

TEXTE

150/2023

Abschlussbericht

Digitalisierung im Verkehr

Potentiale und Risiken für Umwelt und Klima

von:

Ibraheem Oluwatosin Adeniran, Jan Blechschmidt, Elija Deineko, Luise Fremder, Anton Galich, Greta Hettich, Stephan Kirsten, Gernot Liedtke, Jan Reher, Carina Thaller, Christian Winkler
Institut für Verkehrsforschung im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Berlin

Peter Vortisch, Verena Zeidler

Institut für Verkehrswesen am Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Christoph Heidt, Hinrich Helms, Jan Kraeck

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu), Heidelberg

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 150/2023

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3716 58 103 0
FB000860

Abschlussbericht

Digitalisierung im Verkehr

Potentiale und Risiken für Umwelt und Klima

von

Ibraheem Oluwatosin Adeniran, Jan Blechschmidt, Elija
Deineko, Luise Fremder, Anton Galich, Greta Hettich, Ste-
phan Kirsten, Gernot Liedtke, Jan Reher, Carina Thaller,
Christian Winkler

Institut für Verkehrsforschung im Deutschen Zentrum für
Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Berlin

Peter Vortisch, Verena Zeidler

Institut für Verkehrswesen am Karlsruhe Institut für Techno-
logie (KIT), Karlsruhe

Christoph Heidt, Hinrich Helms, Jan Kraeck

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
(ifeu), Heidelberg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum e.V. (DLR), Institut für Verkehrsforschung
Prof. Dr. Gernot Liedtke, Dr.-Ing. Christian Winkler, Dr.-Ing. Carina Thaller, Ibraheem Oluwatosin Adeniran, Jan Blechschmidt, Elija Deineko, Luise Fremder, Dr. Anton Galich, Greta Hettich, Stephan Kirsten, Jan Reher
Rudower Chaussee 7
12489 Berlin

Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Institut für Verkehrswesen
Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch, Verena Zeidler
Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu)
Christoph Heidt, Hinrich Helms, Jan Kraeck
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:

April 2022

Redaktion:

Fachgebiet I 2.1 „Umwelt und Verkehr“
Martyn Douglas

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, November 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Digitalisierung im Verkehr

Im Rahmen des Projektes werden im Wesentlichen die Bereiche vernetztes und automatisiertes Fahren sowie Veränderungen und Trends in Konsum und Produktion beleuchtet. Basierend auf einer breiten Datenbasis werden anhand von Modellen die Wirkungen der Digitalisierungstrends abgebildet und deren ökologische Effekte deutschlandweit abgeschätzt.

Das Forschungsprojekt „Digitalisierung im Verkehr – Potentiale und Risiken für Umwelt und Klima“ identifiziert verschiedenste Einflüsse der Digitalisierung, wie z.B. vernetztes und automatisiertes Fahren, auf den Ablauf des Verkehrs und die Marktdurchdringung sowie sich ändernde Nachfragestrukturen, sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr. Ausgehend von diesen Einflüssen werden anhand von Modellen die zu erwartenden Auswirkungen auf den Personen- und Güterverkehr, den Verkehrsfluss und die damit verbundenen Emissionen quantifiziert. So können Rückschlüsse auf die Effekte auf Umwelt und Klima gezogen werden.

Die methodische Bearbeitung des Forschungsprojekts umfasst strukturierte Literaturrecherchen und -analysen, qualitative Experteninterviews sowie Verkehrsnachfragemodellierungen auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene. Insbesondere wird ein Berechnungsinstrument zur Bilanzierung der verkehrlichen und ökologischen Effekte des physischen Einkaufsverkehrs, der Online-Bestellungen des PrivatkundInnensegments und des Lieferverkehrs in Deutschland entwickelt. Die ökologischen Auswirkungen der Veränderungen im Verkehr (Routenwahl, Transportmittelwahl und Verkehrsaufkommen), die durch die Zunahme der Digitalisierung verursacht werden, werden mit dem Emissionsberechnungsmodell TREMOD abgeschätzt.

Abstract: Digitalization in transport sector

In the framework of this project the fields of connected and automated driving as well as changes and trends in consumption and production are essentially investigated. Based on a broad database, models are used to illustrate the effects of digitization trends and to assess their ecological effects for Germany.

The research project "Digitization in transport sector – potentials and risks for the environment and climate" identifies various influences of digitization, such as connected and automated driving, on transport flows and the market penetration as well as changing demand structures, both in passenger and freight transport. Based on these influences, models are used to quantify the expected effects on passenger and freight transport, the transport flow and the associated emissions. In this way, conclusions are derived about the effects on the environment and climate.

The methodological processing of this research project includes structured literature research and analyses, qualitative expert interviews as well as transport demand modelling on a macroscopic and microscopic level. In particular, a calculation tool for assessing the transport-related and ecological effects of physical shopping transport, online shopping by the private customer segment and parcel transport in Germany is developed. The ecological effects of changes in transport (route choice, mode choice and transport volume) caused by the increase in digitalization are estimated using the emissions calculation model TREMOD.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	15
Abkürzungsverzeichnis.....	18
Zusammenfassung.....	19
Summary	29
1 Übergeordnete Zielstellung und struktureller Aufbau des Projektes	38
2 Modul A: Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens	40
2.1 Effekte digitaler Technologien in Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur für den Personenverkehr	40
2.1.1 Theoriebasierte Analyse der Auswirkungen auf den Verkehrsablauf	41
2.1.1.1 Fernstraße.....	42
2.1.1.2 Stadt.....	43
2.1.1.3 Integrierte Betrachtung verschiedener Streckentypen	45
2.1.1.4 Zusammenfassung	46
2.1.2 Szenarienbeschreibung zum automatisierten und vernetzten Fahren im Personenverkehr	47
2.1.3 Modellierung.....	54
2.1.3.1 Pkw-Besitz-Modellierung mit dem CAST-Modell.....	54
2.1.3.2 Aggregation der verkehrlichen Wirkungen in deutschlandweitem Netzmodell PTV Validate	55
2.1.3.3 Aggregierte Verkehrsnachfragemodellierung mittels RAMOS.....	55
2.1.3.4 Abschätzung der ökologischen Effekte: Methodisches Vorgehen	56
2.1.3.5 Anpassung der Verkehrssituationen.....	58
2.1.3.6 Modellschnittstellen	58
2.1.4 Ergebnisanalyse: Verkehrliche und ökologische Wirkungen der Automatisierung und des vernetzten Fahrens	60
2.1.4.1 Jahresfahr- und Jahresverkehrsleistung im Personenverkehr.....	60
2.1.4.2 THG- und Schadstoffemissionen infolge der Fahrleistungsänderung	65
2.1.4.3 Auslastung des Straßennetzes	66
2.1.4.5 Weitere ökologische Potentiale des automatisierten und vernetzten Fahrens.....	72
2.2 Effekte der fahrzeugseitigen Automatisierung im Wirtschaftsverkehr	76
2.2.1 Theoriebasierte Wirkungsanalyse: Automatisierte Lkw	77
2.2.2 Theoriebasierte Wirkungsanalyse: Platooning	77
2.2.3 Szenarienentwicklung zur Automatisierung im Güterverkehr	84

2.2.4	Güterverkehrsmodellierung.....	89
2.2.4.1	DEMO-GV: Modellierung der Verkehrsträger- und Verkehrsmittelwahl	89
2.2.4.2	Ergebnisse aus DEMO-GV	90
2.2.4.3	Auswirkungen auf Distributionsnetze	96
2.2.4.4	Modellierung der Loßgrößenwahl	110
2.3	Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen zum autonomen und vernetzten Fahren im Straßenverkehr	113
2.3.1	Einordnung der Effekte für die nationalen Klimaschutzziele.....	113
2.3.2	Mögliche Handlungsempfehlungen	115
3	Modul B1: Ökologische Wirkungen des Online-Handels im Vergleich zum stationären Handel	118
3.1	Theoriebasierte Analyse	118
3.1.1	Literaturanalyse im Personenverkehr als Grundlage für ein theoriebasiertes Konzept	119
3.1.2	Literaturanalyse zu Wirkungen von Logistik und Zustellverkehren.....	126
3.2	Multivariate Analysen von Einkaufsverkehr in Nationalen Verkehrsbefragungen (Top- Down-Ansatz).....	133
3.3	Theoriebasiertes Konzept zur Substituierbarkeit von Einkaufsverkehren durch Online- Handel nach Einkaufsfällen	148
3.4	Konzeption, Durchführung und Auswertung der empirischen Befragung zum Einkaufsverhalten	150
3.4.1	Konzeption und Durchführung der empirischen Befragung zum Einkaufsverhalten	150
3.4.2	Empiriebasiertes Konzept zur Substituierbarkeit von Einkaufsverkehren durch Online-Handel nach Einkaufsfällen	153
3.4.3	Ausgewählte Ergebnisse der deskriptiven Analyse	161
3.4.3.1	Soziodemographische und -ökonomische Charakteristika der ProbandInnen	161
3.4.3.2	Mobilitätsverhalten	166
3.4.3.3	Mobilitätsverhalten im Einkaufsverkehr	167
3.4.3.4	Beschreibung des Interneteinkaufsverhaltens	169
3.4.3.5	Beschreibung des Belieferungs- und Versandverhaltens	173
3.4.3.6	Bivariate Auswertung	182
3.5	Quantifizierung verkehrlicher und ökologischer Wirkungen von Logistik und Zustellverkehren	199
3.5.1	Urbane Wirtschaftsverkehrsmodellierung	199
3.5.1.1	Modellierung mittels MATSim und Jsprit nach Schröder et al. (2012).....	199
3.5.1.2	Modellierung mittels der Strategischen Verkehrsprognose nach Thaller (2018)	200
3.5.2	Szenario Same-Day- und Instant-Deliveries.....	202

3.5.2.1	Szenarienbeschreibung und Parametrisierung des Modells	203
3.5.2.2	Analyse der Simulationsergebnisse	206
3.5.3	Szenario Lebensmittellieferungen	211
3.5.3.1	Szenarienbeschreibung und Parametrisierung des Modells	211
3.5.3.2	Analyse der Simulationsergebnisse	217
3.5.4	Szenario Zustellungen zu Paketstationen	228
3.5.4.1	Szenarienbeschreibung und Parametrisierung des Modells	229
3.5.4.2	Analyse der Simulationsergebnisse	230
3.6	Implementierung der quantifizierten Wirkungszusammenhänge in einem Berechnungstool zur Bilanzierung der verkehrlichen Effekte des physischen Einkaufsverkehrs im Vergleich zum KEP-Verkehr	239
3.6.1	Beschreibung des entwickelten Berechnungstools	239
3.6.2	Ergebnisanalyse	241
3.7	Synthese und Handlungsempfehlungen	248
4	Komponente B2: Ökologische Optimierungspotentiale der Produktions- und Beschaffungslogistik.....	252
4.1	Logistiksektor zwischen Globalisierung, Industrie 4.0 und Online-Handel.....	252
4.2	Industrie 4.0	253
4.3	Smart Factory, Cyber-physische Systeme und Smart Products	254
4.4	Tracking and Tracing in der Transportlogistik.....	254
4.5	Data Science (Data Mining, Big Data, Machine Learning).....	255
4.6	Virtual und Augmented Reality.....	255
4.7	Forschungsbedarf zu ökologischen Optimierungspotentialen in der Produktions- und Beschaffungslogistik.....	256
5	Quellenverzeichnis	258
A	Anhang	276
A.1	Modellierungsergebnisse im Personenverkehr	277
A.2	Ergebnisse der Netzmodellierung mit PTV Validate	282
A.3	Fragebogen Digitalisierungsstudie	287
A.4	Ordinale Regression auf die Nutzungshäufigkeit des Online-Handels in Deutschland	300
A.5	Ordinale Regression auf die Nutzungshäufigkeit des Online-Handels in den USA.....	302
A.6	Ordinale Regression auf die Nutzungshäufigkeit des Online-Handels in England.....	303
A.7	Funktionsweise der eingesetzten Modelle	304
A.7.1	Pkw-Besitz-Modellierung mit dem CAST-Modell.....	304

A.7.2	Aggregation der verkehrlichen Wirkungen in deutschlandweitem Netzmodell PTV Validate	309
A.7.3	Aggregiertes, raumloses Verkehrsnachfragemodell RAMOS	314
A.7.4	Modellierung neuer Mobilitätsangebote (ACS/ARS) mit dem MaaS-Modell	332
A.7.5	Abschätzung der ökologischen Effekte: Methodisches Vorgehen	337
A.7.6	DEMO-GV: Modellierung der Verkehrsträger- und Verkehrsmittelwahl im Güterverkehr.....	342
A.7.7	Loßgrößenwahlmodell für den Straßengüterverkehr.....	354

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über die Arbeitspakete des Projektes und zu erwartende Ergebnisse.....	39
Abbildung 2: Automatisierungsgrade des automatisierten Fahrens	41
Abbildung 3: Unterschiede zwischen ACS und ARS.....	56
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Berechnungsablaufs in TREMOD	58
Abbildung 5: Modellschnittstellen	59
Abbildung 6: Jahresverkehrsleistung nach Hauptverkehrsmittel	61
Abbildung 7: Jahresfahrleistung nach Streckentyp (relative Anteile)	63
Abbildung 8: Jahresfahrleistung nach Streckentyp (absolute Distanzen)	64
Abbildung 9: THG-Emissionen des Personenverkehrs in Deutschland ohne Berücksichtigung von Änderungen des Verkehrsflusses.....	66
Abbildung 10: Zusätzliche Güterverkehrsbelastung in den Maximalszenarien im Vergleich zu 2017	68
Abbildung 11: Belastungszunahme im Personenverkehr im Maximalszenario 1 im Vergleich zu 2017	69
Abbildung 12: Streckenauslastung im Maximalszenario 1.....	69
Abbildung 13: Belastungsrückgang im Personenverkehr im Maximalszenario 2a im Vergleich zu 2017	70
Abbildung 14: Streckenauslastung im Maximalszenario 2a.....	70
Abbildung 15: THG-Emissionen des Personenverkehrs in Deutschland mit und ohne Berücksichtigung der Änderungen des Verkehrsflusses für das Jahr 2040.....	72
Abbildung 16: Kraftstoffersparnispotentiale für Lastkraftwagen im Platoon (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Veldhuizen et al. 2019).....	79
Abbildung 17: Kraftstoffersparnispotentiale eines Platoon im Vergleich zur Kolonne mit gesetzl. Mindestabstand	81
Abbildung 18: Kumulierte Auftretenshäufigkeit von mittleren Abständen zwischen Lkw auf Basis der BAST-Zählstellendaten	82
Abbildung 19: DEMO-GV: Vergleich der Simulationsergebnisse zur Verkehrsleistung nach Verkehrsträger.....	91
Abbildung 20: DEMO-GV: Vergleich der Simulationsergebnisse zur Verkehrsleistung nach Verkehrsträger (in Prozent)	92
Abbildung 21: DEMO-GV: Vergleich der Simulationsergebnisse zur Laufleistung pro Jahr nach Lkw-Typen	93
Abbildung 22: DEMO-GV: Vergleich der Simulationsergebnisse zur Laufleistung pro Jahr nach Lkw-Typen (in Prozent).....	94
Abbildung 23: THG-Emissionen des Güterverkehrs in Deutschland ohne Berücksichtigung von Änderungen des Verkehrsflusses.....	95
Abbildung 24 THG-Emissionen des Güterverkehrs in Deutschland mit und ohne Berücksichtigung der Änderungen des Verkehrsflusses und Platooning für das Jahr 2040	96

Abbildung 25: LRP-Heuristik zur Optimierung und Modellierung des deutschlandweiten Logistiknetzwerks	99
Abbildung 26: Georeferenzierte Standorte aus der Nielsen-Datenbank zum Lebensmitteleinzelhandel in Deutschland	101
Abbildung 27: Räumliche Verteilung der Distributionszentren am Beispiel einer ausgewählten Lebensmitteleinzelhandelskette	104
Abbildung 28: Vergleich der Tourencharakteristika zwischen Szenario D+ mit B	106
Abbildung 29: Vergleich der Simulationsergebnisse zum Fahrtenaufkommen	107
Abbildung 30: Vergleich der Simulationsergebnisse zur Gesamtleistung.....	108
Abbildung 31: Prozentuale Abweichung verschiedener verkehrlicher und ökonomischer Kennwerte zwischen den Szenarien B und D+	109
Abbildung 32: Vergleich der Simulationsergebnisse zu den Treibhausgasemissionen	110
Abbildung 33: Modal Split (Verkehrsaufkommen) für alle Wege	136
Abbildung 34: Modal Split (Verkehrsaufkommen) nur Einkaufswege	137
Abbildung 35: Modal Split nach Wegelänge – alle Wege (Verkehrsleistung)	138
Abbildung 36: Modal Split nach Wegelänge – nur Einkaufswege (Verkehrsleistung)	139
Abbildung 37: Online-Handel nach Altersgruppen in Deutschland	142
Abbildung 38: Online-Handel nach Altersgruppen in den USA.....	143
Abbildung 39: Online-Handel nach Altersgruppen in England.....	144
Abbildung 40: Struktur des Regressionsmodells.....	145
Abbildung 41: Struktureller Aufbau des Fragebogens	152
Abbildung 42: Einkaufshäufigkeit versus Wegelänge	157
Abbildung 43: Substitution eines Standardeinkaufsfalles.....	161
Abbildung 44: Anzahl der im Haushalt lebenden Personen.....	162
Abbildung 45: Berufliche Tätigkeit	163
Abbildung 46: Höchster formaler Bildungsabschluss.....	163
Abbildung 47: Nettoeinkommen pro Haushalt und Monat	164
Abbildung 48: Anzahl an Autos im Haushalt	165
Abbildung 49: Führerscheinbesitz bei Frauen.....	165
Abbildung 50: Führerscheinbesitz bei Männern	166
Abbildung 51: Verkehrsmittelnutzung	167
Abbildung 52: Übliches Hauptverkehrsmittel auf Einkaufswegen.....	168
Abbildung 53: Anteil der KäuferInnen in Prozent nach Produktgruppen (N=914)	170
Abbildung 54: Anteil der Internetkäufe in Prozent nach Produktgruppen (N=8.961)	171
Abbildung 55: Anzahl an Interneteinkäufen nach Produktgruppen	171
Abbildung 56: Anzahl an Interneteinkäufen nach Geschlecht und Alter	172
Abbildung 57: Genutzte Versandart (N=1.064).....	174
Abbildung 58: Bevorzugtes Lieferzeitfenster (N=164)	175

Abbildung 59: Bevorzugt genutzter Zustellort (N=919)	176
Abbildung 60: Alternativer Zustellort (N=727)	177
Abbildung 61: Anzahl an Rücksendungen nach Alter und Geschlecht.....	178
Abbildung 62: Abgabeort für Rücksendungen (N=345)	179
Abbildung 63: Entfernungen zum Abholen und Wegbringen von Bestellungen (N=211)	180
Abbildung 64: Verkehrsmittelnutzung für Online-Bestellungen	181
Abbildung 65: Zusätzliche Zahlungsbereitschaft.....	182
Abbildung 66: Modellstruktur von MATSim und Jsprit	200
Abbildung 67: Rückkopplungsansatz nach Thaller (2018) für das Fallbeispiel KEP- Markt in Berlin.....	201
Abbildung 68: SD-Modellstruktur zum Fallbeispiel KEP-Markt.....	202
Abbildung 69: Prozentuale Abweichung des Szenarios "Same-Day- und Instant- Delivery" vom Basisszenario für den KEP-Markt.....	209
Abbildung 70: THG-Emissionen im Fallbeispiel Same-Day- und Instant-Delivery für Berlin im Jahr 2017	210
Abbildung 71: Anteil der KundInnen, die Lebensmittel online kaufen, in ausgewählten EU-Ländern zwischen 2006 und 2018.....	216
Abbildung 72: Vergleich der Simulationsergebnisse der Szenarien Lebensmittelbelieferung: Fahrtenaufkommen	218
Abbildung 73: Vergleich der Simulationsergebnisse der Szenarien Lebensmittelbelieferung: Transportdistanz pro Tour	219
Abbildung 74: Vergleich der Simulationsergebnisse der Szenarien Lebensmittelbelieferung: Transportzeit pro Tour.....	220
Abbildung 75: Vergleich der Simulationsergebnisse der Szenarien Lebensmittelbelieferung: Transportkosten pro Tour.....	221
Abbildung 76: Prozentuale Abweichung der Szenarien „Lebensmittelbelieferung“ vom Basisszenario	222
Abbildung 77: THG-Emissionen im Fallbeispiel Lebensmittelbelieferung für Berlin im Jahr 2017	223
Abbildung 78: Fallbeispiel Paketstationen: Vergleich der Simulationsergebnisse zur Güternachfrage pro Jahr	231
Abbildung 79: Fallbeispiel Paketstationen: Vergleich der Simulationsergebnisse zu Laufleistung pro Jahr	232
Abbildung 80: Fallbeispiel Paketstationen: Vergleich der Simulationsergebnisse zu Laufleistung pro Jahr (Prozentuale Abweichung).....	233
Abbildung 81: THG-Emissionen im Fallbeispiel Paketzustellung für Berlin in den Jahren 2010 bis 2030	234
Abbildung 82: Fallbeispiel Paketstationen: Vergleich der Simulationsergebnisse zur durchschnittlichen Transportdistanz pro Tour	235
Abbildung 83: Fallbeispiel Paketstationen: Vergleich der Simulationsergebnisse zu Transportdistanz pro Tour (Prozentuale Abweichung)	236

Abbildung 84: Fallbeispiel Paketstationen: Vergleich der Simulationsergebnisse zu Gesamttransportkosten pro Jahr	237
Abbildung 85: Fallbeispiel Paketstationen: Vergleich der Simulationsergebnisse zu Gesamttransportkosten pro Jahr (Prozentuale Abweichung)	238
Abbildung 86: Fahrleistung des Einkaufs-, Abhol- und Versandverkehrs des MIV im Vergleich zur Laufleistung des Lieferverkehrs differenziert nach Ortsgröße in Deutschland (2018)	246
Abbildung 87: Treibhausgasemissionen in CO ₂ -Äquivalenten des Einkaufs-, Abhol- und Versandverkehrs des MIV im Vergleich zur Laufleistung des Lieferverkehrs differenziert nach Ortsgröße in Deutschland (2018).....	247
Abbildung 86: Belastungsänderung im Güterverkehr für die Szenarien 2040 A und B im Vergleich zu 2017	283
Abbildung 87: Belastungsänderung im Personenverkehr 2040 A im Vergleich zu 2017	283
Abbildung 88: Belastungsänderung im Personenverkehr 2040 B im Vergleich zu 2017	284
Abbildung 89: Belastungsänderung im Personenverkehr Maximalszenario 2b im Vergleich zu 2017	284
Abbildung 90: Streckenauslastung im Basisfall 2017	285
Abbildung 91: Streckenauslastung im Szenario 2040 A	285
Abbildung 92: Streckenauslastung im Szenario 2040 B	286
Abbildung 93: Streckenauslastung im Maximalszenario 2b.....	286
Abbildung 96: Übersicht des CAST-Grundmodells.....	306
Abbildung 97: Schematische Übersicht der Abläufe des Fahrzeuglebenszyklus in CAST	307
Abbildung 98: Übersicht des Outputs von CAST	307
Abbildung 99: Mögliche Pfade der Einflottung automatisierter Fahrzeuge in die Privat-Pkw-Flotte	308
Abbildung 100: Anteile der Automatisierungslevel an den Neuzulassungen in CAST im Zeitverlauf.....	309
Abbildung 101: Anteile der Automatisierungslevel am Pkw-Bestand in CAST im Zeitverlauf.....	309
Abbildung 102: Ermittlung der HBEFA-Anteile im Gesamtnetz	314
Abbildung 103: Stufen der aggregierten Nachfragemodellierung	315
Abbildung 104: Potentielle NutzerInnen für das automatisierte Fahren im Jahr 2017	317
Abbildung 105: Schematische Darstellung des Kohorteneffekts	319
Abbildung 106: Potentielle NutzerInnen für das automatisierte Fahren im Jahr 2030	320
Abbildung 107: Zusätzliche Nutzergruppen automatisierter Fahrzeuge	321
Abbildung 108: Nutzenfunktion und Generalisierter Aufwand	322
Abbildung 109: Geschwindigkeit nach Streckenlänge (und Raumtyp)	325

Abbildung 110: Tagesganglinien von Montag bis Sonntag nach der MiD 2017....	326
Abbildung 111: Zusammenhang zwischen generalisiertem Aufwand und Distanz	329
Abbildung 112: Gleichung zur Ermittlung der Fahrweiten im Szenariohorizont ..	330
Abbildung 113: Gegenüberstellung der Modal Splits der ViZ und des Basis- Szenarios.....	331
Abbildung 114: Übersicht der räumlichen Klassifizierungen und der Inputvariablen des MaaS-Modells	333
Abbildung 115: Schematische Darstellung des Berechnungsablaufs in TREMOD	338
Abbildung 116: CO ₂ -Emissionen von Pkw und Sattelzügen in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit nach HBEFA 4.1	339

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter in den Szenarien Automatisierung und Vernetzung im Personenverkehr	50
Tabelle 2: Anteile der Fahrleistung nach HBEFA-Klassen auf Autobahnen und Bundesstraßen.....	67
Tabelle 3: Änderung der mittleren spezifischen Emissionen für Pkw durch die Verkehrsverflüssigung am Beispiel der Maximalszenarien 1 und 2a für das Jahr 2040	71
Tabelle 4: Sensitivität „freeflow“ auf Energieverbrauch und Emissionen von Pkw auf Innerortsstraßen (ØDE 2040)	73
Tabelle 5: Sensitivität „freeflow“ und Tempolimit 120 km/h auf Energieverbrauch und Emissionen von Pkw auf Autobahnen (ØDE 2040)	73
Tabelle 6: Infrastrukturseitiger Energieverbrauch der Automatisierung (Stufe 4 und 5) in 2040.....	75
Tabelle 7: Kraftstoffersparnisse basiert auf Theorie, Simulation und Empirie für 14t und 28t Lkw	80
Tabelle 8: Einsparungseffekte aufgrund der verkehrlichen Situation als Offset zur Bestimmung der Minderungspotentiale durch Platooning.....	82
Tabelle 9: Analyse der Effekte des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge im Wirtschaftsverkehr	84
Tabelle 10: Rahmenbedingungen für die Szenarien	85
Tabelle 11: Überblick über relevante Parameter	86
Tabelle 12: Merkmale und deren Ausprägungen der vier entwickelten Szenarien	87
Tabelle 13: Ausgewählte Gütergruppen im Rahmen des Szenarienentwicklungsprozesses	88
Tabelle 14: Mittlere Emissionsfaktoren von Lkw >26t zGG im Jahr 2040 mit und ohne Berücksichtigung von Verflüssigungseffekten	95
Tabelle 15: Parametrisierung des Basisszenarios und des Szenarios Direktverkehre+ zur Automatisierung im Lebensmitteleinzelhandel	102
Tabelle 16: Sensitivitäten der Szenarien für die Loßgrößenwahlmodellierung	112
Tabelle 17: Potentielle Änderung der THG-Emissionen im Verkehrssektor durch die untersuchten Effekte des autonomen Fahrens für das Jahr 2040	113
Tabelle 18: Rechenbeispiel zum Einfluss des autonomen Fahrens für die Einhaltung eines Klimazielpfades für das Jahr 2040 (Werte zu THG-Emissionen in Mt CO ₂ -Äqu.)	114
Tabelle 19: Anteile des Umsatzes im Online-Handel- am Gesamtumsatz des Einzelhandels in Deutschland	123
Tabelle 20: Zeitliche Komponente unterschiedlicher Belieferungskonzepte	127
Tabelle 21: Analyse der Effekte von Zustellungskonzepten der Logistikdienstleistungsunternehmen	133
Tabelle 22: Zentrale Kennzahlen zur Bedeutung des Einkaufsverkehrs	135

Tabelle 23: Zentrale Kennzahlen zur Nutzung des Online-Handels*	140
Tabelle 24: Nutzungshäufigkeit von Online-Handel in den nationalen Verkehrserhebungen	145
Tabelle 25: Ergebnisübersicht der Regressionsanalysen	146
Tabelle 26: Repräsentative Stichprobe	152
Tabelle 27: Häufigkeit persönlicher Einkaufswege nach Produktgruppe	154
Tabelle 28: Wegelänge und Wegedauer nach Produktgruppen	155
Tabelle 29: Standardeinkaufsfälle nach Ortsgröße, Häufigkeit und Wegelänge ..	159
Tabelle 30: Anzahl an Interneteinkäufen nach Einkommen	173
Tabelle 31: Einflussfaktoren auf die Verkehrsmittelnutzung	184
Tabelle 32: Einflussfaktoren auf die Einkaufshäufigkeit unterschiedlicher Gütergruppen (persönliche Einkaufswege)	185
Tabelle 33: Einflussfaktoren auf die Verkehrsmittelnutzung auf persönlichen Einkaufswegen für unterschiedliche Gütergruppen.....	187
Tabelle 34: Einflussfaktoren auf die bei persönlichen Einkaufswegen zurückgelegte Distanz und Wegedauer nach unterschiedlichen Gütergruppen	189
Tabelle 35: Bivariate Auswertung zum Online-Einkaufsverhalten sowie Bestell- und Rücksendeverhalten von Privatpersonen.....	193
Tabelle 36: Zusammenfassung des Negativ Binomialmodells	198
Tabelle 37: Parametrisierung des Basisszenarios für das Fallbeispiel "Same-Day- und Instant-Delivery" (Basisjahr 2017).....	204
Tabelle 38: Fahrzeugcharakteristika eines Lastenfahrrads	205
Tabelle 39: Präferierte Zeitfenster der PrivatkundInnen von Paketdienstleistungsunternehmen	206
Tabelle 40: Simulationsergebnisse des Szenarios "Same-Day- und Instant-Delivery" (SID) im Vergleich zum Basisszenario (B) für den Paketmarkt	207
Tabelle 41: Parametrisierung des Basisszenarios.....	212
Tabelle 42: Simulationsergebnisse des Szenarios „Lebensmittelbelieferung auf der Letzten Meile“	223
Tabelle 43: Parametrisierung des Szenarios „Paketstationen“	229
Tabelle 44: Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland (2018) ..	242
Tabelle 45: Anzahl an Online-Einkäufern differenziert nach Ortsgrößen in Deutschland (2018)	242
Tabelle 46: Anzahl der Sendungen differenziert nach Ortsgrößen in Deutschland (2018).....	243
Tabelle 47: Fahrleistung insgesamt zu Zustellorten differenziert nach Ortsgrößen in Deutschland (2018)	244
Tabelle 48: Fahrleistung insgesamt zu Abgabeorten differenziert nach Ortsgrößen in Deutschland (2018)	244
Tabelle 49: Sendungen differenziert nach gewählten Zustell- und Abgabeort differenziert nach Ortsgrößen in Deutschland (2018)	245

Tabelle 50: Anzahl der Touren des Lieferverkehrs differenziert nach Ortsgrößen in Deutschland (2018)	245
Tabelle 51: THG-Emissionen pro Fahrt bzw. Tour in kg CO ₂ -Äqu/Tour (inkl. Vorkette) (Median)	248
Tabelle 52: Logistikbereiche und ihre Aufgaben im Überblick.....	252
Tabelle 53: Jahresverkehrsleistung und Jahresfahrleistung nach Verkehrsmittel im Basisjahr und in den Szenarien.....	277
Tabelle 54: Jahresfahrleistung nach Streckentyp im Basisjahr und in den Szenarien	280
Tabelle 55: Übersicht der Einflussvariablen der drei Submodelle in CAST	304
Tabelle 56: Differenzierte Kapazitätsänderungen der Straßeninfrastruktur durch die Automatisierung	310
Tabelle 57: Vergleich der Anteile am Verkehrsaufkommen nach Raumtyp in RAMOS und Validate	312
Tabelle 58: Klassengrenzen zur Ermittlung der HBEFA-Verkehrszustände im Validate-Modell	314
Tabelle 59: Inputgrößen für das aggregierte Nachfragemodell	315
Tabelle 60: Zeitwerte für den Analyse- und Szenariohorizont.....	323
Tabelle 61: Annahmen zu den Verkehrsmittel-Alternativen	324
Tabelle 62: Einflusstärke der Inputgrößen und strukturellen Anpassungen	332
Tabelle 63: Übersicht der Kostenkomponenten und Werte der Betriebskosten des ACS bzw. ARS	335
Tabelle 64: Pkw-Bestand in den Szenarien nach Antriebsarten in Millionen Fahrzeugen	340
Tabelle 65: Basis-THG-Emissionsfaktoren für den Personen- und Güterverkehr .	341
Tabelle 66: Bundesweite Fahrleistungen im Pkw-Verkehr in Mrd. Fahrzeug-km.	342
Tabelle 67: Bundesweite Verkehrsleistungen im öffentlichen Personenverkehr in Mrd. Pkm	342
Tabelle 68: Bundesweite Fahrleistungen im Lkw-Verkehr in Mrd. Fahrzeug-km .	342
Tabelle 69: Bundesweite Verkehrsleistungen im Güterverkehr in Mrd. Tkm.....	342
Tabelle 70: Zuordnung jeder Güterklassen (NST-2007-Klassifikation) nach Güter-Cluster.....	350
Tabelle 71: Geschätzte Parameterwerte von α und γ in Abhängigkeit der Güter-Cluster.....	352
Tabelle 72: Losgrößenwahlmodell nach Segmenten	356

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Adaptive Cruise Control
ACS	Automatisiertes Carsharing
APV	LAGA-Ausschuss für Produktverantwortung; FV
ARS	Automatisiertes Ridesharing
BAB	Bundesautobahn
BGBI	Bundesgesetzblatt
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BV Glas	Bundesverband Glasindustrie e.V., Düsseldorf
CACC	Cooperative Adaptive Cruise Control
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
DiätV	Diätverordnung
DLMB	Deutsches Lebensmittelbuch
FrSaftErfrischGetrV	Verordnung über Fruchtsaft, einige ähnliche Erzeugnisse, Fruchtnektar und koffeinhaltige Erfrischungsgetränke (Fruchtsaft- und Erfrischungsgetränkeverordnung)
GDB	Genossenschaft Deutscher Brunnen e.G., Bonn
GfK	GfK SE, Nürnberg
ggü.	gegenüber
GVM	GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH, Mainz
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
KV	Kombinierter Verkehr
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LCV	Light Commercial Vehicle
LTE	Long Term Evolution
Möve	Mehrweg- und ökologisch vorteilhafte Einweggetränke
öve	ökologisch vorteilhafte Einweggetränke
SBA	Streckenbeeinflussungsanlage
SZM	Sattelzugmaschine
UBA	Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
VdF	Verband der deutschen Fruchtsaft-Industrie e.V., Bonn
VerpackV	Verpackungsverordnung
VDM	Verband Deutscher Mineralbrunnen e.V., Bonn
v. H.	Von Hundert
wafg	Wirtschaftsvereinigung Alkoholfreie Getränke e.V., Berlin
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

Zusammenfassung

Das Projekt „Digitalisierung im Verkehr – Potenziale und Risiken für Umwelt und Klima“ identifiziert verschiedenste Einflüsse der Digitalisierung, wie z. B. vernetztes und automatisiertes Fahren, auf den Ablauf des Verkehrs, sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr. Die methodische Bearbeitung des Forschungsprojekts umfasst strukturierte Literaturrecherchen und -analysen, qualitative Experteninterviews sowie Verkehrsnachfragemodellierungen auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene. Im Forschungsfokus stehen vier Bereiche (im Weiteren als Komponenten bezeichnet): (1) die Straßen- und Schieneninfrastruktur (**infrastrukturseitige Digitalisierung**), (2) die Fahrzeugtechnik in Privat- und Nutzfahrzeugen (**fahrzeugseitige Digitalisierung**), (3) das Konsum- und Einkaufsverhalten (**Ausweitung des Online-Handels**) sowie (4) die **Produktions- und Beschaffungslogistik**.

Modul A: Verkehrliche und ökologische Wirkungen der Automatisierung und des vernetzten Fahrens im Verkehr

Im **Modul A** werden zunächst die **verkehrlichen und ökologischen Wirkungen der Automatisierung und des vernetzten Fahrens sowohl im Personenverkehr als auch im Güterverkehr in Deutschland** mittels ausgewählter Modellierungsansätze untersucht.

Zur Untersuchung der verkehrlichen Wirkungen von **Automatisierung im Personenverkehr** wurde zwischen drei Entwicklungspfaden und insgesamt acht Szenarien unterschieden. Die Szenarien differenzieren sich vor allem im Hinblick auf den Anteil an vernetzten und automatisierten Fahrzeugen am gesamten Pkw-Bestand in Deutschland. Der **Entwicklungspfad A** beinhaltet die Referenzszenarien für die Jahre 2030 und 2040, die sich durch einen vergleichsweise geringen Grad an Automatisierung auszeichnen. Im Jahr **2030 im Referenzszenario A** ist die Durchdringung der Automatisierungsstufen im Bestand privat genutzter Fahrzeuge kaum vorangeschritten. Auch im Jahr **2040 des Referenzszenarios A** sind noch keine Fahrzeuge mit Automatisierungslevel 4 oder 5 für den privaten Erwerb verfügbar und es gibt keine vernetzten Fahrzeuge im privaten Pkw-Bestand. Jedoch ist der Anteil der Fahrzeuge mit Automatisierungsstufe 2 und 3 am privaten Pkw-Bestand gestiegen.

Entwicklungspfad B beinhaltet drei Szenarien, die sich im Hinblick auf den Grad an Automatisierung unterscheiden. Im Jahr **2030 des Szenarios B** ist die Automatisierung im Vergleich zum Entwicklungspfad A bereits deutlich stärker vorangeschritten und Fahrzeuge der Automatisierungsstufen 4 und 5 sind auch für den privaten Erwerb verfügbar. Im Jahr **2040 des Szenarios B** sind die Anschaffungskosten für automatisierte Fahrzeuge im Vergleich zum Jahr 2030 deutlich gesunken. Dadurch ist auch der Anteil an Fahrzeugen mit Automatisierungslevel 4 und 5 gestiegen. Dies spiegelt sich ebenfalls in einem relativ hohen Anteil an vernetzten Fahrzeugen im privaten Pkw-Bestand wieder. Im **Szenario B+ (2040)** sind die Anteile der verschiedenen Automatisierungsstufen am privaten Pkw-Bestand die gleichen wie im Szenario B im Jahr 2040. Der Unterschied liegt allerdings darin, dass im Szenario B+ auch geteilte automatisierte Mobilitätsangebote, wie Car- und Ridesharing-Systeme, verfügbar sind.

In den Maximalszenarien wird betrachtet, wie sich eine 100%ige Automatisierung sowohl privater als auch geteilter Fahrzeuge bzw. Fahrten auf den Verkehr auswirken könnte. Im **Maximalszenario 1** im Jahr 2040 verfügen alle Fahrzeuge des privaten Pkw-Bestandes über ein Automatisierungslevel von 5. Auch der Anteil der vernetzten Fahrzeuge beträgt 100%. Im **Maximalszenario 2a** wird davon ausgegangen, dass sich im Jahr 2040 der gesamte motorisierte Individualverkehr nicht mehr im Privatbesitz befindet, sondern nur noch als Carsharing-Bestand existiert. Der Mobilitätsbedarf der Privatpersonen wird dabei zum einen durch andere Verkehrsmittel, wie Fahrräder und den öffentlichen Personenverkehr, gedeckt. Zum anderen

kommen in Maximalszenario 2a automatisierte Mobilitätsangebote, wie Car- und Ridesharing-Systeme, zum Einsatz. Im **Maximalszenario 2b** gelten die gleichen Annahmen im Hinblick auf den Grad an Automatisierung. In diesem Szenario werden aber neben geteilten automatisierten Mobilitätsangeboten auch automatisierte Pkw im Privatbesitz genutzt.

Zur Operationalisierung der Szenarien wurde ein **Kopplungsansatz zwischen den eingesetzten Verkehrsmodellen** entwickelt, um sowohl verkehrliche Wirkungen der Automatisierung im Personen- und Güterverkehr mit und ohne Verflüssigungseffekte, als auch die resultierenden ökologischen Effekte abzuschätzen. Zunächst wird die Zusammensetzung des privaten Pkw-Bestandes nach Automatisierungslevel in dem Modell CAST (DLR-VF) ermittelt. Diese wird an das Netzmodell PTV Validate (KIT) übergeben, welches die zu erwartenden Kapazitätsveränderungen im Straßennetz berechnet. Sowohl die Kapazitätsveränderungen als auch die Zusammensetzung des privaten Pkw-Bestandes werden anschließend in dem Modell RAMOS (DLR-VF) genutzt, um die veränderte Verkehrsnachfrage nach der Einführung automatisierter Fahrzeuge zu bestimmen. Im MaaS-Modell wird das Angebot automatisierter Car- und Ridesharing-Fahrzeuge modelliert. Da die Verfügbarkeit von automatisierten Car- und Ridesharing-Fahrzeugen von deren Nutzung in RAMOS abhängt und die Nutzung wiederum von der Verfügbarkeit beeinflusst wird, sind die beiden Modelle RAMOS und MaaS zueinander rückgekoppelt. Im nächsten Schritt wird die ermittelte Verkehrsnachfrage von RAMOS an PTV Validate übergeben, das auf dieser Basis die Veränderung der Verkehrszustände bestimmt. Da für die Bestimmung der Verkehrszustände die Berücksichtigung des Straßengüterverkehrs notwendig ist, werden an dieser Stelle auch die Ergebnisse der fahrzeugseitigen Automatisierung im Güterverkehr berücksichtigt. Konkret wird dabei die Güterverkehrsnachfrage differenziert nach Verkehrsmodi und Lkw-Typen, die mittels des makroskopischen Güterverkehrsmodells DEMO-GV (DLR-VF) generiert wird, an PTV Validate transferiert. Die in RAMOS und DEMO-GV ermittelte Nachfrage im Personen- und Güterverkehr sowie die Veränderung der Verkehrszustände aus PTV Validate werden schließlich an das Modell TREMOD des ifeu übermittelt. Mittels TREMOD werden die in den verschiedenen Szenarien ausgestoßenen Emissionen berechnet.

Im Fokus der Analysen der **verkehrlichen Wirkungen der Automatisierung im Personenverkehr** standen Auswirkungen auf die Verkehrsleistung. Die Ergebnisse zeigen, dass ein geringer Grad an Automatisierung auch nur geringe Auswirkungen auf den Personenverkehr haben dürfte. Alle Szenarien mit einem höheren Grad an Automatisierung zeigen hingegen, dass dies immer zu Gunsten des motorisierten Individualverkehrs und auf Kosten des Öffentlichen Personenverkehrs geht, wenn nicht gleichzeitig automatisierte Car- und Ridesharing-Angebote eingeführt werden. Zugleich wird in allen Szenarien mit einem hohen Grad an Automatisierung deutlich, dass durch die Einführung automatisierter Car- und Ridesharing-Angebote die Verkehrsleistung des motorisierten Individualverkehrs sinkt. Eine vollständige Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs auf die anderen Verkehrsmodi im Jahr 2040 würde den Anteil der automatisierten Car- und Ridesharing-Angebote und des Öffentlichen Personenverkehrs an der Verkehrsleistung enorm ansteigen lassen und könnte nur durch einen massiven Ausbau des Streckennetzes des Öffentlichen Personenverkehrs bewerkstelligt werden.

Aufbauend auf den prognostizierten Nachfrageänderungen und Zusammensetzungen der Fahrzeugflotten in den Szenarien erfolgten **Abschätzungen der verkehrlichen Wirkungen im Kfz-Verkehr durch die Automatisierung der Flotte im deutschlandweiten Netzmodell PTV Validate**. Auf Basis von Ergebnissen einer Literaturrecherche und von Simulationsmodellen wurden Prognosen der Kapazitätsveränderung für den jeweiligen Durchdringungsgrad mit automatisierten Fahrfunktionen für verschiedene Infrastrukturtypen getroffen und im Modell abgebildet. Dabei zeigt sich, dass deutliche Veränderungen der Kapazität erst bei Marktdurchdringungsgraden mit hochautomatisierten Fahrzeugen von über 50% zu erwarten sind. Bei niedrigen bis

mittleren Durchdringungsgraden nehmen die Kapazitäten zunächst leicht ab, bevor sie bei hohen Durchdringungsgraden schließlich über das heutige Niveau hinaus ansteigen. Dies äußert sich im Referenzszenario 2040 A in einer Kapazitätsreduktion von ca. 3% im Gesamtnetz. Bei 100% Marktdurchdringung mit vernetzten und automatisierten Fahrzeugen sind auf Autobahnen durchschnittliche Kapazitätssteigerungen von durchschnittlich 40% möglich. Im Stadtverkehr können nach derzeitigem Wissensstand keine exakten Kapazitätssteigerungen prognostiziert werden. Zwar ist anzunehmen, dass die Kapazitäten an Knotenpunkten aufgrund geringerer Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen zunehmen. Die Wechselwirkungen mit dem nicht-motorisierten Verkehr und anderen Nutzungen im Straßenraum (Liefersdienste, Parken, etc.) sind aber unbekannt. Ebenfalls ist anzunehmen, dass die Kapazitätszunahmen an den Knotenpunkten aufgrund der Anforderungen des nicht-motorisierten Verkehrs begrenzter als auf Autobahnen sind.

Die **emissionsseitigen Wirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Personenverkehr** sind durch verschiedene Faktoren bedingt. In den meisten der untersuchten Szenarien führten zunehmende Automatisierungs- und Vernetzungsgrade zur Zunahme der Pkw-Verkehrsleistung und damit auch der THG-Emissionen. Wären alle Pkw automatisiert vollvernetzt, aber ausschließlich im Privatbesitz, steigen die Emissionen in 2040 sogar um 33% gegenüber dem Referenzszenario. Im anderen Extremfall, nämlich einer kompletten Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs auf automatisiertes Ride Sharing, Bus und Bahn, sinken die Emissionen 2040 um 35% gegenüber dem Referenzszenario.

Der Einfluss des autonomen Fahrens auf den Verkehrsfluss auf Autobahnen und Bundesstraßen führt zwar zu einer Reduktion der THG-Emissionen, allerdings sind die Effekte wegen höherer Fahrgeschwindigkeiten im flüssigen Verkehr begrenzt. So sinken die THG-Emissionen des Personenverkehrs im Maximalszenario 1 aufgrund des geänderten Verkehrsflusses um 3%, im Maximalszenario 2a unter 1%. Ebenfalls wirkt sich die Verflüssigung positiv auf die Partikel- und Stickoxid-Emissionen aus. Größere positive Effekte wären in Verbindung mit einer weiteren Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit oder einer Verkehrsverflüssigung im Innerortsbereich möglich.

Zu zusätzlichen THG-Emissionen führt hingegen der Stromverbrauch der Vernetzungsinfrastruktur, welche zwischen 2,6% und 5,1% des Personenverkehrs ausmachen können.

Somit haben **Verkehrsnachfrage und Verkehrsmittelwahl den größten Einfluss auf die THG-Emissionen im Personenverkehr**. Hohe Automatisierungs- und Vernetzungsgrade in Verbindung mit Individualverkehr führen zu Zusatzemissionen. Durch signifikante Verlagerungen auf den öffentlichen Verkehr können jedoch THG-Einsparungen erreicht werden.

Zusätzlich wurden die **Effekte der fahrzeugseitigen Automatisierung im Güterverkehr** untersucht. Zunächst wurde der Stand der Forschung darüber wiedergegeben, welche Wirkungen durch die Automatisierung im Güterverkehr erzielt werden können. Danach erfolgte eine Szenarienentwicklung als Grundlage für die weitere Güterverkehrsmodellierung. Abschließend wurden jeweils die Ergebnisse aus der Modellierung präsentiert, die die verkehrlichen und ökologischen Effekte der Automatisierung im Güterverkehr aufzeigen. Hierbei wurde vornehmlich auf die Effekte der Automatisierung auf die Verkehrsträger- und Verkehrsmittelwahl, die Lößgrößenwahl sowie die Logistiknetzgestaltung im Detail eingegangen.

Als Vorbereitung für die modellseitige Abschätzung der Effekte automatisierter Fahrzeuge im Güterverkehr wurden die zu untersuchenden Szenarien für die Zeithorizonte 2030 und 2040 definiert und entwickelt. Fokus lag vor allem auf dem Einsatz von automatisierten Lkw und Platooning im Straßengüterverkehr. Dabei wurden vier Szenarien entwickelt. Beim **Szenario 1** wurden Platoons mit automatisierten Lkw im Hauptlauf auf Autobahnen zwischen mono- oder

multimodalen Umschlagknoten im Jahr **2030** eingesetzt. Es wurde angenommen, dass automatisierte Fahrzeuge primär in Systemverkehren für Stückgüter und bei Seehafenhinterlandverkehren Verwendung finden. Die automatisierten Lkw werden mit Lkw-FahrerInnen zur Überwachung besetzt. Beim **Szenario 2** kommt hinzu, dass fahrerlose Fahrzeuge im Jahr **2040** eingesetzt werden. Zudem finden an den Umschlagknoten automatisierte Umschlagtechnologien für Be- und Entladung Verwendung. Im **Szenario 3** wird davon ausgegangen, dass die Vorteile der Automatisierung für Direktverkehre sowie allgemein für vergleichsweise kleine Fahrzeuge verhältnismäßig größer als für große Fahrzeuge sind. Es wird angenommen, dass bereits im Jahr **2030** die Atomisierung der Sendungen durch flexible Direktverkehre autonomer Fahrzeuge unterstützt wird. Gerade im Bereich Handel und Industrie (B2B-Sektor) werden automatisierte Lkw zur Belieferung eingesetzt. Wie bereits in Szenario 1 werden die automatisierten Lkw mit Lkw-FahrerInnen zur Überwachung besetzt. Im **Szenario 4 (2040)** wird zusätzlich angenommen, dass fahrerlose Fahrzeuge eingesetzt werden. Zudem finden bei der Beladung in verladenden Unternehmen und bei der Entladung bei den EndkundInnen automatisierte Umschlagtechnologien Verwendung.

Zunächst wurden mittels des **makroskopischen Güterverkehrsnachfragemodells DEMO-GV** die Güterflüsse in Deutschland und dabei vornehmlich die **Effekte der Szenarien 1 und 2 auf die Verkehrsträger- und Verkehrsmittelwahl** abgeschätzt. Die Verkehrsleistung insgesamt und die der einzelnen Verkehrsträger unterscheiden sich vom Szenario 1 zum Basisszenario (2030) kaum. Auch die beiden Szenarien Basisszenario und Szenario 2 für das Jahr 2040 unterscheiden sich im Hinblick auf die Gesamtverkehrsleistung nur marginal. Nur zwischen den Verkehrsträgern kommt es hierbei zu einer Verlagerung. Im Szenario 2 verliert die Schiene über 13,2% an Verkehrsleistung im Vergleich zum Basisszenario. Auch per Binnenschiff werden um 8,2% weniger Güter transportiert. Im Vergleich dazu nimmt die Verkehrsleistung auf der Straße um annähernd 3,7% zu. Im Szenario 2 nimmt die Straße einen Anteil von über 80,3% und die Schiene einen Anteil von 14,3% ein. Im Basisszenario hatte die Schiene noch einen Anteil von 16,5% und die Straße 77,7%.

Die berechneten Auswirkungen auf die THG- und Luftschadstoffemissionen sind für das Jahr 2030 vernachlässigbar. Bis 2040 würden die THG-Emissionen zwar aufgrund der stärkeren Automatisierung und Nutzung fahrerloser Lkw und der damit verbundenen Fahrleistungszunahme um 3% gegenüber dem Basisszenario ansteigen. In Verbindung mit einer Vollautomatisierung und -vernetzung der Pkw und einer damit erzielbaren Verkehrsverflüssigung auf Autobahnen können die THG-Emissionen im Güterverkehr jedoch um fast 10% reduziert werden. Ferner sinken auch die Stickoxid-Emissionen deutlich aufgrund der Verkehrsverflüssigung. In der Summe sind damit THG-Emissionseinsparungen im Güterverkehr möglich.

Als Nächstes wurden die **Effekte der Automatisierung auf die Verkehrsleistung und Netzwerkstrukturen rein straßenbasierter Logistiksysteme** untersucht. Ein repräsentatives Netzwerk hierfür stellen **Distributionsnetzwerke im Lebensmitteleinzelhandel** dar. Hierbei werden die Effekte des entwickelten **Szenarios 4** abgeschätzt. Zu diesem Zweck wurde ein semi-kombinierter Ansatz zur Behandlung von großen Location Routing Problems (LRPs) entwickelt. Die entwickelte Metaheuristik sollte die Lösung für großräumige LR-Probleme in plausibler Zeit finden und die Analyse und Optimierung des gesamten, deutschlandweiten Güterverkehrsnetzes in Bezug auf mikroskopische Fahrzeugparameter ermöglichen. Das Verfahren basiert auf klassischen kapazitätsbeschränkten Vehicle Routing Problems (VRPs) mit Time Windows und Facility Location Problems (FLP) mit unbeschränkten Kapazitäten. Zur Lösung des VRP wird das Logistikverhaltensmodell Jsprit, entwickelt von Schröder et al. (2012), eingesetzt. Im Rahmen der Fallstudie Lebensmitteldistribution in Deutschland wird dieser methodische Ansatz operationalisiert und angewandt. Die Auswertung der Standortverteilung der Lager zeigt, dass sich die

Anzahl der Distributionszentren im Lebensmitteleinzelhandel um etwa 15% im Basisszenario (168 Lagerstandorte) im Vergleich zum Ist-Zustand (197 Lagerstandorte) reduziert. Die absolute Anzahl der Distributionszentren sinkt von 168 auf 120 Lager im gesamten System – demnach um annähernd 29%, wenn nur noch fahrerlose Lkw eingesetzt werden. Der Rückgang der Anzahl der Lager ist darauf zurückzuführen, dass in diesem Szenario verstärkt auf die leichten Lkw mit zGG von 7,5 t zurückgegriffen wird. Die gesamte Laufleistung ist mit annähernd 2,2 Mio. km um über 28% höher unter Einsatz von automatisierten Lkw als im Szenario B. Dabei werden aufgrund der Automatisierungsvorteile in Form von entfallenen Personalkosten rund 68% der Laufleistung mittels automatisierter Lkw 7,5 t zGG durchgeführt. Dies entspricht einem Wachstum von über 16% im Vergleich zum Basisszenario, in dem diese leichten Lkw nur einen Anteil von 52% einnahmen. Die Laufleistung mittels Lkw 26 t zGG reduziert sich um 42% und mittels Lkw 40 t zGG um 7,4% im Vergleich zum Basisszenario. Dieser Verlagerungseffekt von den schweren auf die leichten Lkw ist in erster Linie direkt auf die Anzahl und Standortlage der Distributionszentren zurückzuführen. Aufgrund der höheren Fahrleistung sind die Emissionen durch den Einsatz von automatisierten Lkw um ca. 14% höher als im Basisszenario, bei welchem die Lebensmitteltransporte jährlich etwas mehr als 250.000 Tonnen CO₂-Äquivalente verursachen. Damit ist die prozentuale Zunahme der Emissionen geringer als die der Fahrleistung, deren Zuwachs vor allem bei den Lkw mit 7,5 t zGG erfolgt, welche pro Kilometer einen geringeren Kraftstoffverbrauch als die größeren Fahrzeuge haben.

Einen weiteren Aspekt der **Automatisierung im Güterverkehr** stellt die **Veränderung der Losgrößen** dar. Um die Wahl der Losgröße modellseitig umsetzen zu können, wurde das Losgrößenwahlmodell für den Straßengüterverkehr nach Piendl et al. (2018) herangezogen. Auch wenn nicht alle Implikationen vollständig klar sind, gibt es Anzeichen, dass die Kosten für die kleinen Losgrößen relativ zu den großen Losgrößen am meisten sinken werden. Dies trifft vor allem beim Wegfall der FahrerIn zu. Fokus liegt bei der Modellierung der Szenarien auf Transporte mit einer Distanz von mehr als 150 km. Dabei wird nach folgenden Segmenten differenziert: (1) Zeitkritische Güter, (2) Spezielles, (3) Temperaturgeführte Lebensmittel sowie (4) Zeitunkritische Güter, inkl. Schüttgut. Wenn sich die Kostenstrukturen verändern, sind Veränderungen in den Marktanteilen der drei verschiedenen Verkehre Stückgut, Teilladung und Ganzladung zu erwarten. Unter der Annahme, dass die betrachteten Transporte repräsentativ sind, ergibt sich für die Stückgutverkehre ein maximaler Zugewinn von bis zu 8% bei den Verkehren über 150 km. Die segmentspezifische Analyse zeigt einen maximalen Zugewinn von bis zu 12%, vornehmlich für im Bereich der temperaturgeführten Lebensmittel. Für die Teilladungsverkehre lassen sich auch bei Kosteneinsparungen keine Zugewinne erwarten, da sie aufgrund der höheren Kosteneinsparungen bei den Stückgutverkehren gegenüber diesen mehr verlieren, als sie gegenüber den Gesamtladungsverkehren gewinnen. Die Ganzladungsverkehre verlieren bis zu 5% Marktanteil. Der Verlust kann sogar auf 6% für zeitkritische Güter steigen. Die Veränderungen sind insgesamt plausibel. Ein Vergleich zwischen den Segmenten zeigt, dass die reduzierten Kosten für Stückgutverkehre und Teilladungsverkehre den höchsten Effekt auf den temperaturgeführten Lebensmitteln haben.

Modul B1: Ökologische Wirkungen des Online-Handels gegenüber dem stationären Handel

Die Komponente B1 umfasst die **Bilanzierung der ökologischen Wirkungen des Online-Handels gegenüber dem stationären Handel ausgehend von den verkehrlichen Wirkungen im Personen- und Güterverkehr.**

Hierfür wurde zunächst der aktuelle Stand der Forschung zu diesem Thema in den Bereichen des Personenverkehrs und des Wirtschaftsverkehrs aufbereitet. Dabei stand im Personenverkehr das Einkaufsverhalten der VerbraucherInnen im Mittelpunkt. Im Wirtschaftsverkehr lag der Fokus auf den durch den Online-Handel erzeugten Paketzustellungen, die durch Kurier-,

Express- und Paket (KEP) Dienstleistungsunternehmen durchgeführt werden. Danach erfolgte die multivariate Analyse von Einkaufsverkehren auf Basis von nationalen Verkehrsbefragungen in Deutschland, den USA und England. Außerdem wurde im Dezember 2018 eine Online-Befragung durchgeführt, um spezifische Lücken in den nationalen Verkehrserhebungen schließen zu können. Auch die Online-Befragung basiert auf den Ergebnissen der Literaturanalysen und deckt alle relevanten Dimensionen ab: (i) allgemeines Mobilitätsverhalten, (ii) Einkaufsverhalten, (iii) Interneteinkäufe, (iv) Belieferungs- und Versandverhalten sowie (v) Sozioökonomie und -demographie. Insgesamt wurden 1.011 Personen befragt, die nach Alter, Geschlecht, Bundesland und Ortsgröße des Wohnortes repräsentativ für die Bevölkerung Deutschlands sind.

Bei den statistischen Analysen auf Basis der nationalen Verkehrserhebungen in Deutschland, den USA und England und der im Rahmen des Projektes durchgeführten Online-Befragung wurden ordinale und multinomiale Regressionsanalysen sowie Clusterverfahren und Regressionsbäume berechnet, um zu ermitteln, inwieweit die Einkäufe im Internet persönliche Einkaufswegen ersetzen. Als zentrales Ergebnis hierbei bleibt festzuhalten, dass es in Deutschland (noch) nicht zu einem Substitutionseffekt von persönlichen Einkaufswegen durch den Online-Handel kommt. Dies liegt unter anderem daran, dass Online-Handel in Deutschland im internationalen Vergleich noch nicht von sonderlich vielen Personen genutzt wird. Grundsätzlich konnte aber durchaus ein großes Substitutionspotential, insbesondere bei den persönlichen Einkaufswegen für Güter des täglichen Bedarfs wie z.B. Lebensmittel oder Drogerieartikel, festgestellt werden. Wenn der Online-Handel in Deutschland in Zukunft von weiteren Personen genutzt wird und dabei auch die Marktanteile in den unterschiedlichen Warengruppen weiter zunehmen, dann könnte es auch zu einer Einsparung von persönlichen Einkaufswegen kommen.

In Bezug auf das **Belieferungs- und Versandverhalten** werden auf Basis der durchgeführten Online-Befragung ausgewählte uni- und bivariate Auswertungen aufgezeigt. Für ihre im Internet getätigten Bestellungen haben die Befragten unterschiedliche Versandarten genutzt. 78% der Befragten haben bei ihren Bestellungen Standardversand mit Lieferung nach 1-3 Tagen ab Versand genutzt. 19% haben mindestens einmal den teureren Premiumversand mit Lieferung am nächsten Tag gewählt. Same-Day-Versand, mit Belieferung am Bestelltage, (meistens) zwischen 18 Uhr und 22 Uhr, wurde nur von 2% der Befragten genutzt. Instantversand, d. h. eine Lieferung innerhalb von 90 Minuten, wählen 0,19% der Befragten aus. Expressversand, d. h. Lieferung zu einem ausgewählten Zeitfenster oder Zeitpunkt, wurde von 1% verwendet. In Bezug auf die bevorzugten Lieferzeitfenster lässt sich feststellen, dass 35% der Befragten am liebsten zur Abendzeit (18 Uhr bis 22 Uhr) beliefert werden. Dagegen bevorzugen 30% den Nachmittag (14 Uhr bis 18 Uhr), 18% die Mittagszeit (12 Uhr bis 14 Uhr) und 17% den Vormittag (8 Uhr bis 12 Uhr) zur Belieferung.

Der Großteil der InterneteinkäuferInnen (80%) präferiert eine Zustellung der gekauften Ware zum Wohnort. 8% der KundInnen lassen sich Pakete gerne an eine Paketstation senden. Andere Zustellorte, wie der Arbeitsplatz, die nächste Postfiliale, die NachbarIn oder der nächste Pakethop sind nur für weniger als 5% der Befragten bevorzugte Optionen. Auch Vereinbarungen bzgl. des Zustellortes treffen nur sehr wenige der Befragten (2%) mit dem KEP-Dienstleister. Sollte ein Zustellversuch nach Hause seitens des Logistikdienstleistungsunternehmens von den Befragten verpasst worden sein, liefern diese die Bestellung in der Regel an einen anderen Ort. Für einen Großteil der Befragten ist dies dann die NachbarIn (51%). 34% der Befragten holen eine verpasste Sendung bei der nächsten Postfiliale ab und 9% beim nächsten Pakethop. Andere Alternativen kommen bei jeweils weniger als 5% der Befragten vor.

Von den im Internet gekauften Waren wird eine Reihe von Produkten wieder zurückgesendet. 346 Personen (41%) haben mindestens ein Paket zurückgesendet. Insgesamt wurden 946 Einkäufe, d. h. 11% aller Einkäufe, zurückgesendet. Im Mittel sind das 1,07 Pakete pro Person.

Hochgerechnet auf ein Jahr sind dies 4,27 Pakete pro Jahr und pro Person. Der Median (und der Mittelwert) der Anzahl an Rücksendungen liegt bei Frauen in den Altersgruppen bis 49 Jahre höher als bei Männern gleichen Alters. Die Sendungen, die zurückgeschickt werden, werden von mehr als der Hälfte der befragten Personen (58%) hierzu zur nächsten Postfiliale gebracht. Für ca. 30% ist der Paketshop günstiger gelegen und für ca. 8% sind es Paketstationen. Wird die bestellte Ware, beispielsweise aufgrund einer verpassten Lieferung, nicht zum Wohnort der Befragten gesendet, muss sie häufig abgeholt werden.

Die maximal zurückzuliegende Distanz liegt bei 30 km (für das Abholen des Pakets bei einer Paketstation). Aus verkehrlicher Perspektive ist neben der zurückzulegenden Entfernung zum Abhol- bzw. Rückgabeort von Sendungen vor allem das verwendete Verkehrsmittel von Relevanz. Das Auto nimmt überall eine wichtige Stellung ein, nur beim Abholen von der nächsten Postfiliale waren in der Stichprobe mehr Personen zu Fuß als mit dem Auto unterwegs.

Abschließend wurde auf zusätzliche Zahlungsbereitschaften eingegangen. Unterschieden wird bzgl. zusätzlicher Zahlungsbereitschaft der Befragten bei 1.) Lieferung zu einem gewünschten Zeitfenster, 2.) Lieferung zu Privat, 3.) Schneller Lieferung, 4.) gebündelter Lieferung, 5.) Lieferung mit nachhaltiger Verpackung und 6.) klimaneutraler Lieferung. Eine zusätzliche Zahlungsbereitschaft gibt es vor allem für Lieferungen zu einem gewünschten Zeitfenster sowie für Lieferungen mit nachhaltiger Verpackung. In diesen Fällen sind mehr als 50% der Befragten bereit, einen zusätzlichen Betrag zu zahlen. Im Falle der nachhaltigen Verpackung wären das für mehr als 40% der Befragten bis zu 2,50 Euro zusätzlich. 5% würden noch bis zu 5 Euro zusätzlich zahlen. Über diesen Betrag hinaus ist die zusätzliche Zahlungsbereitschaft für nachhaltige Verpackungen gering. Für Lieferungen zu einem gewünschten Zeitfenster ist sie in den Spitzen höher. Hier würden immerhin noch ca. 16% der Befragten bis zu 5 Euro extra bezahlen. Die geringste zusätzliche Zahlungsbereitschaft gibt es für schnelle und gebündelte Lieferungen. Ca. 78% der Befragten sind nicht bereit, hierfür zusätzliche Beträge aufzuwenden. In allen Fällen gibt es Einzelpersonen, die bereit sind 10 Euro und mehr für eine verbesserte Lieferung auszugeben.

Die **Quantifizierung der verkehrlichen Wirkungen** wird von DLR-VF modellseitig mit dem mikroskopischen Simulationsmodell Jsprit (Schröder et al. 2012) und der Strategischen Verkehrsprognose (Thaller 2018) abgebildet. Basierend darauf berechnen ifeu mittels TREMOD die **ökologischen Effekte**. Im Detail werden die drei **Sonderfälle Same-Day- und Instant-Deliveries, Lebensmittellieferungen und Zustellungen zu Paketstationen** untersucht. Als Untersuchungsgebiet wird Berlin verwendet.

Im Szenario **Same-Day- und Instant-Delivery** erfolgt die Distribution der Pakete zu Privatkunden zweistufig. Im ersten Schritt erfolgt die Distribution der nachgefragten Paketeinheiten vom Distributionszentrum zu den Mikro-Depots mit traditionell betriebenen Lkw 3,5 zul. GG. Im zweiten Schritt werden die KundInnen von ihnen nächst gelegenen Mikro-Depot zu den angegebenen Zeitfenstern durch Lastenfahrrädern beliefert. Dieses Logistikkonzept wird im Rahmen der Fallstudie untersucht. Im Vergleich zum Basisszenario wächst das Fahrtenaufkommen um den Faktor 1,8 an. Insgesamt werden 8.685 Touren im Vergleich zum Basisszenario, bei dem nur 3.088 Touren notwendig sind, durchgeführt. Im Vergleich zum Basisszenario sind zusätzliche 365 Fahrzeuge für die Auslieferung notwendig. Dies entspricht einem Zuwachs von 24 % zusätzlichen Fahrzeugen. Dagegen reduzieren sich die zurückgelegten Kilometer um 65,9 %, absolut um 109.836,22 km. Die Treibhausgasemissionen können sogar um 80% durch den Einsatz von elektrisch-betriebenen Lastenfahrrädern gemindert werden. Dies liegt vornehmlich daran, dass damit über 80,7% an Laufleistung durch Diesel-betriebene Lkw 3,5t zGG eingespart werden können.

Zur Abschätzung der **Wirkungen der Lebensmittellieferung an Privathaushalte** wird die vorhandene mikroskopische, verhaltensbasierte Verkehrssimulation MATSim (Balmer et al. 2009) und das integrierte Logistik-Modul Jsprit (Schröder et al. 2012) eingesetzt. Hierbei werden die bereits umgesetzten Fallbeispiele Lebensmitteldistribution (Gabler et al. 2013) und zum KEP-Verkehr (Thaller 2018) in Berlin herangezogen. Hierbei werden zwei Szenarien entwickelt. Im Szenario 1 wird angenommen, dass die Belieferung der Lebensmitteleinzelhandelsfilialen von den Depots in derselben Weise durchgeführt wird, wie im Basisszenario. Um nun die Belieferung der Privathaushalte mit Lebensmitteln abzubilden, werden die Filialen der Lebensmitteleinzelhändler als Depots bzw. Distributionszentren betrachtet. Von dort werden die Auslieferungen der Lebensmittel mit Lkw mit einem zul. GG von 3,5t und Lastenfahrrädern an die Wohnstandorte der PrivatkundInnen durchgeführt. Auch im Szenario 2 wird angenommen, dass die Belieferung der Lebensmitteleinzelhandelsfilialen von den Depots in derselben Weise durchgeführt wird, wie im Basisszenario. Der Unterschied ist hierbei, dass die Distribution zu den EndkundInnen direkt von den Distributionszentren aus erfolgt. Von den Distributionszentren werden die Auslieferungen der Lebensmittel mit Lkw mit einem zul. GG von 3,5t direkt an die Wohnstandorte der PrivatkundInnen durchgeführt.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass im Szenario 1A die Fahrten um den Faktor von annähernd 2, im Szenario 1B sogar um den Faktor 2,4 zunehmen. Bei S1A werden zu diesem Zweck über 37% mehr Fahrzeuge benötigt, im Gegensatz dazu in S1B sogar um annähernd 63% mehr Fahrzeuge, vornehmlich Lkw 3,5 t zGG und Lastenfahrräder. Im Gegensatz dazu nimmt das Fahrtenaufkommen bei Direktbelieferung der Lebensmittel zu den Wohnstandorten der Privathaushalte in S2A nur um 16,9% und in S2B um 29,5% zu. Zu diesem Zweck werden in S2A über 37,1% mehr Fahrzeuge, vornehmlich Lkw 3,5 t zGG benötigt, in S2B sogar um ca. 65% mehr Fahrzeuge. Die Laufleistung pro Tag wächst in S1A um 16,2% und im S1B um 23,2% an. Im Szenario 2A nimmt die Laufleistung um 19,5% und im S2B um 26,8% zu. Die Zusatzemissionen von Lebensmittelbelieferung sind mit ca. 0,6-1 Mt/a CO₂-Äqu. vergleichsweise gering, wobei auch hier die Nutzung von Elektrolastenträdern die niedrigsten Emissionen aufweist. Hier ist denkbar, dass sich durch Vermeidung privater Einkaufsverkehre mit dem Pkw sogar Emissionsreduktionen ergeben könnten.

Im nächsten Fallbeispiel wurden die Auswirkungen der **Paketstationen (PS)** auf den Güterverkehr im Detail betrachtet. Im Basisszenario wird angenommen, dass 100 Prozent der PrivatkundInnen die Belieferungsform Hauszustellung wählen. Im Szenario 1 wird die Annahme getroffen, dass 25 Prozent privater KundInnen die Belieferungsform Paketstationen nutzen. Im Szenario 2 lassen 50 Prozent der PrivatkundInnen ihre Pakete an die Paketstation von KEP-Dienstleistungsunternehmen liefern. Ferner werden in Szenario 3 75 Prozent private Sendungen an die Paketstation geliefert und im Szenario 4 100 Prozent. Die Analyse der zeitlichen Entwicklung der Laufleistung auf der Letzten Meile zeigt, dass im Basisszenario ein Wachstum von über 284,5% bis 2030 zu erwarten ist. Der Entwicklungsgraph des Basisszenarios weist ein quadratisches Wachstum auf. Ein Anteil von 25 % privater Nutzung von Packstationen bringt eine Reduzierung der Laufleistung von über 20% im Jahr 2030. Die Laufleistung weicht im Szenario 50% PS um durchschnittlich 32,7 % im Vergleich zum Basisszenario ab. Szenario 75% PS erreicht sogar 2030 eine relative Abweichung von 57%. Im Szenario 100% PS liegt die Laufleistung bereits 2009 unter -50 % Abweichung, die bis zu -77 % im Jahr 2030 abnimmt. Im Mittel werden in diesem Zeitraum 65,8 % Kilometer Laufleistung in der Stadt pro Jahr eingespart, Tendenz sinkend. Durch die kontinuierliche Zunahme der Laufleistung pro Jahr steigen die THG-Emissionen im Basisszenario, welches keine Nutzung von Paketstationen beinhaltet, von 10 kt CO₂-Äqu in 2010 auf über 30 kt CO₂-Äqu im Jahr 2030 an. Durch die Nutzung von Paketstationen und die damit verbundene Fahrleistungsreduktion können die Emissionen stark reduziert werden. Im Falle, dass alle Pakete an Paketstationen geliefert werden, liegen die THG-Emissionen selbst beim

angenommenen Anstieg der Paketlieferungen im Jahr 2030 nur bei ca. 7 kt CO₂-Äqu pro Jahr und damit um 77% niedriger als im Basisszenario 2030.

Ferner wurde ein **Berechnungsinstrument** entwickelt, das zur Bilanzierung der verkehrlichen und ökologischen Effekte des physischen Einkaufsverkehrs im Vergleich zum KEP-Verkehr dient. Dieses Instrument zeigt die **verkehrlichen und ökologischen Effekte des physischen Einkaufsverkehrs, der Online-Bestellungen des B2C-Segments und des Lieferverkehrs in Deutschland** auf. Dabei handelt es sich um eine Hochrechnung für die Bevölkerung in Deutschland 2018 auf Basis der Ergebnisse der Primärdatenerhebung und der Simulationsergebnisse aus der mikroskopischen Güterverkehrssimulation.

Die Ergebnisse der Analyse zeigen deutlich, dass der Einkaufsverkehr mittels Pkw im Vergleich zum Lieferverkehr einen massiven Anteil an den Treibhausgasemissionen sowohl in ländlichen Regionen, als auch in Mittel- und Großstädten verursacht. Wobei in Mittelstädten die Treibhausgasemissionen um 50% niedriger und in Großstädten sogar um 60% niedriger im Vergleich zum ländlichen Raum sind. Dies liegt wohl daran, dass in Mittel- und Großstädten entweder die Wege zur nächsten Einkaufsgelegenheit kürzer sind und damit die Nutzung von Fahrrad und zu Fuß attraktiver wird, oder das ÖPNV-System besser ausgebaut ist.

Die Lieferverkehre, vornehmlich hier die KEP-Dienstleister, die Privathaushalte beliefern, nehmen einen sehr geringen Anteil als Verursacher der Treibhausgasemissionen ein. Im Vergleich zu den Einkaufs-, Abhol- und Versandverkehren des MIV verursachen Lieferverkehre 0,85% der Treibhausgasemissionen in Kleinstädten, 1,3% in Mittelstädten und 1,5% in Großstädten.

Auf Basis der Erkenntnisse aus den Fallbeispielen zu Same-Day- und Instant-Delivery, private Lebensmittelbelieferung sowie Paketstationen können folgende **Handlungsempfehlungen** zur Entwicklung eines ökologisch nachhaltigeren Lieferverkehrs in Städten abgeleitet werden.

Die Gestaltung der Belieferungskonzepte für Same-Day- und Instant-Delivery sowie für die private Lebensmittelbelieferung liegt in der Hoheit der Logistikdienstleistungsunternehmen. Um nachhaltige Lieferverkehre in diesem Segment zu erzielen, sollten zunehmende Einfahrbeschränkungen für konventionell angetriebene Fahrzeuge eingeführt werden. Lastenfahrräder sind eine umfeldschonende Option zur Belieferung bestimmter Gebiete und zur Erbringung von Lieferungen im Premium-Bereich. Für den Transport von Gütern mit einem Gewicht von mehr als ca. 100 kg ist es notwendig, sog. Schwerlastenfahrräder zu entwickeln und deren Einsatz auf Fahrradwegen rechtlich zu ermöglichen. Um einer Lastenfahrradnutzung Vorschub zu leisten, ist es zunächst notwendig, eine Norm für Schwerlastenfahrräder zu entwickeln. Basierend darauf können Schwerlastenfahrräder entwickelt werden, die auf den bisherigen Fahrradwegen fahren können.

Der Einsatz von Lastenfahrrädern und von Kleinstlieferfahrzeugen auf der Letzten und Allerletzten Meile verlangt die Kombination mit einem Umschlagszentrum (Mikro-Depot), in denen ein größeres Fahrzeug die Waren an die kleineren Fahrzeuge übergibt. Angesichts der Konkurrenz um bestehende Gebäude und Flächen mit anderen Nutzungsmöglichkeiten, der geringen Margen in der Logistik und den momentan geringen Kostenvorteilen solcher Verteilkonzepte kann es Sinn ergeben, dass die öffentliche Hand gezielt Mikro-Hubs fördert oder unterstützt. Dazu kann sie ihre eigenen Flächen an Logistikunternehmen vergeben, Auflagen machen (ggf. Änderungen im Baugesetzbuch notwendig) oder mit ihren öffentlichen Unternehmen als Betreiber tätig werden. Die kommunalen Flächen sollten dauerhaft für anbieteroffene Mikro-Depot-Anlagen zur Verfügung gestellt und ggf. von kommunalen Unternehmen (z.B. ÖPNV-Betrieb) betrieben werden. Auch können diese Flächen nicht nur von KEP-Dienstleistungsunternehmen genutzt werden, sondern auch beispielsweise zur Lebensmittelbelieferung (u.a. Frischwaren).

Basierend auf den Simulationsergebnissen im Fallbeispiel Paketstationen wird ersichtlich, dass Paketstationen eine sinnvolle logistische Maßnahme darstellen, um den KEP-Verkehr zu reduzieren und damit Einsparungen von Treibhausgasemissionen zu erzielen. Aber auch die Transportkosten können für den KEP-Dienstleister reduziert werden.

Daher ist zu empfehlen, das Konzept der anbieteroffenen Paketstationen auch seitens der Verkehrspolitik zu fördern. Bislang wurde dieses Konzept von den Logistikdienstleistern selbst implementiert. Bzgl. der Flächen für diese Stationen waren sie jedoch auch auf die Mitwirkung der öffentlichen Hand oder privatwirtschaftlichen Eigentümern von Flächen stark abhängig. Im Prinzip konnten bislang die Paketstationen bereits auf öffentlichen (z.B. an ÖPNV-Stationen) und privatwirtschaftlichen Flächen (u.a. vor Supermärkten, Tankstellen) implementiert werden. Daher ist bereits jetzt eine Teilnahmebereitschaft auch seitens der Privatwirtschaft erkennbar.

Um diesem Konzept noch mehr Tragweite zu geben, ist jedoch zu empfehlen, diese Paketstationen verpflichtend bei der Immobilienentwicklung berücksichtigen zu müssen. Dies könnte den Zweck Gewerbe, aber auch Wohnen betreffen. Dazu müsste Baugesetzbuch geändert werden.

Ferner wäre es sinnvoll, den Zugang zu den Paketstationen anbieteroffen zu gestalten. Bislang wurden diese Konzepte nur von einzelnen KEP-Dienstleistern umgesetzt. Zu empfehlen wäre hierbei aber, dass ein Netz von anbieteroffenen Paketstationen aufgebaut wird, damit alle KEP-Dienstleister Zugang dazu haben. Damit könnte eine Reduzierung der KEP-Verkehre nach Anzahl der Fahrzeuge, aber auch nach Laufleistung und resultierend daraus eine Minderung der Treibhausgasemissionen erzielt werden.

Bei KEP-Verkehren in Städten ist das größte von der Öffentlichkeit wahrgenommene Problem das Parken in 2. Reihe, was zu Verkehrsflussstörungen, sog. „Mikrostaus“, führt. Daher ist zu sinnvoll, dass Ladezonen für die Lieferfahrzeuge vornehmlich zur Zustellung der B2C-Pakete in Wohngebieten, aber auch der B2B-Pakete an Kleinst- und Kleinunternehmen aus den Dienstleistungs- und Einzelhandelssektoren eingerichtet werden. Zu diesem Zweck ist ein neues Verkehrsschild notwendig, das die Ladezone ausweist und ein absolutes Halteverbot für den motorisierten Individualverkehr verhängt.

Komponente B2: Ökologische Optimierungspotentiale der Produktions- und Beschaffungslogistik

Im Rahmen der **Komponente B2** wurde eine Literaturrecherche und -analyse zu den **Optimierungspotentialen in der Produktion und Beschaffungslogistik durch Digitalisierung und Automatisierung** durchgeführt. Der Fokus liegt auf den Entwicklungssprüngen der Industrie und Logistik, konkret neuerer technologischer Entwicklungen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT), sowie der Digitalisierung und Automatisierung von Produktionsprozessen. Zunächst wurde darauf eingegangen, welche Entwicklungen der Logistiksektor im Zuge der Globalisierung, Industrie 4.0 und dem E-Commerce mit sich bringt. Hierzu wurden die Herausforderungen der Logistikbranche im Zuge der Globalisierung der Wertschöpfung, neuer Produktionskonzepte, der Digitalisierung von Geschäfts- und Arbeitsprozessen und des starken Wachstums des Online-Handels beschrieben. Um die Abläufe entlang der Wertschöpfungskette zu optimieren, sind u.a. Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) und das Internet der Dinge (IoT) erforderlich. Ferner wurde der Einsatz vernetzter Sensorik und Aktorik in Wertschöpfungsnetzwerken in der klassisch produzierenden Industrie untersucht. Anschließend wurde auf einzelne Entwicklungen und Herausforderungen in der Industrie 4.0 eingegangen. Dabei wurden die Anforderungen und Eigenschaften der einzelnen Konzepte (Cyber-Physical Systems, Smart Factory, Smart Products, Big Data, Cloud-Computing, Smart Services) berücksichtigt.

Summary

The project "Digitization in transport sector – Potentials and risks for the environment and climate" identifies various influences of digitization, such as connected and automated driving, on the transport flows, both in passenger and freight transport. The methodological processing of the research project includes structured literature research and analysis, qualitative expert interviews as well as transport demand modeling on a macroscopic and microscopic level. The research focus is on four areas (hereinafter referred to as components): (1) road and rail infrastructure (infrastructure-side digitization), (2) vehicle technology in private and commercial vehicles (vehicle-side digitization), (3) consumer and shopping behaviour (expansion of online shopping) and (4) production and procurement logistics.

Module A: Transport-related and ecological effects of automation and connected driving in transport sector

Module A first examines the transport-related and ecological effects of automation and connected driving in both passenger and freight transport in Germany using selected modelling approaches.

To investigate the transport-related effects of automation in passenger transport, a distinction was made between three development paths and a total of eight scenarios. The scenarios differ primarily with regard to the proportion of connected and automated vehicles in the total number of cars in Germany. Development path A contains the reference scenarios for the years 2030 and 2040, which are characterized by a comparatively low degree of automation. In 2030, in reference scenario A, the penetration of the automation levels in the fleet of privately used vehicles has hardly made any progress. Even in the year 2040 of reference scenario A, there are still no vehicles with automation level 4 or 5 available for private purchase and there are no connected vehicles in the private car fleet. However, the proportion of vehicles with automation levels 2 and 3 in the private car fleet has increased.

Development path B includes three scenarios that differ in terms of the degree of automation. In the year 2030 of scenario B, automation is already much more advanced than development path A and vehicles of automation levels 4 and 5 are also available for private purchase. In the year 2040 of scenario B, the acquisition costs for automated vehicles have decreased significantly compared to the year 2030. As a result, the proportion of vehicles with automation levels 4 and 5 has also increased. This is also reflected in a relatively high proportion of connected vehicles in private cars. In scenario B+ (2040), the shares of the various levels of automation in private cars are the same as in scenario B in 2040. The difference, however, is that in scenario B+ shared automated mobility services, such as car and ride sharing systems, are available.

The maximum scenarios consider how 100% automation of both private and shared vehicles could affect the transport sector. In the maximum scenario 1 in 2040, all vehicles in the private car fleet have an automation level of 5. The proportion of connected vehicles is also 100%. In maximum scenario 2a, it is assumed that by 2040 all motorized private transport will no longer be privately owned, but will only exist as a car sharing fleet. The mobility needs of private individuals are covered on the one hand by other means of transport, such as bicycles and public transport. On the other hand, automated mobility services such as car and ride sharing systems are used in maximum scenario 2a. In the maximum scenario 2b, the same assumptions are applied with regard to the degree of automation. In this scenario, however, privately owned automated cars are also used in addition to shared automated mobility services.

To operationalize the scenarios, a coupling approach between the transport models used was developed in order to assess both the transport-related effects of automation in passenger and

freight transport with and without liquefaction effects, as well as the resulting ecological effects. First, the composition of the private car fleet is determined according to the level of automation in the CAST model (DLR-VF). This is transferred to the network model PTV Validate (KIT), which calculates the expected changes in capacity in the road network. Both the capacity changes and the composition of the private car fleet are then used in the RAMOS (DLR-VF) model to determine the changed transport demand after the introduction of automated vehicles. The services of automated car and ride sharing vehicles are modelled in MaaS (DLR-VF). Since the availability of automated car and ride sharing vehicles depends on their use in RAMOS and use is in turn influenced by availability, the two models RAMOS and MaaS are linked to each other in both directions. In the next step, the determined transport demand is transferred from RAMOS to PTV Validate, which uses this as a basis to determine the change in traffic conditions. Since road freight transport must be considered to determine the traffic conditions, the results of the vehicle-based automation in freight transport are also considered at this point. Specifically, the freight transport demand, differentiated according to transport modes and truck types, which is generated using the macroscopic freight transport model DEMO-GV (DLR-VF), is transferred to PTV Validate. The passenger and freight transport demand determined in RAMOS and DEMO-GV as well as the change in traffic conditions from PTV Validate are finally transmitted to ifeu's TREMOD model. The emissions emitted in the various scenarios are calculated using TREMOD.

The analyses of the transport-related effects of automation in passenger transport focused on the effects on transport performance. The results show that a low level of automation is also likely to have little impact on passenger transport. Furthermore, all scenarios with a higher degree of automation show that this always works for the benefit of motorized individual transport and at the expense of public transport if automated car and ride sharing services are not introduced at the same time. At the same time, it becomes clear in all scenarios with a high degree of automation that the introduction of automated car and ride sharing services will reduce the volume of individual motorized transport. A complete shift of motorized individual transport to the other modes of transport in 2040 would lead to an enormous increase the share of automated car and ride sharing services and public passenger transport of the transport performance and could only be achieved through a massive expansion of the public transport network.

Based on the predicted changes in demand and composition of the vehicle fleets in the scenarios, the transport-related effects of the automation of the fleet on passenger transport were assessed by means of the Germany-wide network model PTV Validate. On the basis of the results of a literature research and simulation models, forecasts of the change in capacity for the respective degree of penetration with automated driving functions for various types of infrastructure were made and illustrated in the model. We can show that significant changes in capacity can only be expected when market penetration level with highly automated vehicles exceeds 50%. In the case of low to medium levels of penetration, the capacities initially decrease before, in the case of high levels of penetration, they finally rise above the current level. This is expressed in the reference scenario 2040 A in a capacity reduction of approx. 3% in the overall network. With 100% market penetration with connected and automated vehicles, average capacity increases of an average of 40% are possible on motorways. According to the current state of knowledge, no exact increases in capacity can be forecast in urban transport. It can be assumed that the capacities at junctions will increase due to the smaller time gaps between the vehicles. The interactions with non-motorized transport and other uses in road space (delivery services, parking, etc.) are unknown. It can also be assumed that the increases in capacity at the intersections are more limited than on motorways due to the requirements of non-motorized transport.

The ecological effects of automated and connected driving in passenger transport are caused by various factors. In most of the scenarios examined, increasing degrees of automation and connected driving led to an increase in car transport performance and thus also in greenhouse gas (GHG) emissions. If all cars were fully connected, but only privately owned, emissions in 2040 would even increase by 33% compared to the reference scenario. In the other extreme case, namely a complete shift of motorized private transport to automated ride sharing, bus and train, emissions in 2040 will decrease by 35% compared to the reference scenario.

The influence of autonomous driving on the transport flows on motorways and federal highways leads to a reduction in GHG emissions, but the effects are limited due to higher driving speeds in flowing traffic. The GHG emissions from passenger transport decrease by 3% in maximum scenario 1 due to the changed traffic flow, and by less than 1% in maximum scenario 2a. Liquefaction also has a positive effect on particle and nitrogen oxide emissions. Larger positive effects would be possible in connection with a further reduction in driving speed or traffic liquefaction in urban areas. In contrast, the electricity consumption of the connected infrastructure leads to additional GHG emissions, which can account for between 2.6% and 5.1% of passenger transport. Thus, transport demand and choice of transport mode have the greatest impact on GHG emissions in passenger transport. High levels of automation and connectivity in combination with private individual transport lead to additional emissions. However, GHG savings can be achieved by significantly shifting to public transport.

In addition, the effects of vehicle automation in freight transport were examined. First, the State of the Art was presented which focusses on the effects that can be achieved by means of automation in freight transport. Afterwards scenarios as a basis for further freight transport modelling were developed. Finally, the modelling results were presented, which show the transport-related and ecological effects of automation in freight transport. The main focus was on the effects of automation on the transport mode choice and transport means choice, the choice of lot size and the design of the logistics network.

