 2013; Preißner et al. 2013; Schäfer und Schmidt 2011) lässt sich zusammenfassen, dass diese überwiegend männlich und durchschnittlich 55 bis 60 Jahre alt sind. Der Bildungsstand dieser Personengruppe ist überdurchschnittlich hoch. In den ausländischen Studien mit Privatnutzern (z. B. Strele 2010) fällt das Durchschnittsalter teilweise deutlich niedriger aus. Sowohl deutsche als auch ausländische Studien zeigen, dass sich durch das Pedelec die Reichweite im Vergleich zu einem konventionellen Rad erhöht. Die häufigste Streckenlänge ist im Schnitt bis zu 5 Kilometer, wobei Strecken bis oder über 10 Kilometer deutlich häufiger als mit dem herkömmlichen Fahrrad unternommen werden. Das Pedelec wird zudem regelmäßig genutzt. Dadurch werden Fahrten ersetzt, die vor dem Kauf noch mit anderen Verkehrsmitteln gemacht wurden. In erster Linie sind dies Fahrten mit dem herkömmlichen Fahrrad und mit dem Pkw.

In dem Forschungsprojekt „Pedelection“ wurde zum ersten Mal eine umfangreiche Analyse zum Mobilitätsverhalten von Pedelec-Neunutzern in verschiedenen Regionen in Deutschland erhoben (LIENHOP et al. 2015). Dabei konnten Ergebnisse aus bisherigen Studien belegt und z.T. tiefere Erkenntnis zum Nutzerverhalten und Motivationen ermittelt werden.

In „Pedelection“ wurden über Datenlogger und Wegeprotokolle die realisierte Pedelec-Nutzung nach der Anschaffung des Pedelecs bis höchstens ein Jahr aufgezeichnet und abgefragt, wie diese Wege vorher zurückgelegt wurden. Abbildung 6-2 zeigt die ursprünglich genutzten Verkehrsmittel für die im Feldtest gefahrenen Pedelec-Wege jeweils nach Anzahl der Wege (blauer Balken) und nach zurückgelegten Pedelec-Kilometern (grauer Balken). Demnach wurden 41 % der zurückgelegten Pedelec-Wege und 45 % der Pedelec-Kilometer vorher mit dem Auto zurückgelegt. An zweiter Stelle der ersetzten Fahrten kommt das Fahrrad, mit dem vor dem Pedelec-Besitz 38 % der Wege und 32 % der Kilometer zurückgelegt wurden. Mit weitem Abstand folgen andere Verkehrsmittel (nach Kilometer): mit 7 % der öffentliche Verkehr, mit 1 % der Fußverkehr und 10 % induzierter Verkehr (Balken „gar nicht“). Die prozentuale Abweichung zwischen den Balken „Anzahl“ und „Pedelec-Kilometer“ ist auf die Unterschiede der durchschnittlichen Wegelängen nach Verkehrsmittel zurückzuführen. So ist ein ersetzter Pkw-Weg tendenziell länger als ein ersetzter Fahrrad-Weg. Besonders eindrücklich wird dies an den Fußwegen deutlich, die zwar tendenziell pro Weg sehr kurz sind, dafür aber häufiger in ihrer Anzahl.

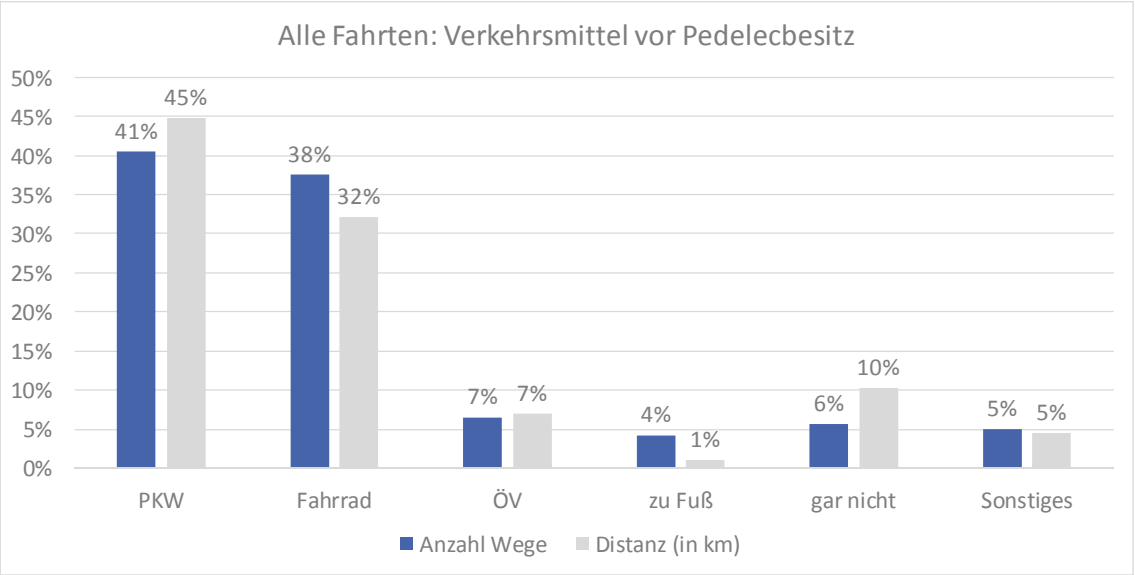


Abbildung 6-2: Verlagerungspotenzial von anderen Verkehrsmitteln zum Pedelec (Lienhop et al. 2015)

Aus der Abbildung wird deutlich, dass das größte Verlagerungspotenzial den motorisierten und nicht-motorisierten Individualverkehr betrifft. Die Verlagerung vom öffentlichen Verkehr spielt bei der Betrachtung aller Pedelec-km eine untergeordnete Rolle. Der neu induzierte Verkehr kann sowohl an dem „neuen“ Fahrspaß, als auch an einem verbesserten Zugang zur Mobilität liegen.

Aufgrund des großen Erkenntnisgewinns aus den Primärdaten von „Pedelection“ wurden einige Ergebnisse für die Ableitung der Szenarien in diesem Forschungsprojekt berücksichtigt. Tabelle 6-1 stellt einige wichtige statistische Kennzahlen aus dem Feldtest in Pedelection zusammen.

Tabelle 6-1: Zusammenfassung zentraler Wegedaten aus dem Feldtest in Pedelection

	Mittelwert	75 % Perzentil	Einheit
Tageskilometer	22,2	30,8	km
Alle Wege einer Einzelfahrt	10,7	15,0	km
Einkauf/Private Erledigung	6,9		km
Arbeitsplatz/ Ausbildungsplatz	10,6		km
Andere berufliche Fahrt	6,0		km
Freizeit/Urlaub	13,5		km
Sonstiges	10,3		km

6.2 Ökologische Bewertung von Pedelecs in der Verkehrsmittelnutzung

Mit einem durchschnittlichen Stromverbrauch von 0,71 kWh/100 km benötigen Pedelecs deutlich weniger Energie zur Fortbewegung als Pkws. Gegenüber dem Fahrrad ist jedoch ein höherer Energie- und Ressourceneinsatz für zusätzliche Komponenten erforderlich (LIENHOP et al. 2016). Außerdem fallen die Herstellungslasten des Pedelecs deutlicher ins Gewicht als der Energieverbrauch während des Betriebes. Abbildung 6-3 zeigt die Klimawirkung des Pedelecs in CO_2-Äquivalenten (CO2-eq.) im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln über den gesamten Lebenswege bezogen auf 100 Personenkilometer (pkm). Dabei wird mit einer durchschnittlichen Auslastung von Pkw (1,4 Personen/Pkw), Regionalzug (28 %), Straßen-/U-Bahn (18 %) und Bus (50 Personen/Bus) gerechnet. Die durchschnittlichen Auslastungsgrade sind über TREMOD 5.6 (ifeu 2016) abgeleitet. Im Vergleich wird der deutliche Vorteil des Pedelecs gegenüber dem Pkw ersichtlich. Außerdem ist zu erkennen, dass die Lasten aus der Herstellung, Wartung und Entsorgung den größten Anteil der Klimawirkung des Pedelecs über seinen Lebensweg ausmachen. In dem Vergleich ist ein Lithium-Ionen-Akku (mit 300 Wh) über den Lebensweg angenommen, was nach heutigem Stand der Technik eher einer kleinen Akkudimensionierung entspricht. Der Feldtest in Pedelection hat gezeigt, dass einige Nutzer dazu tendieren, sich direkt einen Ersatzakku anzuschaffen. Ein zusätzlicher Akku mit 300 Wh oder ein größerer Erstakku mit 600 Wh würde die Klimawirkung insgesamt um 10 % erhöhen (KÄMPER et al. 2016).

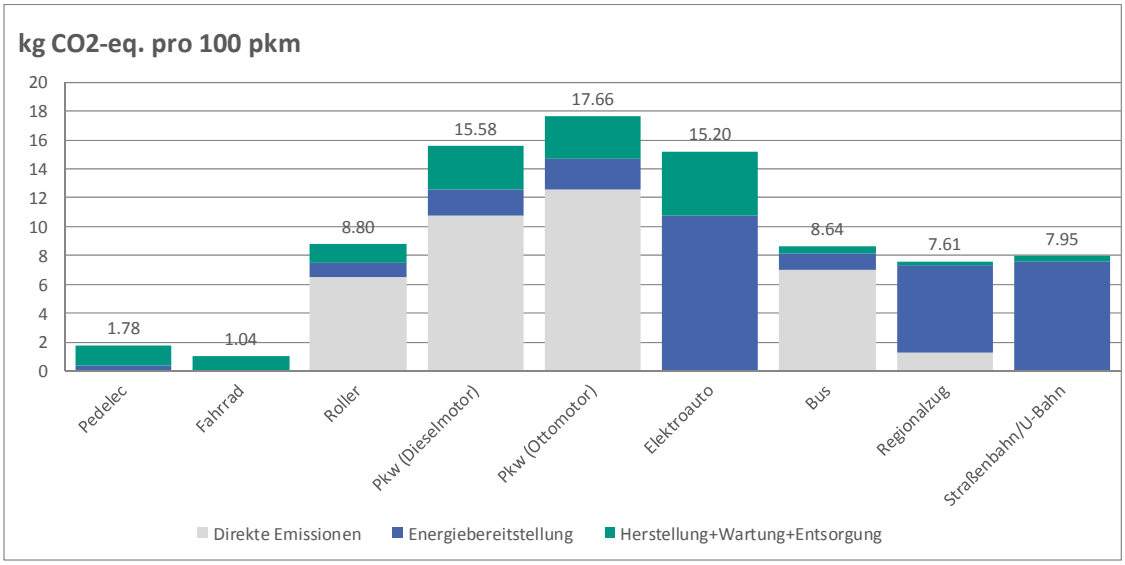


Abbildung 6-3: Klimawirkung verschiedener Verkehrsmittel über den Lebensweg mit deutschem Strommix (Lienhop et al. 2015)

Bei dieser Betrachtung zeigt sich, dass ein Pedelec auch bei zusätzlicher Anschaffung schon bei einer geringen substituierten Pkw-Fahrleistung von 1.600 km einen ökologischen Vorteil bezogen auf Treibhausgasemissionen erfährt. Ersetzt ein Pedelec unter ansonsten nicht veränderten Bedingungen ein Auto komplett, so werden die Klimawirkungen im Vergleich zum Pkw um bis zu 90 % reduziert. Die Mehremissionen gegenüber dem Fahrrad sind demgegenüber sehr gering. So zeigte sich auch im Feldtest von Pedelection, dass 80 % der Probanden bei der Nutzung von Pedelecs Emissionen einsparen konnten und nur 20 % der Probanden neue Emissionen generierten, bedingt durch die Ersetzung des Fahrrades oder durch zusätzliche Mobilität.

In Bezug auf Luftqualität in Städten sind insbesondere die direkten Schadstoffemissionen relevant wie NO_X, Feinstaub, CO, etc.. Hier hat das Pedelec gegenüber dem (konventionellen) Pkw einen absoluten Vorteil, da bedingt durch den elektrischen Antrieb keine direkten Emissionen bestehen. Auch wirkt sich die Nutzung des Pedelecs positiv auf Lärmemissionen und Flächeninanspruchnahme aus, die derzeit neben der NO_2-Belastung die größten Herausforderungen des städtischen Verkehrs darstellen.

6.3 Ableitung von Szenarien zur Pkw-Substitution durch Pedelecs

Zur Ableitung des Substitutionspotenzials von Pkw durch Pedelecs wurde anhand von gewonnen Erkenntnissen zum Mobilitätsverhalten von Pedelec-Nutzern vier verschiedene Szenarien und eine Sensitivität abgeleitet. Die beiden ersten Szenarien orientieren sich an einer maximalen

Nutzung und einer durchschnittlichen Nutzung. Zwei weitere Szenarien bilden zueinander abgrenzbare Nutzertypen ab („Reiner Pendler“ und „Alltagsnutzer“). Die Sensitivität „wettersensibel“ beschränkt zusätzlich die Pedelec-Nutzung bei widrigen Wetterbedingungen und kann jeweils auf die beiden Nutzertypen angewandt werden. Die Szenarien sollen helfen, eine realistische Einordnung der Größendimension der Pedelec-Mobilität zu geben. Tabelle 6-2 fasst die getroffenen Annahmen der Szenarien zusammen. Im Folgenden werden die einzelnen Szenarien näher beschrieben.

Tabelle 6-2: Annahmen der Szenarien zu Pkw-Substitutionspotenzialen durch Pedelecs

	Szenario „Maximal“	Szenario „Mittlere Distanz“	Szenario „Reiner Pendler“	Szenario „Alltagsnutzer“	Sensitivität „wettersensibel“
Alle Wege	≤ 15 km				
Arbeitswege		alle ≤ 11 km	alle ≤ 15 km		
Einkauf/Private Erledigung		alle ≤ 7 km	Nur Erledigung auf dem Heimweg von der Arbeit	alle ≤ 8 km	
Freizeit		alle ≤ 12,5 km		alle ≤ 8 km	
Niederschlag		Max. 10 % aller Fahrten → Regenfahrten			10% der Regentage entfallen
Temperatur					Keine Wege bei ≤ 10 C°
Jahreszeit		Jan., Feb. 50% der Fahrten Nov., Dez., Mrz. 75% der Fahrten			April - Oktober
Wegekette Bedingung	≤ 30 km	≤ 25 km	≤ 30 km	≤ 16 km	

6.3.1 Szenario „Maximal“

Das Maximalszenario setzt eine obere realistische Grenze der Pedelec-Nutzung. Zwei Annahmen setzen den Rahmen für das Szenario:

- Alle Einzelwege sind kleiner gleich 15 km
- Ein Ausgang ist insgesamt kleiner gleich 30 km

Bei der Betrachtung der Häufigkeitsverteilung von Pedelec-Fahrten ergibt sich nach der Erhebung von Pedelection (Lienhop et al. 2015), dass 75 % aller Wege kleiner gleich 15 km waren. Die oberen 25 % sind demnach nicht berücksichtigt. Hierunter fallen insbesondere auch Ausflugsfahrten, die bis zu 100 km betragen können. Die Tourenbedingung von kleiner gleich 30 km leitet sich aus dem Hin- und Rückweg einer Einzelfahrt von maximal 15 km ab und dem 75 %-Perzentil der Tageskilometer aus Pedelection (siehe Tabelle 6-1). Wetterbedingungen haben keinen Einfluss in diesem Szenario. Es wird von einem habitualisierten Verhalten ausgegangen, bei dem der Nutzer in der Lage ist, seine Ausrüstung an Witterungsbedingungen anzupassen.

6.3.2 Szenario „Mittlere Distanz“

Das Szenario „Mittlere Distanz“ soll im Unterschied zum Szenario „Maximal“ die Wegedistanzen nach dem durchschnittlichen Verhalten der Pedelec-Nutzer variieren und weiterhin insbesondere eine Jahreszeitenbedingung berücksichtigen. Damit schränkt sich das Substitutionspotenzial gegenüber dem Szenario „Maximal“ weiter ein. Das Szenario ist aber noch als ein ambitioniertes theoretisches Szenario zu verstehen, da es keine weiteren Einschränkungen, z. B. nach Alter, unternimmt. Weitere Aspekte der Eingrenzung der Pedelec-Nutzung werden mit sozioökonomischen Aspekten gekreuzt.

Das Szenario „Mittlere Distanz“ differenziert die Bedingung der Einzelwegdistanz weiter nach Wegezweck. Folgende Annahmen setzen den Rahmen für das Szenario:

- Bedingung der Distanz nach Wegezweck:
  - Alle Arbeitswege kleiner gleich 11 km
  - Alle privaten Erledigungen kleiner gleich 7 km
  - Alle Freizeitwege kleiner gleich 13,5 km
  - Alle Wege in der Wegekette müssen Bedingungen der Einzelwegzwecke erfüllen
  - Tour darf insgesamt nicht länger als 25 km sein
- Wetterbedingungen:
  - Insgesamt werden nicht mehr als 10 % aller Fahrten bei Regen unternommen
  - Im Januar und Februar entfallen 50 % der möglichen Fahrten; im November, Dezember und März entfallen 25 % der möglichen Fahrten

Die Annahmen zur durchschnittlichen Fahrtenlänge nach Wegezweck sind über die Ergebnisse des Feldtestes in „Pedelection“ abgeleitet (Lienhop et al. 2015). Für die Urlaubs- und Freizeitwege mussten die Daten angepasst werden, da viele Freizeitwege in dem „Pedelection“-Datensatz zu Radtouren zählen und entsprechend die Fahrtenlänge stark nach oben treiben. Die

Daten wurden so gefiltert, dass nur Freizeitwege berücksichtigt wurden, bei denen vorher der Pkw genutzt wurde. Die Anpassung macht auch vor dem Hintergrund Sinn, dass der Pkw sehr häufig für Freizeitfahrten verwendet wird (siehe Abbildung 6-4). Der Wegezweck „Holen und Bringen von Personen“ (Picking someone up / dropping someone off“) entfällt als möglicher Pedelec-Weg, da mit dem Pedelec maximal Kleinkinder transportiert werden können und davon auszugehen ist, dass sich die Mehrheit der Hol- und Bringfahrten auf ältere Kinder und Erwachsene bezieht.

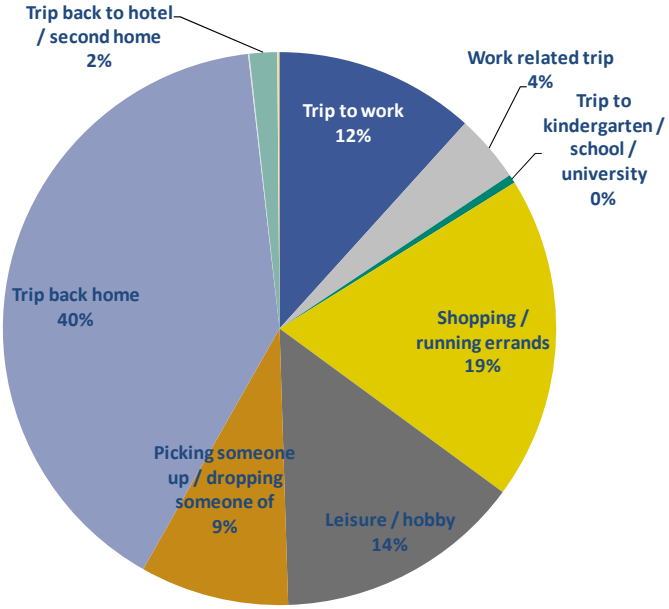


Abbildung 6-4: Anteile der Wegezwecke der Pkw-Fahrten in CUMILE

Der Einfluss des Wetters auf das Pedelec-Nutzerverhalten ist erheblich. Neben den gleichen Einschränkungen, die das Wetter auf das Fahrverhalten von Fahrradfahrern hat, kommt beim Pedelec noch die Sorge um die Beeinträchtigung der teuren Komponenten hinzu (Lienhop et al. 2015). Niederschlag hat einen großen Einfluss auf die Verkehrsmittelentscheidung, aber häufig ändern sich die Wetterbedingungen während der Fahrt oder für die Rückfahrt, sodass der Fahrer häufig gezwungen ist, die Fahrt trotzdem zu unternehmen/fortzusetzen. Außerdem überwiegen in Deutschland deutlich die niederschlagsfreien Stunden gegenüber den Stunden mit Niederschlag. Sowohl in den Datensätzen von „Pedelection“ als auch von CUMILE stellt sich eine statistische Verteilung von 10 % Regenfahrten ein. Deshalb wird für das Szenario „Mittlere Distanz“ auch keine weitere Einschränkung angenommen, außer dass 10 % der Pedelec-Fahrten Regenfahrten sein dürfen. Größere Auswirkung hat die Jahreszeitenbedingung, bei der sich die Nutzung in den „Schlechtwetter“-Monaten reduziert. Orientiert an dem Nutzerverhalten in Pedelection werden die möglichen Fahrten für Dezember und Januar halbiert und für die Monate November, Februar und März nur das Potenzial zu 75 % ausgeschöpft.

6.3.3 Szenario „Reiner Pendler“

Die Erkenntnisse aus „Pedelection“ haben ergeben, dass gerade Pendler ein großes Potenzial besitzen viele Pkw-Fahrten zu ersetzen, da es sich bei Pendel-Fahrten um regelmäßige Ereignisse mit relevanten Strecken handelt. Im dem Szenario „Reiner Pendler“ soll nur das Potenzial von Pendelfahrten betrachtet werden. Deshalb wird im Szenario das Pedelec als reines Pendelfahrzeug verstanden und nur für andere Zwecke eingesetzt, so lange sie sich auf dem direkten Heimweg befinden. Die maximale Pendelstrecke beträgt einfach kleiner gleich 15 km. Die Annahme leitet sich aus den „Pedelection“-Daten ab, in denen 75 % der Arbeitswege kleiner gleich 15 km sind. Die oberen 25 % sind damit nicht berücksichtigt. Die Gesamttour darf nicht größer als 30 km sein.