In preparation for the model-based assessment of the effects of automated vehicles in freight transport, the scenarios to be examined for the time horizons 2030 and 2040 were defined and developed. The main focus was on the use of automated trucks and platooning in road freight transport. In the course of this, four scenarios were developed. In scenario 1, platoons with automated trucks were used in the main run on the motorway between mono- or multimodal transshipment hubs. It was assumed that automated vehicles are primarily used in system traffic for general cargo and in seaport hinterland traffic. The automated trucks are manned by truck drivers for monitoring. In scenario 2, driverless vehicles will be used in 2040. In addition, automated transshipment technologies for loading and unloading are used at the transshipment hubs. In scenario 3, it is assumed that the advantages of automation for direct traffic and generally for comparatively small vehicles are relatively greater than for large vehicles. It is assumed that the atomization of shipments will be supported by flexible direct transport of autonomous vehicles as early as 2030. Automated trucks are used for deliveries, especially in the trade and industry sector (B2B sector). As in scenario 1, the automated trucks are manned by truck drivers for monitoring. In scenario 4 (2040), it is also assumed that driverless vehicles will be used. In addition, automated handling technologies are used for loading by the loading company and for unloading by end customers.

First, the freight transport flows in Germany and primarily the effects of the scenarios 1 and 2 on the transport mode choice as well as transport means choice were estimated using the macroscopic freight transport demand model DEMO-GV. The overall transport performance and that of the individual modes of transport hardly differ from scenario 1 to the baseline scenario (2030). The two scenarios baseline and scenario 2 for the year 2040 also differ only marginally with

regard to the total transport volume. There is only a shift between the modes of transport. In scenario 2, the railways lose more than 13.2% of its transport performance compared to the baseline scenario. 8.2% fewer goods are transported by inland waterway. In comparison, the transport volume on the road increases by almost 3.7%. In scenario 2, the road has a share of over 80.3% and the rail a share of 14.3%. In the baseline scenario, rail still had a share of 16.5% and road 77.7%.

The ecological effects in scenario 1 are negligible compared to the baseline scenario for the year 2030. By 2040, GHG emissions would increase by 3% compared to the baseline scenario due to greater automation and the use of driverless trucks and the associated increase in mileage performed. However, in conjunction with full automation and connectivity of cars and the resulting liquefaction of traffic on motorways, GHG emissions in freight transport can be reduced by almost 10%. Furthermore, nitrogen oxide emissions also decrease significantly due to the liquefaction of the traffic. In conclusion, GHG emission savings in freight transport are possible.

Next, the effects of automation on the transport performance and network structures of purely road-based logistics systems were examined. A representative network for this is represented by distribution networks in the food retail sector. In this context, the effects of the scenario 4 developed are assessed. For this purpose, a semi-combined approach for the treatment of large Location Routing Problems (LRPs) was developed. The developed metaheuristic should find the solution for large-scale LRPs in a plausible time and enable the analysis and optimization of the entire, Germany-wide freight transport network with regard to microscopic vehicle parameters. The method is based on classic capacity-restricted Vehicle Routing Problems (VRPs) with time windows and Facility Location Problems (FLP) with unlimited capacities. To solve the VRP, the logistics behaviour model Jsprit, developed by Schröder et al. (2012), is used. This methodological approach is operationalized and applied for the case study food distribution in Germany. The evaluation of the location distribution of the warehouses shows that the number of distribution centers in the food retail sector is reduced by approx. 15% in the baseline scenario (168 warehouse locations) compared to the current situation (197 warehouse locations). The absolute number of distribution centers decreases from 168 to 120 warehouses in the entire system – accordingly by almost 29% if only driverless trucks are used. The decrease in the number of warehouses is due to the fact that more light trucks with a permissible total weight (ptw) of 7.5 t are used in this scenario. The total mileage performed of almost 2.2 million km is more than 28% higher using automated trucks than in baseline scenario. Due to the advantages of automation in the form of no personnel costs, around 68% of the mileage performed using automated trucks 7.5 t ptw is carried out. This corresponds to a growth of over 16% compared to the baseline scenario, in which these light trucks only accounted for a share of 52%. The mileage performed with trucks 26 t ptw is reduced by 42% and with trucks 40 t ptw by 7.4% compared to the baseline scenario. This shift effect from heavy to light trucks is primarily due to the number and location of the distribution centers. Due to the higher mileage performed, the emissions from the use of automated trucks are approx. 14% higher than in the baseline scenario, in which the transport of food causes slightly more than 250,000 tons of CO₂ equivalents annually. This means that the percentage increase in emissions is lower than that in mileage performed, the increase of which occurs primarily in the case of trucks with 7.5 t ptw, which have lower fuel consumption per kilometer than the larger vehicles.

Another aspect of automation in freight transport is the change in lot sizes. In order to be able to implement the choice of lot size on the model side, the lot size choice model for road freight transport according to Piendl et al. (2018) is used. While not all of the implications are completely clear, there are indications that the cost of the small lot sizes will decrease the most relative to the large lot sizes. This is especially true if the driver is no longer on-board. When

modelling the scenarios, the focus is on transports with a distance of more than 150 km. Thereby a segment-specific analysis differentiates according to the following segments: (1) time-critical goods, (2) specials, (3) temperature-controlled food and (4) non-time-critical goods, including bulk goods. If the cost structures change, changes in the market shares of the three different types of transport general cargo, partial loads and full loads can be expected. Assuming that the transports considered are representative, there is a maximum gain of up to 8% for general cargo transports for transports over 150 km. The segment-specific analysis shows a maximum gain of up to 12%, primarily for the segment temperature-controlled food. No gains can be expected for part-load transports, even in terms of cost savings, since, due to the higher cost savings in general cargo transports, they lose more than they gain compared to full-load transports. Full load transports lose up to 5% market share. The loss can even rise to 6% for time-critical goods. Overall, the changes are plausible. A comparison between the segments shows that the reduced costs for general cargo and part load transports have the greatest effect on the temperature-controlled food.

Module B1: Ecological effects of online retail compared to stationary retail

Module B1 comprises the assessment of the ecological effects of online retail compared to stationary retail based on the transport-related effects in passenger and freight transport.

For this purpose, the current State of the Art on this topic in the research fields of passenger and freight transport was first prepared. In passenger transport, the focus was on the purchasing behaviour of consumers. In freight transport, the focus was on the parcel deliveries generated by online shopping, which are carried out by courier, express and parcel (CEP) service providers. This was followed by the multivariate analysis of shopping transport on the basis of national traffic surveys in Germany, USA and Great Britain. In addition, an online survey was carried out in December 2018 in order to be able to close specific gaps in the national traffic surveys. The online survey is also based on the results of the literature analysis and covers all relevant dimensions: (i) general transport behaviour, (ii) shopping behaviour, (iii) online shopping behaviour, (iv) delivery and shipping behaviour as well as (v) socio-economy and demographics. A total of 1,011 test persons were interviewed who represent the population of Germany according to age, gender, state and size of residence.

In the statistical analysis based on the national traffic surveys in Germany, the USA and Great Britain and the online survey carried out in the framework of the project, ordinal and multinomial regression analyzes as well as cluster methods and regression trees were calculated in order to determine the extent to which purchases on the Internet replace personal shopping trips. The main result here is that there is no substitution effect (yet) of personal shopping channels in Germany due to increasing online retailing. This is due, among other things, to the fact that online retail in Germany is not yet used that much in an international comparison. In principle, however, a large potential for substitution could be determined, especially in personal shopping for everyday goods such as groceries or drugstore items. If online retail in Germany will be used by more people in the future and the market shares in the different product groups will continue to increase, then there could also be a reduction in personal shopping trips.

Selected univariate and bivariate evaluations are shown for the statistical analysis of the delivery and shipping behaviour. The respondents used different shipping methods for their online orders. 78% of the respondents used standard shipping for their orders with delivery 1-3 days from dispatch. 19% have chosen the more expensive premium shipping with next day delivery at least once. Same-day shipping, with delivery on the day of the order, (mostly) between 6 p.m. and 10 p.m., was used by only 2% of those surveyed. Instant shipping (delivery within 90 minutes) is used by only 0.19% of the respondents. Express delivery (delivery at a selected time

slot or point in time) was used by 1%. With regard to the preferred delivery time windows, it can be stated that 35% of the respondents prefer to receive deliveries in the evening (6 p.m. to 10 p.m.). On the other hand, 30% prefer the afternoon (2 p.m. to 6 p.m.), 18% prefer lunch (12 p.m. to 2 p.m.) and 17% prefer the morning (8 a.m. to 12 p.m.) for delivery.

The majority of the online shoppers (80%) prefer delivery of the purchased goods to their residence. 8% of customers let sent their parcels to a parcel station. Other delivery locations, such as the workplace, the nearest post office, the neighbor or the nearest parcel shop, are only preferred options for less than 5% of those surveyed. Very few of the respondents (2%) also make agreements with the parcel service provider regarding the delivery location. If the respondents missed a home delivery attempt on the part of the logistics service provider, they usually deliver the order to a different location. For a large part of the respondents this is the neighbor (51%). 34% of those surveyed pick-ups a missed shipment from the nearest post office and 9% from the next parcel shop. Other alternatives occur in less than 5% of the respondents.

A number of products are returned from the goods bought on the Internet. 346 people (41%) returned at least one parcel. A total of 946 purchases (11% of all purchases) were returned. This is an average of 1.07 parcels per person. Projected over a year, this is 4.27 parcels per year and per person. The median (and mean) of the number of returns is higher for women in the age groups up to 49 years than for men of the same age. The shipments that are returned are brought to the nearest post office by more than half of the respondents (58%). The parcel shop is more conveniently located for approx. 30% and parcel stations for approx. 8%. If the ordered goods are not sent to the respondent's residence, for example due to a missed delivery, they often have to be picked up.

The maximum distance travelled is 30 km (for picking up the parcel at a parcel station). From a transport perspective, in addition to the distance to be travelled to the pick-up or return location of shipments, the means of transport used are of particular relevance. The car occupies an important position everywhere, only when picking up from the nearest post office were more people in our sample on foot than by car.

Finally, additional willingness to pay is discussed. A distinction is made with regard to additional willingness to pay of the respondents with 1.) delivery at a desired time window, 2.) delivery to private residence, 3.) faster delivery, 4.) bundled delivery, 5.) delivery with sustainable packaging and 6.) climate-neutral delivery. There is also an additional willingness to pay for deliveries at a desired time window and for deliveries with sustainable packaging. In these cases, more than 50% of the respondents are willing to pay an additional amount. In the case of sustainable packaging, more than 40% of those questioned would add up to 2.50 euros. 5% would pay up to an additional 5 euros. Beyond this amount, the willingness to pay for sustainable packaging is low. For deliveries at a desired time window, it is higher in the peaks. At least around 16% of those surveyed would still pay up to 5 euros extra. The lowest additional willingness to pay in relation to the broad mass of respondents is for fast and bundled deliveries. About 78% of the respondents are unwilling to spend additional amounts on this. In all cases there are individuals who are willing to spend 10 euros or more for an improved delivery.

The quantification of the transport-related effects is modelled by DLR-VF using the microscopic simulation model Jsprit (Schröder et al. 2012) and the strategic transport forecast (Thaller 2018). Based on this, ifeu uses TREMOD to calculate the ecological effects. The three special cases of Same-Day and Instant Deliveries, private Food Deliveries and deliveries to Parcel Stations are examined in detail. Berlin is used as the investigation area.

In the Same-Day and Instant Delivery scenarios, parcels are distributed to private customers in two stages. In the first step, the requested parcel units are distributed from the distribution

center to the micro-depots by means of traditionally operated trucks 3,5t ptw. In the second step, the customers are supplied from their nearest micro-depot at the specified time windows by means of cargo bikes. This logistics concept is examined in the framework of a case study. Compared to the baseline scenario, the number of tours increases by a factor of 1.8. A total of 8,685 tours are carried out compared to the baseline scenario, in which only 3,088 tours are necessary. 365 more vehicles are used compared to the baseline scenario. This corresponds to an increase of 24% more vehicles. In contrast, the mileage performed is reduced by 65.9%, in absolute terms by 109,836.22 km. GHG emissions can even be reduced by 80% through the use of electrically powered cargo bikes. This is mainly due to the fact that more than 80.7% of the mileage performed can be saved by diesel-powered trucks 3.5 t ptw.

The existing microscopic, behaviour-based transport simulation MATSim (Balmer et al. 2009) and the integrated logistics module Jsprit (Schröder et al. 2012) are used to assess the effects of food delivery to private households. The case studies already implemented on food distribution (Gabler et al. 2013) and CEP transport (Thaller 2018) in Berlin are used for this study. In the course of this, two scenarios are developed. In scenario 1 it is assumed that the deliveries of the food retail branches from the depots are carried out in the same way as in the baseline scenario. In order to illustrate the supply of food to private households, the branches of the food retailers are used as depots or distribution centers. From there, the groceries are delivered by trucks 3.5t ptw and cargo bikes to the residences of private customers. In scenario 2, it is also assumed that the deliveries of the food retail branches from the depots are carried out in the same way as in the baseline scenario. The difference is in this case that the distribution to the end customers takes place directly from the distribution centers. From the distribution centers, the food is delivered by trucks 3,5 t ptw directly to the residences of private customers. The simulation results show that in scenario 1A the tours increase by a factor of almost 2, in scenario 1B even by a factor of 2.4. In S1A, more than 37% more vehicles are required for this purpose, in contrast to S1B even almost 63% more vehicles, primarily trucks with 3.5 t ptw and cargo bikes. In contrast to this, the number of tours with direct delivery of groceries to the residences of private households only increases by 16.9% in S2A and by 29.5% in S2B. For this purpose, over 37.1% more vehicles are required in S2A, primarily trucks 3.5 t ptw, in S2B even around 65% more vehicles. The daily mileage performed increases in S1A by 16.2% and in S1B by 23.2%. In scenario 2A the mileage performed increases by 19.5% and in the S2B by 26.8%. The additional emissions from food deliveries are approx. 0.6-1 Mt/a CO₂ equ. comparatively low, whereby the use of electric cargo bikes also has the lowest emissions. It is conceivable that avoiding private shopping trips by car could even result in emissions reductions.

In the next case study, the effects of the parcel stations (PS) on freight transport were examined in detail. In the baseline scenario, it is assumed that 100 percent of private customers choose home delivery. In scenario 1, the assumption is made that 25 percent of private customers use the delivery form parcel stations. In scenario 2, 50 percent of private customers have their parcels delivered to the parcel station of CEP service providers. Furthermore, in scenario 3, 75 percent private shipments are delivered to the parcel station and in scenario 4 100 percent. The analysis of the development over time shows that mileage performed on the last mile increases by over 284.5% from 2009 to 2030 in the baseline scenario. A share of 25% private use of PS results in a reduction in mileage performed of more than 20% in 2030. The mileage in the 50% PS scenario deviates by an average of 32.7% compared to the baseline scenario. The 75% PS scenario even reaches a relative deviation of 57% in 2030. In the 100% PS scenario, the mileage performed is already below -50% deviation in 2009, which will decrease by up to -77% in 2030. On average, 65.8% of kilometers are saved in the city per year during this period, and the trend is falling. Due to the continuous increase in mileage performed per year, the GHG emissions in the baseline scenario, which does not include the use of parcel stations, rise from 10 kt CO₂ equ.

in 2010 to over 30 kt CO₂ equ. in 2030. By using parcel stations and the associated reduction in mileage performed, emissions can be greatly reduced. In the event that all parcels are delivered to parcel stations, even with the assumed increase in parcel deliveries in 2030, the GHG emissions are only around 7 kt CO₂ equ. per year and thus 77% lower than in the baseline scenario 2030.

In addition, a calculation tool was developed that is used to assess the transport-related and ecological effects of physical shopping transport in comparison to CEP transport. This instrument shows the transport-related and ecological effects of physical shopping transport, online shopping in the B2C segment and CEP transport in Germany. This is an extrapolation for the population in Germany in 2018 based on the results of the primary data collection and the simulation results from the microscopic freight transport simulation.

The results of the analysis clearly show that shopping transport by car causes a massive proportion of greenhouse gas emissions in rural areas as well as in medium-sized and large cities compared to CEP transport. In medium-sized cities, GHG emissions are 50% lower and in large cities even 60% lower compared to rural areas. This is probably due to the fact that in medium-sized and large cities, either the distances to the nearest shopping opportunity are shorter, making cycling and walking more attractive, or the public transport system is better developed.

The delivery transport, primarily the CEP service providers who deliver to private households, have a very small share as the cause of GHG emissions. In comparison to the shopping, pickup and shipping transport of the motorized individual transport, delivery transport causes 0.85% of GHG emissions in small towns, 1.3% in medium-sized cities and 1.5% in large cities.

Based on the findings from the case studies on same-day and instant delivery, private food delivery and parcel stations, the following recommendations for action for the development of ecologically more sustainable delivery transport in cities can be derived.

The development and implementation of delivery concepts for same-day and instant delivery as well as for private food delivery is the responsibility of the logistics service provider. In order to achieve sustainable delivery transport in this segment, increasing entry restrictions for conventionally powered vehicles should be introduced. Cargo bikes are an environmentally friendly option for delivering to certain areas and for making premium deliveries. For the transport of goods weighing more than approx. 100 kg, it is necessary to develop so-called heavy-duty bicycles and to legally enable their use on bicycle lanes. In order to encourage the use of cargo bikes, it is first necessary to develop a standard for heavy-duty bikes. Based on this, heavy-duty bicycles can be developed that can ride on existing bicycle lanes.

The use of cargo bikes and small delivery vehicles on the last and very last mile requires the combination with a transshipment center (micro-depot) in which a larger vehicle hands over the goods to the smaller vehicles. With regard to the competition for existing buildings and areas with other possible uses, the low margins in logistics and the currently low-cost advantages of such distribution concepts, it can make sense for the public sector to specifically promote or support micro-hubs. To do this, it can allocate its own areas to logistics companies, impose conditions (changes in the building code may be necessary) or act as operators with its public companies. The municipal areas should be made available permanently for micro-depot facilities open to suppliers and, if necessary, be operated by municipal companies (e.g. public transport companies). These areas can not only be used by CEP service providers, but also, for example, for food delivery (including fresh goods).

Based on the simulation results in the case study of parcel stations, it becomes clear that parcel stations represent a sensible logistical measure to reduce CEP transport and thus achieve

savings in greenhouse gas emissions. But the transport costs can also be reduced for the CEP service provider.

It is therefore recommended that transport policy should also promote the concept of open-source parcel stations. So far, this concept has been implemented by the logistics service providers themselves. With regard to the areas for these stations, however, they were also heavily dependent on the participation of the public sector or private-sector owners of areas. In principle, the parcel stations could already be implemented on public (e.g. at public transport stations) and private areas (e.g. in front of supermarkets, petrol stations). Therefore, a willingness to participate on the part of the private sector is already evident.

In order to give this concept even more scope, however, it is recommended that these parcel stations have to be compulsorily considered when developing real estate. This could affect commercial as well as residential purposes. This would require a change in the Building Code.

It would also make sense to make access to the parcel stations open to all providers. So far, these concepts have only been implemented by individual CEP service providers. However, it would be advisable to set up a network of open parcel stations so that all CEP service providers have access to it. This could result in a reduction in CEP transport based on the number of vehicles, but also based on mileage performed and, as a result, a reduction in greenhouse gas emissions.

For CEP transports in cities, the biggest problem perceived by the public is double parking, which leads to traffic flow disruptions, so-called "micro-jams". Therefore, it makes sense that loading zones for the delivery vehicles are set up primarily for the delivery of B2C parcels in residential areas, but also B2B parcels to micro and small companies from the service and retail sectors. For this purpose, a new traffic sign is necessary, which identifies the loading zone and imposes an absolute ban on motorized private transport.

Module B2: Ecological optimization potentials of production and procurement logistics

In the framework of module B2, a literature research and analysis were carried out focussing on the optimization potentials in production and procurement logistics by means of digitization and automation. The focus is on the leaps in development in industry and logistics, specifically newer technological developments in the field of information and communication technologies (ICT), as well as the digitization and automation of production processes. First of all, the developments in the logistics sector in the course of globalization, Industry 4.0 and e-commerce were discussed. For this purpose, the challenges of the logistics industry in the course of the globalization of value creation, new production concepts, the digitization of business and work processes as well as the strong growth of online trading were described. In order to optimize the processes along the supply chain, information and communication technologies (ICT) and the Internet of Things (IoT) are required. Furthermore, the use of connected sensors and actuators in value-added networks in traditional manufacturing was investigated. Then individual developments and challenges in Industry 4.0 were discussed. The requirements and properties of the individual concepts (cyber-physical systems, smart factories, smart products, big data, cloud computing, smart services) were considered.

1 Übergeordnete Zielstellung und struktureller Aufbau des Projektes

Ziel des Projektes ist, sowohl positive als auch negative potentielle ökologische Wirkungen der Digitalisierung im Verkehr zu identifizieren und die Auswirkungen auf z. B. Veränderungen in der gesamtdeutschen Verkehrs- und Transportleistung, mögliche Einflüsse auf den Verkehrsfluss sowie Auswirkungen auf die damit verbundenen Emissionen zu untersuchen und zu quantifizieren. Die Untersuchung teilt sich in zwei separat bearbeitete Module A und B auf. Modul A untersucht die Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens. Modul B untersucht die Auswirkungen der Digitalisierung in Konsum und Produktion.

In Modul A werden die Auswirkungen der **infrastruktur- und fahrzeugseitigen Digitalisierung** untersucht. Mit Blick auf Intelligente Verkehrssysteme (IVS), Vernetzung und Automatisierung, stehen hier die folgenden Projektziele im Vordergrund.

- ▶ Bilanzierung möglicher positiver verkehrlicher Effekte, z. B. durch Optimierung des Verkehrsflusses, und möglicher negativer verkehrlicher Effekte, z. B. infolge von Rebound-Effekten
- ▶ Belastbare Quantifizierung von Auswirkungen auf Klima- und Schadstoffemissionen sowie Analyse weiterer Belastungen wie Lärm und Flächenbedarf

Im Modul B werden speziell die Auswirkungen der Digitalisierung im **Online-Handel** und in der **Produktions- und Beschaffungslogistik** untersucht. Bei der Untersuchung des veränderten Konsum- und Einkaufsverhaltens durch den **Online-Handel** und das Internet-Shopping werden folgende Projektziele verfolgt.

- ▶ Bilanzierung der aggregierten Umweltwirkungen von Einkauf im stationären Handel im Vergleich zum Online-Handel für den Status-Quo
- ▶ Strukturierte Aufbereitung relevanter Entwicklungen und indirekter Folgen, die zu nicht-linearen Entwicklungen bezüglich der Umweltfolgen führen können
- ▶ Bündelung dieser Erkenntnisse in einem Berechnungstool, mit dem die Umweltwirkungen des Online-Handels quantifiziert werden können

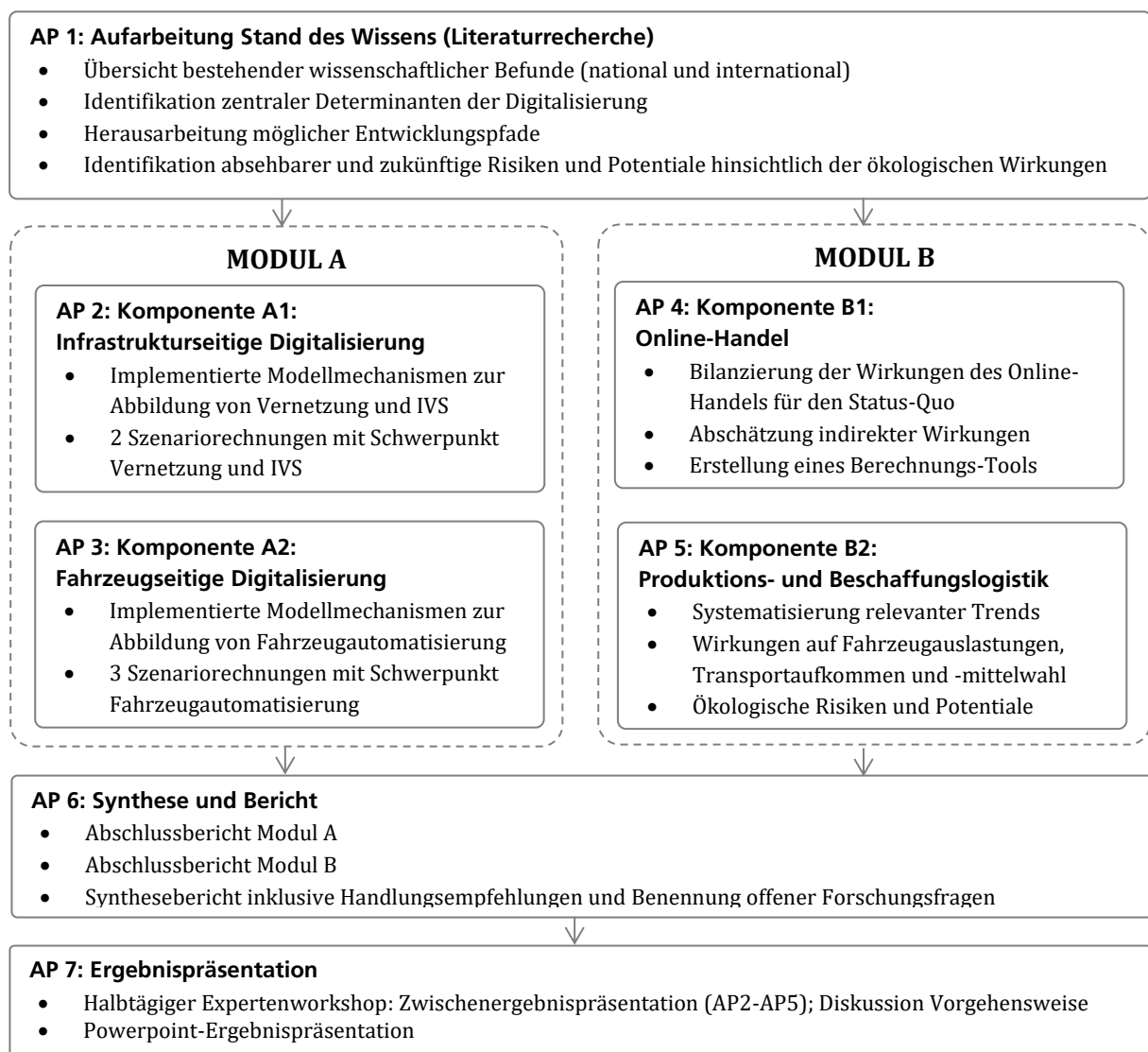
Bezüglich der **Produktions- und Beschaffungslogistik** bestehen folgende Projektziele.

- ▶ Metastudie zu verändertem Transportaufkommen und zur veränderten Transportmittel- und Routenwahl infolge der Digitalisierung in Produktion und Beschaffung
- ▶ Qualitative Abschätzung der Wirkungen einer Verknüpfung von intra-industriellen IT-Systemen und intelligenten Verkehrssystemen auf Verkehr und Umwelt
- ▶ Identifikation neuer Dienstleistungen in diesem Sektor inklusive Wirkungsabschätzung

Bereichsübergreifend erfolgt auf dieser Grundlage eine Synthese zu den Umweltwirkungen der Digitalisierung im Verkehrsbereich. Darauf aufbauend werden schließlich Handlungsempfehlungen abgeleitet, wie Stellhebel bezüglich technischer, rechtlicher, administrativer sowie sonstiger steuerbarer Rahmenbedingungen so gestaltet werden können, dass die Digitalisierung einen möglichst großen Beitrag zum Erreichen von Umweltzielen im Verkehr leistet.

In der Abbildung 1 wird der strukturelle Aufbau des Gesamtprojektes aufgezeigt.

Abbildung 1: Überblick über die Arbeitspakete des Projektes und zu erwartende Ergebnisse



Quelle: Eigene Darstellung

2 Modul A: Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens

Im Modul A liegt der Forschungsschwerpunkt auf den verkehrlichen und ökologischen Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr.

Das Modul umfasst die Komponenten A1 (Infrastrukturseite Digitalisierung) und A2 (Fahrzeugseitige Digitalisierung). Die beiden Komponenten werden integriert betrachtet, da sich infrastruktur- und fahrzeugseitige Ausprägungen der Automatisierung gegenseitig beeinflussen und voneinander abhängig sind. Im Fokus des Moduls A stehen

- ▶ ökologische Wirkungen des vernetzten Fahrens und intelligenter Verkehrssysteme sowie
- ▶ Optimierungspotentiale und Verlagerungseffekte durch automatisiertes Fahren im Personen- und Güterverkehr.

Dies entspricht einer Trennung nach angebotsseitigen (im Sinne des Infrastrukturangebots) und nachfrageseitigen Effekten und steht im Einklang mit den jeweiligen Kompetenzen der Auftragnehmer. Diese im Verkehrswesen übliche Trennung trägt der unterschiedlichen Natur der Effekte von Änderungen im Verkehrssystem Rechnung. Dies sind zum einen aufgrund verkehrstechnischer Auswertungen prognostizierte Kapazitätsänderungen und Veränderungen des Verkehrsablaufs. Auf der anderen Seite kann die Automatisierung verschiedene Auswirkungen auf die Verkehrsnachfrage haben: zum einen durch eine direkte Veränderung des Verkehrsangebots (verbesserter Komfort während der Fahrt) und zum anderen durch eine indirekte Veränderung des Angebots, nämlich aufgrund einer gesteigerten Effizienz des Verkehrssystems (und damit kürzere Reisezeiten). Zu betonen ist an dieser Stelle, dass solche Entwicklungen zu Rebound-Effekten führen können; d. h. im Privatverkehr kann es zu einer Verlagerung hin zum Motorisierten Individual Verkehr (MIV) kommen, da dieser attraktiver wird bzw. neue Personengruppen, wie z. B. gesundheitlich eingeschränkte Personen oder Kinder, erschließt. Dieser kann eine Erhöhung der Verkehrsleistung mit sich bringen. Im Wirtschaftsverkehr wäre ein solcher Rebound-Effekt das Fahren kleinerer Fahrzeuggrößen, da die Einsparungen durch Intelligente Kommunikationstechnologien (IKT) auch das Einsetzen kleinerer Fahrzeuggrößen ökonomisch ermöglicht. Auch diese Entwicklung könnte eine Erhöhung der Verkehrsleistung bewirken. Durch die Kopplung unterschiedlicher Modelle (makroskopische und mikroskopische Modelle, Verkehrsflussmodelle, Emissionsberechnungsmodelle) nach Abschluss der Analyse der einzelnen Effekte werden im weiteren Projektverlauf die Wirkungen dieser logisch voneinander abhängigen, aber teilweise zeitlich entkoppelten Effekte integriert betrachtet.

2.1 Effekte digitaler Technologien in Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur für den Personenverkehr

Im folgenden Kapitel werden die Auswirkungen der fortschreitenden Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen und korrespondierender Anpassungen der Infrastruktur im Personenverkehr untersucht. Dazu erfolgt zunächst ein Literaturüberblick zu möglichen Umweltwirkungen. Daraufhin werden die zu untersuchenden Szenarien entwickelt und die verwendeten Modelle zur Flottenmodellierung (DLR-PEV), Verkehrsnachfragemodellierung (DLR-PEV) und der Abschätzung der resultierenden Netzbelastungen (KIT-IfV) erläutert. Ferner wird das eingesetzte Modell TREMOD zur Bilanzierung der ökologischen Effekte präsentiert. In der Ergebnisanalyse werden die Modellergebnisse integriert dargelegt und diskutiert.

2.1.1 Theoriebasierte Analyse der Auswirkungen auf den Verkehrsablauf

Die Einführung automatisierter Fahrzeuge wird zweifellos das herkömmliche Verkehrsgeschehen ändern. Der Automatisierungsgrad bei Kfz wird allgemein in sechs Automatisierungs-Stufen eingeteilt (siehe Abbildung 2). Die letzte Stufe der Automatisierung sieht die Reduzierung (und Eliminierung) der Verantwortung der FahrerInnen vor. Viele automatisierte Fahrfunktionen sind technologisch bereits umgesetzt. Sie werden derzeit in verschiedenen Pilot- und Demonstrationsprojekten getestet. Die uneingeschränkte Nutzung vollautomatisierter Fahrzeuge und damit die Neudefinition eines sozio-technischen Systems setzt allerdings die Lösung diverser technischer, rechtlicher und gesellschaftlicher Fragestellungen voraus. Mit dem Gesetz zum autonomen Fahren wurden 2021 rechtliche Möglichkeiten für die Nutzung weitgehender automatisierter Fahrfunktionen im Verkehr geschaffen. Allerdings ist davon auszugehen, dass die zurzeit realisierten automatischen und teilautonomen Fahrfunktionen noch nicht die verkehrliche Effizienz ermöglichen, die ausgereifte Systeme in der Zukunft bieten werden.

Die Folgen der aufkommenden Technik, ob positiv oder negativ, werden das Verkehrsangebot des bestehenden Straßennetzes beeinflussen. Aus Sicht der Verkehrsplanung ist es deshalb wichtig, mögliche Kapazitätsgewinne schon frühzeitig zu erkennen, um langfristige Planungsaufgaben entsprechend anzupassen. Da in vielen Aspekten der kommenden Technologieeinführung noch zahlreiche Fragen offen sind, werden in Forschungsprojekten typischerweise Annahmen getroffen, die eine simulative bzw. explorative Untersuchung der Auswirkungen der Digitalisierung im Verkehr ermöglichen. In Bezug auf fahrzeugseitige Automatisierung sind dies beispielsweise Annahmen über die durch automatisierte Fahrzeuge gefahrenen Folgezeitlücken.

Abbildung 2: Automatisierungsgrade des automatisierten Fahrens

SAE Level	Name	Definition	Beispiel	Quer- & Längsführung	Überwachung Fahrzeugumgebung	Rückfall Verantwortung	Automatisierte Fahrsituationen
Mensch verantwortlich für die Überwachung der Fahrzeugumgebung							
0	Nicht automatisiert	Fahraufgabe liegt vollständig bei der fahrzeugführenden Person	Tot-Winkel-Warnung	Mensch	Mensch	Mensch	keine
1	Fahrer-assistenz	Situationsbedingte Automatisierung der Längs- oder Querführung	Abstands-tempomat	Mensch & System	Mensch	Mensch	teilweise
2	Teil-automatisiert	Situationsbedingte Automatisierung der Längs- & Querführung	Abstands-tempomat & Spurhalte-assistent	System	Mensch	Mensch	teilweise
System verantwortlich für die Überwachung der Fahrzeugumgebung							
3	Bedingt automatisiert	Situationsbedingte Automatisierung der Fahraufgabe, fahrzeugführende Person muss immer sofort übernahmebereit sein	Stau-assistent	System	System	Mensch	teilweise
4	Hoch-automatisiert	Situationsbedingte Automatisierung der Fahraufgabe inklusive sicheres Halten, falls fahrzeugführende Person nicht oder zu spät übernahmebereit ist	Autobahn-Pilot	System	System	System	teilweise
5	Voll-automatisiert	Vollständige Automatisierung aller Fahraufgaben in allen Fahrsituationen	Autonomes Fahrzeug	System	System	System	alle

Quelle: Eigene Darstellung nach SAE International (2014)

Dazu gibt es bisher weder herstellerseitig noch von Seiten der regulierenden Behörden konkrete Vorhersagen. Diese haben aber einen großen Einfluss auf Kapazitäten der Infrastruktur. Infolgedessen sind Ergebnisse der Literaturanalyse in einem engen Zusammenhang mit den jeweils getroffenen Annahmen zu interpretieren. Anhand der Literaturrecherche zu Kapazitätsauswirkungen kann exemplarisch dargestellt werden, dass die Streuung der Ergebnisse sehr breit ist. Eine Erhöhung der Kapazität hat einen positiven Einfluss auf die Harmonisierung des Verkehrsflusses und kann somit maßgeblich zur Minderung der staubedingten Emissionen führen. Dabei liegen Ergebnisse nach Friedrich (2015) und Krause et al. (2017) im Bereich von 30–80 % Kapazitätszuwachs; andererseits wurden auch sehr optimistische Prognosen von fast 300 % Kapazitätszuwachs berechnet (Tientrakool et al. 2011). Nachfolgend werden relevante Studien und die darin getroffenen Annahmen detailliert vorgestellt.

2.1.1.1 Fernstraße

Tientrakool et al. (2011) und Friedrich (2015) berechnen potentielle Kapazitätssteigerungen durch hochautomatisierte Fahrzeuge auf Basis theoretischer Berechnungen für einzelne Autobahnabschnitte. Tientrakool et al. gelangen zu potentiellen Steigerungen von 40% für eine vollständige Durchdringung mit automatisierten, nicht vernetzten Fahrzeugen, und von 270% mit vernetzten Fahrzeugen in der Flotte. Friedrich berücksichtigt neben Pkw auch den Schwerverkehr und ermittelt eine Kapazitätssteigerung von etwa 80%.

In Deutschland ermitteln Krause et al. (2017) umfassend die Auswirkungen von Automatisierung auf die Kapazität der Fernstraßen im Netzzusammenhang. Die von der Forschungsvereinigung der Automobiltechnik (FAT) des VDA geförderte Studie stützt sich auf die SAE-Definition der Automatisierungsstufen (SAE International 2014) und bildet das Fahrverhalten von automatisierten und vernetzten Fahrzeugen in einem mikroskopischen Verkehrsflussmodell ab. Für die Abbildung von Quer- und Längsführung von automatisierten Fahrzeugen wurden Annahmen getroffen, die mit einem ExpertInnenkreis aus VertreterInnen von verschiedenen Automobilherstellern und Zulieferern abgestimmt wurden. Aus den Ergebnissen der Studie geht hervor, dass während der Übergangsphase der Technologiediffusion in die Fahrzeugflotte zunächst mit einer Reduzierung der Kapazität von bis zu 7 % zu rechnen ist. Erst mit einem signifikanten Anteil an automatisierten und vor allem an vernetzten Fahrzeugen werden Kapazitätsgewinne erreicht, die je nach Netzelement (Einfahrt, Ausfahrt, Verflechtung oder freie Strecke) bis zu 45 % ausmachen können. Eine Gesamtbetrachtung der Auswirkungen im Fernstraßennetz hat gezeigt, dass bei Vollautomatisierung ein mittlerer Kapazitätsgewinn von 30 % erreicht werden kann. Für ein Szenario, in dem besonders geringe Zeitlücken von 0,5 Sekunden eingehalten werden können, beträgt der errechnete mittlere Kapazitätsgewinn ca. 40 %. Die Entlastung des Fernstraßennetzes durch eine Kapazitätssteigerung von 30 % führt zu einer Verringerung der mittleren Verlustzeiten um 64 % bzw. einer Reduzierung der Gesamtfahrzeit um 7 %. Abschließend wurde eine volkswirtschaftliche Bewertung durchgeführt, um Zeitgewinne aufgrund der Fahrzeugautomatisierung im Personen- und Güterverkehr mit den aktuell gültigen Kostensätzen der Bundesverkehrswegeplanung zu monetarisieren. Als Ergebnis entspricht der volkswirtschaftliche Nutzen von Vollautomatisierung näherungsweise dem Nutzen der Anlegung eines Zusatzfahrstreifens entlang des gesamten Bundesautobahnnetzes.

Haberl et al. (2018) gelangen zu vergleichbaren Ergebnissen im Rahmen einer ähnlichen Untersuchung für das österreichische Autobahnnetz. Maximale Kapazitätsgewinne betragen bei 100% Durchdringung mit automatisierten Fahrzeugen in dieser Untersuchung, 30% auf der freien Strecke sowie 20-25% an Verflechtungsstrecken.

Shladover et al. (2012) haben den Effekt automatisierten Längsverhaltens auf die Kapazität von Autobahnen untersucht. Bezüglich des Längsverhaltens automatisierter Fahrzeuge wird

zwischen dem abstandsgeregelten Tempomat (Adaptive Cruise Control – kurz ACC) und dem abstandsgeregelten Tempomat bei Kommunikation mit dem vorausfahrenden Fahrzeug (Cooperative ACC, kurz CACC) unterschieden. Grundlage der Untersuchung waren Feldversuche, bei denen ProbandInnen selbst die Zeitlücke zum Vorderfahrzeug einstellen konnten. Auf dieser Basis wurden per Simulation Vorhersagen über Kapazitätsveränderungen bei unterschiedlichen Durchdringungsraten gemacht. Anhand der Feldversuche wurde deutlich, dass ohne Kommunikation zwischen den Fahrzeugen die ProbandInnen ähnliche Zeitlücken einstellten wie beim manuellen Fahren. Entsprechend sei für die Marktdurchdringung mit automatisierten Fahrzeugen ohne Kommunikation kein Kapazitätszuwachs zu erwarten. Bei Kommunikation eines Fahrzeugs mit dem Vorderfahrzeug hingegen berge die Technologie ein großes Potential zur Erhöhung der Kapazität, da kürzere Folgezeitlücken ermöglicht würden. Diese kämen allerdings erst bei einer hohen Marktdurchdringung zum Tragen. Für 20 % Marktanteil ergab die Simulation eine Kapazität von 2.090 Fahrzeugen/Fahrstreifen, für 50 % 2.389 und für 100 % knapp 4.000 Fahrzeuge, was einer Verdoppelung der Kapazität entspricht. Im Falle einer Nachrüstung nicht-automatisierter Fahrzeuge mit Kommunikationseinheiten seien höhere Kapazitätsgewinne im Mischverkehr zu erwarten.

Nach Kesting et al. (2010) wird mit einer erhöhten Durchdringung der mit ACC ausgestatteten Fahrzeuge die Stabilität des Verkehrsflusses und somit auch die Kapazität erhöht. Die Stauwahrscheinlichkeit wird also verringert. Dies hat positive Auswirkungen auf die Emissionen. Bei einer Ausstattung von 20 % ACC wird die maximale Verkehrsstärke um 6–8 % erhöht. Für eine höhere Ausstattungsrate von 50 % wurde eine Erhöhung der Kapazität um 16–21 % festgestellt.

Auf Autobahnen ist durch die mögliche enge „Kopplung“ automatisierter Fahrzeuge, sofern diese miteinander vernetzt sind, nicht nur eine Erhöhung der Kapazität möglich, sondern durch die geringen Abstände können auch Kraftstoffeinsparungen erzielt werden. Weitere Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch könnte durch ein geändertes Beschleunigungsverhalten und die Verstetigung des Verkehrs bedingt werden. Nach Fagnant und Kockelman (2015) können automatisierte Fahrzeuge, ausgestattet mit kooperativen Assistenzsystemen, wie z. B. einem kooperativen Abstandsregeltempomat, den Verkehrsfluss harmonisieren und die Anzahl der Beschleunigungsvorgänge minimieren. Als Ergebnis werden potentielle Kraftstoffersparnisse von 23–39 % geschätzt, abhängig von der angenommenen Implementierung der Steuerungsalgorithmen.

Ein weiterer Effekt, der auf Autobahnen zum Tragen kommen kann, ist der verbesserte Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA). SBA wirken heutzutage auf den Verkehrsfluss, indem sie den Verkehrsteilnehmenden über Wechselverkehrszeichen, welche auf die aktuelle Verkehrssituation reagieren, Gebote und Informationen anzeigen. Ziel ist es, die Verkehrssicherheit zu erhöhen und den Verkehrsablauf zu optimieren. Die Wirkung einer SBA hängt von der Akzeptanz der Gebote und der Umsetzung der Informationen durch die Verkehrsteilnehmenden ab. Die Wirksamkeit aktuell eingesetzter SBA zur Verbesserung des Verkehrsflusses ist in der Literatur gut belegt (Hoffmann et al. 1997). Durch eine zunehmende fahrzeugseitige Automatisierung und Vernetzung von Fahrzeugen mit der SBA lässt sich die Wirkung vermutlich steigern. Allerdings gibt es keine wissenschaftlichen Studien, die diese Annahme quantifizieren.

2.1.1.2 Stadt

Im städtischen Verkehr gelten grundsätzlich andere Rahmenbedingungen als auf Fernstraßen. Ein wesentlicher Aspekt ist, dass Knotenpunkte plangleich geführt werden und somit aufgrund der begrenzten Kapazität der Kreuzungsfläche im Vergleich zu freien Strecken die Mehrheit der Verlustzeiten im städtischen Verkehrsnetz an Knotenpunkten entsteht. Vor diesem Hintergrund führen auch Begrenzungen der höchsten zulässigen Geschwindigkeit auf 30 km/h nicht zu wesentlichen Fahrzeitverlusten, sondern überwiegend zu positiven Wirkungen wie eine Erhöhung

der Sicherheit und Reduktion der Emissionen (SVI 2015; UBA 2016). Daher weisen Knotenpunkte in städtischen Netzen das größte Optimierungspotential zur Reduzierung der verkehrsbedingten Emissionen und zur Verringerung von Verlustzeiten auf.

Die Optimierungssysteme im Bereich der Knotenpunkte stützen sich vor allem auf die Einführung von verbesserten Anfahrstrategien wie z. B. "vorausschauendes Bremsen", "antizipativer Start" oder "flying Start" in individuellen Fahrzeugen. Diese Strategien haben das Ziel, Fahrkomfort, Verbrauch, Fahrzeit bzw. die Anzahl der Haltevorgänge zu verbessern. Für eine erfolgreiche Umsetzung der Anfahrstrategien ist eine Vernetzung der ausgestatteten Fahrzeuge mit der unterstützenden Verkehrsinfrastruktur erforderlich. Als Beispiel gilt das Fahrerassistenzsystem GLOSA („Green Light Optimal Speed Advisory“, dt. Grünlichtassistent), das auf Basis der Vernetzung zwischen Lichtsignalanlagen und Fahrzeugen und mit Hilfe individueller Geschwindigkeitsempfehlungen mittlere Wartezeiten und die Anzahl der Haltevorgänge reduzieren soll. Aus den Ergebnissen der modellbasierten Untersuchung des „Grünlichtassistenten“ von Treiber und Kesting (2014) geht hervor, dass auf einer mit Grünlichtassistent ausgestatteten Lichtsignalanlage bei geringer Verkehrsnachfrage 15 % weniger Haltevorgänge und eine Senkung der Fahrzeit und des Kraftstoffverbrauchs von 4 % bei einer maximalen Anfahrgeschwindigkeit von 50 km/h erreicht werden können. Im Vergleich zum Beitrag von ACC zur Reduzierung der Beschleunigungsvorgänge (ca. 25 %), verbessere der Grünlichtassistent die Kennzahlen in einem geringeren Maße. Jedoch sei eine Verbesserung bereits mit dem ersten ausgestatteten Fahrzeug erkennbar. Dies ist ein Vorteil gegenüber Optimierungsstrategien, wie z. B. Vehicle-Platooning, bei dem eine Minstdurchdringungsrate erreicht werden muss.

Eine allgemeine Einschätzung für Kapazitätssteigerungen in städtischen Netzen nimmt Friedrich (2015) auf Basis eines signalisierten Knotenpunktes vor. Anhand veränderter Zeitlücken von automatisierten gegenüber nicht-automatisierten Fahrzeugen wird mithilfe einer theoretischen Kapazitätsabschätzung ein Potential zur Steigerung der Kapazität um 40% aufgezeigt.

Aufbauend auf der Annahme, dass Passagiere während automatisierter Fahrten Beschleunigungen sensibler wahrnehmen als Fahrer dies tun, untersuchen Le Vine et al. (2015) die Auswirkungen auf Kapazitäten signalisierter Knotenpunkte bei defensiverem Beschleunigungsverhalten im Vergleich zu manuellen FahrerInnen. Zusätzlich wurden die Signalprogramme und Abbiegegeschwindigkeiten variiert. Je nach Szenario ergeben sich für die untersuchte Marktdurchdringung von 25 % automatisierter Fahrzeuge Kapazitätseinbußen von 4–53 %. Um diesem Problem entgegenzuwirken, werden von den Automobilherstellern neue Fahrzeugkonzepte entwickelt. Winner und Wachenfeld (2015) beschreiben das Konzept des Aktivfahrwerks, bzw. Neigefahrwerks, das mit Hilfe eines elektromechanisch betätigten Federungssystems jedes Rad einzeln ansteuert und die für die Insassen spürbaren Längs- und Querschleunigungen vermindert. Genaue Werte der durch die NutzerInnen akzeptierten, tatsächlich gefahrenen Beschleunigungen für Fahrzeuge, die mit dieser Technologie ausgestattet sind, liegen aber bisher nicht vor.

Eine mikroskopische Untersuchung des Verkehrsflusses des Beratungsunternehmens Atkins (2016) prognostiziert die Kapazität städtischer Straßennetze bei unterschiedlichen Durchdringungsraten und unterschiedlichem Abstandsverhalten automatisierter Fahrzeuge. Aufgrund qualitativer Aussagen über das Fahrverhalten werden grundsätzliche Unterschiede zu menschlichen FahrerInnen aufgezeigt und für verschiedene Netze und Belastungen die jeweiligen Auswirkungen dieser anhand von Verkehrsflusssimulationen ermittelt. Atkins (2016) erwarten hierbei, dass die NutzerInnen Systemeinstellungen vornehmen können. Für die Anfangsphase der Einführung automatisierter Fahrzeuge wird aufgrund dessen angenommen, dass die automatisierten Fahrzeuge eher vorsichtig fahren werden und die Kapazitäten sinken könnten. Zudem wird davon ausgegangen, dass erst ab einer Durchdringungsrate von vernetzten und automatisierten Fahrzeugen (d. h., wenn ein sehr hoher Automatisierungsgrad erreicht ist) von 50 %

bis 75 % die Kapazitäten im Vergleich zu manuellen Fahrzeugen steigen. Abhängig von der Durchdringungsrate ergaben die Simulationen Reisezeitverbesserungen zwischen 7 % (50 % Durchdringung) und 40 % (100 % Durchdringung). Auf Netzabschnitten mit niedrigen Geschwindigkeiten werden aufgrund der Verstetigung des Verkehrs auch durch Teilautomatisierung (Fahrerassistenzsysteme) starke Verbesserungen bezüglich der Reisezeiten erwartet. Insgesamt wird erwartet, dass die Zuverlässigkeit der Reisezeiten mit steigendem Marktanteil automatisierter Fahrzeuge zunimmt (Atkins 2016). Eine weitere Studie von Lu et al. (2020) untersucht die Auswirkungen hochautomatisierter Fahrzeuge auf die Kapazitäten eines zusammenhängenden urbanen Straßennetzes mithilfe der Simulationssoftware SUMO. Die Studie ermittelt eine Zunahme der Kapazität von 16% im Fall eines konstruierten, schachbrettartigen urbanen Verkehrsnetzes, und von 25% im Fall eines Modells eines europäischen städtischen Teilnetzes. Im Gegensatz zu den vorherigen genannten Studien verläuft der Kapazitätswachst in den Ergebnissen dieser Studie fast linear mit dem Durchdringungsgrad. Grund dafür ist allerdings, dass kein gesondertes Verhalten zwischen automatisierten und nicht-automatisierten Fahrzeugen modelliert wurde. Die Ergebnisse bestätigen die Aussage der Atkins-Studie (2016), dass bei Vollautomatisierung die Zuverlässigkeit nahe der Kapazitätsgrenze zunehme. Mithilfe der Bildung von Makro-Fundamentaldiagrammen wurde aufgezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit für Verkehrszusammenbrüche auch im gesättigten Netz abnimmt (Lu et al. 2020).

Ein weiteres Potential zur Verringerung der Emissionen in Städten besteht in der Beseitigung von Parksuchverkehr. Die Parkplatzsuche beginnt nach Birkner (1994) bei Erreichen des ersten akzeptablen Parkstandes, wenn dieser bereits belegt ist. Ausgehend von einer vergleichbaren Definition des Parksuchverkehrs hat die empirische Untersuchung von Reinhold (1999) gezeigt, dass ein Anteil von 26–44 % des innerstädtischen Verkehrs dem Parksuchverkehr zuzuordnen ist. Im Extremfall wird in manchen Straßenabschnitten bis zu 80 % des Verkehrs als „vermeidbar“ und „von äußerem Parkdruck verursacht“ bezeichnet. Aus den Ergebnissen des Verkehrsdatendienstes INRIX geht hervor, dass AutofahrerInnen in Deutschland durchschnittlich 41 Stunden im Jahr mit der Parkplatzsuche verbringen. Digitalisierung im Verkehr schafft neue Technologien, die eine Verringerung des Parksuchverkehrs und somit der Emissionen in Städten ermöglichen. Als Beispiel wurden Dienste entwickelt, die eine Teilung von Parkplätzen erlauben, ähnlich wie bereits in etablierten Car- oder Bikeshaaring-Systemen. Ein weiterer Ansatz besteht darin, frei verfügbare Parkplätze mit Sensoren zu erkennen und die Information an vernetzte Fahrzeuge weiterzuleiten. Eine Quantifizierung der Auswirkungen der Automatisierung auf den Parksuchverkehr wurde aber bisher nicht vorgenommen.

2.1.1.3 Integrierte Betrachtung verschiedener Streckentypen

Die Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf den Verkehrsfluss unterscheiden sich grundsätzlich je nach Streckentyp. Setzt sich eine Fahrzeugroute aus mehreren Straßentypen zusammen, so werden sich die Auswirkungen z. B. auf die Fahrzeit überlagern und aufgrund dessen ist eine differenzierte Betrachtung erforderlich. Weiterhin sind Nutzungsdomänen (s.g. Operational Design Domains) zu definieren, in denen sich die jeweiligen Automatisierungsstufen ohne einen Eingriff des Fahrers bewegen können. Szimba und Hartmann (2018) haben den Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf die Fahrtzeit für einen typischen Pendlerweg in Deutschland untersucht. Sie nehmen hierbei an, dass die Digitalisierung im Verkehr zur Harmonisierung des Verkehrsflusses und somit zu einer erhöhten Straßenkapazität führt. Weitere Voraussetzungen waren dabei ein verbessertes Anfahrverhalten automatisierter und vernetzter Fahrzeuge an konventionellen signalgesteuerten Knotenpunkten sowie der Wegfall des Parksuchverkehrs. Unter Berücksichtigung dieser getroffenen Annahmen geht aus den Ergebnissen hervor, dass bis zu 25 % Fahrzeiterparnisse auf typischen Pendlerwegen zwischen 20–30 km erzielt werden können. Diese Fahrzeiterparnis führt mit Berücksichtigung der von TNS Infratest & IVT (2013)

ermittelten Zeitkosten von 6,90 €/h pro Pendlerweg zum Nutzen von bis zu ca. 550 €/Jahr. Dabei wurde der Nutzen durch Kraftstoffersparnis nicht betrachtet. Dieser Nutzen entspricht unter Berücksichtigung der Fahrzeugnutzungsdauer der Größenordnung der Zusatzkosten, die AutofahrerInnen bereit sind zu zahlen, um automatisierte Assistenzsysteme als Zusatzausstattung beim Fahrzeugkauf zu erwerben. Diese Zahlungsbereitschaft wurde auf Basis einer Befragung einer amerikanischen repräsentativen Stichprobe ermittelt, in der die NutzerInnen eine hypothetische Kaufentscheidung in einem Discrete-Choice-Experiment fällen sollten. Die Studie ergab, dass die durchschnittliche Zahlungsbereitschaft für Teilautomatisierung bei 3.500 \$ (ca. 3.000 €) und für Vollautomatisierung 4.900 \$ (ca. 4.300 €) beträgt (Daziano et al. 2017).

Das von der europäischen Kommission geförderte CoEXist-Projekt zielt darauf ab, die Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf die Infrastrukturauslastung im Mischverkehr abzuschätzen. Ausgangspunkt dafür ist die Ertüchtigung der Modellannahmen für die Abbildung automatisierten Fahrverhaltens innerhalb der Simulationssoftware. Zu diesem Zweck wurden in Fahrversuchen Daten über das Verhalten von zwei automatisierten Testfahrzeugen während Folge- und Überholvorgängen im realen Straßenverkehr erhoben. Mithilfe dieser Daten wurde das Folge- und das Spurwechselverhalten der Software PTV Vissim kalibriert. Zusätzlich wurden Kapazitätsuntersuchungen auf unterschiedlichen Netzelementen durchgeführt. Die Auswertung der Daten aus den Fahrversuchen zeigen, dass bei Kommunikation der Fahrzeuge untereinander sehr kurze Zeitlücken von unter 0,5 s gefahren werden können und damit starke Kapazitätsgewinne möglich sind (Sukennik et al. 2018; Zeidler 2018).

Ein Aspekt des automatisierten Fahrens, der sowohl innerstädtisch als auch außerstädtisch positive Umweltwirkungen haben kann, sind im Vergleich zu menschlichen FahrerInnen allgemein (unabhängig von Knotenpunkten) geglättete Fahrzyklen. Unter dem Begriff geglättet ist in diesem Kontext keine Änderung des Fahrtverlaufs an sich – wie z. B. eine Reduzierung der Stopps – sondern eine verringerte lokale Varianz der Beschleunigung zu verstehen. Bei manuellen FahrerInnen spielt die unperfekte Bedienung des Fahrzeugs als auch vorausschauendes Fahren für den Energieverbrauch und Schadstoffausstoß eine große Rolle. Beim automatisierten Fahren kann durch eine gute Sensorik und Steuerungslogik sehr viel genauer auf die Wunschgeschwindigkeit hin beschleunigt bzw. gebremst werden. Liu et al. (2017) berechneten die resultierenden Emissionen von mehreren geglätteten bestehenden amerikanischen Fahrzyklen und verglichen die Ergebnisse mit den Emissionen der ursprünglichen Zyklen. Die Ergebnisse variieren nach Schadstoff und Fahrzyklus. Während die Einsparungen von CO₂-Emissionen nur zwischen 2 % und 6,5 % lagen, wurden bei anderen Schadstoffen wie Feinstaub- und NO_x-Einsparungen von bis zu 19 % bzw. 15,5 % berechnet (Liu et al. 2017).

2.1.1.4 Zusammenfassung

Die Literaturanalyse hat gezeigt, dass eine effiziente Fahrweise durch fahrzeug- und infrastrukturseitige Digitalisierung zu einem positiven Einfluss auf die Harmonisierung des Verkehrs und die Verringerung verkehrsbedingter Emissionen führen kann. Eine Schlüsselrolle spielt hier vor allem der Anteil an kommunizierenden hochautomatisierten Fahrzeugen, da besonders bei Kommunikation die Vorteile der Digitalisierung ausgenutzt werden können. Umgekehrt ist zu beachten, dass wenige automatisierte Fahrzeuge, die ein besonders defensives Fahrverhalten aufweisen, eine überproportional negative Auswirkung auf die Homogenität des Verkehrsflusses und die Kapazität haben können.

Grundsätzlich kann zwischen den zwei folgenden Arten der Wirkungen von Digitalisierung und Automatisierung unterschieden werden.

1. Systeme, die eine individuelle positive Auswirkung auf den Verkehrsablauf aufweisen; das heißt, die positiven Effekte skalieren linear mit der Marktdurchdringung;

2. Systeme, die einen Mindestdurchdringungsgrad an ausgestatteten Fahrzeugen erfordern, um positive Auswirkungen auf den Verkehrsablauf zu generieren.

Zu den Systemen erster Art gehören fahrzeugseitige Optimierungssysteme, wie z. B. der adaptive Abstandstempomat oder der Grünlichtassistent. Zu den Systemen zweiter Art gehören insbesondere diejenigen Maßnahmen, die eine Kommunikation zwischen Fahrzeugen erfordern, wie beispielsweise das Platooning. Beide Arten von Systemen haben auch einen individuellen Nutzen (sowohl in Bezug auf Kosten als auch auf Zeit und Komfort) für die FahrerInnen. Jedoch tritt der im zweiten Fall nur ein, wenn ein kommunizierendes Fahrzeug auf mindestens ein zweites kommunizierendes Fahrzeug trifft – und dann profitiert auch nur das an zweiter Stelle fahrende. Je nachdem, welche Fahrfunktion modelliert und wie diese konkret parametrisiert wurde, gibt es daher für alle Streckentypen gerade bei geringen bis mittleren Durchdringungsgraden unterschiedliche Prognosen hinsichtlich der Kapazitätsentwicklung und der Harmonisierungswirkung. Für die Beurteilung der Aussagekraft ist neben der Parametrisierung von Relevanz, ob die Untersuchungen mit gängigen, validierten Methoden der Verkehrssimulation vorgenommen wurden und die Fragestellung im Netzzusammenhang, also einer Abfolge von Netzelementen, betrachtet wurde. Für sehr hohe Grade der Marktdurchdringung zeigen Studien, die diese Anforderungen erfüllen, ein konsistentes Bild von 20-40 % Kapazitätszuwachs durch vernetzte hochautomatisierte Fahrzeuge.

Die Literaturrecherche zeigt ebenfalls, dass im städtischen Kontext die Unsicherheit hinsichtlich des tatsächlichen Fahrverhaltens automatisierter Fahrzeuge vergleichsweise hoch ist und die verfügbaren Studien auf weniger konsistenten Annahmen hinsichtlich des Fahrverhaltens als für Autobahnen fußen. Üblicherweise treffen an innerstädtischen Knotenpunkten Radfahrende, Zu Fußgehende, der motorisierte Verkehr als auch Fahrzeuge des ÖPNV in unterschiedlichen Formen zusammen. Dadurch ergeben sich einerseits deutlich komplexere Untersuchungsfälle für die Kapazitätsbemessung als auch mehr Herausforderungen für die Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen. Daher wird die Nutzung der automatisierten Fahrfunktionen auf der Autobahn deutlich früher als im Stadtverkehr erwartet.

2.1.2 Szenarienbeschreibung zum automatisierten und vernetzten Fahren im Personenverkehr

Zur Untersuchung der verkehrlichen Wirkung von Digitalisierung und Automatisierung im Personenverkehr wird zwischen drei Entwicklungspfaden unterschieden und daraus insgesamt acht Szenarien entwickelt. Die Szenarien unterscheiden sich vor allem im Hinblick auf den Anteil an vernetzten und automatisierten Fahrzeugen am gesamten Pkw-Bestand in Deutschland. Die Entwicklungspfade und die dazugehörigen Szenarien werden im Folgenden in Kürze beschrieben.

Entwicklungspfad A – Geringer Grad an Digitalisierung und Automatisierung

Entwicklungspfad A beinhaltet die Referenzszenarien für die Jahre 2030 und 2040, die sich durch einen vergleichsweisen geringen Grad an Digitalisierung und Automatisierung auszeichnen.

Referenzszenario A (2030)

Im Jahr 2030 im Referenzszenario A ist die Durchdringung der Automatisierungsstufen im Bestand privat genutzter Fahrzeuge kaum vorangeschritten. Lediglich 12% der privaten Pkw-Flotte weisen ein SAE Level von 2 und nur 5% ein SAE Level von 3 auf. Die zusätzlichen Kosten für Automatisierungsstufen bei der Anschaffung eines privaten Pkws sind mit 4.800€ für SAE Level 2 und 7.000€ für SAE Level 3 außerdem relativ hoch. Fahrzeuge mit einem

Automatisierungslevel von 4 oder 5 sind in diesem Szenario noch nicht verfügbar und der Anteil der vernetzten Fahrzeuge im privaten Pkw-Bestand liegt bei 0%.

Referenzszenario A (2040)

Auch im Jahr 2040 des Referenzszenarios A sind noch keine Fahrzeuge mit Automatisierungslevel 4 oder 5 für den privaten Erwerb verfügbar und es gibt keine vernetzten Fahrzeuge im privaten Pkw-Bestand. Im Vergleich zum Jahr 2030 sind die zusätzlichen Anschaffungskosten für die Automatisierungslevel 2 und 3 allerdings auf 2.800€ und 4.100€ gesunken. Dementsprechend ist der Anteil der Fahrzeuge mit Automatisierungsstufe 2 und 3 am privaten Pkw-Bestand auf 23% und 20% gestiegen.

Entwicklungspfad: B – Hoher Grad an Digitalisierung und Automatisierung

Entwicklungspfad B beinhaltet drei Szenarien, die sich im Hinblick auf den Grad an Digitalisierung und Automatisierung unterscheiden.

Szenario B (2030)

Im Jahr 2030 des Szenarios B ist die Digitalisierung und Automatisierung im Vergleich zum Entwicklungspfad A bereits deutlich stärker vorangeschritten und Fahrzeug der Automatisierungsstufen 4 und 5 sind auch für den privaten Erwerb verfügbar. Sie machen 9 und 2% der privaten Pkw-Flotte aus. Der Anteil der vernetzten Fahrzeuge am Bestand privater Pkws beträgt 11%.

Szenario B (2040)

Im Jahr 2040 des Szenarios B sind die Anschaffungskosten für automatisierte Fahrzeuge im Vergleich zum Jahr 2030 deutlich gesunken. Dadurch ist auch der Anteil an Fahrzeugen mit Automatisierungslevel 4 und 5 auf 29 und 25% gestiegen. Dies spiegelt sich ebenfalls in einem relativ hohen Anteil an vernetzten Fahrzeugen im privaten Pkw-Bestand von 53% wieder.

Szenario B+ (2040)

Im Szenario B+ sind die Anteile der verschiedenen Automatisierungsstufen am privaten Pkw-Bestand die gleichen wie im Szenario B im Jahr 2040. Der Unterschied liegt allerdings darin, dass im Szenario B+ auch geteilte automatisierte Mobilitätsangebote wie Car- und Ridesharing-Systeme verfügbar sind.

Entwicklungspfad: Maximalszenarien

In den Maximalszenarien wird betrachtet, wie sich eine 100%ige Automatisierung sowohl privater als auch geteilter Fahrzeuge auf den Verkehr auswirken könnte.

Maximalszenario 1 (2040): Voll-Automatisierung im privaten Pkw-Bestand

Im Maximalszenario 1 im Jahr 2040 verfügen alle Fahrzeuge des privaten Pkw-Bestandes über ein Automatisierungslevel von 5. Auch der Anteil der vernetzten Fahrzeuge beträgt 100%. Geteilte automatisierte Mobilitätsangebote sind jedoch nicht verfügbar.

Maximalszenario 2a (2040): Flächendeckende Verfügbarkeit und Nutzung geteilter automatisierter Angebote

Im Gegensatz zum Maximalszenario 1 wird im Maximalszenario 2a davon ausgegangen, dass sich im Jahr 2040 der gesamte motorisierte Individualverkehr auf andere Verkehrsmodi verlagert hat. Dies könnte das Resultat verschiedener Entwicklungen, wie z.B. einer Erhöhung der Attraktivität von Car- und Ridesharing-Angeboten und des ÖPV durch großzügige

Subventionierung, einem stark gestiegenen Umweltbewusstsein der Bevölkerung aufgrund zunehmend sichtbar werdender Folgen des Klimawandels, einem zunehmenden Platzmangel in Städten etc. sein. Die Wahrscheinlichkeit des Eintritts dieser Entwicklungen oder ihr konkreter Einfluss wird dabei nicht untersucht. Stattdessen steht im Vordergrund, zu eruieren, welche verkehrlichen Auswirkungen es hätte, wenn sich tatsächlich der gesamte motorisierte Individualverkehr auf andere Verkehrsmodi verlagert.

Der Mobilitätsbedarf der Privatpersonen wird dabei zum einen durch andere Verkehrsmittel wie Fahrräder und den Öffentlichen Personenverkehr gedeckt. Zum anderen kommen in Maximalszenario 2a automatisierte Mobilitätsangebote wie Car- und Ridesharing-Systeme zum Einsatz.

Maximalszenario 2b (2040): Kombination aus der Nutzung geteilter automatisierter Angebote und

Maximalszenario 2b mit **automatisierten privaten Pkw** geht noch einen Schritt weiter im Hinblick auf den Grad an Automatisierung und Digitalisierung. Alle Fahrzeuge des privaten Pkw-Bestandes sind mit Automatisierungslevel 5 ausgestattet. Ebenso liegt der Anteil der vernetzten Fahrzeuge bei 100%. Außerdem sind geteilte automatisierte Mobilitätsangebote zugelassen.

Die Szenarien der Entwicklungspfade A und B dienen vor allem dazu, die unterschiedlichen Auswirkungen eines geringen bzw. hohen Grades an Digitalisierung und Automatisierung auf den Verkehr zu bestimmen. Im Szenariojahr 2040 im Entwicklungspfad B sowie bei den Maximalszenarien wird außerdem unterschieden, ob geteilte, automatisierte Mobilitätsangebote existieren oder nicht.

Um die Szenarien adäquat in den Verkehrsmodellen umsetzen zu können, mussten einige Annahmen im Hinblick auf relevante Einflussgrößen getroffen werden. Diese beziehen sich beispielsweise auf die Entwicklung des Kraftstoffpreises bis 2030 und 2040 oder auch den Marktanteil von automatisierten Fahrzeugen in diesen Jahren. Um eine einheitliche Grundlage für die zukünftige Entwicklung in den Szenarien zu schaffen, mussten die Einflussgrößen nicht nur für die Jahre 2030 und 2040 bestimmt werden, sondern auch für die Ausgangssituation im Basisjahr 2017. Dieses Basisjahr bildet den Ausgangspunkt für alle weiteren Szenarien.

Die Tabelle 1 gibt einen Überblick der getroffenen Annahmen für die einzelnen Einflussgrößen je Szenario.

Tabelle 1: Parameter in den Szenarien Automatisierung und Vernetzung im Personenverkehr

Parameter	Basis-jahr 2017	Referenz-szenario A (2030)	Referenz-szenario A (2040)	Szena-rio B (2030)	Sze-nario B (2040)	Sze-nario B+ (2040)	Maximalsze-nario 1 (2040)	Maximalsze-nario 2a (2040)	Maximalsze-nario 2b (2040)
Kraftstoffpreis	0,1 €/km	Steigende Realkosten um 0,5% pro Jahr							
Parkgebühren	Urban: 2 € Subur-ban: 1 € Ländlich: 0 €	Erhöhung der Parkgebühren um 50%	Erhöhung der Parkgebühren um 100%	Erhöhung der Park-gebühren um 50%	Erhöhung der Parkgebühren um 100%				
Kosten ÖPV	Funktion abhängig von Raumtyp und Dis-tanz	Steigende Realkosten um 1% pro Jahr							
Entwicklung BIP	-	Steigung von 1,14% pro Jahr							
Anschaffungskosten für Pkw (in €) nach Größenklasse	Klein: 13.600 – 17.900 (BEV bis 24.700) Mittel: 19.100 – 24.200	Klein: 13.800 – 18.200 Mittel: 19.400 – 26.900 Groß: 27.600 – 41.200	Klein: 14.000 – 18.400 Mittel: 19.600 – 26.200 Groß: 27.900 – 41.600	Klein: 13.800 – 18.200 Mittel: 19.400 – 26.900 Groß:	Klein: 14.000 – 18.400 Mittel: 19.600 – 26.200 Groß: 27.900 – 41.600			Nicht relevant, da komplette Verlagerung des MIV auf andere Verkehrsmodi	Klein: 14.000 – 18.400 Mittel: 19.600 – 26.200 Groß: 27.900 – 41.600

Parameter	Basis-jahr 2017	Referenz-szenario A (2030)	Referenz-szenario A (2040)	Szenario B (2030)	Szenario B (2040)	Szenario B+ (2040)	Maximalszenario 1 (2040)	Maximalszenario 2a (2040)	Maximalszenario 2b (2040)
	(BEV bis 37.300) Groß: 27.100 – 40.500 (BEV bis 52.700)			27.600 – 41.200					
Zusätzliche Anschaffungskosten für Fahrzeuge mit Automatisierungslevel (in €)	-	Level 2: 4.800 Level 3: 7.000 Level 4: - Level 5: -	Level 2: 2.800 Level 3: 4.100 Level 4: - Level 5: -	Level 2: 3.700 Level 3: 5.100 Level 4: 7.300 Level 5: 13.500	Level 2: 2.300 Level 3: 3.300 Level 4: 4.400 Level 5: 5.800		Nicht relevant, da 100% Marktdurchdringung	Nicht relevant, da komplette Verlagerung des MIV auf andere Verkehrsmodi	Nicht relevant, da alle Pkw vollautomatisiert (Level 5)
Einführungszeiträume der Automatisierungslevel	-	Level 2: bereits verfügbar Level 3: 2024 Level 4: >2040 Level 5: >2040		Level 2: bereits verfügbar Level 3: 2021 Level 4: 2023 Level 5: 2027			Nicht relevant, da 100% Marktdurchdringung	Nicht relevant, da komplette Verlagerung des MIV auf andere Verkehrsmodi	Nicht relevant, da alle Pkw vollautomatisiert (Level 5)
Durchdringung der Automatisierungsstufen im Bestand privat genutzter Fahrzeuge	-	Level 2: 12% Level 3: 5% Level 4: 0% Level 5: 0%	Level 2: 23% Level 3: 20% Level 4: 0% Level 5: 0%	Level 2: 21% Level 3: 14% Level 4: 9%	Level 2: 12% Level 3: 23% Level 4: 29% Level 5: 25%		Level 2: 0% Level 3: 0% Level 4: 0% Level 5: 100%	Nicht relevant, da komplette Verlagerung des MIV auf andere Verkehrsmodi	Level 2: 0% Level 3: 0% Level 4: 0% Level 5: 100%

Parameter	Basis-jahr 2017	Referenz-szenario A (2030)	Referenz-szenario A (2040)	Szenario B (2030)	Szenario B (2040)	Szenario B+ (2040)	Maximalszenario 1 (2040)	Maximalszenario 2a (2040)	Maximalszenario 2b (2040)
				Level 5: 2%					
Jährliche Kfz-Steuer (in €) nach Antrieb und Größenklasse	Benzin: Klein: 46 Mittel: 108 Groß: 216 Diesel: Klein: 132 Mittel: 218 Groß: 393 PHEV: Klein: 18 Mittel: 22 Groß: 34 BEV: 0	Benzin: Klein: 24, Mittel: 56, Groß: 152 Diesel: Klein: 133, Mittel: 192, Groß: 356 PHEV: Klein: 18, Mittel: 22, Groß: 34 BEV: Klein: 12, Mittel: 11, Groß: 86						Nicht relevant, da komplette Verlagerung des MIV auf andere Verkehrsmodi	Benzin: Klein: 24, Mittel: 56, Groß: 152 Diesel: Klein: 133, Mittel: 192, Groß: 356 PHEV: Klein: 18, Mittel: 22, Groß: 34 BEV: Klein: 12, Mittel: 11, Groß: 86
Einstiegsalter alleiniger NutzerInnen autonomer Fahrzeuge (SAE Level 5)	-	14 Jahre							
Anzahl Elektrofahrzeuge in Millionen	Kaum vorhanden	10	23,7	10	23,7				

Parameter	Basis-jahr 2017	Referenz-szenario A (2030)	Referenz-szenario A (2040)	Szena-rio B (2030)	Sze-nario B (2040)	Sze-nario B+ (2040)	Maximalsze-nario 1 (2040)	Maximalsze-nario 2a (2040)	Maximalsze-nario 2b (2040)
(davon jeweils 2/3 BEV und 1/3 PHEV)									
Anteil vernetzter Fahrzeuge im Be-stand	-	0%	0%	11%	53%	56%	100%		
relative Kapazitätsän-derung (aggregiert)	-	0%	-3%	0%	3,9%	5,8%	30,5%		
Zulassung geteilter automatisierter Mo-bilitätsangebote	-	Nein				Ja	Nein	Ja	

Die konkreten Werte bzw. Annahmen zu den einzelnen Parametern entstammen unterschiedlichen Quellen. Die Werte zum Kraftstoffpreis, zu den Parkgebühren, den Kosten des Öffentlichen Verkehrs, zur Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes und zur jährlichen Kfz-Steuer entstammen der Verkehrsverflechtungsprognose nach dem Bundesverkehrswegeplan. Zu den Anschaffungskosten für Pkw hat bereits der ADAC (2019) eine Übersicht zusammengestellt, die für dieses Projekt genutzt wurde. Auf Basis der Verkehrsprognose des BMVI (2016) wurden die Anschaffungskosten bis 2040 fortgeschrieben.

Die zusätzlichen Anschaffungskosten für Fahrzeuge mit Automatisierungslevel und die Einführungszeiträume der Automatisierungslevel basieren auf Werten, die in einer Literaturrecherche (siehe Unterkapitel 2.1.1) ermittelt wurden. Die Durchdringung der Automatisierungsstufen im Bestand privat genutzter Fahrzeuge wurde mit dem Modell CAST berechnet, wie im folgenden Unterkapitel genauer erläutert wird. Das Einstiegsalter von 14 Jahren für die alleinige Nutzung autonomer Fahrzeuge hingegen wurde auf dem ersten Treffen des Forschungsbegleitkreises dieses Projektes als gemeinsamer Konsens erarbeitet. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die ersten Generationen hochautomatisierter Fahrzeuge noch nicht so gut auf den Transport von Kindern im Alter von 7 oder 9 Jahren ausgerichtet sind. Bei spontanen Straßensperrungen durch Unfälle, Baustellen etc. könnte es beispielsweise passieren, dass Kinder nicht direkt zum angestrebten Ziel gebracht werden können, sondern unter Umständen ein paar Hundert Meter von dem eigentlichen Ziel entfernt abgesetzt werden und dann selbstständig zusätzliche Straßen und Kreuzungen überqueren müssen. Dies wird Kindern im jugendlichen Alter von 14 und mehr Jahren am ehesten zugetraut.

Die Anzahl von 10 Millionen Elektrofahrzeugen im Jahr 2030 entspricht den politischen Zielen der Bundesregierung, während die Anzahl von 23,7 Millionen im Jahr 2040 auf Basis von Berechnungen mit dem Modell Tremod ermittelt wurde. Der Anteil vernetzter Fahrzeuge im Bestand beruht auf der Annahme, dass eine Vernetzung ab SAE Level 4 besteht und ergibt sich somit aus den Durchdringungsraten der Automatisierungsstufen. Die Anteile vernetzter und nicht vernetzter automatisierter Fahrzeuge sind die Eingangsgröße für die Ermittlung der relativen Kapazitätsänderung. Im Rahmen der Modellierung seitens des KIT-IfV wurden die Auswirkungen auf Autobahnen und im städtischen Verkehr getrennt betrachtet (siehe Unterkapitel 2.1.3.2). Da für die Einbeziehung der Kapazität im Verkehrsnachfragemodell ein Wert für das gesamte Straßennetz notwendig ist, wurden die Änderungsraten für das Autobahnnetz, Landstraßen und städtische Netze entsprechend der Fahrleistungsverteilung nach Bäumer et al. (2017) gewichtet und ein mittlerer Wert für das Gesamtnetz berechnet.

Außerdem wurde in Szenarien mit einem hohen Grad an Automatisierung und Vernetzung gezielt untersucht, welchen zusätzlichen verkehrlichen Effekt die Zulassung geteilter automatisierter Mobilitätsangebote im Vergleich zu einem Pkw-Bestand mit einem hohen Anteil an ausschließlich privaten automatisierten Fahrzeugen haben würde.

2.1.3 Modellierung

Im Folgenden werden die Funktionsweisen der eingesetzten Modelle zur Abbildung der Vernetzung und Automatisierung im Personenverkehr im Detail erklärt. Anschließend wird auf die Modellschnittstellen zwischen den einzelnen Modellen näher eingegangen.

2.1.3.1 Pkw-Besitz-Modellierung mit dem CAST-Modell

Der Pkw-Besitz von Haushalten und die damit zusammenhängende Verfügbarkeit von Privat-Pkw für die Haushaltsmitglieder haben einen entscheidenden Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl. Privat-Pkw können daher als Mobilitätswerkzeuge bezeichnet werden, da sie die NutzerInnen dazu befähigen, das Verkehrsmittel Pkw zu wählen. Neben dem Pkw gibt es noch weitere

Mobilitätswerkzeuge, wie z. B. Fahrräder, Zeitkarten für den ÖPNV sowie Registrierungen und Mitgliedschaften bei Car-Sharing-Anbietern, die die Nutzung bestimmter Verkehrsmittel ermöglichen.

Um das Verkehrsmittelwahlverhalten modellieren zu können, bedarf es auch der Information von Pkw-Verfügbarkeiten der Haushalte und Personen. Im Rahmen dieses Projekts wird das Fahrzeugbestandsmodell CAST (Car-Stock-Model) zur Modellierung von Diffusionsraten automatisierter Fahrzeuge im Privat-Pkw-Besitz und die Zuweisung der Fahrzeuge zu den einzelnen Haushalten genutzt. Der Aufbau und die Funktionsweise des Modells werden im Detail im Anhang A.7.1 erklärt.

2.1.3.2 Aggregation der verkehrlichen Wirkungen in deutschlandweitem Netzmodell PTV Validate

PTV Validate ist ein Modell des gesamten deutschen Hauptstraßennetzes. Es bietet die Möglichkeit, Auswirkungen auf den Verkehrsablauf durch fahrzeugseitige oder infrastrukturelle Änderungen im gesamten Netzzusammenhang zu untersuchen. In Validate wird die durchschnittliche Verkehrsnachfrage eines hochbelasteten Wochentages abgebildet. Zu diesem Zweck enthält es in 10.000 Verkehrszellen räumlich verortete Verkehrsnachfragedaten, auf Basis derer Quellen und Ziele von Wegen zugeordnet werden. Zur Kalibrierung der Belastungen wurden die durchschnittlichen Verkehrsbelastungsdaten aller Dienstage und Donnerstage eines Jahres verwendet, da an diesen Tagen die Verkehrsnachfrage üblicherweise am höchsten ist. Es enthält zudem Kapazitäten für jeden Streckenabschnitt, die den Auslastungsgrad im Ist-Zustand bestimmen. Es handelt sich dabei um planerische Kapazitäten, die keine temporären Vorkommnisse (z. B. Baustellen) abbilden, sondern nur den störungsfreien Zustand mit der aktuellen Fahrzeugzusammensetzung repräsentieren.

Zur Untersuchung der infrastrukturellen Effekte durch einerseits geänderte verkehrstechnische Rahmenbedingungen und andererseits eine veränderte Verkehrsnachfrage müssen die Modellparameter angepasst werden. Die entsprechenden Verfahrensschritte werden in Anhang A.7.2 beschrieben.

2.1.3.3 Aggregierte Verkehrsnachfragemodellierung mittels RAMOS

Ziel der aggregierten Verkehrsnachfragemodellierung ist die Abschätzung der verkehrlichen Wirkungen neuer automatisierter Technologien und Mobilitätskonzepte. Von besonderer Bedeutung ist die Berücksichtigung verschiedener Durchdringungsraten und Stufen der Automatisierung. Darüber hinaus sollen die Auswirkungen automatisierten Fahrens auf die Wegelängen für den motorisierten Individualverkehr aufgezeigt werden.

Die Untersuchung der Nachfragewirkungen, beeinflusst durch die Automatisierung, geschieht in verschiedenen Szenarien (vgl. Tabelle 1). Automatisierte Privat-Pkw werden dabei in allen Szenarien betrachtet. Bei einer hohen Automatisierung und Vernetzung werden zusätzlich geteilte automatisierte Mobilitätsangebote eingesetzt. Als Ergebnis werden Veränderungen bedeutender Mobilitätskenngrößen, wie des Modal Splits oder der Jahresverkehrsleistungen, berechnet und analysiert. Dabei sollen ebenfalls negative verkehrliche Auswirkungen wie Rebound-Effekte untersucht werden. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde das beim DLR bereits bestehende Modell grundlegend überarbeitet und neue Funktionalitäten und Daten wurden integriert. So wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verkehrswesen des KIT die Rückkopplung mit dem Verkehrsfluss integriert. Zusätzlich wurde die Einarbeitung der aktuellen MiD-Daten (MiD 2017) abgeschlossen und das Modell auf Plausibilität und Funktionalität geprüft.

Innerhalb des Moduls A sollen die vielfältigen Wirkmechanismen des automatisierten und vernetzten Fahrens analysiert und aufgezeigt werden. Zentraler Bestandteil ist hierbei ein

Verkehrsnachfragemodell, mit dem die verkehrlichen Auswirkungen quantifiziert werden. Die Funktionsweise des hier verwendeten aggregierten, raumlosen Verkehrsnachfragemodells RAMOS wird in Anhang A.7.3 im Detail erläutert.

2.1.3.3.1 Modellierung neuer Mobilitätsangebote (ACS/ARS) mit dem MaaS-Modell

Im Rahmen der Szenarienrechnungen werden im Verkehrsnachfragemodell zusätzliche neue Mobilitätsangebote modelliert. Dabei wird zwischen zwei Angebotsformen unterschieden (vgl. Abbildung 3). Im Fall des autonomen Car-Sharings (ACS) werden Fahrzeuge nacheinander von unterschiedlichen Nutzern genutzt. In der Zwischenzeit kommt es zu Repositionierungen in Form von Leerfahrten. Im Fall des autonomen Ride-Sharings (ARS) kann es zu einer Bündelung von Fahrten unterschiedlicher NutzerInnen kommen. Beim ARS sitzen also zeitgleich unterschiedliche NutzerInnen mit ähnlichen Start- und Zielorten im selben Fahrzeug.

Abbildung 3: Unterschiede zwischen ACS und ARS

	ACS	ARS
Geteilte Fahrzeuge	✓	✓
Geteilte Fahrten		✓
Umwege möglich		✓
Leerfahrten möglich	✓	✓
Aufteilung der Kosten unter mehreren Nutzern		✓

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Zur Berücksichtigung im raumlosen Verkehrsnachfragemodell sind angebots- und nachfrageseitige Anpassungen notwendig. Die Angebotsmodellierung führt zur Definition der Eigenschaften der neuen Mobilitätsoptionen. Auf Basis der nachgefragten Menge und der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge werden Verteilungen für Zufahrten (Leerfahrten) der Fahrzeuge zu den NutzerInnen ermittelt. Je höher die Anzahl der verfügbaren Fahrzeuge je Raumfläche ist, desto kürzer sind die Zugangswege. Die Zufahrtslängen sind daher raum- und nachfrageabhängig. Beim ARS erfolgt zudem eine Bündelung anhand der Nachfragedichte im Raum. Je höher die Anzahl der zeitgleich nachgefragten ARS-Wege ist, desto höher sind die Besetzungsgrade der Fahrzeuge. Aufgrund der Bündelung erfolgt zudem eine Berechnung von Umwegfaktoren. Die Funktionsweise des Modells wird im Detail in Anhang A.7.4 aufgezeigt.

2.1.3.4 Abschätzung der ökologischen Effekte: Methodisches Vorgehen

Als zentrale Umweltwirkungen werden zunächst die Abgasemissionen von Treibhausgasen (THG), Stickstoffoxid (NO_x) und der Partikelmasse (PM)¹ für die verschiedenen verkehrlichen Szenarien bilanziert.

Bei den Treibhausgasen werden Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) berücksichtigt und gemäß den IPCC-Guidelines 2007 zu CO_2 -Äquivalenten gewichtet. CO_2 stellt aktuell das wichtigste Treibhausgas im Verkehr dar und trägt ca. 99% zu den Treibhausgasemissionen in CO_2 -Äquivalenten bei (UBA 2021). Da Treibhausgase nicht nur lokal, sondern global auf die

¹ Partikel aus Abrieb oder Aufwirbelung sind hierbei nicht erfasst.

Klimaveränderung einwirken, werden die gesamten Treibhausgasemissionen well-to-wheel (WtW) ermittelt, also Treibhausgase der Energiebereitstellung sowie die Auspuffemissionen von Treibhausgasen.

NO_x und PM gehören zu den aktuell am meisten betrachteten Luftschadstoffen aus dem Verkehr. Hier stehen vor allem lokale gesundheitliche Effekte im Vordergrund, so dass hier nur die Abgasemissionen (Tank-to-Wheel) betrachtet wurden. Diese sind auch für die Einhaltung der europäischen NEC-Richtlinie (2016/2284/EU) bedeutsam, welche u.a. die Gesamtemissionen von NO_x und PM_{2,5} Deutschlands begrenzt, und für die Einhaltung der Luftqualitätsgrenzwerte (Richtlinie 2008/50/EG) für NO₂, PM_{2,5} und PM₁₀, insbesondere in Städten, Vorgaben macht.

Über die Abgasemissionen hinaus tragen auch andere Faktoren zu den ökologischen Auswirkungen bei. Diesbezüglich soll hier vor allem der Flächenbedarf quantifiziert werden, der mit (oft negativen) Veränderungen der Ökosysteme verbunden ist (Versiegelung, Biodiversität, Zerschneidung).