6.3.4 Szenario „Alltagsnutzer“

Ähnlich dem Szenario „Reiner Pendler“ soll in dem Szenario „Alltagsnutzer“ ein Nutzertyp mit einem ausschließlichen Verhalten abgebildet werden, um das Potenzial getrennt von anderen Einflüssen zu betrachten. Das Pedelec wird in diesem Szenario ausschließlich für Einkäufe, private Erledigungen und Freizeitfahrten verwendet. Arbeitswege werden mit einem anderen Verkehrsmittel unternommen. Die maximale Strecke für diese Erledigungen entspricht 8 km und leitet sich ebenfalls wie beim „Reinen Pendler“ aus dem 75 % Perzentil der Pedelection-Daten für private Erledigungen ab.

6.3.5 Sensitivität „wettersensibel“

Für die beiden Nutzertyp-Szenarien wurden zunächst keine Wetterbeschränkungen angenommen. Mit der Sensitivität „wettersensibel“ kann der Einfluss des Wetters zusätzlich getrennt für das Substitutionspotenzial beobachtet werden. Es liegt die Annahme zugrunde, dass in dieser Sensitivität immer auf das Auto ausgewichen werden kann und der Nutzer somit nicht gezwungen ist, bei schlechten Bedingungen zu fahren. Die Wetterbeschränkungen sind restriktiver als die des Szenarios „Mittlere Distanz“:

- Keine Wege bei Niederschlägen
- Keine Wege unter 10°C
- Nutzung nur von April bis Oktober

6.4 Pkw-Substitutionspotenzial durch Pedelec-Nutzung

6.4.1 Anwendung der Pedelec-Szenarien auf den CUMILE-Datensatz

Zur Ermittlung der Ergebnisse mussten zunächst die Daten in CUMILE angepasst werden. Dies betraf insbesondere die Abbildung der Touren im Wegedatensatz. Es war wichtig zu ermitteln, wie lang eine Tour insgesamt ist und welcher Rückweg zur entsprechenden Tour zugeordnet werden muss. Dazu wurden folgende Variablen eingefügt:

- Tour Nummer
- Anzahl der Wege innerhalb einer Tour
- Gesamtkilometer einer Tour
- Primärer Tourenzweck

Der primäre Tourenzweck leitet sich aus der Logik ab, dass die Wegezwecke innerhalb einer Tour nach ihrer Priorität geordnet werden. Folgende Reihenfolge ergibt sich bei den Prioritäten:

1. „Bringen und Holen“: Da mit dem Pedelec nur Kleinkinder (max. 2 im Anhänger) transportiert werden können, scheiden diese Touren grundsätzlich für Pedelecs aus, weil mehrheitlich Erwachsene und ältere Kinder transportiert werden.
2. „Arbeitswege“
3. „Private Erledigung“
4. „Freizeit“

Mit Hilfe dieser Anpassungen konnten die Szenarien in CUMILE berechnet werden.

6.4.2 Ergebnisse

Tabelle 6-3 fasst die Ergebnisse der berechneten Szenarien zusammen. Dabei können im Szenario „Maximal“ 50 % der Wege und 15 % der Kilometer eingespart werden. Bei den Annahmen im Szenario „Mittlere Distanz“ reduzieren sich die Wege auf 33 % und die Kilometer auf 7 %. Hier wirken sich deutlich die niedriger angesetzten Distanzen und die zusätzliche Jahreszeitenbedingung aus. In den Nutzertyp-Szenarien ersetzt der „Reine Pendler“ 12 % der Wege und 4 % der Kilometer, wenn zusätzlich die Bedingung „wettersensibel“ angesetzt wird, reduziert sich das Substitutionspotenzial weiter auf 5 % bzw. 2 %. Der „Alltagsnutzer“ hat aufgrund der höheren Anzahl von Erledigungs- und Freizeitwegen im Datensatz gegenüber dem „Reinen Pendler“ ein größeres Substitutionspotenzial mit 27 % der Wege und 5 % der Kilometer. Auch hier kommt es zu einer deutlichen Reduktion von über 50 % aufgrund der Annahmen in der Sensitivität „wettersensibel“ auf 12 % der Wege bzw. 2 % der Kilometer.

Tabelle 6-3: Substituierte Wege und Kilometer durch das Pedelec in den Szenarien

Szenario	Anzahl Weg	%	Summe km	%
Alle Fahrten	4.582.582	100 %	82.716.007	100 %
Szenario Maximal	2.272.904	50 %	12.435.175	15 %
Szenario Mittlere Distanz	1.516.893	33 %	6.112.142	7 %
Szenario „Reine Pendler“	546.500	12 %	3.623.534	4 %
+Sensitivität „wettersensibel“	231.591	5 %	1.529.331	2 %
Szenario „Alltagsnutzer“	1.215.968	27 %	4.293.299	5 %
+ Sensitivität „wettersensibel	535.640	12 %	1.899.437	2 %

Zur weiteren Analyse wurden die substituierten Wege der Szenarien mit zusätzlichen sozio-ökonomischen Angaben der Pkw-Nutzer gekreuzt. Dabei ergaben sich keine besonderen Auffälligkeiten in der Verteilung bei der räumlichen Kategorie des Wohnsitzes (BBSR-7 Gebiete) und dem Fahrradbesitz. Geringfügige Verschiebungen ergeben sich für „Qualität des Zuganges zu öffentlichen Verkehrsmitteln“ und „räumliche Lages des Arbeitsplatzes/Universität/Schule“. Die potenziellen Pedelec-Nutzer im Szenario „Mittlere Distanz und Alltags-Nutzer“ sind tendenziell mit ihrem Zugang zum öffentlichen Verkehr zufriedener als der Durchschnitt der Pkw-Nutzer. Das könnte sich positiv auf den Umstieg auf das Pedelec auswirken, da es mit dem ÖV noch eine Ausweichoption gibt. Sehr deutliche Verschiebungen gibt es für die Betrachtung nach Geschlecht, Alter und Erwerbstätigkeit. Die Verteilung nach Geschlecht weicht in dem Szenario „Reiner Pendler“ mit ca. 9,4 % vom Durchschnitt ab, sodass Frauen mit 54 % mehr Pendelfahrten unternehmen als Männer (46 %). Das hängt damit zusammen, dass von Frauen tendenzielle kürzere Arbeitsstrecken unternommen werden als von Männern.

Bei der Betrachtung nach Altersklassen ergeben sich in allen Szenarien deutliche Verschiebungen. Im „Szenario Maximal“, „Mittlere Distanz“ und „Alltagsnutzer“ sind es tendenziell die älteren Menschen, welche die Fahrten unternehmen, was darauf zurückzuführen ist, dass von älteren Menschen (über 61 Jahren) insgesamt eher weniger und kürzere Fahrten, insbesondere für private Erledigungen, unternommen werden. In dem Szenario „Reiner Pendler“ ist erwartungsgemäß die Altersgruppe zwischen 36 und 60 deutlich stärker vertreten als im Durchschnitt.

Tabelle 6-4: Verteilung der substituierte Wege der Szenarien auf Altersklassen

	Abweichung von Durchschnitt (Prozentpunkte)

	Alle Fahrten	Maximal	Mittlere Distanz	Reiner Pendler	Alltags-nutzer
Zwischen 10 und 17 Jahre	0 %	0,0	0,0	-0,1	0,0
Zwischen 18 und 25 Jahre	4 %	0,2	-0,2	-0,2	-0,5
Zwischen 25 und 35 Jahre	9 %	-2,6	-2,6	0,3	-3,7
Zwischen 36 und 50 Jahre	36 %	-5,6	-5,7	10,7	-10,3
Zwischen 51 und 60 Jahre	21 %	0,7	0,6	10,3	-2,5
Zwischen 61 und 70 Jahre	20 %	4,2	4,5	-12,0	9,2
Älter als 70 Jahre	10 %	3,2	3,4	-9,0	7,8

Die Betrachtung des Status der Erwerbstätigkeit steht im engen Zusammenhang mit der Altersgruppe (vgl. Tabelle 6-5). Deshalb zeichnet sich auch hier ein ähnlicher Trend ab. Insbesondere die Personen im Ruhestand ersetzen überdurchschnittlich Pkw-Fahrten mit dem Pedelec in den Szenarien „Maximal“, „Mittlere Distanz“ und „Alltagsnutzer“. In dem Szenario „Reiner Pendeler“ sind es insbesondere die Vollzeitbeschäftigten, die fast 70 % der Pkw-Wege substituieren.

Tabelle 6-5: Verteilung der substituierte Wege der Szenarien auf Status der Erwerbstätigkeit

		Abweichung von Durchschnitt (Prozentpunkte)			
	Alle Fahrten	Maximal	Mittlere Distanz	Reiner Pendler	Alltags-nutzer
Vollzeit	43 %	-4,8	-5,0	26,5	-14,9
Teilzeit	19 %	-2,0	-2,2	5,4	-4,6
Vorläufig nicht beschäftigt	2 %	0,2	0,2	-1,5	0,8
In Ausbildung	2 %	0,1	-0,1	-0,9	-0,2
In Fortbildung	1 %	0,1	-0,1	-0,3	-0,1
Nicht beschäftigt	5 %	-0,3	-0,2	-4,1	1,2
Ruhestand	27 %	6,8	7,5	-25,0	17,8

Neben den sozioökonomischen Eigenschaften der Pkw-Fahrer wurden die Szenarien außerdem mit den Pkw-Daten verschnitten. Dabei wurde näher untersucht, welche Pkw die Fahrten innerhalb der Szenarien unternehmen. Genauer betrachtet wurden die Eigenschaften Pkw-Segment und Jahreskilometer. Dabei ergaben sich für die Pkw nach Segment nur geringe Abweichungen gegenüber der durchschnittlichen Verteilung. Lediglich im Szenario „Reiner

Pendler“ ist eine leichte Tendenz in Richtung Klein- und Kleinstwagen zu beobachten (33 % gegenüber 24 % im Durchschnitt).

Deutlichere Verschiebungen ergeben sich bei der Betrachtung der Jahreskilometer (vgl. Tabelle 6-6). Hier ist eine Verschiebung in allen Szenarien auf die niedrigeren Jahresfahrleistungen unter 10.000 km festzustellen. Im Durchschnitt machen die Pkw mit einer Jahresfahrleistung von unter 10.000 km ca. 37 % aus. Im Szenario „Maximal“ sind das bereits 10,3 % mehr (also insgesamt 47,3 % der Pkw). Im Szenario „Mittlere Distanz“ sind es 12,5 %, im Szenario „Reiner Pendler“ 12,3 % und im Szenario „Alltagsnutzer“ sind es 11,7 % mehr Pkw gegenüber dem Durchschnitt. Somit haben in allen Szenarien die Pkw mit geringen Fahrleistungen das größte Substitutionspotenzial für die Pedelec-Nutzung. Dies sind i.d.R auch die Fahrzeuge mit der dem höchsten ökonomischen Potenzial zur Substitution mit CS (bzw. CS und ÖPNV). Pedelecs können somit einen wesentlichen Beitrag für eine Mobilität ohne Pkw-Besitz leisten.