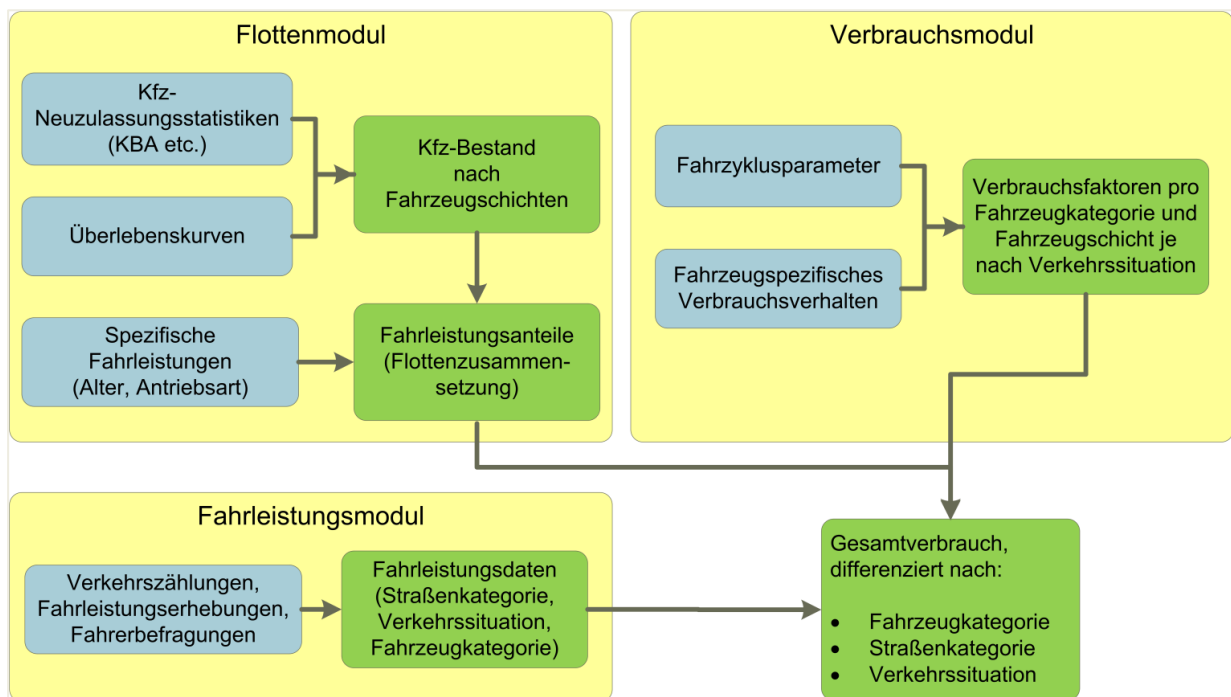
Die Modellierung der deutschlandweiten Emissionen erfolgt methodisch auf Basis des Modells **TREMOD (Transport-Emissions-MODEll)**, das von ifeu im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickelt wurde und das auch für die offiziellen Berichtspflichten der Bundesregierung eingesetzt wird. Die zugrundeliegende Version 6.01 ist in Knörr et al. (2020) dokumentiert. In TREMOD werden Energieverbrauch und Emissionen aller in Deutschland betriebenen Personenverkehrsmittel (Pkw, motorisierte Zweiräder, Busse, Bahnen, Schiffe, Flugzeuge) und Güterverkehrsträger (Lkw und Zugmaschinen, Bahnen, Schiffe, Flugzeuge) sowie der sonstige Kfz-Verkehr seit dem Basisjahr 1960 erfasst.

Der Verbrauch und die Emissionen im Straßenverkehr werden in TREMOD für jedes Bezugsjahr in folgenden Teilschritten berechnet.

- ▶ Aufbereitung des Fahrzeugbestands und dessen Fahrleistungsverteilung nach emissionsrelevanten Fahrzeugschichten und Fahrzeugalter für jede Fahrzeugkategorie. Die Aufteilung des Fahrzeugbestandes wurde für die Szenarienbetrachtung für den Zeitraum 2010 bis 2040 aus dem TREMOD-Trendszenario übernommen (siehe Knörr et al. 2020). Hieraus wurden mittlere fahrzeugspezifische Basis-Emissionsfaktoren abgeleitet (siehe 0)
- ▶ Aufteilung der Jahresfahrleistung auf die Straßenkategorien und Verkehrssituationen je Fahrzeugkategorie. Diese Daten wurden für die Berechnungen der deutschlandweiten Emissionen der verschiedenen Automatisierungsszenarien im Personen- und Güterverkehr angepasst (siehe 0 und 2.1.3.5).
- ▶ Aufbereitung der Emissionsfaktoren für jede relevante Fahrzeugschicht und Verkehrssituation. Hierbei werden die Energieverbrauchs- und Emissionsfaktoren des HBEFA 4.1 zugrunde gelegt (siehe nächster Abschnitt zum HBEFA).

Abschließend werden die Teilergebnisse verknüpft, und der jährliche Energieverbrauch und die Emissionen sowohl für den Straßenverkehr insgesamt als auch für alle gewünschten Aufteilungen und Aggregationen berechnet. Abbildung 4 gibt einen Überblick über den Ablauf der Berechnung.

Abbildung 4: Schematische Darstellung des Berechnungsablaufs in TREMOD



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu

Die Funktionsweise von TREMOD wird im Detail in Anhang A.7.5 erläutert.

2.1.3.5 Anpassung der Verkehrssituationen

Zur Ermittlung der Umwelteffekte durch die Änderung des Verkehrsflusses werden die verkehrlichen Wirkungen im Modul A mithilfe des Modells PTV Validate ermittelt (siehe Kapitel 2.1.4.3). Diese Ergebnisse werden als Eingangsdaten zur Neugewichtung der mittleren Emissionsfaktoren von Pkw und Lkw aus dem HBEFA 4.1 verwendet.

Die Fahrleistungsanteile nach Geschwindigkeitsbegrenzung wurden ebenfalls aus PTV Validate übernommen. Im Fall der Automatisierungsszenarien für Abschnitte ohne Geschwindigkeitsbegrenzung das Fahrverhalten auf Autobahnen mit einer Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h angenommen. Sonstige emissionsrelevante Annahmen im HBEFA, wie die Anteile nach Längsneigungsgrad oder weitere Unterkategorien für Bundesstraßen, wurden nicht verändert, sondern aus den mittleren Verkehrssituationen für TREMOD übernommen.

2.1.3.6 Modellschnittstellen

Im Folgenden werden die Modellschnittstellen zwischen den eingesetzten Modellen beschrieben. Hierbei handelt es sich jeweils um einen Datentransfer von einem Modell zum anderen. In Abbildung 5: werden die Schnittstellen zwischen den Modellen aufgezeigt.

Abbildung 5: Modellschnittstellen



Quelle: eigene Darstellung, DLR, KIT, Ifeu

Zunächst wird die Zusammensetzung des privaten Pkw-Bestandes nach Automatisierungslevel in dem Modell CAST ermittelt. Diese wird an das Netzmodell des KIT übergeben, welches die zu erwartenden Kapazitätsveränderungen im Straßennetz berechnet. Sowohl die Kapazitätsveränderungen als auch die Zusammensetzung des privaten Pkw-Bestandes werden anschließend in dem Modell RAMOS des DLR genutzt, um die veränderte Verkehrsnachfrage nach der Einführung automatisierter Fahrzeuge zu bestimmen.

Da in RAMOS selbst jedoch keine automatisierten Car- und Ridesharing-Angebote als Verkehrsmittel zur Verfügung stehen, wurde am DLR das Modell MaaS entwickelt. In MaaS wird das Angebot automatisierter Car- und Ridesharing-Fahrzeuge modelliert. Da die Verfügbarkeit von automatisierten Car- und Ridesharing-Fahrzeuge von deren Nutzung in RAMOS abhängt und die Nutzung wiederum von der Verfügbarkeit beeinflusst wird, sind die beiden Modelle RAMOS und MaaS iterativ miteinander gekoppelt. Dies bedeutet, die beiden Modelle werden solange miteinander iteriert bis sich ein Gleichgewichtszustand etabliert, in dem genügend automatisierte Car- und Ridesharing-Fahrzeuge für interessierte Nutzer zur Verfügung stehen und umgekehrt.

Im nächsten Schritt wird die ermittelte Verkehrsnachfrage von RAMOS an PTV Validate von KIT übergeben, das auf dieser Basis die Veränderung der Verkehrszustände bestimmt. Da für die Bestimmung der Verkehrszustände die Berücksichtigung des Straßengüterverkehrs notwendig ist, werden an dieser Stelle auch die Ergebnisse der fahrzeugseitigen Automatisierung im Wirtschaftsverkehr berücksichtigt (vgl. Unterkapitel 2.2.4.2). Beides, die in RAMOS ermittelte Verkehrsnachfrage sowie die Veränderung der Verkehrszustände aus PTV Validate, werden schließlich an das Modell TREMOD des ifeu übergeben. Mittels TREMOD werden die in den verschiedenen Szenarien ausgestoßenen Emissionen berechnet.

2.1.4 Ergebnisanalyse: Verkehrliche und ökologische Wirkungen der Automatisierung und des vernetzten Fahrens

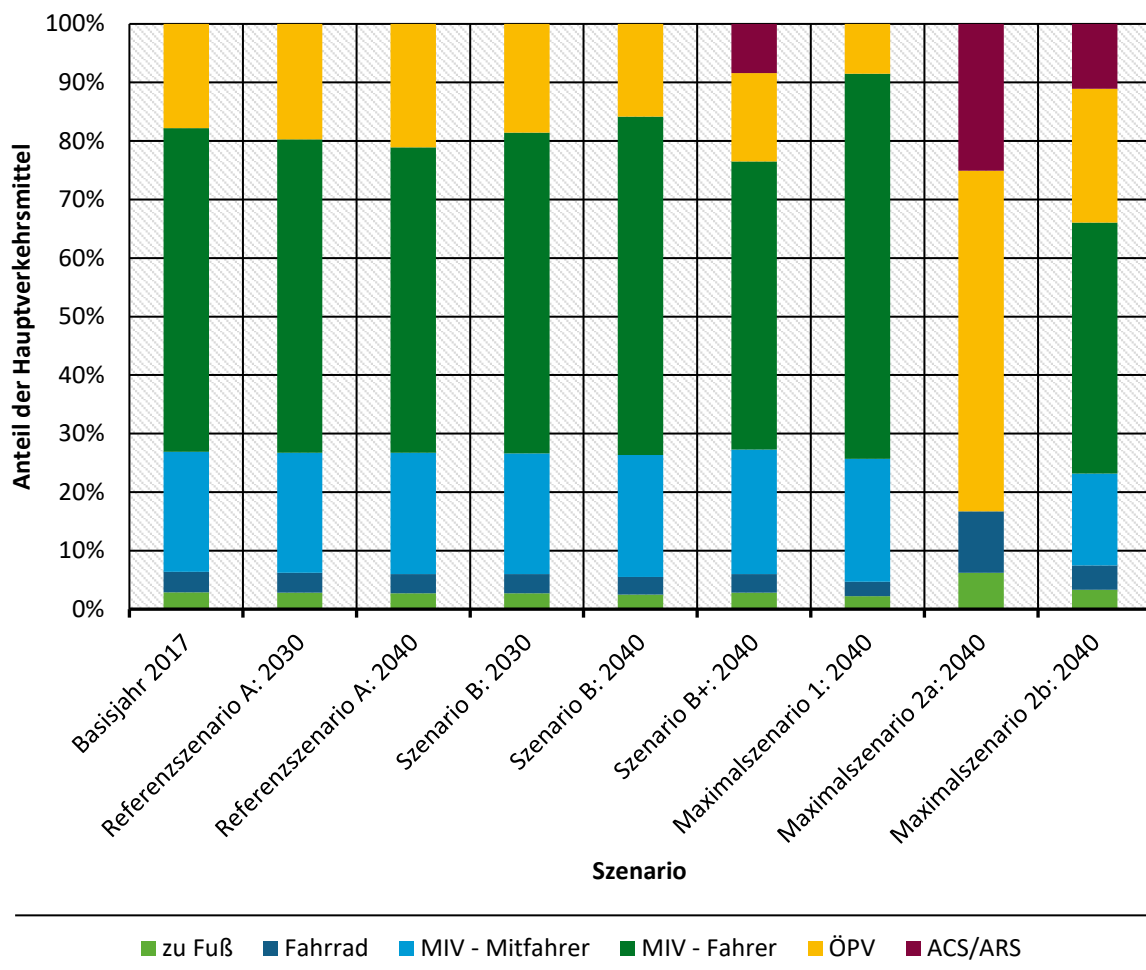
Im Folgenden werden zunächst die Modellierungsergebnisse zur Automatisierung und Vernetzung im Personenverkehr dargestellt. Die verkehrliche Wirkung der Automatisierung und des vernetzten Fahrens wird hierbei über die Jahresfahrleistung (Pkw-km) bzw. die Jahresverkehrsleistung (Pkm) abgebildet. Diese wird für die einzelnen Szenarien getrennt nach Verkehrsmittel (zu Fuß, Fahrrad, MIV MitfahrerInnen, ÖPNV, ACS/ARS) und Streckentyp (Autobahn, innerorts, außerorts) betrachtet.

Anschließend werden die aus veränderter Nachfrage- und Angebotsstruktur resultierenden Auslastungsgrade im deutschlandweiten Netzmodell PTV Validate dargestellt.

2.1.4.1 Jahresfahr- und Jahresverkehrsleistung im Personenverkehr

Abbildung 6 zeigt die Anteile der einzelnen Hauptverkehrsmittel an der Jahresverkehrsleistung in den Szenarien.

Abbildung 6: Jahresverkehrsleistung nach Hauptverkehrsmittel



Quelle: eigene Darstellung, DLR

Während das Referenzszenario A mit seiner vergleichsweise geringen Automatisierung und Vernetzung sich im Hinblick auf die Jahresverkehrsleistung nach Verkehrsmittel nur marginal vom Basisjahr 2017 unterscheidet, zeigt sich im Gegensatz dazu in den B- und Maximalszenarien sehr deutlich die Wirkung einer stärkeren Automatisierung und Vernetzung. Im Szenario B wird im Vergleich zum Referenzszenario A beispielsweise vor allem der MIV auf Kosten des ÖPV gestärkt, wenn lediglich automatisierte Privat-Pkw ohne autonome Car- und Ridesharing-Angebote eingeführt werden.

Wie stark der Gewinn des MIV dabei ausfällt, hängt vor allem von den Durchdringungsraten der Automatisierungsstufen im Bestand privat genutzter Fahrzeuge ab. Während im Jahr 2030 in Szenario B lediglich 11% der privaten Fahrzeuge ein SAE Level von 4 oder 5 aufweisen, sind es im Jahr 2040 insgesamt 54%. Dies zeigt, dass es vor allem die hohen Automatisierungslevel sind, die den MIV gegenüber dem ÖPV, aber auch gegenüber dem Fuß- und Fahrradverkehr attraktiv machen. Im Jahr 2040 in Szenario B steigt die Jahresverkehrsleistung des MIV (Fahrer und Mitfahrer) um knapp 120 Mrd. pkm im Vergleich zum Jahr 2040 im Referenzszenario A (siehe Tabelle 53 im Anhang für die detaillierten Ergebnisse). Dementsprechend steigt auch der Anteil des MIV am Modal Split um mehr als 5%, was nahezu vollständig zu Lasten des ÖPV geht.

Der Vergleich der Szenarien B und B+ verdeutlicht die verkehrliche Wirkung der Einführung autonomer Car- und Ridesharing-Angebote im Personenverkehr. Dabei zeigt sich vor allem die Attraktivität autonomer Car- und Ridesharing-Angebote gegenüber dem privaten Pkw. Während

auch der ÖPV leicht an Jahresverkehrsleistung und Anteil im Modal Split einbüßt, so geht der allergrößte Teil der Jahresverkehrsleistung autonomer Car- und Ridesharing-Angebote auf Kosten des MIV.

Ein Vergleich der Summe der Jahresverkehrsleistungen über alle Verkehrsmittel hinweg zeigt außerdem, dass es sich hierbei nicht um ein Nullsummenspiel handelt. Die Einführung autonomer Car- und Ridesharing-Angebote im Szenario B+ führt zu einer Reduktion der Jahresverkehrsleistung von fast 30 Mrd. km gegenüber Szenario B. Diese Reduktion ist vor allem auf das Teilen von Fahrten mit autonomen Ridesharing-Angeboten zurückzuführen. Im Vergleich zu Referenzszenario A zeigt sich darüber hinaus, dass sowohl Szenario B als auch B+ eine deutlich höhere Jahresverkehrsleistung aufweisen, was auf die als angenehmer empfundene Reisezeit in automatisierten Fahrzeugen zurückzuführen ist. Dies führt dazu, dass längere Distanzen zurückgelegt werden.

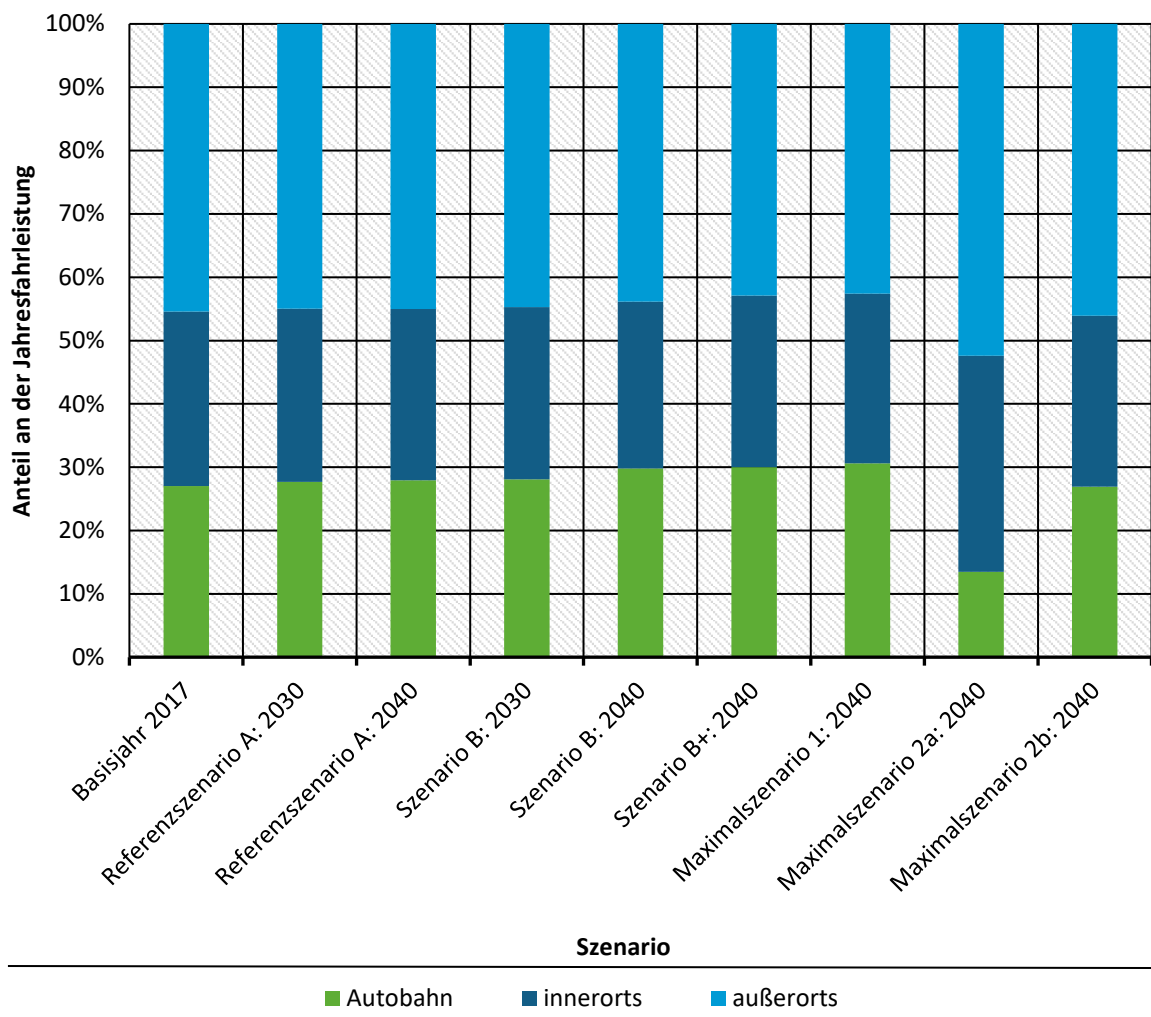
Die Maximalszenarien geben wieder, welche verkehrlichen Wirkungen im Personenverkehr bei einer 100%-igen Automatisierung von SAE Level 5 des gesamten Pkw-Bestandes im Jahr 2040 zu erwarten wären. In Maximalszenario 1 wären dabei nur private Pkw zugelassen und keine Car- und Ridesharing-Angebote. Dies würde dem MIV einen enormen Zuwachs von knapp 14% im Modal Split gegenüber dem Referenzszenario A bringen. Dieser Zuwachs ginge zum allergrößten Teil auf Kosten des ÖPV, dessen Anteil am Modal Split auf 8,5% schrumpfen würde. Auch würde die Jahresverkehrsleistung des Fuß- und Fahrradverkehrs deutlich schrumpfen. Zusätzlich fällt auch die Summe der Jahresverkehrsleistung über alle Verkehrsmittel hinweg in Maximalszenario 1 deutlich größer aus, als in den Szenarien A und B, sowie in den anderen beiden Maximalszenarien.

Im Maximalszenario 2a, in dem automatisierte Car- und Ridesharing-Angebote vorhanden sind, aber sich der gesamte MIV auf andere Verkehrsmodi verlagert, fällt die Summe der Jahresverkehrsleistung aller Verkehrsmittel um über 100 Mrd. pkm geringer als in Maximalszenario 1 aus. Die Car- und Ridesharing-Angebote erreichen einen Modal Split Anteil von 25%, während sich der Anteil des Fußverkehrs und des ÖPV gegenüber dem Referenzszenario A mehr als verdoppelt und der Anteil des Fahrradverkehrs mehr als verdreifacht wird. Dabei muss natürlich berücksichtigt werden, dass in Maximalszenario 2a davon ausgegangen wurde, dass sich der motorisierte Individualverkehr aufgrund verschiedener politischer Maßnahmen (z.B. Erhöhung der Mineralölsteuer, Reduktion von Pkw-Parkplätzen, Ausbau des Öffentlichen Personenverkehrs, Ausbau von Fahrradwegen etc.) vollständig auf andere Verkehrsmodi verlagert. Die den Ergebnissen zugrundeliegende Annahme ist somit, dass der motorisierte Individualverkehr unattraktiver wurde und alle anderen Verkehrsmittel in gleichem Maße an Attraktivität gewannen.

In Maximalszenario 2b sind private Pkw vollständig automatisiert und vernetzt sowie Car- und Ridesharing-Angebote zugelassen. Hierbei sinkt der Anteil des MIV am Modal Split um fast 15% im Vergleich zum Referenzszenario A. Zum Teil geht dies zu Gunsten der Car- und Ridesharing-Angebote, die auf einen Anteil von 11% kommen. Aber auch der Anteil am Modal Split sowie die Jahresverkehrsleistung des ÖPV und des Fuß- und Fahrradverkehrs steigen deutlich. Betrachtet man den Anteil des ÖPV am Modal Split differenzierter, so zeigt sich in den Maximalszenarien 2a und 2b, dass die Car- und Ridesharing-Angebote vor allem auf Kosten des Nahverkehrs mit Bus und Bahn gehen. Dahingegen können Fernbusse und Fernzüge ihre Anteile am Modal Split steigern, da die Car- und Ridesharing-Angebote auf Fernstrecken keine Konkurrenz für den ÖPV darstellen.

Abbildung 7: zeigt schließlich, wie sich die Jahresfahrleistung der MIV-FahrerInnen und der automatisierten Car- und Ridesharing-Angebote auf unterschiedliche Streckentypen verteilt.

Abbildung 7: Jahresfahrleistung nach Streckentyp (relative Anteile)



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

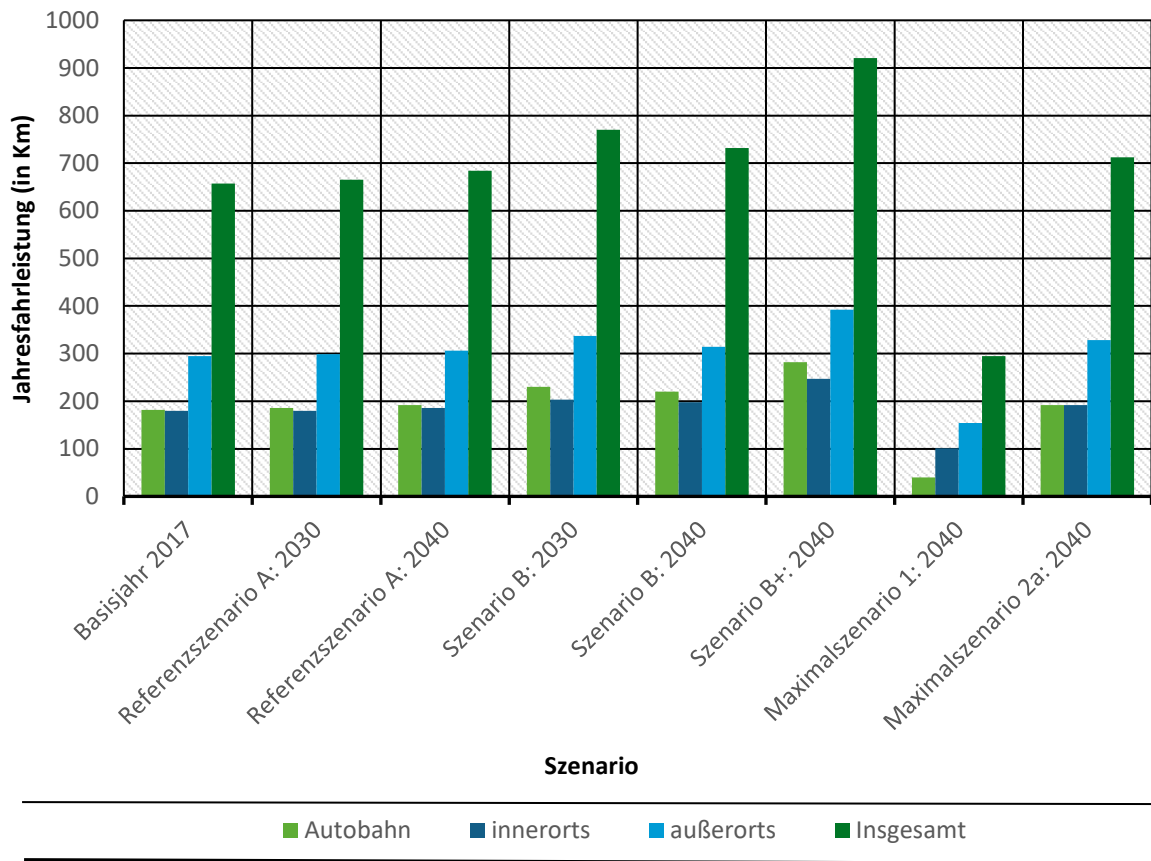
Auch hier wird deutlich, dass der geringe Grad an Automatisierung und Vernetzung in Referenzszenario A ohne Fahrzeuge mit einem SAE Level von 4 oder 5 nur zu marginalen Unterschieden im Vergleich zum Basisjahr 2017 führt. So nimmt die Jahresfahrleistung der MIV-FahrerInnen auf Autobahnen insgesamt etwas zu, während sie innerorts und außerorts leicht abnimmt.

Die gleichen Tendenzen zeigen sich in etwas verstärkter Form, wenn man die Szenarien B und B+ mit dem Referenzszenario A und dem Basisjahr 2017 vergleicht. In Szenario B steigt der Anteil der Jahresfahrleistung der MIV-Fahrer auf Autobahnen um knapp 2% gegenüber dem Referenzszenario A, während die Jahresfahrleistung innerorts und außerorts jeweils um ca. 1% abnimmt. Betrachtet man nicht die relativen, sondern die absoluten Zahlen (siehe Tabelle 54 im Anhang), so wird deutlich, dass die Jahresfahrleistung auf allen Streckentypen in Szenario B stark ansteigt im Vergleich zum Referenzszenario A. Dies ist vor allem auf die in Szenario B verfügbaren Fahrzeuge mit einem SAE Level von 4 oder 5 zurückzuführen, die aufgrund ihres hohen Grades an Automatisierung die Reisezeit im privaten Pkw angenehmer machen und somit dazu führen, dass längere Strecken zurückgelegt werden.

Im Szenario B+ führt die Verfügbarkeit von automatisierten Car- und Ridesharing-Angeboten dazu, dass der Anteil der Jahresfahrleistung von MIV-FahrerInnen und Car- und Ridesharing-Angeboten zusammengekommen, der sich auf innerörtliche Streckenabschnitte verteilt, im

Vergleich zu Szenario B zunimmt und sich mit 27% auf dem Niveau des Referenzszenarios A bewegt. Die absoluten Zahlen (siehe Abbildung 8) zeigen außerdem, dass durch die Einführung der automatisierten Car- und Ridesharing-Angebote die gesamte Jahresfahrleistung von diesen und den MIV-FahrerInnen gegenüber dem Szenario B auf allen Streckentypen abnimmt.

Abbildung 8: Jahresfahrleistung nach Streckentyp (absolute Distanzen)



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Wird die Jahresfahrleistung von MIV-FahrerInnen und Car- und Ridesharing-Angeboten insgesamt für jeden Streckentyp betrachtet, so zeigt sich, dass die Car- und Ridesharing-Angebote mit 25% den größten Anteil auf innerörtlichen Streckentypen einnehmen. Außerorts kommen sie auf 11%, während sie auf Autobahnen mit 2,5% nur eine stark untergeordnete Rolle gegenüber den MIV-FahrerInnen spielen. Dies bestätigt die bereits erläuterten Ergebnisse der Jahresfahrleistung nach unterschiedlichen Verkehrsmitteln. Aufgrund der Verfügbarkeit des Angebots und der Kostenstrukturen entfalten die Car- und Ridesharing-Angebote ihre größte verkehrliche Wirkung innerorts in dicht urbanen Räumen.

Im Maximalszenario 1 steigt die absolute Jahresfahrleistung der MIV-FahrerInnen auf allen Streckentypen im Vergleich zu allen anderen Szenarien stark an. Gegenüber dem Referenzszenario A steigt sie mit knapp 100 Mrd. km besonders stark auf Autobahnen und außerörtlichen Streckentypen. Mit 30,6% wird in Maximalszenario 1 ein höherer Anteil der gesamten Jahresfahrleistung der MIV-FahrerInnen auf Autobahnen gefahren, als in allen anderen Szenarien. Wie bereits zuvor erläutert, führt die vollständige Automatisierung aller privaten Pkw auf SAE Level 5 vor allem dazu, dass der MIV stark gegenüber dem ÖV an Bedeutung gewinnt und dementsprechend auch im Fernverkehr auf Autobahnen und außerörtlichen Streckentypen deutlich mehr Wege als MIV-FahrerIn zurückgelegt werden.

Im Maximalszenario 2a verlagert sich der gesamte MIV auf andere Verkehrsmodi. Bei automatisierten Car- und Ridesharing-Angeboten verteilt sich die Verkehrsleistung mit 52,5% auf außerörtliche und mit 34,2% auf innerörtliche Streckentypen, während nur 13,5% auf die Autobahnen entfällt. Wenn kein MIV stattfindet, werden Car- und Ridesharing-Angebote somit auch verstärkt außerorts und zum Teil auch auf Autobahnen genutzt. Dennoch fällt die absolute Jahresfahrleistung der Car- und Ridesharing-Angebote weniger als halb so groß als in allen anderen Szenarien, in denen MIV stattfindet, aus. Das liegt vor allem an den Fernstrecken, die eher mit Fernbussen und -zügen als mit Car- und Ridesharing-Angeboten zurückgelegt werden.

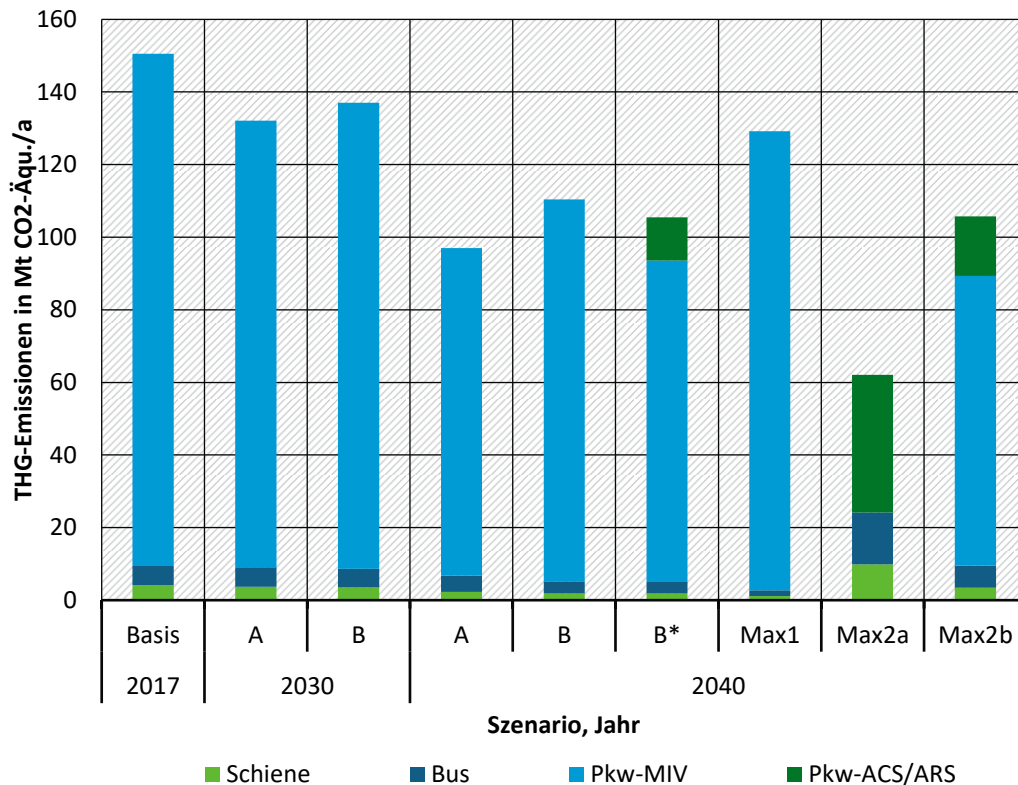
Maximalszenario 2b weist mit der gesamten Jahresfahrleistung von 712 Mrd. km der MIV-FahrerInnen und der Car- und Ridesharing-Angebote zwar einen deutlich höheren Wert als Referenzszenario A auf, bleibt aber zugleich deutlich unter der Jahresfahrleistung der Szenarien B, B+ und des Maximalszenarios A im Jahr 2040. Die Anteile der gesamten Jahresfahrleistung verteilen sich in Maximalszenario 2b dabei sehr ähnlich auf die drei verschiedenen Streckentypen wie in Referenzszenario A. Betrachtet man die Anteile der Jahresfahrleistung pro Streckentyp differenziert nach MIV-FahrerInnen und Car- und Ridesharing-Angeboten, so wird deutlich, dass letztere mit 30,6% ihren größten Anteil auf innerörtlichen Strecken erzielen. Dies bestätigen die bisherigen Ergebnisse, dass Car- und Ridesharing-Angebote auf innerörtlichen Strecken am attraktivsten sind.

2.1.4.2 THG- und Schadstoffemissionen infolge der Fahrleistungsänderung

Abbildung 9 stellt die jährlichen THG-Emissionen des Personenverkehrs in Deutschland für die verschiedenen Szenarien dar. Zwischen 2017 und 2040 sinken die Emissionen im Trend unabhängig von den Effekten des automatisierten Fahrens aufgrund der Zunahme von elektrisch betriebenen Fahrzeugen und der Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs in allen Szenarien (vgl. Kapitel 2.1.2). Die Automatisierung und Vernetzung führt dagegen in allen Szenarien – mit Ausnahme des Maximalszenario 2a – zu einer Zunahme der Fahrleistung und damit zur Erhöhung der THG-Emissionen gegenüber dem jeweiligen Basisszenario.

Weiterhin sind in den Szenarien mit hohen Automatisierungs- und Vernetzungsgraden die Emissionen höher als in den Szenarien mit geringer Durchdringung. Im Maximalszenario 1 (Vollvernetzung, 100% der Pkw im Privatbesitz) steigen die Emissionen somit um 33% (bei einem Anstieg der MIV-Fahrleistung um 39%). Das Maximalszenario 2a stellt eine Ausnahme dar: durch Vollvernetzung bei gleichzeitiger Verlagerung des kompletten MIV auf Ride Sharing, Bus und Bahn sinken die Emissionen somit um 35% gegenüber dem Basisszenario im Jahr 2040 (bei einem Rückgang der MIV-Fahrleistung um 55%).

Abbildung 9: THG-Emissionen des Personenverkehrs in Deutschland ohne Berücksichtigung von Änderungen des Verkehrsflusses



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu. Erläuterungen: THG-Emissionen well-to-wheel (inklusive Vorkette).

2.1.4.3 Auslastung des Straßennetzes

Im Rahmen der verkehrstechnischen Untersuchungen wurden die Auslastungsgrade im Streckennetz in Abhängigkeit von Änderungen der Streckenkapazitäten und der Verkehrsnachfrage bestimmt. Die Auslastung gibt Auskunft darüber, inwiefern das Straßennetz eine bestimmte Verkehrsnachfrage abwickeln kann. Streckenfeine Auslastungsgrade geben außerdem Hinweise, welche Verkehrszustände auf diesen Strecken vorherrschen. Von hohen Auslastungsgraden lassen sich Anteile der Verkehrsleistung im gebundenen und stop+go-Verkehr ableiten. Aufgrund der Tatsache, dass es sich um ein Tagesmodell handelt, lassen sich Überlastungszustände nicht exakt bestimmen. Ein Auslastungsgrad von ca. 1 und darüber bedeutet aber, dass das regelmäßige Auftreten dichter Verkehrszustände wahrscheinlich ist. Die Verkehrszustände und die gefahrenen Geschwindigkeiten wirken sich auf die Emissionen aus, weshalb Veränderungen dieser Wahrscheinlichkeit in die Emissionsberechnung einbezogen werden (siehe Kapitel 2.1.4.4). Die Berechnung der Verkehrszustände erfolgt nur für Autobahnen und Bundesstraßen, da für andere Netzabschnitte die Auslastungsgrade aus methodischen Gründen einerseits nicht exakt genug berechnet werden können, und andererseits dies einen hohen Aufwand in der Datenverarbeitung erfordert hätte. Die Umlegung erfolgte im gesamten Netz, das neben Autobahnen, Bundes-, Landes und Kreisstraßen auch Verbindungsstraßen im untergeordneten Netz enthält.

Aus rein verkehrstechnischer Sicht ergeben sich für Szenarien mit geringen bis mittleren Anteilen automatisierter Fahrzeuge an der Gesamtflotte die größten negativen Auswirkungen. Grund dafür ist, dass die Kapazität nicht linear mit den Anteilen vernetzter Fahrzeuge im Pkw-Bestand zunimmt. Entsprechend sinken die Kapazitäten zunächst, um erst in den Maximalszenarien deutlich anzusteigen. Im Basisszenario 2017 treten bereits Überlastungen im Netz in den

urbanen, dicht besiedelten Gebieten wie beispielsweise im Ruhrgebiet auf. Im ländlichen Raum zeigen sich hingegen noch große Kapazitätsreserven. Im Referenzszenario 2040 A kommt es zu einer Verringerung der Kapazitäten vor allem auf Autobahnen, da relevante Anteile von automatisierten Fahrzeugen vorhanden sind, diese aber zum Großteil nicht vernetzt sind. Gleichzeitig steigt die Verkehrsnachfrage und damit die Auslastungsgrade im Vergleich zum Basisfall. Da die Fahrleistungszunahme vor allem im suburbanen Bereich entsteht, werden die hoch belasteten Strecken in Ballungsgebieten noch stärker belastet. Im Szenario 2040 B wird zwar aufgrund der hohen Durchdringungsgrade mit kommunizierenden, automatisierten Fahrzeugen eine Steigerung der Kapazität von im Mittel 4 % angenommen. Allerdings nimmt auch die Verkehrsleistung in allen Regionstypen stärker zu. Dies führt zu einer ähnlichen Auslastung des Straßennetzes wie im Szenario 2040 A (siehe Tabelle 2 und Anhang A.2).

Tabelle 2: Anteile der Fahrleistung nach HBEFA-Klassen auf Autobahnen und Bundesstraßen

Szenario	Fahrzeug-typ	Frei fließend	Dicht	Gebunden	Stop+go
Basis 2017	Pkw	52,39%	33,04%	11,11%	3,46%
	Lkw	84,35%	9,50%	3,40%	2,76%
2040 A	Pkw	43,77%	30,53%	15,64%	10,07%
	Lkw	70,59%	10,87%	9,54%	9,00%
2040 B	Pkw	43,48%	31,20%	15,58%	9,73%
	Lkw	71,18%	12,72%	8,07%	8,02%
Maximalszenario 2040 1	Pkw	56,40%	31,83%	8,85%	2,92%
	Lkw	89,26%	5,97%	2,77%	2,00%
Maximalszenario 2040 2a	Pkw	96,71%	3,18%	0,10%	0,01%
	Lkw	99,63%	0,11%	0,07%	0,19%
Maximalszenario 2040 2b	Pkw	74,23%	22,93%	2,35%	0,49%
	Lkw	96,95%	1,79%	0,68%	0,58%

Quelle: Eigene Darstellung, KIT

In den Maximalszenarien wird davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge automatisiert fahren und untereinander vernetzt sind, unabhängig davon, ob sie privat oder von öffentlichen Flottenbetreibern genutzt werden. Dies führt zu sehr großen Kapazitätsgewinnen im Autobahnnetz, jedoch abhängig von den Rahmenbedingungen auch zu großen Nachfragesteigerungen. Auf bestimmten Streckentypen, die vornehmlich im Umfeld stark ausgebauter Infrastruktur in Ballungsgebieten vorkommen, wie z.B. 3-streifige Autobahnabschnitte, steigen die Kapazitäten um bis zu 45 %, während andere Streckentypen deutlich weniger Kapazitätsveränderung aufweisen. Im Maximalszenario 1, in dem insgesamt die höchsten Nachfragesteigerungen auftreten, nimmt

die Nachfrage besonders in städtischen Regionen zu. Trotzdem können durch die hohen Kapazitätsgewinne diese Zunahmen abgewickelt werden (siehe Abbildungen Abbildung 10-

Abbildung 12). Insgesamt nimmt die Fahrleistung im gebundenen und stop+go-Verkehr sogar etwas ab, vermutlich weil auf Strecken mit geringerer Belastungszunahme die gesteigerten Kapazitäten den Verkehrsfluss verbessern. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass es aufgrund der hohen Belastung gerade in den urbanen Netzen zu Verlagerungen der Routenwahl in das untergeordnete Netz kommt, d.h. auch dort die Verkehrsmengen zunehmen. Da der Forschungsstand zu den tatsächlichen Kapazitätswirkungen innerstädtisch noch viele Fragen offenlässt, herrscht auch große Unsicherheit darüber, ob die innerstädtischen Kapazitäten und mögliche Rückwirkungen auf das übergeordnete Netz zuverlässig abgebildet werden konnten.

Im Maximalszenario 2a wird die Pkw-Nachfrage ausschließlich über geteilte Mobilitätsangebote abgewickelt. Hierbei nimmt die Fahrleistung im Kfz-Verkehr deutlich ab. Durch die doppelte Wirkung von höheren Infrastrukturkapazitäten und eine im Vergleich zu heute geringere Gesamtverkehrsbelastung von Personen- und Güterverkehr wird das Verkehrsnetz deutlich entlastet. Dies zeigt sich in Auslastungsgraden von deutlich unter 1 fast im gesamten Netz. Im Maximalszenario 2b kommt es in städtischen Gebieten, ähnlich zum Szenario 2a, zu starken Nachfragerückgängen aufgrund der Nutzung geteilter Fahrzeuge. In urbanen und ländlichen Gebieten gibt es zwar deutliche Verkehrszunahmen, diese können jedoch durch bestehende Kapazitätsreserven und durch die Automatisierung gewonnen Kapazitäten gut abgewickelt werden. Aufgrund des Rückgangs der urbanen Nachfrage werden in diesem Szenario auch die Ballungsgebiete weitestgehend entlastet. Dies führt zu einer geringeren Auslastung als im Basisfall 2017 (siehe Abbildungen

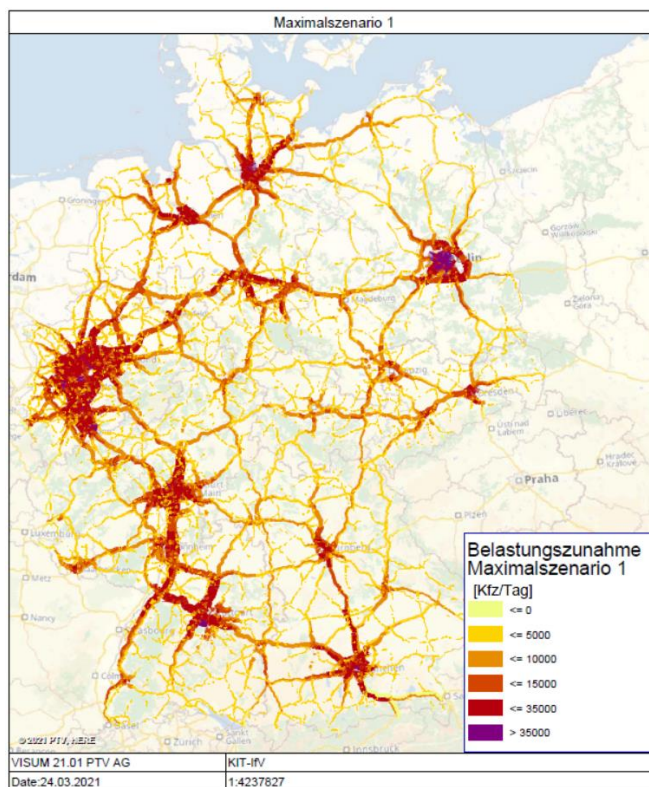
Abbildung 13 und Abbildung 14 sowie Anhang A.2).

Abbildung 10: Zusätzliche Güterverkehrsbelastung in den Maximalszenarien im Vergleich zu 2017



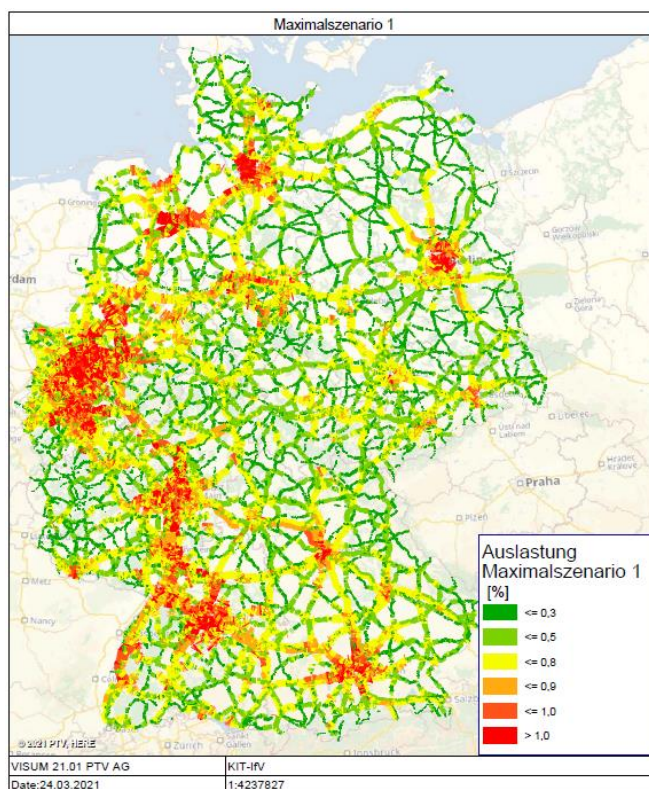
Quelle: Eigene Darstellung, KIT

Abbildung 11: Belastungszunahme im Personenverkehr im Maximalszenario 1 im Vergleich zu 2017



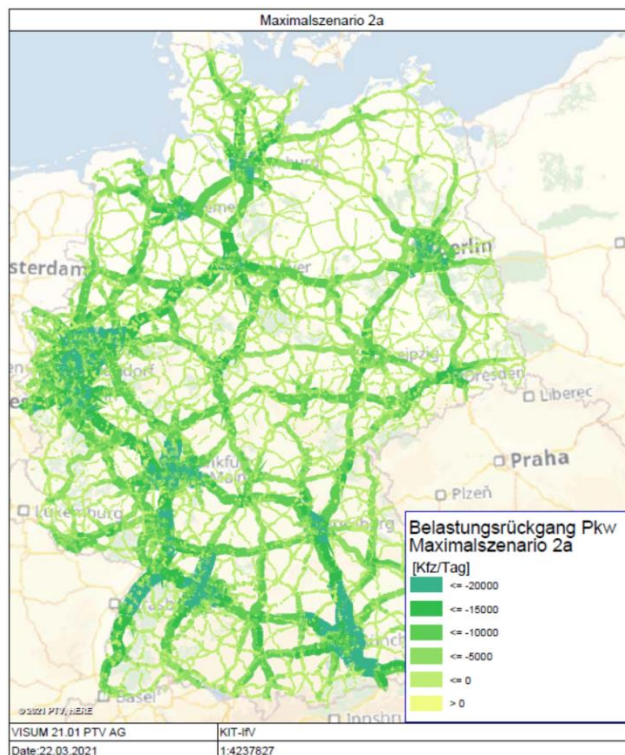
Quelle: Eigene Darstellung, KIT

Abbildung 12: Streckenauslastung im Maximalszenario 1



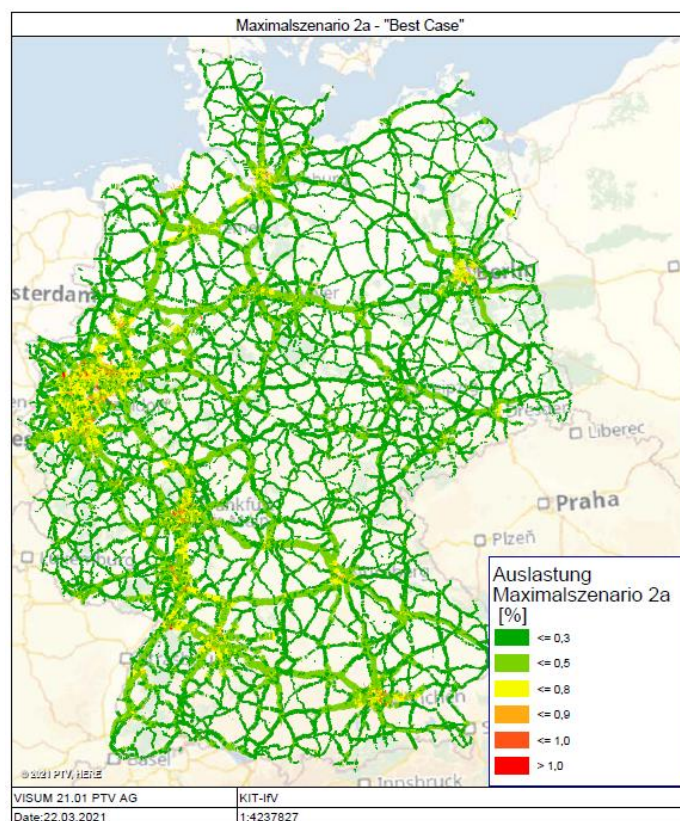
Quelle: Eigene Darstellung, KIT

Abbildung 13: Belastungsrückgang im Personenverkehr im Maximalszenario 2a im Vergleich zu 2017



Quelle: Eigene Darstellung, KIT

Abbildung 14: Streckenauslastung im Maximalszenario 2a



Quelle: Eigene Darstellung, KIT

2.1.4.4 THG- und Schadstoffemissionen infolge der Verkehrsverflüssigung in den Maximalszenarien

Der Einfluss des fahrerlosen Fahrens auf den Verkehrsfluss und die Emissionen wurde für den Verkehr auf Autobahnen und Bundesstraßen quantifiziert. Dies wird in Tabelle 3 separat für Autobahnen und insgesamt (inklusive aller übrigen Straßen) dargestellt. Prinzipiell nehmen die Emissionen durch die Verflüssigung ab. Auf den Autobahnen, bei denen die Änderung der Verkehrszustände am größten sind, sinken die spezifischen THG-Emissionen pro Pkw-Kilometer um bis zu 8%, bei NO_x um bis zu 13% und bei den Abgaspartikeln um bis zu 5%. Auffällig ist hierbei, dass das Maximalszenario 1 höhere Minderungen aufweist als das Maximalszenario 2a, obwohl in letzterem fast 100% der Fahrleistung im freifließenden Verkehr stattfindet. Dies liegt an den höheren Geschwindigkeiten im Maximalszenario 2a, welche trotz flüssigeren Verkehrs zu höheren Emissionen führen (siehe Kapitel 2.1.4.3). Somit ergibt sich eine mittlere Geschwindigkeit der Pkw auf Autobahnen im Maximalszenario 1b von 87 km/h und im Maximalszenario 2a von 124 km/h (die Maximalgeschwindigkeit im freeflow liegt bei 141 km/h).

Da für Landes-, Kreis-, Gemeinde- und Innerortsstraßen keine Änderung des Verkehrszustandes quantifiziert wurde und die Änderung der Verkehrszustände auf den Bundesstraßen geringer ist, sind die Minderungen im Durchschnitt aller Straßenkategorien deutlich geringer als allein auf Autobahnen. Dass auf dem nachgeordneten Straßennetz geringere Wirkungen durch Kapazitätsgewinne erwartet werden, liegt daran, dass bei einem Teil dieser Straßen die mittlere Auslastung geringer ist (weil z.B. die Erschließungsfunktion dominiert) und sich daher Kapazitätsgewinne nicht in einer Änderung des Verkehrszustands niederschlagen, und dass beim anderen Teil dieser Straßen, vor allem innerstädtisch, der Verkehrsfluss von vielen Störeinflüssen bestimmt wird (ÖV, Parkvorgänge, nichtmotorisierter Verkehr) und deshalb das Potential für höhere Verkehrsstärken im MIV nicht genutzt werden kann.

Insgesamt sinken die THG-Emissionen des Personenverkehrs im Maximalszenario 1 aufgrund des geänderten Verkehrsflusses somit um 3% und im Maximalszenario 2a entsprechend nur um 0,7% (siehe Abbildung 15). Der treibende Faktor für die THG-Emissionen bleibt allerdings die Änderung der Pkw-Fahrleistung. Die negativen Effekte des Maximalszenarios 1 aufgrund des hohen MIV-Anteils werden somit geringfügig gemindert, während die positiven Effekte durch den Rückgang des MIV in Maximalszenario 2a beinahe unverändert bleiben. In Verbindung mit weiteren Reduktionen der Fahrgeschwindigkeit oder einer Verkehrsverflüssigung auch im Innerortsbereich wären weitere Reduktionen möglich (siehe Kapitel 2.1.4.3).

Tabelle 3: Änderung der mittleren spezifischen Emissionen für Pkw durch die Verkehrsverflüssigung am Beispiel der Maximalszenarien 1 und 2a für das Jahr 2040

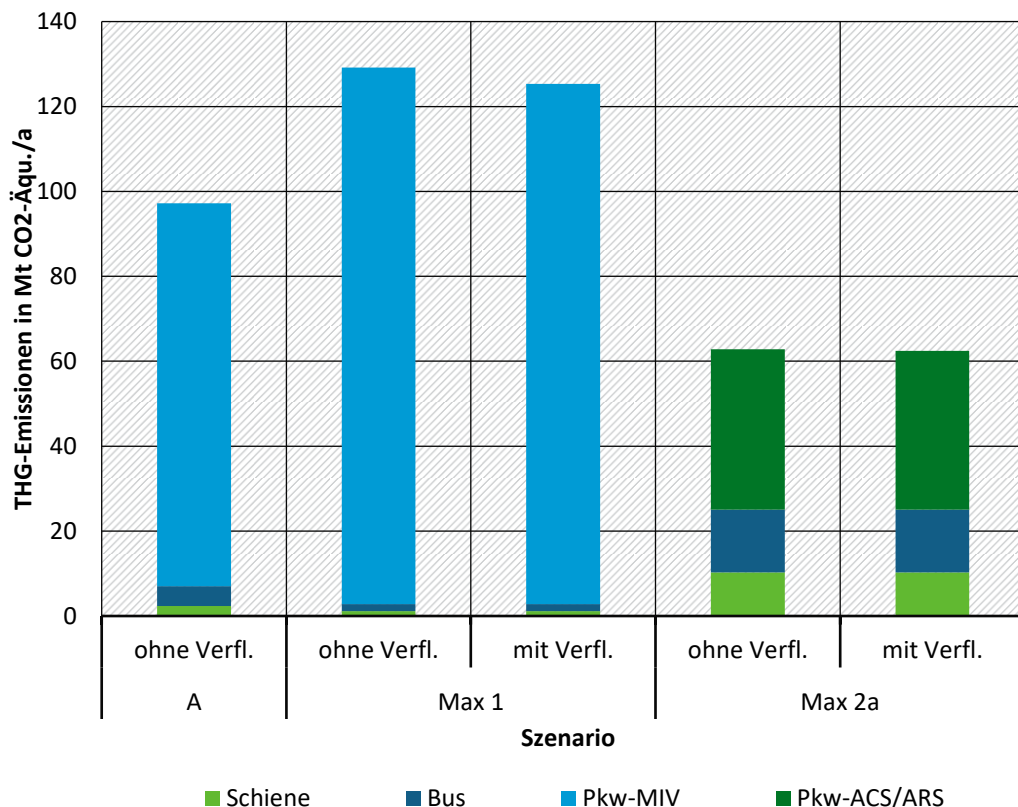
Schadstoff, Einheit	Straßentyp	2040 A	Max 1 („Worst Case“)			Max 2a („Best Case“)		
Verflüssigung (VV)		ohne VV	ohne VV	Mit VV	Diff	ohne VV	Mit VV	Diff
CO ₂ -Äqu. (g/km) WTW	Autobahnen	155	155	142	-8%	155	146	-6%
	Alle Straßen	133	134	130	-3%	129	127	-1%
NO _x (mg/km)	Autobahnen	69,9	69,9	60,5	-13%	69,9	67,5	-3%
	Alle Straßen	54	55	52	-6%	52	51	-1%
PM	Autobahnen	1,0	1,0	0,9	-5%	1,0	1,0	-3%

Schadstoff, Einheit	Straßentyp	2040 A	Max 1 („Worst Case“)				Max 2a („Best Case“)		
(mg/km)	Alle Straßen	0,7	0,7	0,7	-3%		0,6	0,6	-1%

Quelle: Eigene Darstellung, ifeu. Erläuterungen: THG-Emissionen well-to-wheel (inklusive Vorkette). „VV“:

Verkehrsverflüssigung. Auf Autobahnen ohne Geschwindigkeitsbegrenzung wurde die Einhaltung der Richtgeschwindigkeit 130km/h angenommen.

Abbildung 15: THG-Emissionen des Personenverkehrs in Deutschland mit und ohne Berücksichtigung der Änderungen des Verkehrsflusses für das Jahr 2040



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu. Erläuterungen: THG-Emissionen well-to-wheel (inklusive Vorkette)..

2.1.4.5 Weitere ökologische Potentiale des automatisierten und vernetzten Fahrens

Im Folgenden werden weitere Auswirkungen des autonomen und vernetzten Fahrens diskutiert, die für eine ökologische Bewertung von Relevanz sind, welche jedoch aufgrund des gestellten Untersuchungsrahmens dieser Studie nur exemplarisch bzw. auf Basis von Erkenntnissen aus anderen Studien darstellbar sind.

2.1.4.5.1 Sensitivitätsbetrachtungen zum Einfluss der Verkehrssituationen auf Innerortsstraßen und Autobahnen

Da die Auswirkungen des autonomen Fahrens auf die Netzbelastung nur für Autobahnen und Bundesstraßen modellbasiert quantifiziert werden konnten, wird für den Innerortsbereich eine Potentialbetrachtung durchgeführt. Tabelle 4 zeigt hierzu Emissionsfaktoren für die durchschnittliche Pkw-Flotte im Jahr 2040 gemäß HBEFA 4.1 mit der heutigen Verteilung nach Verkehrssituationen (ØDE) und mit 100% freifließendem Verkehr auf. Insgesamt wären dadurch bis zu 4% Reduktion des Endenergieverbrauchs und 6% der Schadstoffemissionen erreichbar, mit entsprechend höheren Minderungen im Innerortsbereich. Diese Zahlen stellen jedoch nur

einen Maximaleffekt dar, da aus dieser Studie keine Erkenntnisse dazu vorliegen, welcher Grad an Verkehrsverflüssigung auf Innerortsstraßen durch autonomes Fahren erreicht werden kann. Ferner ist zu beachten, dass die im Referenzszenario des HBEFA 4.1 angenommene Pkw-Flotte einen geringen Anteil an Elektrofahrzeugen hat. Da Elektrofahrzeuge im Teillastbetrieb deutlich effizienter als Verbrenner sind, würden die Emissionsminderungen in den Szenarien dieser Studie für das Jahr 2040 geringer ausfallen.

Tabelle 4: Sensitivität „freeflow“ auf Energieverbrauch und Emissionen von Pkw auf Innerortsstraßen (ØDE 2040)

Komponente	Einheit	ØDE	100% freeflow	Diff Innerorts	Diff Insgesamt*
Endenergieverbrauch	MJ/km	1,80	1,49	-17%	-4%
NOx	mg/km	41	31	-25%	-6%
PM	mg/km	0,6	0,5	-23%	-6%
PM10 (Abrieb+Aufwirbelung)	mg/km	35,4	26,4	-25%	-6%

Quelle: HBEFA 4.1 und ifeu-Berechnungen. * unter Annahme, dass 25% der Pkw-Fahrleistung innerorts erfolgt.

In den Szenarien dieser Studie wird zusätzlich angenommen, dass automatisierte Fahrzeuge auf Autobahnen die Richtgeschwindigkeit von 130 km/h einhalten. Dabei führen die Verflüssigungseffekte auf Autobahnen nur bedingt zu Emissionsminderungen, da Geschwindigkeiten über ca. 90 km/h auch bei konstantem Fahren zu steigenden Emissionen führen. Der Einfluss einer Höchstgeschwindigkeit von 120km/h auf Autobahnen in Kombination mit 100% freifließendem Verkehr wird in Tabelle 5 am Beispiel der durchschnittliche Pkw-Flotte im Jahr 2040 gemäß HBEFA 4.1 dargestellt². Gegenüber einer Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h, mit 1,5 % Reduktion des Energieverbrauchs und 3,4 % Reduktion der NO_x-Emissionen, kann mit einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h mehr als die doppelte Minderung erreicht werden. Die Daten sind aufgrund der unterschiedlichen Fahrzeugflotte und Anteile der Verkehrszustände im Basisfall (ØDE) zwar nicht genau vergleichbar mit den Szenarien dieser Studie, sie zeigen jedoch einen plausiblen Trend und das hohe Umweltpotential einer Verkehrsverflüssigung in Kombination mit einer weiteren Absenkung der Maximalgeschwindigkeit für Pkw.

Tabelle 5: Sensitivität „freeflow“ und Tempolimit 120 km/h auf Energieverbrauch und Emissionen von Pkw auf Autobahnen (ØDE 2040)

Komponente, Einheit	ØDE	100% freeflow TL130	Diff Autobahn	Diff Gesamt*	100% freeflow TL120	Diff Autobahn	Diff Gesamt*
Endenergieverbrauch (MJ/km)	1,89	1,81	-5%	-1,5%	1,69	-11%	-3,4%
NOx (mg/km)	74	66	-11%	-3,4%	47	-36%	-11%
PM (mg/km)	1,2	1,1	-7%	-2,2%	1,0	-13%	-4,0%

Quelle: HBEFA 4.1 und ifeu-Berechnungen. * unter Annahme, dass 31% der Pkw-Fahrleistung auf Autobahnen erfolgt.

² Es wurden jeweils die HBEFA-Fahrzyklen auf Autobahnen mit Geschwindigkeitsbegrenzungen von 130 km/h und 120 km/h zugrundegelegt.

2.1.4.5.2 Infrastruktureitiger Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen durch die Vernetzung

Die ökologischen Effekte der verkehrlichen Wirkung der Automatisierung und des vernetzten Fahrens wurden in den Abschnitten 2.1.4.2, 2.1.4.4 und 2.2.4.2 für die verschiedenen Szenarien bilanziert und diskutiert. Zusätzlich zu diesen verkehrlichen Wirkungen sind jedoch auch weitere Energieverbräuche durch die Vernetzung zu erwarten, insbesondere durch Zusatzaggregate im Fahrzeug, den Mobilfunk selbst und auch im gesamten, für die Automatisierung und Vernetzung zuständigen Backend. Diese Energieverbräuche erzeugen entsprechend zusätzliche THG-Emissionen, die den positiven Auswirkungen der Automatisierung entgegenwirken bzw. negative Auswirkungen noch verstärken.

Eine Abschätzung dieses spezifischen Zusatzverbrauchs der Automatisierung wurde für Pkw von der Agora Verkehrswende (2020) unternommen. Dabei werden zwei Szenarien der Entwicklung und Ausprägung der Vernetzung unterschieden. Bei der „Minimalvernetzung“ erfolgt lediglich eine „*Vernetzung der Fahrzeuge untereinander (V2V) über Ad-hoc-Netzwerke mit dem Standard 802.11p oder über Mobilfunk, [jedoch] keine weitere Vernetzung mit einer Cloud beziehungsweise einem Backend oder der Infrastruktur [...]*.“ (Agora Verkehrswende 2020) Die „Effiziente Vernetzung“ geht zusätzlich von einer bis 2050 weitgehenden Vernetzung mit einem Backend beziehungsweise einer Cloud (V2C) sowie einer Vernetzung mit der Infrastruktur (V2I) aus. „*Die Vernetzung mit dem Backend ist in diesem Szenario über den Datentransfer der Fahrzeugdaten zu und von einem dezentralen, lokalen Frontend-Server (Mobile Edge Computing, kurz MEC) via 5G-Mobilfunk oder über den WLAN-Standard 802.11p konzipiert.*“ (Agora Verkehrswende 2020). Die zusätzlichen THG-Emissionen des infrastruktureitigen Energieverbrauchs werden für die Maximalszenarien 1 und 2a im Personenverkehr mithilfe der spezifischen Energieverbräuche aus den beiden Vernetzungsszenarien im Sinne einer Minimal- und Maximalbetrachtung quantifiziert. Dabei werden nach Agora Verkehrswende (2020) die folgenden Verbräuche differenziert berücksichtigt (siehe Tabelle 6).

- **On-board-Energieverbrauch** umfasst den Energieverbrauch der Systemkomponenten zur Automatisierung im Fahrzeug wie Ultraschall, Radar, Lidar, Kamera, Kommunikation, Positionsbestimmung, V2X-Modul und Steuergerät. Der Verbrauch wird in 2040 für vollautomatisierte und fahrerlose Fahrzeuge (Stufe 4 und 5) gleichermaßen mit etwa 300 kWh/100 km abgeschätzt. Ein möglicher weiterer Zusatzverbrauch durch höheres Gewicht und einen höheren Luftwiderstand der Fahrzeuge durch die Komponenten wurde dabei nicht berücksichtigt.
- Der Energieverbrauch durch die Vernetzung im **Mobilfunk** wurde auf Basis möglicher Technologieentwicklungen und erwarteter Datenmengen abgeschätzt und unterscheidet sich daher wesentlich zwischen den beiden Vernetzungsszenarien. Der zusätzliche Energiebedarf 2040 ist entsprechend bei der Minimalvernetzung mit 26 kWh/100 km fast vernachlässigbar, liegt aber bei umfassender Vernetzung (in der Studie als „effiziente Vernetzung“ bezeichnet) fast 30-mal höher und damit mehr als doppelt so hoch wie der On-Board Verbrauch.
- Der Energieverbrauch im **Backend** entsteht im Szenario Minimalvernetzung vor allem durch die Annahme des Updates von HD-Karten vor Fahrtantritt im heimischen WLAN. Für die effiziente Vernetzung wird dagegen eine Vernetzung mit einem Backend und der Infrastruktur angenommen, der Energieverbrauch liegt dann etwa dreimal höher.

In Summe ist der Energieverbrauch im Szenario „Effiziente Vernetzung“ mehr als dreimal so hoch wie bei der Minimalvernetzung. Dabei wurde von den gleichen verkehrlichen Wirkungen in

beiden Szenarien ausgegangen wird. Daher wird nun auch die Bandbreite zwischen Minimalvernetzung und Effizienter Vernetzung für die Automatisierung von Pkw quantifiziert. Für die Verbrennungs-Pkw musste der zusätzliche OnBoard-Verbrauch in einen Zusatzverbrauch an Benzin und Dieselkraftstoff umgerechnet werden³.

Tabelle 6: Infrastrukturseitiger Energieverbrauch der Automatisierung (Stufe 4 und 5) in 2040

Endenergieverbrauch (kWh/100 km)	Minimalvernetzung	Effiziente Vernetzung
On-Board-Stromverbrauch	300	300
Mobilfunk	26	766
Backend	117	378
Summe Stromverbrauch	443	1.444

Quelle: Agora Verkehrswende (2020)

Im Ergebnis erhöhen sich die THG-Emissionen der automatisierten Pkw um 1 Mt (Maximalszenario 2a mit Minimalvernetzung) bis 4,7 Mt (Maximalszenario 1 mit Effizienter Vernetzung). Die Gesamt-THG-Emissionen der Pkw erhöhen sich damit um 2,6-5,1 %. Diese zusätzlichen Emissionen erhöhen damit die Klimawirkung beträchtlich, liegen aber deutlich unter den verkehrlichen Wirkungen des automatisierten Fahrens, so dass sich keine Änderungen in der Ergebnisrichtung gegenüber dem Basisszenario 2040 A ergibt. Diese werden allerdings vor allem durch die Änderung der Verkehrsnachfrage getrieben, während die mögliche THG-Einsparung durch Verkehrsverflüssigungseffekte bei den Pkw nur im Bereich von ca. 1-3% liegt (siehe Kapitel 2.1.4.4) und damit den Mehrverbrauch für die Automatisierungsinfrastruktur nicht kompensieren kann.

2.1.4.5.3 Mögliche Änderung im Flächenbedarf in den Automatisierungsszenarien

Die Existenz und Nutzung von Fahrzeugen sind immer auch mit einem Bedarf an Fläche verbunden, vor allem durch die Verkehrswege. Insbesondere in dicht besiedelten Innenstadtlagen ist Fläche ein knappes Gut um das verschiedene Nutzungen konkurrieren. Aber auch im ländlichen Raum ist die Flächenbelegung durch Verkehr mit (oft negativen) Veränderungen der Ökosysteme verbunden (Versiegelung, Biodiversität, Zerschneidung).

Im Rahmen des UBA-Projekts „Ökologische Bewertung von Verkehrsarten“ wurde die heute durchschnittliche Flächenbelegung der verschiedenen Verkehrsarten abgeleitet (Allekotte et al. 2020). Dabei wurde die Flächenbelegung nach Infrastrukturtyp und Verkehrsträger differenziert und auf die mittlere Verkehrsleistung (Personen- bzw. Tonnenkilometer) allokiert. Diese Quantifizierung der Flächenbelegung ermöglicht damit auch eine Differenzierung nach Verkehrswegen, Industrieflächen und Böschungen und quantifiziert Verschiebungen zwischen den Verkehrsträgern, die nicht direkt mit den Treibhausgasemissionen verknüpft sind. Verkehrswege und Industrieflächen (z.B. Tankstellen und Straßenmeistereien) sind dabei oft versiegelt und haben nur noch geringen Umweltnutzen. „Böschungen“ sind dagegen Grünflächen entlang der Verkehrswege mit einer höheren ökologischen Qualität.

Bei einer Quantifizierung von möglichen Änderungen im Flächenbedarf durch die Automatisierungs- und Vernetzungsszenarien ist zu beachten, dass diese auf Basis der Flächenbelegung der heutigen Verkehrsleistung auf der heutigen Verkehrsfläche erfolgt. Die Entwicklung der Verkehrsfläche bis 2040 ist also nicht berücksichtigt. Es kann auch keine Aussage über tatsächliche

³ Hierzu wurde aufgrund der geringen Gesamtrelevanz die grob vereinfachenden Annahmen eines Gesamtwirkungsgrade von Motor und Lichtmaschine von 30 % getroffen.

Änderungen bei der Verkehrsfläche getroffen werden, da ebenso eine höhere oder niedrigere Flächenbelegung ohne Auswirkungen auf die Verkehrsfläche möglich ist. Es kann jedoch dargestellt werden, welche Verkehrsfläche nach Maßstäben der heutigen Flächenbelegung zusätzlich benötigt bzw. theoretisch frei bzw. deutlich unter der Kapazität genutzt würde.

Diese potentiellen Änderungen werden beispielhaft für die Maximalszenarien 1 und 2a im Personenverkehr quantifiziert. Für die Quantifizierung wurden die Flächenbelegungsfaktoren pro Personenkilometer aus Allekotte et al. (2020) angewendet. Aufgrund der geringen Änderungen der Verkehrsnachfrage in den Szenarien zum Güterverkehr wird dieser hier nicht betrachtet.

Die Ergebnisse zeigen durch die Automatisierung, analog zu den Treibhausgasemissionen, einen deutlichen Anstieg des Flächenbedarfs von gut 2.600 Mio. m² pro Jahr im Grundszenario A auf 3.300 Mio. m² pro Jahr im Szenario Max 1 (+26%), der weitgehend auf die zusätzliche Pkw-Fahrleistung zurückgeht. Dabei könnten auf der anderen Seite durch weniger ruhenden Verkehr jedoch auch Flächen frei werden, dieser Effekt dürfte jedoch geringer ausfallen da ruhende Fahrzeuge weniger Fläche beanspruchen als Fahrende. Im Szenario Max 2a gibt es durch die massive Reduzierung von Pkw und Verlagerung auf den ÖV dagegen einen Rückgang des Flächenbedarfs auf ca. 2.200 m² pro Jahr (-15%), der damit aber deutlich hinter dem Rückgang bei den Treibhausgasemissionen (-35%) zurückbleibt, da auch der ÖV mit tlw. hoher Flächenbelegung verbunden ist. Der schienengebundenen ÖV belegt dabei heute auch relevante Anteile an Industrie- und Böschungen. Betrachtet man im Szenario Max 2a dagegen allein die Verkehrswege ist der Rückgang auf knapp 1.800 Mio. m² (-27%) deutlich ausgeprägter.

Inwiefern die Änderungen der Verkehrsleistung und des Modal Split einen tatsächlichen Ausbau oder Rückbau von Verkehrsflächen auslöst, kann mit dieser Betrachtungsweise nicht erschlossen werden. Im Fall des Maximalszenarios 1 zeigen die Analysen dieser Studie beispielsweise, dass das heutige Straßennetz ausreicht, um trotz Zunahme des Pkw-Verkehrs keine Verschlechterung des Verkehrsflusses zu bewirken. Der Zuwachs des Flächenbedarfs nach heutiger Flächenbelegung beträgt knapp 40%, so dass eine Ausweitung der Verkehrswegefläche nicht zwingend notwendig sein muss. Jedoch ist anzunehmen, dass höhere Flächenbelegungen auch einen höheren Aufwand zur Flächenerhaltung bedeuten.

Beim Maximalszenario 2a, welches eine Verdreifachung der Verkehrsleistung im öffentlichen Verkehr annimmt, ist es dagegen unwahrscheinlich, dass dies ohne eine Ausweitung der Verkehrsfläche möglich ist. Beim Schienenverkehr, der heute eine besonders hohe Flächenbelegung aufweist, würde sich der Flächenbedarf nach heutiger Flächenbelegung sogar mehr als vervierfachen. Eine Ausweitung der Verkehrsfläche erscheint damit in diesem Bereich unausweichlich. Jedoch geht durch die Reduktion der Nachfrage im Pkw-Verkehr der Flächenbedarf dort bei heutiger Flächenbelegung um fast 70% zurück. Inwieweit dies in der Praxis tatsächlich zu einem Rückbau oder einer Umwidmung bestehender Verkehrsflächen führt, müsste jedoch in eigenen Machbarkeitsstudien untersucht werden.

2.2 Effekte der fahrzeugseitigen Automatisierung im Wirtschaftsverkehr

In diesem Kapitel werden die Effekte der fahrzeugseitigen Automatisierung im Wirtschaftsverkehr untersucht. Zunächst wird der Stand des Wissens darüber wiedergegeben, welche Wirkungen durch die Automatisierung im Wirtschaftsverkehr erzielt werden können. Danach erfolgt eine Szenarienentwicklung als Grundlage für die weitere Wirtschaftsverkehrsmodellierung. In den weiteren Abschnitten werden die herangezogenen Modelle zur Beschreibung der Wirtschaftsverkehrsnachfrage im Detail beschrieben. Hierbei liegt der Fokus auf den Funktionalitäten der Modelle und deren Parametrisierung. Abschließend werden jeweils die Simulationsergebnisse ausgewertet und die verkehrlichen und ökologischen Effekte dargestellt.

2.2.1 Theoriebasierte Wirkungsanalyse: Automatisierte Lkw

Der **automatisierte Lkw** bietet zunächst das Potential, einige Probleme der Güterverkehrsbranche zu reduzieren und die Kosten zu senken. Neben der Senkung der Kraftstoffkosten spielt eine Reduzierung der Lohnkosten eine wichtige Rolle. Zudem können die täglichen Betriebsstunden ausgeweitet werden. Die Sicherheit kann erhöht werden. Insgesamt erwartet der VDA (2015) positive Effekte sowohl für die Lkw-Industrie als auch für die Gesellschaft.

Hemmnisse in der Einführung von automatisierten Lkw bestehen jedoch in der Verfügbarkeit der erforderlichen Infrastrukturen (z. B. Long Term Evolution-Netzwerk), der Akzeptanz der neuen Fahrzeuge und Systeme, der neuen Qualifizierungsanforderungen an die FahrerInnen sowie der Technologie für Level 5. In einer Welt, in der alle Fahrzeuge miteinander kommunizieren sollen und über Sensoren, den Mobilfunk oder auch das Internet vernetzt sind, kommt der Safety und Security und der Einführung von Sicherheitsstandards bei vernetzten Fahrzeugen eine besondere Rolle zu. Insbesondere in Bezug auf den Datenschutz steht man vor großen Herausforderungen, die momentan noch unterschätzt werden. Ferner stellen die Marktfähigkeit bzw. die Kosten der automatisierten Fahrzeuge, die staatlichen Kosten für die Infrastruktur und die fehlende globale Diffusion von automatisierten Fahrzeugen im Güterverkehr weitere Hemmnisse dar. Auch gibt es bislang kaum automatisierte Umschlagtechnologien, die eine Be- und Entladung erlauben.

Vordergründig kommt der Stand der Forschung zum Ergebnis, dass der automatisierte Güterverkehr ausschließlich positive Wirkungen haben wird. Es ist jedoch davon auszugehen, dass beim Wegfall der FahrerInnen derart kostensenkende Effekte auftreten, dass es insgesamt zu einer Steigerung des Güterverkehrs auf der Straße kommt. Es kann hierbei einerseits zur Verlagerung des Güterverkehrs, der bisher über die Schiene abgewickelt wurde, auf die Straße kommen. Andererseits kann davon ausgegangen werden, dass die Netzwerkstrukturen der Logistikdienstleistungsunternehmen im Straßengüterverkehr an die neuen Möglichkeiten langfristig angepasst werden. Schließlich könnten sich Logistiknetzwerke, Wertschöpfungsketten und Logistikprozesse ändern und damit zu weiteren Transportwegen führen.

Die serienhafte Einführung automatisierter Lkw ist noch nicht gewährleistet (Automatisierungsstufe 5). Zurzeit sind die Technologien mit sehr hohen Investitionskosten verbunden, so dass zunächst der Einsatz von **Platooning** wirtschaftlich sinnvoll erscheint. Aufgrund dessen wird mit besonderem Fokus auf Platooning und dessen Auswirkungen im Kapitel 2.2.2 eingegangen.

2.2.2 Theoriebasierte Wirkungsanalyse: Platooning

Zunächst wird im Folgenden die Herkunft, Bedeutung und Funktionsweise von Platooning erläutert. Der Begriff Platooning leitet sich vom englischen Begriff „Platoon“ (deutsch: Zug) ab und bedeutet „Fahren in einer Kolonne“. Das Platooning ist ein neuartiges Fahrzeugkonzept, welches insbesondere im Wirtschaftsverkehr Anwendung findet bzw. getestet wird. Hierbei wird von „Truck-Platooning“ gesprochen. Dies beschreibt das Fahren von mehreren Lkw, in der Regel zwei bis drei, mit sehr geringem Abstand zur Ausnutzung des Windschattens zum einen und der Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Straßensystems zum anderen. Insbesondere auf Autobahnen oder Fernstraßen können die Lkw dadurch sehr dicht hintereinanderfahren und folgen jeweils dem vorausfahrenden Fahrzeug. Die Lkws sind mit Assistenz- und Kommunikationssystemen ausgerüstet. Das erste Fahrzeug in der Kolonne und somit Führungsfahrzeug fährt entweder teilautomatisiert oder wird durch eine FahrerIn gesteuert. Sobald sich ein weiteres Fahrzeug elektronisch in die Kolonne einklinkt, werden dessen Assistenzsysteme vom Führungsfahrzeug gesteuert. Das eingeklinkte Fahrzeug fährt nun teilautomatisiert, sodass der FahrerIn die Steuerung überlassen wird und nur noch er bzw. sie die Systeme überwacht.

Die **Ziele** beim Platooning sind Energieeinsparung und verbesserte Autobahnkapazitäten sowie die eventuelle Möglichkeit der Reduzierung von Personalkosten durch den unbemannten Betrieb des Konvois (Tsugawa et al. 2016, S. 68). Gleichzeitig können dadurch Straßen effizienter genutzt werden, da sich der benötigte Platzbedarf fast halbiert. Die Folge ist ein verbesserter Verkehrsfluss (Daimler AG 2017g; Dutch Ministry 2017a). Des Weiteren stellen Zeitersparnisse, durch weniger Verkehrsstaus und Unfälle auf Autobahnen, sowie die Reduzierung von Strafzahlungen aufgrund nicht eingehaltener Lieferzeiten Vorteile des Platoonings dar (Tsugawa et al. 2016, S. 70 ff.). Der verkürzte Sicherheitsabstand wird über eine elektrische Deichsel bzw. Vehicle-2-Vehicle-Kommunikation ermöglicht (VDA 2015). Im Wirtschaftsverkehr könnte das Platooning in Zukunft eine wichtige Rolle zur Optimierung des Güterverkehrs auf Autobahnen und Fernstraßen einnehmen.

Durch die Vernetzung der Fahrzeuge miteinander sind die Reaktionszeiten derart gering, dass Sicherheitsabstände zwischen den Fahrzeugen auf ein Minimum verkürzt werden können. Während ein Mensch durchschnittlich 1,4 Sekunden zum Reagieren (z.B. zum Bremsen) benötigt, kann der Computer in unter 0,1 Sekunden die entsprechende Aktion ausführen. Der benötigte Sicherheitsabstand verkürzt sich somit von 50 auf 15 Meter.

Eine Voraussetzung zum Platooning ist, dass genügend Fahrzeuge zeitgleich abfahren und eine ausreichend lange Strecke gemeinsam zurücklegen. Dies ist zum einen dann der Fall, wenn große Aufkommensmengen transportiert werden – ähnlich einem Ganzzug. In gewissem Sinn können Platoons damit eine Alternative zum Bahn- und Schiffsverkehr werden. Alternativ können sich Platoons auch durch gegenseitiges Warten der Fahrzeuge bilden. Dies führt jedoch zu Wartezeiten und Koordinationsproblemen. Platooning in Netzwerken zeigt bei konvergierenden Routen größere Nachteile aufgrund von Verspätung an den Zusammenführungspunkten als bei divergierenden Routen (Zhang et al. 2017, S. 12ff.). Dies bedeutet, dass es tendenziell effizienter ist, wenn ein Platoon gemeinsam startet und später auseinanderfährt, als wenn, bei getrennten Routen zu Beginn Verzögerungen bei der Platoonbildung entstehen. Jedoch gilt dieser Nachteil nicht speziell für das Platooning, sondern tritt genauso bei Routen des herkömmlichen Straßen-güterverkehrs auf, die innerhalb von Netzwerken ablaufen.

Durch die Vernetzung von Fahrzeugen im Sinne von Platooning können insbesondere FlottenbetreiberInnen durch gesenkte Kosten einen höheren Profit erwirtschaften, bzw. niedrigerer Preise an die KundInnen weitergeben.

Quantifizierung der unmittelbaren Wirkungen der Digitalisierung auf die Effizienz des Fahrzeugs

Wie bereits erwähnt, ist eines der Ziele des Truck-Platoonings die Einsparung von Kraftstoff und CO₂-Emissionen durch Ausnutzung des Windschattens des vorausfahrenden Fahrzeugs. Dies gelingt durch die geringen Abstände der Fahrzeuge (Daimler AG 2017g; Dutch Ministry 2017a).

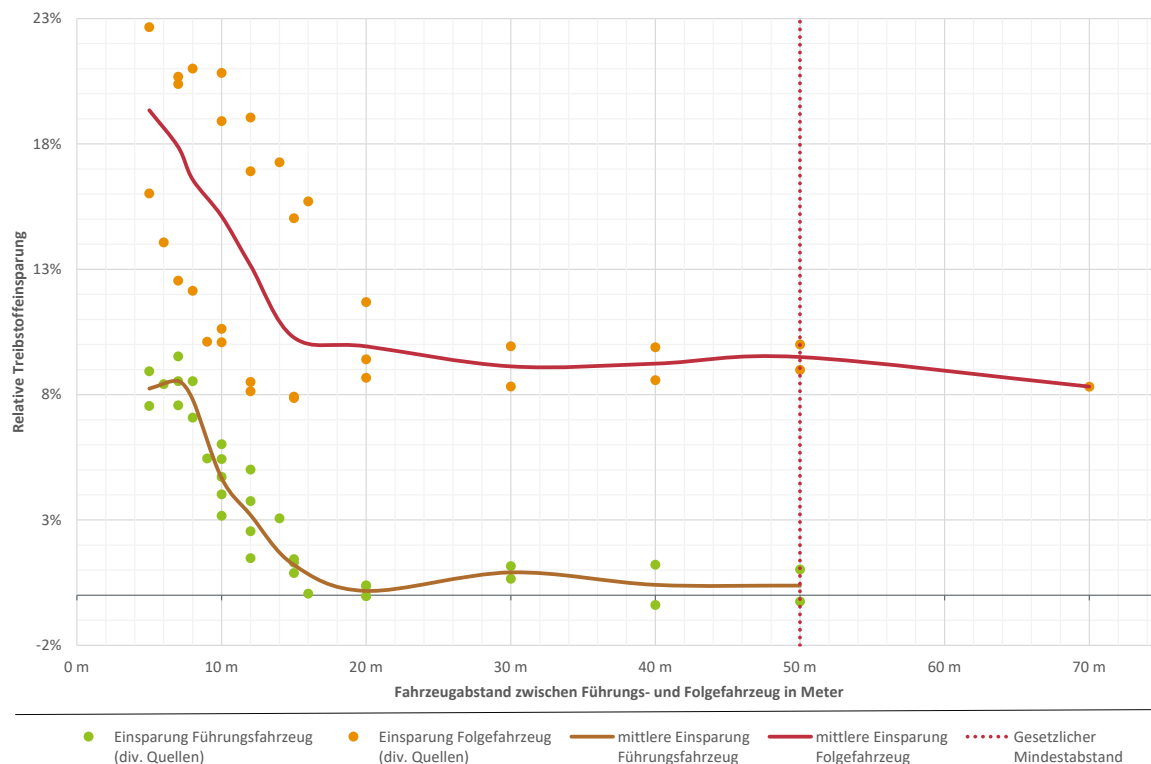
Aufgrund dessen wird im Folgenden auf die unmittelbaren Wirkungen auf den Energieverbrauch durch Platooning eingegangen.

Ziel ist die Quantifizierung des mittleren Einflusses auf den Kraftstoffverbrauch der Lkw-Flotte in Deutschland. Dabei ist einerseits der Einfluss des Platooning auf den Energieverbrauch des einzelnen Lkw im Platoon maßgeblich, andererseits aber auch das Potential der Fahranteile der Flottenverkehre für Platooning zu berücksichtigen. Die Quantifizierung erfolgt mittels Literaturrecherche und Modellrechnungen. Auf dieser Basis werden mittlere Kraftstoffeinsparungen der Fahrzeuge im Platoon abgeleitet.

Kraftstoffeinsparung im Platoon Fahren Lkw in geringen Abständen, bildet sich also ein Platoon von mindestens zwei Fahrzeugen, reduziert sich ihr Kraftstoffverbrauch aufgrund aerodynamischer Effekte gegenüber einem allein fahrenden Fahrzeug. Nach Veldhuizen et al. (2019)

nimmt diese relative Krafteinsparung mit steigendem Abstand der Lastkraftwagen stetig ab; je näher die Fahrzeuge auffahren, desto höher ist die Einsparung im Platoon. Zur Einsparung von Kraftstoff kommt es dabei sowohl beim vorne fahrenden Führungsfahrzeug, als auch beim Folgefahrzeug. Die Länge des Abstandes wirkt sich auf das Führungs- und das Folgefahrzeug jedoch unterschiedlich aus. In Abbildung 16 werden die Ergebnisse aus verschiedenen Versuchsfahrten aufgezeigt. Die Unterschiede bei gleichem Abstand lassen sich auf unterschiedliche Karosserie-merkmale, Differenzen im Testgewicht und variierende Windverhältnisse zurückführen. Es wird jedoch deutlich, dass im Falle des Führungsfahrzeuges die Kraftstoffersparnis im Mittel von etwa 8% auf unter ein Prozent ab 16m Distanz abfällt. Über diesen Abstand hinaus sind somit für das Führungsfahrzeug keine signifikanten Einsparungen zu erwarten. Beim Folgefahrzeug sind die Einsparungen dagegen höher und auch noch bei größeren Abständen relevant. Die Kraftstoffersparnis fällt zunächst von über 18% auf etwa 10 % bei 16 m ab und nimmt dann bis zum Mindestabstand von 50 m nur noch geringfügig ab. Im Mittel liegen die Einsparungen dann zwischen 9 % und 10 %.

Abbildung 16: Kraftstoffersparnispotentiale für Lastkraftwagen im Platoon (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Veldhuizen et al. 2019)



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu

Es wird deutlich, dass für Folgefahrzeuge bereits bei heute schon üblicher Einhaltung des gesetzlichen Mindestabstands von 50 m eine Minderung des Kraftstoffverbrauchs von über acht Prozent besteht und sich diese Einsparung erst ab ca. 16m Abstand deutlich erhöht und sich dann auch eine zusätzliche Einsparung beim Führungsfahrzeug einstellt. McAuliffe et al. (2018) zeigen, dass in einem Platoon aus drei Fahrzeugen, die Einsparung des mittleren Fahrzeugs im Vergleich zu den anderen beiden Fahrzeugen am höchsten sind. Ferner macht es einen Unterschied von rund 2 %-Punkten, ob dem Folgefahrzeug zwei oder ein Lkw folgt. So fällt der Minderverbrauch von 10 % auf 8 % bei 50 m Abstand, wenn nur ein Fahrzeug vorausfährt.

Eine Studie zur Effektivität von Platooning im Rahmen des Projekts Energy ITS, eines der im Bereich Platooning durchgeführten Pilotprojekte, kam zu folgendem Ergebnis: Wenn 40 % der schweren Lkw auf Autobahnen in Platoons unterwegs sind, ist je nach Abstand zwischen den Fahrzeugen (4 m oder 10 m) eine CO₂-Einsparung von 2,1 % bis 4,8 % auf Autobahnen möglich (Tsugawa et al. 2016). Die erzielten Kraftstoffeinsparungen variieren zwischen 11 und 38 % für den zweiten Lkw im Platoon, abhängig vom Ermittlungsansatz (siehe Tabelle 7).

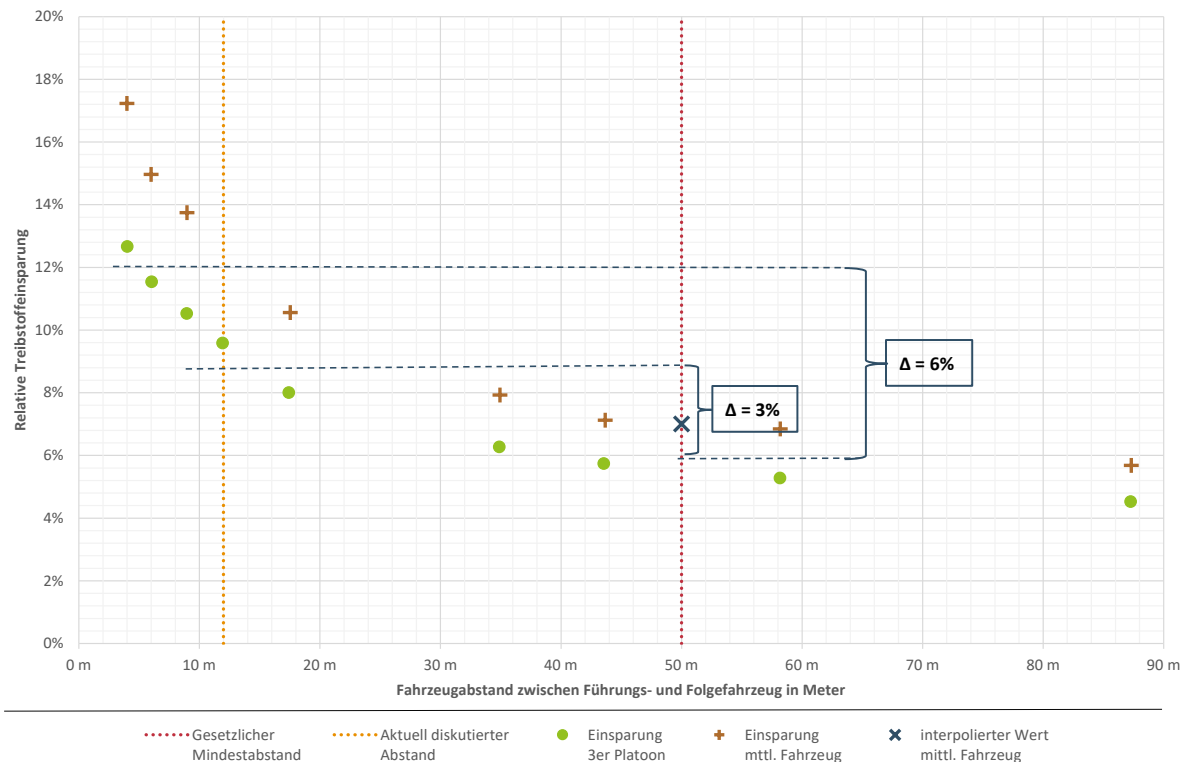
Tabelle 7: Kraftstoffersparnisse basiert auf Theorie, Simulation und Empirie für 14t und 28t Lkw

Kraftstoffverbrauch	Theoretisch	Simulation nach Daimler	Bemessung nach Daimler	Simulation mittels PELOPS nach KONVOI
Fahrzeug 1	2,17% (14 t zGG) 1,64% (28 t zGG)	2% (28 t zGG)	6% (14 t zGG)	2% (14 t zGG)
Fahrzeug 2	38,1% (14 t zGG) 28,8% (28 t zGG)	19% (28 t zGG)	21% (28 t zGG)	11% (28 t zGG)

Quelle: Eigene Darstellung nach Tsugawa et al. (2016)

Um abzuschätzen, welchen zusätzlichen Nutzen die Bildung von in kurzem Abstand automatisiert fahrenden Platoon im Vergleich zu heute schon teilweise bestehenden langen Kolonnen im gesetzlichen Mindestabstand von 50 m hat, wurde in Abbildung 17 die relative Kraftstoffeinsparung des mittleren Fahrzeuges im Dreier-Platoon bei 50 m Abstand der eines Platoons bei 12 m, dem aktuell diskutiertem Abstand für automatisiertes Platooning, und 4m als minimalst angenommener Abstand gegenübergestellt. Die zusätzliche Kraftstoffersparnis durch das Bilden eines automatisiert fahrenden Platoon liegt dann zwischen 3 % bei 12 m Abstand und 6 % bei 4m Fahrzeugabstand. Zudem werden bereits durch vorrausfahrende Pkw bei einem Abstand zwischen 43 und 87 m knapp 3 % weniger Kraftstoff verbraucht. Die Einsparungen bei mehreren vorrausfahrenden Lkw liegen hier bei einer Distanz von 87 m auf einem Niveau von 8 %.

Abbildung 17: Kraftstoffersparnispotentiale eines Platoon im Vergleich zur Kolonne mit gesetzl. Mindestabstand



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu

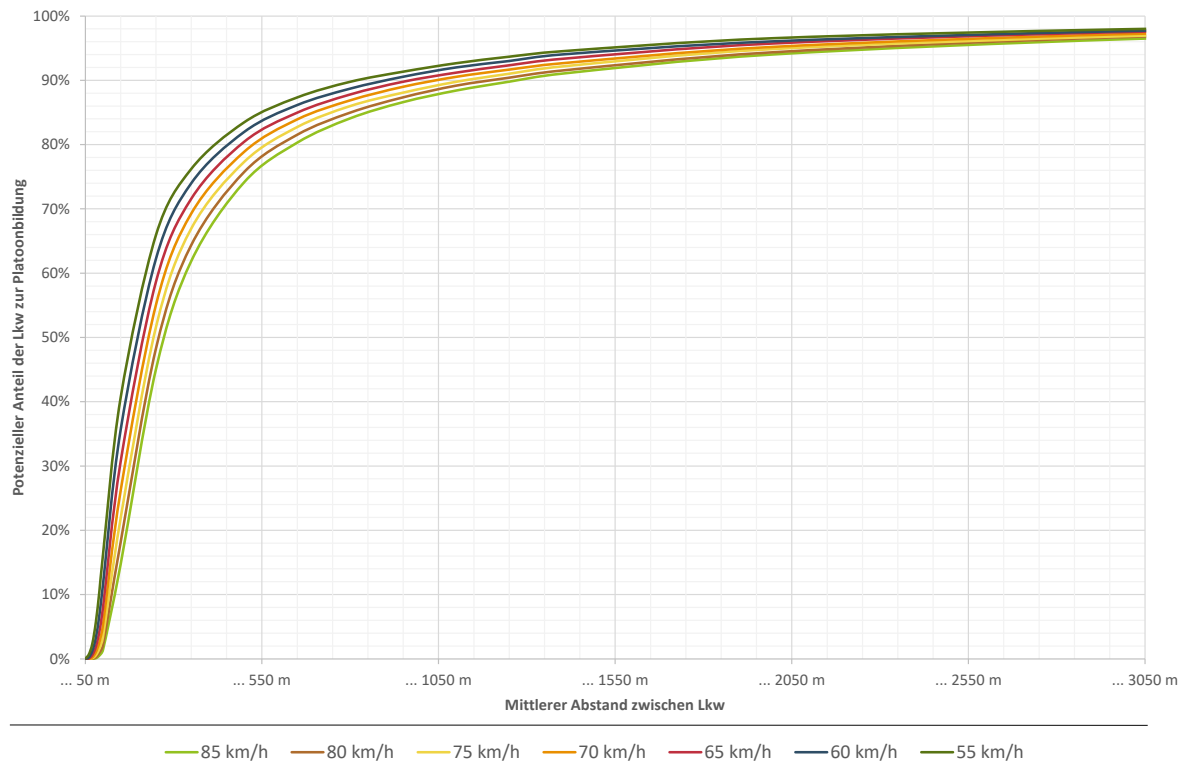
Potential für die Bildung von Platoon Um das mittlere Potential für zusätzliche Kraftstoffersparnung durch automatisiertes Platooning in Deutschland abzuschätzen, werden die Stundenwerte der Rund 1.900 Verkehrszählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen der BAST (2018) ausgewertet. Über eine angenommene mittlere Fahrgeschwindigkeit wird die Häufigkeit des Auftretens von mittleren Fahrzeugabständen der Lkw abgeschätzt. Abbildung 18 zeigt die kumulative Auftrittswahrscheinlichkeit der mittleren Fahrzeugabstände. Es ist ersichtlich, dass rund 80 % der erfassten Lkw einen Abstand von unter 550m aufweisen, wenn man annimmt, dass diese sich gemäß dem Rechtsfahrgebot nahezu vollständig auf einer Fahrspur aufhalten.

Für die Quantifizierung des Potentials zur Bildung von Platoons wird eine mittlere Geschwindigkeit von 75 km/h angenommen (siehe Abbildung 18) und es wird bei vollständigem Platooning von einer Kraftstoffeinsparung von 10 % ausgegangen. Damit ergibt sich abzüglich des bereits für heute schon angenommenen Einsparungseffektes folgendes zusätzliches Einsparungspotential durch automatisiertes Platooning (siehe Tabelle 8).

- Für ca. 3% der Lkw betragen die mittleren Abstände weniger als 100m. Hier wird davon ausgegangen, dass auch ohne automatisiertes Fahren bereits ein Einsparungseffekt von 8 % realisiert wird. Der durch automatisiertes Platooning zusätzlich realisierbare Einsparungseffekt liegt dann bei nur 2 %.
- Für die Distanzklasse von 100m auf 600m wird eine degressive Einsparung durch vorausfahrende Fahrzeuge von 8% auf 3% angesetzt, da die Anzahl vorrausfahrender Lkw abnimmt und sukzessive vermehrt Pkw auf der Fahrspur für Windschatten sorgen. Im Mittel können durch Fahrzeuge, die heute in dieser Distanzklasse fahren, etwa 3,5 % zusätzliche Kraftstoffeinsparung erzielt werden.

- Für die Distanzklasse von 600 bis 1.200m wird davon ausgegangen, dass die Einsparung von 3 % auf 0 % durch die vorausfahrende Klasse sinkt. Demnach könnten dann in dieser Distanzklasse im Mittel gut 8 % zusätzliche Kraftstoffeinsparung nach Bildung eines Platoons durch den verringerten Fahrzeugabstand erzielt werden.

Abbildung 18: Kumulierte Auftretenshäufigkeit von mittleren Abständen zwischen Lkw auf Basis der BAST-Zählstellendaten



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu

Die Tabelle 8 fasst diese Klassifizierung zusammen und gibt zusätzlich den Anteil der Fahrzeuge an, für die diese Potentiale zutreffen. Gewichtet nach Anteil der Lkw liegt das Potential zusätzlicher Einsparung durch automatisiertes Platooning bei 4,5 %. Wobei das größte Potential in der Abstandsklasse zwischen 100 und 600 m liegt, da hier viele Fahrzeuge unterwegs sind und auch relevante zusätzliche Einsparungen erzielt werden können.

Tabelle 8: Einsparungseffekte aufgrund der verkehrlichen Situation als Offset zur Bestimmung der Minderungspotentiale durch Platooning

Distanzklasse	Abstand	Einsparung ohne Platooning aufgrund der Verkehrsdichte	Zusätzliches Einsparungspotential durch Fahren im Platoon	Anteil der Lkw
A	50 ... 100m	8%	2%	3,4%
B	100 ... 600m	8% ... 3%	2%-7%	76,7%
C	600 ... 1200m	3% ... 0%	3%-10%	10,5%

Weitere Einschränkungen für Platooning Weitere Einschränkung zur Bildung und Aufrechterhaltung eines Platoons, die die Effektivität dieser Technologie einschränken können, lassen sich folgenden Gruppen zuordnen.

- ▶ Infrastruktur:
 - Erhöhung des Fahrzeugabstandes in Tunneln aufgrund sicherheitstechnischer Aspekte sowie vor Auffahrten und Autobahnkreuzen und anschließendes Neuformieren. Gemäß Jermann et al. (2017) werden beispielsweise zur Formierung und Auflösen bei Abständen von 15m und 50m in etwa jeweils 1.100 bis 1.200m Fahrtstrecke benötigt.
- ▶ Verkehrssituation:
 - Störungen durch Fahrzeuge, die nicht ins Platoon eingebunden werden können und eine Formierung behindern.
- ▶ Organisatorisch:
 - Differierende Lenkzeitpausen aufgrund gesetzlicher Bestimmungen
 - Unterschiedliche Rastzeiten aufgrund menschlicher Bedürfnisse
 - Herauslösen einzelner Fahrzeuge aus dem Verbund aufgrund differierender Routenteile bzw. Lieferziele
- ▶ Fahrzeug- und regelungstechnisch:
 - Unterschiedliche Fahrzeugmassen können topographisch bedingt Beschleunigungsphasen des Folgefahrzeugs mit erhöhtem Kraftstoffbedarf verursachen, um den gewünschten Abstand einzuhalten.

Nicht alle diese Effekte lassen sich hier exakt quantifizieren. In der weiteren Betrachtung wird davon ausgegangen, dass das Rechtsfahrgebot für Lkw auf Autobahnen und mehrspurigen Bundesstraßen nicht aufgehoben wird. Daher schränkt sich der Anteil der zurückgelegten Wegelängen im Platoon aufgrund verkehrstechnischer Gegebenheiten beim Lösen und Bilden des Verbundes an Auf- und Abfahrten weiter ein. Die weiteren Restriktionen finden aufgrund mangelnder Erkenntnisse über deren Auswirkung keine Berücksichtigung.

Im Fall, dass aus Gründen der Verkehrssicherheit an Auf- und Abfahrten sowie an entsprechenden Autobahnkreuzen ein Mindestabstand von 50 m eingehalten werden muss, verringert sich der Anteil der zurücklegbaren Strecke im Platoon. Gemäß Jermann et al. (2017) ergeben sich zum Auflösen und Bilden eines Platoons folgende Fahrtstrecken während der Manöver.

- ▶ Schließen des Platoons von 50 auf 15m Abstand: 1.100m
- ▶ Öffnen des Platoons von 15 auf 50m Abstand: 1.200m

Ausgehend von den Abständen zwischen Auf- und Abfahrten der Bundesautobahn nach BASt (2020), ergibt sich nach Abzug der Manöverdistanzen ein Autobahnstreckenanteil von rund 44%, in dem als vollständig ausgebildetes Platoon gefahren werden kann. Unter der vereinfachenden Annahme, dass die Autobahnabschnittslängenverteilung zwischen den Auf- und Abfahrten auf viel und wenig befahrenen Straßenabschnitten gleich ist, verringert sich somit das Gesamteinsparpotential in etwa auf 2%. Dieser Wert wird auch durch verschiedene Feldtestergebnisse bestätigt.

- ▶ Teststrecke A 9 bei München und Nürnberg (Vogel Communications Group 2019):
 - 1,3 % des Führungsfahrzeuges
 - 3%-4 % des Folgefahrzeuges
- ▶ USA Long Haul Trucks (Shiers 2019):
 - “Perfect platooning occurs only 20% of the time. As a result, in real world conditions savings are closer to 1%.”

Die Quantifizierung der Effekte unterliegt vielerlei Unsicherheiten. Die abgeleiteten Zahlen können daher keine finale Bewertung darstellen, sondern sollen eher eine transparente Abschätzung der Größenordnung sein. Demnach liegt das Potential automatisierten Platoonings für zusätzliche Kraftstoffeinsparungen nicht bei 10 % wie teilweise unter optimalen Bedingungen ermittelt, sondern eher zwischen 2-4 %, eventuell sogar niedriger. Für die Parametrisierung der eingesetzten Güterverkehrsmodelle wird daher der Wert des Parameters Kraftstoffverbrauch um 3% reduzieren.

Tabelle 9 fasst die Ergebnisse hinsichtlich der Effekte des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge (siehe Kapitel 2.2.1) und zum Platooning im Wirtschaftsverkehr (siehe Kapitel 2.2.2).

Tabelle 9: Analyse der Effekte des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge im Wirtschaftsverkehr

	Wirkungen													
	Verkehrlich				Ökonomisch						Ökologisch			S.*
	Stau	Fahrtenreduzierung	Sendungsbündelung	Fahrtenbündelung	Fahrzeugauslastung	Leerfahrten	Transportzeit	Transportdistanzen	Kraftstoffverbrauch	Transportkosten	Abgasemissionen	Lärm	Flächenverbrauch	Verkehrssicherheit
Einsatz automatisierter Fahrzeuge														
Lkw	+	-	-	o	+	+	+	+	+	-	+	o	o	+
Platooning	+	-	+	o	+	-	o	+	+	-	+	o	o	+
+: Verbesserung/Erhöhung, o: Keine Wirkung, -: Verschlechterung/Reduzierung (*) Sozial														

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

2.2.3 Szenarienentwicklung zur Automatisierung im Güterverkehr

Als Vorbereitung für die modellseitige Abschätzung der Effekte automatisierter Fahrzeuge im Güterverkehr werden zunächst die zu untersuchenden Szenarien definiert und entwickelt. Die zu betrachtenden Zeithorizonte sind in diesem Kontext 2030 und 2040.

Im Basisszenario werden nur traditionelle Fahrzeugflotten auf öffentlichen Straßen betrachtet. Die Nachfragestruktur für den Güterverkehr verändert sich entsprechend der folgenden Rahmenbedingungen (in Anlehnung an die Annahmen des Bundesverkehrswegeplans [BVWP]) (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Rahmenbedingungen für die Szenarien

Rahmenbedingungen	2030	2040
Bevölkerung in Mio. EW	79,3 (-2,8%)	76,8 (-5,9%)
BIP	1,14%/a	
Exporte	3,63%/a	
Importe	3,99%/a	
Mineralölsteuersatz Diesel	2,5%/a	
Kraftstoffpreis	2,0%/a	
Kostensenkung durch Produktivitätsfortschritt	-1,0%/a	
Kaufpreis für automatisierte Lkw	0,0%/a	
Lkw-Maut (2015)	0,0%/a	
Verkehrspolitik	Infrastrukturelle Maßnahmen mit „vordringlichem Bedarf nach BVWP“	

Quelle: Verkehrsverflechtungsprognose 2030 nach BVWP

Zur Untersuchung der Effekte der Automatisierung im Güterverkehr im öffentlichen Straßenraum werden vier Szenarien entwickelt, die im Folgenden im Detail aufgezeigt werden. In diesen Szenarien gelten dieselben Rahmenbedingungen (z. B. Sozioökonomie, Verkehrsinfrastruktur, Verkehrspolitik) wie im Basisszenario. Fokus liegt hierbei auf den Wirkungen der Szenarien ohne und mit Automatisierung.

Zunächst wird beschrieben, welche Einstellung und Perspektive die Logistikdienstleistungsunternehmen gegenüber der Automatisierung im Güterverkehr zeigen. Diese Erkenntnisse wurden im Rahmen des vom BMVI geförderten Forschungsprojektes „ATLaS – Automatisiertes und vernetztes Fahren in der Logistik“ mittels qualitativer Interviews von Logistikdienstleistungsunternehmen gewonnen (BMVI 2020). Die Auswertung dieser qualitativen Interviews hat ergeben, dass die Logistikdienstleistungsunternehmen bis 2030 einen Fahrermangel erwarten. Zudem kann von einer schnellen Substitution der Flotte – innerhalb von sechs Jahren aufgrund der Abschreibungszeit – ausgegangen werden. Die Pionierleistung hinsichtlich der automatisierten Lkw wird durch die Global Player (z. B. DB Schenker) und die eCommerce-Handelskonzerne (z. B. Amazon) erwartet. Hierbei werden zunächst automatisierte Technologien zur Kostenoptimierung von bestehenden Prozessen eingesetzt. Das größte Einsatzpotential erwarten die befragten AkteurInnen im Bereich der Systemverkehre. Größtes Einsatzpotential für automatisierte Fahrzeuge sehen die Befragten auf der Autobahn zwischen Depots und Güterverkehrszentren sowie zu Begegnungspunkten. Wenig realistisch ist für die Befragten der Einsatz auf der Ersten und Letzten Meile. Auch wird die Übernahme anderer Tätigkeiten durch die FahrerIn während der Fahrt als unrealistisch erachtet und daher ausgeschlossen. Nutzenerhöhend wären zudem der Einsatz von automatisierten Lang-Lkw sowie das Platooning.

Für die Szenariendefinition und die Parametrisierung der eingesetzten Modelle ist es zunächst erforderlich, die Eingangsparameter der Modelle zu identifizieren, bei denen eine maßgebliche Änderung durch den Einsatz von automatisierten Lkw erwartet wird. Im Folgenden wird ein Überblick über relevante Parameter, u. a. Transportkostenbestandteile und sonstige Fahrzeugcharakteristika aufgezeigt, die zur Parametrisierung der Modelle berücksichtigt werden müssen. Bei den in fett markierten Parametern werden sich die Eingangswerte für die automatisierten Fahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen verändern (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Überblick über relevante Parameter

Laufleistungsabhängige Kosten	Fixe Kosten	Zeitabhängige Kosten	Sonstige Fahrzeugangaben
Kraftstoffkosten pro km	Kalkulatorischer Zinssatz	Personalkosten pro Fahrer	Nutzlast
Adbluekosten pro km	Zeitabschreibungsrate	Personalfaktor pro Lkw	Fahrzeugkapazität
Schmierstoffkosten pro km	Steuern pro Lkw	Arbeitsstunden pro Tag	Auslastung
Reifenkilometer	Versicherungen pro Lkw		Leerfahrtenanteil
Reifenpreise	Sonstige Kosten pro Lkw		Kraftstoffverbrauch
Leistungsabschreibungsrate			Adblueverbrauch
Restwert			Kaufpreis für 1 Lkw
Instandhaltung/Reparatur pro km			Max. erreichbarer Geschwindigkeit
Lkw-Maut pro km			

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Im Zuge der Automatisierung von Fahrzeugflotten im Güterverkehr wird erwartet, dass sich vornehmlich Änderungen bei den zeitabhängigen Kosten, den Kraftstoffkosten sowie beim Kraftstoffverbrauch ergeben.

Zudem ist die Frage zu klären, welche Sektoren für die Automatisierung von Lkw-Flotten in Frage kommen.

Für die Entwicklung der Szenarien und die Modellierung werden folgende Aspekte explizit von der Betrachtung ausgeschlossen.

- Elektromobilität im Güterverkehr
- Oberleitungs-Lkw

Im Folgenden werden die vier Szenarien entwickelt und im Detail beschrieben.

Szenario 1: Multimodalität

Im Jahr 2030 werden Platoons mit automatisierten Lkw im Hauptlauf auf Autobahnen zwischen mono- oder multimodalen Umschlagknoten eingesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass automatisierte Fahrzeuge vornehmlich in **Systemverkehren für Stückgüter und bei Seehafenhinterlandverkehren** Verwendung finden. Die automatisierten Lkw werden mit Lkw-FahrerInnen zur Überwachung besetzt. Die FahrerInnen haben immer die Möglichkeit, manuell einzugreifen. In

Einklang mit den beiden betrachteten Einsatzmärkten gibt es nur automatisierte Fahrten ohne Endkundenkontakt.

Szenario 2: Multimodalität+

Dieses Szenario stellt eine Erweiterung von Szenario 1 dar. Dabei wird der Zeithorizont 2040 betrachtet. Unterschied zum Szenario 1 ist dabei, dass fahrerlose Fahrzeuge eingesetzt werden. Zudem finden an den Umschlagknoten automatisierte Umschlagtechnologien für Be- und Entladung Verwendung. Dementsprechend wird der Umschlag von Sattelauflegern mittels Wechselbrücken bzw. -stationen automatisiert realisiert.

Szenario 3: Direktverkehre

In diesem Szenario wird angenommen, dass die Vorteile der Automatisierung für Direktverkehre sowie allgemein für vergleichsweise kleine Fahrzeuge verhältnismäßig größer als für große Fahrzeuge sind. Es wird angenommen, dass schon im Jahr 2030 die Automatisierung der Sendungen durch flexible **Direktverkehre automatisierte Fahrzeuge** unterstützt wird. Gerade im Bereich **Handel und Industrie (B2B-Sektor)** werden automatisierte Lkw zur Belieferung eingesetzt. Wie bereits in Szenario 1 werden die automatisierten Lkw mit Lkw-FahrerInnen zur Überwachung besetzt. Die FahrerIn hat hierbei durch technische Voraussetzungen die Möglichkeit, manuell einzugreifen.

Szenario 4: Direktverkehre+

Betrachtungshorizont für dieses Szenario ist das Jahr 2040. Dieses Szenario stellt eine Erweiterung von Szenario 3 dar. Unterschied zum Szenario 3 ist dabei, dass fahrerlose Fahrzeuge eingesetzt werden. Zudem finden bei der Beladung beim Verloader und bei der Entladung beim EndkundInnen automatisierte Umschlagtechnologien Verwendung. Dementsprechend wird die Be- und Entladung an den Rampen automatisiert ohne weiteren Personalbedarf realisiert.

Im Folgenden werden die Merkmale mit ihren jeweiligen Ausprägungen der vier Szenarien gegenübergestellt (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Merkmale und deren Ausprägungen der vier entwickelten Szenarien

	Merkmalsausprägungen			
Merkmale	Szenario 1: Multimodalität	Szenario 2: Multimodalität+	Szenario 3: Direktverkehre	Szenario 4: Direktverkehre+
Zeitlicher Betrachtungshorizont	2030	2040	2030	2040
Straßentyp	BAB	BAB	BAB, Bundes-/Landstraßen	BAB, Bundes-/Landstraßen
Verkehrsnetzstrukturen	Hub- and Spoke-Netz	Hub- and Spoke-Netz	Direktverkehrsnetz	Direktverkehrsnetz
Funktionszusammenhänge	Fernverkehr	Fernverkehr	Fernverkehr	Fern-/ Regionalverkehr
Transportkonzept	Sammelgutverkehr	Sammelgutverkehr	Direktbelieferung, Punkt-zu-Punkt-Linienvverkehre	Direktbelieferung, Punkt-zu-Punkt-Linienvverkehre

	Merkmalsausprägungen			
Transportkette	Hauptlauf	Hauptlauf	Rampe-zu-Rampe-Ladungsverkehr	Rampe-zu-Rampe-Ladungsverkehr
Fahrzeugtypen	Lkw > 20 t zGG	Lkw > 20 t zGG	Lkw ≤ 20 t zGG	Lkw ≤ 20 t zGG
Einsatz Lkw-FahrerIn	Ja	Nein	Ja	Nein
Personalkosten pro FahrerIn	0%	-	0%	-
Personalfaktor pro Lkw	1,4	-	1,4	-
Pausenzeiten der FahrerIn in min	45	0	45	0
Ruhezeit der FahrerIn in h/Woche (h/Tag)	min. 45 – max. 66 (9-11)	0	min. 45 – max. 66 (9-11)	0
Fahrverbot	Sonntag	Sonntag	Sonntag	Sonntag
Arbeits-/Einsatzzeit pro Tag in h	8	24	8	24
Einsatz von Platooning	Ja	Ja	Nein	Nein
Kraftstoffverbrauch	-3%	-3%	0%	0%
Adblueverbrauch	-3%	-3%	0%	0%
Sicherheitsabstand in m	15 statt 50	15 statt 50	15 statt 50	15 statt 50
Umschlagtechnologie (Be-/Entladen)	Nein	Ja	Nein	Ja
Umschlagzeiten	0%	-50%	0%	-50%

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Sowohl für die Szenarien 1 und 2 zur Multimodalität als auch für die Szenarien 3 und 4 zu Direktverkehren werden folgende Gütergruppen ausgewählt (siehe Tabelle 13). Da der Fokus auf Systemverkehren für Stückgüter, Seehafenhinterlandverkehren sowie auf den Sektor Handel und Industrie (B2B) liegt, werden vornehmlich Stückgüter und der Kombinierte Verkehr (KV) berücksichtigt. Diese Gütergruppen wurden vornehmlich ausgewählt, da in diesen Segmenten auch jetzt bereits vornehmlich Lkw eingesetzt werden bzw. diese Gütergruppen für den Transport mit dem Lkw geeignet sind. Explizit werden Schütt- und Sauggüter sowie Flüssiggüter ausgeschlossen, da ein Transport mit dem Lkw vorwiegend auszuschließen ist und die Verkehrsträger Schiene und Binnenschiff zu diesem Zweck zu bevorzugen sind.

Tabelle 13: Ausgewählte Gütergruppen im Rahmen des Szenarienentwicklungsprozesses

Gütergruppen	Ausgewählt	Gütergruppen	Ausgewählt
Landwirtschaftliche Erzeugnisse, Forstprodukte		Sonstige Mineralprodukte	
Steinkohle		Stahl, Eisen	X

Gütergruppen	Ausgewählt	Gütergruppen	Ausgewählt
Braunkohle		Maschinen, Ausrüstungen	
Rohöl		Fahrzeuge und Fahrzeugteile	X
Erze		Möbel, sonst. Halb- und Fertigwaren	X
Düngemittel		Recyclingprodukte, Abfälle	
Steine, Erden		Post, Pakete	X
Nahrungs- und Genussmittel, Getränke	X	Geräte und Material für die Güterbeförderung	
Textilien		Umzugsgut und sonstige nichtmarktbestimmte Güter	
Holz, Forstprodukte, Papier		Sammelgut	X
Koks		Gutart unbekannt	X
Mineralölprodukte		Maritimer Kombinierte Verkehr (Container)	X
Chemische Produkte		Kontinentaler Kombinierte Verkehr (Kranbarer Sattelanhänger)	X

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

2.2.4 Güterverkehrsmodellierung

Im Folgenden werden jeweils die eingesetzten Modellierungsansätze zum Aufzeigen der Effekte der Automatisierung auf den Güterverkehr in Kürze vorgestellt. Ferner werden das methodische Vorgehen und der Datenbedarf zur Parametrisierung der jeweiligen Modelle präsentiert. Abschließend werden jeweils die Simulationsergebnisse ausgewertet und die verkehrlichen und ökologischen Effekte dargestellt. In diesem Kontext werden drei Modellierungsansätze verwendet, um die Effekte der Automatisierung auf die Verkehrsträgerwahl und die Verkehrsmittelwahl, die Loßgrößenwahl sowie die Distributionsnetze aufzuzeigen. Im Detail werden die Funktionsweisen der eingesetzten Modelle in Anhang A.X erläutert.

2.2.4.1 DEMO-GV: Modellierung der Verkehrsträger- und Verkehrsmittelwahl

Zur Abschätzung der Effekte automatisierter Fahrzeuge im Güterverkehr wird das am DLR entwickelte makroskopische Verkehrsnachfragemodell DEMO-GV (Burgschweiger et al. 2017) verwendet. Damit können Güterflüsse in Deutschland abgebildet werden.

Dieses Modell erlaubt, Wirkungen technologischer Entwicklungen im Wirtschaftsverkehr auf die Verkehrsträgerwahl (Modal Split) und Verkehrsmittelwahl im Straßengüterverkehr (Transport Means Split) abzuschätzen. Hierbei können neue Fahrzeugtypen mit spezifischen Fahrzeugkosten und -größen sowie neue Umschlagtechnologien untersucht werden. Basisszenarien liegen bereits für die Jahre 2010, 2030 und 2040 vor. Zur Abschätzung der Effekte automatisierter Fahrzeuge müssen dementsprechend diese Basisszenarien erweitert werden.

Es werden hierbei verschiedene Szenarien entwickelt, die sich nach dem Automatisierungsgrad der Fahrzeuge differenzieren lassen. Zudem sollen die Effekte des Platoonings untersucht werden (siehe Kapitel 2.2.3). DEMO-GV wird in diesem Kontext herangezogen, um die Effekte der Szenarien Multimodalität und Multimodalität+ aufzuzeigen. Die Szenarien zu Direktverkehren können mittels DEMO-GV nicht abgebildet werden.

Hierbei werden vornehmlich Effekte auf die Verkehrsträger- und -mittelwahl erwartet. Es werden die drei Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße betrachtet.

Zur Parametrisierung wird das Kostenmodul von DEMO-GV angepasst, da die Kosten hierbei erheblichen Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl haben. Die folgenden Lkw-Typen werden hierbei für den Verkehrsträger Straße berücksichtigt.

- ▶ Lkw 3,5 bis ≤ 7,5t zGG
- ▶ Lkw 7,5 bis ≤ 12t zGG
- ▶ Lkw 12 bis ≤ 18t zGG
- ▶ Lkw 18 bis ≤ 26t zGG (GLZ)
- ▶ Sattelzüge (SZM) bis 19t zGG (vornehmlich Lkw 40t zGG)

Die Kosten für die Schienenfahrzeug- und Binnenschiffstypen müssen nicht angepasst werden, da für dieses Szenario angenommen wird, dass hier keine Automatisierung der Züge und Schiffe erfolgt. Dementsprechend werden nur die Kosten für die betrachteten Lkw-Typen für die Szenarien angepasst.

Zur Einführung von automatisierten Fahrzeugen im Straßengüterverkehr sind die jeweiligen Transportkostenbestandteile zur Vollkostenberechnung im Vergleich zum Basisszenario anzupassen.

Die Funktionsweise von DEMO-GV wird in Anhang A.7.6 im Detail aufgezeigt.

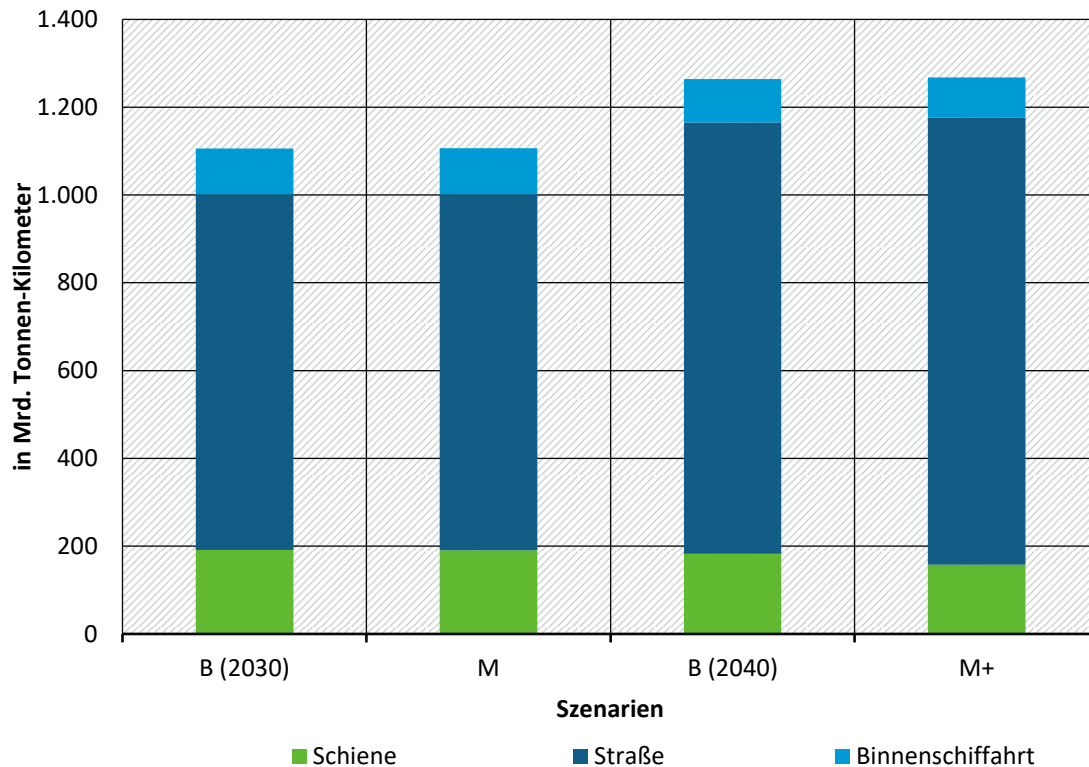
2.2.4.2 Ergebnisse aus DEMO-GV

Mittels DEMO-GV werden die Szenarien Multimodalität (M) und Multimodalität+ (M+) berechnet. Dazu wird einerseits die Verkehrsleistung in Tonnen-Kilometern pro Jahr der drei Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße im Vergleich zu den Basisszenarien (B) 2030 und 2040 aufgezeigt. Ferner wird die Laufleistung in Kilometer pro Jahr differenziert nach Lkw-Typen der Szenarien im Vergleich zu den Basisszenarien dargestellt.

2.2.4.2.1 Verkehrs- und Laufleistungen

Folgende Abbildung 19 zeigt die Verkehrsleistung in Mrd. Tonnen-Kilometer nach den drei Verkehrsmodi für die jeweiligen Szenarien.

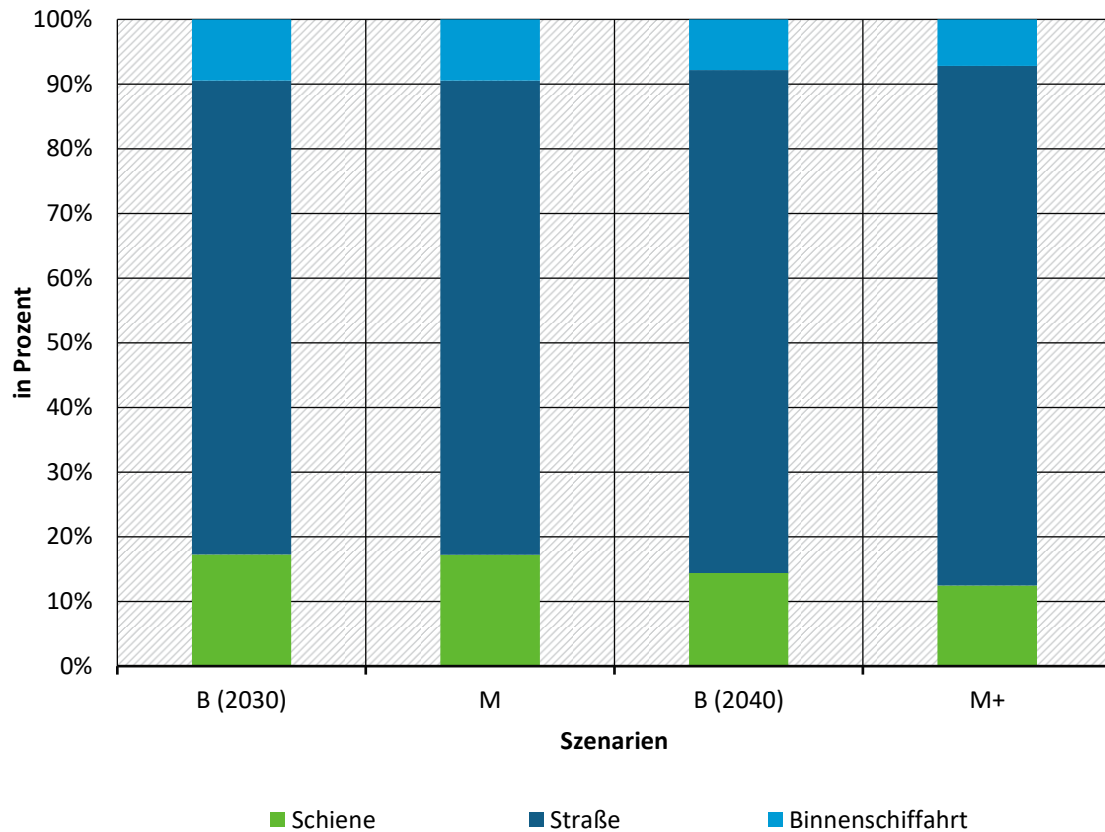
Abbildung 19: DEMO-GV: Vergleich der Simulationsergebnisse zur Verkehrsleistung nach Verkehrsträger



Quelle: Eigene Darstellung, DLR-VF

In Abbildung 19 ist zu erkennen, dass sich die Verkehrsleistungen insgesamt vom Szenario Multimodalität zum Basisszenario (2030) kaum unterscheiden. Hierbei ist nur eine relative Abweichung von 0,02% zu verzeichnen. Auch kommt es nur beim Modus Straße zu einer Erhöhung der Verkehrsleistung in Szenario M von 0,1% im Vergleich zum Basisszenario. Die Verkehrsleistung der Binnenschifffahrt reduziert sich nur um 0,14% und auf der Schiene um 0,23%. Die höchste Verkehrsleistung insgesamt verzeichnet das Multimodalität+ Szenario. Auch die zwei Szenarien für das Jahr 2040 unterscheiden sich im Hinblick auf die Gesamtverkehrsleistung kaum. Nur zwischen den Modi kommt es hierbei zu einer Verlagerung. Im Szenario M+ verliert die Schiene über 13,2 % an Verkehrsleistung im Vergleich zum Basisszenario. Auch per Binnenschiff werden um 8,2% weniger Güter transportiert. Im Vergleich dazu nimmt die Verkehrsleistung auf der Straße um annähernd 3,7% zu.

Abbildung 20: DEMO-GV: Vergleich der Simulationsergebnisse zur Verkehrsleistung nach Verkehrsträger (in Prozent)

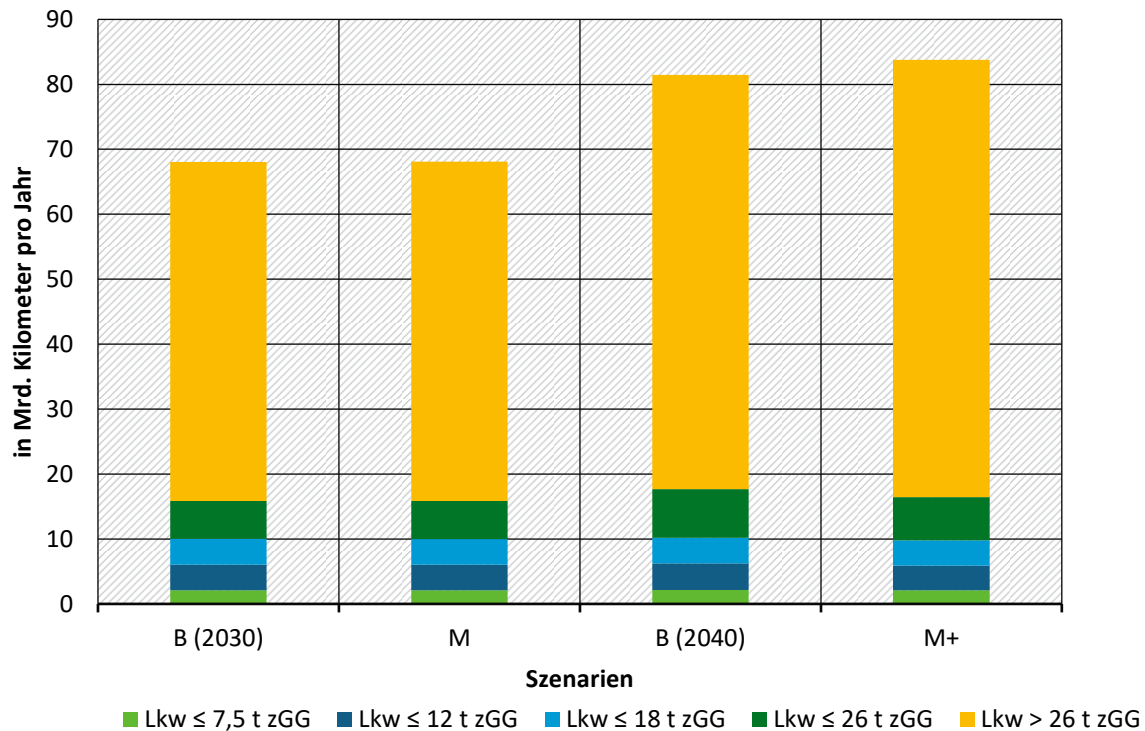


Quelle: Eigene Darstellung, DLR-VF

In Abbildung 20 werden die prozentualen Anteile der Verkehrsträger je Szenario aufgezeigt. Wie bereits zuvor sind zwischen Szenario B (2030) und M nur marginale Unterschiede in der Verkehrsträgeraufteilung zu verzeichnen. Im Szenario M+ nimmt die Straße einen Anteil von über 80,3% und die Schiene einen Anteil von 14,3% ein. Im Basisszenario hatte die Schiene noch einen Anteil von 16,5% und die Straße 77,7%.

In Abbildung 21 wird die Laufleistung pro Jahr differenziert nach Lkw-Typen je entwickelten Szenario im Vergleich zu den Basisszenarien 2030 und 2040 aufgezeigt.

Abbildung 21: DEMO-GV: Vergleich der Simulationsergebnisse zur Laufleistung pro Jahr nach Lkw-Typen

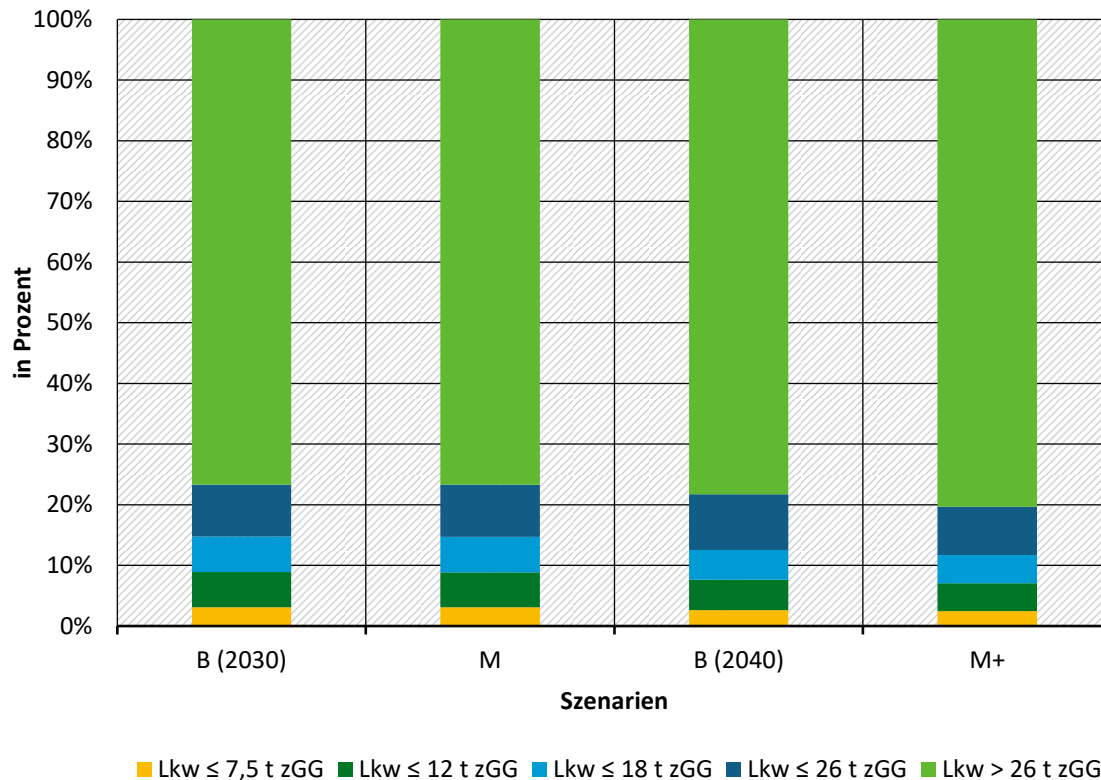


Quelle: Eigene Darstellung, DLR-VF

Abbildung 21 zeigt, dass sich die Fahrleistung auf der Straße für das Jahr 2030 der beiden Szenarien B (2030) und M kaum unterscheiden. Hierbei werden annähernd 68 Mrd. Kilometer jeweils auf der Straße absolviert. Auch zwischen dem Szenario M+ und dem Basisszenario B (2040) ist nur ein marginaler Zuwachs an Fahrleistung von 2,9% zu verzeichnen.

Werden nun genauer die Verlagerungen zwischen den Lkw-Typen betrachtet, wird ein leichter Anstieg der Lkw ≤ 26 t zGG (0,65%) und Lkw > 26 t zGG (0,09%) im Szenario M im Vergleich zum Basisszenario 2030 verzeichnet. Im Szenario M+ dagegen erhöht sich die Fahrleistung der Lkw > 26 t zGG um 5,6% im Vergleich zum Basisszenario 2040. Im Gegensatz dazu sinkt die Fahrleistung der jeweils weiteren Lkw-Typen z.T. enorm. Beispielsweise werden über 6% weniger Kilometer mit Lkw ≤ 12 t zGG absolviert. Die Laufleistung mit Lkw ≤ 26 t zGG reduziert sich sogar um über 11,3%.

Abbildung 22: DEMO-GV: Vergleich der Simulationsergebnisse zur Laufleistung pro Jahr nach Lkw-Typen (in Prozent)



Quelle: Eigene Darstellung, DLR-VF

Abbildung 22 zeigt den prozentualen Anteil der jeweiligen Lkw-Typen an der Gesamtfahrleistung je Szenario. Hierbei wird deutlich, dass kaum Unterschiede zwischen den Szenarien B (2030) und M existieren. Im Szenario M+ zeigt sich ein höherer Anteil an Lkw > 26 t zGG von 80,4% im Vergleich zum Basisszenario 2040 (78,3%). Im Gegenzug ist der Anteil der Lkw ≤ 26 t zGG (7,9%) im Vergleich zum Basisszenario 2040 (9,2%) gesunken.

2.2.4.2.2 THG- und Schadstoffemissionen

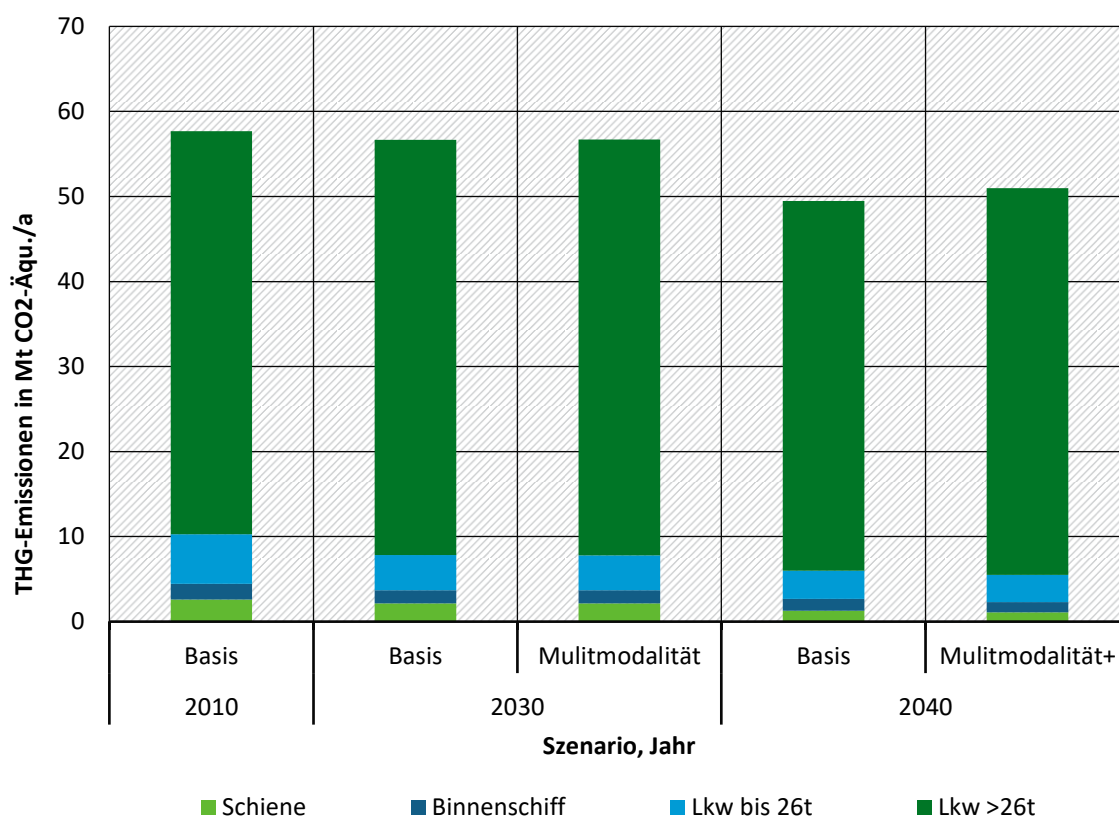
Abbildung 23 stellt die Ergebnisse für die jährlichen THG-Emissionen des Güterverkehrs in Deutschland für die verschiedenen Szenarien dar. Zwischen 2010 und 2040 sinken die Emissionen unabhängig von den Effekten des automatisierten Fahrens leicht. Dahinter stecken jedoch zwei gegenläufige Effekte, welche in Summe zu einer Minderung führen:

- Eine Steigerung der Lkw-Laufleistung um ca. 30%
- Ein Rückgang des spezifischen Energieverbrauchs der Lkw um durchschnittlich 33%

Der Straßengüterverkehr und insbesondere die Klasse N3 (SNF > 20 t zGG) hat den größten Anteil an den THG-Emissionen, während Bahn und Binnenschiff insgesamt weniger als 10% beitragen.

Die Automatisierung und Vernetzung führen zu einer weiteren leichten Zunahme der Lkw-Fahrleistung und damit zur Erhöhung der Emissionen. Im Szenario Multimodalität für das Jahr 2030 sind die Änderungen vernachlässigbar. Mit dem Szenario Multimodalität+, welches zusätzlich den Einsatz fahrerloser Lkw annimmt, steigen die Emissionen dann um 3% gegenüber dem Basisszenario 2040.

Abbildung 23: THG-Emissionen des Güterverkehrs in Deutschland ohne Berücksichtigung von Änderungen des Verkehrsflusses



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu. Erläuterungen: THG-Emissionen well-to-wheel (inklusive Vorkette).

Einfluss des Verkehrsflusses und von Platooning

Die Potentiale des automatisierten Fahrens zur Minderung der THG-Emissionen des Straßengüterverkehrs über eine Verkehrsverflüssigung werden in Tabelle 14 exemplarisch für Lkw > 26t zGG dargestellt. Die THG-Emissionen pro Lkw-Kilometer sinken bei den Lkw >26t zGG um bis zu 11%, die NO_x-Emissionen um bis zu 34 % und die Abgaspartikel um bis zu 16%. Bei den NO_x-Emissionen sind die Minderungen besonders hoch, da sich die Verkehrssituationen mit geringer Motorlast negativ auf die Leistung der Abgasnachbehandlung auswirken, und gerade solche Situationen vermieden werden. Zusätzlich ist die benötigte Energie zum Bremsen und Beschleunigen von der Fahrzeugmasse abhängig, so dass die positiven Umwelteffekte einer Verkehrsverflüssigung für schwere Nutzfahrzeuge besonders groß sind.

Im Gegensatz zu den Pkw entstehen durch die Verkehrsverflüssigung keine direkten negativen Effekte, da die angenommenen Höchstgeschwindigkeiten für Lkw auf Autobahnen mit 90 km/h noch im optimalen Effizienzbereich des Motors liegen und der Anstieg des Luftwiderstands begrenzt bleibt. Auch die angenommene mittlere Geschwindigkeit der Lkw auf Autobahnen liegt mit 86 km/h in diesem Bereich.

Tabelle 14: Mittlere Emissionsfaktoren von Lkw >26t zGG im Jahr 2040 mit und ohne Berücksichtigung von Verflüssigungseffekten

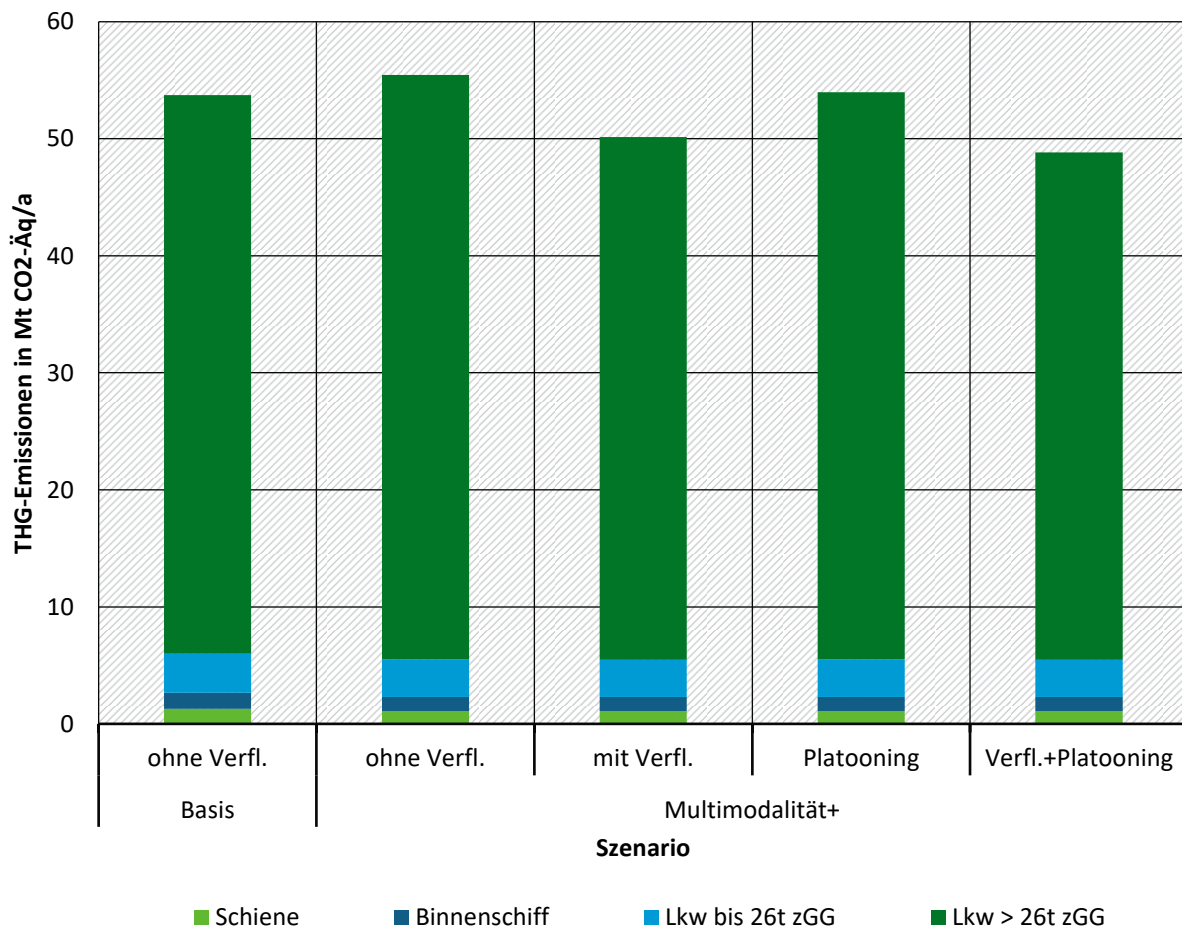
Szenario	Basis 2040	Best Case		Worst Case	
	ohne VV	Mit VV	Diff	Mit VV	Diff

Szenario	Basis 2040	Best Case		Worst Case	
CO ₂ -Äqu. (g/km WTW)	766	682	-11%	698	-9%
NOx (mg/km)	1.298	862	-34%	962	-26%
PM (mg/km)	13,4	11,2	-16%	11,7	-13%

Quelle: Eigene Darstellung, ifeu. Erläuterungen: THG-Emissionen well-to-wheel (inklusive Vorkette). „VV“: Verkehrsverflüssigung.

Bezogen auf den gesamten Güterverkehr sinken die THG-Emissionen im Best Case durch die Verkehrsverflüssigung für Lkw um 9,6% (siehe Abbildung 15). Durch Platooning würden hingegen nur 2,7% der THG-Emissionen eingespart werden. In Kombination führen beide Effekte zu einer Minderung der THG-Emissionen im Güterverkehr um fast 12% und übersteigen damit die zusätzlichen Emissionen durch die Laufleistungszunahme.

Abbildung 24 THG-Emissionen des Güterverkehrs in Deutschland mit und ohne Berücksichtigung der Änderungen des Verkehrsflusses und Platooning für das Jahr 2040



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu. Erläuterungen: THG-Emissionen well-to-wheel (inklusive Vorkette).

2.2.4.3 Auswirkungen auf Distributionsnetze

Während im vorangegangenen Abschnitt unter ceteris-paribus Annahmen untersucht worden ist, wie sich die Automatisierung auf den Modal Split und den Transport Means Split auswirkt, so wird im folgenden Abschnitt untersucht, wie sich die Automatisierung auf den Güterverkehr und

die Netzwerkgestaltung rein straßenbasierter Logistiksysteme auswirkt. Ein exemplarisches Netzwerk hierfür stellen Distributionsnetzwerke im Lebensmitteleinzelhandel dar. Basierend darauf werden die Effekte der entwickelten Szenarien 3 und 4 zu Direktverkehren abgeschätzt.

Die Annahme hierfür ist, dass sich die logistischen Netzwerkstrukturen aufgrund der sich verändernden Transportkonzepte durch den Einsatz von automatisierten Fahrzeugen anpassen werden. Bislang werden Sammelverkehre über ein Hub-and-Spoke-Netzwerk im Stückgutsektor durchgeführt. Es wird jedoch erwartet, dass durch den Einsatz automatisierter Fahrzeuge eine flexiblere Auslieferung an sieben Tagen der Woche jeweils 24 Stunden pro Tag möglich ist. Hierbei muss nicht mehr auf die gesetzlichen Ruhezeiten der FahrerIn geachtet werden. Dies hätte zur Folge, dass Sammelverkehre durch Direktverkehre ersetzt werden würden, um den kostenintensiven Umschlag zu vermeiden. Die zu erwartenden Effekte sind in diesem Kontext:

- ▶ kleinere Sendungsgrößen und höherer Leerfahrtenanteil,
- ▶ höhere Frequenz,
- ▶ Einsatz kleinerer Fahrzeuge und mehr Direktverkehre,
- ▶ Erhöhung des Fahrtenaufkommens sowie
- ▶ **Erhöhung der Laufleistung.**

Ökonomisch mögen solche Entwicklungen für Verladende und Versendende Sinn ergeben. Aus ökologischer Sicht sind hier starke negative Effekte zu erwarten.

2.2.4.3.1 Modellannahmen

Um die Veränderungen einer Logistikstruktur als Antwort auf einer Veränderung der in ihr verwendeten Transportressourcen beschreiben zu können, wird zunächst die Annahme getroffen, dass die BetreiberIn wie folgt agiert.

- ▶ Er bzw. sie agiert als GewinnmaximiererIn und damit als KostenminimiererIn.
- ▶ Es spielen sowohl Transportkosten als auch Lagerkosten eine Rolle, wobei sich letztere aus Bestandsführung und Gebäudekosten zusammensetzen.
- ▶ Die Lagestruktur wird ständig revidiert und folgt dem genannten Kostenminimierungskül.
- ▶ Weitere Faktoren mit Einfluss auf die Lagerstruktur (z.B. Absprachen mit Arbeitnehmervertretungen) und implizite Motive der Entscheidungsträger bleiben unberücksichtigt.

In der Folge dieser Annahmen kann die Lagerstruktur mittels mathematischer Optimierung modelliert werden

2.2.4.3.2 Entwicklung einer Heuristik für die großräumige, überregionale Standortsuche

Insbesondere im Hinblick auf eine steigende Güterverkehrsleistung durch Digitalisierung der Wirtschaft werden steigende Anforderungen an das logistische Netz erwartet. Allgemein lässt sich die Netzwerkoptimierung in zwei Subprobleme unterteilen – Standortplanung (Facility Location Problem bzw. „FLP“) und Tourenplanung (Vehicle Routing Problem bzw. „VRP“). Beide Themenkomplexe stehen in enger Wechselwirkung und wurden in den letzten Jahrzehnten simultan und sukzessiv behandelt (siehe Srivastava 1986, Salhi and Rand 1989, Prins et al. 2007, Harks 2013, Schneider 2017, Arnold und Sörensen 2018). Nachfolgend wird ein semi-kombinierter Ansatz zur Behandlung von großen Location-Routing Problemen (LRP) entwickelt. Die

Erarbeitung eines eigenen methodischen Vorgehens war notwendig, da alle in der Literatur beschriebenen und den AutorInnen bekannten Ansätze nur die Lösung des LRP auf makroskopischer Ebene zum Ziel hatten. Dies bedeutet, dass die mikroskopischen Fahrzeugparameter, wie Personalkosten oder Umschlagszeiten, die in direkter Beziehung zu verkehrlichen Wirkungen standen, nicht durch solche allgemeinen Metaheuristiken abbildbar waren. Des Weiteren haben viele LRP-Algorithmen ihren Ursprung in dem Bereich Operations Research und waren nicht direkt auf reale Problemstellungen mit georeferenzierten Daten übertragbar (vgl. Barreto et al. 2007, Prins et al. 2008, Escobar 2014, Alvim et al. 2013, Guemri et al. 2016).

Die hier erarbeitete Metaheuristik (nachfolgend auch LRP-Heuristik genannt) liefert die Lösung für großräumige LR-Probleme in plausibler Zeit und ermöglicht die Analyse und Optimierung des gesamten, deutschlandweiten Logistiknetzes in Bezug auf mikroskopische Fahrzeugparameter. Zur abschließenden Routenplanung wird das Logistikverhaltensmodell für die Tourenplanung und -optimierung „Jsprit“ (Schröder et al. 2012) als Teil der Lösungssuche verwendet.

Die heuristische LRP-Suche beginnt im ersten Schritt mit der k-Means++ Clustering-Methode, die eine vordefinierte Zahl von k-Centroiden in einem 2D-Raum verteilt. Der k-Means++ Algorithmus weist eine effiziente Rechenkomplexität ($O(\log(k))$) auf, so dass er sich als Mittel der Wahl für eine kombinierte Heuristiken erweist (Arthur und Vassilvitskii 2006). Der k-Means++ Algorithmus zielt in erster Linie darauf ab, die globale Lösungssuche durch die Auswahl der Kandidatenstandorte und die Zuweisung von Kunden zu vereinfachen. Um die beste Kombination und die endliche Menge potenzieller Standorte zu finden, die die Transportkosten minimieren können, wird die Approximationstechnik basierend auf der analytischen Routingkostenabschätzung nach Daganzo (2005) implementiert. Nachfolgend wird eine Routingkosten-Approximationstechnik beschrieben, die im Rahmen der hier entwickelten Metaheuristik Anwendung findet.

Sei R ein konvexes Einzugsgebiet mit uniformer Kundenverteilung. Die Belieferung der n -Kunden in R kann mit zwei Direktfahrten und einer lokalen Travelling Salesman Problem (TSP)-Tour beschrieben werden. Die gesamte zurückgelegte Distanz einer VRP-Tour lässt sich näherungsweise als

$$d_{total} \approx 2 * d_{linehaul} * \left[\frac{D_i}{Q_{veh}} + \frac{1}{2} \right] + \frac{k_{tsp} * n}{\sqrt{\rho}}$$

n : Anzahl der Kunden in R

ρ : die Kundendichte (Stopp/m²)

k_{tsp} : Scalar. Räumlicher Faktor (hier 1,15)

abschätzen, wobei D_i die Nachfrage im Cluster i und Q_{veh} die Fahrzeugkapazität ist (vgl. Gabris et al. 2016). Die Gesamtkosten resultieren schließlich aus drei Kostenquellen: (i) Distanzkosten oder variablen Kosten c_{dist} , (ii) Kosten pro Halt c_{stop} und (iii) die Stückkosten c_{item} . Diese Komponenten werden szenarioabhängig parametrisiert und stellen hier die maßgebenden Kostentreiber für die Automatisierung dar. Folglich kann die Gesamttransportkosten in der Gesamtre-gion R als Summe aller drei Kostenkomponenten definiert werden:

$$C_{total} = C_{fix} + c_{dist} \left(2 * \left[\frac{D_{tot}}{Q_{veh}} + \frac{1}{2} \right] * cl * d_{linehaul} + \frac{k_{tsp} n}{\sqrt{\rho}} \right) + c_{stop} * \left(n + \left[\frac{D_{tot}}{Q_{veh}} + \frac{1}{2} \right] \right) + c_{item} * D_{tot}$$

Die Fixkosten C_{fix} in oberstehender Gleichung beruhen vereinfacht auf zwei Komponenten: (i) Standortfixkosten, die relativ zur Nachfrage und Durchschnittsmiete des Kandidatenortes stehen: $D * C_{rent} * a_{stor}$ und (ii) die fixen Transportkosten C_{veh} für den Einsatz des Fahrzeuges. Durch die Einbeziehung der minimalen Fixkosten wird ein bekannter Trade-off erreicht: mit steigender Anzahl der Cluster im Gesamtsystem sinken die Routingkosten. Die Anwendung der hier beschriebenen Continuum Approximation (CA)-Technik zielt darauf ab, die

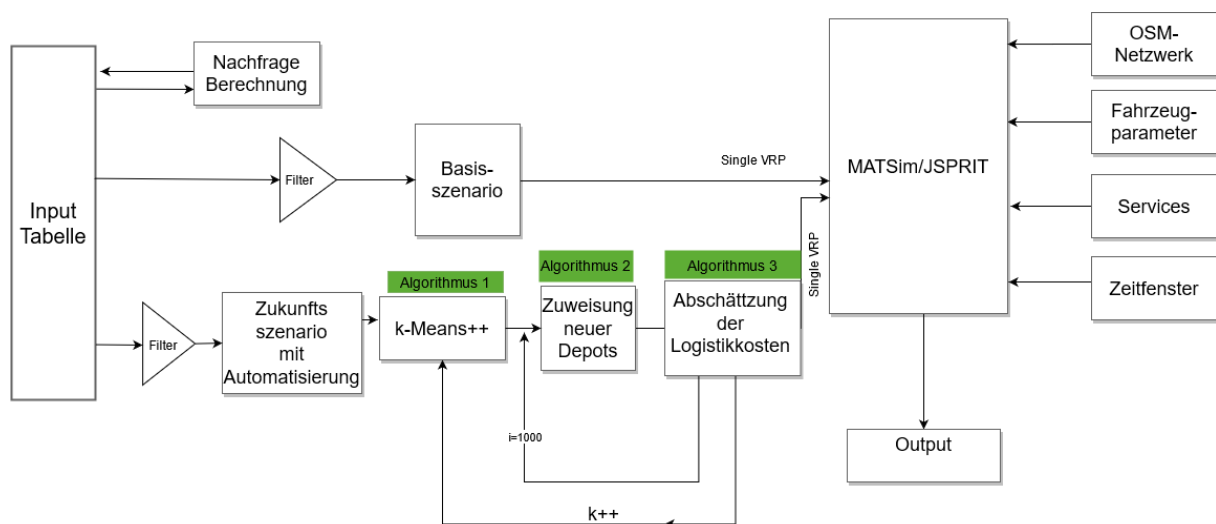
Transportkosten mit einer Zeitkomplexität von $O(1)$ sofort abzuschätzen. Dies macht es möglich, bis zu 1.000 Iterationen für jeden der k Cluster durchzuführen. Die praktische Anwendung und das Ergebnis des LRP-Approximationsalgorithmus werden im Kapitel 2.2.4.3.3 demonstriert.

Gegenstand des dritten Schrittes ist eine diskrete Tourenoptimierung. In diesem Schritt wird zur Lösung des VRPs das Logistikverhaltensmodell Jsprit, entwickelt von Schröder et al. (2012) und die mikroskopische, agentenbasierte Verkehrssimulation MATSim (Horni et al. 2016) eingesetzt. Hierbei werden die Touren im Hinblick auf die folgenden für das Netz relevanten Parameter konstruiert.

- Flottengröße
- Abfahrtzeit vom Depot
- Fahrzeugtypen
- Nachfrage der KundInnen
- Kapazitäten der Fahrzeuge und Fahrzeugwahl

In diesem Ansatz wird Jsprit erst als Black-Box-Modell behandelt, dessen detaillierte Beschreibung im Kapitel 3.5.1 erfolgt. Da Jsprit nur eine begrenzte Anzahl der Relationen zwischen KundInnen und Depots im Netzwerk simultan in angemessener Zeit optimieren kann, wird das VRP mittels Jsprit erst nach der Identifizierung der potentiellen Standorte mittels LRP-Heuristik gelöst. In Abbildung 25 wird die entwickelte LRP-Heuristik aufgezeigt.

Abbildung 25: LRP-Heuristik zur Optimierung und Modellierung des deutschlandweiten Logistiknetzwerks



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

2.2.4.3.3 Szenarienentwicklung

Vor diesem Hintergrund werden die im Kapitel 2.2.3 entwickelten Szenarien auf das Fallbeispiel zum Lebensmitteleinzelhandel operationalisiert, um die Auswirkungen der Automatisierung des Güterverkehrs im Lebensmitteleinzelhandel auf die Logistiknetzwerkgestaltung aufzuzeigen.

Basisszenario

Das Basisszenario ist hauptsächlich auf das Jahr 2017 bezogen und stellt somit im Rahmen der weiteren Netzwerkmodellierung das Status-Quo Szenario dar. Infolgedessen werden in diesem Szenario bereits georeferenzierte und im Jahr 2010 sich im Betrieb befindende Distributionszentren zur Simulation herangezogen. Die Filialen werden hierbei im Status-Quo Szenario gemäß dem Nielsen-Datensatz zu ihren aktuellen Distributionszentren zugewiesen (siehe Kapitel 2.2.4.3.4).

Im Basisszenario erfolgt die Belieferung der Filialen des Lebensmitteleinzelhandels durch dieselbetriebene Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) von 7,5t, 18t, 26t und 40t. Diese Lkw-Typen werden hauptsächlich im Lebensmitteleinzelhandel eingesetzt. Unter Verwendung einer Transportkostenrechnung (TCO) können sowohl die variablen (entfernungsabhängigen) als auch die fixen und die personellen (zeitabhängigen) Kosten abgeleitet werden. Grundlage für die TCO sind die von Eurotransport (2017) aufbereiteten Parameterwerte. Bei der Ermittlung des Lieferzeitfensters für jede Filiale wird in diesem Szenario angenommen, dass Tiefkühl- und Trockenware innerhalb des Zeitfensters zwischen 9:00 und 19:00 Uhr und Frischware zwischen 4:00 und 9:00 Uhr geliefert werden (Martins-Turner und Nagel 2019).

Zusätzlich wird angenommen, dass drei Minuten für jeden Stopp (konstante Stoppzeit) und zwei Minuten für das Be- bzw. Entladen von einer Palette mit trockenen und frischen Waren (variable Stoppzeit) benötigt werden. Für Tiefkühlwaren, die in Kühlboxen transportiert werden, beträgt die variable Stoppzeit eine Minute pro angelieferte Kühlbox. (Gabler et al. 2013)

Tabelle 15 gibt einen Überblick über die im Basisszenario verwendeten Parameter. Für einen vertieften Einblick können auch die Datenaufbereitung von Gabler et al. (2013) herangezogen werden. Weiterführend wird dieses Fallbeispiel in Kapitel 3.5.3 im Detail beschrieben.

Das Szenario **Direktverkehre+** wird für dieses Fallbeispiel nach den Spezifikationen in Kapitel 2.2.3 operationalisiert. Auf die Umsetzung des Szenarios Direktverkehre wird verzichtet, da sich keine Änderungen an den Parameterwerten im Vergleich zum Basisszenario ergeben.

2.2.4.3.4 Parametrisierung des Gesamtmodells

Zur Parametrisierung des Modells werden folgende Daten zu den Depots der Logistikdienstleistungsunternehmen, den KundInnen und den Fahrzeugen benötigt.

► Depots der Logistikdienstleistungsunternehmen

- Georeferenzierte Standorte
- Eröffnungskosten (€/Standort)

► KundInnen

- Georeferenzierte Standorte (fix)
- Bedarf (Paletten/Tag) (fix)

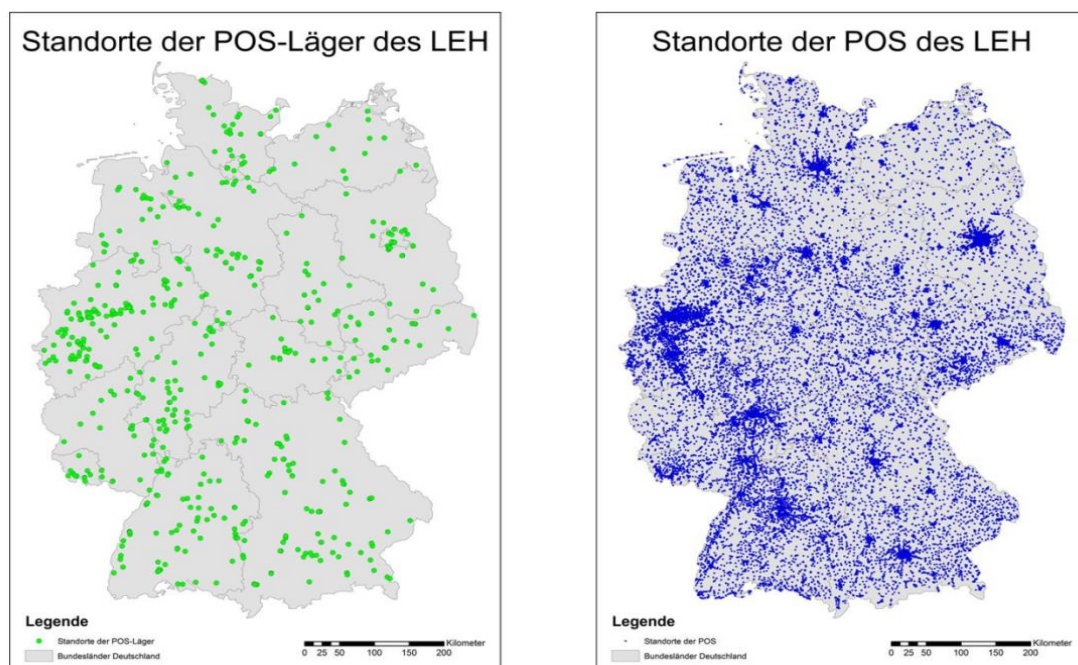
► Fahrzeuge

- Variable Transportkosten (€/km)
- Fixe Transportkosten (€/Fahrzeug)
- Personalkosten (€/Stunde)
- Kapazitäten (in Paletten pro Fahrzeug) (fix)

Wie bereits erwähnt, wird als Fallstudie die Lebensmitteleinzelhandelsdistribution in Deutschland beleuchtet. Hierbei wird jeweils ein typischer Tag für das Basisszenario und das Szenario Direktverkehre+ (D+) mit automatisierten Fahrzeugen für das Bezugsjahr 2017 simuliert. Zu diesem Zweck müssen die Daten zur Parametrisierung des Modells zunächst aufbereitet werden.

Als Datenbasis für die georeferenzierte Standorte der Depots und Filialen im Basisszenario werden die Daten der Nielsen-Datenbank (2012) für den Lebensmitteleinzelhandel (LEH) herangezogen. Dieser beinhaltet einerseits die Standorte der Lebensmitteleinzelhandelsfilialen bzw. der Points of Sale (POS), in diesem Fall der KundInnen, und der Lager der Lebensmitteleinzelhandelsketten, in diesem Fall der Depots. Aus den insgesamt 546 zur Verfügung stehenden Distributionszentren in Deutschland konnten 197 Depots eindeutig in Bezug auf die neun hier untersuchten LEH-Ketten referenziert werden. Vor diesem Hintergrund werden im Basisszenario insgesamt 197 identifizierte LEH-Lager zur Modellierung des Basisszenarios herangezogen.

Abbildung 26: Georeferenzierte Standorte aus der Nielsen-Datenbank zum Lebensmitteleinzelhandel in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Zur Auswahl weiterer potentieller Depotstandorte für das LRP-Framework im Kapitel 2.2.4.3.2 wird das Digitale Landschaftsmodell für Deutschland (DLM) (2007) genutzt. Daraus werden 10 438 Industrie- und Grünflächen als potentielle Depotstandorte deklariert und aus dieser Datenbasis extrahiert. Die 10.438 Depotstandorte werden während der Optimierung des Transportnetzes im Hinblick auf die Automatisierung im LRP-Framework zur Auswahl gestellt. Alle Standorte werden dabei mit Angaben zu minimalen sowie maximalen Bodenpreisen, Geokoordinaten und maximaler zur Verfügung stehenden Bebauungsfläche versehen.

Für die Modellierung wird in diesem Rahmen angenommen, dass die Depots keine Kapazitätsbeschränkung haben.

Wie bereits erwähnt, sind die **Standorte der KundInnen**, die Lebensmitteleinzelhandelsfilialen, in der Nielsen-Datenbank (2012) enthalten. Diese **35.529 Standorte** liegen in georeferenzierter Form vor. Der Nachfragebedarf je KundIn (in Paletten und Kühlboxen pro Tag) wurde bereits von Gabler (2013) für den Untersuchungsraum Berlin abgeleitet. Die generierten Daten werden

für ganz Deutschland unterstellt. Hierbei bedarf es einer Umrechnung der Nachfrage auf Quadratmeter der Filialfläche. Die nachgefragte Menge je Filiale wird in Paletten angegeben.

Im Folgenden liegt der Fokus der Untersuchung jedoch nur auf den folgenden Lkw-Typen, die vornehmlich in der Lebensmitteldistribution Einsatz finden.

- ▶ 7,5t zGG
- ▶ 18t zGG
- ▶ 26t zGG
- ▶ 40 t zGG

Tabelle 15 zeigt einen Überblick über die Parameterwerte, die zur Parametrisierung der verschiedenen Lkw-Typen für das Basisszenario (B) und das Szenario Direktverkehre+ (D+) Verwendung finden. Zusätzlich werden die zur Parametrisierung der Szenarien verwendeten Datenquellen angegeben. Für einen vertieften Einblick in die Aufbereitung der Sekundärdaten, die zur Parametrisierung des Modells herangezogen werden, wird auf Gabler (2012) und Gabler et al. (2013) verwiesen.

Tabelle 15: Parametrisierung des Basisszenarios und des Szenarios Direktverkehre+ zur Automatisierung im Lebensmitteleinzelhandel

Input-Parameter	B	D+	Einheit	Datenquelle
Fahrzeugeigenschaften				
Lkw 7.5 t zGG zur Belieferung von Frisch-, Gefrier- und Trockenwaren				
Fahrzeugkapazität	15 (70)	15 (70)	P/T (B/T)	TPK(2018), Gabler (2012)
Fixkosten	65,26876702	65,26876702	€/Tag	BGL (2018), ETM (2017), DAT Group (2018), Mehlhart et al. (2011), MWV (2018), Schulz (2017), Wittenbrink (2014)
Variable Kosten	0,000440626	0,000440626	€/m	
Zeitabhängige Kosten	0,004524287		€/s	
Dieselvebrauch	0,000162500	0,000162500	l/m	
Adblue-Verbrauch	0,000002178	0,000002178	l/m	
Lkw 18 t zGG zur Belieferung von Trockenwaren				
Fahrzeugkapazität	17	17	P/T	TPK (2018)
Fixkosten	82,16041331	82,16041331	€/Tag	BGL (2018), ETM (2017), DAT Group (2018), Mehlhart et al. (2011), MWV (2018), Schulz (2017), Wittenbrink (2014)
Variable Kosten	0,000579283	0,000579283	€/m	
Zeitabhängige Kosten	0,004524607		€/s	
Dieselvebrauch	0,000253000	0,000253000	l/m	
Adblue-Verbrauch	0,000003390	0,000003390	l/m	
Lkw 26 t zGG zur Belieferung von Frisch-, Gefrier- und Trockenwaren				
Fahrzeugkapazität	18 (160)	18 (160)	P/T (B/T)	TPK (2018), Gabler (2012)
Fixkosten	93,13820929	93,13820929	€/Tag	

Input-Parameter	B	D+	Einheit	Datenquelle
Variable Kosten	0,000702103	0,000702103	€/m	BGL (2018), ETM (2017), DAT Group (2018), Mehlhart et al. (2011), MWV (2018), Schulz (2017), Wittenbrink (2014)
Zeitabhängige Kosten	0,004524767		€/s	
Dieserverbrauch	0,000330000	0,000330000	l/m	
Adblue-Verbrauch	0,000004422	0,000004422	l/m	
Lkw 40 t zGG zur Belieferung von Trockenwaren				
Fahrzeugkapazität	34	34	P/T	TPK (2018)
Fixkosten	142,636821	142,63682115	€/Tag	BGL (2018), ETM (2017), DAT Group (2018), Mehlhart et al. (2011), MWV (2018), Schulz (2017), Wittenbrink (2014)
Variable Kosten	0,000810996	0,000810996	€/m	
Zeitabhängige Kosten	0,004524767		€/s	
Dieserverbrauch	0,000337867	0,000337867	l/m	
Adblue-Verbrauch	0,000004527	0,000004527	l/m	
Umschlagzeiten				
Stopzeitkonstante	180	90	s/St	
Stopzeitvariable je Palette	120	60	s/P	
Stopzeitvariable je Box	60	30	s/B	

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

2.2.4.3.5 Auswertung der Simulationsergebnisse aus der Netzwerkoptimierung im Lebensmitteleinzelhandel

Im Folgenden werden die Wirkungen der Automatisierung auf die Netzwerkstruktur im Lebensmitteleinzelhandel und basierend darauf auf den Güterverkehr in diesem Segment aufgezeigt.

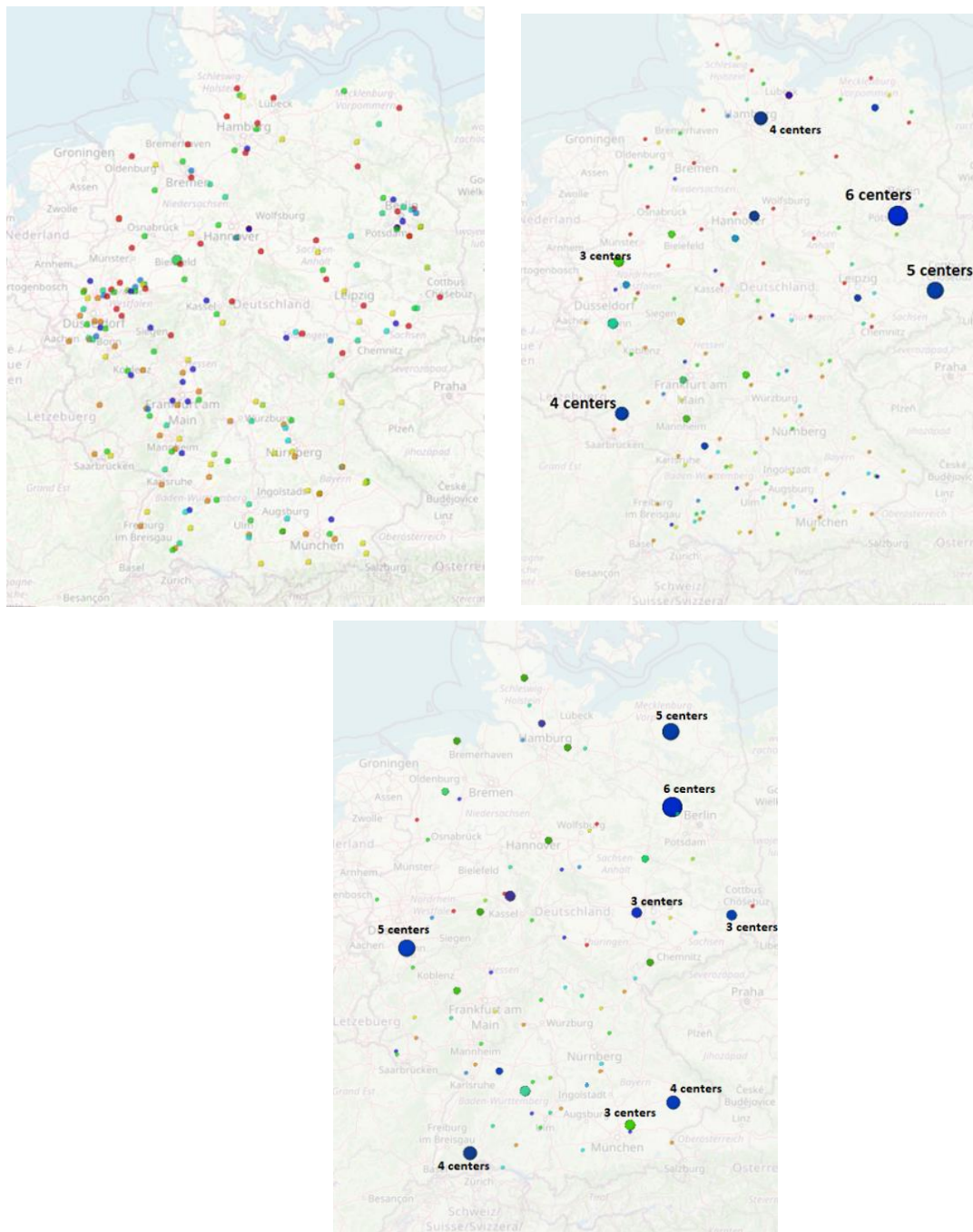
Auswertung der Standortverteilung der Lager

In einem Ist-Szenario, das hier lediglich der Standortvalidierung dient, unterhalten neun hier in Betracht gezogene LEH-Ketten zusammen 197 Standorte in Deutschland.