Tabelle 6-6: Verteilung der substituierten Wege der Szenarien auf die Jahresfahrleistung der Pkw

		Abweichung von Durchschnitt (Prozentpunkte)			
	Alle Fahrten	Maximal	Mittlere Distanz	Reiner Pendler	Alltagsnutzer
≤ 1000	0 %	0,1	0,2	-0,1	0,3
1.001 – 5.000	7 %	3,1	4,0	0,7	4,8
5.001 – 10.000	30 %	7,1	8,3	11,6	6,6
10.001 – 15.000	29 %	0,1	-0,7	1,0	-0,7
15.001 – 20.000	16 %	-3,3	-3,9	-3,8	-3,6
20.001 – 40.000	16 %	-6,2	-6,8	-7,9	-6,5
40.001 – 60.000	2 %	-0,8	-0,8	-1,2	-0,8
60.001 – 80.000	0 %	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1
80.001 +	0 %	0,0	0,0	0,0	0,0

6.5 Diskussion geeigneter Maßnahmen und Handlungsempfehlungen

Für die Ausschöpfung des ermittelten Potenzials erscheinen insbesondere die Radverkehrsinfrastruktur und, zumindest kurz- bis mittelfristig, die Verfügbarkeit von Pedelecs zentral. Weitere Aspekte betreffen die gesetzlichen Rahmenbedingungen, die Verbesserung der technischen Eigenschaften und die weitere Vertiefung des Wissens über den Einsatz der Räder. Hier soll nur auf die zentralen Aspekte eingegangen werden. Für eine Diskussion weiterer Punkte wird auf die Studie „Pedelection“ verwiesen.

6.5.1 Infrastrukturelle Rahmenbedingungen verbessern

Prinzipiell benötigen Pedelecs keine eigene bzw. spezielle Infrastruktur gegenüber dem Fahrrad, eine Verbesserung der Radwegeinfrastruktur sowie von Abstellmöglichkeiten kommt sowohl der Pedelec-Nutzung als auch der Nutzung herkömmlicher Fahrräder zugute. Um die Potenziale von Pedelecs zu nutzen und Nutzungskonkurrenzen bezüglich der Infrastruktur mit Fahrradfahrern zu minimieren, sollten jedoch bei der Planung der Infrastruktur die partiell höheren Anforderungen von Pedelecs berücksichtigt werden: z. B. größere Kurvenradien, Vermeiden von Absperrpfosten und anderen Hindernissen, Überholmöglichkeiten, genügend Platz für Gespanne und Lastenpedelecs. Dabei sind die 2010 überarbeiteten „Empfehlungen zur Errichtung von Radverkehrsanlagen“ (ERA) und die „Richtlinien für Lichtsignalanlagen“ (RiLSA) auch für Pedelecs ausreichend. Pedelec-Nutzern ist zudem eine sichere Abstellmöglichkeit besonders wichtig, da der Anschaffungspreis um einiges höher liegt als bei konventionellen Fahrrädern. Dies gilt insbesondere für Umsteigepunkte an öffentlichen Haltestellen.

Von einer flächendeckend, der ERA entsprechenden, Radinfrastruktur ist Deutschland weit entfernt, teilweise wird die geforderte Qualität auch im Neubau nicht erreicht. Folglich wird die bestehende Radwegeinfrastruktur von der Mehrheit der Teilnehmenden des Feldtestes in „Pedelection“ als ungenügend empfunden. Auch der BMVI-Fahrradmonitor 2017 zeigt, dass eine Mehrheit der Nutzer sich auf der vorhandenen Infrastruktur unsicher fühlt (Borgstedt et al. 2017), wobei Durchschnittsbetrachtungen wie diese dabei die sehr heterogene Situation in Deutschland nur bedingt abbilden (siehe u.a. BMVBS 2012b).

Für eine in der Breite qualitativ hochwertige Infrastruktur sind zum einen die Finanzmittel zu erhöhen, zum anderen entsprechende Planungsressourcen zu schaffen. Mögliche Instrumente sind dabei:

- Erhöhung der Finanzmittel für die Bereiche für die der Bund bzw. die Länder direkt verantwortlich sind.
- Erhöhung der Bundesfördermittel für Radverkehrsanlagen in kommunaler bzw. Landes-Verantwortung, sofern dies im Rahmen der Zuständigkeiten möglich ist (z. B. in den Themenfeldern „Förderung innovativer Radinfrastruktur“ oder „Klimaschutz“).
- Erhöhung der Landesfördermittel für Rad- und Fußverkehrsanlagen in kommunaler Verantwortung.
- Förderung von Planungen und Schaffung von Verwaltungsressourcen, z. B. über die Finanzierung von zusätzlich in die Kommunen kommenden Fachkräften, die sich ausschließlich um die Belange des Radverkehrs kümmern (analog zum BMUB-Programm

für Klimaschutzmanager) oder über die Förderung von Radverkehrskonzepten (DLR und ifeu 2016).

- Verknüpfung von Fördermitteln an das Vorhandensein einer hochwertigen, angebotsorientierten Planung, welche durch festgeschriebene Teilnahmen an Audits und Weiterbildungen der Planungsverantwortlichen, dem Aufstellen von Radverkehrsstrategien, verpflichtenden Einhaltung der ERA oder die Durchführung von Bürgerbeteiligungen sichergestellt werden könnte.

6.5.2 Verfügbarkeit erhöhen

Bei der Betrachtung der hohen Verkaufszahlen von Pedelecs erscheinen zusätzliche finanzielle Förderungen zur Anschaffung wie Kaufprämien wenig effizient. Trotzdem gilt es weiterhin Anreize zu schaffen, die dem Pedelec weitere Zielgruppen erschließt. Gruppen, die bisher nur im geringen Maße das Pedelec für sich entdeckt haben, sind Frauen sowie Jugendliche und junge Erwachsene. Dies könnte zum einen damit zusammenhängen, dass für diese die Alltagsnutzung (Pendlerfahrzeug, Transport von Einkäufen, Kindern) mit Hemmnissen behaftet ist, zum anderen auch mit dem hohen Anschaffungspreis. Instrumente für die Erschließung dieser Nutzergruppen können dabei sein:

- Die Einführung von betrieblichen Mobilitätsmanagements, welches gezielt eine Fahrrad-/Pedelec-Mobilität fördert. Beispiele hierfür sind die Firma „Roche“ an den Standorten Basel und Kaiseraugst (Adam 2013) oder die vom ADFC ausgezeichneten fahrradfreundlichen Betriebe[3].
- Förderung von in den ÖPNV integrierten öffentlichen Pedelec-Verleihsystemen, wie dies z. B. im Rahmen des Projekts „Vernetzte E-Bike-Anschlussmobilität an Bahnhaltepunkten in der Region Stuttgart“[4] umgesetzt wird.

[3] Zertifizierung vom ADFC: http://www.fahrradfreundlicher-arbeitgeber.de/

[4] http://www.vvs.de/pedelecsleihen/

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt „Substitutionspotenziale der Pkw-Nutzung“ erfolgte auf der Grundlage bestehender Modellansätze oder im Rahmen des Projektes weiterentwickelter Modelle deren Fusion bzw. die Entwicklung geeigneter Schnittstellen. Weiterhin erfolgte eine Anreicherung der vorhandenen empirischen Daten. Diese im Rahmen des Projektes entwickelten Fusionsansätze bzw. die Schnittstellenbildung zwischen den Modellen erlauben es im Ergebnis,

- zunächst alle Fahrten einer repräsentativen Pkw-Flotte in Deutschland über den Zeitraum eines Jahres zu abzubilden (CUMILE, Car Use Model Integrating Long Distance Events),
- für diese Pkw und deren Fahrten die resultierenden Kosten und die finanzielle Belastung für deren Halter abzuschätzen,
- für diese Fahrten die jeweils benutzten Straßenkategorien zu bestimmen (Nutzung von CUMILE unter Nutzung des Modellansatzes von VALIDATE™),
- durch die Zuordnung zu den einzelnen Fahrten jahreszeitlich typischer Witterungsbedingungen deren Einfluss auf das Emissionsverhalten abzuschätzen und
- damit wiederum die daraus resultierenden Emissionen und den Energieverbrauch für jede einzelne Fahrt abzubilden unter Nutzung von TREMOD (Transport Emission Model).

Diese Modelllandschaft – insbesondere das Zusammenspiel des Pkw-Nutzungsmodells CUMILE und dem Transportemissionsmodell TREMOD – ermöglicht es, zentrale Fragestellungen zu den Minderungsoptionen im Personenverkehr, insbesondere bezüglich Potenzialen, Nutzerkosten und Emissionen, zu bearbeiten. Damit werden Daten über die tatsächliche Verwendung von Kraftfahrzeugen und die daraus resultierenden Emissionen bereitgestellt, welche die Pkw-Nutzung einer repräsentativen Flotte in einer hierfür notwendigen und angepassten Detaillierung und Auflösung und insbesondere für längere Zeiträume (ein Jahr) abbildet.

Auf Seiten der Emissionsmodellierung erlaubt der Ansatz der fahrtengenauen Modellierung über ein Jahr insbesondere eine qualitativ deutlich höherwertige Abbildung der Kaltstartemissionen. Aufgrund der starken Sensitivität der Emissionen gegenüber sehr kalten Temperaturen und über die Zuordnung der Witterungsbedingungen zu den einzelnen Fahrten sind die abgebildeten Kaltstartemissionen dabei höher als mit dem bisherigen in TREMOD verwendeten HBEFA-Ansatz der Modellierung über Monatsmittelwerte. Dies trifft aber die Situation der Realität geeigneter.

Mit der Modellierung der Pkw-Nutzung über das gesamte Jahr, der Auflösung in Einzelfahrten und der Ermittlung der resultierenden Emissionen kann evaluiert werden, für welche Haushalte und deren Mobilität der Pkw mehr oder weniger unverzichtbar ist (z. B. tägliche Nutzung zum

Pendeln), wie „abhängig“ ein Haushalt von seinem bzw. seinen Pkw ist. Umgekehrt können die Modellergebnisse auch genutzt werden, um zu untersuchen, wie „notwendig“ die verschiedenen Pkw im Haushalt überhaupt sind, um die gesamten Mobilitätsbedürfnisse des Haushalts zu befriedigen. Es kann also durchaus möglich sein, dass, wenn ein Haushalt mehrere Pkw besitzt, diese verschiedenen Pkw einen unterschiedlichen Notwendigkeitsgrad besitzen (abnehmender Grenznutzen zusätzlicher in einem Haushalt vorhandener Pkw). Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Spannweite der Pkw-Abhängigkeit und der Pkw-Notwendigkeit bezogen auf Haushalte und für einzelne Pkw groß ist, d.h. es gibt in Deutschland durchaus Haushalte, die zwar einen Pkw besitzen, diesen aber unter objektiven Gesichtspunkten nicht benötigen. Dabei sind gerade Rentner-Haushalte oder Haushalte in größeren Städten häufiger weniger von ihrem oder ihren Pkw abhängig, da entweder der Umfang der Mobilitätsbedürfnisse gering ist oder alternative Mobilitätsangebote zur Verfügung stehen: Solche Pkw mit einer geringen Notwendigkeit sind mittlerweile häufig die im Haushalt vorhandenen älteren Fahrzeuge, für deren ursprüngliche Fahrprofile bereits ein neueres Ersatzfahrzeug angeschafft wurde. Diese Pkw werden also häufig als „So-da-Autos“ gehalten, d.h. Fahrzeuge die - da kein unmittelbarer ökonomischer Zwang besteht, diese Pkw abzuschaffen - vorgehalten werden und durch ihr Vorhandensein, dann auch für Wege eingesetzt werden, die ohne diese Pkw auch mit anderen Verkehrsmitteln durchgeführt werden könnten. Ziel einer bedarfsgerechten, nachhaltigen Verkehrspolitik sollte daher sein, für diese Pkw-Halter Anreize zu schaffen, ihre Mobilitätsbedürfnisse anders als mit ihrem eigenen Pkw zu befriedigen. Die Kombination aus Fahrrad, Pedelec, dem öffentlichem Verkehr sowie Carsharing (CS) bieten hierfür gute Möglichkeiten.