Im Basisszenario reduziert sich die Anzahl der Distributionszentren um etwa 15 Prozent im Vergleich zum Ist-Szenario. Nur noch 168 Lagerstandorte befinden sich im Untersuchungsgebiet. Ein wesentlicher Einflussfaktor für die Reduzierung der Gesamtanzahl der Depots im modellierten Basisszenario ist die zugrunde liegende Annahme der kapazitätsfreien Depots. Dieser Umstand ist insbesondere am Beispiel von großen Distributionsregionen, wie Berlin oder Nordrhein-Westfalen gut zu erkennen, wobei mehrere dicht aneinander liegende Lager mit wenigen, zentralen Lagerstandorten infolge der Optimierung ersetzt werden (siehe Abbildung 27).

Abbildung 27 zeigt die räumliche Verteilung der Lagerstandorte im Ist-Szenario, im modellierten Basisszenario sowie im Szenario Direktverkehre+ für die neun hier untersuchten LEH-Ketten auf.

Abbildung 27: Räumliche Verteilung der Distributionszentren am Beispiel einer ausgewählten Lebensmittel-einzelhandelskette.



Quelle: Eigene Darstellung, DLR (Darstellung eines Kartenausschnitts aus OSM). Anmerkung: Ist-Szenario (oben links) mit 197 Distributionszentren; Modelliertes Basisszenario (B) (oben rechts) mit 168 optimierten Lagerstandorten; Szenario Direktverkehre+ (unten mittig) mit 120 optimierten Lagerstandorten.

Die absolute Anzahl der Distributionszentren sinkt bis auf 120 Lager im gesamten System, wenn im Szenario Direktverkehre+ nur noch fahrerlose Lkw eingesetzt werden (siehe Abbildung 27). Dieser Rückgang ist darauf zurückzuführen, dass in diesem Szenario verstärkt auf die schweren Lkw mit zGG von 40t zurückgegriffen wird. Hierbei lässt sich auch feststellen, dass die Distributionszentren im vollautomatisierten Szenario an die Peripherie der Kundenregionen installiert werden, da dort die Mietpreise pro m² am günstigsten sind. Es wird erwartet, dass in diesem Szenario die LieferantInnen auf die schweren Lkw von 40 t zGG zurückgreifen, wodurch die

Skaleneffekte verstärkt eintreten. Außerdem lässt die Reduzierung der Lagerstandorte sich damit begründen, dass die Lenkzeiten der FahrerInnen nicht mehr berücksichtigt werden müssen. Damit ist die Einsatzzeit der automatisierten Lkw nur noch durch ihre Kapazität begrenzt, jedoch nicht mehr durch die maximale Lenkzeit.

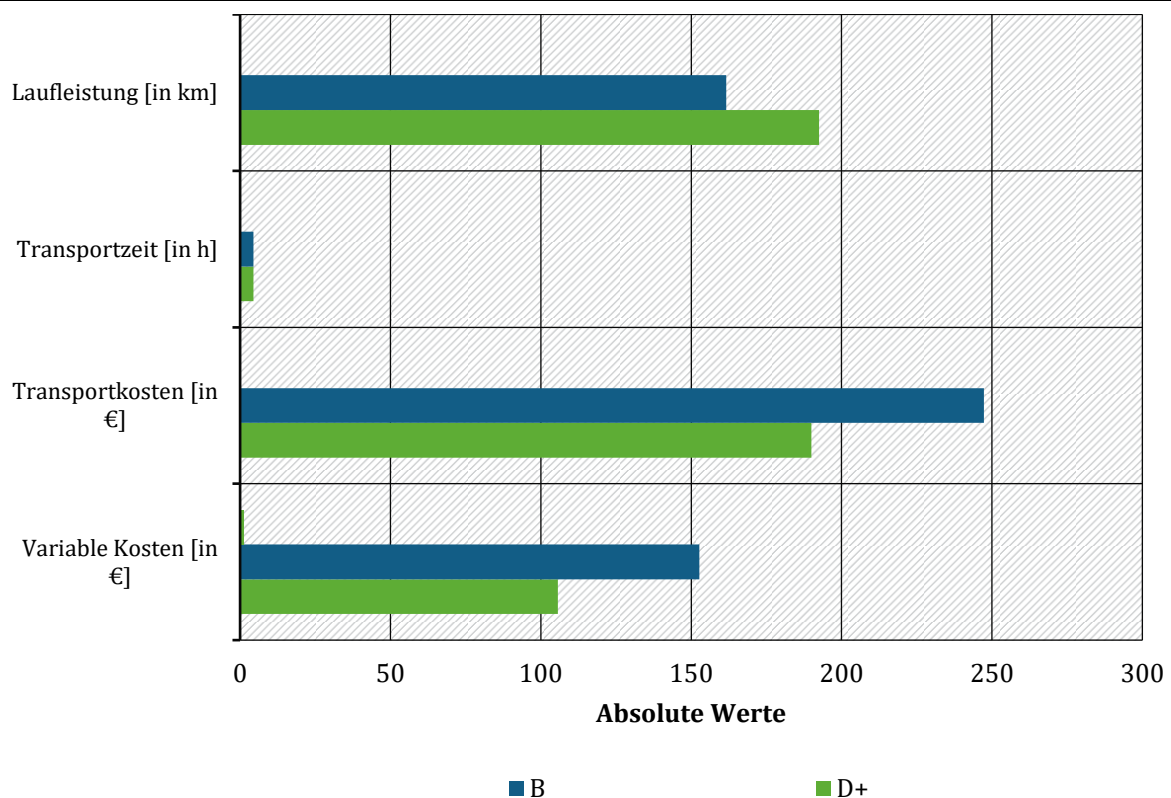
Abbildung 27 ist zu entnehmen, dass das LRP-Framework mit einer relativ guten Übereinstimmung die Standorte in Einzugsgebieten mit hoher Kundendichte, wie Hamburg, oder Sachsen-Anhalt, finden konnte. Allerdings kann das Framework die Abdeckung des tatsächlichen Transportnetzwerkes nur begrenzt abbilden. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass während der Optimierung der modellierten Szenarien die Lagerstandorte räumlich uneingeschränkt neu verteilt worden sind. Dies führte unter anderem zu der räumlichen Interpolation, wobei fehlende, nicht im Originaldatensatz enthaltene Distributionsstandorte in Distributionsregionen, meistens auf Kosten der anderen Distributionscluster, ersetzt worden waren. Folglich werden neue Standorte räumlich ausgewogener im Gesamtsystem verteilt, was zu einer Reduzierung der mittleren Distanzen von KundInnen zu Depots führt. Zu erwähnen ist auch, dass die maximal mögliche Anzahl der Standorte im Laufe der Simulation ebenso mit der maximalen, im Ist-Zustand vorhandenen Standortanzahl limitiert wurde, damit die Lösungsgüte des Algorithmus nicht durch das „Over Fitting“ leidet. Abschließend lässt sich somit festhalten, dass die hier entwickelte LRP-Heuristik zwar die optimalen geografischen Lagen für viele LEH-Ketten im neuen, durch Automatisierung geprägten Szenario findet, die Abbildung der tatsächlichen Netzwerkstrukturen ist jedoch meistens einer Vielzahl anderer wirtschaftlicher, sozialer und geografischer Einflussfaktoren unterworfen.

Auswertung der verkehrlichen Wirkungen

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse zu den verkehrlichen Effekten im Detail aufgezeigt und diskutiert.

An einem typischen Tag in Deutschland werden von den neun hier ausgewählten Lebensmittel Einzelhandelsketten im Basisszenario (B) 10.601 Touren zur Belieferung der Filialen mit Frisch- und Trockenwaren durchgeführt. Für die traditionellen Lkw (<7.5 t zGG, 18 t zGG, 26 t zGG und 40 t zGG) legen die Fahrer im Durchschnitt etwa 161 km pro Tour zurück und verbrauchen etwa 38 Liter Diesel pro Fahrt. Die Touren dauern im Durchschnitt für alle Fahrzeuge im deutschen Transportnetz etwa 4 Stunden – hier die Gesamttransportzeit pro Tour. Die variablen Kosten pro Tour betragen für den Logistiker in dem Basisszenario etwa 152 Euro pro Fahrt. Die Gesamttransportkosten liegen bei ca. 250 Euro pro Fahrt (siehe Abbildung 28).

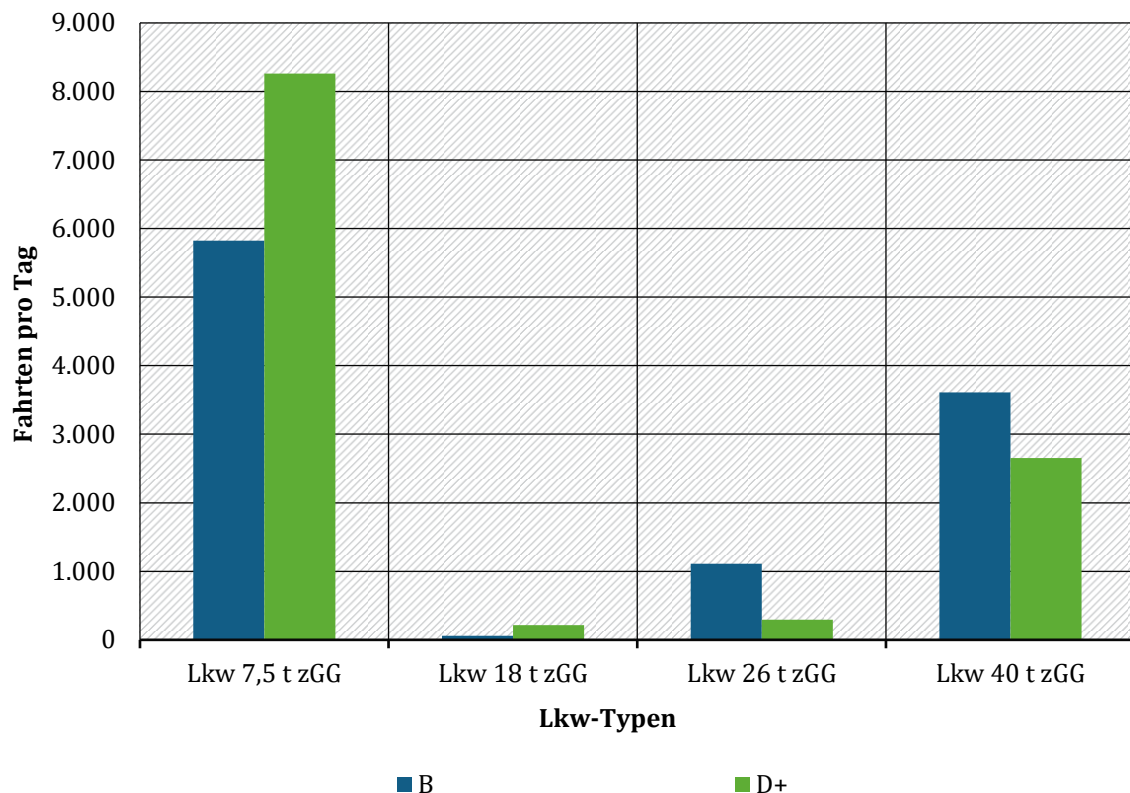
Abbildung 28: Vergleich der Tourencharakteristika zwischen Szenario D+ mit B



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Wird nun der Einfluss der automatisierten Fahrzeuge im Netzwerk des Szenario D+ analysiert (siehe Abbildung 28), so lässt sich feststellen, dass die Laufleistung pro Tour um über 19 % zunimmt. Die Transportzeit ändert sich im Durchschnitt nur marginal (-0,34%). Die Restriktion für die Tourdauer ist hierbei die Fahrzeugkapazität. Im Gegensatz dazu reduzieren sich im Szenario D+ die variablen Kosten (-30,8%) und die gesamten Transportkosten (-23,2%). Dies ist direkt auf den Wegfall der FahrerIn und damit der Personalkosten durch die Automatisierung zurückzuführen. Die um fast 30% verminderte Anzahl der Depots im Netzwerk des Szenarios D+ führen zu den längeren Touren der vollautomatisierten Lkw. Dies liegt wiederum daran, dass keine Restriktionen hinsichtlich der Einsatzzeit für die Fahrzeuge mehr eintreten, da keine FahrerIn mehr erforderlich ist.

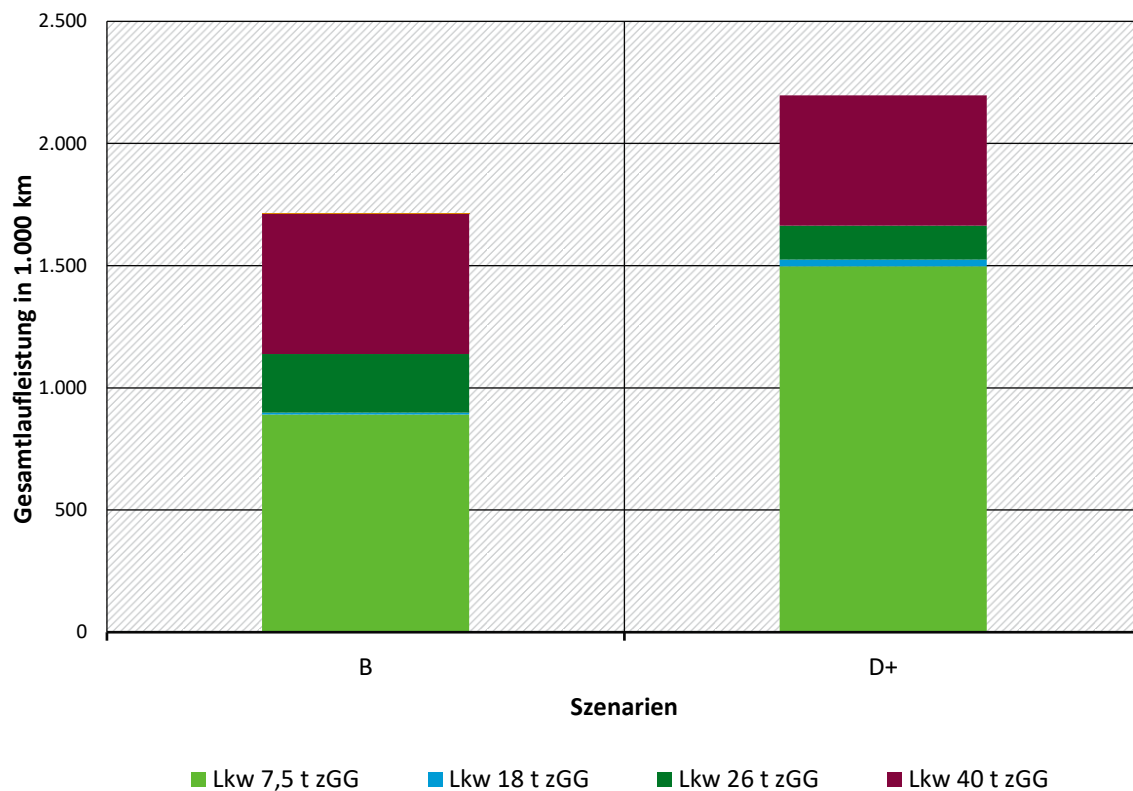
Abbildung 29: Vergleich der Simulationsergebnisse zum Fahrtenaufkommen



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

In Abbildung 29 wird das Fahrtenaufkommen differenziert nach den jeweiligen Lkw-Typen und den betrachteten Szenarien an einem Werktag in Deutschland aufgezeigt. Hierbei fällt auf, dass im Szenario Direktverkehre+ eine Verlagerung der Transporte in Richtung leichte Lkw (bis 20 t zGG) stattfindet. Wie angenommen, greifen im Szenario D+ die LogistikerInnen verstärkt auf die Lkw 7,5 t zGG zurück. Obwohl in D+ alle Lkw-Typen vollautomatisiert sind und die Lagerstandorte in diesem Szenario in meisten Fällen außerhalb der KundInnencluster liegen, werden annähernd 42% mehr Fahrten mit Lkw 7,5 t zGG im Vergleich zu B durchgeführt. Die Fahrten mit Lkw mit 18 t zGG haben in B bereits einen sehr geringen Anteil von 0,57% an den Gesamtfahrten. Diese nehmen jedoch in D+ um über 253% im Vergleich zu B zu. Dennoch haben sie in D+ immer noch einen sehr geringen Anteil von 1,9% der Gesamtfahrten. Im Gegensatz zum steigenden Fahrtenaufkommen der Lkw bis 20 t zGG nehmen die Fahrten mit Lkw > 20t zGG im Szenario D+ stark ab. Bei den Lkw 26 t zGG reduziert sich die Anzahl der durchgeführten Fahrten um 73,8% und bei den Lkw 40 t zGG um 26,5%. In der Summe zeigt das Szenario B einen Anteil von 10,5% an Lkw mit 26 t zGG und 34% der Lkw 40 t zGG am Gesamtfahrtenaufkommen auf. Dagegen werden in der Summe nur noch 2,6% der Fahrten im Szenario D+ durch Lkw mit 26 t zGG und 23,2% der Fahrten mit Lkw 40 t zGG durchgeführt. Die verstärkte Nutzung von leichteren Lkw, wie am Beispiel von Lkw mit 7,5 t zGG zu sehen ist, impliziert zugleich, dass die Fahrten in diesem vollautomatisierten Szenario flexibler und mit einer höheren Frequenz durchgeführt werden.

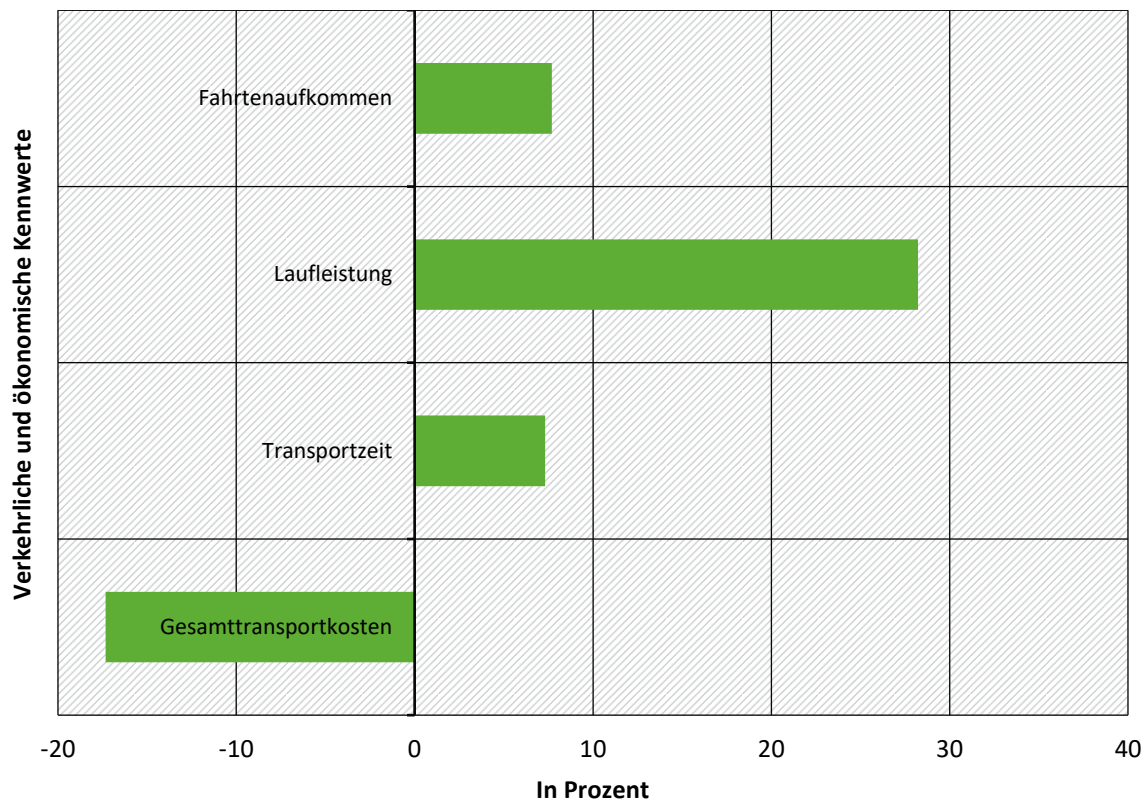
Abbildung 30: Vergleich der Simulationsergebnisse zur Gesamtleistung



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

In Abbildung 30 wird der Vergleich der Szenarien hinsichtlich der gesamten Laufleistung aufgezeigt. Dabei werden in D+ aufgrund der Automatisierungsvorteile in Form von entfallenden Personalkosten rund 68 % (ca. 1,5 Mio. km) der Laufleistung mittels automatisierter Lkw 7,5 t zGG zurückgelegt. Dies entspricht einem Wachstum von über 68% im Vergleich zum Basisszenario, in dem diese leichten Lkw einen Anteil von 52% von insgesamt 1,7 Mio. km einnehmen. Auch in Bezug auf die Laufleistung spielen die Lkw 18 t zGG – wie bereits beim Fahrtenaufkommen – eher eine untergeordnete Rolle. Die Laufleistung mittels Lkw 26 t zGG reduziert sich um 42% und mittels Lkw 40 t zGG um 7,4% im vollautomatisierten Szenario D+ im Vergleich zum Basisszenario, was auch im Einklang mit den Ergebnissen aus den Fahrtenaufkommen (siehe Abbildung 29) steht. In der Summe lässt sich festhalten, dass die gesamte zurückgelegte Distanz im Szenario Direktverkehre+ mit annähernd 2,2 Mio. km (+28%) höher als im Szenario B ist. Dieses Ergebnis lässt sich sowohl direkt auf die Verlagerungseffekte als auch auf die Anzahl und Lage der Standorte von Distributionszentren zurückführen. Im Szenario D+ beträgt sie nämlich 120 Standorte im gesamten Transportsystem.

Abbildung 31: Prozentuale Abweichung verschiedener verkehrlicher und ökonomischer Kennwerte zwischen den Szenarien B und D+



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

In Abbildung 31 wird die prozentuale Abweichung zwischen B und D+ der betrachteten verkehrlichen und ökonomischen Kennwerte aufgezeigt.

Szenario Direktverkehre+ beschreibt die Welt, in der sich sowohl die schweren fahrerlosen Fahrzeuge (Lkw > 20 t zGG) als auch leichtere Fahrzeuge (Lkw bis zu 20 t zGG) in dem Lebensmittel Einzelhandel durchgesetzt haben. Als Folge davon hat sich das gesamte Logistiknetzwerk den neuen Umständen angepasst. Wie erwartet, ist dieses Szenario vor allem durch die stark gestiegene Laufleistung gekennzeichnet, die im Vergleich zum Basisszenario im gesamten Logistiknetzwerk um etwa 28,2% steigt. Weniger ausgeprägt wächst das Fahrtenaufkommen im Szenario D+ mit 7,7% an. Gleichzeitig nimmt die Gesamttransportzeit – über alle durchgeführten Touren – um 7,3% zu. Diese Einblicke deuten implizit darauf hin, dass die Fahrzeuge in D+ viel stärker beansprucht werden, da nur mit jeweils 7-8% mehr Transportzeit und Fahrten insgesamt annähernd 30% höhere Laufleistung erbracht wird.

Es zeigt sich auch, dass die Einführung der automatisierten Fahrzeug- und Umschlagtechnologien sowie die daraus resultierende angepasste Netzwerkstruktur zur Reduzierung der Transportkosten insgesamt führen. Trotz der stark gestiegenen Gesamtlauflistung fallen die variablen Kosten im Szenario D+ um rund 25% niedriger als im Szenario B aus. Dies liegt vornehmlich an der Einsparung von Personalkosten durch den Einsatz fahrerloser Lkw. Dies schlägt sich auf die Gesamttransportkosten mit einer Reduzierung von 17,3% im Vergleich zu B nieder, trotz der gesunkenen Anzahl der Distributionszentren im Gesamtsystem.

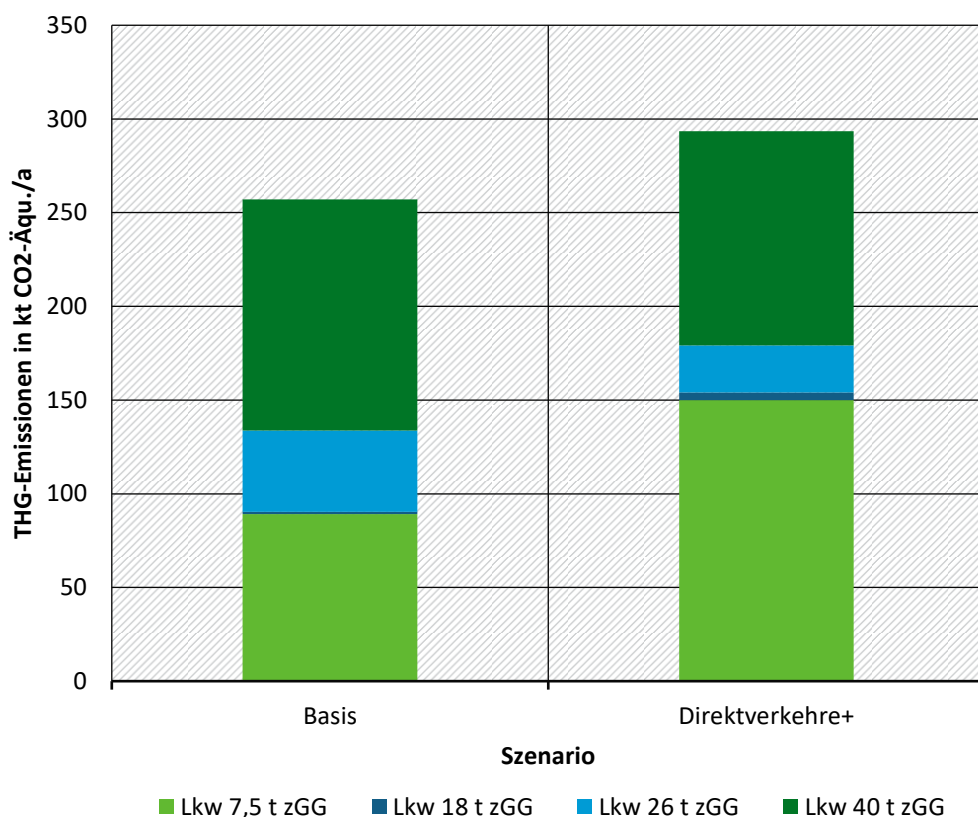
Auf Grundlage dieser Simulationsergebnisse lässt sich festhalten, dass ein hoher Automatisierungsgrad mit vollautonomen Fahrzeugen sich insgesamt profitabel für den

Transportlogistiksektor erweisen kann, wenn von einer ceterus-paribus Annahme ausgegangen wird, d.h. alle anderen wirtschaftlichen und sozialen Einflussgrößen wie Transformation des Immobilienmarktes, Technologieinvestitionen, Lohnkosten für LagermitarbeiterInnen etc. konstant bleiben.

2.2.4.3.6 Auswirkungen auf die THG-Emissionen

Abbildung 32 stellt die jährlichen THG-Emissionen des Basisszenarios und des Szenarios Direktverkehr+ dar. Aufgrund der höheren Fahrleistung sind die Emissionen im Szenario Direktverkehr+ um ca. 14% höher als im Basisszenario, bei welchem die Lebensmittetransporte jährlich etwas mehr als 250.000 Tonnen CO₂-Äquivalente verursachen. Damit ist die prozentuale Zunahme der Emissionen geringer als die der Fahrleistung, deren Zuwachs vor allem bei den Lkw mit 7,5 t zGG erfolgt, welche pro Kilometer einen geringeren Kraftstoffverbrauch als die größeren Fahrzeuge haben.

Abbildung 32: Vergleich der Simulationsergebnisse zu den Treibhausgasemissionen



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu. Anmerkung: THG-Emissionen inkl. Energiebereitstellung. Emissionsfaktoren basierend aus Flottenmittelwerten aus TREMOD 6.03 für das Jahr 2040

2.2.4.4 Modellierung der Loßgrößenwahl

Einen weiteren Aspekt der Automatisierung – und der damit verbundenen Kosteneinsparungen – stellt die Veränderung der Loßgrößen dar. Um die Wahl der Transportlosgröße modellseitig umsetzen zu können entwickeln Piendl et al. (2018) ein **Loßgrößenwahlmodell für den Straßengüterverkehr**. Dabei werden drei Klassen von Loßgrößen unterschieden: Ganzladungen, Teilladungen und Stückgüter. Im Modell ist unterstellt, dass Verlader ihre Gesamtlogistikkosten bestehend aus Lager-, Bestell- und Transportkosten minimieren. Das Modell unterscheidet nachfrageseitig zwischen vier homogenen Gütersegmenten und zusätzlich die jährlichen Transportmengen zwischen einem Versender und einem Empfänger.

Der genaue Modellierungsansatz wird in Anhang A.7.7 im Detail erläutert.

Szenarienentwicklung

Ein Losgrößenmodell erklärt die gewählte Losgröße einer regelmäßigen Lieferbeziehung eines Versenders und Empfängers in Abhängigkeit von Transporttarifen, Eigenschaften der Transportrelation und Charakteristika der Verkehrsmittel. Leider sind die Einflüsse der Fixkosten der Transporttarife (Teil des Tarifs, der unabhängig von der Menge ist) nicht von anderen bestellfixen Kosten zu trennen, so dass die vier Szenarien Multimodalität, Multimodalität+, Direktverkehre und Direktverkehre+ nicht direkt umgesetzt werden können. Wir analysieren Effekte auf die Losgröße daher ausschließlich auf hoher Abstraktionsebene.

Szenario 1 (Multimodalität und Multimodalität +)

Das erste Szenario beschreibt für das Jahr 2030 die Einführung von Platoons im Hauptlauf auf Autobahnen zwischen mono- oder multimodalen Umschlagknoten. Durch Platooning sinken die variablen Transportkosten pro km, da sich die Kraftstoffverbräuche und damit auch die Kraftstoffkosten pro km der Lkw reduzieren. Die Vorteile von Kostenersparnissen durch Skaleneffekte bei größerer Losgröße sinken. Während die Ganzladungsverkehre hierdurch einen ihrer Vorteile einbüßen, profitieren möglicherweise Teilladungs- und Stückgutverkehre. Die automatisierten Lkw werden zunächst mit Lkw-FahrerInnen zur Überwachung eingesetzt. Die FahrerInnen hat hierbei durch technische Voraussetzungen die Möglichkeit, manuell einzugreifen. Erst im Jahr 2040 werden auch fahrerlose Fahrzeuge eingesetzt. Dann sinken sämtliche Kosten des Lkw – sowohl die Fixkosten im Transporttarif als auch die mengen- und distanzvariablen Tarifbestandteile. Beim Wegfall des Fahrpersonals profitieren die kleinen Losgrößen relativ gesehen am meisten. Wenn zusätzlich an den Umschlagknoten des Platoonings automatisierte Technologien für die Be- und Entladung eingesetzt werden, sinken die Fixkosten vor allem für die Stückgut- und Teilladungsverkehre, da für diese eine erhöhte Anzahl an Umschlägen charakteristisch ist.

Szenario 2 (Direktverkehre und Direktverkehre +)

In Übereinstimmung mit der Formulierung dieses Szenarios ergibt der Wegfall der FahrerInnen Einsparungen bei allen Komponenten eines Transporttarifes, wobei kleine Fahrzeuge relativ mehr davon profitieren als große Fahrzeuge. Aufgrund der Formulierung des Losgrößenmodells und unter Berücksichtigung üblicher Fahrzeugeinsatzmuster werden Bandbreiten formuliert, in denen sich die Fixkosten in der Tarifstruktur ändern könnten:

1. 5% für mittlere Losgrößen und 10% für kleine Losgrößen im Vergleich zu großen Losgrößen,
2. 10% für mittlere Losgrößen und 30% für kleine Losgrößen im Vergleich zu großen Losgrößen und
3. 20% für mittlere Losgrößen und 50% für kleine Losgrößen im Vergleich zu großen Losgrößen.

Selbst starke Reduzierungen von relativen Fixkostenänderungen um 20%-50% sind plausibel.

Auswertung der Ergebnisse

Wir fokussieren uns bei der Modellierung der Szenarien auf Transporte mit einer Distanz von mehr als 150 km. Die Sensitivitäten des Losgrößenwahlmodells für die verschiedenen Szenarien werden in Tabelle 16 aufgezeigt. Die geschätzten Marktanteile sind nach dem jeweiligen Automatisierungsszenario differenziert und werden für jede Losgrößenkategorie dargelegt. Eine spaltenweise Betrachtung der Tabelle erlaubt zudem die segmentspezifische Analyse. Dargestellt sind die mittleren Individualwahrscheinlichkeiten für die Wahl der unterschiedlichen

Losgrößenkategorien. Die Segmente werden in der folgenden Tabelle mit S abgekürzt und fortlaufend nummeriert. Es handelt sich um die Segmente 1: Zeitkritische Güter, Segment 2: Spezielles, Segment 3: (Temperaturgeführte) Lebensmittel sowie Segment 4: Zeitunkritische Güter, inkl. Schüttgut.

Tabelle 16: Sensitivitäten der Szenarien für die Loßgrößenwahlmodellierung

	Fixkosten		S1	S2	S3	S4	Insgesamt
Anzahl Fälle			149	83	32	167	431
Status quo		$P(q1)$	0.21	0.17	0.38	0.19	0.21
Status quo		$P(q2)$	0.36	0.31	0.29	0.30	0.32
Status quo		$P(q3)$	0.43	0.52	0.33	0.51	0.47
Geringe Reduzierung	-10 %	$P(q1)$	0.23	0.18	0.40	0.20	0.22
Geringe Reduzierung	-5 %	$P(q2)$	0.35	0.31	0.28	0.29	0.32
Geringe Reduzierung		$P(q3)$	0.42	0.51	0.32	0.51	0.46
Mittlere Reduzierung	-30%	$P(q1)$	0.26	0.21	0.44	0.23	0.25
Mittlere Reduzierung	-10%	$P(q2)$	0.34	0.30	0.25	0.28	0.30
Mittlere Reduzierung		$P(q3)$	0.40	0.49	0.31	0.49	0.45
Starke Reduzierung	-50%	$P(q1)$	0.31	0.25	0.50	0.26	0.29
Starke Reduzierung	-20%	$P(q2)$	0.32	0.28	0.23	0.27	0.29
Starke Reduzierung		$P(q3)$	0.37	0.47	0.28	0.47	0.42

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Wenn sich die Kostenstrukturen verändern, sind Veränderungen in den Marktanteilen der drei verschiedenen Verkehre Stückgut, Teilladung und Ganzladung zu erwarten. Unter der Annahme, dass die betrachteten Transporte repräsentativ sind, ergibt sich für die Stückgutverkehre ein maximaler Zugewinn von bis zu 8% bei den Verkehren über 150 km (*Starke Reduzierung*). Die segmentspezifische Analyse zeigt einen maximalen Zugewinn von bis zu 12% (Segment 3, *Starke Reduzierung*). Für die Teilladungsverkehre lassen sich auch bei Kosteneinsparungen keine Zugewinne erwarten, da sie aufgrund der höheren Kosteneinsparungen bei den Stückgutverkehren gegenüber diesen mehr verlieren, als sie gegenüber den Gesamtladungsverkehren gewinnen. Die Ganzladungsverkehre verlieren im Szenario *Starke Reduzierung* bis zu 5% Marktanteil. Die segmentspezifische Analyse zeigt, dass der Verlust sogar auf 6% für Produkte aus Segment 1 steigen kann. Die Veränderungen sind insgesamt plausibel.

Die Ergebnisse aus den Szenarien *Geringe Reduzierung* und *Mittlere Reduzierung* zeigen geringere Effekte aufgrund der geringeren Kostenersparnisse.

Ein Vergleich zwischen den Segmenten zeigt, dass die reduzierten Fixkosten für Stückgutverkehre und Teilladungsverkehre den höchsten Effekt auf den Segmenten der Klasse 3 haben. Dies sind (temperaturgeführte) Lebensmittel.

Der Zusammenhang zwischen den Szenarien Multimodalität, Multimodalität+, Direktverkehre und Direktverkehre+ mit dieser Analyse ist auf hoher Abstraktionsebene gegeben. Detailliertere (und gegenläufige) Effekte auf die Kostenersparnisse bei den Losgrößen können derzeit nicht abgebildet werden.

2.3 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen zum autonomen und vernetzten Fahren im Straßenverkehr

2.3.1 Einordnung der Effekte für die nationalen Klimaschutzziele

Der Verkehr trägt laut Umweltbundesamt im Jahr 2020 mit 146 Mt CO₂-Äqu. etwa 20% zu den Treibhausgasemissionen Deutschlands bei, wobei die Emissionen u.a. durch die Folgen der COVID-19-Pandemie gegenüber dem Vorjahr um 11,4% gesunken sind. Bis zum Jahr 2019 konnten die THG-Emissionen gegenüber dem Jahr 1990 jedoch kaum reduziert werden. Im Rahmen des novellierten Klimaschutzgesetzes der Bundesregierung (KSG) (2021) steht der Verkehrssektor vor der Aufgabe, seine Treibhausgase bis zum Jahr 2030 auf 85 Mt CO₂-Äqu. zu reduzieren. Untersuchungen von (Harthan et al. 2020) zufolge werden die bisher beschlossenen Maßnahmen des Klimaschutzprogramms nicht ausreichen, um das Klimaziel für 2030 einzuhalten. Bis zum Jahr 2040 sollen laut dem KSG über alle Sektoren die THG-Emissionen um 88% reduziert werden und bis 2045 THG-Neutralität erreicht werden. Es ist davon auszugehen, dass auch der Verkehr dann praktisch keine THG-Emissionen mehr ausstoßen darf.

Vor diesem Hintergrund soll in diesem Abschnitt diskutiert werden, welche Auswirkungen das automatisierte Fahren auf die Einhaltung der Klimaziele haben kann.

In Tabelle 17 werden daher die verschiedenen Effekte des automatisierten Fahrens und ihre Wirkungen auf die THG-Emissionen noch einmal zusammengefasst und hinsichtlich der möglichen Rahmenbedingungen bewertet. Dabei wurden die berechneten THG-Minderungen aus den Analysen dieser Studie zu einem „optimistischen“ und „pessimistischen“ Szenario gruppiert und die anteilige Änderung bezogen auf den Verkehr insgesamt berechnet. Die dargestellten Werte gelten jedoch nur für die Annahmen in dieser Studie und können bei anderen Rahmenbedingungen abweichende Erkenntnisse liefern. Dennoch lassen sich mit dieser Betrachtung mögliche Chancen und Risiken für die Treibhausgasemissionen durch einen automatisierten Straßenverkehr einordnen.

Tabelle 17: Potentielle Änderung der THG-Emissionen im Verkehrssektor durch die untersuchten Effekte des autonomen Fahrens für das Jahr 2040

Effekt	Pessimistisches Szenario	THG-Emission	Optimistisches Szenario	THG-Emission
Verkehrsnachfrage	Zunahme bei Pkw und Lkw	+22%	Rückgang bei Pkw Zunahme bei Lkw	-20%
Verkehrsverflüssigung	Weitgehend freeflow auf Bundesstraßen und Autobahnen; v < 130 km/h; Platooning Lkw	-3%	Freeflow auf allen Straßen v < 120 km/h	-7%
Stromverbrauch Infrastruktur	Zunahme Pkw-Fahrleistung; Umfassende Vernetzung	+3%	Reduktion Pkw-Fahrleistung;	+2%

Effekt	Pessimistisches Szenario	THG-Emission	Optimistisches Szenario	THG-Emission
			Minimalvernetzung	

Quelle: Eigene Darstellung, ifeu. Eigene Berechnung auf Basis der Szenarien Max1 und Max2a im Personenverkehr, Multimodalität+ im Güterverkehr, sowie weiteren Berechnungen in dieser Studie. Anmerkung: Die THG-Änderungen beziehen sich auf die Emissionen inkl. der Energiebereitstellung.

Die Änderung der Verkehrsnachfrage im Personenverkehr hat den größten Klimaeffekt. Die Vernetzung und Automatisierung ermöglicht im optimistischen Szenario, dass der motorisierte Personenverkehr vollständig mittels geteilter Mobilitätsangebote (ACS/ARS) durchgeführt werden kann. Hierbei sinken die THG-Emissionen des gesamten Verkehrs um 20%. Zur Erreichung dieser Verlagerung und Vermeidung des privaten Pkw-Besitzes wären zusätzlich zum Angebot einer automatisierten Flotte aber wahrscheinlich weitere regulatorische Maßnahmen notwendig. Eine Vollautomatisierung und Vernetzung ohne Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs auf geteilte Mobilitätsangebote könnte sonst auch zu erheblichem induziertem Verkehr und zur Schwächung des Umweltverbundes führen und damit die THG-Emissionen um 22% erhöhen.

Die Verkehrsverflüssigung bietet demgegenüber zwar theoretisch relevante Potentiale zur THG-Reduktion, diese können jedoch nur mit einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h auf Autobahnen und einer Verflüssigung auf Innerortstraßen voll ausgeschöpft werden. Inwiefern insbesondere die Potentiale auf Innerortstraßen tatsächlich umgesetzt werden, wurde in dieser Studie nicht untersucht. Auch dann bleibt das Potential mit 7% Reduktion jedoch deutlich hinter den ermittelten Effekten der Verkehrsnachfrage zurück. Bei der Betrachtung der Verflüssigungseffekte auf Bundesstraßen und Autobahnen in Verbindung mit einer Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h ist das THG-Vermeidungspotential mit 3% gering und wird durch den zusätzlichen Stromverbrauch der Automatisierungsinfrastruktur möglicherweise sogar kompensiert.

Im Folgenden werden die Effekte bezogen auf die absoluten Emissionen untersucht. Da die Einflüsse des automatisierten Fahrens für das Jahr 2040 bilanziert worden sind, aber für dieses Jahr kein eigenes Klimaziel für den Verkehr vorliegt, wird ein fiktiver Zielwert zwischen 20 MT und 30 MT angenommen⁴.

Tabelle 18 zeigt die THG-Emissionen des TREMOD-Trendszenarios, die sich in 2040 aus den Effekten der Automatisierungsszenarios des Personen- und Güterverkehrs jeweils im optimistischen und im pessimistischen Szenario ergeben⁵.

Tabelle 18: Rechenbeispiel zum Einfluss des autonomen Fahrens für die Einhaltung eines Klimazielpfades für das Jahr 2040 (Werte zu THG-Emissionen in Mt CO₂-Äqu.)

Szenario	Personenverkehr (PV)	Güterverkehr (GV)	Sonstige*	Verkehr insgesamt	Zielkorridor 2040 (ifeu-Annahme)
TREMOD-Trend	73	39	15	128	20-30
Optimistisch	47 (-36%)	36 (-9%)	15	98	

⁴ Der untere Wert entspräche etwa einer Reduktion der Verkehrsemissionen um 88% gegenüber 1990. Der obere Wert käme zustande, wenn die Reduktion von 2030 bis 2045 linear erfolgen dürfte.

⁵ Bei den Zahlen ist zu berücksichtigen, dass die nationale Treibhausgasberichterstattung auf dem im Inland getankten Kraftstoffmengen basiert und Emissionen aus der Energiebereitstellung und durch die Nutzung von Biokraftstoffen nicht dem Verkehr angerechnet werden. Die Daten wurden die Daten auf das TREMOD-Trendszenario bezogen und nur die relativen Änderungen der Automatisierungsszenarios übernommen.

Szenario	Personenverkehr (PV)	Güterverkehr (GV)	Sonstige*	Verkehr insgesamt	Zielkorridor 2040 (ifeu-Annahme)
Pessimistisch	94 (+29%)	41 (+3%)	15	150	

Quelle: Eigene Darstellung, ifeu. Definition der Szenarien: TREMOD-Trend (keine Automatisierung), optimistisch (PV: Szenario Max2a, GV: Szenario Multimodalität+, inkl. Effekt Verkehrsverflüssigung und Platooning Lkw), pessimistisch (PV: Szenario Max1, GV: Szenario Multimodalität+, ohne Effekt Verkehrsverflüssigung und Platooning Lkw). Werte für THG-Emissionen beziehen sich auf tank-to-wheel (exkl. Energiebereitstellung), Biokraftstoffe werden mit Nullemissionen berechnet. * unter „Sonstige“ fallen die THG-Emissionen der Verkehrsmittel, welche in den Automatisierungsszenarien nicht berücksichtigt worden sind, d.h. leichte Nutzfahrzeuge, Mopeds und Motorräder, übrige Kfz und der nationale Luftverkehr.

Mit keinem in dieser Studie berechneten Szenario würde jedoch der angenommene Zielwert für 2040 eingehalten. Hierbei wurden allerdings zahlreiche Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 noch nicht berücksichtigt. Dennoch macht diese Betrachtung zwei Faktoren deutlich:

1. Selbst für das optimistische Szenario, welches die aus ökologischen Gesichtspunkten optimalen Bedingungen für das autonome Fahren abbildet, wären umfassende weitere Klimaschutzmaßnahmen für den Verkehr notwendig. Das automatisierte Fahren würde jedoch einen bedeutenden Anteil zur Zielerreichung leisten.
2. Unter ökologisch unvorteilhaften Rahmenbedingungen, hier als pessimistisches Szenario bezeichnet, kann automatisiertes Fahren die Einhaltung der Klimaziele deutlich erschweren oder möglicherweise verhindern.

2.3.2 Mögliche Handlungsempfehlungen

Die Quantifizierung der ökologischen Effekte hat deutlich gezeigt, dass Automatisierung und Vernetzung nicht nur Chancen, sondern auch Risiken bergen. Unter unvorteilhaften Rahmenbedingungen wird automatisiertes Fahren im Personenverkehr zu zusätzlichen THG-Emissionen führen und damit den Weg zu einem emissionsneutralen Verkehr im Jahr 2050 deutlich erschweren. Selbst im Szenario 2a, bei dem in einer maximalen Ausprägung ökologisch orientierte Rahmenbedingungen für das automatisierte Fahren unterstellt sind, sind weitergehende Verkehrs- und Energiewendemaßnahmen notwendig, um die politisch definierten Ziele zur Reduktion der THG-Emissionen im Straßenverkehr zu erreichen. Das automatisierte Fahren könnte in diesem Szenario jedoch einen wichtigen Anteil zur Erreichung der Klimaziele leisten.

Insbesondere die Änderung der Verkehrsnachfrage im Personenverkehr hat den größten Einfluss auf die Klimabilanz, und daher sollte hierauf ein Fokus politischer Maßnahmen gelegt werden. Ziel sollte dabei sein, den momentan weitgehend motorisierten Individualverkehr zu geteilten Angeboten (ACS/ARS) sowie zum Öffentlichen Personenverkehr hin zu lenken. Letztere müssen vorrangig von den Möglichkeiten der Automatisierung und Vernetzung profitieren können, und dies sollte durch weitere Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung flankiert werden. Eine Vollautomatisierung und Vernetzung ohne Reduktion des privaten Pkw-Besitzes könnte dagegen in erheblichem Ausmaß zusätzlichen Verkehr induzieren und den Umweltverbund schwächen.

Zwar bietet eine Verkehrsverflüssigung durch Automatisierung und Vernetzung im Personenverkehr nur ein geringes Potential zur THG-Reduktion. Jedoch könnte eine Verkehrsverflüssigung in Kombination mit einer Reduktion der Durchschnittsgeschwindigkeit einen durchaus großen Effekt erreichen. Weitere Potentiale zur Emissionsreduktion durch Verkehrsverflüssigung bestehen, wenn auch auf Innerortstraßen der Verkehrsablauf durch automatisiertes Fahren verbessert wird.

Dabei muss jedoch immer berücksichtigt werden, dass die Automatisierung des Kfz-Verkehrs zusätzlichen Stromverbrauch durch Datenerhebung und -verarbeitung erzeugt. Diese Datenverarbeitung sollte möglichst energieeffizient umgesetzt werden, um zu vermeiden, dass die Vorteile durch den zusätzlichen Stromverbrauch der Automatisierungsinfrastruktur kompensiert werden.

Angesichts der noch vorhandenen Unsicherheiten sind weitere Forschungsarbeiten sinnvoll, um

- ▶ die fahrleistungsseitigen Auswirkungen des autonomen Fahrens unter Berücksichtigung von Rebound-Effekten zu den Auswirkungen der Verkehrsverflüssigung zu bestätigen.
- ▶ die Potentiale zur Verbesserung des Verkehrsablaufs auf Innerortstraßen abzuschätzen.
- ▶ weitere Auswirkungen des automatisierten Fahrens und möglicher Verkehrszunahmen auf urbane Räume unter dem Aspekt einer nachhaltigen Stadtentwicklung, aber auch unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen zu untersuchen.
- ▶ zu analysieren, welche Maßnahmen in welchem Ausmaß zu einer höheren Attraktivität automatisierter Car- und Ridesharing-Angebote sowie des Öffentlichen Personenverkehrs beitragen könnten.
- ▶ zu evaluieren, wie eine starke Zunahme der Verkehrsleistung des Öffentlichen Personenverkehrs durch eine Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs durch den Ausbau des Streckennetzes zu bewerkstelligen ist.
- ▶ spezifische Daten zur Fahrdynamik automatisierter und vernetzter Fahrzeuge zu erheben, da diese in der vorliegenden Studie analog zu den Fahrzyklen konventioneller Fahrzeuge (auf Basis des Handbuchs Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs) angenommen wurden.
- ▶ zu untersuchen, welchen Einfluss Marktkonstellationen und Preisregulierungen (z.B. Monopolgewinn, wohlfahrtsoptimaler Gewinn, subventionierter Gewinn etc.) auf die Unternehmen, die automatisierte ACS-/ARS-Services anbieten, hinsichtlich der Dienstleistungsgestaltung, der Tarife und somit auf die Nutzung solcher Angebote haben.

In Bezug auf die Effekte der Automatisierung und Vernetzung im Güterverkehr sollte erwähnt werden, dass der Fokus im Rahmen der Szenarien nur auf Stückgut- und Seehafenhinterlandverkehren sowie auf den Sektoren Handel und Industrie (B2B) lag und daher vornehmlich Stückgüter und der Kombinierte Verkehr (KV) berücksichtigt wurden. Explizit wurden Schüttgüter, Sauggüter und Flüssiggüter ausgeschlossen. Insofern hat die Studie die Auswirkungen des automatisierten Güterverkehrs nur teilweise abgeschätzt. Es zeigt sich, dass durch Platooning mit FahrerInnen on Board nur marginale Veränderungen auf die Verkehrsleistung auf der Straße und demzufolge auch keine Verlagerungseffekte festzustellen sind. Bei vollautomatisierten Fahrzeugen in Platoons und unter Einsatz von automatisierten Umschlagtechnologien im intermodalen Güterverkehr verlieren jedoch in den Szenarienberechnungen die Schiene ca. 13% und das Binnenschiff ca. 8% ihrer Verkehrsleistung. Im Gegenzug nimmt die Straße um knapp 4% an Verkehrsleistung zu. In der Summe über alle Verkehrsträger hinweg steigen die THG-Emissionen um 3% an. Werden jedoch noch die Wirkungen der Verkehrsverflüssigung berücksichtigt, zeigen sich im Güterverkehr deutlich positive Effekte, welche in Kombination eine Minderung der THG-Emissionen im Güterverkehr um fast 12% ergeben. Damit übersteigen in den betrachteten Szenarien die positiven Effekte des autonomen Fahrens im Straßengüterverkehr die negativen Effekte der gestiegenen Verkehrsnachfrage deutlich.

Unter Umweltgesichtspunkten wäre es sinnvoll, Wege zu finden, die verhindern, dass eine Verlagerung von der Schiene auf die Straße stattfindet. Dazu müssten neben Regulierungen zur Förderung der Schiene auch konkrete Maßnahmen zur Attraktivitätssteigerung der Schiene seitens der Verkehrspolitik implementiert werden, um die Verlagerung und die weitere Schwächung der Schiene zu verhindern (siehe UBA-Forschungsprojekt „Handlungsoptionen für eine ökologische Gestaltung der Langstreckenmobilität im Personen- und Güterverkehr, Forschungskennzahl 3717 58 102 0).

Um der Verlagerung von der Schiene auf die Straße entgegenzuwirken, ist zu empfehlen, das Schienengüterverkehrssystem umfassend zu digitalisieren und zu automatisieren (u.a. Kuppung, Buchung, Blockverdichtung, usw.). Zusätzlich könnte durch den Einsatz automatisierter Umschlagtechnologien ein schnellerer Umschlag erfolgen und demzufolge der Kombinierte Verkehr schneller und attraktiver werden.

Vertiefter Forschungsbedarf besteht dementsprechend in den folgenden Bereichen.

- ▶ Wirkungsabschätzung der Effekte der Digitalisierung und Automatisierung des Schienengüterverkehrssystems mittels ausgewählter Modellierungsansätze
- ▶ Untersuchung und Entwicklung von innovativer Umschlagtechnologien für den schnelleren Umschlag und deren Einbettung in Logistiksysteme und Geschäftsmodelle
- ▶ Weiterentwicklung der Fördermaßnahmen für den Kombinierten Verkehr

3 Modul B1: Ökologische Wirkungen des Online-Handels im Vergleich zum stationären Handel

Die Komponente B1 umfasst die Bilanzierung der ökologischen Wirkungen des Online-Handels gegenüber dem stationären Handel ausgehend von den verkehrlichen Wirkungen im Personen- und Güterverkehr.

Um die ökologischen Wirkungen des Online-Handels gegenüber dem stationären Handel erfassen zu können, wird zunächst der aktuelle Stand der Forschung zu diesem Thema aufbereitet. Hierfür werden Literaturanalysen in den Bereichen des Personenverkehrs und des Wirtschaftsverkehrs durchgeführt. Bei der Literaturanalyse steht im Personenverkehr das Einkaufsverhalten der VerbraucherInnen im Mittelpunkt. Im Wirtschaftsverkehr liegt der Fokus auf den durch den Online-Handel erzeugten Paketzustellungen, die durch Kurier-, Express- und Paket- (KEP-) Dienstleistungsunternehmen durchgeführt werden. Diese stellen hier die zentralen AkteurInnen dar.

Als zentrales Ergebnis der Literaturanalysen werden die wichtigsten Veränderungen im Personen- und Wirtschaftsverkehr herausgearbeitet, die mit dem zunehmenden Online-Handel einhergehen. Diese Veränderungen bilden die Grundlagen für die weiteren Arbeitsschritte, insbesondere für die Erstellung eines theoriebasierten Konzeptes zur Substituierbarkeit von Einkaufsverkehren durch Online-Handel und die Quantifizierung verkehrlicher Wirkungen von Logistik und Zustellungen.

Dementsprechend werden im Folgenden zunächst die zentralen Ergebnisse der Literaturanalysen im Personen- und im Wirtschaftsverkehr dargestellt. Danach erfolgt die multivariate Analyse von Einkaufsverkehren auf Basis von nationalen Verkehrsbefragungen. Im Anschluss daran erfolgt die Entwicklung eines theoriebasierten Konzepts zur Substituierbarkeit von Einkaufsverkehren durch den Online-Handel. Anschließend wird das Konzept für die Online-Befragung präsentiert. Die Befragung ist notwendig, um spezifische Lücken in den vorliegenden Datensätzen der nationalen Verkehrserhebungen schließen zu können. Auch die Online-Befragung basiert auf den Ergebnissen der Literaturanalysen und deckt alle relevanten Dimensionen des Online-Handels im Hinblick auf seine Auswirkungen auf den Personen- und Wirtschaftsverkehr ab. Basierend auf den Erkenntnissen der Online-Befragung wird ein empirisch basiertes Konzept zur Substituierbarkeit von Einkaufsverkehren durch den Online-Handel abgeleitet. Ferner werden ausgewählte deskriptive Auswertungen des Datensatzes präsentiert. Danach wird auf die Quantifizierung verkehrlicher Effekte von Logistik und Zustellverkehren eingegangen. In diesem Rahmen werden die Szenarien definiert, die herangezogenen Modelle vorgestellt und die Parametrisierung der Modelle gezeigt. Basierend darauf wird ein Berechnungsinstrument entwickelt, das zur Bilanzierung der verkehrlichen und ökologischen Effekte des physischen Einkaufsverkehrs im Vergleich zum KEP-Verkehr dient. Mittels dieses entwickelten Instruments werden Hochrechnungen für Deutschland durchgeführt. Dieses Instrument zeigt die verkehrlichen und ökologischen Effekte des physischen Einkaufsverkehrs, der Online-Bestellungen des B2C-Segments und des Lieferverkehrs in Deutschland auf. Abschließend werden die wesentlichen Erkenntnisse in einer Synthese zusammengefasst und Handlungsempfehlungen daraus abgeleitet.

3.1 Theoriebasierte Analyse

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Literaturanalyse im Personenverkehr dargestellt. Hierbei geht um die Wege, die die Personen selbst im Rahmen ihrer Einkäufe zurücklegen. Anschließend werden die wichtigsten Erkenntnisse aus der Literatur für den Bereich des Wirtschaftsverkehrs präsentiert. Die Ergebnisse der Literaturrecherche bilden die Grundlage für die

Erstellung eines theoriebasierten Konzeptes zur Substituierbarkeit von Einkaufsverkehren durch Online-Handel nach Einkaufsfällen.

3.1.1 Literaturanalyse im Personenverkehr als Grundlage für ein theoriebasiertes Konzept

Der Fokus der Literaturrecherche lag in erster Linie auf dem Einkaufsverhalten von Personen und den dabei zurückgelegten Wegen sowie der Veränderung dieser durch geändertes Kaufverhalten wie zum Beispiel dem Online-Shopping. Zudem wurden Studien hinsichtlich der Auswirkungen auf die Umwelt analysiert. Insbesondere wurde der aktuelle Stand der Forschung im Hinblick auf das Verhältnis und die Unterschiede zwischen stationärem Handel und Online-Handel und die wichtigsten Determinanten für positive oder negative ökologische Wirkungen aufbereitet.

Die zentralen Erkenntnisse der Literaturrecherche werden entlang von drei Unterpunkten subsumiert. Zunächst werden die generellen Unterschiede der Einkaufswege zwischen stationärem Handel und Online-Handel skizziert sowie die wichtigsten Entwicklungen der letzten Jahre bezüglich des Verhältnisses von stationärem Handel und Online-Handel aufgezeigt. Anschließend wird näher auf das KäuferInnenverhalten beim Online-Handel und dessen spezifische Implikationen für den Verkehr eingegangen. Schließlich werden spezifische Unterschiede zwischen einzelnen Warengruppen sowie deren Digitalisierungsgrad wiedergegeben, da diese einen entscheidenden Faktor im Hinblick auf die ökologischen Potentiale des Online-Handels darstellen.

Dabei wird auch auf die unterschiedlichen Energieverbräuche im stationären Handel und im Online-Handel eingegangen sowie auf deren Bedeutung für die Umweltbilanz.

Zu 1) Einkaufswege: Stationärer Handel und Online-Handel

Der Einkaufsverkehr bildet mit 32% der unternommenen Wege und 17% der zurückgelegten Distanzen einen wichtigen Bestandteil der Gesamtmobilität vieler Menschen und des Personenverkehrs in Deutschland insgesamt (BBSR 2011, S. 1). Zudem stellen die beim persönlichen Einkauf zu transportierenden Güter einen wichtigen Grund für den Besitz eines privaten Pkws dar (WiMobil 2016, S. 171, 175). Dementsprechend wurden im Jahr 2008 auch mit über 50% die meisten persönlichen Einkaufswege in Deutschland mit dem motorisierten Individualverkehr (MIV) zurückgelegt; entweder als FahrerIn oder als BeifahrerIn (BBSR, 2011 S. 20). Welches Verkehrsmittel für den Einkaufsweg gewählt wird, hängt dabei vor allem von der Haushaltsgröße, dem Alter, der Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln und den räumlichen Rahmenbedingungen des Wohnortes (z.B. Gemeindegröße und Wegelänge bis zum Geschäft) ab (ebd., S. 7). So wurden in Städten mit mehr als 500.000 EinwohnerInnen beispielsweise nur 47% der Einkaufswege im MIV bewältigt, während es in Gemeinden mit weniger als 20.000 EinwohnerInnen 72% waren (ebd., S. 23).

Ein immer größer werdender Teil der Einkäufe wird mittlerweile online getätigt. Im Jahr 2014 hat mit 50,2% ungefähr die Hälfte der BürgerInnen der Europäischen Union (EU) Güter im Internet erworben (Europäische Kommission 2015, S. 54). Die Anzahl der Personen, die Güter im Internet erwirbt, variiert allerdings erheblich zwischen den einzelnen Ländern der EU. Während in Schweden, Dänemark und dem Vereinigten Königreich von Großbritannien und Nordirland jeweils mindestens 75 % der EinwohnerInnen Güter im Internet erwarben, waren es in Italien, Bulgarien und Rumänien jeweils weniger als 25 % (ebd., S. 55). In Deutschland erwarb ein Anteil von 70 % der Personen Güter im Internet im Jahr 2014 (ebd.). Der Trend des zunehmenden Online-Handels könnte in der Zukunft zudem durch eine weitere Verbreitung von Shopping-Apps für Smartphones verstärkt werden, da diese zu zusätzlichen Produktkäufen beitragen können (Einav et al. 2014, S. 489).

In allen Ländern der EU ist dabei der Anteil der Personen, die Güter im Internet erwerben, von 2008 bis 2014 kontinuierlich gestiegen (Europäische Kommission 2015, S. 55). Gleichzeitig steigt auch der Anteil des Umsatzes, der über Online-Handel erzielt wird, am Umsatz des Einzelhandels insgesamt. In den Niederlanden ist dieser beispielsweise von 2,8% im Jahr 2005 auf 9-10% im Jahr 2011 gestiegen (Visser et al. 2014, S. 17). Auch in Deutschland stieg der Anteil des Online-Handels am Gesamtumsatz des Einzelhandels auf 8,5% im Jahr 2015.⁶

Die grundsätzliche Internetaffinität von Personen scheint dabei einen deutlich stärkeren Einfluss auf deren Neigung zum Online-Handel auszuüben, als die tatsächliche Distanz ihres Wohnortes zu stationären Geschäften und deren Erreichbarkeit mit verschiedenen Verkehrsmitteln. Denn obwohl die Erreichbarkeit von stationären Geschäften mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln in peripheren Gebieten und Gemeinden mit weniger als 20.000 EinwohnerInnen deutlich schlechter als in zentralen Gebieten und Gemeinden mit mehr als 20.000 EinwohnerInnen bewertet wird (BMVBS 2011, S. 10), kaufen Menschen in dicht besiedelten, urbanen Gegenden häufiger online ein als in ländlicheren Gebieten (Farag 2006, S. 73).

Festgehalten werden kann ebenso, dass mehr online erledigte Einkäufe von bestimmten Personen nicht zwangsweise mit weniger Einkaufswegen zu stationären Geschäften einhergehen. Hisselius et al. (2015) haben beispielsweise das Einkaufsverhalten von Online-KäuferInnen in Schweden untersucht und festgestellt, dass Personen, die mindestens einmal pro Monat Güter im Internet erwerben, genauso viele Wege zu stationären Geschäften erledigen wie Personen, die so gut wie nie im Internet einkaufen (ebd., S. 21). Dennoch haben sich auch Unterschiede zwischen den beiden Gruppen gezeigt. So erledigen Personen, die mindestens einmal pro Monat online einkaufen, einen deutlich geringeren Teil ihrer persönlichen Einkaufswegen mit dem Auto, als Personen, die nie oder so gut wie nie online einkaufen (ebd., S. 27). Selbst bei den Einkaufswegen, die beide Gruppen mit dem Auto erledigen, zeigen sich große Unterschiede. So legen Personen, die nie oder selten online einkaufen, für ihre Einkaufswegen, die sie mit dem Auto erledigen, fast doppelt so große Distanzen zurück, wie Personen die mindestens einmal pro Monat online einkaufen (ebd., S. 26).

Der zunehmende Online-Handel kann somit auf viele unterschiedliche Weisen das Verkehrsaufkommen insgesamt und die ökologischen Auswirkungen des Einkaufsverkehrs verändern. Ein hoher Bündelungsgrad vieler verschiedener Güter an unterschiedliche, aber relativ nah beieinander wohnende Adressaten könnte beispielsweise ein Faktor sein, der zu einer Verringerung des Verkehrsaufkommens führt. Gleichzeitig bietet das Internet allerdings die Möglichkeit, weltweit Güter zu bestellen. Dadurch könnten die bisher lokal gekauften Produkte auch durch Einkäufe bei Online-Handelsunternehmen mit Sitz in weit entfernten Ländern ersetzt werden. Dies führt zu entsprechend langen Lieferwegen. Tatsächlich gaben in einer Umfrage im Mai 2017 40% der befragten Online-KäuferInnen an, innerhalb der letzten 12 Monate bewusst Waren bei einem ausländischen Online-Handelsunternehmen bestellt zu haben (Ibi research 2017, S. 6). Dabei lag mit 35% der Standort der meisten ausländischen Online-Handelsunternehmen in China (ebd.).

Dies verdeutlicht, dass das konkrete Verhalten der KäuferInnen beim Online-Handel einen entscheidenden Faktor bezüglich möglicher Veränderungen des Einkaufsverkehrs darstellt.

Zu 2) KäuferInnenverhalten beim Online-Handel

Im Hinblick auf das KäuferInnenverhalten beim Online-Handel muss zunächst definiert werden, welches Verhalten genau betrachtet werden soll. So grenzen Franz & Gersch (2016)

⁶ Statistisches Bundesamt (2018): Binnenhandel, Gastgewerbe und Tourismus. Internetquelle: <https://www.destatis.de/DE/Zahlen-Fakten/Wirtschaftsbereiche/BinnenhandelGastgewerbeTourismus/Einzelhandel/Einzelhandel.html>, abgerufen am 18.06.2018

beispielsweise in ihrer Studie den Online-Handel vom Begriff des E-Commerce ab, indem sie unter Online-Handel ausschließlich die Transaktion von physischen Gütern verstehen, während E-Commerce auch Handel mit nicht-physischen Gütern wie Musik- oder Textdateien beinhaltet (ebd., S. 7). Ebenso muss der Online-Handel zwischen Unternehmen (B2B – Business to Business), zwischen Konsumenten (C2C – Consumer to Consumer) und zwischen Unternehmen und Konsumenten (B2C – Business to Consumer) differenziert betrachtet werden (ebd., S. 8).

Der vorliegende Literaturüberblick beruht auf einem breiten Verständnis des Online-Handels, das sowohl den Handel mit physischen wie nicht-physischen Gütern, als auch Transaktionen von Unternehmen zu KonsumentInnen sowie Transaktionen zwischen KonsumentInnen berücksichtigt. Lediglich Studien, die den Online-Handel zwischen Unternehmen untersuchen, werden von der folgenden Analyse ausgeschlossen.

Das KäuferInnenverhalten im Online-Handel hängt grundsätzlich davon ab, wie die einzelnen KäuferInnen sowohl stationäre als auch Online-Angebote nutzen, um sich über Produkte und Einzelhandelsunternehmen bzw. Geschäfte zu informieren und wo sie letztendlich ihren Einkauf tätigen. Dabei sind viele unterschiedliche Kombinationen aus stationär/online und Information/Einkauf denkbar, die in der Literatur zumeist unter dem Stichwort des „Multi-Channeling“ bzw. „Mono-Channeling“ behandelt werden.

Beim Mono-Channeling verwenden die KonsumentInnen nur einen Kanal. Dies bedeutet,

- dass sie sich nur online über ein Produkt informieren und dieses anschließend auch nur online kaufen oder
- Information und Einkauf finden beide lediglich in einem stationären Geschäft statt (Handelsverband Deutschland 2017, S. 23).

Beim Multi-Channeling hingegen nutzten die KonsumentInnen einen Kanal (stationär/online) zur Information und den jeweils anderen zum Kauf (ebd.). Schließlich werden Fälle, in denen die zur Verfügung stehenden stationären und Online-Kanäle desselben Handelsunternehmens übergreifend genutzt werden, unter dem Begriff des „Cross-Channeling“ subsumiert (ebd.). Aufgrund dessen versuchen viele Handelsunternehmen, ihre verschiedenen Kanäle möglichst gewinnbringend miteinander zu verzahnen („Channel Integration“) (Herhausen et al. 2015, S. 2).

Konkrete Untersuchungsergebnisse zum Thema „Multi-Channeling“ zeichnen allerdings kein ganz eindeutiges Bild des tatsächlichen KäuferInnenverhaltens. In einer Befragung von über 1.000 Online-KäuferInnen im Mai 2017 fand Ibi research beispielsweise heraus, dass 86 % der Befragten, die im stationären Geschäft nach verschiedenen Produkten recherchieren, diese dann auch im stationären Geschäft kaufen (Ibi research 2017, S. 6). Ebenso kauften 74 % der Befragten, die zunächst bestimmte Produkte bei Amazon recherchiert haben, die entsprechenden Produkte im Anschluss auch bei Amazon (ebd.). Diese Ergebnisse deuten somit eher auf ein weit verbreitetes „Mono-Channeling“ beim KäuferInnenverhalten hin. Bullinger (2013) fasst dahingegen viele Studien zusammen, die darauf hindeuten, das Multi-Channeling den Umsatz in stationären Geschäften deutlich erhöht, da online bestellte und im Geschäft getestete Waren oft mit zusätzlichen, spontanen Käufen bei der Abholung der Ware einhergehen (ebd., S. 39).

Diese Erkenntnisse deuten auf eine weitere wichtige Einflussgröße beim KäuferInnenverhalten, nämlich das sogenannte Erlebnishopping, hin. Dieses steht einer weiteren Zunahme des Online-Handels tendenziell eher entgegen, denn das Hauptmerkmal des Erlebnishoppings ist, dass Vergnügens- und Freizeitaspekte und nicht die reine Bedarfsdeckung mit lebensnotwendigen Gütern beim Einkaufen im Vordergrund stehen (Cao et al. 2010, S. 15). Aus diesem Grund wird in der Literatur oft angenommen, dass attraktive Innenstädte von Großstädten weniger von der

Verlagerung des stationären Handels in den Online-Handel betroffen sein werden, da bei Besuchen von attraktiven Innenstädten nach wie vor das Erlebnishopping im Vordergrund steht, welches der Online-Handel so nicht bietet (Hengst & Steinebach 2012, S. 516). Die Innenstädte von Mittel- und Kleinstädten werden demgegenüber jedoch sehr stark von der Verlagerung in den Online-Handel und den damit einhergehenden Schließungen von stationären Geschäften betroffen sein (Dannenberg et al. 2017, S. 4).

Dementsprechend gibt es aber auch Bestrebungen einer Veränderung der Innenstädte durch zunehmenden Online-Handel entgegen zu wirken. Dabei können hierfür beispielsweise lokale Online-Marktplätze genannt werden, die dem lokalen Fachhandel die Vernetzung von stationärem Geschäft und Vertrieb ermöglichen und, im Gegensatz zu überregionalen Online-Plattformen, gezielt ein regionales Publikum ansprechen sollen (Beckmann & Hangebruch 2016, S. 8, 9). Ein weiteres Mittel, um die KundInnen an das Einkaufen in stationären Geschäften zu binden, stellt die Emotionalisierung des Einkaufserlebnisses durch ansprechende Ladengestaltung, angenehme Lichtverhältnisse und Orientierungsfreundlichkeit dar (Haberkorn 2015, S. 16-18).

Ein weiterer wichtiger Aspekt beim KäuferInnenverhalten, insbesondere im Hinblick auf das Verkehrsaufkommen und die ökologischen Auswirkungen des Online-Handels, ist die Retour von online bestellten Produkten. Dabei geht es sowohl um die konkrete Ausgestaltung des Retourensystems der jeweiligen Online-Handelsunternehmen, als auch um die Häufigkeit der Inanspruchnahme dieses Systems durch die KäuferInnen (Breidenbach et al. 2005, S. 254, 255). Laut dem Bundesverband E-Commerce und Versandhandel e.V. (BEVH 2017) wurden in Deutschland in den Jahren von 2012 bis 2017 jeweils zwischen 13 und 26% der online bestellten Produkte wieder zurückgesendet (ebd., S. 8). Diese Angaben beruhen auf der Befragung von 63 Unternehmen des Online- und Versandhandels in Deutschland (ebd., S. 56). Ein bewusster Retouren-Missbrauch durch die KäuferInnen scheint hierbei ein eher geringes Problem darzustellen. So gaben in derselben Befragung nur 5% bzw. 7% der Unternehmen im Jahr 2013 bzw. 2017 an, hiermit Erfahrungen gemacht zu haben (ebd., S. 42).

Zu 3) Warengruppen, Digitalisierungsgrad und gebäudebezogene Energieverbräuche

Das Einkaufsverhalten beim Online-Handel unterscheidet sich stark nach verschiedenen Warengruppen und spezifischen Produkteigenschaften. Wie Tabelle 1 entnommen werden kann, wird in Deutschland vor allem in den Bereichen „Consumer Electronics/Elektro“, „Fashion & Accessoires“, „Freizeit und Hobby“ und „Büro & Schreibwaren“ mit jeweils über 20% ein bedeutender Anteil des Gesamtumsatzes des Einzelhandels über den Online-Handel erzielt. Am wenigsten ausgeprägt ist der Online-Handel im Lebensmittelbereich. Nur 1,7% des Gesamtumsatzes, den der deutsche Einzelhandel im Jahr 2016 über den Verkauf von Lebensmitteln einnehmen konnte, wurde über Online-Handel erwirtschaftet (Handelsverband Deutschland 2017, S. 10f.).

Tabelle 19: Anteile des Umsatzes im Online-Handel- am Gesamtumsatz des Einzelhandels in Deutschland

Warengruppe	Anteil des Online-Umsatzes 2015 am Gesamtumsatz (in %)	Anteil des Online-Umsatzes 2016 am Gesamtumsatz (in %)	Veränderungsrate des Online-Umsatzes insgesamt 2016 (in %)
Consumer Electronics/ Elektro	23,6	25,7	+9,0
Fashion & Accessoires	21,4	23,5	+11,3
Freizeit & Hobby	21,7	22,9	+6,9
Büro & Schreibwaren	22,5	22,8	Keine Angabe
Schmuck & Uhren	13,6	15,2	Keine Angabe
Gesundheit & Wellness	10,2	11,3	Keine Angabe
Wohnen & Einrichten	9,6	10,7	+13,0
Heimwerken & Garten	4,1	4,6	+14,6
FMCG (Lebensmittel inklusive Getränke)	1,5	1,7	+19,3

Quelle: Eigene Darstellung nach Handelsverband Deutschland (2017, S. 10f.)

Dabei gibt es unterschiedliche Gründe, die dazu führen, dass bestimmte Warengruppen von den KäuferInnen eher online bestellt werden als andere. Im Lebensmittelbereich entwickelt sich der Online-Handel u.a. vergleichsweise langsam, da die Verderblichkeit und die Notwendigkeit von durchgehenden Kühlketten die Kosten für die Zulieferung von Lebensmitteln in die Höhe treiben (de Kervenoael et al. 2015, S. 3, Morganti et al. 2014, S. 182). Insbesondere temperatur-, licht- und druckempfindliche Lebensmittel benötigen entsprechende Versandverpackungen, die gewährleisten, dass sie sicher und unverändert transportiert werden können. Zusätzliche zu berücksichtigende Schwierigkeiten sind die Gewährleistung eines Angebots an attraktiven Lieferzeiträumen (Morganti u. Gonzales-Feliu 2015, S. 120ff.) und die leichte Verständlichkeit der Internetseite (Linder u. Rennhak 2012, S. 3). Des Weiteren ist es schwierig, den KundInnen ein Einkaufserlebnis online zu vermitteln, da der Lebensmitteleinkauf ein sehr sensibles Erleben darstellt, das sich durch haptische und olfaktorische Aspekte auszeichnet (Bohg u. Leger 2013, S. 100).

Obwohl im Lebensmittelbereich somit bisher nur ein sehr geringer Anteil des Gesamtumsatzes durch Einkäufe im Internet erzielt wird, verzeichnet der Online-Handel in genau dieser Warengruppe seit einigen Jahren ein rasantes Wachstum und erfreut sich einer immer mehr wachsenden Beliebtheit (Krewinkel et al. 2011, S. 395). Als Gründe hierfür können u.a. die Unabhängigkeit von Öffnungszeiten, Komfort, keine Warteschlangen und die Einsparung von Fahrtkosten identifiziert werden (Krewinkel et al. 2011, S.396f.). KonsumentInnen bekommen die unkomplizierte Möglichkeit, ihren Bedarf an Lebensmitteln jederzeit, 24 Stunden am Tag, sieben Tage die Woche zu decken (Comans 2014, S.109). Dadurch werden besonders bestimmte

KundInnengruppen, wie „Silver Surfer“, Mütter, Väter und beruflich stark eingebundene sowie junge Personen angesprochen. Auch für Lebensmittelunternehmen ist der Online-Handel eine attraktive Vermarktungsform, da limitierende Faktoren des stationären Handels wie Ladenöffnungszeiten, ein begrenztes Platzangebot für die Präsentation von Waren oder der Ausschluss von verschiedenen KundInnengruppen aufgrund von Distanzen im E-Commerce nicht auftreten (Comans 2014, S.109).

Zudem wird der vergleichsweise hohe Umsatz des Online-Handels in bestimmten Warengruppen von der Digitalisierung ganzer Produktgruppen wie beispielsweise Fahrkarten, Konzert-Tickets, Bücher, Musik-CDs, Computerspiele, Software etc. begünstigt, wodurch in diesen Fällen eher die Digitalisierung als der Online-Handel einen Beitrag zur Einsparung von Verkehrsaufkommen leistet (eComTraf 2015, S. 7). Allerdings führt auch die Digitalisierung einer bestimmten Warengruppe nicht zwangsweise zu einer vollständigen Verlagerung des Einkaufs von stationären Geschäften zum Online-Handel. Bücher können beispielsweise relativ problemlos vollständig digitalisiert und als E-Books im Online-Handel angeboten werden. Dennoch gelang es dem Buchhandel, durch innovative Ladenkonzepte (z.B. Integration von Cafés in Buchläden) einen bedeutenden Teil ihrer KundInnen vom Online-Handel zurück in die stationären Geschäfte zu locken bzw. diese erst gar nicht an den Online-Handel zu verlieren. Dieses Konzept ist so erfolgreich, dass selbst ursprünglich reine Online-Versandhandelsunternehmen wie Amazon die Errichtung von stationären Buchhandlungen planen (BBSR 2017, S. 30).

Außerdem muss beachtet werden, dass sich Online-Handel oft mit anderen Formen des Einkaufs, die nicht in stationären Geschäften stattfinden, wie Bestellungen aus Katalogen oder auf Basis von Fernsehsendungen (Laghaei et al. 2015, Lee et al. 2015), vermischt. Hierbei hängt die Entscheidung für Online-Handel oder den Einkauf in einem stationären Geschäft oft von der spezifischen Intention des Einkaufes ab (Lim et al. 2016, S. 408). Bei einer Befragung von 232 InternetnutzerInnen in Griechenland haben Keisidou et al. (2011) beispielsweise herausgefunden, dass der Kauf von Büchern im Online-Handel vor allem von der Internetaffinität, der wahrgenommenen Sicherheit und der Wertschätzung des Produktes beeinflusst wird, während bei e-tickets nur die Wertschätzung des Produktes relevant ist (Keisidou et al. 2011, S. 39ff.). Eine Befragung von 1.000 KäuferInnen bei einem Online-Handelsunternehmen für Lebensmittel in den USA kam außerdem zu dem Ergebnis, dass Bequemlichkeit sowie Produkt- und Markenvielfalt wichtige Kriterien für Online-KäuferInnen darstellen (Rohm & Swaminathan 2004, S. 751ff.).

Schließlich fallen auch die potentiellen Auswirkungen des zunehmenden Online-Handels auf den Verkehr insgesamt je nach Warengruppe unterschiedlich aus, da für den Einkauf bestimmter Produkte in stationären Geschäften unterschiedliche Wegestrecken bewältigt werden müssen. So wurde in einer Studie in Österreich auf Basis einer Befragung von 1.002 KundInnen und Daten aus Mobilitätserhebungen berechnet, dass der durchschnittliche Online-Einkauf bei Lebensmitteln „nur“ 1,3 km an Wegestrecken pro Person einspart, hingegen der Online-Einkauf von Möbeln und Wohnaccessoires zu einer Reduzierung von über 16 km im Personenverkehr führt (eComTraf 2015, S. 7).

Selbst wenn die durch den Online-Handel zusätzlich anfallenden Zulieferwege zu den Personen nach Hause im Wirtschaftsverkehr mit den Einsparungen im Personenverkehr verrechnet werden, kommt es insgesamt zu einer Abnahme des Verkehrsaufkommens. Nach eComTraf (2015) sinkt die Verkehrsleistung der KundInnen um durchschnittlich 7,2 km, während die Verkehrsleistung der KEP-Dienstleistungsunternehmen nur um 1,2 km wächst (ebd., S. 7). Diese Ergebnisse hängen stark von den getroffenen Annahmen im Hinblick auf den Bündelungsgrad und die Anzahl der Stopps bei der Zulieferung ab, welche mit den wichtigsten KEP-Dienstleistungsunternehmen in Österreich entwickelt wurden (ebd, S. 38).

Bemerkenswert an der genannten Studie ist außerdem, dass trotz der berechneten Abnahme des Verkehrsaufkommens, dennoch eine Zunahme an Emissionen im Verkehrssystem insgesamt ermittelt wurde. Dies liegt vor allem daran, dass viele Lieferungen von Lkws mit hohem Emissionsausstoß getätigt werden (eComTraf 2015, S. 44f.). Die Auswirkungen des zunehmenden Online-Handels auf den gesamten Verkehr hängen demzufolge von der Entwicklung des zusätzlichen Wirtschaftsverkehrs ab, welche im folgenden Unterkapitel näher erläutert wird.

Im Hinblick auf die gebäudebezogenen Energieverbräuche und Umweltbilanzen der Geschäfte des stationären Handels bzw. der Verteilzentren und Lagerhallen des Online-Handels kommen unterschiedliche Studien zu verschiedenen und teils widersprüchlichen Ergebnissen. Mangiaracina et al. (2015) z.B. stellen auf Basis einer Literaturanalyse einerseits fest, dass die im Online-Handel gängigen größeren Lagerhäuser zu geringeren durchschnittlichen Energieverbräuchen führen. Andererseits führt aber eine höhere Anzahl an kleineren Bestellungen und Retouren im Online-Handel auch zu einem stärkeren Betrieb in den Lagerhäusern, was wiederum zu einem höheren Energieverbrauch im Vergleich zum stationären Handel beitragen kann (Mangiaracina et al. 2015, S. 13).

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Studien hängen dabei auch stark davon ab, welche Warengruppen betrachtet und welche Lagerstrukturen im Online-Handel und im stationären Handel angenommen werden. Feichtinger & Gronalt (2021) betonen, dass es bei im Internet gekaufter Kleidung viel höhere Rücksenderaten als bei online bestellten Büchern oder Lebensmitteln gibt, was zu mehr Betrieb und Energieverbrauch in den Lagerhallen führt. Zugleich stellen Lebensmittel aber generell einen Sonderfall dar, da ihre Lagerung und ihr Transport mitunter eine Kühlung erfordern kann, was sich auch sehr stark auf den Energieverbrauch auswirkt (Feichtinger & Gronalt 2021, S. 7).

Edwards et al. (2010) weisen zusätzlich darauf hin, dass es bei im Internet bestellten Lebensmitteln verschiedene Zustellwege mit unterschiedlichen Lagerstrukturen gibt. So können die Kunden die im Internet bestellten Lebensmittel entweder selbst in einem Supermarkt oder einer spezifischen Abholstation einsammeln oder auch von einem Mikro-Depot bzw. direkt von einer großen Lagerhalle nach Hause geliefert bekommen (Edwards et al. 2010, S. 105).

Van Loon et al. (2014, S. 6) vergleichen die gebäudebezogenen CO₂-Emissionen unterschiedlicher Warengruppen und kommen zu dem Schluss, dass die CO₂-Emissionen pro Produkt im Durchschnitt in den großen Lagerhäusern des Online-Handels deutlich niedriger sind und im Falle von Lebensmitteln sogar nur ca. halb so groß wie in stationären Supermärkten. Wyman (2021, S. 7) vergleicht die Umweltbilanzen verschiedener Warengruppen außer Lebensmitteln und kommt ebenfalls zu dem Ergebnis, dass im Durchschnitt die gebäudebezogenen CO₂-Emissionen im stationären Handel ca. 8-mal größer als im Online-Handel sind. Preston et al. (2020) wiederum betonen, dass die CO₂ Emissionen der sowohl beim Online-Handel als auch beim stationären Handel eingesetzten Lagerhallen in etwa vergleichbar sind. Den Unterschied machen allerdings die für die Endkunden zugänglichen Geschäfte des stationären Handels welche 4-mal mehr CO₂ Emissionen als die Lagerhallen verursachen (Preston et al. 2020, S. 4).

Den Eindruck, dass die meisten Studien beim Online-Handel niedrigere gebäudebezogene Energieverbräuche bzw. CO₂-Emissionen ausmachen, bestätigt eine von Pålsson et al. (2017) durchgeführte Literaturanalyse von elf Studien. Hiernach gibt die Mehrheit der Studien wieder, dass die gebäudebezogenen Energieverbräuche beim Online-Handel geringer als beim stationären Handel ausfallen, wenn auch nur in sehr geringem Ausmaß (Pålsson et al. 2017, S. 765). Eine Ausnahme der gängigen Studienlage stellt dahingegen eine Untersuchung von Dost & Maier (2017) dar. So kommen die Autoren auf Basis der Analyse von Zeitreihendaten von 1992-2015

in den USA zu dem Schluss, dass die gebäudebezogenen Energieverbräuche beim Online-Handel höher als beim stationären Handel sind (Dost & Maier 2017, S. 809).

Festzuhalten bleibt somit, dass die meisten Studien zu dem Ergebnis kommen, dass die gebäudebezogenen Energieverbräuche beim Online-Handel niedriger als beim stationären Handel sind. Die Ergebnisse der Untersuchungen hängen dabei sehr stark von den angenommenen Lagerstrukturen im Online-Handel und im stationären Handel ab.

3.1.2 Literaturanalyse zu Wirkungen von Logistik und Zustellverkehren

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Literaturrecherche zu den Wirkungen des Online-Handels auf die Logistik und den Zustellverkehr dargestellt. Im Fokus der Literaturanalyse stehen Studien, die verkehrliche Wirkungen durch den Online-Handel quantifizieren – vorrangig auf der Letzten Meile. Im Besonderen werden die drei Sonderfälle Same-Day-Delivery (SDD) inklusive Instant-Deliveries, Lebensmittellieferungen und Zustellungen zu Paketstationen untersucht. Die Ergebnisse der Literaturrecherche dienen als Datenbasis für die sich anschließende Modellierung der drei Fallbeispiele. Als Modellierungsgebiet soll das Stadtgebiet von Berlin verwendet werden, da hierfür dem DLR eine breite Datenbasis zur Verfügung steht.

Nachfolgend werden zu den drei Sonderfällen die Ergebnisse der Literaturanalyse präsentiert, die die Wirkungen der Digitalisierung auf den Zustellverkehr der Letzten Meile theoriebasiert ableitet. Basierend darauf wird das jeweilige Konzept zur Modellierung der drei Sonderfälle vorgestellt.

Zu 1) Same-Day-Delivery und Instant-Delivery

Die Kurier-, Express- und Paket- (KEP) Branche gehört zu den am schnellsten wachsenden Branchen der Weltwirtschaft. Das Kerngeschäft der KEP-Dienstleistungsunternehmen ist die Durchführungen von Haus-zu-Haus-Transporten und die Zustellung von Lieferungen am nächsten Tag oder zeitdefinierten Sendungen, einschließlich Dokumenten, Paketen und Handelswaren (Forecasting 2005, S. 5ff). Der Markt teilt sich auf in kleine, lokal agierende Kurierdienstleistungsunternehmen, die vielfach mit selbstständigen Fahrradkurieren zusammenarbeiten, bis hin zu internationalen Integratoren mit weltweiten Logistiknetzwerken. Zur Klärung der Begriffe, wie sie in dieser Studie verwendet werden, erfolgt im Folgenden eine kurze Begriffsdefinition.

Express- und Overnight-Delivery: DHL definiert Express-Lieferungen bzw. Overnight-Lieferungen als Zustellung, die am nächsten oder übernächsten Tag erfolgt (DHL 2018). Die großen Integratoren wie z.B. DHL, UPS, DPD, GLS und FedEx ermöglichten dies mit ihren effizienten weltweiten Logistiknetzwerken (siehe Hausmann et al. 2014).

Same-Day-Delivery (SDD): Zur Abgrenzung von Expresslieferungen wurde für Lieferungen, die noch am selben Tag der Bestellung zugestellt werden, der Begriff Same-Day-Delivery (SDD) eingeführt. Diese Dienstleistung ist nicht ganz neu: so wurden diese Dienstleistung meist durch Fahrradkuriere und Stadtboten schon in den 60er Jahre (sog. messenger service) angeboten. Dieser Service stellt eine Direktbelieferung mit Abholung bei der VersenderIn und Zustellung bei der EmpfängerIn innerhalb eines Tages dar. Mit der Übernahme dieser Dienstleistungen durch die internationalen Integratoren wurde eine begriffliche Abgrenzung zu Expresslieferungen notwendig.

Instant-Delivery: Eine weitere Verschärfung von SDD sind die Instant-Deliveries, also Sofort-Lieferungen, wie sie z.B. Amazon Prime Now ihren Abo-KundInnen anbietet. Das Unternehmen stellt in wenigen Metropolen ihrem KundInnenstamm Einkäufe binnen 60-90 Minuten nach Abschluss des Online-Einkaufs zu. Der Service ist auf wenige Tausend verschiedene Produkte beschränkt. Zur Realisierung dieser „Sofort“-Dienstleistung sind innerstädtische

Konsolidierungszentren bzw. Mikro-Depots, in denen die Produkte vorgehalten werden, notwendig. Als Mikro-Depots werden vornehmlich Lkw-Auflieger oder Wechselbrücken eingesetzt. Sie dienen den Logistikdienstleistungsunternehmen als Umschlagknoten bzw. Zwischenlager. Diese werden entweder im öffentlichen Raum oder auch auf privatwirtschaftlich genutzten Flächen in der Innenstadt aufgestellt. Zur Aufstellung der Mikro-Depots auf privatwirtschaftlichen und öffentlichen Flächen müssen diese zuvor von den Logistikdienstleistungsunternehmen angemietet werden.

Die entsprechenden Lieferdauern der unterschiedlichen Belieferungskonzepte werden in Tabelle 20 im Überblick dargestellt.

Tabelle 20: Zeitliche Komponente unterschiedlicher Belieferungskonzepte

Express/Overnight	SDD	Instant
1-2 Tage	Selber Tag	60 min – 3 h

Quelle: Eigene Darstellung

Organisation Charakteristisch für taggleiche Lieferungen bei Online-Einkäufen ist die Zustellung in einem von den KonsumentInnen ausgesuchten Zeitfenster. Die Lieferung ist vornehmlich auf den urbanen Raum beschränkt (Voccia et al. 2017, S.1ff). Jede auszuliefernde Sendung ist durch ihre Herkunft, den Bestimmungsort und einen festgelegten Liefertermin beziehungsweise Lieferzeitpunkt gekennzeichnet. Dafür erfolgt die Organisation üblicherweise über sogenannte Hub-and-Spoke-Delivery-Netzwerke. Es kommen aber auch Point-to-Point-Systeme zur Anwendung (Ducret 2014, S.15). Für eine erfolgreiche Umsetzung werden verschiedene Entscheidungen hinsichtlich der Anzahl an Hubs, ihrer Standorte sowie Ausrichtungen des Kerngeschäfts des jeweiligen Dienstleistungsunternehmens verlangt (Cupic u. Teodorovic 2013, S. 701ff). Zustellungen werden nach vier verschiedenen Planungsaktivitäten (strategischer und taktischer sowie Markt- und Kontingenplanung) durchgeführt (Barnhart et al. 2002, S. 243ff).

Konsequenzen Die KEP-Dienstleistungsunternehmen haben mit verschiedenen Problematiken hinsichtlich ihrer angebotenen Services umzugehen: Staus, Baustellen, Umleitungen, Halteverbote oder Störungen am Fahrzeug nicht hundertprozentig für die Dienstleistungsunternehmen planbar (Ferrucci u. Bock 2014, S.1ff). Zudem herrscht ein extremer Zeit- und Kostendruck in der Branche. Der Zeitdruck bewirkt, dass Zustellungsfahrzeuge, ohne die Transportkapazität des Fahrzeugs ausnutzen zu können, zu den KundInnen fahren, was wiederum hinsichtlich der Ökonomie und der Ökologie zu Ineffizienzen führt. Außerdem entstehen ineffiziente Routenführungen und hohe operative sowie personelle Kosten. SDD ist für die ausführenden Logistikunternehmen ein komplexer und teurer Service (Voccia et al. 2017, S.1ff). Des Weiteren gestalten sich die Fahrzeugflotten der Dienstleistungsunternehmen meist heterogen hinsichtlich der Transportkapazität, Reisezeit, Routen- und abhängigen Reisekosten sowie den Personalkosten. Daher bedarf es einer Echtzeit-Planung der Zustellungsrouten, um eine SDD innerhalb des bestellten Zeitfensters zu gewährleisten (Ferrucci u. Bock 2014, S.1ff).

Durch SDD und Instant-Deliveries ergeben sich für die Dienstleistungsunternehmen verschiedene Probleme hinsichtlich der Planung und Einteilung der Fahrzeugrouten, der einzusetzenden Flottengröße, Wartungsarbeiten, der Erstellung eines Treiber-Rotationsplans und der Fahrreinteilung (Cupic u. Teodorovic, S.244ff). Besondere Herausforderungen stellen Wohngebiete mit begrenzten Frachtzonen und mehrteiligen Wohnungen mit begrenztem Lager für Pakete und Frischlieferungen dar (Lin et al. 2017, S.2ff). Die wachsende Zahl der SDD-Lieferungen umfasst Privatfahrzeuge, die das Modell der Verkehrsnetzbetreiber nicht widerspiegeln. Dadurch könnte

das Fahrtenaufkommen außerhalb der Spitzenzeiten in Wohngebiete höher ausfallen. Diese Fahrten werden möglicherweise nicht in den aktuellen regionalen Modellen erfasst, die dazu beitragen, den Systembedarf vorherzusagen (Rutter et al. 2017, S. 3).

Auf der Planungsseite besteht bei der Durchführung von SDD-Lieferungen das Vehicle Routing Problem. Es besteht die Notwendigkeit der Organisation von Beladungs- und Entladungspunkten entlang einer festgelegten Route. Dabei sind Faktoren, wie die Wahl der kürzesten Entfernung zum Zustellungsort, Mindestkosten und Zeitlimit unter bestimmten Bedingungen (u.a. Warenbedarf, Lieferung, Lieferzeit, Fahrzeugrestriktionen, Reisebeschränkungen, Zeitbeschränkungen, etc.) zu realisieren. Außerdem ist es wichtig, die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge so gering wie möglich zu halten (Cao u. Yang 2017, S. 2f.).

Lösungsansätze Im Wesentlichen haben sich drei Betriebsmodelle entwickelt, um den logistischen Bedarf zu decken. Das erste Modell ist die herkömmliche Organisationsstruktur der KEP-Dienstleistungsunternehmen, wie sie DHL oder UPS hauptsächlich umsetzen. Diese haben zu ihrer Hub-and-Spoke-Organisation zusätzliche Lieferwellen in Form von direkten Zustellungen etabliert. Des Weiteren unterhalten immer mehr große Einzelhandelsketten ihre eigenen Logistik-Flotten, um die Expresslieferung anbieten zu können. Das bekannteste Beispiel ist hier Rewe (Hausmann et al. 2014).

Für eine Verbesserung der Organisation und Durchführung von SDD- und Instant-Lieferungen gewinnt die Zustellung per Crowdsourcing im internationalen Kontext zunehmend an Bedeutung (Lin et al. 2017, S. 2). Jedoch ist die rechtliche Lage für Deutschland hinsichtlich der Ausführung der Zustellungen über die Crowd noch nicht hinreichend abgesichert (Ducret 2014, S.15ff.).

Das Angebot von taggleichen Lieferungen in Kombination mit Paketstationen oder besonderen Paketfächern in Mehrfamilienhäusern könnte zu einer Reduzierung der Einkaufsfahrten von E-Commerce-KundInnen führen und die Rate der Zweitzustellungsversuche bei Abwesenheit verringern (Rutter et al. 2017, S. 9).

Ein weiterer Lösungsansatz besteht in der Sendungsmithnahme durch Personenbeförderungsunternehmen. Vorteil an diesem Geschäftsmodell wäre die volle Ausschöpfung der Transportkapazität, um im Wettbewerb des Personenverkehrsmarktes bestehen zu können (Jiang et al. 2017, S. 2f., 16). Dieses Geschäftsmodell ist jedoch als kritisch zu betrachten, da verschiedene kommunal- und arbeitsrechtliche Hindernisse diesem entgegenstehen. Hierbei wäre auch die Haftungsfrage bei Beschädigungen kritisch zu diskutieren. Dementsprechend ist dieses Geschäftsmodell schwer durchsetzbar.

Außerdem wird die Zustellung in sog. „Customer Specific Reception Box“ oder „Delivery Box“ als Lösungsansätze postuliert. Hierbei impliziert der unbeaufsichtigte Empfang der Aufträge keine zusätzlichen Zustellungsversuche. Die Lieferung innerhalb von Zeitfenstern wird aufgehoben, da der Auftrag garantiert noch am selben Tag ausgeführt wird (Punakivi et al. 2001, S. 427ff.). Des Weiteren wird zunehmend an der Zustellung durch Drohnen geforscht und verschiedene Optionen entwickelt. Beispielsweise arbeitet Amazon an einer Zustellung der Bestellung nach 60 Minuten durch eine Drohne, die an ein Zustellfahrzeug gebunden ist. (Murray 2015)

Die Zukunft der Warenlieferung ist wahrscheinlich eine hybride Form von Hub-and-Spoke und Crowdsourcing, um die oben genannten Vorteile beider zu nutzen (Lin et al. 2017).

Zu 2) Lebensmittellieferungen

Organisation Lebensmittellieferungen zeichnen sich durch eine sehr schnelle Zustellung, meistens innerhalb von 24 Stunden, aus (Same-Day-Delivery). Nicht selten werden dabei Zeitfenster von maximal zwei Stunden eingehalten, da die Kühlung der leicht verderblichen Produkte zu gewährleisten ist (López u. Ferrándiz 2016).

Die Lieferung von online bestellten Lebensmitteln erfolgt in unterschiedlichen Formen. Dabei ist die Unterscheidung wichtig, woher die Waren kommen. Zum einen kann die Ware aus einem großflächigen Distributionszentrum aus entweder direkt an die KundIn (Warenversand) oder an eine Filiale versendet werden, wo die KundIn sie dann in der Filiale (Click & Collect) oder am Drive-In-Schalter abholt (Drive-In-Supermarkt). Zum anderen kann das Filialnetz als Warenlager beziehungsweise lokales Distributionszentrum dienen, so dass die MitarbeiterInnen den Warenkorb der KundInnen aus den Regalen bestücken und dieser seine Bestellung dann abholt (Dannenberg u. Franz 2014, S. 239f.).

Konsequenzen für den Verkehr ergeben sich durch unterschiedliche Standortbedingungen, die aus räumlich-strukturellen Differenzen resultieren (Breidenbach u. Rauh 2010, S. 54). Zurzeit beschränkt sich die Effizienz von Lebensmittellieferungen aufgrund der guten Infrastrukturbedingungen auf den urbanen Raum. Hingegen steht im ländlichen Raum eine nicht zu unterschätzende Nachfrage weiten Transportwegen gegenüber. Zudem sind die Netzdichte an Supermärkten sowie die Verkehrsdichte weitaus geringer, wodurch eine effektivere Routenplanung für die Lieferung von Lebensmitteln möglich ist, so dass die Bestellung von Lebensmitteln über das Internet hier zu empfehlen wäre (Linder u. Rennhak 2012, S. 25). Außerdem führt der zunehmende Anteil an Online-Einkäufen von Lebensmitteln langfristig zu einer Modifikation der Filialnetzstruktur, da hier ein größeres Einzugsgebiet bedient werden kann (Dannenberg u. Franz 2014, S. 239ff.).

Die meisten großen Unternehmen im Frischemarkt und Discount-Segment treten mittlerweile als Multi-Channel-Unternehmen auf (Dannenberg u. Franz, S. 240ff.). Multi-Channel-Effekte resultieren aus der Verwendung mehrerer Vertriebskanäle innerhalb einer Transaktion. Dabei hängt die Intensität der Nutzung von externen Faktoren ab. Der dadurch entstehende Aktionsraum der VerbraucherInnen erzeugt indirekte verkehrliche Effekte, da es zu veränderten privaten Verkehrsaufwendungen führt (Breidenbach u. Rauh 2010, S. 53ff.).

Verkehrliche Herausforderungen Durch das vermehrte Verkehrsaufkommen in Wohngebieten kommt es immer wieder zu Konflikten bei der Zustellung. Denn durch das Ausladen und Parkverhalten, oft an unautorisierten Stellen, der ZustellerInnen werden oftmals Fußgänger- und Radwege blockiert und Störungen des Verkehrsflusses durch Parken in zweiter Reihe verursacht. (López u. Ferrándiz 2016, S. 190f.) Außerdem ist die Streckenführung oft ineffizient, da die Routenzusammenstellung manuell erfolgt. Der Einsatz einer GPS unterstützten Planung der Routen könnte zu einer verbesserten Routenführung hinsichtlich der gefahrenen Kilometer sowie Auslastung durch Verknüpfung anderer Zustellungsorte führen, so dass nicht nur Zeit und Kosten gespart werden können, sondern auch die Umweltbelastung reduziert würde. Zudem werden die Zustellfahrzeuge nicht geteilt, was wiederum zu mehr Verkehr führt (López u. Ferrándiz 2016, S. 190f.). Die Zustellung von zubereiteten Speisen wird nach derzeitigem Kenntnisstand keine wesentlichen Auswirkungen auf den Verkehrsfluss haben, da Online-Plattformen, wie Deliveroo oder Foodora im Wesentlichen auf Fahrradkuriere setzen (Deliveroo 2017, Foodora 2017).

Lösungsansätze Lebensmittellieferungen haben besonders mit den folgenden drei Schwierigkeiten bei der Zustellung bestellter Waren zu kämpfen.

- Einhaltung kurzer Lieferzeiten
- Einsatz spezieller Kühlungstechnik
- Besonderer Umgang mit leicht verderblichen Produkten

Daraus resultiert die Idee, Food Hubs zu implementieren. Diese führen zur Reduzierung des städtischen Verkehrsaufkommens durch die Koordination der Lieferungen. Des Weiteren sind positive Effekte hinsichtlich Zeiteinsparungen, Transportkapazitäten und Umweltauswirkungen zu erwarten. Außerdem wäre der vermehrte Einsatz von Light Good Vehicles anstelle von Heavy Good Vehicles so leichter umsetzbar (Morganti u. Gonzales- Feliu 2015, S. 120ff.).

Für die Sicherstellung der Einhaltung von Kühlketten diskutieren Dannenberg und Franz (2014) die Einführung eines flächendeckenden Netzes an gekühlten Automaten, da diese Infrastruktur die Lieferung von Lebensmitteln erheblich vereinfachen würde. Die Lieferung ist nicht mehr an ein knappes Zeitfenster gebunden und bietet Logistikunternehmen und KundInnen mehr Flexibilität, ohne dass die Waren leicht verderben (Dannenberg u. Franz 2014, S. 239).

Zusammenfassung Die verkehrlichen Effekte des Lebensmittel-Online-Handels beziehen sich hauptsächlich auf die zunehmende Fragmentierung der Zustellungen auf der Letzten Meile und haben meistens negative Effekte auf den urbanen Verkehr. Gerade das Parken in zweiter Reihe für die Zustellung der Lieferungen an Privathaushalte wird dabei als Störfaktor aufgeführt, der negative Auswirkungen auf den Verkehrsfluss hat (Morganti et al. 2014b, S. 182ff.).

Zu 3) Zustellungen zu Paketstationen

Durch die stetig wachsende Nutzung des E-Commerce entwickelt sich ein neuer, genereller Trend in der Logistikbranche. Gerade im Hinblick auf Same-Day- und Instand-Delivery nutzen Logistikunternehmen die Transportkapazität ihrer Zustellfahrzeuge nicht voll aus, um auf diese KundInnenwünsche zu reagieren oder die schnelle Lieferung zu gewährleisten. Dadurch erhöht sich die Frequenz an Zustellungen und damit verbunden die Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen. Die Zustellung auf der Letzten Meile wird hauptsächlich mit Kleintransportern oder Lkws ausgeführt. Small-lot Deliveries (Klein-Zustellungen) führen dabei zur Erhöhung des urbanen Verkehrsaufkommens und stören darüber hinaus den innerstädtischen Verkehrsfluss. Auch zukünftig wird ein Wachstum des E-Commerce erwartet. Dies führt zu einer Erhöhung des Aufkommens an Zustellungen und einer höheren Anzahl an Zustellfahrzeugen in Wohngebieten (Visser et al. 2014, S. 18ff.). Der stetig wachsende E-Commerce lässt zudem fehlgeschlagene Zustellungsversuche ansteigen. Demzufolge resultiert daraus eine erhöhte Rate an erneuten Zustellungen. Übergeordnetes Ziel der Logistikdienstleistungsunternehmen ist jedoch, eine hohe Auslastung ihrer Fahrzeuge mit möglichst optimaler Routenführung zur Minimierung der Transportkosten zu erreichen.

Zur Reduzierung der Transportkosten, aber auch zur Gewährleistung der garantierten Zustellung und zeitlichen Flexibilität für den KundInnen, bieten Logistikdienstleistungsunternehmen nun alternative Zustellkonzepte an. In diesem Kontext sind die Collection/Delivery Points (CDP) (sogenannte Pick-up Points [PP]) und die Automated Parcel Stations (APS) zu nennen. Dabei handelt es sich um alternative Paketabholstellen, die den PrivatkundInnen – neben der Hausbelieferung – angeboten werden (Song et al. 2008, S. 1ff.; Morganti et al. 2014a, S. 23ff.). Im deutschen Kontext sind CDP bzw. PP auch als Paketshops der Paketdienstleistungsunternehmen bekannt. Dabei handelt es sich um kleine Läden im Einzelhandelssegment, die neben ihrem hauptsächlichen Verkauf von Produkten auch die Abholung und Rücksendung von Paketen ermöglichen. Diese Läden handeln hier im Auftrag der Paketdienstleistungsunternehmen und bieten diesen Service zusätzlich an. APS sind Paketstationen, die in Deutschland seit 2008 von der Deutschen Post DHL Group angeboten werden. Dieses Angebot wurde seither stetig ausgebaut. Seit kurzem bieten jedoch auch weitere Logistikdienstleistungsunternehmen dieses Angebot für ihre KundInnen an (z. B. Amazon). Dabei handelt es sich um Paketstationen, in denen die Pakete zur Abholung vom Paketdienstleistungsunternehmen für die PrivatkundInnen hinterlegt werden. Zudem können die KundInnen auch wie bereits bei PP Rücksendungen zur Paketstation

bringen. Dazu ist eine KundInnenkarte notwendig, mit der die Pakete abgeholt oder abgegeben werden können. Die KundIn erhält nach der Zustellung des Paketes in die Paketstation eine Nachricht per E-Mail und SMS mit einer Tan-Nummer, die er zur Abholung benötigt. Vorteil daran ist, dass er nicht an Öffnungszeiten gebunden ist und die Pakete zu jeder Zeit flexibel abholen kann.

Jedoch bietet die Form der CDP der KundIn durch die Gebundenheit an Öffnungszeiten nur eine eingeschränkte Flexibilität in der Abholung ihrer Pakete. Außerdem ist der Vorteil, den der Einkauf im E-Commerce ermöglicht, nämlich 24 Stunden an sieben Tagen in der Woche einzukaufen, dadurch wiederum z.T. relativiert (Song et al. 2008). Die KundInnen des E-Commerce präferieren daher die Zustellungsart des Home Delivery. Home Delivery kann nach Visser (2014, S. 18ff.) in folgende Arten erfolgen: Zustellung zu einer Wohnadresse, einer anderen Adresse (z.B. Arbeitsplatz), anderen Familienmitgliedern, einer NachbarIn oder einem CDP. Für die Reduzierung des innerstädtischen Verkehrsaufkommens und Minderung der Störungen des Verkehrsflusses, bedingt durch die erneuten Zustellungsfahrten, ergibt sich ein Bedarf, flexible neue Lösungen für KundInnen und Optimierungsansätze für die ZustellerInnen zu entwickeln (Song et al. 2008, S. 1ff.; Morganti et al. 2014a, S. 23).

Organisation CDP werden durch lokale Geschäfte, wie Kioske, Tankstellen oder Blumenfachgeschäfte betrieben. Die nicht zustellbaren Pakete werden hier hinterlegt, bis die EmpfängerIn sie abholt. Meistens sind diese im direkten Wohnumfeld der EmpfängerIn lokalisiert. Die Möglichkeit der Abholung besteht an sechs Tagen in der Woche zu den Öffnungszeiten des jeweiligen Host Business. Die KundIn ist in seiner Flexibilität der Abholung seiner Bestellung zeitlich an die Öffnungszeiten des jeweiligen Shops gebunden und damit nicht so flexibel in seinem Zeitmanagement, wie bei der Benutzung von APS (Morganti et al. 2014a, S. 26).

APS bieten den Vorteil der Paketabholung an sieben Tagen in der Woche ohne zeitliche Beschränkungen. Sie sind meistens an Tankstellen, Shopping-Centern, Bahnhöfen oder an den Straßen im öffentlichen Raum lokalisiert (Gajaghar et al. 2016, S. 1372ff.; Morganti et al. 2014a, S. 24). Beide Lösungsansätze können zur Reduzierung der Kosten für die Logistikunternehmen beitragen, indem die Kosten für einen erneuten Zustellungsversuch entfallen (Morganti et al. 2014a, S. 24). Zudem wird die täglich aufgewendete Zeit der Routen der Zustellfahrzeuge verringert. Die Auslastung der Transportkapazität der Fahrzeuge steigt. Außerdem ist die Senkung von Lieferkosten für Logistikunternehmen möglich, da die anfallenden Versandkosten einer Zustellung auf alle Zustellungen, die in den APS hinterlegt werden, verteilt werden können. Aus der KundInnenperspektive ergeben sich nun Vorteile hinsichtlich der zu bezahlenden Versandkosten und dem selbstbestimmten Zeitfenster der Abholung der Bestellungen. Sie sind an keine zeitlichen Vorgaben mehr gebunden und müssen nicht den ganzen Tag Zuhause verbringen, um ein Paket annehmen zu können, sondern haben die Möglichkeit, die Paketabholung flexibel in ihren Alltag zu integrieren (Gajaghar 2016, S. 1772ff.).

Konsequenzen Zum einen wird erwartet, dass Home Deliveries zu mehr Güterverkehr führen, aber auf der anderen Seite weniger Verkehr im Zusammenhang mit dem Einkaufen an sich entsteht. Der E-Commerce führt zur Substituierung des Besuchs eines Geschäftes durch die Zustellungsart des Home Delivery. Allerdings besteht auch die Möglichkeit, dass KonsumentInnen ihre nicht mehr zu tätigende Einkaufsfahrten nun durch längere Freizeitfahrten kompensieren. (Visser et al. 2014, S. 19ff.).

Zudem ist auch eine gewisse Fragmentierung im E-Commerce festzustellen. Sofern ein Produkt online gekauft und noch andere Produkte benötigt werden, erfolgt die Bestellung dieser Waren gegebenenfalls über unterschiedliche Handelsunternehmen, da das Angebot an Produkten und Handelsunternehmen im Online-Kanal viel größer als im realen Geschäft ist, so dass separate

Lieferungen in Auftrag gegeben werden. Es wird eine große Anzahl an Zustellungsfahrten erzeugt, wobei die Nichtzustellungsrate zusätzlich ansteigt. Außerdem werden Over-Orders vor allem in der Bekleidungsindustrie getätigt, die wiederum durch die Abwicklung von Retouren zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen führen. Zusätzlich kann das „Stoppen und Starten“ des Motors des Zustellfahrzeugs vermieden werden, da nur noch die Adresse der CDP angefahren wird und nicht mehr an vielen EmpfängerInnenadressen gehalten werden muss (Cullinane 2009, S. 771ff.). Des Weiteren wird sich das Transportaufkommen durch die nun höhere Anzahl an CDP erhöhen (Visser et al. 2014, S. 20). Die potentiellen Gewinne in Bezug auf reduzierte Fahrzeugkilometer auf der kommerziellen Seite können aufgrund erhöhter privater Pkw-Fahrten verloren gehen, vor allem wenn BewohnerInnen des suburbanen und ländlichen Raums den Zugang zu CDP-Dienstleistungen nutzen (Morganti et al. 2014a, S. 31). Zusätzlich ist anzumerken, dass eine volle Kapazitätsauslastung der „Light Goods Vehicles“ nur selten der Fall ist (LGVs) (Sang 2008).

Das Zustellungskonzept hat Vorteile für den Zustellverkehr (u.a. Bündelung von vielen Zustellungen, Verringerung der Stoppdichte, gute Parkmöglichkeiten, gute Erreichbarkeit, etc.). Neben den Auswirkungen auf den Verkehrsablauf ist zusätzlich der Flächenverbrauch im öffentlichen und halböffentlichen Raum für logistische Flächen inklusive der versiegelten Park- und Rangierflächen der Packstationen zu berücksichtigen (Visser et al. 2014, S. 20ff.).

Lösungsansätze Die Konsolidierung führt zu einem effizienteren Transport. Daher ergeben sich folgende Lösungsansätze.

- ▶ Kooperationsmöglichkeit zwischen Speditionsfirmen zur Bündelung ihrer Lieferungen nach Zielgebieten
- ▶ Zusammenarbeit zwischen den EmpfängerInnen (z. B. im gegenseitigen Annehmen von Bestellungen)
- ▶ Kooperation von Transportunternehmen auf einem städtischen Gebiet, aber auch auf nationaler Ebene

CDP haben gewisse Vor- und Nachteile im Hinblick auf den Flexibilitätsaspekt für die KonsumentInnen. CDP sind zudem teurer als automatisierte Paketstationen, jedoch brauchen diese eine gewisse Größe und ein gewisses Volumen, um eine ökonomische Rentabilität aufzuweisen. Außerdem bedarf es in Deutschland einem noch größeren Netz an Paketstationen, auch für andere AnbieterInnen als DHL. Immer mehr Multi-Channel-Unternehmen bieten zudem die Möglichkeit des „Click and Collect“ an. Diese Alternative ist kostengünstiger und bietet durch die Bündelung von Lieferungen und Bestellungen die Chance, das Transportaufkommen in Wohngebieten zu reduzieren (Visser et al. 2014, S. 23ff.).

Zusammenfassung CDP und APS stellen Lösungsansätze dar, dem wachsenden Transportaufkommen durch E-Commerce-Einkäufen gerecht zu werden. Zudem würde das Ausschließen von Lieferfahrzeugen in Wohngebieten helfen, eine nachhaltigere Zustellung zu garantieren (Visser et al. 2014, S. 23). Ob Zufahrtsbeschränkungen von KEP-Dienstleistern in Wohngebieten realistisch und umsetzbar sind, wird im Stand der Forschung nicht geklärt, und müsste kritisch diskutiert werden. Home Deliveries sollten über eine lokale Ebene in der Stadt abgewickelt werden, so dass die Zustellung auf der Letzen Meile beispielsweise über Lastenfahrräder organisiert oder der Einsatz von umweltfreundlicheren Fahrzeugen vorgeschrieben wird (Visser et al. 2014, S. 23). In diesem Kontext wäre auch zu überlegen, ob die Immobilienwirtschaft bei Neubauprojekten verpflichtet wird, Be- und Entladungskonzepte (u.a. Ladezonen, Stellplätze zur Belieferung der Privathaushalte) in der Bauphase bereits zu berücksichtigen. Ferner könnten hierbei auch White-Label Lösungen von Paketstationen bzw. -boxen im Gebäude oder innerhalb der Gebäudeanlage von den Eigentümern der Immobilien – ob nun Bestands- oder Neubauimmobilien –

implementiert werden. Dabei hätten alle relevanten KEP-Dienstleister Zugang zu den Paketboxen, vergleichbar mit dem Briefkastenkonzept, zur Abgabe der Pakete. Die Privatkunden müssten nicht vor Ort sein, um die Pakete entgegenzunehmen. Damit könnten mehrmalige Zustellversuche vermieden werden.

Tabelle 21 fasst die Ergebnisse der Analyse der Effekte von Zustellkonzepten der Logistikdienstleistungsunternehmen zusammen.

Tabelle 21: Analyse der Effekte von Zustellungskonzepten der Logistikdienstleistungsunternehmen

	Wirkungen													
	Verkehrlich				Ökonomisch					Ökologisch			S. *	
	Stau	Fahrtenreduzierung	Sendungsbündelung	Fahrtenbündelung	Fahrzeugauslastung	Leerfahrten	Transportzeit	Transportdistanzen	Kraftstoffverbrauch	Transportkosten	Abgasemissionen	Lärm	Flächenverbrauch	Verkehrssicherheit

Belieferungskonzepte der KEP-Dienstleistungsunternehmen

SDD/Express-lieferungen	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	≠	-
Lebensmittel-lieferungen	-	-	o	o	≠	+	+	+	-	+	-	-	-	-
Packstationen	≠	≠	+	+	+	+	≠	+	+	-	+	≠	-	+

+: Verbesserung/Erhöhung, o: Keine Wirkung, -: Verschlechterung/Reduzierung, ≠: Keine Angabe

(*) Sozial

Quelle: Eigene Darstellung

3.2 Multivariate Analysen von Einkaufsverkehr in Nationalen Verkehrsbefragungen (Top-Down-Ansatz)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analysen der großen nationalen Verkehrsbefragungen in Deutschland („Mobilität in Deutschland“, nachfolgend MiD), den USA („National Household Travel Survey“, nachfolgend NTHS) und des Vereinigten Königreiches von Großbritannien und Nordirland („National Travel Survey“, nachfolgend NTS)⁷ dargestellt. Die Analysen umfassen in diesem Kontext drei Schwerpunkte. Zunächst sollen die Bedeutung des Einkaufsverkehrs für den Personenverkehr insgesamt veranschaulicht und eventuelle Unterschiede im Einkaufsverkehr zwischen den drei Ländern aufgezeigt werden. Ferner wird die Nutzungshäufigkeit des

⁷ Tatsächlich fließen in die nationale Verkehrsbefragung des Vereinigten Königreiches von Großbritannien und Nordirland seit 2013 nur noch Haushalte und Einzelpersonen aus England mit ein. Aus diesem Grund wird im Folgenden stets von der englischen NTS bzw. den Ergebnissen für England gesprochen. Dies entspricht den Empfehlungen des Nutzerhandbuchs der NTS (UK Department for Transport: National Travel Survey. Data Extract User Guide, 1995-2016, Seite 2).

Online-Handels genauer betrachtet, um herauszufinden, welche Bevölkerungsgruppen primär von der Möglichkeit des Online-Handels Gebrauch machen. Schließlich wird mittels multivariaten Regressionsanalysen untersucht, welche Variablen den größten Einfluss auf die Nutzungshäufigkeit des Online-Handels haben.

Bevor auf die konkreten Ergebnisse der Analysen eingegangen wird, sollen zunächst kurz einige grundlegende Unterschiede zwischen den drei Verkehrsbefragungen erläutert werden, um dem Leser ein besseres Verständnis des Weiteren Vorgehens zu ermöglichen.

Kurze Erläuterung der drei Erhebungen und ihrer Unterschiede

In der deutschen MiD und der US-amerikanischen NHTS aus dem Jahr 2017 sowie der englischen NTS der Jahre 2015 und 2016 wurden zum Teil ähnliche Sachverhalte auf unterschiedliche Art und Weise erfasst. So liegt zwar für alle drei Erhebungen mindestens ein Datensatz auf Personen-, auf Haushalts- und auf Wegeebe vor. Jedoch wurden in England alle Wege pro Probanden über eine ganze Woche erhoben, während sich die Wegeerfassung in Deutschland und den USA nur auf einen Stichtag bezieht. Die Frage nach der Nutzungshäufigkeit von Online-Handel wiederum wurde zwar in allen drei Befragungen mit relativ ähnlichen Antwortmöglichkeiten gestellt, allerdings auf unterschiedlichen Ebenen. In England wurden bei der Frage explizit die Online-Bestellungen des gesamten Haushaltes adressiert, während in Deutschland und den USA die Frage an Einzelpersonen gerichtet war.

Dies führt dazu, dass die für diese Studie relevanten Variablen zwischen den Datensätzen nicht immer direkt miteinander vergleichbar sind. Teilweise können diese Unterschiede behoben werden, indem eine vertretbare Angleichung der Variablen vorgenommen wird. Für die englische NTS wurde beispielsweise aus der Anzahl der Einkaufswege über eine gesamte Woche die durchschnittliche Anzahl an Einkaufswegen pro Tag berechnet, um sie mit den Stichtagserhebungen der MiD und der NHTS vergleichbarer zu machen. Einige Unterschiede konnten aber auch nicht bereinigt werden. Die Häufigkeit von Online-Bestellungen liegt für England nur auf Haushaltsebene vor und wird auf dieser Basis auch im Folgenden so dargestellt. Dieser Unterschied zur MiD und zur NHTS wurde aber in der Interpretation der Ergebnisse stets berücksichtigt. An den entsprechenden Stellen wird explizit darauf verwiesen, dass keine 100%-ige Vergleichbarkeit der Zahlen vorliegt.

Insgesamt haben an der MiD 316.361 Personen, an der NHTS 264.234 Personen und an der NTS 128.946 Haushalte teilgenommen. In allen drei Datensätzen liegen jedoch spezifische Fragen vor, die nicht allen Beteiligten, sondern je nach Erhebungsmethode (Telefoninterview, Fragebogen etc.) nur spezifischen Untergruppen gestellt wurden. Außerdem haben nicht alle Teilnehmende jede Frage, die ihnen gestellt wurde, auch beantwortet, sodass die Gesamtanzahl der gültigen und auswertbaren Antworten pro Frage jeweils unterschiedlich ausfällt. Unter anderem aus diesen Gründen wird in den folgenden Abbildungen primär auf Prozentangaben und Durchschnittswerte statt auf die absoluten Zahlen pro Erhebung zurückgegriffen.

Unterschiede im Einkaufsverkehr

Der Einkaufsverkehr macht in Deutschland, den USA und England einen wichtigen und jeweils ähnlich großen Anteil des gesamten Verkehrs aus. So beträgt der Anteil der Einkaufswege an der Anzahl aller Wege in allen drei Ländern zwischen 16% und 19%. Auch der Anteil der Länge der Einkaufswege an der Länge aller Wege insgesamt fällt mit zwischen 7 und 11% relativ ähnlich aus. Einkaufswege machen somit fast ein Fünftel des Verkehrsaufkommens und fast ein Zehntel der Verkehrsleistung in Deutschland, den USA und England aus.

Im Durchschnitt legen Personen in Deutschland und England mit 0,56 bzw. 0,51 ungefähr gleich viele Einkaufswege pro Tag zurück. US-Amerikaner gehen im Gegensatz dazu mit 0,73

Einkaufswegen pro Tag etwas öfter einkaufen. In allen drei Ländern zeigen sich dabei die gleichen Tendenzen, wenn die Anzahl der Einkaufswege pro Tag nach Geschlecht und nach Personen, die auf dem Land oder in der Stadt wohnen, unterschieden wird: Frauen und Personen, die auf dem Land wohnen, gehen etwas häufiger einkaufen als Männer und Personen, die in der Stadt wohnen (siehe Tabelle 22).

Tabelle 22: Zentrale Kennzahlen zur Bedeutung des Einkaufsverkehrs

Kategorie	Unterkategorie	Deutschland	USA	England
Anteil der Anzahl der Einkaufswege an der Anzahl alle Wege		16%	18%	19%
Länge eines Einkaufsweges in km (Ø)*		4,57	7,18	7,22
Anteil der Länge der Einkaufswege an der Länge aller Wege		7%	8%	11%
Anzahl der Einkaufswege pro Person pro Tag**		0,56	0,73	0,51
Länge der Einkaufswege pro Person pro Tag in km (Ø)*		2,55	5,26	3,55
Anzahl der Einkaufswege nach Geschlecht pro Person pro Tag**	Männlich	0,51	0,65	0,45
	Weiblich	0,61	0,82	0,57
Länge der Einkaufswege nach Geschlecht pro Person pro Tag in km (Ø)*	Männlich	2,38	4,84	3,10
	Weiblich	2,73	5,69	3,99
Anzahl der Einkaufswege nach Regionstyp des Wohnortes pro Person pro Tag**	Urban	0,54	0,73	0,50
	Ländlich	0,59	0,75	0,54
Länge der Einkaufswege nach Regionstyp des Wohnortes pro Person pro Tag in km (Ø)	Urban	2,27	4,58	3,08
	Ländlich	3,15	8,51	5,76

* Es wurden nur Einkaufswege bis zu einer Länge von 60km betrachtet, da davon ausgegangen wurde, dass es sich bei allen längeren Einkaufswegen um Fehler in der Datenerhebung handelt.

** Bei den Durchschnittsangaben zur Anzahl der Einkaufswege pro Person muss berücksichtigt werden, dass viele Personen nicht jeden Tag einkaufen gehen und somit im Durchschnitt für die Gesamtbevölkerung ein Wert unter eins steht.

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

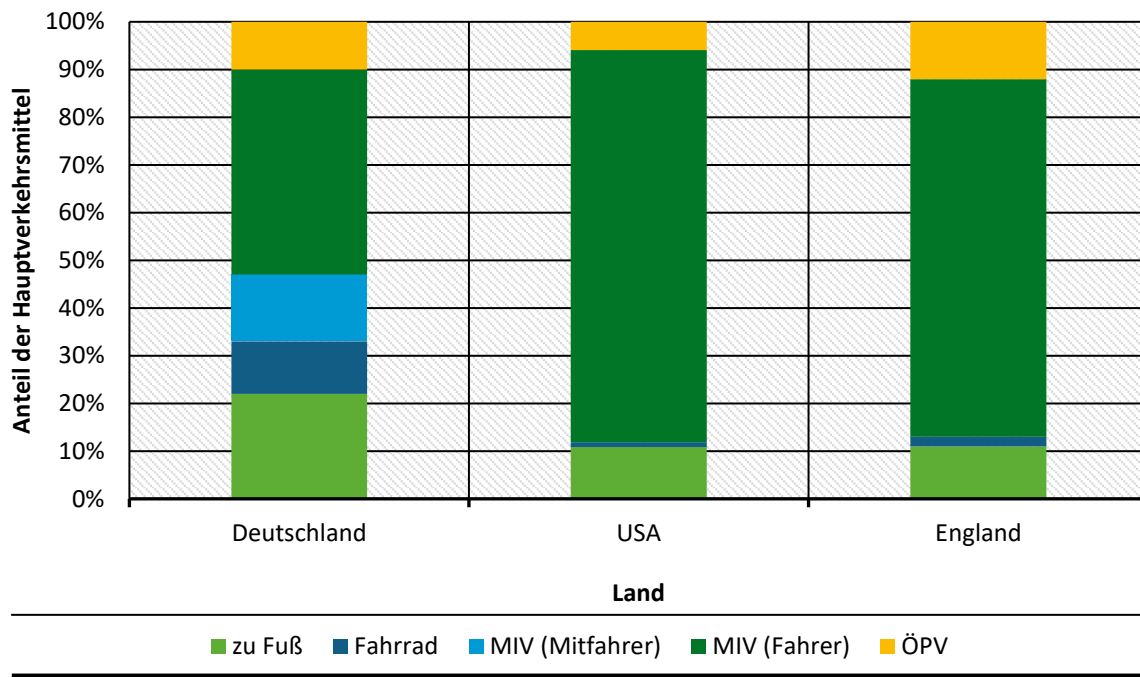
Deutliche Unterschiede zeigen sich dahingegen in der durchschnittlichen Länge der Einkaufswege. Diese ist mit 4,57 km in Deutschland erheblich kleiner als in den USA (7,18 km) und in

England (7,22 km). Dementsprechend fallen auch die für Einkaufswege pro Tag und pro Person zurückgelegten Kilometer mit 2,55 in Deutschland deutlich niedriger als in den USA (5,26 km) und in England (3,55 km) aus. Im Durchschnitt legt ein/e Amerikaner/in somit ungefähr doppelt so viele Kilometer pro Tag für persönliche Einkaufswege wie ein/e Deutsche/r zurück.

Dabei zeigen sich in allen drei Ländern ähnliche Unterschiede zwischen den Geschlechtern und zwischen Personen, die in der Stadt oder auf dem Land wohnen. Frauen legen sowohl in Deutschland als auch in den USA und in England mehr Kilometer pro Tag für Einkaufswege als Männer zurück. Ebenso legen in allen drei Ländern Personen, die auf dem Land wohnen, mehr Kilometer pro Tag für Einkaufswege als Personen, die in der Stadt wohnen, zurück. Besonders deutlich fällt dieser Unterschied in den USA aus, wo Personen auf dem Land fast doppelt so viele Kilometer pro Tag für Einkaufswege als Personen in der Stadt zurücklegen.

Im Hinblick auf die Verkehrsmittelwahl insgesamt als auch auf die Wahl des Verkehrsmittels für Einkaufswege zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen Deutschland einerseits und den USA und England andererseits, wie Abbildung 33 und Abbildung 34 entnommen werden kann.

Abbildung 33: Modal Split (Verkehrsaufkommen) für alle Wege



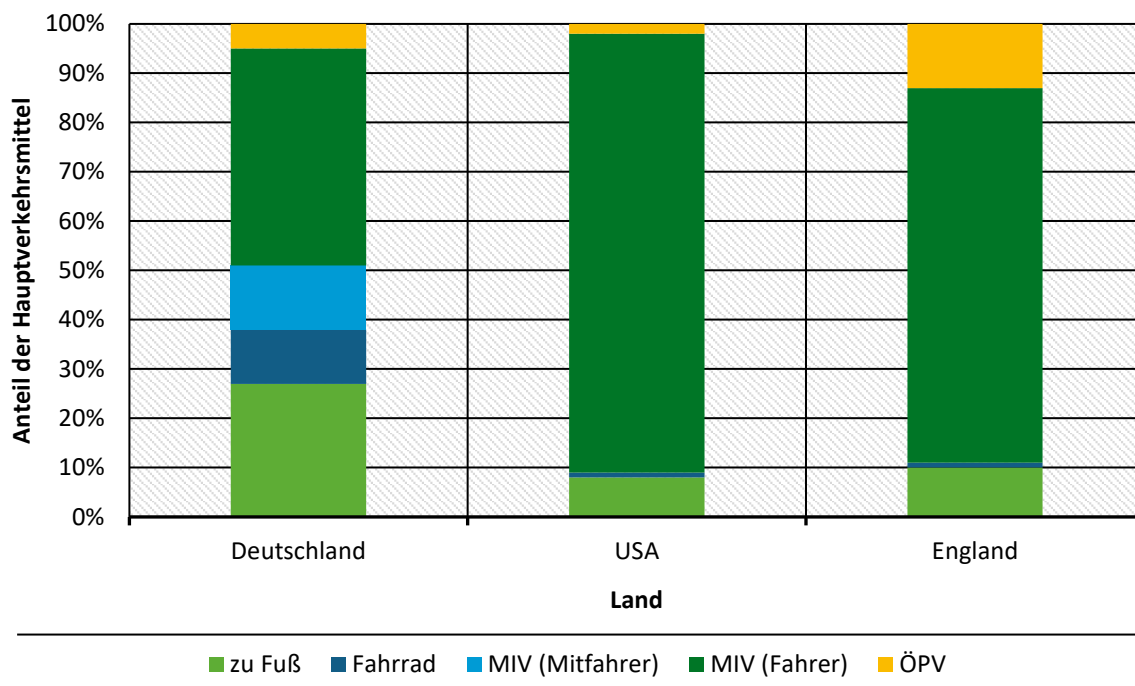
* Bei der NHTS in den USA und der NTS im Vereinigten Königreich von Großbritannien und Nordirland wurde nicht zwischen MIV (Fahrer) und MIV (Mitfahrer) unterschieden.

Quelle: Eigene Darstellung nach NHTS (2017), NTS (2016) und MiD (2017)

Selbst wenn man bedenkt, dass in der NHTS und der NTS der motorisierte Individualverkehr (MIV) nicht für FahrerInnen und MitfahrerInnen getrennt erhoben wurde, zeigt sich dennoch eine klare Lücke zwischen dem MIV-Anteil im Modal Split (Verkehrsaufkommen) in Deutschland (57%) und dem in den USA (83%) oder in England (75%). Auch das Fahrrad spielt in den USA und in England eine deutlich geringere Rolle als in Deutschland, wo ungefähr jeder zehnte Weg mit dem Fahrrad zurückgelegt wird. Darüber hinaus werden in Deutschland mit 22% doppelt so viele Wege zu Fuß als in den USA oder in England mit jeweils 11% absolviert.

Diese generellen Unterschiede in der Verkehrsmittelwahl spiegeln sich auch bei den für Einkaufswege genutzten Verkehrsmitteln wieder (siehe Abbildung 34).

Abbildung 34: Modal Split (Verkehrsaufkommen) nur Einkaufswege



* Bei der NHTS in den USA und der NTS im Vereinigten Königreich von Großbritannien und Nordirland wurde nicht zwischen MIV (Fahrer) und MIV (Mitfahrer) unterschieden.

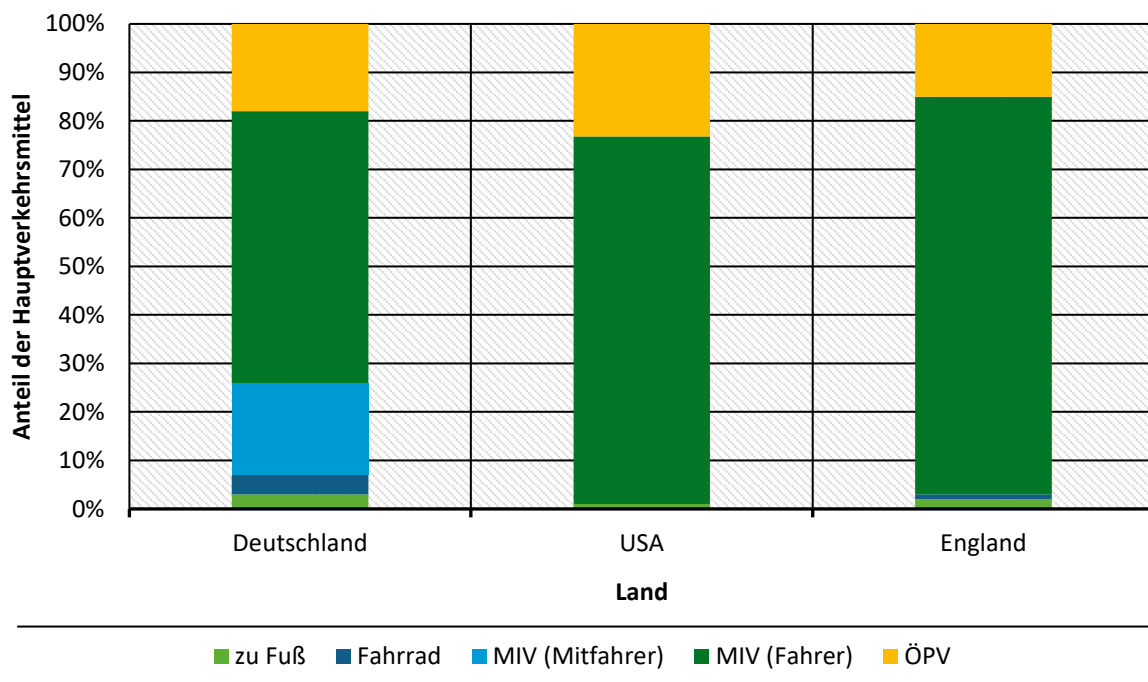
Quelle: Eigene Darstellung nach NHTS (2017), NTS (2016) und MiD (2017)

In den USA werden fast 89% der Einkaufswege mit dem MIV und 8% zu Fuß getätigt. Das Fahrrad und der Öffentliche Personenverkehr spielen im Hinblick auf Einkaufswege in den USA nahezu gar keine Rolle. Auch in England stellt der MIV mit 76% das absolut dominante Verkehrsmittel bei Einkaufswegen dar und die zu Fuß zurückgelegten Einkaufswege sind mit 10% auf einem ähnlichen Niveau wie in den USA. Allerdings werden in England 13% der Einkaufswege mit dem Öffentlichen Personenverkehr zurückgelegt, welcher in den USA nur für 2% und in Deutschland nur für 5% aller Einkaufswege genutzt wird.

Insgesamt weist Deutschland einen im Hinblick auf die Einkaufswege deutlich diverseren Modal Split (Verkehrsaufkommen) als die USA oder England auf. Zwar werden auch in Deutschland mit 57% die meisten Einkaufswege mit dem MIV zurückgelegt. Allerdings wird mit 27% auch etwas mehr als jeder vierte Einkaufsweg zu Fuß bestritten und mit 11% wird für ca. jeden zehnten Einkaufsweg das Fahrrad genutzt, welches in den USA oder in England für Einkaufswege nahezu keine Rolle spielt.

Ähnliche Unterschiede zwischen Deutschland einerseits und den USA und England andererseits zeigen sich auch beim Modal Split nach der Wegelänge, wenn auch in deutlich abgeschwächter Form (siehe Abbildung 35).

Abbildung 35: Modal Split nach Wegelänge – alle Wege (Verkehrsleistung)



* Bei der NHTS in den USA und der NTS im Vereinigten Königreich von Großbritannien und Nordirland wurde nicht zwischen MIV (Fahrer) und MIV (Mitfahrer) unterschieden.

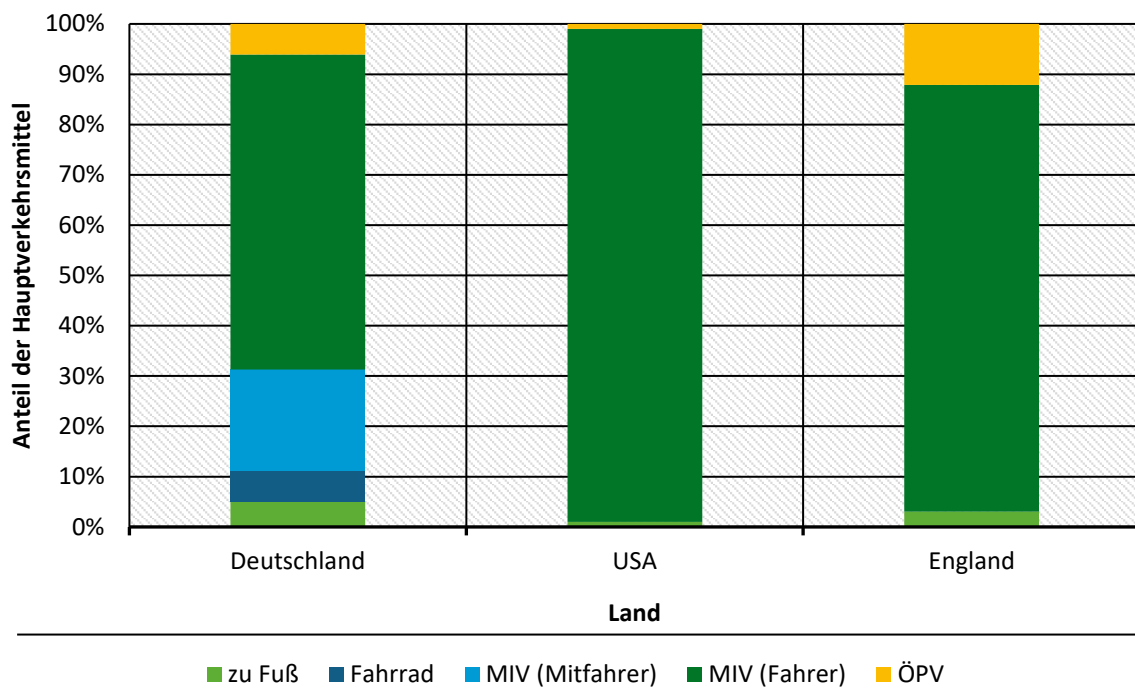
Quelle: Eigene Darstellung nach NHTS (2017), NTS (2016) und MiD (2017)

Sowohl in Deutschland, als auch in den USA und in England wird mit jeweils 75%, 75% und 82% der allergrößte Teil der Verkehrsleistung des Personenverkehrs mit dem MIV zurückgelegt. Auch der ÖPV-Anteil an der Verkehrsleistung bewegt sich mit zwischen 15% und 23% in allen drei Ländern auf einem ähnlichen Niveau. Im Hinblick auf den ÖPV ist jedoch hervorzuheben, dass in den USA zwar nur 6% aller Wege mit dem ÖPV absolviert werden, diese 6% der Wege allerdings 23% aller insgesamt zurückgelegten Kilometer ausmachen. Das heißt, dass der ÖPV in den USA zwar seltener als in Deutschland oder in England genutzt wird. Falls er jedoch genutzt wird, dann für deutlich längere Wege.

Aus der Abbildung 35 geht ebenfalls hervor, dass der Anteil der mit dem Fahrrad oder zu Fuß zurückgelegten Kilometer in Deutschland ca. doppelt so hoch als in den USA oder in England ausfällt. Dies dürfte vor allem darauf zurückzuführen sein, dass in Deutschland auch ca. doppelt so viele Wege mit dem Fahrrad oder zu Fuß absolviert werden, wie zuvor bereits erläutert.

Abbildung 36 veranschaulicht schließlich den Modal Split nach Wegelänge (Verkehrsleistung) nur für die Einkaufswege in den drei Ländern.

Abbildung 36: Modal Split nach Wegelänge – nur Einkaufswege (Verkehrsleistung)



* Bei der NHTS in den USA und der NTS im Vereinigten Königreich von Großbritannien und Nordirland wurde nicht zwischen MIV (Fahrer) und MIV (Mitfahrer) unterschieden.

Quelle: Eigene Darstellung nach NHTS (2017), NTS (2016) und MiD (2017)

In den USA werden mit 98% nahezu alle durch den Einkaufsverkehr anfallenden Kilometer mit dem MIV zurückgelegt. Auch in England und in Deutschland ist der MIV sehr dominant und es werden 84% bzw. 82% der durch den Einkaufsverkehr anfallenden Kilometer mit dem MIV absolviert. Allerdings spielt auch der ÖPV mit 12% in England eine wichtige Rolle und in Deutschland werden mit 5% bzw. 6% nahezu gleich viele Kilometer, die durch den Einkaufsverkehr anfallen, zu Fuß, mit dem Fahrrad oder dem ÖPV bewältigt.

Abschließend lässt sich somit festhalten, dass der Einkaufsverkehr in allen drei Ländern einen hohen Anteil am Verkehrsaufkommen und an der Verkehrsleistung einnimmt und dabei zum größten Teil mit dem MIV zurückgelegt wird. Dies bedeutet, dass grundsätzlich in allen drei Ländern ein großes Potential für Verkehrsreduktion durch Online-Handel besteht. Grundvoraussetzung wäre hierbei, alle auf den persönlichen Einkaufswegen gekauften Waren durch Online-Bestellungen zu erledigen und die Waren bei der Auslieferung effektiv zu bündeln.

Unterschiede im Online-Handel

Die Nutzung von Online-Handel ist vor allem in England aber auch in den USA deutlich stärker als in Deutschland verbreitet. Während in Deutschland nur jede/r zehnte mindestens einmal pro Woche Waren im Internet kauft, ist es in den USA bereits jede/r vierte und in England fast jede/r dritte. Dementsprechend gibt in Deutschland auch mit 55% die Mehrheit an, selten oder nie im Internet einzukaufen, während es in den USA nur 43% und in England sogar nur 23% sind.

Im Hinblick auf die Nutzung von Online-Handel nach Geschlecht und Wohnort (Stadt/Land) zeigen sich gegensätzliche Tendenzen zwischen den drei Ländern. Während in Deutschland Männer etwas häufiger als Frauen die Möglichkeit nutzen, im Internet Waren zu erwerben, ist es in den USA genau umgekehrt. In England nutzen Frauen und Männer in nahezu gleichem Ausmaß die Möglichkeiten des Online-Handels. Nach Wohnort unterschieden kaufen Personen, die in der

Stadt wohnen, in Deutschland und den USA etwas häufiger als Personen, die auf dem Land wohnen, im Internet ein. In England hingegen kaufen Personen, die auf dem Land wohnen, deutlich häufiger im Internet ein, als Personen, die in der Stadt wohnen (siehe Tabelle 23).

Tabelle 23: Zentrale Kennzahlen zur Nutzung des Online-Handels*

Kategorie	Unterkategorie	Deutschland	USA	England
Nutzung Online-Handel	Häufig (min. einmal pro Woche)	10%	25%	30%
	Gelegentlich (min. einmal pro Monat)	35%	32%	47%
	Selten/Nie (weniger als einmal pro Monat)	55%	43%	23%
Nutzung Online-Handel: Häufig	Männlich	12%	22%	30%
	Weiblich	8%	26%	31%
Nutzung Online-Handel: Gelegentlich	Männlich	37%	30%	47%
	Weiblich	33%	32%	47%
Nutzung Online-Handel: Selten/Nie	Männlich	51%	48%	23%
	Weiblich	59%	42%	23%
Nutzung Online-Handel: Häufig	Urban	10%	24%	29%
	Ländlich	9%	21%	36%
Nutzung Online-Handel: Gelegentlich	Urban	36%	31%	47%
	Ländlich	33%	30%	43%
Nutzung Online-Handel: Selten/Nie	Urban	54%	44%	23%
	Ländlich	57%	49%	22%
Nutzung Online-Handel: Häufig	Anzahl persönlicher Einkaufswege (Ø)	0,49	0,81	0,46
Nutzung Online-Handel: Gelegentlich	Anzahl persönlicher Einkaufswege (Ø)	0,48	0,81	0,54
Nutzung Online-Handel: Selten/Nie	Anzahl persönlicher Einkaufswege (Ø)	0,55	0,79	0,72
Nutzung Online-Handel: Häufig	Länge persönlicher Einkaufswege in km (Ø)	2,10	8,05	3,22

Kategorie	Unterkategorie	Deutschland	USA	England
Nutzung Online-Handel: Gelegentlich	Länge persönlicher Einkaufswege in km (Ø)	2,36	8,06	3,66
Nutzung Online-Handel: Selten/Nie	Länge persönlicher Einkaufswege in km (Ø)	2,47	7,51	4,49

* Die Frage nach der Nutzung des Online-Handels wurde jeweils nur einem Teil aller Befragten gestellt. Dementsprechend unterscheiden sich spezifische Kennzahlen wie die Anzahl persönlicher Einkaufswege pro Person pro Tag leicht von den gleichen Kennzahlen die weiter oben bereits für alle Befragten präsentiert wurden.

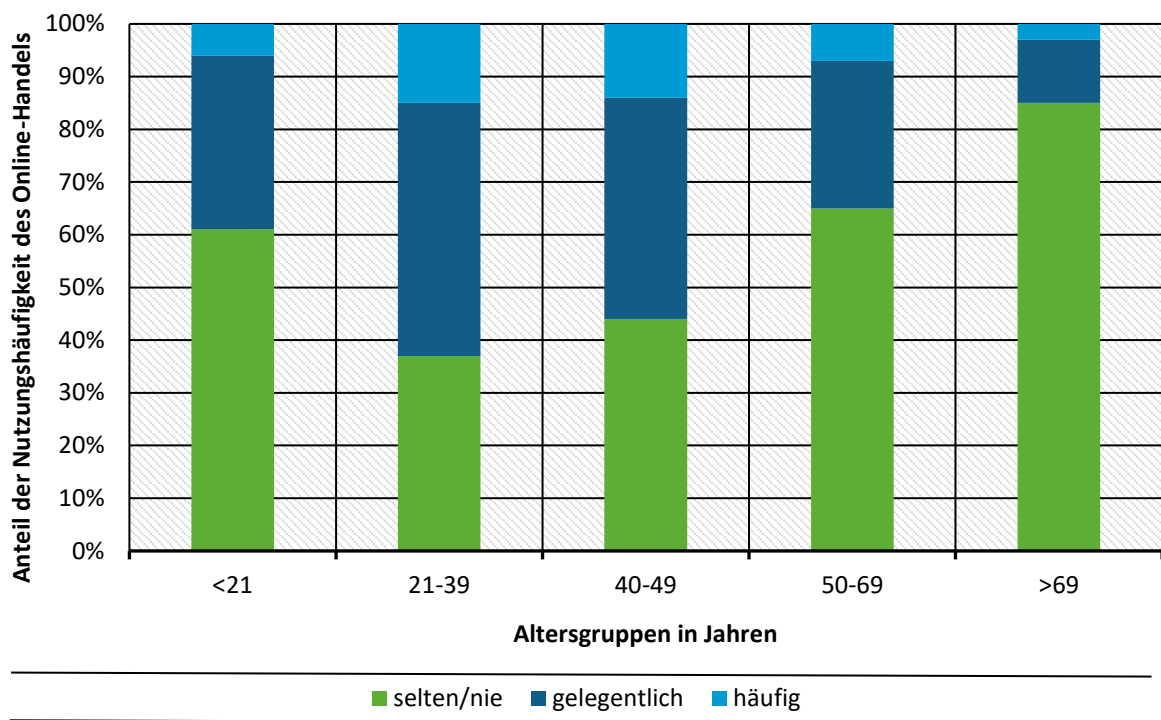
Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Personen, die häufig Online-Handel nutzen, legen sowohl in Deutschland als auch in den USA im Durchschnitt pro Tag ungefähr genauso viele persönliche Einkaufswege zurück, wie Personen, die nur gelegentlich oder sogar nur selten oder nie Waren im Internet erwerben. In England hingegen legen Personen, die häufig Online-Handel nutzen, deutlich weniger persönliche Einkaufswege pro Tag zurück, als Personen, die selten oder nie Waren im Internet kaufen. Dies könnte darauf hindeuten, dass es in England bereits zu einer Substitution von persönlichen Einkaufswegen durch Einkäufe im Internet gekommen ist.

Dementsprechend werden in England von Personen, die häufig Online-Handel nutzen, auch deutlich weniger Kilometer pro Tag für persönliche Einkaufswege zurückgelegt, als von Personen, die selten oder nie im Internet einkaufen. Die gleiche Tendenz zeigt sich zwar auch in Deutschland. Dies dürfte jedoch weniger auf die geringere Anzahl persönlicher Einkaufswege pro Tag zurückzuführen sein, sondern eher darauf beruhen, dass Personen, die häufig Online-Handel nutzen, in Deutschland tendenziell eher in der Stadt wohnen. Diese Personen haben in der Regel kürzere Wege zum nächsten Supermarkt, als Personen, die auf dem Land wohnen. In den USA zeigt sich schließlich keine klare Tendenz, was die pro Tag für Einkaufswege zurückgelegten Kilometer und die Nutzung von Online-Handel betrifft.

Die folgenden drei Abbildungen Abbildung 37, Abbildung 38 und Abbildung 39 veranschaulichen, wie sich die Nutzungshäufigkeit des Online-Handels in den drei Ländern auf unterschiedliche Altersgruppen verteilt.

Abbildung 37: Online-Handel nach Altersgruppen in Deutschland

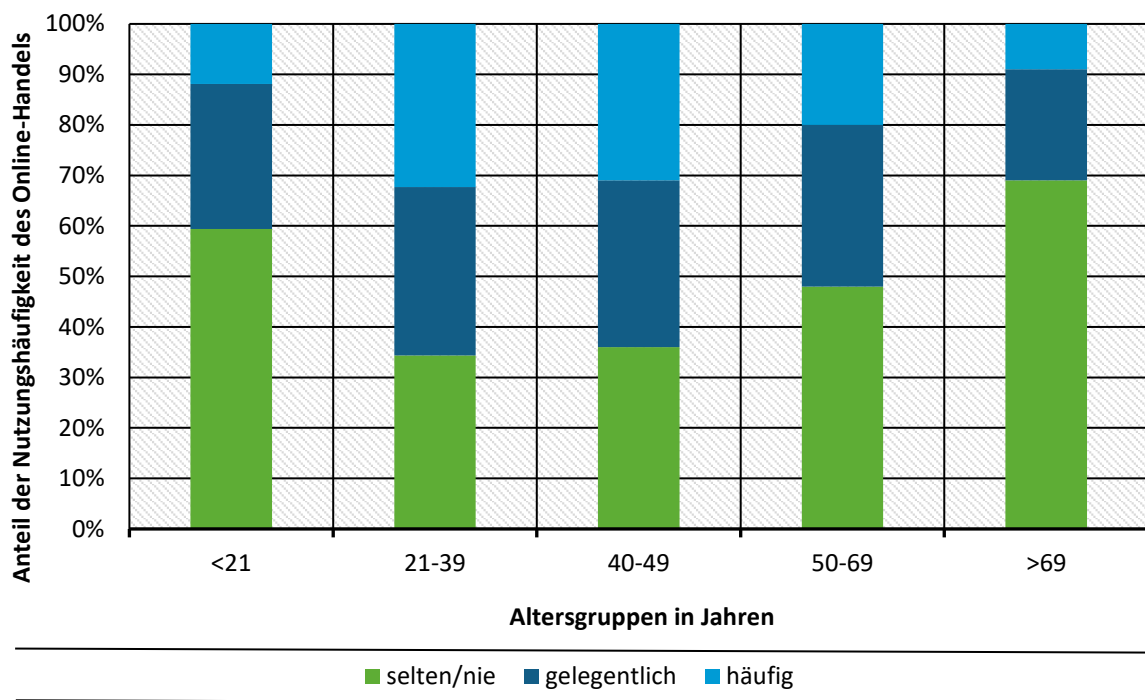


Quelle: Eigene Darstellung nach MiD (2017)

In Deutschland sind es vor allem die 21-39-Jährigen sowie die 40-49-Jährigen, die relativ häufig im Internet einkaufen. 15% bzw. 14% der jeweiligen Gruppe geben an, dies mindestens einmal pro Woche zu tun. Bei der Gruppe der Personen, die mindestens 69 Jahre alt sind, geben dahingegen mit 85% die allermeisten an, selten oder nie im Internet etwas zu kaufen (siehe Abbildung 37).

In den USA zeigen sich ähnliche Tendenzen, wenn auch auf einem insgesamt deutlich höheren Niveau, was die Nutzungshäufigkeit von Online-Handel betrifft (siehe Abbildung 38).

Abbildung 38: Online-Handel nach Altersgruppen in den USA

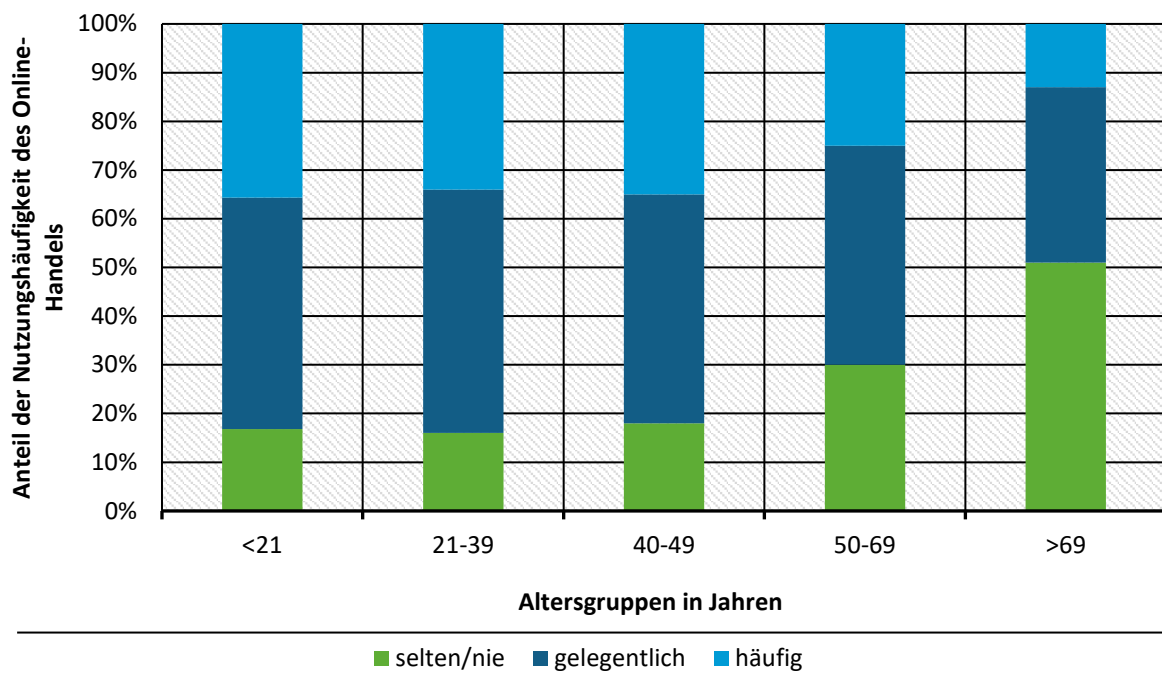


Quelle: Eigene Darstellung nach NHTS (2017)

Jeweils ungefähr ein Drittel der 21-39-Jährigen und der 40-49-Jährigen in den USA nutzt mindestens einmal pro Woche die Möglichkeit, im Internet einzukaufen. Diese Anteile sind damit ca. doppelt so hoch wie die Anteile der entsprechenden Altersgruppen in Deutschland. Auch in den USA ist der Anteil der häufigen NutzerInnen von Online-Handel bei der Gruppe der Personen, die älter als 69 Jahre sind, am geringsten. Allerdings kauft auch in dieser Personengruppe mit 9% ein deutlich höherer Anteil häufig als in Deutschland mit 3% im Internet ein (siehe Abbildung 38).

In England hingegen zeigt sich eine gänzlich andere Verteilung der Nutzungshäufigkeit des Online-Handels differenziert nach den Altersgruppen (siehe Abbildung 39).

Abbildung 39: Online-Handel nach Altersgruppen in England



Quelle: Eigene Darstellung nach NTS (2016)

Während sich der Anteil der 21-39-Jährigen und der 40-49-Jährigen, die häufig Online-Handel nutzen, ungefähr auf dem gleichen Niveau als in den USA befindet, kauft in England auch bei der Gruppe der Personen, die jünger als 21 Jahre sind, ca. jede/r Dritte häufig im Internet ein. Außerdem ist der Anteil der Personen, die selten oder nie Online-Handel nutzen, in England in allen Altersgruppen deutlich niedriger als in den USA oder in Deutschland. Selbst bei den Personen, die älter als 69 Jahre sind, nutzt ca. die Hälfte zumindest gelegentlich (mindestens einmal pro Monat) die Möglichkeit, im Internet einzukaufen.

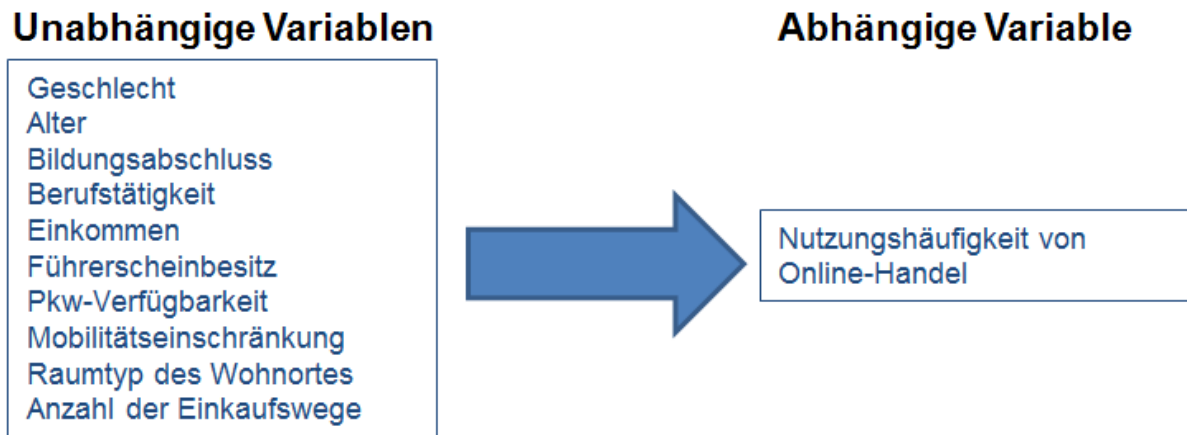
Zusammenfassend lässt sich somit vor allem festhalten, dass Online-Handel in Deutschland wesentlich geringer als in England oder in den USA verbreitet ist. Es sind in Deutschland tendenziell eher Männer und eher Personen, die in Städten wohnen, die häufig im Internet einkaufen. Nach Alter differenziert sind es in Deutschland vor allem die 21-39-Jährigen und die 40-49-Jährigen, die relativ häufig im Internet einkaufen. Über alle Altersgruppen, Wohnorte und Geschlechter hinweg ist allerdings der Anteil der Personen, die im Internet einkaufen, in Deutschland deutlich geringer als in England oder in den USA. Im Umkehrschluss besteht somit in Deutschland das größte Steigerungspotential, was den Anteil der Personen, die Online-Handel nutzen, betrifft.

Zusammenhang zwischen Online-Handel und Einkaufsverkehr

Um den Zusammenhang zwischen Online-Handel und Einkaufsverkehr genauer zu untersuchen, wurden drei ordinale Regressionsmodelle auf Basis der MiD, der NHTS und der NTS gerechnet. Die Grundidee hierbei war zu überprüfen, ob es einen Zusammenhang zwischen der Nutzungshäufigkeit von Online-Handel und der Anzahl der persönlichen Einkaufswegen gibt. Wenn zunehmender Online-Handel bereits zu einer Substitution von persönlichen Einkaufswegen in einem der drei Länder führt, dann müsste sich ein negativer Zusammenhang zwischen der Nutzungshäufigkeit von Online-Handel und der Anzahl der persönlichen Einkaufswegen zeigen.

Wie aus dem Literaturüberblick hervorging, haben bisherige Studien allerdings eher gezeigt, dass es andere, vor allem sozio-demographische Variablen sind, die die Nutzungshäufigkeit von Online-Handel bestimmen. Aus diesem Grund wurden, neben der Anzahl der Einkaufswege, neun weitere unabhängige Variablen in die Regressionsmodelle mitaufgenommen (siehe Abbildung 40).

Abbildung 40: Struktur des Regressionsmodells



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Während die meisten der unabhängigen Variablen in der MiD, der NHTS und der NTS auf unterschiedlichem Skalenniveau vorlagen und auch nicht in ein einheitliches Skalenniveau überführt werden konnten, wurden die Antwortkategorien für die abhängige Variable vereinheitlicht (siehe Tabelle 24).

Tabelle 24: Nutzungshäufigkeit von Online-Handel in den nationalen Verkehrserhebungen

Antwortkategorien in den nationalen Verkehrserhebungen			Vereinheitlichte Antwortkategorien
MiD	NHTS	NTS (Haushalts-ebene ⁸)	
≥ 1-3mal pro Woche	≥ 4 pro Monat	≥ 1-2mal pro Woche	Häufig
1-3mal pro Monat	≥ 1 & ≤ 3mal pro Monat	> 2mal pro Monat & 1-2mal pro Monat	Gelegentlich
Seltener als monatlich und fast nie	0	≤ 2mal pro Jahr	Selten/nie

Quelle: Eigene Darstellung nach NHTS (2017), NTS (2016) und MiD (2017)

⁸ Die Nutzungshäufigkeit von Online-Handel wurde in der NTS nicht auf Personen, sondern auf der Ebene von Haushalten erhoben. Die befragte Person wurde also darum gebeten, anzugeben, wie oft sie selbst oder andere Personen in ihrem Haushalt Produkte im Internet einkaufen. In der MiD und der NHTS wurde diese Frage dahingegen auf Personenebene erhoben. Bei Einpersonenhaushalten stellt dieser Unterschied kein Problem für die Auswertung dar. Bei Mehrpersonenhaushalten kann allerdings nicht abschließend beurteilt werden, inwiefern eine Vergleichbarkeit der Daten gegeben oder nicht gegeben ist. Denkbar wäre beispielsweise, dass die Befragten in der NTS nicht immer über die Internetbestellungen weiterer Haushaltsmitglieder informiert sind und somit die Frage letztendlich doch eher nur für sich beantworten. Zugleich können die Befragten in der MiD oder der NHTS natürlich auch Internetbestellungen für andere Haushaltsmitglieder vornehmen und diese bei der Frage ebenfalls angeben. Es sind also Verzerrungen in unterschiedliche Richtungen möglich, sodass die Nutzungshäufigkeit von Online-Handel nicht direkt zwischen den drei Erhebungen verglichen werden sollte. Eine Überprüfung des Einflusses anderer Faktoren auf die Nutzungshäufigkeit von Online-Handel innerhalb der einzelnen drei Datensätze, wie in diesem Bericht, ist aber problemlos möglich.

Um die Nutzungshäufigkeit von Online-Handel über die drei Erhebungen vergleichbar zu machen, wurden also drei einheitliche Kategorien gebildet. Die Kategorie „häufige Nutzung von Online-Handel“ wurde so definiert, dass sie in allen drei Erhebungen Personen umfasst, die im Durchschnitt mindestens einmal pro Woche Produkte im Internet erwerben. Die Kategorie „gelegentliche Nutzung von Online-Handel“ umfasst im Gegensatz dazu Personen, die mehrmals pro Monat im Internet einkaufen. Die Kategorie „selten/nie“ beinhaltet schließlich alle Personen, die im Durchschnitt seltener als einmal pro Monat im Internet einkaufen.

Aufgrund des somit ordinalen Skalenniveaus der vereinheitlichten abhängigen Variablen wurde eine ordinale Regressionsanalyse durchgeführt, um den Einfluss der in Abbildung 40 dargestellten Faktoren auf die Nutzungshäufigkeit von Online-Handel zu untersuchen. Dabei wird gemäß dem Prinzip der ordinalen Regression angenommen, dass der direkt beobachteten ordinalen abhängigen Variable Y eine unbeobachtete, latente metrische Variable Y^* zugrunde liegt, die nach folgender Gleichung geschätzt werden kann:

$$Y_i^* = \sum_{k=1}^K \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i$$

wobei:

- β_k : Dem Regressionskoeffizienten für die Variable k ,
- X_{ki} : Der unabhängigen Variable k für das Individuum i und
- ε_i : Dem Fehlerterm für das Individuum i , der einer logistischen Verteilung mit Mittelwert 0 (und Varianz $\pi^2/3$) folgt.

Aus den geschätzten Werten der latenten Variable Y^* können wiederum über Schwellenwerte, die ebenfalls geschätzt werden müssen, die tatsächlichen Ausprägungen der abhängigen Variable Y bestimmt werden:

$$Y_i = 1 \text{ ("selten/nie")} \text{ wenn } Y_i^* \leq \kappa_1$$

$$Y_i = 2 \text{ ("gelegentlich")} \text{ wenn } \kappa_1 \leq Y_i^* \leq \kappa_2$$

$$Y_i = 3 \text{ ("häufig")} \text{ wenn } Y_i^* \geq \kappa_2$$

Die ordinale Regressionsanalyse ermöglicht somit, den Einfluss der unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable zu modellieren. Folgende Tabelle 25 veranschaulicht die auf Basis der drei Regressionsanalysen identifizierten Einflüsse⁹.

Tabelle 25: Ergebnisübersicht der Regressionsanalysen

Land	Unabhängige Variable	Abhängige Variable
Deutschland	Geschlecht (Frau) Alter (-) Bildungsabschluss (+) Berufstätigkeit (ja) Einkommen (+) Führerscheinbesitz Pkw-Verfügbarkeit (ja) Mobilitätseinschränkung (nein)	Nutzungshäufigkeit von Online-Handel

⁹ Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse aller drei Regressionsanalysen befindet sich aus Gründen der Übersichtlichkeit im Anhang.

Land	Unabhängige Variable	Abhängige Variable
	Raumtyp des Wohnortes Anzahl der Einkaufswege	
USA	Geschlecht (Frau) Alter (-) Bildungsabschluss (+) Berufstätigkeit (ja) Einkommen (+) Führerscheinbesitz (ja) Pkw-Verfügbarkeit (ja) Mobilitätseinschränkung (nein) Raumtyp des Wohnortes (ländlich) Anzahl der Einkaufswege (+)	Nutzungshäufigkeit von Online-Handel
England	Geschlecht Alter (-) Bildungsabschluss Berufstätigkeit Einkommen (+) Führerscheinbesitz Pkw-Verfügbarkeit Mobilitätseinschränkung Raumtyp des Wohnortes (ländlich) Anzahl der Einkaufswege	Nutzungshäufigkeit von Online-Handel

Fett = signifikanter Einfluss, + / - = positiver / negativer Einfluss, () = Antwortkategorie, die positiven Einfluss ausübt
Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Die drei Regressionsanalysen deuten darauf hin, dass es (bisher) weder in Deutschland, noch in den USA oder in England in größerem Ausmaß zu einer Substitution von persönlichen Einkaufswegen durch Online-Handel gekommen ist. Die durchschnittliche Anzahl der persönlichen Einkaufswege, die eine Person pro Tag zurücklegt, hat in Deutschland und in England keinen signifikanten Einfluss auf die Nutzungshäufigkeit von Online-Handel. In den USA verläuft der Einfluss genau entgegen einer Substitution: Je mehr persönliche Einkaufswege eine Person pro Tag im Durchschnitt zurücklegt, desto häufiger nutzt sie auch die Möglichkeiten des Online-Handels.

Insgesamt scheint aber die Nutzungshäufigkeit von Online-Handel eher von soziodemografischen Einflussfaktoren als von der Anzahl persönlicher Einkaufswege abzuhängen. In allen drei Ländern üben das Alter und das Einkommen einen signifikanten Einfluss aus. So nimmt sowohl in Deutschland als auch in den USA und in England die Nutzungshäufigkeit von Online-Handel mit zunehmendem Alter ab. Beim Einkommen hingegen lässt sich in allen drei Ländern ein positiver Zusammenhang feststellen: Je höher das Einkommen, desto öfter wird im Internet eingekauft.

Das Geschlecht, der Bildungsabschluss, die Berufstätigkeit, die Pkw-Verfügbarkeit und die Mobilitätseinschränkung üben dahingegen nur in Deutschland und USA einen signifikanten Einfluss auf die Nutzungshäufigkeit aus. Frauen, Personen mit höherem formalem Bildungsabschluss und Berufstätige nutzen sowohl in Deutschland als auch in den USA stärker die Möglichkeit, im Internet einzukaufen, als Männer, Personen mit niedrigerem formalem Bildungsabschluss und Nicht-Berufstätige.

Pkw-Verfügbarkeit und Mobilitätseinschränkungen wirken dagegen in den USA und in Deutschland in unterschiedliche Richtungen. Während in Deutschland die Nutzungshäufigkeit von Online-Handel höher ist, wenn ein Pkw verfügbar ist und keine Mobilitätseinschränkung vorliegt, steigt in den USA die Nutzungshäufigkeit von Online-Handel, wenn kein Pkw verfügbar ist, aber eine Mobilitätseinschränkung vorliegt. Dies spricht dafür, dass in den USA durchaus bereits in Teilen eine gezielte Substitution von persönlichen Einkaufswegen durch Interneteinkäufe stattfindet und zwar bei der Gruppe der Mobilitätseingeschränkten, denen kein Auto zur Verfügung steht.

Auch der positive Einfluss des Wohnortes im ländlichen Raum in den USA und in England könnte darauf hindeuten, dass es hier zumindest zum Teil zu einer Substitution von persönlichen Einkaufswegen durch Interneteinkäufe kommt. Während andere Studien zu dem Ergebnis kamen, dass Online-Handel vor allem von technik- und internetaffinen Menschen in urbanen Räumen genutzt wird, zeigen diese Ergebnisse, dass es in den USA und England eher die Bevölkerung im ländlichen Raum ist, die verstärkt die Möglichkeit des Einkaufs im Internet nutzt.

3.3 Theoriebasiertes Konzept zur Substituierbarkeit von Einkaufsverkehren durch Online-Handel nach Einkaufsfällen

Wie dem Literaturüberblick in Unterkapitel 3.1.1 entnommen werden kann, sind die Wirkungszusammenhänge zwischen Digitalisierung und Einkaufsverhalten vielfältig und komplex. So gibt es beispielsweise bereits vollständig digitalisierte Produkte, wie Bücher, CDs, Zugfahrkarten oder auch Konzerttickets, bei denen ein Online-Einkauf den persönlichen Weg zu einem der entsprechenden Geschäfte vollständig ersetzen kann. Zugleich gibt es das Konzept des Multi-Channeling, bei dem nicht klar ist, ob die zunehmende Internetnutzung der Bevölkerung zu mehr Online-Handel oder zu mehr persönlichen Einkaufswegen führt. Schließlich gibt es bestimmte Produktgruppen, wie insbesondere Lebensmittel, bei denen der Erlebnisfaktor eine große Rolle spielt, sodass hier der Online-Handel im Vergleich zu anderen Bereichen (noch) relativ schwach ausgeprägt ist. Außerdem können ohnehin anfallende Wege, wie beispielsweise Arbeitswege, mit persönlichen Einkaufswegen kombiniert werden, was das Interesse an Online-Handel schmälern kann.

Um dennoch eine Quantifizierung des Substitutionspotentials persönlicher Einkaufswege durch häufigere Online-Einkäufe vornehmen zu können, sollen im Folgenden Standardeinkaufsfälle definiert werden. Dabei wird bewusst der Begriff des Standardeinkaufsfalles und nicht der des Warenkorb verwendet. Ein Warenkorb bezeichnet „die Menge an Waren und Gütern, die statistisch den typischen Verbrauch eines privaten Haushalts innerhalb eines bestimmten Zeitraums darstellt“ (BpB 2019a). Der Warenkorb, der den Berechnungen des Verbraucherindex des Statistischen Bundesamtes zugrunde liegt, enthält beispielsweise 700 ausgewählte Waren und Dienstleistungen (ebd.). Diese präzise Aufschlüsselung nach spezifischen Waren wird benötigt, um eventuelle Veränderungen in den Lebenserhaltungskosten der Verbraucher über die Jahre möglichst genau berechnen zu können (BpB 2019b).

Die vorliegende Studie zielt jedoch nicht auf die Erfassung eventueller Veränderungen der Lebenserhaltungskosten der Verbraucher ab, sondern auf die möglichst präzise Berechnung des Substitutionspotentials von persönlichen Einkaufswegen durch den Online-Handel. Im Vordergrund steht somit nicht die Erfassung des Erwerbs einzelner Waren, sondern der Wege, die für diesen Erwerb getätigt werden. Dabei muss natürlich berücksichtigt werden, dass mehrere Wege für den Einkauf unterschiedlicher Waren kombiniert werden können, wenn diese an unterschiedlichen Orten erworben werden.

Ein Standardeinkaufsfall muss somit einen im Hinblick auf die Wegelänge durchschnittlichen Weg zum Erwerb einer bestimmten Kombination an Waren abbilden. Allerdings wurden im Rahmen einer Literaturrecherche im Stand der Forschung keine wissenschaftlichen Studien mit der Forschungsfrage gefunden, welche konkreten Produkte bei einem typischen Einkaufsweg gekauft und ob nur ein oder mehrere Geschäfte hierfür aufgesucht werden. Untersuchungen, die sich mit den Themen Einkauf und Verkehr beschäftigen, gehen nicht auf einzelne Produkte ein, sondern analysieren z.B. die Verkehrsmittelwahl auf Wegen zu unterschiedlichen Typen von Geschäften oder Geschäftskomplexen wie innerstädtischem Einzelhandel, mittelgroßen Einkaufsquartieren und sehr großen Outlet-Centern (z.B. Popovich & Handy 2015). Weitere Studien beschäftigen sich damit, die Bedeutung von Einkaufswegen für das Verkehrsaufkommen insgesamt einzuschätzen (z.B. Al Razib & Rahman 2017; Shobeirinejad et al. 2012), gehen dabei aber ebenfalls nicht auf den Kauf spezifischer Produkte pro Einkaufsweg ein.

Aus diesem Grund soll die **Definition konkreter Standardeinkaufsfälle** in der vorliegenden Studie auf Basis

1. der Unterscheidung von Produkten für den täglichen, mittelfristigen und langfristigen Bedarf,
2. spezifischer Annahmen zum Einkaufsverhalten und
3. der empirischen Ergebnisse der Online-Erhebung

vollzogen werden.