Die entwickelte Modellfusion wurde folglich dazu angewendet, um das ökonomische (Kosteneinsparungen in Privathaushalten) und ökologische Potenzial (resultierende reduzierte Schadstoffemissionen) einer Substitution von Pkw durch unterschiedlich Ansätze zu (stationsgebundenes CS und Nutzung von Pedelecs) analysieren:

In einem ersten Anwendungsfall wurde szenarienhaft die Substitution privater Pkw durch stationsgebundenes CS in Privathaushalten analysiert. Hierfür wurden für jedes Fahrzeug der CUMILE-Flotte die Kosten für die private Pkw-Nutzung und den Pkw-Besitz ermittelt. Zudem wurden die jährlichen Kosten für den Fall, dass Haushalte ihr Privatfahrzeug abschaffen und stattdessen CS-Mitglied werden, unter verschiedenen Szenarien berechnet. Anhand eines Vergleiches der jährlichen Pkw-Kosten als Privatfahrzeug mit den jährlichen CS-Kosten konnten Pkw bestimmt werden, die aus finanzieller Sicht substituierbar sind. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Substitution von Pkw durch CS für 14% der deutschen Pkw-Flotte grundsätzlich kosteneffizient ist, wenn man davon ausgeht, dass der gleiche Pkw-Typ wie bisher im CS eingesetzt wird und dass CS-Mitglieder Verkehrsträger der aktiven Mobilität, also insbesondere

das Fahrrad im Kurzstreckenbereich (Fahrtweite bis unter 5 km) nutzen. Pkw, die aus ökonomischer Sicht gut substituierbar sind, befinden sich oft im Besitz von älteren Personen, Kleinhaushalten, und Stadtbewohnern. Häufig werden die Pkw nicht zum Pendeln genutzt, sondern nur für wenige ganz bestimmte Fahrtmuster. Dies sind damit zumeist Zweit- oder Drittwagen des Haushalts. Die Substitution von Privatfahrzeugen durch Nutzung von CS-Angeboten unter den beschriebenen Annahmen führt, bezogen auf die Gesamtflotte, zu einem $C0_2$ Emissionsminderungspotenzial von 0,1% bis 7,0% in den verschiedenen Szenarien. Die größten Einsparpotenziale bei den Kohlenwasserstoff-Emissionen (12,2% in Szenario 5) ergeben sich aufgrund der vermiedenen Pkw-Kurzstrecken. Die Emissionsminderungspotenziale von PM, NOx und CO liegen je nach Szenario und Parameter zwischen 0,5% und 14,4%.

Die grundsätzlichen zugrundeliegenden ökonomischen Überlegungen unter Berücksichtigung typischer Pkw-Nutzungsmuster und typischer Halter-Merkmale haben Eingang in eine Werbe-Broschüre gefunden, in welcher diese Überlegungen zur Selbstreflektion von Mobilitätsverhalten zusammengestellt werden (in Anhang A dargestellt).

Ein weiterer Anwendungsfall von möglichen Verlagerungen von Pkw-Fahrten auf das Pedelec auf Grundlage von aus heutigen Pedelec-Nutzungsmustern abgeleiteten Szenarien zeigt, dass bis zu 15 % der Verkehrsleistung des Pkws auf das Pedelec verlagerbar ist. Dabei sind es insbesondere Frauen, bei denen ein hohes Verlagerungspotenzial besteht. Grund dafür sind die in der Regel kürzeren Pendelwege von Frauen. Auch Personen im Ruhestand könnten grundsätzlich überdurchschnittlich viele Pkw-Fahrten mit dem Pedelec ersetzen. Dies betrifft dann häufig Pkw mit ohnehin niedrigen Jahresfahrleistungen von deutlich unter 10.000 km. Da Pkw mit niedrigerer Fahrleistung tendenziell höhere spezifische Kosten je Kilometer haben, kann die Substitution wesentlicher Fahrtleistungsanteile eines Pkw durch das Pedelec – neben der positiven Umweltwirkung der einzelnen ersetzten Fahrt – der Initialgrund für die Abschaffung des Privat-Pkws sein: Durch die Bewältigung der Mobilität des Alltags im Wesentlichen mit dem Pedelec und dem ÖV wird der Besitz des eigenen Pkw ökonomisch ineffizient, für die verbleibenden – nicht auf das Pedelec oder den ÖV verlagerbare Fahrten - wird dann auch Car-Sharing zu einer sinnvollen Ergänzung der Mobilität jenseits des persönlichen Pkw.

Die im Rahmen dieses Projektes entwickelten Modelle bzw. deren Fusionen können auch für weiterführende Fragestellungen eingesetzt werden:

- Mit der Kenntnis der vorhandenen Pkw-Nutzung lassen sich Aussagen dazu ableiten, wie Batterie-elektrische (BEV) oder Plug-in-Hybrid-elektrische Fahrzeuge (PHEV) zu dimensionieren sind: Vor dem Hintergrund der bekannten Nutzungsmuster, von Jahresfahrleistungen und deren Aufteilung auf unterschiedliche Tage und Weglängen, können Batterien so dimensioniert werden, dass sie den Mobilitätsbedürfnissen des

Alltags optimal entsprechen (z. B. Dimensionierung der Batterie auf den täglichen Pendelweg).

- Damit ist weiterhin ableitbar, für welche Nutzungsmuster welche Art eines elektrischen Antriebs und in welcher Kombination (z. B. Batteriekapazität) am geeignetsten ist. Darüber hinaus lassen sich mit der Kenntnis der Nutzungsmuster über längere Zeiträume Szenarien der resultierenden Ladeleistungen in einer sinnvollen zeitlichen Auflösung ableiten und sich die Möglichkeiten einer zeitlichen Verschiebung der Ladevorgänge mit ihren Auswirkungen großmaßstäblich simulieren.
- Die Möglichkeiten, die Kostenrelevanz von Fahrzeugen geeignet in einer Längsschnitt-perspektive abzubilden, eröffnet weitere Möglichkeiten, gerade um die ökonomische Sinnfälligkeit der Vorhaltung von Privat-Pkw auf einer objektiven Grundlage zu evaluieren.
- Die Möglichkeit, eine „Abhängigkeit“ vom Pkw zu quantifizieren und mit der Kenntnis sowohl bestimmter sozio-demografischer und sozio-ökonomischer Eigenschaften von Pkw-Nutzern auf der einen Seite, aber auch der Eigenschaften der jeweiligen Pkw auf der anderen, lassen sich Betroffenheiten von bestimmten verkehrs- und umweltpolitischen Maßnahmen (z. B. Dieselfahrverbote) ableiten. Die sozialen Implikationen (z. B. deutlich erschwerte Erreichbarkeit eines Arbeitsplatzes) sind grundsätzlich abbildbar.
- Mit der Möglichkeit, eine Gesamtfahrleistung auf den Alltags- und den Fernverkehr aufzuteilen und der den Fahrzuständen entsprechenden Emissionszuordnung, kann eine plausible Aufteilung und Berechnung der Emissionen nach Fahrtzwecken und Fahrtweiten erfolgen: Damit kann eine sinnvolle Abschätzung der Emissionsumfänge im Fernverkehr erfolgen.

8 Literatur

ADAC (2017): ADAC Autokosten. Online verfügbar unter https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokosten/, zuletzt geprüft am 25.01.2017.

Adam, G. (2013): Mobilitätskonzept Roche. Veranstaltung Schweizerischer Städteverband. 14.06.13. Online verfügbar unter http://staedteverband.ch/cmsfiles/g_adam_mobilitatskonzeptroche.pdf, zuletzt geprüft am 20.12.2017.

Ajzen, Icek (1991): The Theory of Planned Behavior. In: *Behavior and Human Decision Processes* (50), S. 179–211.

Anable, Jillian (2005): 'Complacent Car Addicts' or 'Aspiring Environmentalists'? Identifying travel behaviour segments using attitude theory. In: *Transport Policy* 12 (1), S. 65–78. DOI: 10.1016/j.tranpol.2004.11.004.

Axhausen, Kay W.; Schönfelder, Stefan; Wolf, J.; Oliveira, M.; Samaga, U. (2004): 80 weeks of GPS-traces: Approaches to enriching the trip information. In: Transportation Research Board (Hg.): TRB 83rd Annual Meeting. Washington, D.C.

Bäumer, Marcus; Hautzinger, Heinz; Pfeiffer, Manfred; Stock, Wilfried; Lenz, Barbara; Kuhnimhof, Tobias; Köhler, Katja (2017): Fahrleistungserhebung 2014 - Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko von Marcus Bäumer, Heinz Hautzinger, Manfred Pfeiffer, Wilfried Stock (IVT Research GmbH, Mannheim), Barbara Lenz, Tobias Kuhnimhof, Katja Köhler (Institut für Verkehrsforschung, DLR, Berlin). Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH (Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen. Verkehrstechnik, Heft V 291).

Bergk, Fabian; Biemann, Kirsten; Heidt, Christoph; Ickert, Lutz; Knörr, Wolfram; Lambrecht, Udo et al. (2016a): Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. Schlussbericht. Forschungsprojekt 3712 45 199, gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Dessau-Roßlau.

Bergk, Fabian; Heidt, Christoph; Knörr, Woflram; Keller, Mario (2016b): Erweiterung der Software TREMOD um zukünftige Fahrzeugkonzepte, Antriebe und Kraftstoffe. 1. Auflage. Bremen: Wirtschaftsverlag NW (Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen - Fahrzeugtechnik (F), 113).

Bhat, Chandra R.; Srinivasan, Sivaramakrishnan; Axhausen, Kay W. (2005): An analysis of multiple interepisode durations using a unifying multivariate hazard model. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 39 (9), S. 797–823. DOI: 10.1016/j.trb.2004.11.002.

BMVBS (Hg.) (2012a): Chancen des ÖPNV in Zeiten einer Renaissance der Städte. Feldbericht. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (BMVBS-Online-Publikation, 2012,2).

BMVBS (2012b): Nationaler Radverkehrsplan 2020. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Online verfügbar unter https://nationaler-radverkehrsplan.de/de/bund/nationaler-radverkehrsplan-nrvp-2020, zuletzt aktualisiert am 20.12.2017.

Borgstedt, Silke; Hecht, Jan; Jurczok, Franziska (2017): Fahrrad-Monitor Deutschland 2017. Ergebnisse einer repräsentativen Online-Befragung. Hg. v. Sinus Markt - und Sozialforschung GmbH. Heidelberg. Online verfügbar unter http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/fahrradmonitor-2017-ergebnisse.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt aktualisiert am 20.12.2017.

Bosch Ebike Systems (2017): Marktanalyse von Bosch eBike Systems "Jedes zweite Rad in zehn Jahren ein eBike" Claus Fleischer prognostiziert rasantes Wachstum. Online verfügbar unter https://www.presseportal.de/pm/112314/3800047, zuletzt geprüft am 20.12.2017.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.) (2015): Verkehr in Zahlen 2015/2016. Unter Mitarbeit von Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) Berlin. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) Berlin. 44. Jg. Hamburg: DVV Media Group GmbH.

Chlond, Bastian; Last, J.; Manz, W.; Zumkeller, Dirk (2004): Eckwerte des Personenfernverkehrs in Deutschland. In: *Internationales Verkehrswesen* 56 (10), S. 430–435.

Chlond, Bastian; Weiss, Christine; Heilig, Michael; Vortisch, Peter (2014): Hybrid Modeling Approach of Car Uses in Germany on Basis of Empirical Data with Different Granularities. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2412), S. 67–74. DOI: 10.3141/2412-08.

Cullinane, Sharon; Cullinane, Kevin (2003): Car dependence in a public transport dominated city: Evidence from Hong Kong. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 8 (2), S. 129–138. DOI: 10.1016/S1361-9209(02)00037-8.

Diekmann, Laura; Gerhards, Eva; Klinski, Stefan; Meyer, Bettina; Schmidt, Sebastian; Thöne, Michael (2011): Steuerliche Behandlung von Firmenwagen in Deutschland. FiFo Institute for Public Economics. Cologne (Fifo Reports, 13). Online verfügbar unter http://www.foes.de/pdf/2011_Firmenwagenbesteuerung_lang.pdf, zuletzt geprüft am 02.11.2017.

DLR; ifeu (2016): Alltagsmobilität: Verlagerungspotenziale auf nicht motorisierte und öffentliche Verkehrsmittel im Personenverkehr. Endbericht. Unter Mitarbeit von Claudia Nobis, Angelika Schulz, Katja Köhler, Fabian Bergk und Frank Dünnebeil. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/studie-verlagerungspotenzial-alltagsmobilitaet.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt aktualisiert am 20.12.2017.

DWD (2016): Climate Data Center FTP-Server. Deutscher Wetterdienst. Offenbach. Online verfügbar unter http://www.dwd.de/DE/leistungen/cdcftpmesswerte/cdcftpmesswerte.html?nn=17626.

Elango, Vetri Venthan; Guensler, Randall L.; Ogle, Jennifer Harper (2007): Day-to-Day Travel Variability in the Commute Atlanta, Georgia, Study. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2014), S. 39–49. Online verfügbar unter http://dx.doi.org/10.3141/2014-06.

FGSV (2017): Multi- und Intermodalität: Hinweise zur Umsetzung und Wirkung von Maßnahmen im Personenverkehr. Teilpapier 1: Definitionen. Unter Mitarbeit von Martin Kagerbauer, Till Ackermann, Volker Blees, Michael Boßhammer, André Bruns, Bastian Chlond et al. Hg. v. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Online verfügbar unter http://www.fgsv.de/fileadmin/gremien/ak_128/Teilpapier_1_Definitionen.pdf.

Goodwin, Phil; Cairns, Sally; Dargay, Joyce; Parkhurst, Graham; Polak, John; Stokes, Gordon; Vythoulkas, Petros (1995): Car Dependence. A Report for the RAC Foundation for Motoring and the Environment. Hg. v. RAC Foundation. RAC Foundation. London.

Götz, Konrad; Jahn, Thomas; Schultz, Irmgard (1998): Mobilitätsstile. Ein sozial-ökologischer Untersuchungsansatz ; Arbeitsbericht ; Subprojekt 1: Mobilitätsleitbilder und Verkehrsverhalten. Freiburg Breisgau: Öko-Inst (Forschungsbericht stadtverträgliche Mobilität, Bd. 7).

Gray, David; Farrington, John; Shaw, Jon; Martin, Suzanne; Roberts, Deborah (2001): Car dependence in rural Scotland. Transport policy, devolution and the impact of the fuel duty escalator. In: *Journal of Rural Studies* 17 (1), S. 113–125. DOI: 10.1016/S0743-0167(00)00035-8.

Greene, David L. (1985): Estimating daily vehicle usage distributions and the implications for limited-range vehicles. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 19 (4), S. 347–358. DOI: 10.1016/0191-2615(85)90041-4.

Haag, Martin (1996): Notwendiger Autoverkehr in der Stadt. Dissertation, Kaiserslautern. Verkehrswesen.

Handy, Susan; Weston, Lisa; Mokhtarian, Patricia L. (2005): Driving by choice or necessity? In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 39 (2-3), S. 183–203. DOI: 10.1016/j.tra.2004.09.002.

Hausberger, Stefan; Rexeis, D. MartinI.; Zallinger, D.I Michael; Luz, D. RaphaelI. (2009): Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3. Report Nr. I-20/2009 Haus-Em 33/08/679.

Hautzinger, Heinz; Stock, Wilfried; Mayer, Karin; Schmidt, Jochen; Heidemann, Dirk (2005): Fahrleistungserhebung 2002 – Inländerfahrleistung. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, V 120. Heilbronn, Mannheim.

He, Xiaoyi; Wu, Ye; Zhang, Shaojun; Tamor, Michael A.; Wallington, Timothy J.; Shen, Wei et al. (2016): Individual trip chain distributions for passenger cars. Implications for market acceptance of battery electric vehicles and energy consumption by plug-in hybrid electric vehicles. In: *Applied Energy* 180, S. 650–660. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.021.

Hilgert, Tim; von Behren, Sascha; Eisenmann, Christine; Vortisch, Peter (2018): Are activity patterns stable or variable? An analysis of three-year panel data. In: Transportation Research Board (Hg.): TRB 97th Annual Meeting Compendium of Papers. Washington, D.C.

Hunecke, M.; Haustein, S.; Böhler, S.; Grischkat, S. (2010): Attitude-Based Target Groups to Reduce the Ecological Impact of Daily Mobility Behavior. In: *Environment and Behavior* 42 (1), S. 3–43. DOI: 10.1177/0013916508319587.

Hunecke, Marcel (2015): Mobilitätsverhalten verstehen und verändern. Psychologische Beiträge zur interdisziplinären Mobilitätsforschung. Wiesbaden: Springer VS (Research, 26). Online verfügbar unter http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/1869257.

ifeu (2014): Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 (TREMOD) für die Emissionsberichterstattung 2015 (Berichtsperiode 1990-2013). Im Auftrag des Umweltbundesamtes.

ifeu (2016): Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMOD) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014). Heidelberg.

infas; DLR (2010a): Mobilität in Deutschland (MiD) 2008: Ergebnisbericht Struktur - Aufkommen - Emissionen - Trends. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung. Bonn und Berlin.

infas; DLR (2010b): Mobilität in Deutschland 2008 – Methodenbericht. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrsforschung. Bonn, Berlin.

INFRAS (2014): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 3.2. Bern, zuletzt aktualisiert am 2014.

Institut für Mobilitätsforschung (Hg.) (2013): Megacity Mobility Culture. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Mobility).

Institute for Mobility Research (2013): Megacity Mobility Culture. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Khan, Mobashwir; Kockelman, Kara M. (2012): Predicting the Market Potential of Plug-in Electric Vehicles Using Multiday GPS Data. In: *Energy Policy* 46, S. 225–233. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.03.055.

Kraftfahrt-Bundesamt (2015): Statistik zu Fahrzeug-Zulassungen. Flensburg.

Kraftfahrt-Bundesamt (2017a): Bestand an Personenkraftwagen am 1. Januar 2017 gegenüber 1. Januar 2016 nach Segmenten und Modellreihen (Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes).

Kraftfahrt-Bundesamt (2017b): Fahrzeugzulassungen (FZ) – Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen. Flensburg.

Kuhnimhof, Tobias; Eisenmann, Christine (2017): Vehicle cost imputation in travel surveys: Gaining insight into the fundamentals of (auto-) mobility choices. In: International Steering Committee for Travel Survey Conferences (ISCTSC) (Hg.): 11th International Conference on Transport Survey Methods. Esterel, Canada.

Lienhop, Martina; Thomas, Dirk; Brandies, Alexander; Kämper, Claudia; Jöhrens, Julius; Helms, Hinrich (2015): Pedelection: Verlagerungs- und Klimaeffekte durch Pedelec-Nutzung im Individualverkehr. Braunschweig. Online verfügbar unter http://www.transportation-design.org/cms/upload/DOWNLOADS/150916_Abschlussbericht_Pedelection_final.pdf, zuletzt geprüft am 20.12.2017.

Lipps, Oliver (2001): Modellierung der individuellen Verhaltensvariationen bei der Verkehrsentstehung. Dissertation. Universität Fridericana zu Karlsruhe, Karlsruhe. Institut für Verkehrswesen. Online verfügbar unter http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1172001.

Lois, Daniel (2015): Logistische Regression (in SPSS). Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Humanwissenschaftewn und Sozialwissenschaftliche Methodenlehre. München.

LSE Cities; InnoZ (Hg.) (2015): Towards new Urban Mobility. The case of London and Berlin. London.

Lucas, Karen; Jones, Peter (2009): The Car in British Society. Hg. v. RAC Foundation. London.

Manz, Wilko (2005): Mikroskopische längsschnittorientierte Abbildung des Personenfernverkehrs. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2004.

Mattioli, Giulio; Anable, Jillian; Vrotsou, Katerina (2016): Car dependent practices. Findings from a sequence pattern mining study of UK time use data. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 89, S. 56–72. DOI: 10.1016/j.tra.2016.04.010.

Newman, Peter W.; Kenworthy, Jeffrey R. (1989): Cities and automobile dependence. A sourcebook. Aldershot: Gower.

Pearre, Nathaniel S.; Kempton, Willett; Guensler, Randall L.; Elango, Vetri V. (2011): Electric vehicles: How much range is required for a day's driving? In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 19 (6), S. 1171–1184. DOI: 10.1016/j.trc.2010.12.010.

Plötz, Patrick (2014): How to estimate the probability of rare long-distance trips. Karlsruhe (Working Paper Sustainability and Innovation, No. S1/2014).

Plötz, Patrick; Jakobsson, Niklas; Sprei, Frances (2017): On the distribution of individual daily driving distances. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 101, S. 213–227. DOI: 10.1016/j.trb.2017.04.008.