Zunächst soll somit präzisiert werden, was unter Produkten des täglichen, mittelfristigen und langfristigen Bedarfs zu verstehen ist. Allerdings konnte auch hierfür in der Literatur keine allgemeingültige Definition gefunden werden, obwohl in vielen Studien zwischen Gütern des kurz-, mittel- und langfristigen Bedarfs unterschieden wird. In der Regel wird hierbei aber implizit ein grundlegendes, allgemeines Verständnis dieser Begriffe vorausgesetzt. In der MiD (2017) wurden die Befragten beispielsweise nach dem Verkehrsmittel gefragt, das sie in der Regel für Einkäufe des „täglichen“ und des „gelegentlichen“ Bedarfs sowie für den Erwerb von „langlebigen Gütern“ nutzen. Den Befragten wurde dabei für jede Kategorie ein Beispiel vorgegeben („Lebensmittel“, „Bekleidung“ und „größere Elektrogeräte“). Ansonsten wurde ihnen aber selbst überlassen, welche Wege sie welchen Produktkategorien zuordnen.

Auch in der vorliegenden Studie wird ein pragmatischer Ansatz zur Einteilung von Produkten in Güter des täglichen, mittelfristigen und langfristigen Bedarfs verfolgt. Die Gruppierung einzelner Produkte in eine der drei Kategorien soll dabei sowohl auf Basis der empirischen Angaben der Befragten aus der Online-Erhebung bezüglich der Wegelängen und der Häufigkeit der persönlichen Einkaufswege, als auch auf Basis der folgenden zwei Annahmen vollzogen werden.

- Erstens wird davon ausgegangen, dass die meisten Menschen versuchen, **Einkäufe**, die sie gleich oder ähnlich oft, aber in unterschiedlichen Geschäften tätigen, **zu bündeln**. Jemand der dreimal pro Woche Lebensmittel und Drogerieartikel einkauft, wird somit versuchen, dies auf ein und demselben Weg zu erledigen, auch wenn er oder sie dafür unterschiedliche Geschäfte aufsuchen muss.
- Zweitens wird angenommen, dass die entsprechenden Personen versuchen, die unterschiedlichen Produktgruppen entweder im gleichen Geschäft oder zumindest in nicht allzu weit voneinander entfernten Geschäften zu erwerben, um die **Wegelänge insgesamt möglichst kurz** zu halten und unnötige Wege zu vermeiden.

Übertragen auf die vorliegende empirische Erhebung bedeuten diese Annahmen, dass Produktgruppen, für die unsere Befragten mit der gleichen Häufigkeit persönliche Einkaufswege

zurückgelegt, auf ein und demselben Weg erworben werden. Die Länge dieses Weges ergibt sich außerdem nicht aus der Addition der Wegelängen für die einzelnen Produktgruppen, da die Befragten versuchen, unnötige Wegestrecken zu vermeiden. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass die jeweils längere Wegeangabe der tatsächlichen Wegelänge entspricht oder dieser zumindest am nächsten kommt, da weitere Einkäufe in anderen Geschäften möglichst „auf dem Weg“ erledigt werden.

Um auf diese Weise Standardeinkaufsfälle zu definieren, muss somit auf Basis der empirischen Daten geprüft werden, welche Produktgruppen zusammen auf einem Weg gekauft werden und wie lang dieser Weg im Durchschnitt ist. Gleichzeitig müssen diese Standardeinkaufsfälle nach sozio-demographischen Merkmalen der jeweiligen Personengruppe, sowie nach den verschiedenen Verkehrsmitteln, mit denen die Wege zurückgelegt werden, unterschieden werden.

Diese Definition von Standardeinkaufsfällen dient letztendlich vor allem der Identifikation und Quantifizierung der Substitutionspotentiale physischer Einkaufswege durch Online-Handel.

Denn nur wenn bekannt ist,

- ▶ welche Wege zum Einkauf
- ▶ von welchen Produkten
- ▶ von welchen Personengruppen zurückgelegt werden,

kann auch ermittelt werden, wie groß das Substitutionspotential dieser Wege durch Online-Handel und den damit einhergehenden Zulieferverkehr der entsprechenden Produkte ist.

3.4 Konzeption, Durchführung und Auswertung der empirischen Befragung zum Einkaufsverhalten

Im Folgenden werden zunächst das Konzept und die Durchführung der empirischen Befragung zum Einkaufsverhalten vorgestellt. Basierend auf den Ergebnissen der Befragung wird anschließend ein empirisches Konzept zur Untersuchung des Substitutionseffektes von persönlichen Einkaufswegen durch Online-Handel erarbeitet. Auf Grundlage dieses Konzepts und der empirischen Befragung wird mittels multivariater Analysen geklärt, ob und inwieweit es in Deutschland bereits zu einer Substitution von persönlichen Einkaufswegen durch Online-Handel kommt.

3.4.1 Konzeption und Durchführung der empirischen Befragung zum Einkaufsverhalten

Auf Grundlage von der umfangreichen Literaturanalyse wurde eine empirische Befragung (Stichprobe 1.000 Personen; Online-Befragung; Befragungszeit ca. 15 min) konzipiert. Die Feldarbeit für diese Befragung wurde ausgeschrieben und an ein externes Dienstleistungsunternehmen vergeben. Nach Durchführung der Befragung erfolgen die Auswertung und die empirisch basierte Umsetzung des theoriebasierten Konzepts.

Die Online-Befragung dient zur Erhebung zusätzlicher Informationen zur Schließung bestehender Lücken in den vorliegenden Datensätzen der Mobilität in Deutschland (MiD), des Britischen National Travel Survey (NTS) und des US-amerikanischen National Household Travel Survey (NHTS). So enthält die MiD beispielsweise nur Daten für Einkäufe am jeweils abgefragten Stichtag und auch nur Angaben zur Häufigkeit des Einkaufs im Online-Handel insgesamt. Der NTS-Datensatz beinhaltet zwar mehr Daten zu Einkäufen in stationären Geschäften und im Online-Handel, allerdings liegen diese nur auf der Haushalts- und nicht auf der Personenebene vor. Ebenso liegen im NHTS-Datensatz zwar Angaben zu Online-Einkäufen vor, allerdings decken

diese bei weitem nicht alle relevanten Dimensionen ab, die im weiter oben präsentierten Literaturüberblick identifiziert wurden.

Aus diesen Gründen liegt der Fokus der Online-Befragung vor allem auf der detaillierten Erfassung des Einkaufsverhaltens sowohl im Online-Handel als auch in stationären Geschäften. Nach einer kurzen Einleitung, in welcher den (potentiell) Teilnehmenden die wichtigsten Ziele der Online-Befragung sowie die Bedeutung ihrer Teilnahme erläutert werden, folgen Fragen zu den folgenden fünf Themenbereichen.

1. Allgemeines Mobilitätsverhalten
2. Persönliche Einkaufswege nach Produktgruppen
3. Online-Bestellungen nach Produktgruppen
4. Lieferung und Versand
5. Soziodemografie

Zunächst werden den Teilnehmenden einige generelle Fragen zum Pkw-Führerscheinbesitz, zur Häufigkeit der Nutzung verschiedener Verkehrsmittel, sowie zur Anzahl der in ihrem Haushalt zur Verfügung stehenden Fahrzeuge gestellt. Anschließend folgen spezifische Fragen zum persönlichen Einkaufsverkehr. Hierbei wird die Häufigkeit des Einkaufs in stationären Geschäften, sowie die für diese Wege zurückgelegten Distanzen und die hierfür genutzten Verkehrsmittel erhoben.

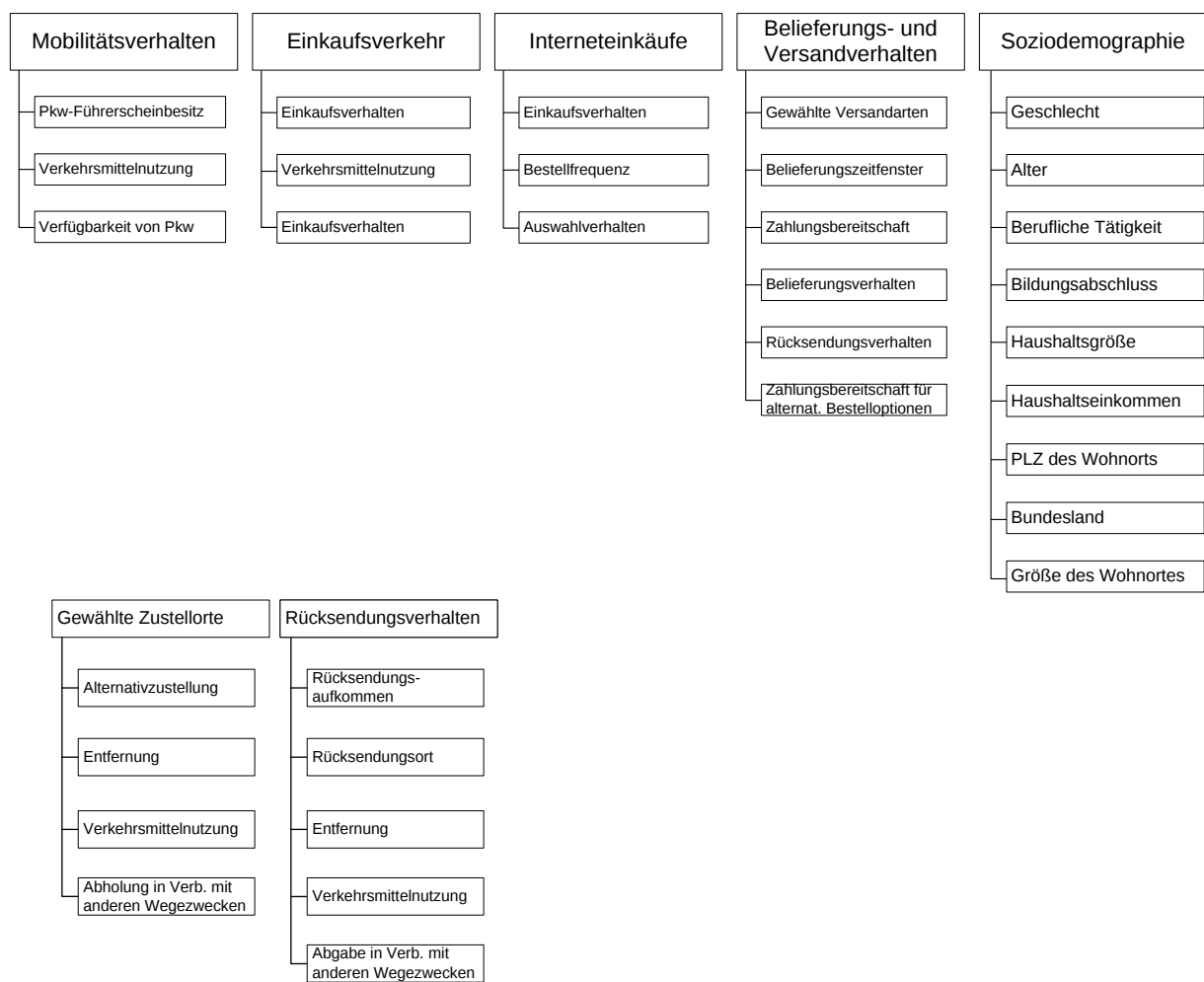
Im Themenbereich „Interneteinkäufe“ werden zunächst die Häufigkeit des Einkaufs im Online-Handel und die dabei erworbenen Produkte abgefragt.

Im Abschnitt „Belieferungs- und Versandverhalten“ werden die Teilnehmenden nach den von ihnen am häufigsten gewählten Versandarten (Standardversand, Same-Day-Lieferung etc.) und Zustellungsorten (private Anschrift, Paketstationen etc.) sowie den von ihnen bevorzugten Zustellungszeiten gefragt. Hierbei wird auch das spezifische Belieferungs- und Rücksendungsverhalten erhoben. Zusätzlich wird die Zahlungsbereitschaft für verschiedene, alternative Bestelloptionen erfragt.

Abschließend werden im letzten Abschnitt der Befragung relevante soziodemografische Angaben (u. a. Geschlecht, Berufstätigkeit, Bildungsabschluss, Haushaltgröße, Wohnort) erhoben.

In Abbildung 41 wird der strukturelle Aufbau des Fragebogens im Detail aufgezeigt.

Abbildung 41: Struktureller Aufbau des Fragebogens



Quelle: Eigene Darstellung

Zu diesen fünf Themenbereichen wurden im Zeitraum vom 10. – 21. Dezember 2018 insgesamt 1.011 Personen befragt, welche im Hinblick auf Alter, Geschlecht, Bundesland und Ortsgröße des Wohnortes die reale Bevölkerungsstruktur Deutschlands repräsentativ widerspiegeln. In Tabelle 26 wird die gezogene Stichprobe privater Personen differenziert nach den definierten soziodemographischen Kennzahlen aufgezeigt.

Tabelle 26: Repräsentative Stichprobe

Kategorie		Relativer Anteil	Absolute Zahlen
Geschlecht	Mann	50,1%	507
	Frau	49,9%	504
Altersgruppen	18-29	20,2%	204
	30-39	17,6%	178
	40-49	20,2%	204
	50-59	23,9%	242
	60-69	18,1%	183

Kategorie		Relativer Anteil	Absolute Zahlen
Ortsgröße des Wohnortes	0-19.999 EinwohnerInnen	40,3%	407
	20.000-99.999 EinwohnerInnen	27,2%	275
	≥100.000 EinwohnerInnen	32,5%	329
Bundesland	Baden-Württemberg	13,7%	139
	Bayern	16,4%	166
	Berlin	3,3%	33
	Brandenburg	2,5%	25
	Bremen	0,5%	5
	Hamburg	1,1%	11
	Hessen	7,8%	79
	Mecklenburg-Vorpommern	1,8%	18
	Niedersachsen	10,1%	102
	Nordrhein-Westfalen	20,4%	226
	Rheinland-Pfalz	5,2%	53
	Saarland	1,1%	11
	Sachsen	4,9%	50
	Sachsen-Anhalt	2,9%	29
	Schleswig-Holstein	3,6%	36
	Thüringen	2,8%	28

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Um den Aufwand für die Befragten gering zu halten und die angestrebte Stichprobengröße nicht zu gefährden, wurde die Befragung so gestaltet, dass eine Beantwortung aller Fragen nicht mehr als 15-20 Minuten in Anspruch nehmen sollte. Während die Struktur und der Inhalt der Befragung (konkrete Ausformulierung aller Fragen und Antwortmöglichkeiten) vom DLR konzipiert wurden, wurde die tatsächliche Durchführung (Online-Programmierung, Versand und Rücklaufkontrolle) bei einem externen Dienstleistungsunternehmen in Auftrag gegeben. Demzufolge wurde nach der Finalisierung des Fragebogens die Feldarbeit für die Befragung ausgeschrieben. Nach Durchführung der Befragung erfolgte zunächst die Datenaufbereitung für die weitere statistische Analyse. Die Auswertung zielt auf die empirische basierte Quantifizierung des theoriebasierten Konzeptes zur Substituierbarkeit von Einkaufsverkehren durch Online-Handel nach Einkaufsfällen ab.

3.4.2 Empiriebasiertes Konzept zur Substituierbarkeit von Einkaufsverkehren durch Online-Handel nach Einkaufsfällen

Auf Basis der erhobenen Daten im Rahmen der Primärdatenerhebung wurde ein empirisch basiertes Konzept zur Substituierbarkeit von Einkaufsverkehren durch Online-Handel nach Einkaufsfällen entwickelt. Dieses Konzept wird im Folgenden näher erläutert.

Persönliche Einkaufswege der befragten Personen

Um eine Definition zu Standardeinkaufsfällen abzuleiten, müssen die Einkaufsmuster der von uns befragten Personen untersucht werden. Damit diese wiederum im Detail analysiert werden können, wurden die Teilnehmer in der empirischen Erhebung zu Ihrem Einkaufsverhalten getrennt nach spezifischen Produktgruppen befragt. Es wurden neun Produktgruppen unterschieden, die auf Basis des Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik (NST-2007, Statistisches Bundesamt 2008) und der Warengruppen des Handelsverbandes Deutschland (Handelsverband Deutschland 2017) erstellt wurden.

1. Lebensmittel
2. Drogerieartikel, Kosmetik und Parfüm
3. Bekleidung, Schuhe und Accessoires
4. Bücher, Schreibwaren und Bürobedarf
5. Unterhaltungselektronik/Elektronikartikel, Telekommunikation, Handy und Zubehör
6. Medikamente, Arzneimittel
7. Haushaltswaren, Spielwaren
8. Möbel, Haushaltsgeräte (u. a. Kühlschrank etc.)
9. Heimwerken und Garten, Auto und Motorrad/Zubehör
10. Sonstiges (offene Antwortmöglichkeit)

Folgende Tabelle 27 gibt wieder, wie viele Personen wie häufig persönliche Einkaufswege zurücklegen, um die entsprechenden Waren aus einer der obigen Produktgruppen zu erwerben.

Tabelle 27: Häufigkeit persönlicher Einkaufswege nach Produktgruppe

Ausprägung Kategorie	Täglich	an 1-3 Tagen pro Woche	an 1-3 Tagen pro Monat	1-3 Mal im halben Jahr	Seltener oder nie	weiß nicht	keine Angabe	N
Lebensmittel	109 (11%)	809 (80%)	79 (8%)	3 (0%)	10 (1%)	0 (0%)	1 (0%)	1011 (100%)
Drogerieartikel, Kosmetik und Parfüm	10 (1%)	168 (17%)	644 (64%)	145 (14%)	42 (4%)	1 (0%)	1 (0%)	1011 (100%)
Bekleidung, Schuhe und Accessoires	7 (1%)	22 (2%)	261 (26%)	584 (58%)	130 (13%)	5 (1%)	2 (0%)	1011 (100%)
Bücher, Schreibwaren und Bürobedarf	7 (1%)	28 (3%)	211 (21%)	445 (44%)	312 (31%)	6 (1%)	2 (0%)	1011 (100%)
Unterhaltungselektronik/ Elektronikartikel, Telekommunikation, Handy und Zubehör	6 (1%)	19 (2%)	88 (9%)	414 (41%)	473 (47%)	10 (1%)	1 (0%)	1011 (100%)
Medikamente, Arzneimittel	6 (1%)	37 (4%)	294 (29%)	488 (48%)	177 (18%)	7 (1%)	2 (0%)	1011 (100%)

Ausprägung Kategorie	Täglich	an 1-3 Ta- gen pro Woche	an 1-3 Ta- gen pro Monat	1-3 Mal im halben Jahr	Seltener oder nie	weiß nicht	keine An- gabe	N
Haushaltswa- ren, Spielwa- ren	7 (1%)	20 (2%)	199 (20%)	431 (43%)	337 (33%)	15 (2%)	2 (0%)	1011 (100%)
Möbel, Haus- haltsgeräte (u. a. Kühl- schrank etc.)	4 (0%)	11 (1%)	33 (3%)	263 (26%)	684 (68%)	14 (1%)	2 (0%)	1011 (100%)
Heimwerken und Garten, Auto und Mo- torrad/Zube- hör	5 (1%)	16 (2%)	115 (11%)	388 (38%)	460 (46%)	21 (2%)	6 (1%)	1011 (100%)
Sonstiges (of- fenes Text- feld): „Hau- stier“	0 (0%)	0 (0%)	1 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (100%)

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Aus der Tabelle 27 geht hervor, dass die meisten persönlichen Einkaufswege für den Erwerb von Lebensmitteln zurückgelegt werden. 91% der von uns befragten Personen gehen mindestens einmal pro Woche persönlich Lebensmittel einkaufen. Der in Deutschland noch sehr gering ausgeprägte Online-Einkauf von Lebensmitteln birgt somit prinzipiell ein sehr großes Potential zur Substitution persönlicher Einkaufswege. Dieses Ergebnis unserer empirischen Erhebung spiegelt die Erkenntnisse aus anderen Studien wieder, die bereits in der Literaturzusammenfassung ausführlich dargestellt wurden.

Die zweitmeisten persönlichen Einkaufswege werden für den Erwerb von Drogerieartikeln, Kosmetik und Parfüm zurückgelegt. 18% der von uns Befragten machen dies mindestens einmal pro Woche und weitere 64% mindestens einmal pro Monat. Für alle anderen Produktgruppen werden weitaus weniger persönliche Einkaufswege zurückgelegt. Dennoch lassen sich bestimmte Muster erkennen. So kaufen jeweils die meisten Menschen Produkte aus den Bereichen „Haushaltswaren, Spielwaren“, „Medikamente, Arzneimittel“, „Bücher, Schreibwaren und Bürobedarf“ und „Bekleidung, Schuhe und Accessoires“ an 1-3 Tagen pro Monat ein, während Einkaufswege für die noch verbleibenden Produktgruppen „Möbel, Haushaltsgeräte (u. a. Kühlschrank etc.)“, „Heimwerken und Garten, Auto und Motorrad/Zubehör“, „Unterhaltungselektronik/Elektronikartikel, Telekommunikation, Handy und Zubehör“ von den meisten nur 1-3 Mal im halben Jahr getätigt werden.

Um das Substitutionspotential persönlicher Einkaufswege durch Online-Handel präzise abbilden zu können, wurden die Teilnehmenden der empirischen Erhebung außerdem dazu befragt, wie lang ihre persönlichen Einkaufswege für den Erwerb der jeweiligen Produkte sind (siehe Tabelle 28).

Tabelle 28: Wegelänge und Wegedauer nach Produktgruppen

Ausprägung	Wegelänge [km]*						
Kategorie	Mini- mum	1. Quar- til	Median	Durch- schnitt	3. Quar- til	Maxi- mum	N

Ausprägung	Wegelänge [km]*						
Lebensmittel	0,05	1,00	2,00	3,09	5,00	11,00	945
Drogerieartikel, Kosmetik und Parfüm	0,01	1,00	3,00	3,85	5,00	13,00	879
Bekleidung, Schuhe und Accessoires	0,30	3,00	7,00	9,34	15,00	32,00	825
Bücher, Schreibwaren und Bürobedarf	0,10	2,00	5,00	5,86	9,00	20,00	643
Unterhaltungselektronik/ Elektronikartikel, Telekommunikation, Handy und Zubehör	0,20	3,00	8,00	9,87	15	30,00	509
Medikamente, Arzneimittel	0,01	1,00	2,00	2,68	4,00	11,00	768
Haushaltswaren, Spielwaren	0,01	3,00	5,00	8,51	12,00	30,00	622
Möbel, Haushaltsgeräte (u. a. Kühlschrank etc.)	0,50	4,00	10,00	12,12	20,00	40,00	293
Heimwerken und Garten, Auto und Motorrad/Zubehör	0,50	4,00	6,25	8,44	12,00	25,00	494
Sonstiges (offenes Textfeld): „Haustier“	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	1

* Ausreißer ($> 3 \cdot \text{Quartil} + 1,5 \cdot \text{IQR}$) wurden ausgeschlossen und es wurden nur Wege betrachtet, die länger als 0km sind.

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Die größten Distanzen legen unsere Befragten im **Durchschnitt mit 12,12 km für den Erwerb von Möbeln, Haushaltsgeräten und Ähnlichem** zurück. Dies ist zugleich die Produktgruppe, in welcher am seltensten persönliche Einkaufswege getätigt werden. Die Angaben klingen inhaltlich plausibel, da es sich bei Möbeln und Haushaltsgeräten oft um relativ große Produkte handelt, die für den **langfristigen Gebrauch** gekauft werden. Für diese seltenen Wege nimmt man somit auch größere Wege in Kauf, um genau das Produkt zu erhalten, welches man haben möchte.

Für den Erwerb von Waren aus den **Produktgruppen „Lebensmittel“, „Drogerieartikel, Kosmetik und Parfüm“ und „Medikamente, Arzneimittel“** werden hingegen mit **3,09 km, 3,85 km und 2,68 km eher kurze Distanzen** zurückgelegt. Auch dies klingt plausibel, da Lebensmittel und Drogerieartikel zu den **Waren des täglichen Bedarfs** gehören. Sie werden also häufig gekauft, weshalb man möglichst kurze Wege wählt. Dies wird natürlich begünstigt durch die weitaus höhere Dichte an Supermärkten und Drogerien im Vergleich zu beispielsweise Möbelhäusern. Eine relativ hohe Dichte an Apotheken dürfte auch die kurzen Einkaufswege für Medikamente und Arzneimittel erklären. Diese werden zwar nicht in der Häufigkeit gekauft, aber auch hier sind die zurückgelegten Wege relativ kurz.

Relativ ähnliche durchschnittliche Wegelängen zeigen sich mit **zwischen 5,86 – 9,87 km außerdem in den Produktgruppen „Heimwerken und Garten, Auto und Motorrad/Zubehör“,**

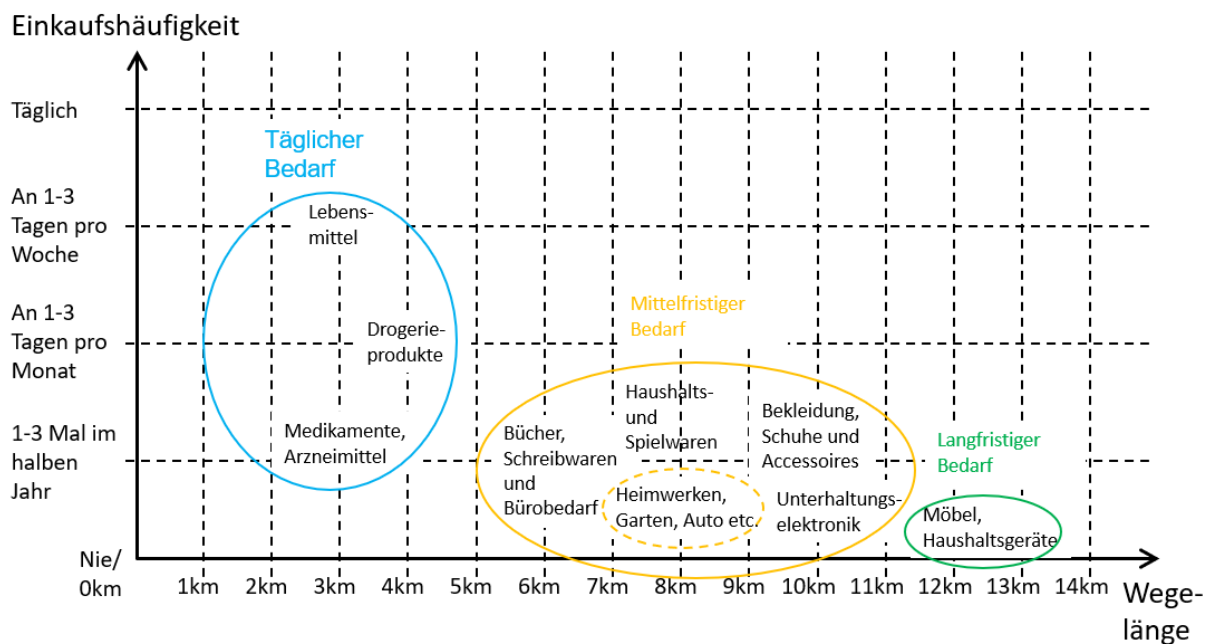
„Haushaltswaren, Spielwaren“, „Unterhaltungselektronik/Elektronikartikel, Telekommunikation, Handy und Zubehör, „Bücher, Schreibwaren und Bürobedarf“ und „Bekleidung, Schuhe und Accessoires“. Wenn man die Produktgruppe „Bücher, Schreibwaren und Bürobedarf“ ausklammert, ergeben sich für die übrigbleibenden Produktgruppen mit zwischen 8,44 – 9,87 km sogar noch ähnlichere durchschnittliche Wegelängen.

Einteilung in Güter des kurz-, mittel- und langfristigen Bedarfs

Sowohl die durchschnittlichen Wegelängen, als auch die Häufigkeiten der persönlichen Einkaufswege zeigen somit, dass es im Einkaufsverhalten große Ähnlichkeiten zwischen bestimmten Produktgruppen gibt. Diese Ähnlichkeiten beruhen in erster Linie auf den **Eigenschaften der jeweiligen Produkte bzw. ihrer Bedeutung für die Verbraucher**. So werden **Lebensmittel und Drogerieartikel z.B. täglich benötigt und teilweise auch täglich aufgebraucht**, was dazu führt, dass sie entsprechend häufig eingekauft werden müssen. Hingegen werden Produkte wie z.B. ein Sofa oder ein Kühlschrank in der Regel gekauft, um über mehrere Jahre, mitunter auch Jahrzehnte, genutzt zu werden.

Diese Ähnlichkeiten zwischen den einzelnen Produktgruppen werden auch in der Abbildung 42 aufgezeigt, in welcher die durchschnittliche Wegelänge auf der X-Achse und die Einkaufshäufigkeit der am häufigsten genannten Kategorie auf der Y-Achse eingetragen sind.

Abbildung 42: Einkaufshäufigkeit versus Wegelänge



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Abbildung 42 verdeutlicht, dass sich die neun Produktgruppen nach Wegelänge und Einkaufshäufigkeit in relativ homogene Gruppen einteilen lassen. Zu den **Gütern des täglichen Bedarfs** sollen dementsprechend im Folgenden

- Lebensmittel,
- Drogerieartikel, Kosmetik und Parfüm,
- Medikamente und Arzneimittel

gezählt werden. Die Güter für den mittelfristigen Bedarf umfassen hingegen

- ▶ Bekleidung, Schuhe und Accessoires,
- ▶ Bücher, Schreibwaren und Bürobedarf,
- ▶ Unterhaltungselektronik/Elektronikartikel, Telekommunikation, Handy und Zubehör sowie
- ▶ Haushaltswaren, Spielwaren.

Die Produktgruppe der „Heimwerken und Garten, Auto und Motorrad/Zubehör“ kann auf Basis der Wegelänge und Einkaufshäufigkeit auch den Gütern des mittelfristigen Bedarfs zugeordnet werden. Wir gehen aber eher davon aus, dass die Waren dieser Produktgruppe tendenziell eher in anderen Geschäften als z.B. Bücher, Bekleidung oder Unterhaltungselektronik erworben werden, sodass diese Produktgruppe separat betrachtet werden soll. Die Produktgruppe der „Möbel, Haushaltsgeräte (u. a. Kühlschrank etc.)“ zählen wir hingegen zu den Gütern des langfristigen Bedarfs, da sie sich vor allem im Hinblick auf die Wegelänge deutlich von den anderen Produktgruppen abgrenzen.

Was diese Einteilungen und unsere bereits zuvor formulierten Annahmen konkret bedeuten, kann am Beispiel von Gütern des täglichen Bedarfs gezeigt werden. Dabei gehen wir aufgrund der hohen Dichte an Supermärkten, Drogerien und Apotheken, davon aus, dass Waren aus den Produktgruppen „Lebensmittel“, „Drogerieartikel, Kosmetik und Parfüm“ und „Medikamente, Arzneimittel“ in den allermeisten Fällen auf ein und demselben Einkaufsweg erworben werden. Da Drogerien auch nicht-verschreibungspflichtige Arzneimittel anbieten und in Supermärkten auch viele Drogerieartikel erworben werden können, kann sogar vermutet werden, dass viele dieser Produkte in dem gleichen Geschäft gekauft werden. Ein Blick in die empirischen Ergebnisse bekräftigt diese Vermutung: Knapp über 50% unserer Befragten geben an, dass sie für den persönlichen Einkaufsweg für „Drogerieartikel, Kosmetik und Parfüm“ exakt (auf zwei Nachkommastellen) die gleiche Distanz zurücklegen wie für den persönlichen Einkauf von Lebensmitteln.

Da persönliche Einkaufswege am häufigsten für den Erwerb von Lebensmitteln zurückgelegt werden, gehen wir des Weiteren davon aus, dass auch „Drogerieartikel, Kosmetik und Parfüm“ und „Medikamente, Arzneimittel“ auf diesen Wegen erworben werden und hierfür somit keine weiteren Wege anfallen. Hierdurch dürften wir sowohl die Anzahl der tatsächlich getätigten persönlichen Einkaufswege als auch deren Länge unterschätzen, da nicht alle Befragten ihre Einkäufe von Lebensmitteln, Drogerieartikeln und Medikamenten auf ein und demselben Weg erledigen werden. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, soll als durchschnittliche Wegelänge für einen Einkauf von Gütern des täglichen Bedarfes, der **größte Wert der durchschnittlichen Wegelängen für die drei Produktgruppen** angesetzt werden.

Für **Güter des täglichen Bedarfs** ergibt sich somit, dass 11% täglich, 80% an 1-3 Tagen pro Woche und 8% an 1-3 Tagen pro Monat persönliche Einkaufswege von **im Durchschnitt 3,85 km** zurücklegen (siehe Tabelle 27 und Tabelle 28). Die verbleibenden ein Prozent führen persönliche Einkaufswege zum Erwerb von Gütern des täglichen Bedarfs entweder seltener oder gar nicht durch. Generell werden im Folgenden nur Einkaufswege betrachtet, die mindestens 1-3 Mal im halben Jahr getätigt werden, da bei allen niedrigeren Angaben eine präzise Quantifizierung nicht möglich ist und der Beitrag zum Verkehrsaufkommen gering sein dürfte.

Analog zu den Gütern des täglichen Bedarfs, wird auch bei den **Gütern des mittelfristigen Bedarfs** die Anzahl der persönlichen Einkaufswege aus der Produktgruppe übernommen, in welcher diese am häufigsten getätigt werden. Ebenso wird der längste durchschnittliche Einkaufsweg angesetzt. Für Güter des mittelfristigen Bedarfs ergibt sich somit, dass vornehmlich **26% an**

1-3 Tagen pro Monat und 58% 1-3 Mal pro halben Jahr persönliche Einkaufswege mit einer **durchschnittlichen Länge von 9,87 km** zurücklegen. 13% führen keine persönlichen Einkaufswege in relevantem Ausmaß durch, um Güter des mittelfristigen Bedarfs zu erwerben.

Für die separat betrachtete Produktgruppe „**Heimwerken und Garten, Auto und Motorrad/Zubehör**“ sowie für die **Güter des langfristigen Bedarfs**, welche mit „Möbel, Haushaltsgeräte (u. a. Kühlschrank etc.)“ auch nur eine Produktgruppe umfassen, können die entsprechenden Einkaufshäufigkeiten und Wegelängen direkt den Tabelle 27 und Tabelle 28 entnommen werden. Demnach legen **11% an 1-3 Tagen pro Monat und 38% 1-3 Mal pro halben Jahr** persönliche Einkaufswege mit einer **durchschnittlichen Länge von 8,44 km** zurück, um Waren der Produktgruppe „Heimwerken und Garten, Auto und Motorrad/Zubehör“ zu erwerben. Für den Erwerb von Gütern des langfristigen Bedarfs hingegen legen **26% 1-3 Mal pro halben Jahr** persönliche Einkaufswege mit einer **durchschnittlichen Länge von 12,12 km** zurück.

Standardeinkaufsfälle und Substitutionspotential

Die bisherigen Ausführungen sollten vor allem der Illustration der Vorgehensweise bei der Definition von Standardeinkaufsfällen dienen. Standardeinkaufsfälle sollen somit im Hinblick auf **Gütergruppen** und die **Häufigkeit der persönlichen Einkaufswege** samt **deren Länge** unterschieden werden. Zusätzlich ist es sinnvoll, das Einkaufsverhalten getrennt nach der **Ortsgröße des Wohnortes** der Befragten zu betrachten. Hierbei unterscheidet sich die Dichte an entsprechenden Geschäften mitunter erheblich zwischen ländlichen und urbanen Räumen, was wiederum Einfluss auf die Länge der jeweiligen Einkaufswege hat.

Tabelle 29 gibt die definierten **Standardeinkaufsfälle nach Ortsgröße, Häufigkeit und Wegelänge** wieder. Im Hinblick auf die jeweils zurückgelegten **Entfernungen** wurden auch die **Durchschnittswerte pro Tag und Jahr** berechnet. Hierfür wurde angenommen, dass bei den Kategorien „an 1-3 Tagen pro Woche“, „an 1-3 Tagen pro Monat“ und „1-3 Mal im halben Jahr“, an jeweils **zwei Tagen pro Woche, pro Monat bzw. im halben Jahr** die entsprechenden Einkaufswege vollzogen wurden. Diese Werte wurden dementsprechend zur Berechnung der durchschnittlichen Entfernung pro Tag und pro Jahr herangezogen.

Tabelle 29: Standardeinkaufsfälle nach Ortsgröße, Häufigkeit und Wegelänge

Ausprägung	Ortsgröße des Wohnortes	Häufigkeit*				Entfernung**		
		Täglich	an 1-3 Tagen pro Woche	an 1-3 Tagen pro Monat	1-3 Mal im halben Jahr	Wegelänge (Ø km)	Km pro Person pro Tag (Ø)* **	Km pro Person pro Jahr (Ø)***
Täglicher Bedarf (Lebensmittel, Drogerieartikel, Kosmetik und Parfüm, Medikamente, Arzneimittel)	<20.000	9%	80%	8%	1%	4,92	0,40	145,47
	20.000 – 99.999	12%	80%	8%	0%	3,67	0,33	118,52
	>=100.000	12%	80%	7%	0%	2,85	0,25	91,86
Mittelfristiger Bedarf (Bekleidung, Schuhe und Accessoires, Unterhaltungselektronik/Elektronikartikel, Telekommunikation, Handy und	<20.000	1%	2%	23%	59%	14,44	0,14	49,43
	20.000 – 99.999	0%	4%	26%	59%	8,46	0,08	27,20
	>=100.000	1%	2%	29%	55%	5,68	0,06	21,29

Ausprägung	Ortsgröße des Wohnortes	Häufigkeit*				Entfernung**		
Zubehör, Haushaltswaren, Spielwaren)								
Mittelfristiger Bedarf (Heimwerken und Garten, Auto und Motorrad/Zubehör)	<20.000	1%	2%	14%	41%	10,40	0,08	28,03
	20.000 – 99.999	1%	3%	11%	38%	6,93	0,05	19,02
	>=100.000	0%	1%	9%	36%	6,83	0,02	7,98
Langfristiger Bedarf (Möbel, Haushaltsgeräte (u. a. Kühlschrank etc.)	<20.000	1%	0%	3%	23%	15,35	0,06	20,34
	20.000 – 99.999	0%	3%	3%	27%	12,04	0,04	14,87
	>=100.000	0%	1%	3%	29%	9,06	0,02	6,64

* Berechnungsgrundlage war jeweils die Produktgruppe mit der höchsten Häufigkeit

** Berechnungsgrundlage war jeweils die Produktgruppe mit dem längsten durchschnittlichen Einkaufsweg. Hierbei wurden Ausreißer ($> 3 \cdot \text{Quartil} + 1,5 \cdot \text{IQR}$) ausgeschlossen und es wurden nur Wege betrachtet, die länger als 0km sind.

*** Berechnet auf Basis von jeweils 2 Tagen für die Kategorien 1-3 Tage pro Woche, 1-3 Tage pro Monat und 1-3 Mal im halben Jahr.

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

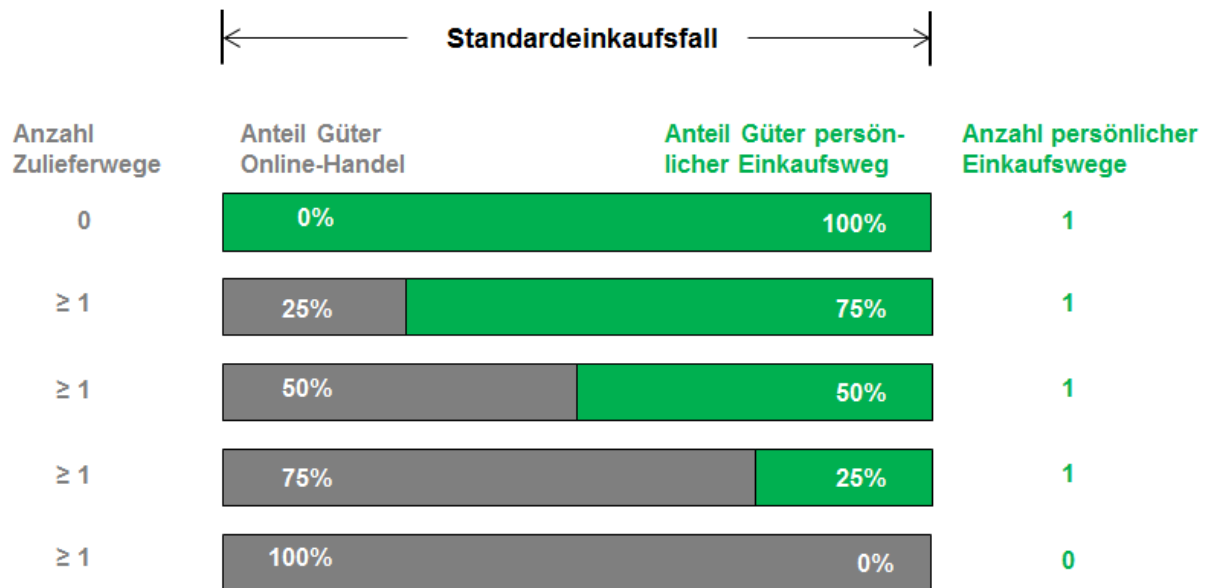
Die Werte der Tabelle 29 stellen sozusagen das **maximale Substitutionspotential** von persönlichem Einkaufsverkehr durch Online-Handel dar. Es können somit beispielsweise pro Person im Durchschnitt maximal 145,47 km an persönlichen Einkaufswegen für Güter des täglichen Bedarfs pro Jahr in Orten mit weniger als 20.000 EinwohnerInnen eingespart werden, wenn die zu dieser Zielgruppe gehörenden Personen ihre gesamten Einkäufe von Gütern des täglichen Bedarfs durch Online-Handel erledigen. Dahingegen fällt das maximale Einsparpotential bei persönlichen Einkaufswegen für Güter des täglichen Bedarfs in urbanen Gebieten mit mindestens 100.000 EinwohnerInnen mit im Durchschnitt 91,86 km pro Person deutlich geringer aus. Menschen in urbanen Gebieten gehen zwar etwas häufiger für Güter des täglichen Bedarfs einkaufen, legen dabei aber deutlich kürzere Wege als Menschen in ländlichen Gegenden zurück.

Die gleichen Tendenzen zeigen sich auch bei persönlichen Einkaufswegen für den Erwerb von Gütern des mittel- oder langfristigen Bedarfes. Aufgrund der jeweils deutlich kürzeren durchschnittlichen Länge eines persönlichen Einkaufsweges, fällt auch das maximale Einsparpotential pro Person in urbanen Gebieten deutlich niedriger als in ländlichen Gegenden aus. So legen Personen in urbanen Gebieten beispielsweise pro Jahr im Durchschnitt 6,64 km zurück, um Güter des langfristigen Bedarfs zu erwerben, während Personen in ländlichen Gegenden hierfür mit 20,34 km im Durchschnitt ungefähr eine dreimal längere Strecke bewältigen.

Dieses jeweils maximale Substitutionspotential könnte allerdings nur ausgeschöpft werden, wenn tatsächlich **alle Güter eines persönlichen Einkaufes durch Online-Bestellungen ersetzt werden**. Dies ist deshalb notwendig, weil davon ausgegangen werden kann, dass wenn z.B. „nur“ 95% der Güter eines Einkaufes für den täglichen Bedarfs online erworben werden, den noch 5% an benötigten Gütern verbleiben, für die dann weiterhin ein persönlicher Einkaufsweg anfallen würde. **Wir nehmen also an, dass ein persönlicher Einkaufsweg erst dann nicht mehr angetreten wird, wenn tatsächlich alle Güter, die auf diesem Weg erworben werden sollen, stattdessen online bestellt werden.** Solange ein bestimmter Einkauf nur in Teilen durch Online-Handel ersetzt wird, bleibt der persönliche Einkaufsweg bestehen und es fallen zusätzlich Zulieferwege an.

Abbildung 43 zeigt unser Verständnis der Substituierbarkeit eines persönlichen Einkaufsweges bei einem Standardeinkaufsfall durch Online-Handel.

Abbildung 43: Substitution eines Standardeinkaufsfalles



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Dieses Beispiel verdeutlicht die Notwendigkeit, das Substitutionspotential von persönlichem Einkaufsverkehr durch Online-Handel **je individuellem Einkaufsfall** zu betrachten.

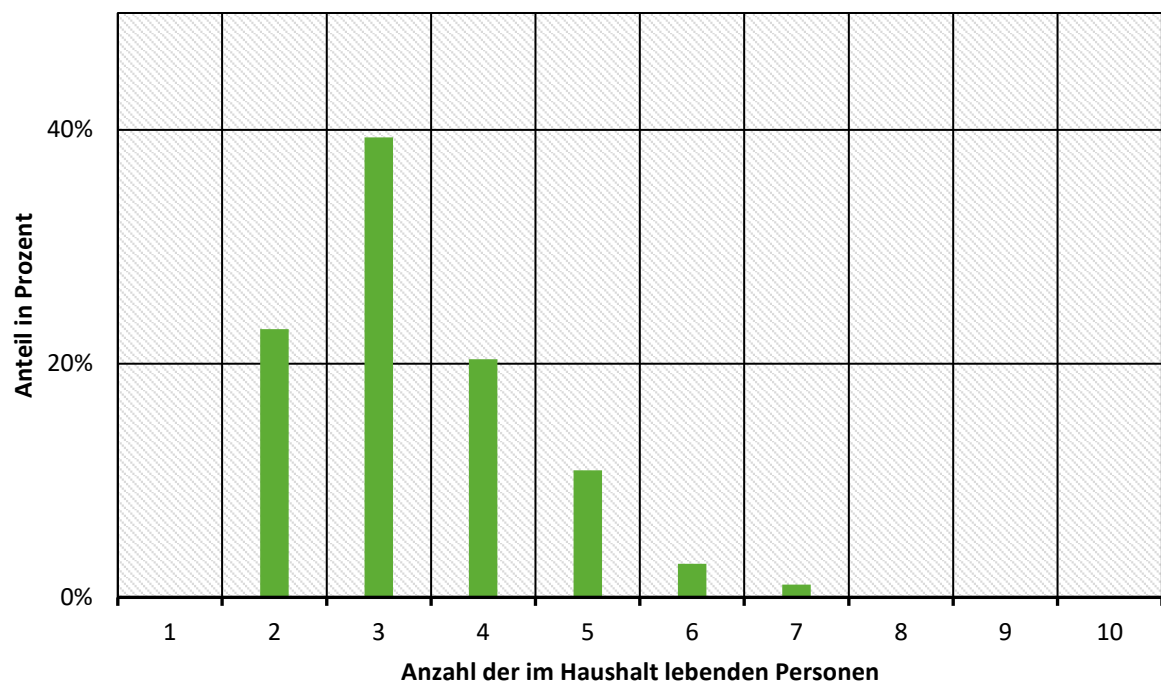
3.4.3 Ausgewählte Ergebnisse der deskriptiven Analyse

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Ergebnisse der deskriptiven Analyse aufgezeigt. Zunächst werden die Charakteristika der Befragten beschrieben. Danach erfolgt die Beschreibung des Einkaufsverhaltens, des Online-Bestellverhaltens sowie des Belieferungs- und Versandverhaltens privater NutzerInnen. Anschließend werden die Ergebnisse zu den bivariaten und multivariaten Analyse zur Identifizierung von Zusammenhängen präsentiert.

3.4.3.1 Soziodemographische und -ökonomische Charakteristika der ProbandInnen

Im Folgenden werden zunächst die von uns befragten Personen genauer im Hinblick auf soziodemographische Eigenschaften und ihr Mobilitätsverhalten beschrieben. Wie Abbildung 44 entnommen werden kann, leben mit 39% die meisten der Befragten in Dreipersonenhaushalten. Jeweils 23% bzw. 20% leben außerdem in Zwei- bzw. Vierpersonenhaushalten. Etwas überraschend lebt keine der von uns befragten Personen alleine.

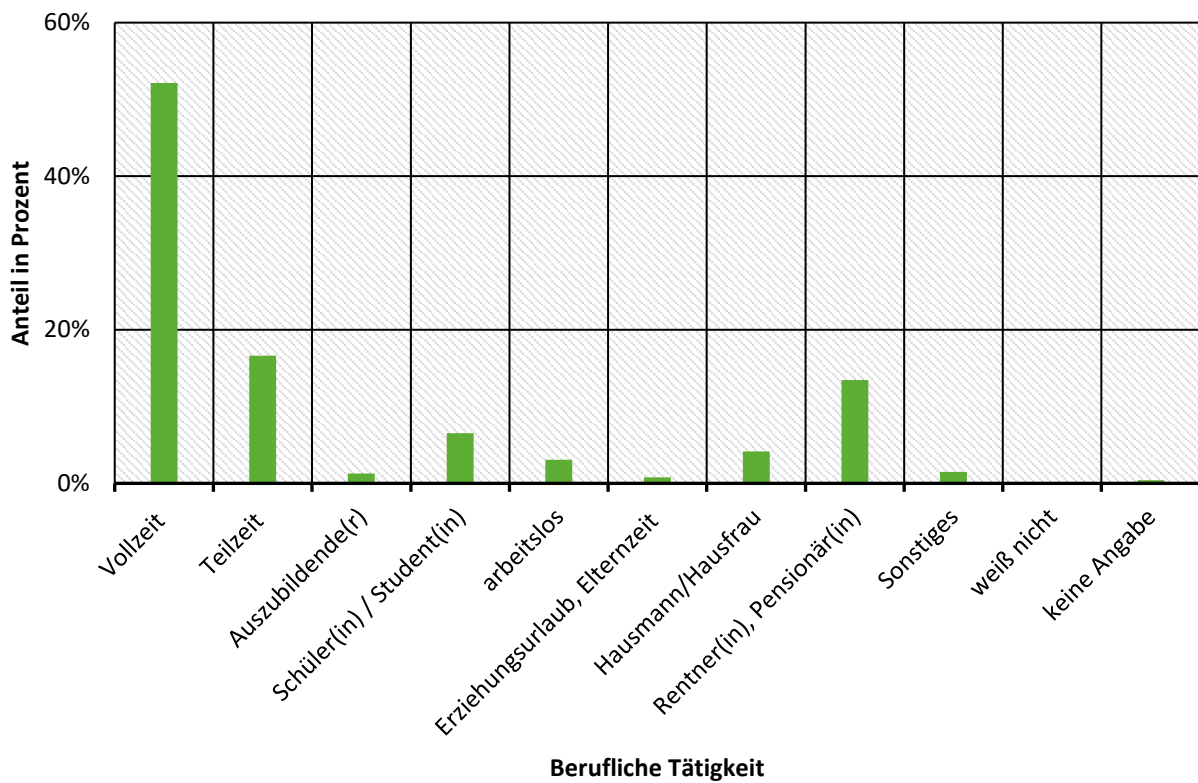
Abbildung 44: Anzahl der im Haushalt lebenden Personen



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Mit 52% ist etwas mehr als die Hälfte der Befragten in Vollzeit berufstätig. Weitere 17% sind teilzeitberufstätig, 13% sind in Rente und 7% gaben an SchülerInnen bzw. Studierende zu sein. Nur 4% bzw. 3% waren zum Zeitpunkt der Befragung hauptsächlich Hausmann oder Hausfrau bzw. arbeitslos (siehe Abbildung 45:).

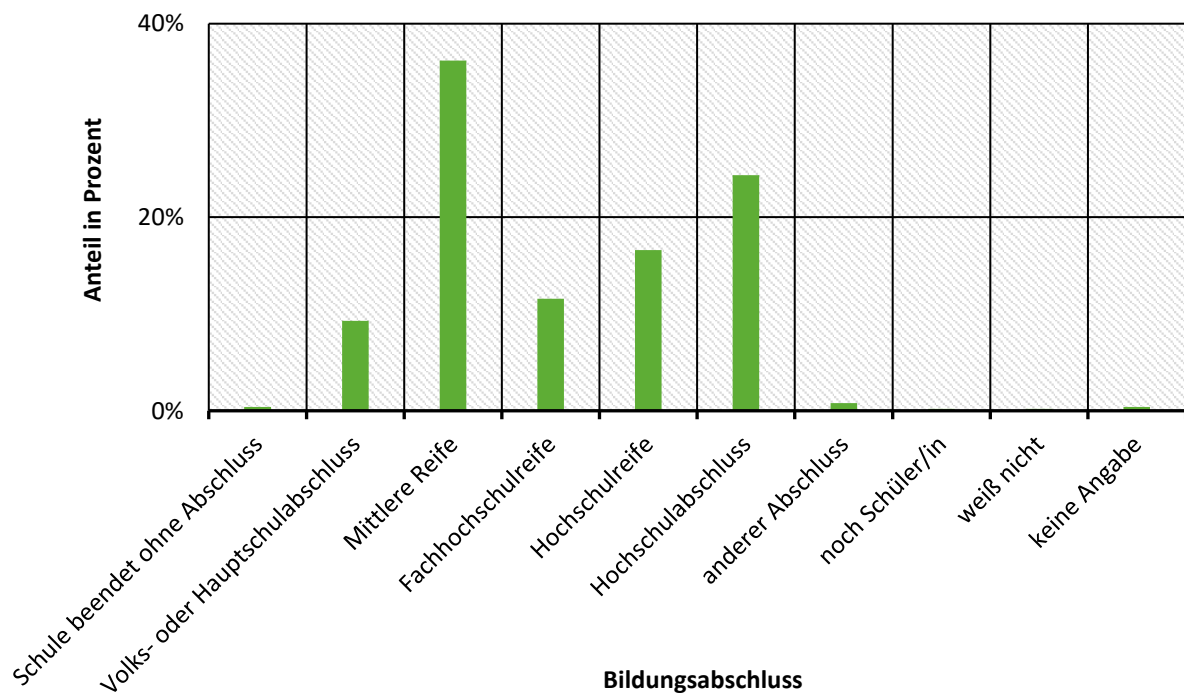
Abbildung 45: Berufliche Tätigkeit



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Bei etwas mehr als einem Drittel der von uns befragten Personen stellt die mittlere Reife den höchsten formalen Bildungsabschluss dar. 24% verfügen über einen Hochschulabschluss und 17% bzw. 12% über die Hochschul- bzw. Fachhochschulreife. 9% haben einen Volks- oder Hauptschulabschluss (siehe Abbildung 46).

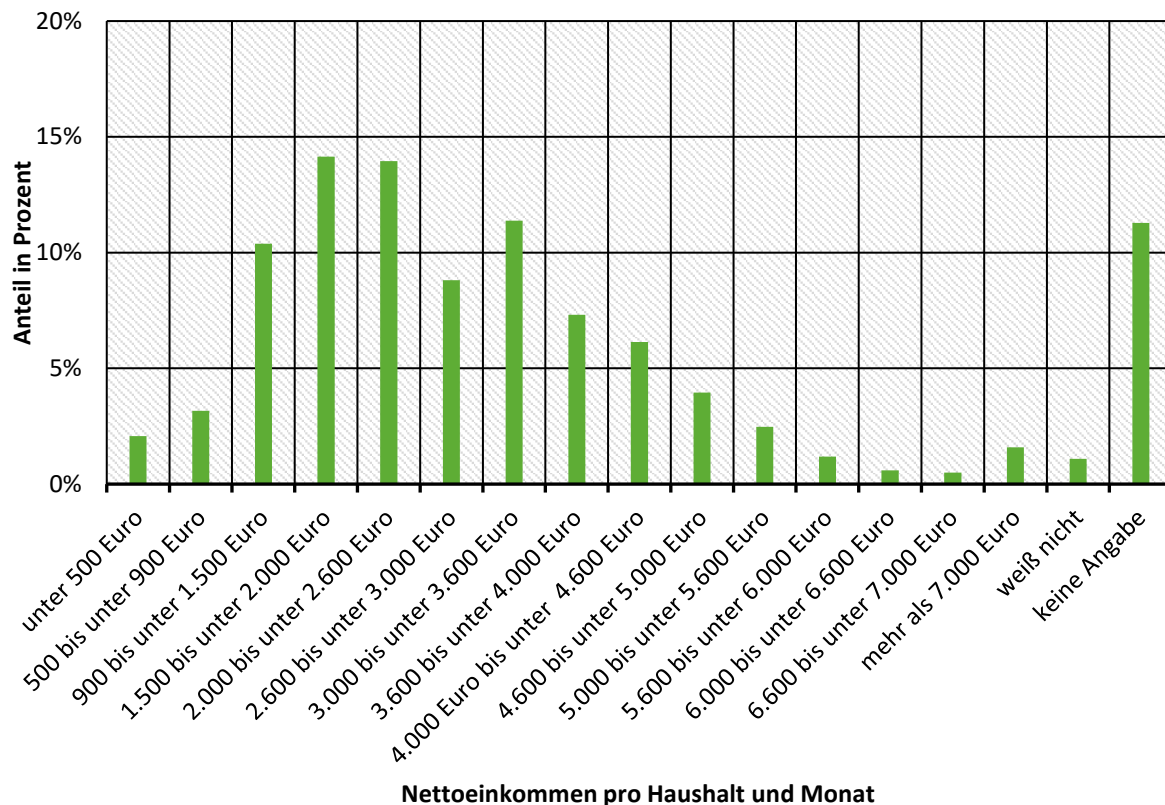
Abbildung 46: Höchster formaler Bildungsabschluss



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Mit 75% verfügen die meisten der von uns Befragten über ein Haushaltsnettoeinkommen zwischen 900 und 5.000 € pro Monat. Die Kategorien, die am häufigsten genannt wurden, waren hierbei 1.500 bis unter 2.000 € und 2.000 bis unter 2.600 € mit jeweils 14% (siehe Abbildung 47).

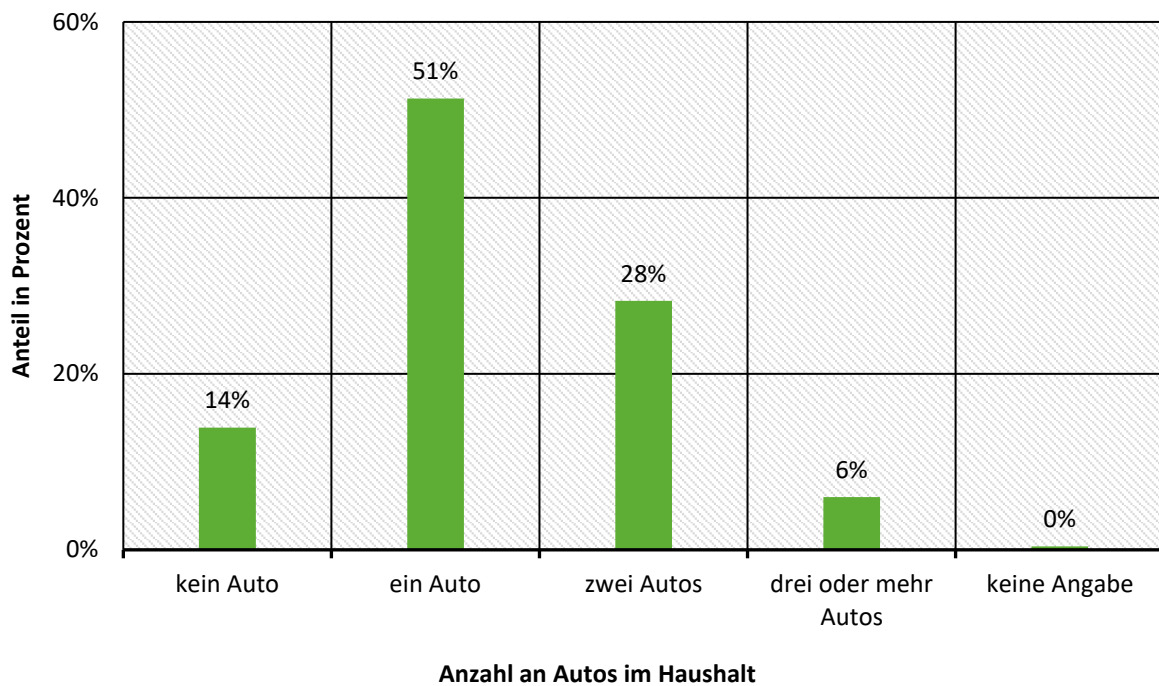
Abbildung 47: Nettoeinkommen pro Haushalt und Monat



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Die große Mehrheit der von uns befragten Personen lebt in Haushalten, in denen mindestens ein Auto vorhanden ist. Bei fast genau der Hälfte handelt es sich um Haushalte mit einem Auto, während 28% in Haushalten mit zwei Autos leben und 6% in Haushalten mit drei oder mehr Autos. Nur 14% der befragten Personen lebt in einem Haushalt, in dem kein Auto vorhanden ist (siehe Abbildung 48).

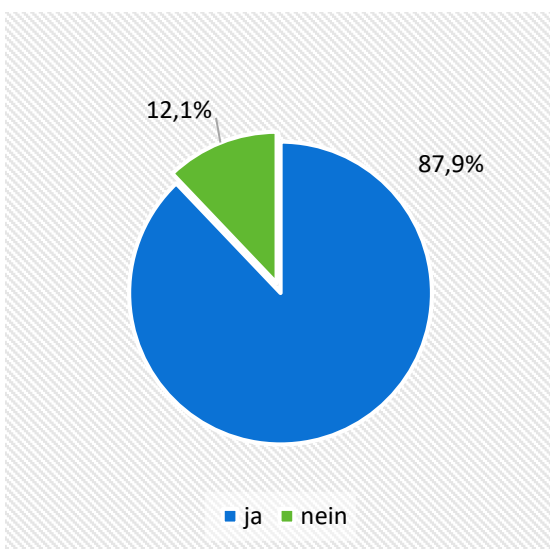
Abbildung 48: Anzahl an Autos im Haushalt



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

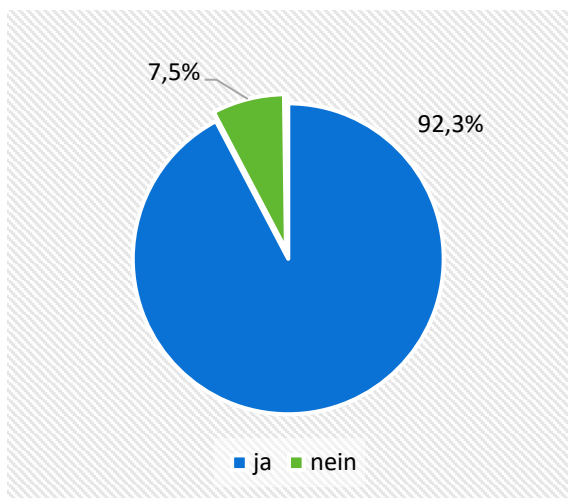
Während 92,3% der Männer in unserer Befragung über einen Führerschein verfügen, ist dies nur bei 87,9% der Frauen der Fall. Damit ist unsere Stichprobe auch im Hinblick auf den Führerscheinbesitz nach Geschlecht betrachtet repräsentativ für Deutschland, da auch in der MiD 2017 sehr ähnliche Führerscheinbesitzquoten für Männer und Frauen angegeben werden (MiD 2017 Tabellenband, Seite 31).

Abbildung 49: Führerscheinbesitz bei Frauen



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Abbildung 50: Führerscheinbesitz bei Männern

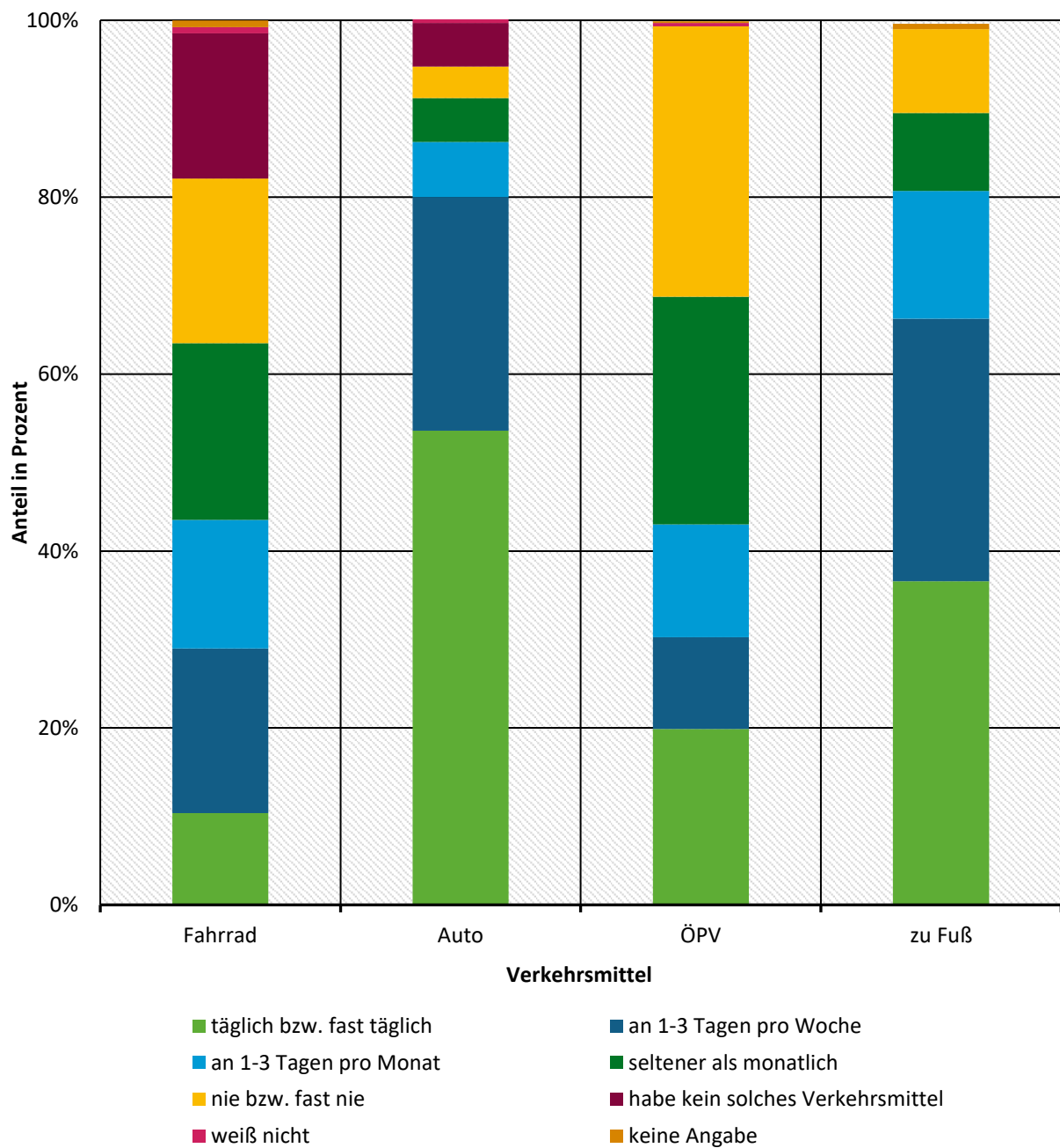


Quelle: Eigene Darstellung, DLR

3.4.3.2 Mobilitätsverhalten

Das Auto ist das dominante Verkehrsmittel bei den von uns befragten Personen. 54% nutzen täglich bzw. fast täglich das Auto und weitere 26% nutzen es an 1-3 Tagen pro Woche. Kein anderes Verkehrsmittel wird so oft genutzt, auch wenn 37% bzw. 30% der Befragten angeben, täglich bzw. fast täglich oder an 1-3 Tagen pro Woche zu Fuß zu gehen. Das Fahrrad oder auch die Verkehrsmittel des Öffentlichen Personenverkehrs werden von unseren dahingegen deutlich seltener genutzt (siehe Abbildung 51:).

Abbildung 51: Verkehrsmittelnutzung

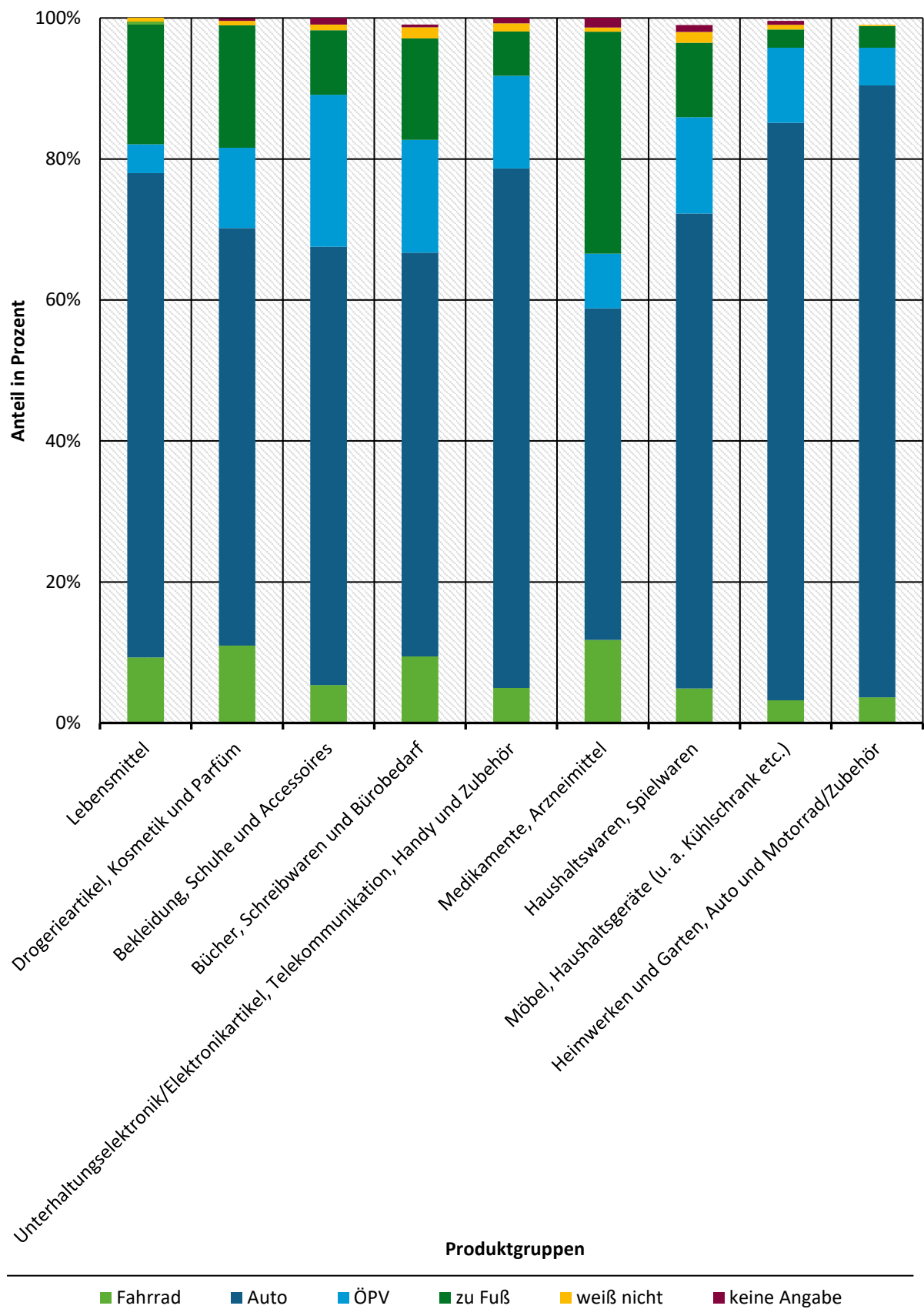


Quelle: Eigene Darstellung, DLR

3.4.3.3 Mobilitätsverhalten im Einkaufsverkehr

Wenn nur die Verkehrsmittelnutzung auf Einkaufswegen betrachtet wird, nimmt die Dominanz des Autos weiter zu (siehe Abbildung 52).

Abbildung 52: Übliches Hauptverkehrsmittel auf Einkaufswegen



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Vor allem auf Einkaufswegen, bei denen Möbel gekauft oder Heimwerkerbedarf abgedeckt wurde, ist das Auto mit 82% bzw. 87% das absolut dominante Verkehrsmittel. Dies klingt plausibel, da wie bereits dargestellt für den Erwerb dieser Produkte auch die längsten Wege bewerkstelligt werden und da davon auszugehen ist, dass diese Produkte in der Regel deutlich schwerer und sperriger sind, als beispielsweise Lebensmittel oder Bücher.

Bei Warengruppen, für deren Erwerb vergleichsweise kurze Wege zurückgelegt werden, spielen dahingegen auch andere „Verkehrsmittel“ eine wichtige Rolle. So werden 31% der Einkaufswege für Medikamente zu Fuß bewerkstelligt. Ebenso werden jeweils 17% der Einkaufswege für den Erwerb von Lebensmitteln oder Drogerieartikeln zu Fuß zurückgelegt. Auch das Fahrrad erreicht seine höchsten Nutzungswerte bei den vergleichsweise kurzen Einkaufswegen der genannten drei Warengruppen. Die Verkehrsmittel des Öffentlichen Personenverkehrs hingegen erreichen mit 22% bzw. 16% ihre höchsten Anteile bei Einkaufswegen für den Erwerb von Bekleidung bzw. Büchern.

3.4.3.4 Beschreibung des Interneteinkaufsverhaltens

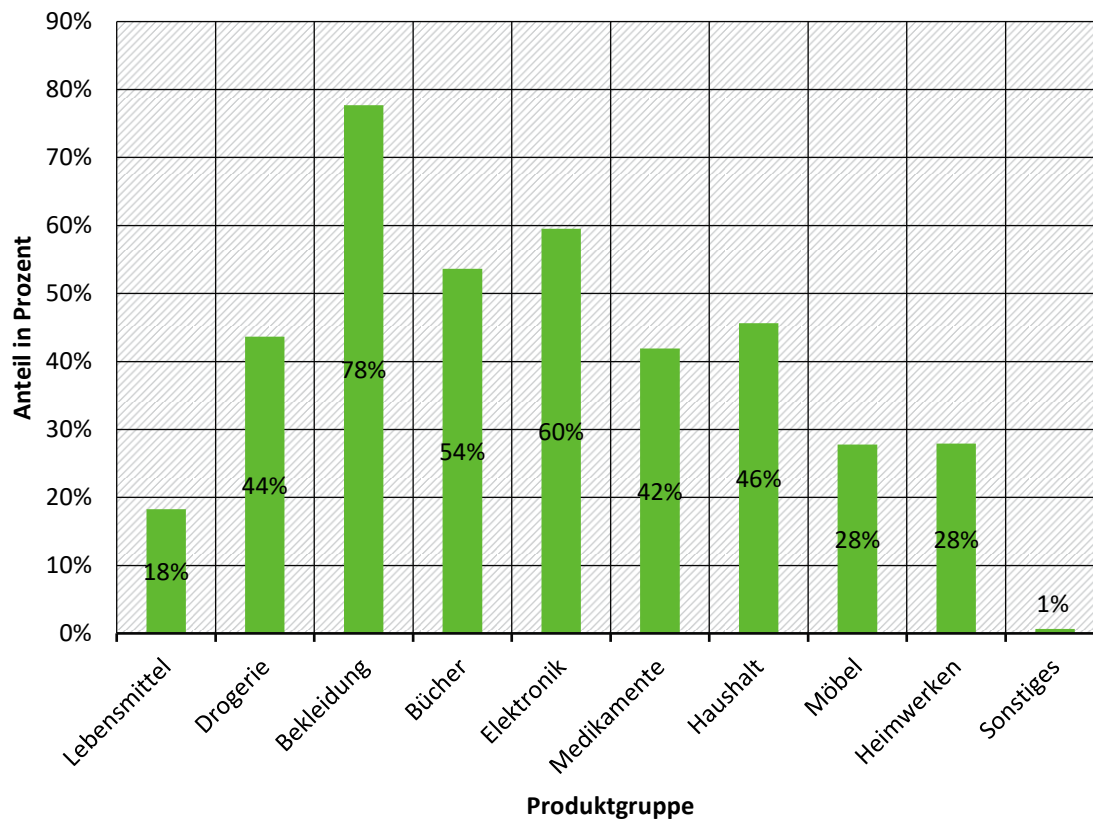
Im Folgenden werden die von uns befragten Personen genauer im Hinblick auf ihr Interneteinkaufsverhalten beschrieben. Von den 1.011 befragten Personen geben nur 91 Personen (9%) an, in den letzten drei Monaten keine Käufe im Internet getätigt zu haben. Die große Mehrheit von 914 Personen (90%) hat in den letzten drei Monaten mindestens ein Produkt der folgenden Produktgruppen im Internet gekauft.

1. Lebensmittel
2. Drogerieartikel, Kosmetik und Parfüm
3. Bekleidung, Schuhe und Accessoires
4. Bücher, Schreibwaren und Bürobedarf
5. Unterhaltungselektronik/Elektronikartikel, Telekommunikation, Handy und Zubehör
6. Medikamente, Arzneimittel
7. Haushaltswaren, Spielwaren
8. Möbel, Haushaltsgeräte (u. a. Kühlschrank etc.)
9. Heimwerken und Garten, Auto und Motorrad/Zubehör
10. Sonstiges
11. Tierbedarf
12. Bild- und Tonträger

Von den 914 Personen, die im Internet Waren bestellt haben, haben 78% ein Produkt der Produktgruppe 3 gekauft (Bekleidung, Schuhe und Accessoires). Auch Elektronikartikel bzw. Telekommunikationsartikel, Handys und Zubehör (Produktgruppe 5) sowie Bücher, Schreibwaren oder Bürobedarf (Produktgruppe 4) wurde von mehr als der Hälfte der Online-Shopper bestellt.

Der Anteil an Käufern ist unterteilt nach Produktgruppen in Abbildung 53 dargestellt. Mehrfachkäufe sind natürlich möglich.

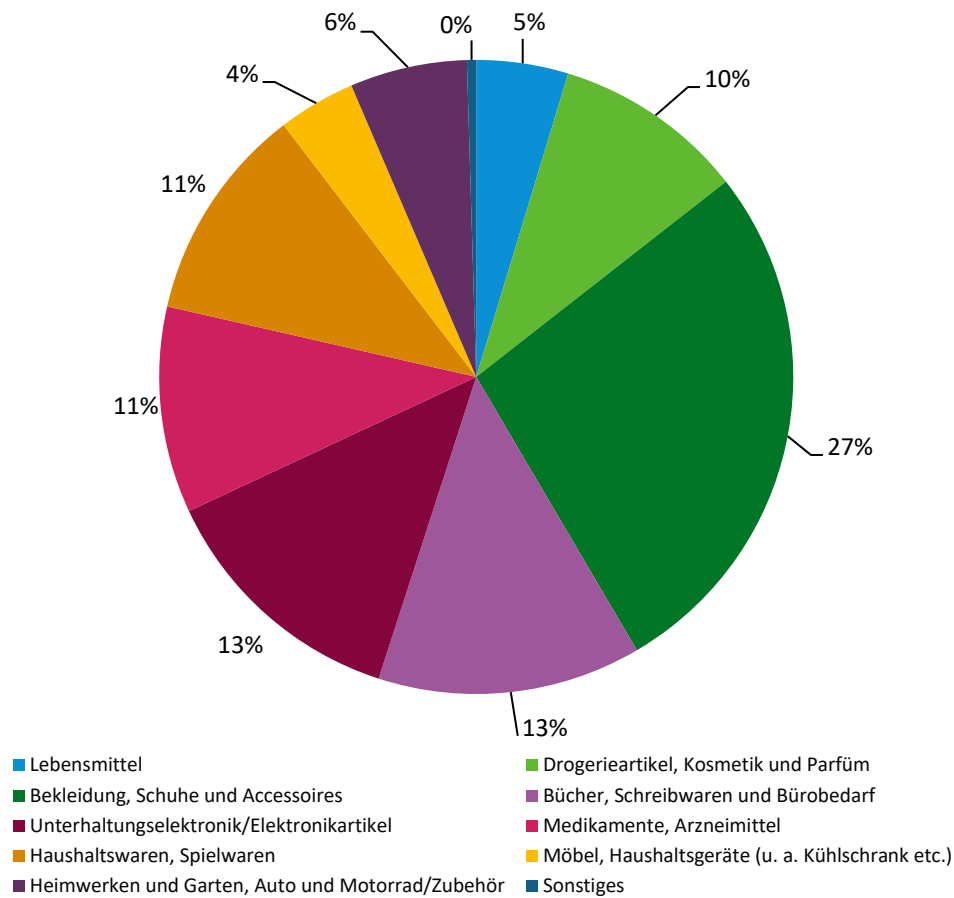
Abbildung 53: Anteil der KäuferInnen in Prozent nach Produktgruppen (N=914)



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Insgesamt wurden von den 914 Personen 8.961 Käufe getätigt. Diese verteilen sich wie folgt auf die 12 Produktgruppen (siehe Abbildung 54).

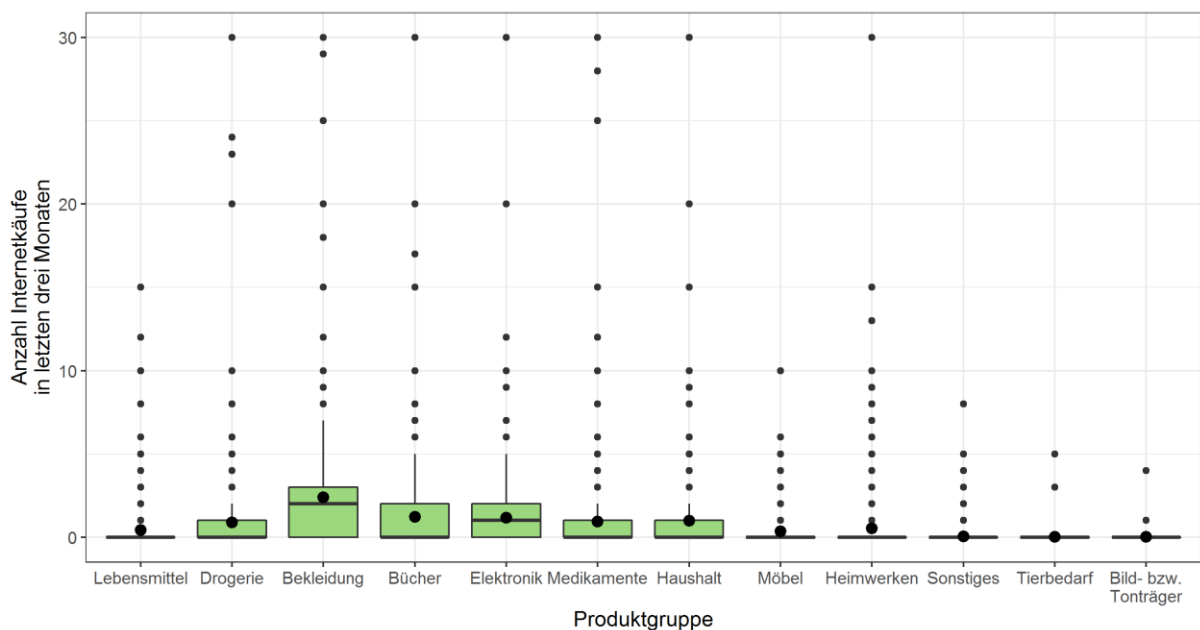
Abbildung 54: Anteil der Internetkäufe in Prozent nach Produktgruppen (N=8.961)



Quelle: Eigene Darstellung

Die Verteilung der 8.961 Internetkäufe unterteilt nach Produktgruppen ist in Form von Boxplots in Abbildung 55 dargestellt.

Abbildung 55: Anzahl an Interneteinkäufen nach Produktgruppen

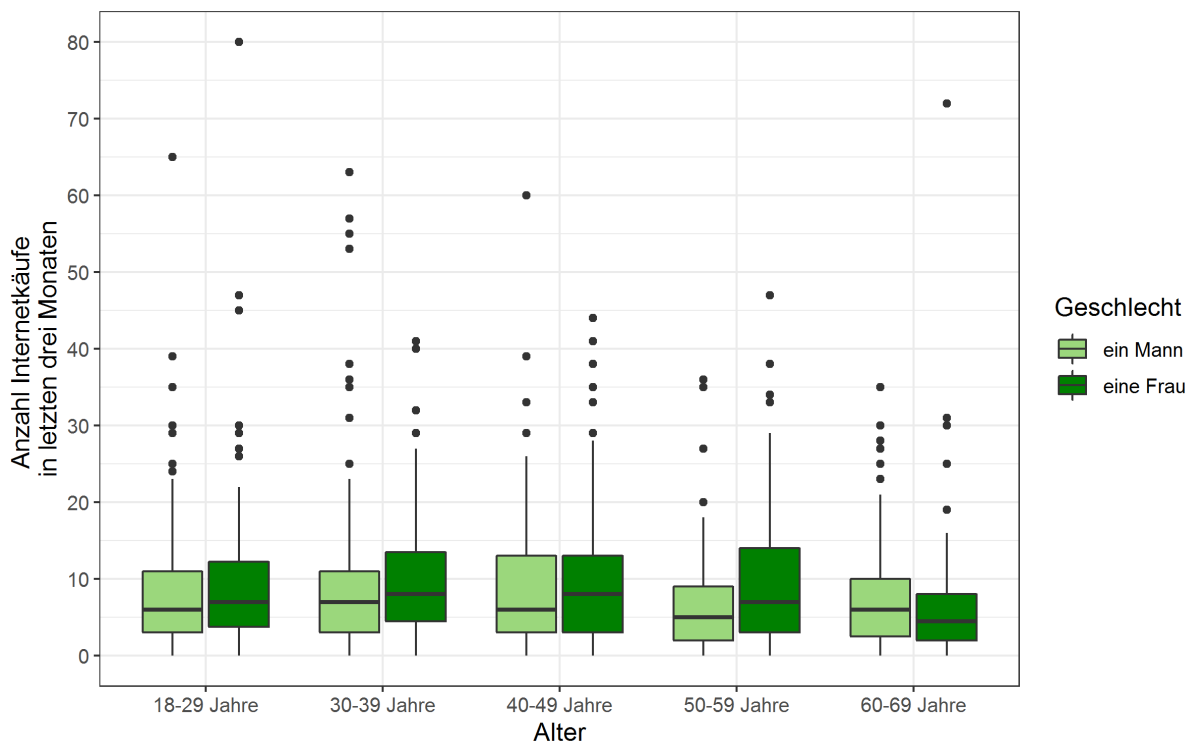


Quelle: Eigene Darstellung

Im Mittel wurden nur von Büchern und Medikamenten sowie Drogerie-, Bekleidungs- Haushalts- und Elektronikartikeln ein bzw. mehr als ein Produkt pro Person im Internet bestellt. Es gibt allerdings auch Personen, die bis zu 30 Produkte einer Kategorie bestellt haben. Eine Hochrechnung auf jährliche Einkäufe zeigt, dass eine beliebige Person in Deutschland im Mittel vier Bücher, Medikamente, Drogerie-, Bekleidungs-, Haushalts- und Elektronikartikel pro Jahr kauft. Bei den Personen, die zu InterneteinkäuferInnen von bestimmten Produktgruppen gehören, liegt die mittlere, jährliche Anzahl an Interneteinkäufen zwischen 4 und 12 Produkten pro Kategorie. Im Hinblick auf die Anzahl an Interneteinkäufen in Abhängigkeit von der Ortsgröße zeigt sich, dass diese zwischen den drei abgefragten Ortsgrößen bis 20.000 EinwohnerInnen, zwischen 20.000 und 100.000 EinwohnerInnen und größer als 100.000 EinwohnerInnen nicht sonderlich variiert: Der Median der Einkäufe liegt bei EinwohnerInnen einer mittelgroßen Stadt bei sieben Käufen in drei Monaten, bei Klein- bzw. Großstädtern sind es sechs.

Eine Analyse nach Alter und Geschlecht kann in Form von Boxplots Abbildung 56 entnommen werden.

Abbildung 56: Anzahl an Interneteinkäufen nach Geschlecht und Alter



Quelle: Eigene Darstellung

Die Auswertung zeigt, dass die Verteilungen etwas variieren. Frauen kaufen im Mittel, mit 9,5 Paketen, knapp ein Paket mehr als Männer (8,4). Außerdem haben ältere Personen über 60 Jahren im Mittel knapp 7 Bestellungen getätigt, jüngere hingegen zwischen 8,3 und 10,5. Dies sind hochgerechnet auf das Jahr, über alle Gruppen hinweg, zwischen 33 und 38 Pakete im Mittel. Die Spitzen liegen bei 72 – 80 Online-Einkäufen in drei Monaten.

Wird die Anzahl an Internetkäufen nach dem Netto-Haushaltseinkommen differenziert, so wird ersichtlich, dass die mittlere Anzahl an Online-Einkäufen mit dem Einkommen steigt (vgl. Tabelle 30).