Preißner, Claudia L.; Kemming, Herbert; Wittowsky, Dirk (2013): Einstellungsorientierte Akzeptanzanalyse zur Elektromobilität im Fahrradverkehr. Online verfügbar unter https://www.ils-forschung.de/files_publikationen/pdfs/ILS_Bericht_Elektrofahrraeder.pdf, zuletzt geprüft am 20.12.2017.

Schäfer, P. K.; Schmidt, K. (2011): Sozialwissenschaftliche Begleitforschung zur Elektromobilität in der Modellregion Rhein-Main. Einzelbericht für das Demonstrationsvorhaben des Regionalverbands FrankfurtRheinMain Bike + Business 2.0. Frankfurt/Main.

Schönfelder, Stefan (2006a): Urban rhythms - Modelling the rhythms of individual travel behaviour. Dissertation. ETH, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich. IVT, Institute for Transport Planning and Systems.

Schönfelder, Stefan (2006b): Urban rhythms – Modelling the rhythms of individual travel behaviour. Dissertation. ETH, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich. IVT, Institute for Transport Planning and Systems.

Shiftan, Yoram; Albert, Gila; Keinan, Tamar (2012): The impact of company-car taxation policy on travel behavior. In: *Transport Policy* 19 (1), S. 139–146. DOI: 10.1016/j.tranpol.2011.09.001.

Siedentop, Stefan; Roos, Sebastian; Fina, Stefan (2013): Ist die „Autoabhängigkeit“ von Bewohnern städtischer und ländlicher Siedlungsgebiete messbar? In: *Raumforsch Raumordn* 71 (4), S. 329–341. DOI: 10.1007/s13147-013-0240-0.

Stadtmobil Karlsruhe (2017): CarSharing – Das rechnet sich! Online verfügbar unter http://karlsruhe.stadtmobil.de/privatkunden/tarife/vergleich/, zuletzt geprüft am 06.08.2017.

Stadtmobil Stuttgart (2017): Handbuch. Stuttgart.

Statistisches Bundesamt (2013): Einkommens- und Verbrauchsstichprobe 2013. Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt (2015): Mikrozensus 2015. Wiesbaden.

Strele, M. (2010): Landrad - Neue Mobilität für den Alltagsverkehr in Vorarlberg. Bregenz.

Susilo, Yusak O.; Axhausen, Kay W. (2014): Repetitions in individual daily activity–travel–location patterns. A study using the Herfindahl–Hirschman Index. In: *Transportation* 41 (5), S. 995–1011. DOI: 10.1007/s11116-014-9519-4.

Verkehrsclub Deutschland e. V. (2013): Das E-Rad - mit Recht Hoffnungsträger urbaner Mobilität? Online verfügbar unter https://www.vcd.org/fileadmin/user_upload/Redaktion/Publikationsdatenbank/Radverkehr/VCD_Auswertung_E-Rad_Nutzerumfrage_2013.pdf, zuletzt geprüft am 20.12.2017.

Verma, Meghna (2015): Growing car ownership and dependence in India and its policy implications. In: *Case Studies on Transport Policy* 3 (3), S. 304–310. DOI: 10.1016/j.cstp.2014.04.004.

Verreault, Hubert; Morency, Catherine (2011): Transcending the Typical Weekday with Large-Scale Single-Day Survey Samples. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2230), S. 38–47. Online verfügbar unter http://dx.doi.org/10.3141/2230-05.

von Behren, Sascha; Minster, Clotilde; Esch, Johanna; Hunecke, Marcel; Chlond, Bastian (2017): Assessing Car Dependence: Development of a Comprehensive Survey Approach Based on the Concept of a Travel Skeleton. In: International Steering Committee for Travel Survey Conferences (ISCTSC) (Hg.): 11th International Conference on Transport Survey Methods. Esterel, Canada.

von Behren, Sascha; Minster, Clotilde; Magdolen, Miriam; Chlond, Bastian; Hunecke, Marcel; Vortisch, Peter (2018): Bringing travel behavior and attitudes together: An integrated survey approach for clustering urban mobility types. In: Transportation Research Board (Hg.): TRB 97th Annual Meeting Compendium of Papers. Washington, D.C.

Vortisch, Peter; Waßmuth, Volker (2007): VALIDATE - A Nationwide Dynamic Travel Demand Model for Germany. In: Proceedings of the 11th National Transportation Planning Application Conference of the Transport Research Board. Daytona Beach, Florida, USA.

Walters, Peter (2000): An introduction to ergodic theory. 1. softcover printing. New York [u.a.]: Springer (Graduate texts in mathematics, 79).

Weiss, Christine; Chlond, Bastian; Heilig, Michael; Wassmuth, Volker; Vortisch, Peter (2016a): Who Uses Freeways and Who Pays for Them? – A Model Based Analysis of Distribution Effects of Different Toll Tariff Systems in Germany. In: Transportation Research Board (Hg.): TRB 95th Annual Meeting Compendium of Papers. Washington, D.C.

Weiss, Christine; Chlond, Bastian; Hilgert, Tim; Vortisch, Peter (2016b): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) - Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2014/2015: Alltagsmobilität und Fahrleistung. Karlsruhe.

Wermuth, Manfred (1978): Struktur und Effekte von Faktoren der individuellen Aktivitätennachfrage als Determinanten des Personenverkehrs. Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Verkehrs- und Stadtplanung.

Wermuth, Manfred; Neef, Christian; Wirth, Rainer; Löhner, Holger; Hautzinger, Heinz; Stock, Wilfried et al. (2012): Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010. Schlussbericht. Forschungsprojekt 70.0829/2008 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Braunschweig, Heilbronn, Berlin, Flensburg.

Zhao, Jinhua (2011): Subjective Measure of Car Dependence. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2231, S. 44–52. DOI: 10.3141/2231-06.

ZIV (2017): E-Bike-Markt wächst weiter - Absatz von Fahrrädern rückläufig. Stimmungsbarometer für das 1. Halbjahr 2017. Hg. v. Zweirad-Industrie-Verband e.V. Online verfügbar unter http://www.ziv-zweirad.de/uploads/media/PM_2017_29.08._Fahrradmarkt_1._HJ_2017.pdf, zuletzt geprüft am 20.12.2017.

Zumkeller, Dirk; Manz, Wilko; Last, Jörg; Chlond, Bastian (2005): Die intermodale Vernetzung von Personenverkehrsmitteln unter Berücksichtigung der Nutzerbedürfnisse (INVERMO). Schlussbericht. Forschungsprojekt 19 M 9832 A0 gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Karlsruhe.

9 Anhang A: Carsharing-Broschüre

Carsharing

Ein lohnenswertes Projekt für mich?

Welche der folgenden Aussagen könnten auf Sie zutreffen?

1. Sie leben im Stadtbereich und benötigen zu viel Zeit, um einen Parkplatz zu finden?

2. Ihr Pkw ist alt, muss häufiger teuer repariert werden und bald steht die nächste TÜV Untersuchung an?

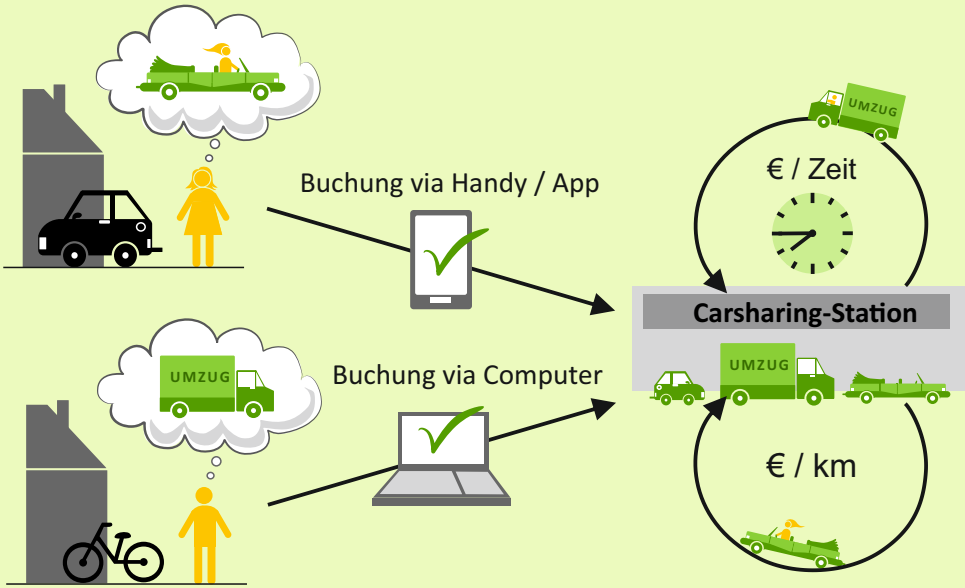
3. Sie besitzen einen Pkw um des „Besitzen“ Willen, aber Sie nutzen ihn kaum?

4. Sie sind Staus, Lärm und Luftverschmutzung leid und möchten selbst etwas zu einer lebenswerteren Stadt beitragen?

Vielleicht wäre **Carsharing** eine Alternative für Sie?
Doch vorerst die entscheidende Frage:

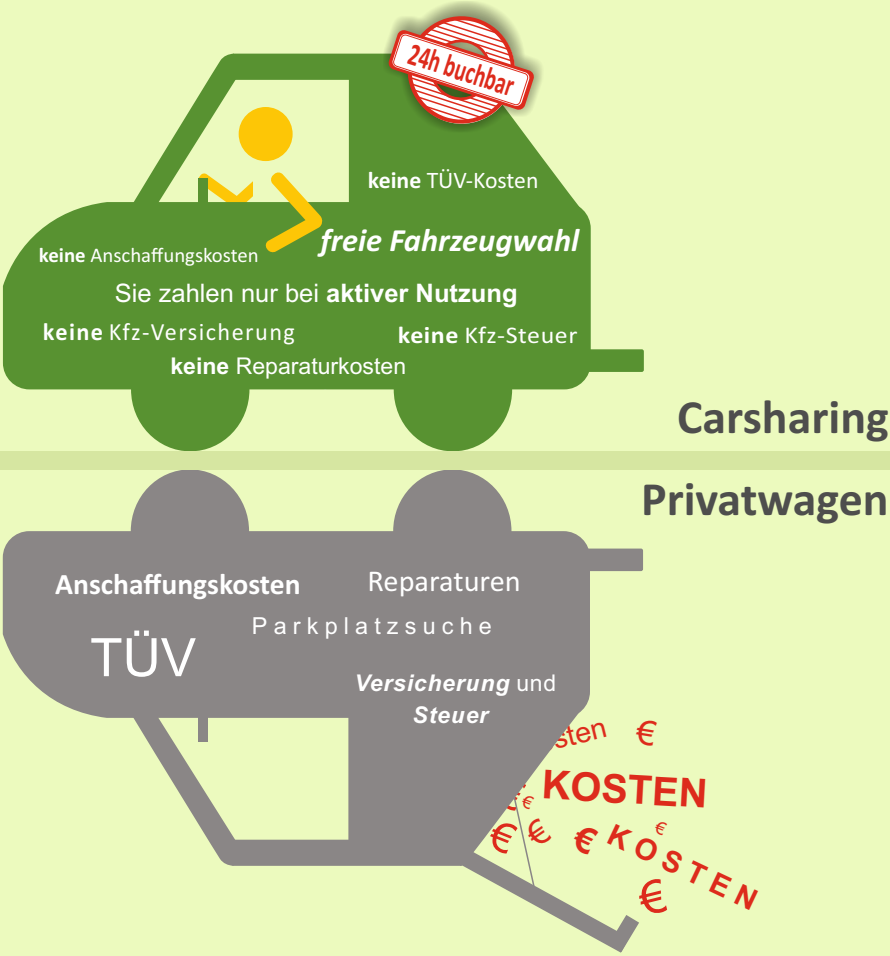
Was ist Carsharing genau?

Carsharing bedeutet im übertragenen Sinne „ein Auto teilen“, das nicht zu Ihrem persönlichen Autobestand gehört. Dazu können Sie aus den vielseitigen Fahrzeugangeboten eines Carsharing-Anbieters ein für Ihre Aktivitäten ideales Fahrzeug buchen. Sie bezahlen also nur für die Nutzung des Fahrzeugs, Fixkosten wie Steuer und Versicherung entfallen. Die Carsharing-Kosten berechnen sich anhand der Buchungsdauer und der zurückgelegten Fahrstrecke. Sie buchen das Fahrzeug Ihrer Wahl, holen es an der Carsharing-Station ab und stellen es dort bei Fahrtende wieder ab.



Neugierig? Doch was erwartet Sie als Carsharing-Mitglied?

Das Carsharing Konzept bietet Ihnen zahlreiche **Vorteile**.



Überzeugt?

Ob und wie viel Geld Sie mit Carsharing sparen können, zeigen Ihnen die folgenden Fallbeispiele.

Torben Müller (38), Bürokaufmann

Herr Müller benutzt seinen neun Jahre alten Mittelklassewagen hauptsächlich, um zu seinem 18 km entfernten Arbeitsplatz zu pendeln. Sein Auto ist an 300 Tagen im Jahr im Einsatz und hat eine vergleichsweise hohe Jahresfahrleistung von 18.000 km. Da er vor seiner Haustüre eine Straßenbahnhaltestelle hat und sein Arbeitsplatz auch gut mit der Straßenbahn erreichbar ist, wäre es kein Problem, diese zu nutzen, und sich hierfür ein Jobticket zu kaufen. Herr Müller nimmt sich zukünftig vor, für kurze Fahrten, wie beispielsweise zum Bäcker, öfter das Fahrrad zu nutzen. Für alle anderen Fahrten, wie große Einkäufe, Besuch bei Freunden oder den Ausflug in die Berge möchte er Carsharing nutzen und sein eigenes Auto abgeben. So viel könnte Herr Müller dann einsparen:

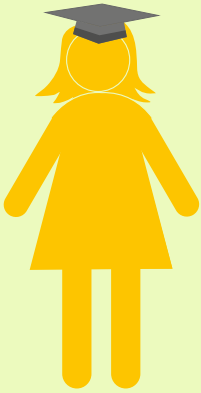
Emissionsminderung pro Jahr

Kohlenstoffdioxid CO_2	51%
Stickoxide NO_x	43%
Feinstaub PM	14%

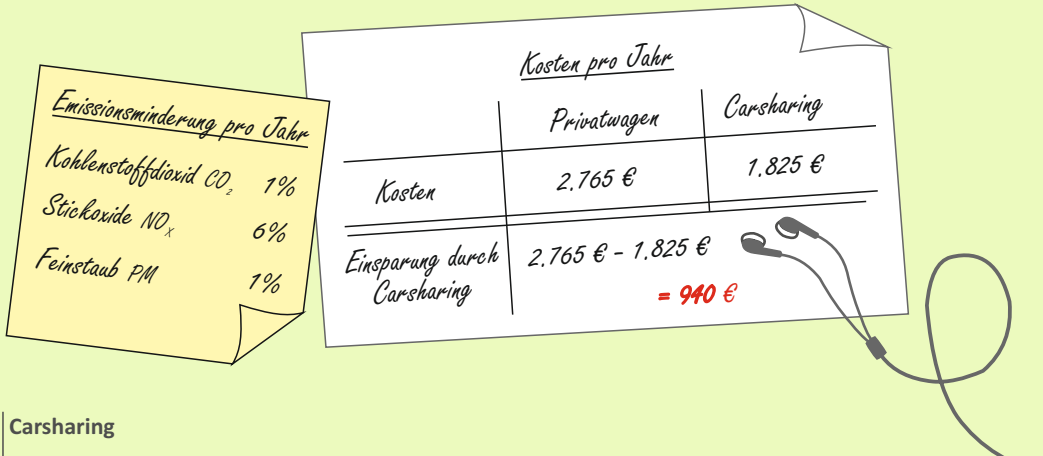
Kosten pro Jahr

	Kosten	Summe
mit Privatwagen	6.750 €	6.750 €
ohne Privatwagen	Carsharing: 3.670 € ÖV-Jobticket: 490€	4.160 €
Einsparung durch Carsharing	6.750 € - 4.160 €	**2.590 €**

Helena Schmitt (22), Studentin



Helena Schmitt ist zum Studium bei ihren Eltern ausgezogen und wohnt jetzt in einer Studentenstadt. Um zur Uni zu fahren, sich mit ihren Freunden zu treffen oder zum Shoppen zu gehen braucht sie ihr Auto nicht. Für diese Wege nutzt sie ihr Fahrrad oder die Straßenbahn. Ihr Auto (Kleinwagen, drei Jahre) nutzt sie daher nur, wenn sie sperrige Gegenstände transportieren muss, beispielsweise den Getränkeeinkauf für ihre WG, oder um zum Tennistraining zu fahren. Zweimal im Monat besucht sie ihre Eltern im 160 km entfernten Heimatort. Helenas Auto hat eine Jahresfahrleistung von 6.000 km und an insgesamt 180 Tagen im Jahr wird das Auto nicht genutzt. Die Einsparung durch Carsharing, wenn sie auf das eigene Auto verzichten würde, beträgt:



Emissionsminderung pro Jahr

Kohlenstoffdioxid CO_2	1%
Stickoxide NO_x	6%
Feinstaub PM	1%

Kosten pro Jahr

	Privatwagen	Carsharing
Kosten	2.765 €	1.825 €
Einsparung durch Carsharing	2.765 € - 1.825 € = 940 €	

Birgit Maier (42), Frisörin und zweifache Mutter

Familie Maier besitzt zwei Autos. Der Erstwagen wird hauptsächlich von Herrn Maier genutzt, um zu seinem 35 km entfernten Arbeitsplatz zu fahren. Frau Maier nutzt für die Fahrt zu ihrer Teilzeitstelle in einem drei km entfernten Frisörsalon das Fahrrad. Trotzdem hat Familie Maier einen acht Jahre alten Zweitwagen. Frau Maier nutzt diesen für den Wocheneinkauf und um ihre Kinder zum Sport oder zum Arzt zu fahren. Insgesamt hat der Kleinwagen mit 3.100 km eine eher geringe Jahresfahrleistung und steht an 260 Tagen im Jahr ungenutzt vor der Haustür. Für weitere Strecken, wie den Besuch bei den Großeltern, nutzt Familie Maier immer den größeren Erstwagen. Würden sie ihren Zweitwagen abschaffen und Carsharing-Mitglied werden, dann könnte die Familie über 1.000 € im Jahr einsparen:

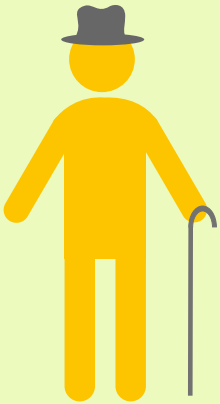
Emissionsminderung pro Jahr

Kohlenstoffdioxid CO_2	27%
Stickoxide NO_x	44%
Feinstaub PM	2%

Kosten pro Jahr

	Privatwagen	Carsharing
Kosten	3.260 €	2.030 €
Einsparung durch Carsharing	3.260 € - 2.030 € = **1.230 €**	

Alfons Schröder (68), Rentner



Herr Schröder besitzt einen vier Jahre alten Kompaktwagen, den er hauptsächlich für kurze Strecken nutzt. Meist fährt er mit dem Auto zum Einkaufen oder zum Seniorentreff. Jedes Jahr zu Weihnachten besucht er seine 340 km entfernt lebende Tochter und deren Familie. Insgesamt kommt Herr Schröders Auto auf eine eher geringe Jahresfahrleistung von rund 4.100 km und an 190 Tagen im Jahr steht das Auto in der Garage. Würde er in Zukunft statt seines Autos ein Carsharing-Fahrzeug nutzen und auf sein Auto verzichten, könnte er Folgendes einsparen:

Emissionsminderung pro Jahr

Kohlenstoffdioxid CO_2	6%
Stickoxide NO_x	1%
Feinstaub PM	17%

Kosten pro Jahr

	Privatwagen	Carsharing
Kosten	3.275 €	2.410 €
Einsparung durch Carsharing	3.275 € - 2.410 € = 865 €	

Sie können sich keinem der Fallbeispiele zuordnen oder sind noch nicht überzeugt? Hier kommen noch ein paar wichtige **Fakten**:

Wussten Sie, dass Autos in Deutschland im Mittel an 142 Tagen im Jahr nur stehen und nicht genutzt werden?

Wussten Sie, dass ein Weg mit dem Auto im Schnitt 17 km beträgt und das Auto eine Art Allzweckmittel ist, da es sowohl für sehr kurze Fahrten, beispielsweise zum Briefkasten, aber auch für lange Fahrten in den Urlaub genutzt wird?

Wussten Sie, dass es in Deutschland rund 4.600 Carsharing-Stationen in 537 Städten und Gemeinden gibt? Vielleicht befindet sich ja ein Standort in Ihrer Nähe?

Wussten Sie, dass 2017 ein „Gesetz zur Bevorrechtigung des Carsharing“, das sogenannte Carsharingesetz, beschlossen wurde? In diesem werden Maßnahmen zur Bevorrechtigung von Carsharing-Fahrzeugen geregelt, beispielsweise für das Parken.

Wussten Sie, dass Sie bei Carsharing verschiedene Versicherungstarife wählen können, beispielsweise mit und ohne Selbstbeteiligung?

Wussten Sie, dass ein Viertel der in Deutschland zugelassenen Autos eine Jahresfahrleistung unter 6.500 km hat und dass diese Autos an 70 % aller Tage im Jahr ungenutzt in der Garage oder vor der Haustür stehen?

Welche Meinung haben Sie nun zu Carsharing:
Ist es ein lohnenswertes Projekt für Sie?

☐ **JA**
☐ **NEIN**

Impressum

Herausgeber
Institut für Verkehrswesen (IfV) KIT Karlsruhe

Gefördert durch
Landesministerium für Verkehr Baden-Württemberg

Projekt
Substitutionspotenziale der Pkw-Nutzung

Partner
ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
stadtmobil carsharing AG Stuttgart

Stand
20.12.2017