Tabelle 30: Anzahl an Interneteinkäufen nach Einkommen

Haushalts-Netto-einkommen	Minimum	Median	Arithmetisches Mittel	Maximum
< 900 Euro	0	5	6,3	53
900 bis < 2.000 €	0	5	7,6	72
2.000 bis < 3.000 €	0	7	9	55
3.000 bis < 4.000 €	0	8	9,7	39
4.000 bis < 5.000 €	0	7	11,2	65
5.000 bis < 6.000 €	0	8	12,7	80
6.000 bis < 7.000 €	2	9	7,8	12
> 7.000 €	0	6.5	12,4	60

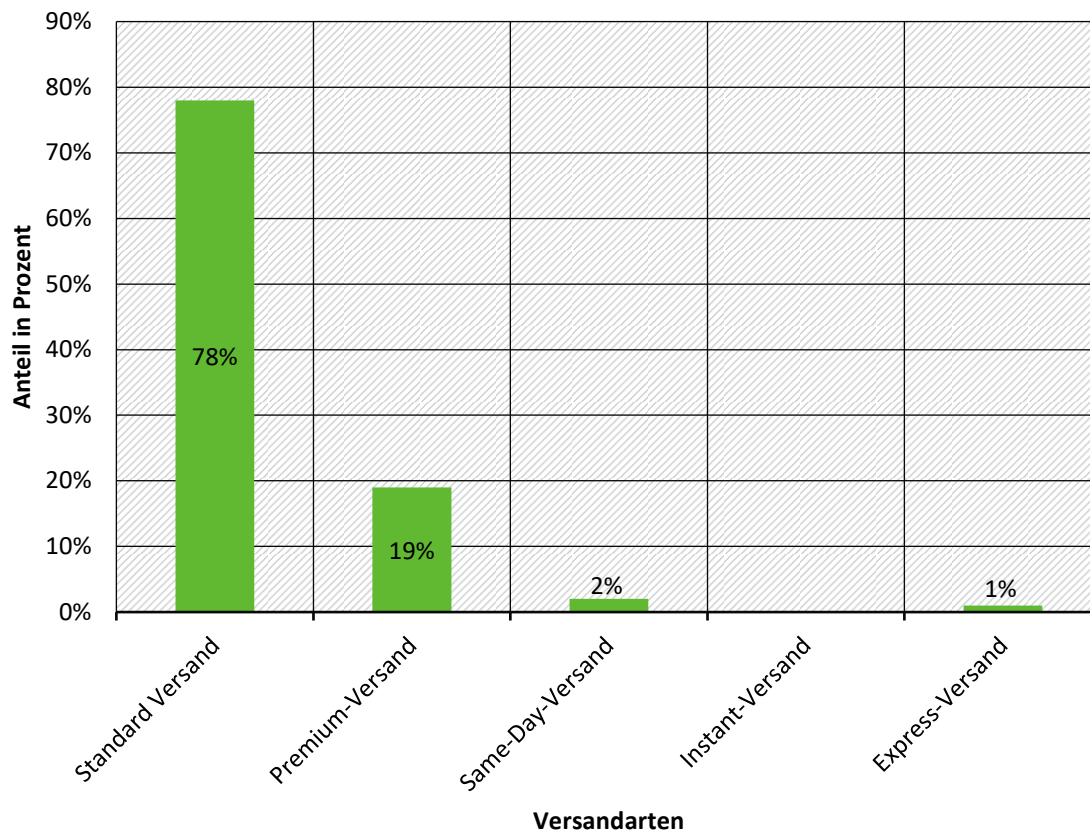
Quelle: Eigene Darstellung

Beispielsweise werden im Mittel in der niedrigsten Einkommensklasse 6,3 Pakete, in der höchsten Einkommensklasse aber 12,4 Pakete, also ca. doppelt so viele, bestellt. In der vom Trend abweichenden Gruppe der Personen mit Netto-Haushaltseinkommen zwischen 6.000 und unter 7.000 Euro sind nur 1% der Befragten eingeordnet. Die Stichprobe ist demnach sehr klein.

3.4.3.5 Beschreibung des Belieferungs- und Versandverhaltens

Für ihre im Internet getätigten Bestellungen haben die Befragten unterschiedliche Versandarten genutzt (Mehrfachnennungen möglich, siehe Abbildung 57).

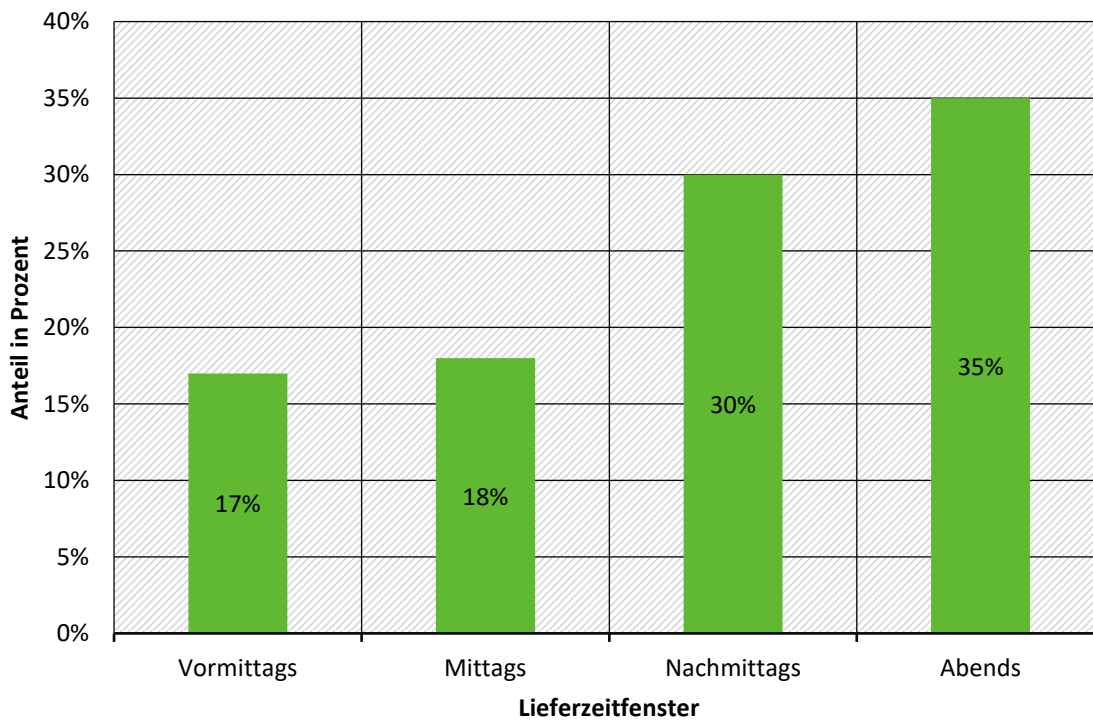
Abbildung 57: Genutzte Versandart (N=1.064)



Quelle: Eigene Darstellung

78% der Befragten haben bei ihren Bestellungen Standard-Versand mit Lieferung nach 1-3 Tagen ab Versand genutzt. 19% haben mindestens einmal den teureren Premium-Versand mit Lieferung am nächsten Tag gewählt. Same-Day-Versand, mit Belieferung am Bestelltage, (meistens) zwischen 18 Uhr und 22 Uhr, wurde nur von 2% der Befragten genutzt. Instant-Versand, d. h. eine Lieferung innerhalb von 90 Minuten, wählen 0,19% der Befragten aus. Express-Versand, d. h. Lieferung zu einem ausgewählten Zeitfenster oder Zeitpunkt, wurde von 1% verwendet.

Abbildung 58: Bevorzugtes Lieferzeitfenster (N=164)

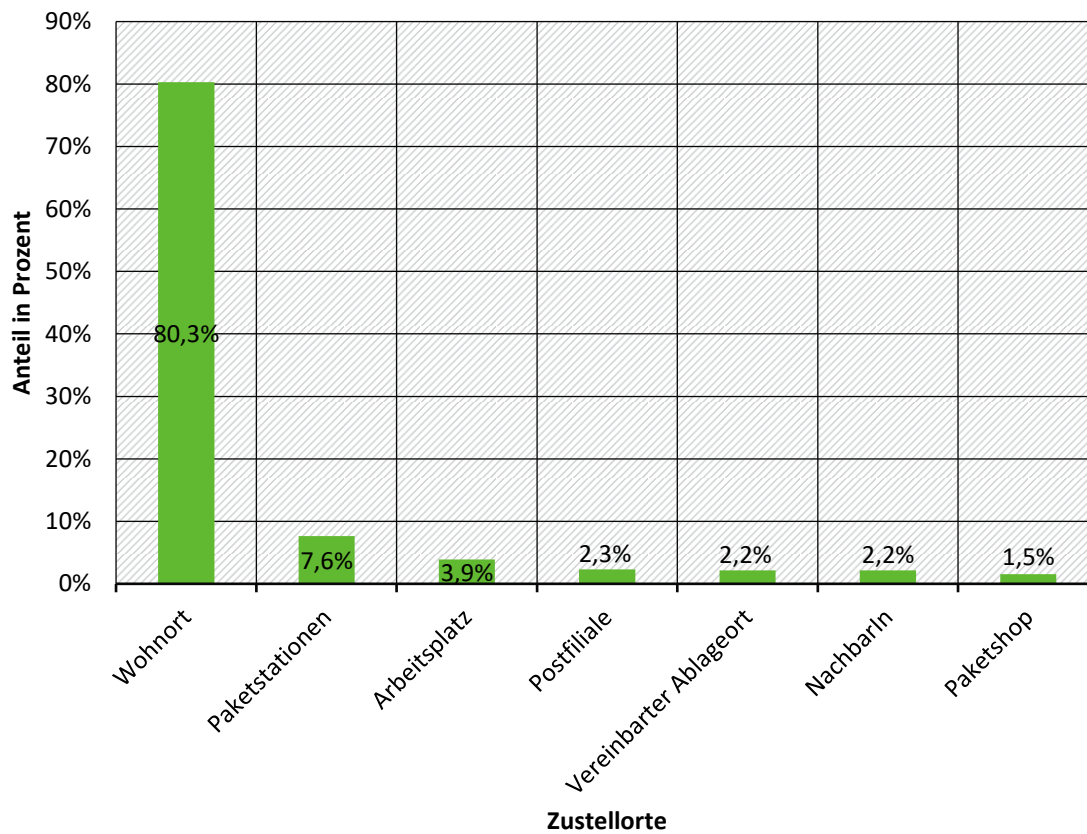


Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 58 zeigt, dass 35% der Befragten am liebsten zur Abendzeit (18 Uhr bis 22 Uhr) beliefert werden. Dagegen bevorzugen 30 % den Nachmittag (14 Uhr bis 18 Uhr), 18% die Mittagszeit (12 Uhr bis 14 Uhr) und 17% den Vormittag (8 Uhr bis 12 Uhr) zur Belieferung.

Der Großteil der InterneteinkäuferInnen (80%) präferiert eine Zustellung der gekauften Ware zum Wohnort. 8% der KundInnen lassen sich Pakete gerne an eine Paketstation senden. Andere Zustellorte, wie der Arbeitsplatz, die nächste Postfiliale, der NachbarIn oder der nächste Paketshop sind nur für weniger als 5% der Befragten bevorzugte Optionen. Auch Vereinbarungen bzgl. des Zustellortes treffen nur sehr wenige der Befragten (2%) mit dem Paketdienstleistungsunternehmen (siehe Abbildung 59).

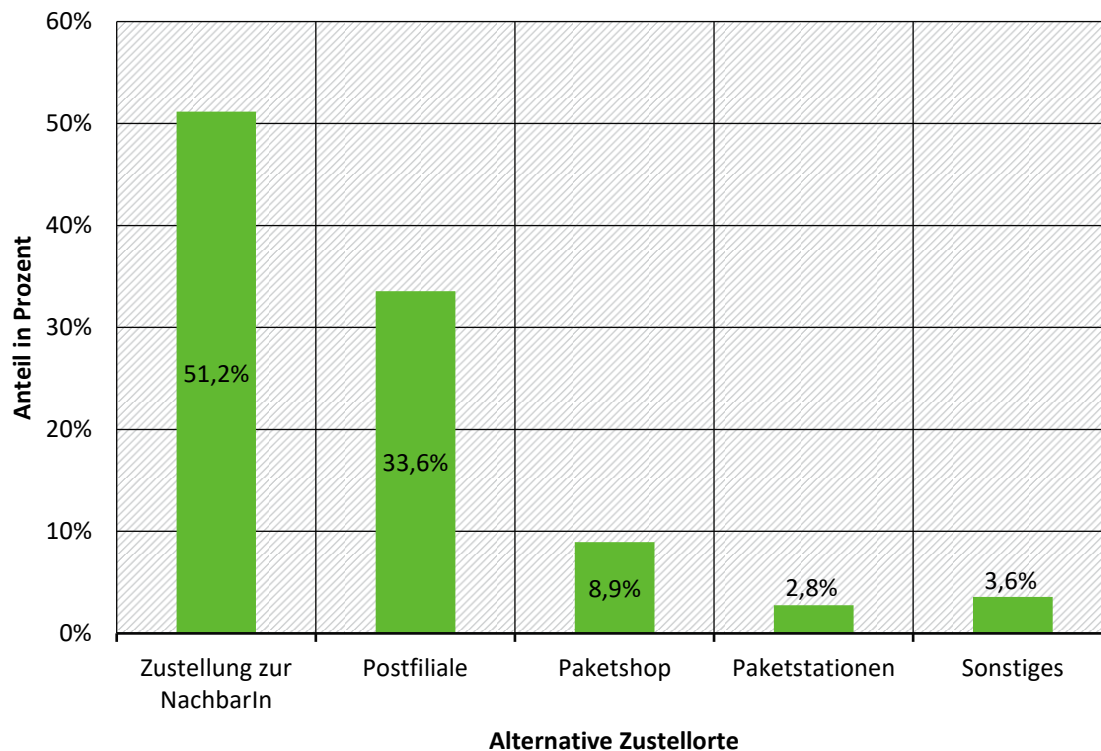
Abbildung 59: Bevorzugt genutzter Zustellort (N=919)



Quelle: Eigene Darstellung

Sollte ein Zustellversuch nach Hause seitens des Logistikdienstleistungsunternehmens von den Befragten verpasst worden sein, liefern diese die Bestellung in der Regel an einen anderen Ort. Für einen Großteil der Befragten ist dies dann die NachbarIn (51%). 34% holen eine verpasste Sendung bei der nächsten Postfiliale ab und 9% beim nächsten Paketshop. Andere Alternativen kommen bei jeweils weniger als 5% der Befragten vor (siehe Abbildung 60).

Abbildung 60: Alternativer Zustellort (N=727)

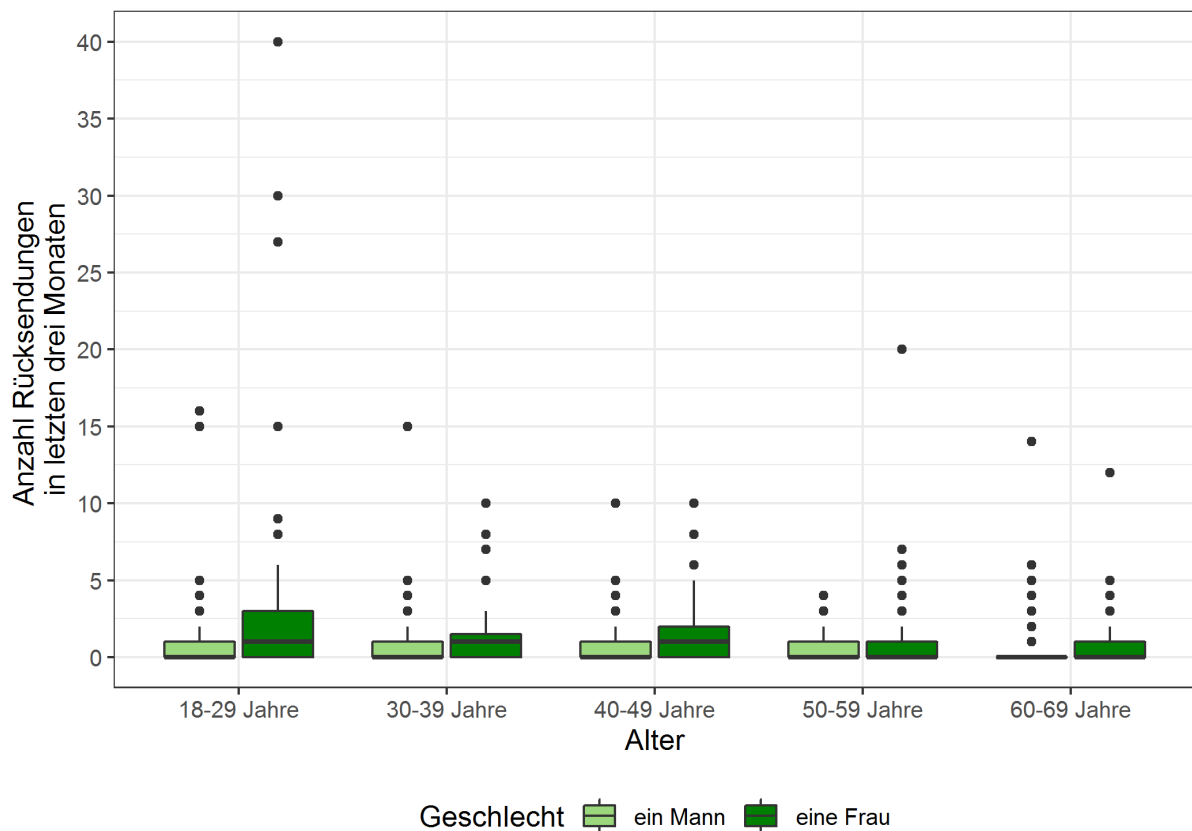


Quelle: Eigene Darstellung

Von den im Internet gekauften Waren wird eine Reihe von Produkten wieder zurückgesendet.

491 Personen (59%) geben an, keine der gekauften Ware in den letzten drei Monaten zurückgesendet zu haben. 346 Personen (41%) haben mindestens ein Paket zurückgesendet. Insgesamt wurden 946 Einkäufe, d. h. 11% aller Einkäufe, zurückgesendet. Im Mittel sind das 1,07 Pakete pro Person. Hochgerechnet auf ein Jahr sind dies 4,27 Pakete pro Jahr und pro Person. Eine produktgruppenspezifische Auswertung der Rücksendungen war mit der vorliegenden Befragung leider nicht möglich. Stattdessen werden die Rücksendungen in Abhängigkeit von Geschlecht und Alter analysiert. In Abbildung 61 sind Boxplots zur Anzahl an Rücksendungen nach Alter und Geschlecht dargestellt.

Abbildung 61: Anzahl an Rücksendungen nach Alter und Geschlecht

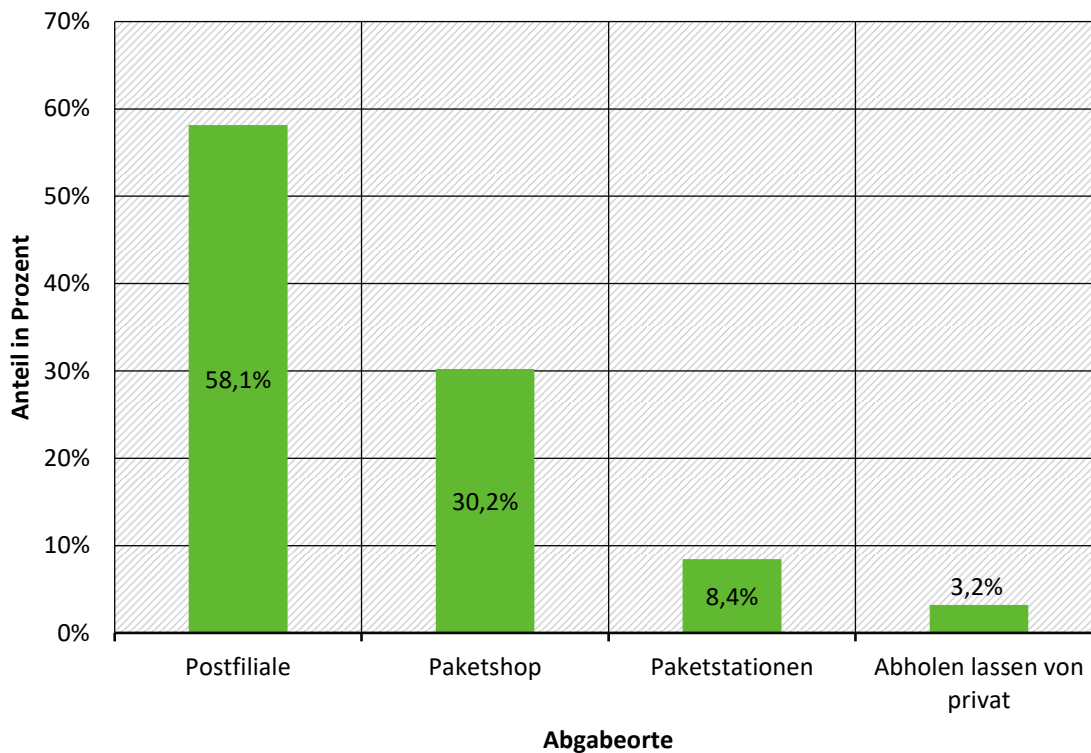


Quelle: Eigene Darstellung

Der Median (und der Mittelwert) der Anzahl an Rücksendungen liegt bei Frauen in den Altersgruppen bis 49 Jahre höher als bei Männern gleichen Alters. Frauen dieser Altersgruppen senden im Mittel also mehr Pakete als Männer zurück. Auch die maximale Anzahl an Rücksendungen (40 Pakete im Zeitraum) wurde von einer Frau jungen Alters (18-29 Jahre) durchgeführt.

Die Sendungen, die zurückgeschickt werden, werden von mehr als der Hälfte der befragten Personen (58%) hierzu zur nächsten Postfiliale gebracht. Für ca. 30% ist der Paketshop günstiger gelegen und für ca. 8% sind es Paketstationen. Weniger als 5% der Befragten haben das Paket bei sich zu Hause vom Logistikdienstleistungsunternehmen abholen lassen (siehe Abbildung 62).

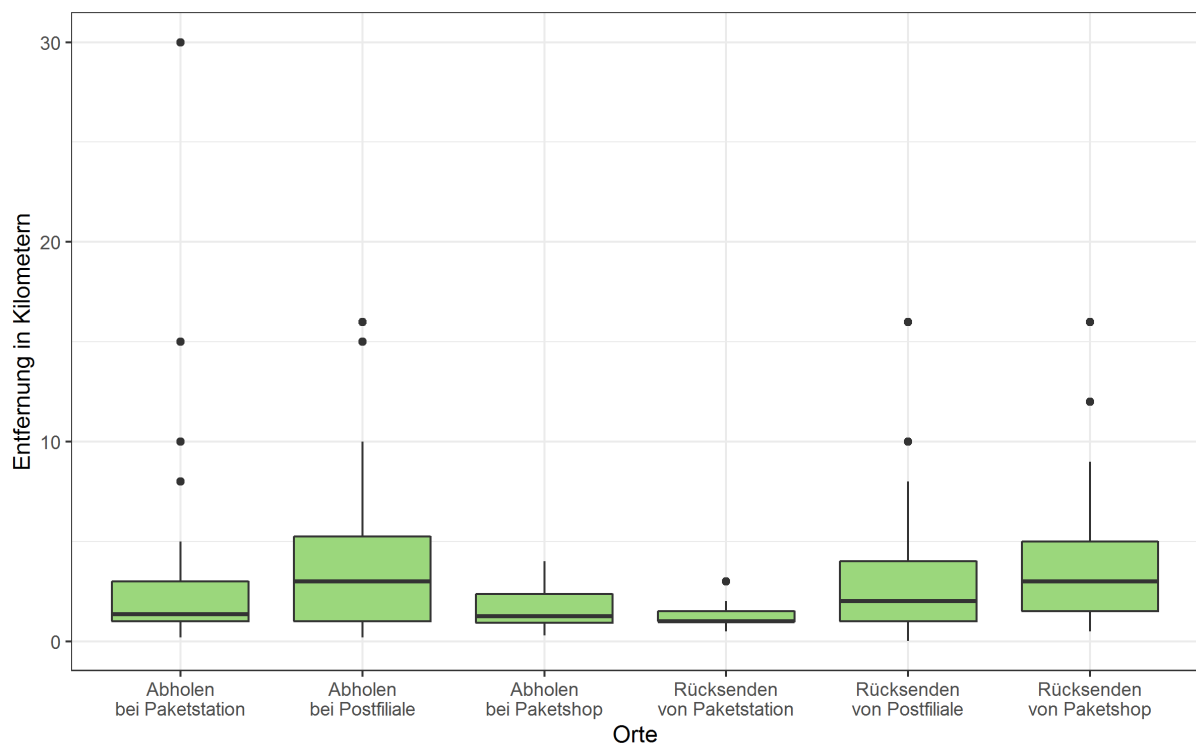
Abbildung 62: Abgabeort für Rücksendungen (N=345)



Quelle: Eigene Darstellung

Wird die bestellte Ware, beispielsweise aufgrund einer verpassten Lieferung, nicht zum Wohnort der Befragten gesendet, muss sie häufig abgeholt werden. Gleiches gilt für Sendungen, die zurückgegeben werden sollen, wenn die Rücksendung nicht von privat abgeholt wird. In Abbildung 63 ist die Verteilung der Entfernung zum nächst gelegenen Abhol- bzw. Rückgabeort differenziert nach Abhol- und Rückgabeorte mittels Boxplots dargestellt. Die maximal zurückzuliegende Distanz, die im Datensatz beobachtet wird, liegt bei 30 km (für das Abholen des Pakets bei einer Paketstation). Ansonsten variiert die Entfernung leicht zwischen den Orten.

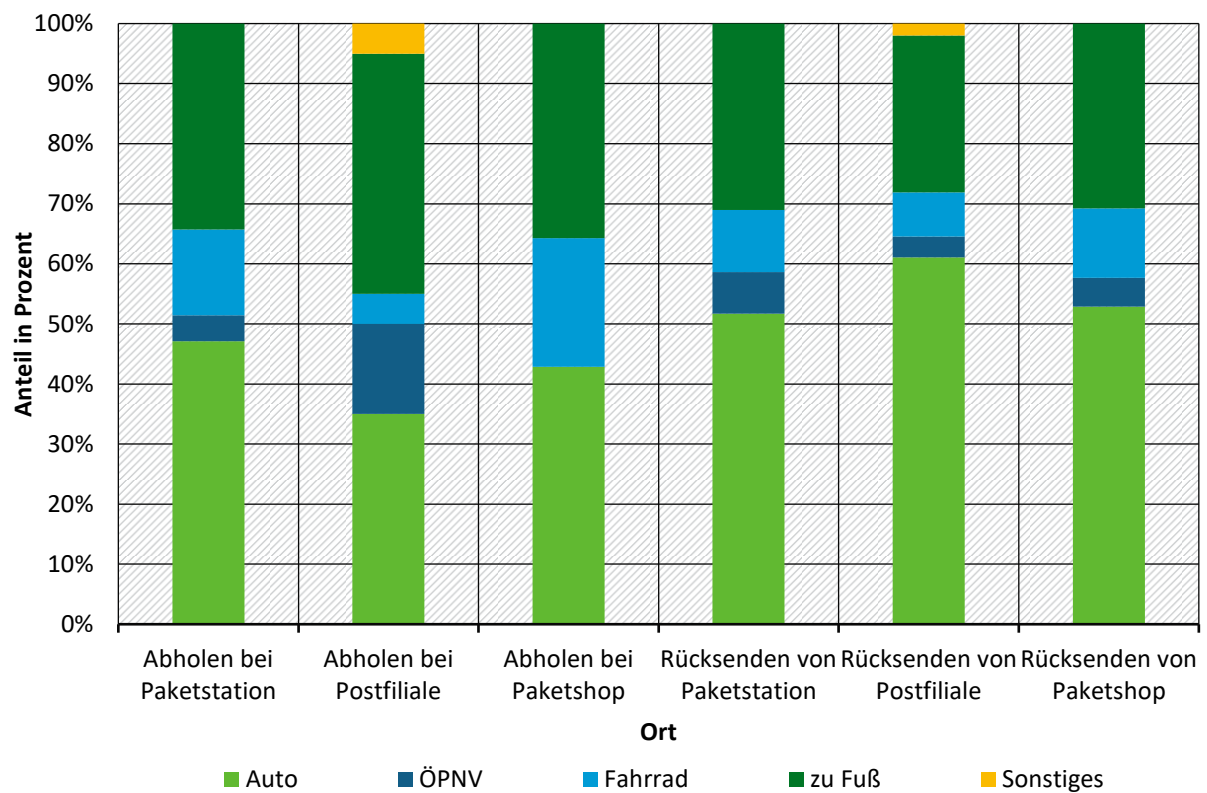
Abbildung 63: Entfernungen zum Abholen und Wegbringen von Bestellungen (N=211)



Quelle: Eigene Darstellung

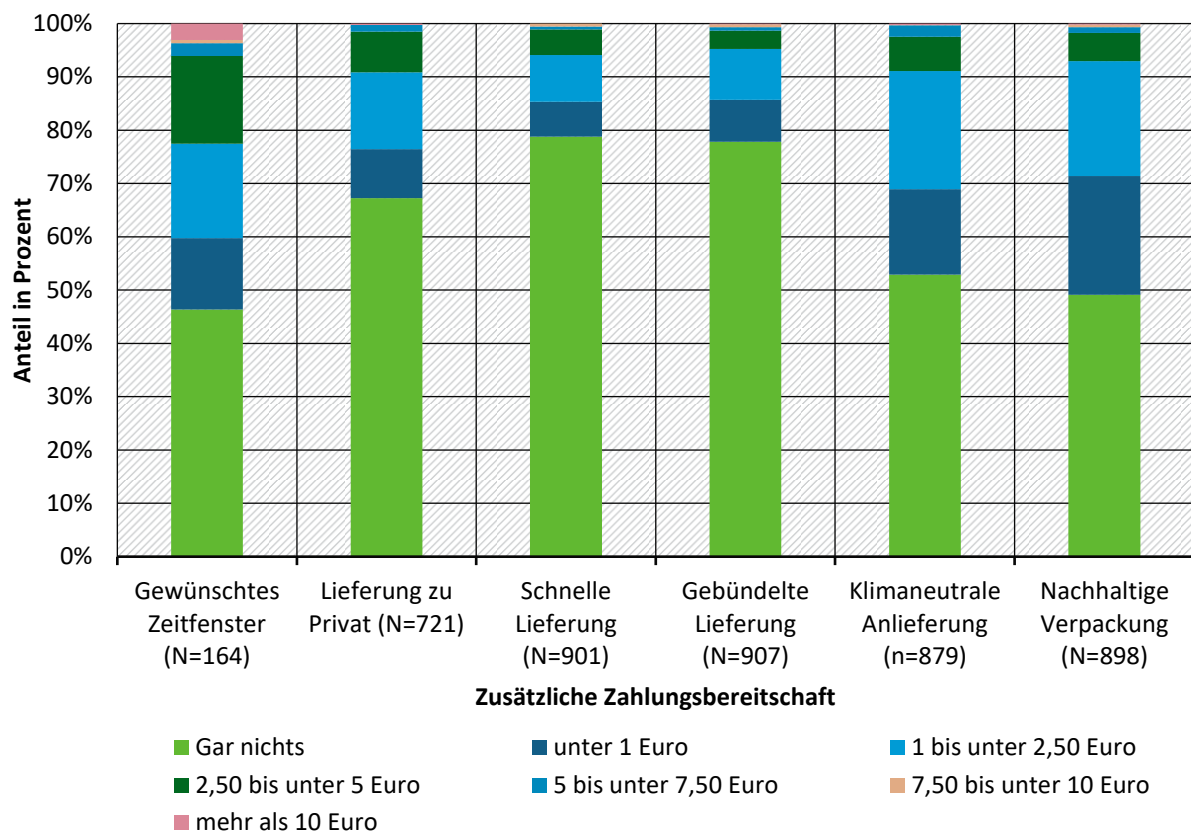
Aus verkehrlicher Perspektive ist neben der zurückzulegenden Entfernung zum Abhol- bzw. Rückgabeort von Sendungen vor allem das verwendete Verkehrsmittel von Relevanz. In Abbildung 64 ist der Anteil an Verkehrsmitteln in Prozent dargestellt, der zur Abholung bzw. Rücksendung eines Pakets verwendet wird. Dabei differenziert die Grafik nach Abholort der Zusendungen bzw. Abgabeort der Rücksendung. Auf den Balken stehen die absoluten Werte. Das Auto nimmt überall eine wichtige Stellung ein, nur beim Abholen von der nächsten Postfiliale waren in unserer Stichprobe mehr Personen zu Fuß als mit dem Auto unterwegs. Die Fallzahl ist hierbei jedoch sehr gering (n=20).

Abbildung 64: Verkehrsmittelnutzung für Online-Bestellungen



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 65: Zusätzliche Zahlungsbereitschaft



Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 65 wird auf zusätzliche Zahlungsbereitschaften eingegangen. Unterschieden wird bzgl. zusätzlicher Zahlungsbereitschaft der Befragten bei 1.) Lieferung zu einem gewünschten Zeitfenster, 2.) Lieferung zu Privat, 3.) Schneller Lieferung, 4.) gebündelter Lieferung, 5.) Lieferung mit nachhaltiger Verpackung und 6.) klimaneutraler Lieferung. Eine zusätzliche Zahlungsbereitschaft gibt es vor allem für Lieferungen zu einem gewünschten Zeitfenster sowie für Lieferungen mit nachhaltiger Verpackung. In diesen Fällen sind mehr als 50% der Befragten bereit, einen zusätzlichen Betrag zu zahlen. Im Falle der nachhaltigen Verpackung wären das für mehr als 40% der Befragten bis zu 2,50 Euro zusätzlich. 5% würden noch bis zu 5 Euro zusätzlich zahlen. Über diesen Betrag hinaus ist die zusätzliche Zahlungsbereitschaft für nachhaltige Verpackungen gering. Für Lieferungen zu einem gewünschten Zeitfenster ist sie in den Spitzen höher. Hier würden immerhin noch ca. 16% der Befragten bis zu 5 Euro extra bezahlen. Die geringste zusätzliche Zahlungsbereitschaft bezogen auf die breite Masse an Befragten gibt es für schnelle und gebündelte Lieferungen. Ca. 78% der Befragten sind nicht bereit, hierfür zusätzliche Beträge aufzuwenden. In allen Fällen gibt es Einzelpersonen, die bereit sind 10 Euro und mehr für eine verbesserte Lieferung auszugeben.

3.4.3.6 Bivariate Auswertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse von bivariaten Analysen der möglichen Einflussfaktoren auf das Mobilitätsverhalten im Einkaufsverkehr und das Interneteinkaufsverhalten sowie das Belieferungs- und Versandverhalten präsentiert. Während in den Analysen selbst alle im Datensatz vorhandenen Variablen miteinander gekreuzt und auf mögliche Zusammenhänge hin untersucht wurden, werden an dieser Stelle nur relevante Zusammenhänge vollständig dargestellt.

Je nach Ausprägung bzw. Skalenniveau der untersuchten Variablen wurden unterschiedliche Zusammenhangsmaße zur Analyse herangezogen. Im Falle von metrischen Ausprägungen in

beiden Variablen wird zur Beschreibung der Stärke des Zusammenhangs der Korrelationskoeffizient nach Pearson berechnet. Im Falle von ordinal – metrisch bzw. ordinal – ordinal wird der Koeffizient nach Spearman (oder nach Kendall) ausgegeben. Kruskal und Goodmans Gamma wird bestimmt, wenn der Zusammenhang zwischen einer ordinalen und einer Dummy-Variablen ermittelt wird. Der Kontingenzkoeffizient und Cramers V kommen bei nominalen Variablen und Dummy – Dummy-Kombinationen zum Einsatz. Die Analyse wurde darüber hinaus teilweise durch weitere Maßzahlen ergänzt, wenn dies situationsspezifisch vielversprechend war (Punktbiseriale Korrelation, η^2).

Einflussfaktoren auf das Mobilitätsverhalten

Ob eine Person über einen Führerschein verfügt oder nicht, hängt vor allem von der Ortsgröße ihres Wohnortes, ihrer beruflichen Tätigkeit und dem verfügbaren Nettoeinkommen ihres Haushaltes ab. Je kleiner der Ort in dem eine Person wohnt, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese Person einen Führerschein besitzt. Arbeitslose und Hausmänner und Hausfrauen sind deutlich seltener in Besitz eines Führerscheins als Personen, die in Vollzeit berufstätig sind. Außerdem steigt die Wahrscheinlichkeit, einen Führerschein zu besitzen, mit dem verfügbaren Haushaltsnettoeinkommen pro Monat.

Die Anzahl der Autos pro Haushalt hängt dahingegen von deutlich mehr Faktoren wie dem Bundesland, in dem eine Person wohnt, der Größe des Wohnortes, der beruflichen Tätigkeit, dem Haushaltsnettoeinkommen und der Haushaltgröße ab. So gibt es beispielsweise in Hamburg, im Saarland und in Berlin deutlich mehr Haushalte ohne einen Pkw als in den anderen Bundesländern. Ebenso haben Arbeitslose beispielsweise eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit, kein Auto im Haushalt zu besitzen, als in Vollzeit berufstätige Personen. Generell lässt sich sagen, dass je kleiner der Ort ist, in dem eine Person wohnt, desto höher ist die Anzahl der Autos in dem Haushalt dieser Person. Das Haushaltsnettoeinkommen hat dabei einen stark positiven Einfluss auf die Anzahl der Autos in einem Haushalt. Je mehr Einkommen einem Haushalt zur Verfügung steht, desto mehr Autos befinden sich in dem Haushalt.

Etwas komplexer sind die identifizierten Zusammenhänge zwischen der Haushaltsgröße bzw. dem Alter einer Person und der Anzahl der Autos eines Haushaltes. Betrachtet man nur die Haushaltsgröße, so scheint auch hier ein positiver Einfluss auf die Anzahl der Autos vorhanden zu sein. Ein genauerer Blick zeigt jedoch, dass es vor allem die Anzahl der Personen zwischen 18 und 64 Jahren in einem Haushalt ist, die einen positiven Einfluss auf die Anzahl der Autos in dem jeweiligen Haushalt hat. Auch beim Alter zeigt sich, dass es vor allem Personen mittleren Alters sind, die einen positiven Einfluss auf die Anzahl der Autos in einem Haushalt ausüben, während ältere Personen eher einen negativen Einfluss auf die Anzahl der Autos in einem Haushalt haben.

Für die bivariaten Analysen der Einflussfaktoren auf die Nutzungshäufigkeit der unterschiedlichen Verkehrsmittel wurden, abhängig vom Skalenniveau der betrachteten Variablen, verschiedene Zusammenhangs- und Korrelationsmaße wie Cramér's V oder Kendall's Tau verwendet. Die Ergebnisse dieser Analysen können Tabelle 31 entnommen werden.

Tabelle 31: Einflussfaktoren auf die Verkehrsmittelnutzung

Abhängige Variable	zu Fuß	Fahrrad	ÖPV	Auto
Geschlecht	KK: 0,07 CV: 0,07	KK: 0,12* CV: 0,12*	KK: 0,05 CV: 0,05	KK: 0,10* CV: 0,10*
Alter	SRK: 0,00 KT: 0,00	SRK: -0,02 KT: -0,02	SRK: -0,18** KT: -0,13**	SRK: -0,05 KT: -0,04
Bundesland	KK: 0,23 CV: 0,12	KK: 0,26 CV: 0,14	KK: 0,30** CV: 0,16**	KK: 0,30* CV: 0,15*
Ortsgröße	SRK: 0,14** KT: 0,12**	SRK: 0,11** KT: 0,09**	SRK: 0,29** KT: 0,25**	SRK: -0,23** KT: -0,21**
Tätigkeit	KK: 0,19 CV: 0,09	KK: 0,26* CV: 0,14*	KK: 0,37** CV: 0,19**	KK: 0,33** CV: 0,18**
Bildung	SRK: 0,03 KT: 0,03	SRK: 0,00 KT: 0,00	SRK: 0,21** KT: 0,19**	SRK: -0,08 KT: -0,08
Haushaltsnettoeinkommen	SRK: -0,11** KT: -0,08**	SRK: -0,01 KT: -0,01	SRK: -0,01 KT: -0,01	SRK: 0,25** KT: 0,20**
Haushaltsgröße	SRK: -0,08** KT: -0,07**	SRK: -0,04 KT: -0,03	SRK: -0,04 KT: -0,04	SRK: 0,14** KT: 0,12**
Anzahl von Personen unter 18 Jahren im Haushalt	SRK: -0,04 KT: -0,03	SRK: -0,00 KT: -0,00	SRK: -0,03 KT: -0,03	SRK: 0,14** KT: 0,13**
Anzahl von Personen zwischen 18 und 64 Jahren im Haushalt	SRK: 0,00 KT: 0,00	SRK: -0,04 KT: -0,03	SRK: 0,06 KT: 0,05	SRK: -0,02 KT: -0,02
Anzahl von Personen mit 65 Jahren und älter im Haushalt	SRK: -0,06 KT: -0,05	SRK: -0,05 KRK: -0,04	SRK: -0,17* KT: -0,15*	SRK: -0,12 KT: -0,12

Erläuterung zur Tabelle:

KK – Kontingenzkoeffizient, CV – Cramér's V, SRK – Spearman's Rangkorrelationskoeffizient, KT – Kendall's Tau

Fett – Signifikanter Zusammenhang vorhanden

* Signifikant auf dem Level von 5%, ** Signifikant auf dem Level von 1%

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Ob eine Person aus unserer Befragung oft zu Fuß geht oder nicht, hängt vor allem von der Größe des Ortes in dem sie wohnt, ihrem verfügbaren Haushaltsnettoeinkommen und der Größe ihres

Haushaltes ab. Je größer der Ort, desto wahrscheinlicher ist es, dass eine Person oft zu Fuß geht. Das Haushaltsnettoeinkommen und die Haushaltsgröße üben dahingegen einen negativen Einfluss auf das Zu-Fuß-Gehen aus. Das heißt, je höher das Haushaltsnettoeinkommen und je größer der Haushalt, desto seltener geht eine Person zu Fuß.

Im Hinblick auf die Nutzungshäufigkeit des Fahrrades sind hingegen das Geschlecht, die Ortsgröße und die berufliche Tätigkeit die entscheidenden Variablen. So fahren Männer tendenziell etwas häufiger mit dem Fahrrad als Frauen. Ebenso fahren Personen, die in Orten mit mehr als 100.000 EinwohnerInnen wohnen häufiger mit dem Fahrrad als Personen, die in Orten mit weniger als 20.000 EinwohnerInnen leben. Bei der beruflichen Tätigkeit wurde deutlich, dass Arbeitslose vergleichsweise selten mit dem Fahrrad fahren, während viele Auszubildende und in Vollzeit Berufstätige mehrmals pro Woche oder täglich dieses Verkehrsmittel nutzen.

Die Verkehrsmittel des Öffentlichen Personenverkehrs werden vor allem von älteren Personen deutlich seltener genutzt. Je höher das Alter einer Person und je höher der Anteil der über 65-Jährigen in einem Haushalt, desto seltener wird der ÖPV genutzt. Der Einfluss des Bundeslandes, in dem eine Person wohnt, und der Einfluss der Ortsgröße auf die Nutzungshäufigkeit des ÖPV dürften eng miteinander verwoben sein. Je größer der Ort, desto häufiger werden die Verkehrsmittel des ÖPV genutzt. Passend hierzu wird der ÖPV am stärksten in den dicht besiedelten Stadtstaaten Berlin, Bremen und Hamburg genutzt. Ebenso steigt die Nutzungshäufigkeit des ÖPV mit dem formalen Bildungsgrad einer Person. Im Hinblick auf die berufliche Tätigkeit lässt sich sagen, dass Auszubildende und Studierenden den ÖPV deutlich häufiger als Rentner, Hausmänner oder Hausfrauen, Arbeitslose und in Vollzeit- oder Teilzeit-Berufstätige.

Auch das Auto wird von Männern tendenziell etwas öfter genutzt als von Frauen. Die Ortsgröße hat allerdings einen negativen Einfluss auf die Nutzungshäufigkeit des Autos. Passend hierzu wird das Auto häufig in dünn besiedelten Flächenländern wie Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein genutzt. Bei der beruflichen Tätigkeit zeigt sich, dass es vor allem die in Vollzeit berufstätigen Personen sind, die häufig das Auto nutzen, während Arbeitslose und Hausmänner oder Hausfrauen es deutlich seltener verwenden. Außerdem lässt sich sagen, dass die Autonutzung mit steigendem Haushaltsnettoeinkommen, zunehmender Haushaltsgröße und zunehmender Anzahl an Personen unter 18 Jahren im Haushalt ebenfalls zunimmt.

In den bivariaten Analysen wurden zudem die Einflussfaktoren auf die Häufigkeit persönlicher Einkaufswege zum Erwerb der drei bereits definierten Gütergruppen untersucht (siehe Tabelle 32).

Tabelle 32: Einflussfaktoren auf die Einkaufshäufigkeit unterschiedlicher Gütergruppen (persönliche Einkaufswege)

Abhängige Variable Unabhängige Variable	Güter des täglichen Bedarfs	Güter des mittelfristigen Bedarfs	Güter des langfristigen Bedarfs
Geschlecht	KK: 0,09 CV: 0,09	KK: 0,09 CV: 0,09	KK: 0,13** CV: 0,13**
Alter	SRK: 0,10** KT: 0,08**	SRK: -0,19** KT: -0,15**	SRK: -0,04 KT: -0,03

Abhängige Variable Unabhängige Variable	Güter des täglichen Bedarfs	Güter des mittelfristigen Bedarfs	Güter des langfristigen Bedarfs
Bundesland	KK: 0,19 CV: 0,10	KK: 0,27 CV: 0,14	KK: 0,28** CV: 0,15**
Ortsgröße	SRK: 0,06 KT: 0,06	SRK: 0,04 KT: 0,03	SRK: -0,07* KT: -0,07*
Tätigkeit	KK: 0,19 CV: 0,10	KK: 0,30** CV: 0,16**	KK: 0,21 CV: 0,11
Bildung	SRK: 0,04 KT: 0,04	SRK: 0,12** KT: 0,12**	SRK: -0,02 KT: -0,02
Haushaltsnettoeinkommen	SRK: 0,04 KT: 0,03	SRK: 0,16** KT: 0,13**	SRK: 0,17** KT: 0,14**
Haushaltsgröße	SRK: 0,05 KT: 0,04	SRK: 0,18** KT: 0,15**	SRK: 0,14** KT: 0,12**
Anzahl von Personen unter 18 Jahren im Haushalt	SRK: 0,06 KT: 0,05	SRK: 0,15** KT: 0,14**	SRK: 0,02 KT: 0,02
Anzahl von Personen zwischen 18 und 64 Jahren im Haushalt	SRK: -0,09* KT: -0,08*	SRK: 0,08* KT: 0,07*	SRK: -0,02 KT: -0,02
Anzahl von Personen mit 65 Jahren und älter im Haushalt	SRK: 0,01 KT: 0,01	SRK: -0,09 KT: -0,08	SRK: -0,01 KT: -0,01

Erläuterung zur Tabelle:

KK – Kontingenzkoeffizient, CV - Cramér's V, SRK - Spearman's Rangkorrelationskoeffizient, KT - Kendall's Tau

Fett – Signifikanter Zusammenhang vorhanden

* Signifikant auf dem Level von 5%, ** Signifikant auf dem Level von 1%

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Auf die Einkaufshäufigkeit von Gütern des täglichen Bedarfs konnte lediglich ein signifikanter Einfluss des Alters festgestellt werden. Dies bedeutet, mit zunehmendem Alter werden mehr persönliche Einkaufswege für den Erwerb von Gütern des täglichen Bedarfs wie z. B. Lebensmittel, Drogerieprodukte oder Medikamente zurückgelegt. Bei Gütern des mittelfristigen Bedarfs hat das Alter jedoch einen negativen Einfluss. Je älter eine Person ist, desto weniger persönliche Einkaufswege absolviert sie, um Produkte wie z. B. Bücher und Kleidung zu kaufen.

Es sind vor allem Studierende und in Vollzeit Berufstätige, die häufiger als beispielsweise Arbeitslose und Rentner persönliche Einkaufswege für den Erwerb von Gütern des mittelfristigen Bedarfs zurücklegen. Dementsprechend überrascht es nicht, dass sowohl Bildung als auch das Haushaltsnettoeinkommen einen positiven Einfluss auf die Anzahl der persönlichen Einkaufswege für den Erwerb von Gütern des mittelfristigen Bedarfs ausüben. Auch die Haushaltsgröße

und dabei insbesondere die Anzahl von Personen unter 18 Jahren haben einen positiven Einfluss auf die Anzahl der persönlichen Einkaufswege für den Erwerb dieser Gütergruppe.

Bei den Gütern des langfristigen Bedarfs hingegen spielt auch das Geschlecht eine Rolle. Männer gehen signifikant häufiger persönlich einkaufen, um beispielsweise Möbel oder Produkte für Auto oder Garten zu erwerben. Auch das Bundesland, in dem der Wohnort unserer Befragten liegt, scheint einen Einfluss auf die Anzahl der persönlichen Einkaufswege für den Erwerb von Gütern des langfristigen Bedarfs zu haben. In einer genaueren Betrachtung der Anzahl persönlicher Einkaufswege nach Bundesland ließen sich hier jedoch keine eindeutigen und sinnvoll interpretierbaren Muster feststellen. Schließlich steigt die Anzahl der persönlichen Einkaufswege für den Erwerb von Gütern des langfristigen Bedarfs mit dem verfügbaren Nettoeinkommen und der Größe eines Haushalts.

Tabelle 33 stellt die Einflussfaktoren auf die Verkehrsmittelnutzung auf persönlichen Einkaufswegen getrennt für die drei unterschiedlichen Gütergruppen dar.

Tabelle 33: Einflussfaktoren auf die Verkehrsmittelnutzung auf persönlichen Einkaufswegen für unterschiedliche Gütergruppen

Abhängige Variable Unabhängige Variable	Güter des täglichen Bedarfs	Güter des mittelfristigen Bedarfs	Güter des langfristigen Bedarfs
Geschlecht	KK: 0,05 CV: 0,05	KK: 0,05 CV: 0,05	KK: 0,13* CV: 0,13*
Alter	KK: 0,35 CV: 0,21	KK: 0,40 CV: 0,25	KK: 0,50* CV: 0,33*
Bundesland	KK: 0,27** CV: 0,16**	KK: 0,28** CV: 0,17**	KK: 0,27 CV: 0,16
Ortsgröße	KK: 0,30** CV: 0,22**	KK: 0,30** CV: 0,22**	KK: 0,15* CV: 0,11*
Tätigkeit	KK: 0,24** CV: 0,14**	KK: 0,25** CV: 0,15**	KK: NA CV: NA
Bildung	KK: NA CV: NA	KK: NA CV: NA	KK: NA CV: NA
Haushaltsnettoeinkommen	KK: 0,30** CV: 0,17**	KK: 0,26 CV: 0,16	KK: 0,27 CV: 0,16
Haushaltsgröße	KK: 0,24** CV: 0,14**	KK: 0,25** CV: 0,15**	KK: 0,19 CV: 0,11
Anzahl von Personen unter 18 Jahren im Haushalt	KK: 0,24 CV: 0,14	KK: 0,21 CV: 0,12	KK: 0,21 CV: 0,13

Abhängige Variable Unabhängige Variable	Güter des täglichen Be- darfs	Güter des mittelfristigen Bedarfs	Güter des langfristigen Bedarfs
Anzahl von Personen zwi- schen 18 und 64 Jahren im Haushalt	KK: 0,14 CV: 0,08	KK: 0,22 CV: 0,13	KK: 0,17 CV: 0,10
Anzahl von Personen mit 65 Jahren und älter im Haushalt	KK: 0,18 CV: 0,13	KK: 0,16 CV: 0,11	KK: 0,26 CV: 0,19

Erläuterung zur Tabelle:

KK – Kontingenzkoeffizient, CV - Cramér's V, NA – Fehlender Wert (z.B. aufgrund zu geringer Fallzahlen oder Variation bei einer Variablen)

Fett – Signifikanter Zusammenhang vorhanden

* Signifikant auf dem Level von 5%, ** Signifikant auf dem Level von 1%

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Das Bundesland sowie die Ortsgröße des Wohnortes, die berufliche Tätigkeit, das Haushaltsnettoeinkommen und die Haushaltsgröße üben einen signifikanten Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl bei persönlichen Einkaufswegen für den Erwerb von Gütern des täglichen Bedarfs aus. So sind es nur die drei Stadtstaaten Berlin, Bremen und Hamburg, in denen weniger als 50% hauptsächlich das Auto auf persönlichen Einkaufswegen für den Kauf von beispielsweise Lebensmitteln, Drogerieprodukten oder Medikamenten verwenden. Dies spiegelt sich auch im Einfluss der Ortsgröße wieder. Nur in Orten mit mehr als 100.000 EinwohnerInnen nutzen mit 49%, knapp weniger als die Hälfte, der Befragten hauptsächlich das Auto für den Erwerb von Gütern des täglichen Bedarfs, während das Fahrrad und das Zu-Fuß-Gehen mit 14% bzw. 30% hier ihre höchsten Anteile erreichen.

Bei der beruflichen Tätigkeit fällt auf, dass für RentnerInnen, Hausmänner oder Hausfrauen, Personen in Mutterschaftsurlaub oder Elternzeit, in Vollzeit Berufstätige und Auszubildende das Auto das dominante Verkehrsmittel für den Erwerb von Gütern des täglichen Bedarfs darstellt. Jeweils mindestens 66% gaben an, hierfür hauptsächlich das Auto zu verwenden. Bei den Studierenden und den Arbeitslosen gab mit 34% bzw. 40% auch ein relativ großer Anteil an, hauptsächlich zu Fuß zu gehen. Ferner lässt sich tendenziell sagen, dass mit steigendem Haushaltseinkommen und zunehmender Haushaltsgröße der Anteil der Befragten zunimmt, die hauptsächlich das Auto für den Erwerb von Gütern des täglichen Bedarfs nutzen, während der Anteil der Befragten, die auf diesen Wegen hauptsächlich zu Fuß gehen sinkt.

Bei den persönlichen Einkaufswegen für den Erwerb von Gütern des mittelfristigen Bedarfs lassen sich ähnliche Einflüsse auf die Verkehrsmittelwahl feststellen. Auch hier sind es nur die drei Stadtstaaten bzw. Orte mit mehr als 100.000 EinwohnerInnen, in denen weniger als die Hälfte der Befragten angibt, hauptsächlich das Auto auf diesen Einkaufswegen zu nutzen. In Orten mit mehr als 100.000 EinwohnerInnen gaben jeweils 10%, 29% bzw. 12% der Befragten an, auf persönlichen Einkaufswegen für den Erwerb von Gütern des mittelfristigen Bedarfs hauptsächlich das Fahrrad oder den ÖPV zu nutzen bzw. zu Fuß zu gehen. Während jeweils über 62% der Hausmänner und Hausfrauen, der in Mutterschaftsurlaub oder Elternzeit befindlichen Personen, der Rentner und der in Vollzeit berufstätigen Personen hauptsächlich das Auto für den Erwerb von Gütern des mittelfristigen Bedarfs nutzen, nutzt mit 37% bzw. 26% auch ein relevanter Anteil der Studierenden und Arbeitslosen auf diesen Einkaufswegen den ÖPV. Schließlich lässt sich für die persönlichen Einkaufswegen für den Erwerb von Gütern des mittelfristigen Bedarfs

festhalten, dass mit zunehmender Haushaltsgröße der Anteil der Personen zunimmt, die hauptsächlich das Auto auf diesen Wegen nutzen.

Lediglich das Geschlecht, das Alter und die Ortsgröße des Wohnortes unserer Befragten üben einen signifikanten Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl für persönliche Einkaufswege für den Erwerb von Gütern des langfristigen Bedarfs aus. Frauen nutzen hierbei tendenziell etwas öfter das Auto und das Fahrrad als Männer, während letztere etwas öfter zu Fuß gehen oder den ÖPV nutzen. Zwar gaben in allen Altersgruppen mindestens 83% der Befragten an, dass sie hauptsächlich das Auto für den Erwerb von Gütern des langfristigen Bedarfs verwenden. Bei der Gruppe der 60-69-Jährigen ist dieser Anteil mit 92% aber noch einmal etwas höher als in allen anderen Altersgruppen. Das Auto ist ebenfalls in allen Ortsgrößen des Wohnortes das absolut dominante Verkehrsmittel für den Erwerb von Gütern des langfristigen Bedarfs. Jedoch sinkt sein Anteil von 91% in Orten mit weniger als 20.000 EinwohnerInnen auf 85% in Orten mit 20.000-99.999 EinwohnerInnen und auf 80% in Orten mit mehr als 100.000 EinwohnerInnen.

Tabelle 34 zeigt schließlich die Einflussfaktoren auf die bei persönlichen Einkaufswegen zurückgelegte Distanz und die Wegedauer.

Tabelle 34: Einflussfaktoren auf die bei persönlichen Einkaufswegen zurückgelegte Distanz und Wegedauer nach unterschiedlichen Gütergruppen

Abhängige Variable Unabhängige Variable	Unter-scheidung Wegedistanz /Wegedauer	Güter des täglichen Bedarfs	Güter des mittel- fristigen Bedarfs	Güter des langfristi- gen Bedarfs
Geschlecht	Distanz (in km)	ET: 0,00	ET: 0,00	ET: 0,00
	Dauer (in min)	ET: 0,01	ET: 0,01	ET: 0,00
Alter	Distanz (in km)	r: -0,03	r: -0,13**	r: -0,16**
	Dauer (in min)	r: 0,06	r: -0,02	r: -0,12**
Bundesland	Distanz (in km)	ET: 0,03*	ET: 0,05**	ET: 0,02
	Dauer (in min)	ET: 0,01	ET: 0,02	ET: 0,03
Ortsgröße	Distanz (in km)	SRK: -0,30** KT: -0,04	SRK: -0,39** KT: -0,13**	SRK: -0,22** KT: -0,01
	Dauer (in min)	SRK: -0,30** KT: -0,04	SRK: -0,39** KT: -0,13**	SRK: -0,22** KT: -0,01
Tätigkeit	Distanz (in km)	ET: 0,01	ET: 0,02	ET: 0,01
	Dauer (in min)	ET: 0,03**	ET: 0,02	ET: 0,01

Abhängige Variable Variable Unabhängige Variable	Unter-scheidung Wegedistanz /Wegedauer	Güter des täglichen Bedarfs	Güter des mittel- fristigen Bedarfs	Güter des langfristi- gen Bedarfs
Bildung	Distanz (in km)	SRK: -0,02 KT: -0,05	SRK: -0,04 KT: 0,00	SRK: -0,08 KT: 0,01
	Dauer (in min)	SRK: -0,02 KT: -0,05	SRK: -0,04 KT: 0,00	SRK: -0,08 KT: 0,01
Haushaltsnettoein- kommen	Distanz (in km)	SRK: 0,09* KT: -0,07**	SRK: 0,12** KT: -0,01	SRK: 0,10* KT: 0,01
	Dauer (in min)	SRK: 0,09* KT: -0,07**	SRK: 0,12** KT: -0,01	SRK: 0,10* KT: 0,01
Haushaltsgröße	Distanz (in km)	SRK: 0,15** KT: 0,01	SRK: 0,13** KT: 0,03	SRK: 0,16** KT: 0,05
	Dauer (in min)	SRK: 0,15** KT: 0,01	SRK: 0,13** KT: 0,03	SRK: 0,16** KT: 0,05
Anzahl von Perso- nen unter 18 Jahren im Haushalt	Distanz (in km)	SRK: 0,08 KT: -0,02	SRK: 0,07 KT: -0,01	SRK: 0,06 KT: 0,04
	Dauer (in min)	SRK: 0,08 KT: -0,02	SRK: 0,07 KT: -0,01	SRK: 0,06 KT: 0,04
Anzahl von Perso- nen zwischen 18 und 64 Jahren im Haushalt	Distanz (in km)	SRK: 0,04 KT: -0,02	SRK: 0,12** KT: 0,07*	SRK: 0,08 KT: 0,03
	Dauer (in min)	SRK: 0,04 KT: -0,02	SRK: 0,12** KT: 0,07*	SRK: 0,08 KT: 0,03
Anzahl von Perso- nen mit 65 Jahren und älter im Haus- halt	Distanz (in km)	SRK: 0,05 KT: 0,02	SRK: -0,02 KT: 0,02	SRK: 0,02 KT: 0,10
	Dauer (in min)	SRK: 0,05 KT: 0,02	SRK: -0,02 KT: 0,02	SRK: 0,02 KT: 0,10

Erläuterung zur Tabelle:

ET – η^2 , r – Pearson's Korrelationskoeffizient, SRK – Spearman's Rangkorrelationskoeffizient, KT – Kendall's Tau

NA – Fehlender Wert (z.B. aufgrund zu geringer Fallzahlen oder Variation bei einer Variablen)

Fett – Signifikanter Zusammenhang vorhanden

* Signifikant auf dem Level von 5%, ** Signifikant auf dem Level von 1%

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Die Wegedistanzen sowie die Wegedauer der persönlichen Einkaufswege für den Erwerb von Gütern des täglichen Bedarfs sinken bzw. steigen mit zunehmender Ortsgröße des Wohnortes und Größe des Haushaltes. Je größer der Ort, in dem eine Person wohnt, bzw. je kleiner ihr

Haushalt, desto kürzer sind die Wege, die sie im Durchschnitt für den Erwerb von Gütern des täglichen Bedarfs zurücklegt. Im Hinblick auf die berufliche Tätigkeit legen Personen, die sich in Mutterschaftsurlaub oder in Elternzeit befinden mit durchschnittlich 3,6 km deutlich kürzere persönliche Einkaufswege zurück, als Hausmänner oder Hausfrauen mit 6,4 km.

Bei den persönlichen Einkaufswegen für den Erwerb von Gütern des mittelfristigen Bedarfs üben das Alter und die Ortsgröße des Wohnortes einen negativen Einfluss auf die Wegedistanzen und die Wegedauern aus, während das Haushaltsnettoeinkommen und die Haushaltsgröße einen positiven Einfluss haben. Dementsprechend gilt, je älter eine Person ist und je größer der Ort ist, in dem sie wohnt, desto kürzer sind ihre persönlichen Einkaufswegen für den Erwerb von Gütern des mittelfristigen Bedarfs. Hingegen steigen die Wegedistanzen und -dauern mit zunehmendem Haushaltsnettoeinkommen und mit zunehmender Haushaltsgröße, insbesondere durch weitere Personen zwischen 18 und 64 Jahren im Haushalt. Auch das Bundesland des Wohnortes übt einen signifikanten Einfluss auf die Wegelänge aus. Während eine Person in Bremen oder im Saarland im Durchschnitt 3,4 km auf persönlichen Einkaufswegen für den Erwerb von Gütern des mittelfristigen Bedarfs zurücklegt, sind diese Wege in Mecklenburg-Vorpommern mit 19,3 km ca. sechsmal länger.

Bei den persönlichen Einkaufswegen für Erwerb von Gütern des langfristigen Bedarfs zeigen sich ähnliche Zusammenhänge. Je älter eine Person und je größer der Ort, in dem sie wohnt, desto kürzer sind die Wegedistanzen und die Wegedauern, die sie für den Erwerb von Gütern des langfristigen Bedarfs zurücklegt. Das Haushaltsnettoeinkommen und die Haushaltsgröße wirken sich im Gegensatz dazu positiv auf die Wegedistanzen und -dauern aus. Je höher das Haushaltsnettoeinkommen und je größer der Haushalt, desto längere Distanzen und Dauern werden auf persönlichen Einkaufswegen für den Erwerb von Gütern des langfristigen Bedarfs in Kauf genommen.

Einflussfaktoren auf das Internetbestellverhalten sowie das Belieferungs- und Versandverhalten

Die bivariate Analyse zeigt zunächst, dass kein wirklich relevanter Zusammenhang zwischen der Anzahl an Einkäufen und dem Geschlecht besteht, da der Fehler bei der Vorhersage der Anzahl an Interneteinkäufen bei Kenntnis des Geschlechts nur um irrelevante 0,3 % reduziert werden kann ($\text{Eta}^2 = 0,003$). Auch der negative Zusammenhang zwischen Alter und Anzahl an Interneteinkäufen ist nur sehr schwach. Etwas stärkere (positive) Zusammenhänge gibt es zwischen Interneteinkäufen und Bildung, Haushaltsnettoeinkommen und Haushaltsgröße.

Neben der Anzahl an Interneteinkäufen wurde darüber hinaus die Eigenschaft NutzerIn bzw. Nicht-NutzerIn von Online-Shopping zu sein produktgruppenspezifisch und in Relation zu weiteren Größen analysiert. Es zeigt sich, dass InterneteinkäuferInnen von Bekleidung, Elektronik und Haushaltswaren sowie Spielsachen tendenziell jünger, und solche von Medikamenten eher älter sind. Bezüglich der Ortsgröße ergibt sich, dass Lebensmittel eher in größeren Städten über das Internet bestellt werden, Produkte der Gruppe 9 (Heimwerken und Garten, Auto und Motorrad/Zubehör) hingegen eher in kleineren Städten. Zudem gibt es positive Zusammenhänge zwischen höherer Bildung und dem Onlinekauf von Büchern, Elektronikwaren und Haushaltswaren/Spielzeug oder einem höheren Haushaltsnettoeinkommen und Drogerieartikeln, Bekleidung sowie Büchern, Elektronikwaren und Haushaltswaren/Spielzeug. Gleiches gilt für die Haushaltsgröße (kein Zusammenhang mit dem Kauf von Drogerieartikeln, aber mit Möbeln) – insgesamt sind alle der gefundenen Zusammenhänge jedoch nicht stark ausgeprägt (Zusammenhangsmaße zwischen 0,1 und 0,26).

Für die gewählte Versandart gilt, dass es negative Zusammenhänge zwischen Alter und Premiumversand gibt. Premiumversand zeichnet sich im Unterschied zu Standardversand dadurch aus, dass er schneller, aber teurer ist. Es wundert nicht, dass er positiv mit einem höheren

Haushaltsnettoeinkommen sowie mit höherer Bildung korreliert. Same-Day-Delivery ist stark positiv mit der Ortsgröße korreliert. Wahrscheinlich liegt dies daran, dass diese Option des sehr schnellen Versands nicht für kleinere Städte zur Verfügung steht.

Bezogen auf das präferierte Belieferungszeitfenster wird ersichtlich, dass spätere Zeitfenster positiv mit Bildung und Haushaltsnettoeinkommen, und damit vielleicht Personen, die lange Arbeiten, korrelieren. Aus der Kontingenztafel zwischen beruflicher Tätigkeit und Belieferungszeitfenster ist erkennbar, dass eine Belieferung am Vormittag eher nicht von Berufstätigen bevorzugt wird.

Weitere interessante Ergebnisse aus der bivariaten Auswertung stellen die identifizierten Zusammenhänge zwischen zusätzlichen Zahlungsbereitschaften und sozioökonomischen Eigenschaften dar. Auffällig ist hierbei, dass es eher die jüngeren Personen sind, die bereit sind, für zeitpunktgenaue Zustellung, Lieferung an privat, schnellere Lieferung, gebündelte Lieferung, Lieferung in nachhaltiger Verpackung und klimaneutralen Transport einen Aufpreis zu zahlen (-0,14 bis -0,20). Außerdem korreliert eine erhöhte Zahlungsbereitschaft für nachhaltige Verpackung und klimaneutrale Lieferung positiv mit Bildung.

Bezüglich der Bereitschaft, längere Wege zum Abholen/Abgeben von Paketen von/zu der nächsten Postfiliale/Paketshop zurückzulegen, zeigt sich, dass Männer längere Wege in Kauf nehmen.

Wer ein Paket holen muss bzw. abgibt, verbindet diese Tätigkeit teilweise mit anderen Erledigungen. Je älter die Personen sind, desto eher sind diese nicht Arbeits- bzw. Freizeitwege. Das Abgeben von Rücksendungen an Abgabeorte mit Arbeitswegen zu verbinden korreliert jedoch positiv mit dem Haushaltsnettoeinkommen.

In diesem Zusammenhang ist es von besonderem Interesse, auch in Erfahrung zu bringen, wie die Anzahl an Rücksendungen mit den Charakteristika der Personen zusammenhängt. Zunächst wird identifiziert, dass der Zusammenhang zum Geschlecht, bzw. ein Erklärgehalt durch Kenntnis des Geschlechts, nicht gegeben ist. Je jünger eine Person dabei ist, desto eher schickt sie im Internet bestellte Ware wieder zurück. Zudem korrelieren Bildung und Haushaltsnettoeinkommen positiv mit einer erhöhten Anzahl an Rücksendungen. Gleiches gilt für große Haushaltsgrößen.

Tabelle 35: Bivariate Auswertung zum Online-Einkaufsverhalten sowie Bestell- und Rücksendeverhalten von Privatpersonen

Abhängige Variable Unabhängige Variable	Anzahl an Internet-käufen	Online-Nutze-rlin	Versand	Belieferungs-Zeitfenster	Zahlungs-be-reitschaft	Zustellorte	Entfernung	Erledigungen	Anzahl an Rücksendun-gen
Geschlecht	Eta ² : 0,003	-	-	-	-	-	Eta ² : Postfiliale: 0,17 Paketshop: 0,26	-	Eta ² : 0,017
Alter	PP: -0,09**	Pb: 3) -0,19** 5) -0,16** 6) 0,10** 7) -0,11**	Pb: Premium -0,17** Standard 0,09**	-	SRK: Zeitgenau -0,18* Privat -0,14** Schnell -0,18** Ganzladung -0,14** Nachhaltige Verpackung -0,15** Klimaneutrale Anlieferung -0,20**	PB: An Privat 0,08*	-	Pb: Rücksendung wegbringen nach Arbeit: -0,28** Rücksendung wegbringen nach Freizeit: -0,17**	PP: -0,15**
Ortsgröße	-	GKK: 1) 0,19** 9) -0,17**	GKG: SDD 0,47**	-	-	GKG: Arbeit 0,40** Paketshop 0,35** Privat: -0,32**	-	-	-
Tätigkeit	-	-	-	KK: 0,43 CV: 0,27	-	-	-	-	KK: 0,39 CV: 0,15

Abhängige Variable Unabhängige Variable	Anzahl an Internet-käufen	Online-Nutze-rin	Versand	Belieferungs-Zeitfenster	Zahlungs-be-reitschaft	Zustellorte	Entfernung	Erledigungen	Anzahl an Rücksendun-gen
Bildung	SRK: 0,13**	GKG: 4) 0,26** 5) 0,15** 7) 0,16**	GKG: Premium 0,12*	SRK: 0,31**	SRK: Nachhaltige Verpackung 0,11** Klimaneutrale Anlieferung 0,11**	-	-	-	SRK: 0,09**
Haushaltsnetto-Einkommen	SRK: 0,19**	GKG: 2), 0,15** 3) 0,17** 4) 0,19** 5) 0,15** 7) 0,24**	GKG: Premium 0,18**	SRK: 0,26**	-	-	SRK: Postfiliale -0,71**	GKG: Rücksendung wegbringen nach Arbeit: 0,20*	SRK: 0,09*
Haushaltsgröße	PP: 0,15**	Pb: 3) 0,1** 4) 0,11** 5) 0,11** 7) 0,20** 8) 0,13**	-	-	-	-	-	-	PP: 0,10**

PP: Pearson's Korrelationskoeffizient

Pb: Punktbiseriale Korrelation

SRK: Spearman's Rangkorrelationskoeffizient

GKG: Goodman und Kruskal's Gamma

KK: Kontingenzkoeffizient

CV: Cramér's V

*(**) Signifikant auf dem Level von 5% (1%)

Produktgruppen:

- 1.) Lebensmittel
- 2.) Drogerieartikel, Kosmetik und Parfüm
- 3.) Bekleidung, Schuhe und Accessoires
- 4.) Bücher, Schreibwaren und Bürobedarf
- 5.) Elektronikartikel
- 6.) Medikamente, Arzneimittel
- 7.) Haushaltswaren, Spielwaren
- 8.) Möbel, Haushaltsgeräte (u. a. Kühlschrank etc.)
- 9.) Heimwerken und Garten, Auto und Motorrad/Zubehör
- 10.) Sonstiges
- 11.) Tierbedarf
- 12.) Bild- und Tonträger

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

3.4.3.7 Multivariate Analyse

Im Folgenden werden Regressionsmodelle zur Erklärung des Interneteinkaufs in Abhängigkeit sozio-demographischer und -ökonomischer Charakteristika, Ortsgröße und Präferenzen bzgl. Versand und Zustellung erstellt. Je nach Skalenniveau der zu erklärenden Variable wird dabei auf folgende Methoden zurückgegriffen.

- ▶ Poisson-Regression (bzw. Negativ-Binomial-Regression)
- ▶ Logistische Regression
- ▶ Multinomiale logistische Regression
- ▶ Ordinale logistische Regression

Hierdurch ist es möglich, den Einfluss mehrerer Variablen im Zusammenspiel zu analysieren und damit die Erkenntnisse aus den bivariaten Analysen essentiell zu erweitern.

Einflussfaktoren auf die Häufigkeit persönlicher Einkaufswege unter Betrachtung der Nutzungshäufigkeit von Online-Handel

Um zu überprüfen, inwieweit die Nutzung von Online-Handel bereits zu einer Substitution von persönlichen Einkaufswegen führt, wurden ordinale und multinomiale Regressionsanalysen sowie Clusterverfahren und Regressionsbäume berechnet. Diese wurden sowohl im Hinblick auf die Häufigkeit persönlicher Einkaufswege für die aggregierten Gütergruppen (täglicher, mittel- und langfristiger Bedarf), als auch für die einzelnen Gütergruppen (Lebensmittel, Drogerieprodukte etc.) durchgeführt. Als unabhängige Variablen flossen jeweils Geschlecht, Alter, Haushaltsgröße, Haushaltseinkommen, Ortsgröße, Bundesland, Anzahl der Interneteinkäufe, berufliche Tätigkeit, höchster formaler Bildungsabschluss, genutzte Verkehrsmittel für persönliche Einkaufswege, Anzahl Pkw im Haushalt sowie Führerscheinbesitz in die Modelle mit ein.

Als zentrales Ergebnis kann hierbei festgehalten werden, dass in keinem der berechneten Modelle ein signifikanter Einfluss der Anzahl der Interneteinkäufe auf die Häufigkeit der persönlichen Einkaufswege festgestellt werden konnte. Dies gilt sowohl für die aggregierten als auch für die einzeln betrachteten Gütergruppen. Somit werden die Ergebnisse der multivariaten Analysen auf Basis der nationalen Verkehrserhebungen in Deutschland, den USA und England bestätigt. Demzufolge sprechen alle Ergebnisse der vorliegenden Studie dafür, dass zurzeit noch keine Substitution von persönlichen Einkaufswegen durch Online-Handel stattfindet.

Zusätzlich soll an dieser Stelle angemerkt werden, dass keines der berechneten Modelle eine hohe Modellgüte aufwies. Es wurden zwar viele unterschiedliche Variablenkonstellationen betrachtet und auch diverse Klassifikationen verschiedener Variablen getestet, aber dennoch konnte für keine der aggregierten und einzeln betrachteten Gütergruppen ein im Hinblick auf Bestimmtheitsmaße und Signifikanzen zufriedenstellendes Modell entwickelt werden. Der primäre Grund hierfür dürfte die Kombination fehlender Werte unterschiedlicher Personen bei verschiedenen Variablen sein, sodass viele Fallausschlüsse vorliegen, wodurch auch die Varianz innerhalb der untersuchten Variablen beeinträchtigt wird.

Auch die Clusteranalysen, bei denen untersucht wurde, ob sich anhand soziodemographischer Merkmale verschiedene Personengruppen im Hinblick auf die Nutzungshäufigkeit von Online-Handel für unterschiedliche Gütergruppen bilden lassen, brachten keine zufriedenstellenden Ergebnisse hervor. Dabei wurden sowohl partitionierende als auch hierarchische Clusteranalysen mit unterschiedlichen Linkage-Verfahren (single, average, complete, centroid, k-means) und Distanzmaßen (euclidean, pearson) sowie Variablenkombinationen getestet. Zudem wurde die

Anzahl der Interneteinkäufe nach Quartilen in Gruppen eingeteilt, wobei weniger als dreimal zu „selten“, ab drei bis unter 11-mal zu „gelegentlich“ und mindestens 11-mal zu „häufig“ wurde.

Dennoch brachten alle unterschiedlichen Analysen stets Cluster hervor, denen nur ein bis zwei Personen zugeordnet wurden, während sich alle anderen Personen in ein und demselben Cluster befinden. Es wurde vermutet, dass dies daran liegt, dass bei vielen Gütergruppen die allermeisten Personen nichts online eingekauft haben. Aber auch ein Ausschluss dieser Gütergruppen aus dem Datensatz brachte keine Verbesserung.

Aus diesem Grund wurde ein Versuch mit dem Ausschluss von Ausreißern getestet, der jedoch ebenfalls keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferte. Hierbei ist zu erwähnen, dass der Datensatz von 854 auf 287 Personen reduziert wurde. Auch die gerechneten Regressionsbäume konnten nicht dazu beitragen, unterschiedliche Personengruppen im Hinblick auf die Nutzungshäufigkeit von Online-Handel für unterschiedliche Gütergruppen zu identifizieren.

Dementsprechend lässt sich als zentrales Ergebnis der Clusteranalysen und Regressionsbäume festhalten, dass im vorliegenden Datensatz keine homogenen Personengruppen ermittelt werden konnten, die sich im Hinblick auf die Nutzungshäufigkeit von Online-Handel für den Einkauf spezifischer Gütergruppen unterscheiden. Dies deutet darauf hin, dass Personen, die beispielsweise Drogerieprodukte, Lebensmittel, Bücher oder auch Möbel im Internet erwerben, sich im Hinblick auf Geschlecht, Alter, Haushaltsnettoeinkommen und weitere soziodemographische Variablen nicht hinreichend voneinander unterscheiden, um von homogenen Käufergruppen bei einem Produkt sprechen zu können.

Einflussfaktoren auf das Internetbestellverhalten

Zur gleichzeitigen Analyse des Einflusses mehrerer Variablen auf das Internetbestellverhalten wurden multiple Regressionsmodelle geschätzt. Das Internetbestellverhalten lässt sich im vorliegenden Datensatz am besten durch eine Modellierung der Variable ‚Anzahl an Interneteinkäufen (innerhalb der letzten drei Monate)‘ erklären. Da es sich bei dieser Variablen um eine metrische Variable handelt, muss zur Modellierung eine Regressionstechnik für metrische Variablen zum Einsatz kommen. Das Benchmark-Verfahren ist hierbei die Poisson-Regression. Diese unterstellt, dass die abhängige Variable Anzahl an Interneteinkäufen, gegeben die unabhängigen Variablen, einer Poisson-Verteilung folgt. Dies impliziert insbesondere eine sogenannte Equidispersion, d.h. Mittelwert- und Varianzgleichheit. Ist die Annahme der Equidispersion verletzt, sollte anstelle eines Poisson-Regressionsmodells die Verwendung eines Negativ-Binomial-Regressionsmodells in Betracht gezogen werden. Tatsächlich zeigt die Modelldiagnostik im vorliegenden Fall, dass nur das Negativ-Binomial-Regressionsmodell zu adäquaten Modellierungsergebnissen führt. Zur Erklärung werden die Variablen verwendet, für die schon in der bivariaten Analyse eine relevante Korrelation mit der Anzahl an Interneteinkäufen erkannt wurde. Dies sind:

- ▶ Bildung,
- ▶ Haushaltsnettoeinkommen und
- ▶ Haushaltgröße.

Als Kontrollvariable wurden zusätzlich das Geschlecht, die Ortsgröße, der Führerscheinbesitz und die Anzahl an Pkw, die dem Haushalt zur Verfügung stehen, in den multiplen Modellen evaluiert, um zu überprüfen, ob Bildung, Haushaltsnettoeinkommen und Haushaltgröße relevant bleiben, bzw. ob und wie stark sich die Variablen im Zusammenwirken beeinflussen und die Parameterschätzungen verändern. Das beste Modell (bezogen auf das Pseudo- R^2 nach McFadden [0.22] und das Akaike Informationskriterium [5129,9]) ist ein Negativ-Binomial-

Regressionsmodell mit den erklärenden Variablen Geschlecht, Bildung, Haushaltsnettoeinkommen sowie Haushaltgröße. Die Ergebnisse des Modells werden in Tabelle 36 aufgezeigt.

Tabelle 36: Zusammenfassung des Negativ Binomialmodells

Variable	Koeffizient	Std.-Fehler	z-Wert	p-Wert	Signifikanz
Konstante	1,24713	0,18062	6,905	5,03*10 ⁻¹²	**
Geschlecht (Ref.: Mann) Frau	0,16904	0,06642	2,545	0,01092	*
Bildung (Ref.: Höchstens Hauptschulab.) Hochschulabschluss (Fach-)Abitur Realschulab.	0,33315 0,34820 0,20081	0,13291 0,12556 0,12272	2,507 2,773 1,636	0,01219 0,00555 0,10178	* **
Haushaltsnettoeinkommen (Ref.: Unter 900€) 900 € bis unter 2.000€ 2.000 € bis unter 3.000€ 3.000 € bis unter 4.000€ 4.000 € bis unter 5.000€ 5.000 € bis unter 6.000€ 6.000 € und mehr	0,29926 0,37581 0,41566 0,53560 0,63511 0,39134	0,15130 0,15476 0,16147 0,20908 0,21438 0,23619	1,978 2,428 2,574 2,562 2,963 1,657	0,04794 0,01517 0,01005 0,01042 0,00305 0,09754	* * * * ** *
Anzahl an Haushaltsmitgliedern	0,08747	0,03133	2,792	0,00523	**

*(**) Signifikant auf dem Level von 5% (1%)

Quelle: Eigene Darstellung

Der Output zeigt, dass Frauen im Mittel ca. 1,2-mal mehr Artikel im Internet kaufen als Männer, vorausgesetzt alle anderen Einflussfaktoren sind gleich. Analog lassen sich die Koeffizienten der anderen Einflussvariablen interpretieren: Personen mit Hochschulabschluss kaufen beispielsweise im Mittel 1,39-mal mehr als Personen, die (höchstens) einen Hauptschulabschluss erworben haben. Ähnliches gilt für Personen mit Abitur (aber keinem Hochschulabschluss). Auch Personen mit einem Realschulabschluss (ohne Abitur) kaufen im Mittel mehr Ware im Internet (positiver Koeffizient) als Personen mit (höchstens) einem Hauptschulabschluss – der Unterschied ist hier jedoch nicht signifikant. Bezogen auf das Haushaltseinkommen gilt: Je mehr ein Haushalt an (Netto-)Einkommen zur Verfügung hat, desto mehr kauft er im Mittel im Internet ein. Eine Ausnahme ist in diesem Fall ein Einkommen von mehr als 6.000 Euro. Im Mittel werden von diesen Personen zwar 1,47-mal mehr Artikel bestellt, als bei Personen mit einem Haushaltsnettoeinkommen von unter 900 Euro, die Personen mit einem Haushaltseinkommen zwischen 2.000 Euro und 6.000 Euro haben hier jedoch höhere, relative Mehrkäufe. Analysiert man den Einfluss der Anzahl an Haushaltsmitgliedern, so lässt sich festhalten, dass Haushalte mit einem zusätzlichen Haushaltsmitglied 1,19 Pakete im Mittel mehr kaufen, als Haushalte mit einer um eins geringeren Anzahl an Haushaltsmitgliedern.

3.5 Quantifizierung verkehrlicher und ökologischer Wirkungen von Logistik und Zustellverkehren

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Auswirkungen des Online-Handels bzw. des Konsums- und Einkaufsverhaltens auf den Güterverkehr – vornehmlich auf den KEP-Verkehr – mittels ausgewählter Simulationsmodelle abgeschätzt und aufgezeigt. Basierend darauf können die ökologischen Effekte abgeleitet werden.

Ziel ist hierbei die Quantifizierung der verkehrlichen und ökologischen Wirkungen.

Zusätzlich werden im Folgenden ausgewählte Logistikkonzepte, u.a. **Same-Day- und Instant-Deliveries, Lebensmittellieferungen und Zustellungen zu Paketstationen** untersucht und deren Auswirkungen auf die betrachteten Lieferverkehre sowie deren ökologische Effekte aufgezeigt.

Basierend auf den zentralen Ergebnissen der Literaturanalyse zu den Logistikkonzepten (siehe Kapitel 3.1) sowie den empirischen Erkenntnissen der Primärdatenerhebung zum Einkaufs-, Online-Bestellverhalten sowie zum Belieferungs- und Versandverhalten privater Haushalte (siehe Kapitel 3.4) werden Szenarien als Grundlage für die Modellierung entwickelt, die Modelle und diese mittels der eingesetzten Modellierungsinstrumente analysiert.

Im Folgenden werden zunächst die herangezogenen Modelle vorgestellt. Danach wird im Detail auf die drei ausgewählten Logistikkonzepte eingegangen. Hierbei werden die Fälle zunächst in Szenarien definiert, die Datenfundierung und Parametrisierung der Modelle aufgezeigt und anschließend die wesentlichen Simulationsergebnisse zu den verkehrlichen und ökologischen Effekten der Logistikkonzepte diskutiert.

Die Simulationsergebnisse dienen als Grundlage für konkrete Handlungsempfehlungen für die Verkehrs- und Umweltpolitik.

3.5.1 Urbane Wirtschaftsverkehrsmodellierung

In diesem Kapitel werden zunächst die eingesetzten Modellierungsinstrumente von DLR Institut für Verkehrsforschung, Abteilung Wirtschaftsverkehr zur Abschätzung verkehrlicher Wirkungen von Zustellverkehren im urbanen Raum im Überblick vorgestellt.

3.5.1.1 Modellierung mittels MATSim und Jsprit nach Schröder et al. (2012)

Zur detaillierten Untersuchung der Sonderfälle Same-Day- und Instant-Delivery und Lebensmittellieferungen wird die mikroskopische, agentenbasierte Verkehrssimulation MATSim und das integrierte Logistik-Modul Jsprit eingesetzt. MATSim dient hierbei zur Abbildung des Verhaltens und der Entscheidungsprozesse heterogener EntscheidungsträgerInnen im Güterverkehr auf infrastruktureller Ebene. Dagegen dient Jsprit zur Tourenoptimierung. Mittels Jsprit kann bisher jedoch nur ein verhaltenshomogener Sektor im Güterverkehr jeweils simuliert werden. Im Rahmen von MATSim/Jsprit wird ein typischer Tag simuliert.

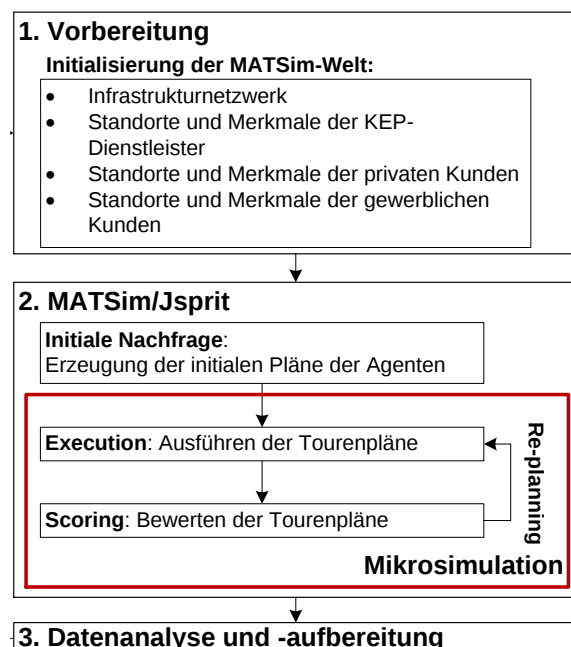
Bei der Optimierung der Transportkosten mittels Jsprit gelten folgende Nebenbedingungen.

- Die Belieferungsfahrten zu den KundInnen beginnen beim jeweiligen Distributionszentrum.
- Die Belieferungsmengen an die KundInnen sind im Voraus bekannt.
- Die Auslieferzeiten der Belieferungen können durch Zeitfenster beschränkt werden.
- Jeder FrachtführerIn wird ein Fuhrpark zugewiesen, der aus unterschiedlichen Fahrzeugtypen besteht. Die Fahrzeugtypen unterscheiden sich hinsichtlich Kapazität und Kosten.

- Alle Fahrzeuge starten und enden beim Distributionszentrum.
- Einem Fahrzeug kann höchstens eine Route pro Tag zugewiesen werden.

In Abbildung 66 wird die Modellstruktur von MATSim und Jsprit aufgezeigt. Hierbei sind drei Modellierungsschritte durchzuführen. Im ersten Schritt wird das Modell vorbereitet, d. h. die initiale Welt von MATSim, wird aufgebaut. Dazu werden das Infrastrukturnetzwerk sowie die georeferenzierten Standorte und Merkmale der KEP-Dienstleistungsunternehmen sowie der privaten und gewerblichen KundInnen aufbereitet und für die Simulation hinterlegt. Im zweiten Schritt erfolgt die eigentliche Simulation des Modells. Dabei werden zunächst die initialen Pläne der Agenten erzeugt und basierend darauf die Tourenpläne ausgeführt. In einem weiteren Schritt werden die durchgeführten Tourenpläne nach Kosten-Nutzenfunktionen bewertet und ggf. in einer weiteren Iteration neu geplant. Diese drei Schritte Execution, Scoring und Re-Planning werden iterativ ausgeführt, bis ein Systemoptimum erreicht wird. Danach erfolgt abschließend die Datenaufbereitung und -analyse.

Abbildung 66: Modellstruktur von MATSim und Jsprit



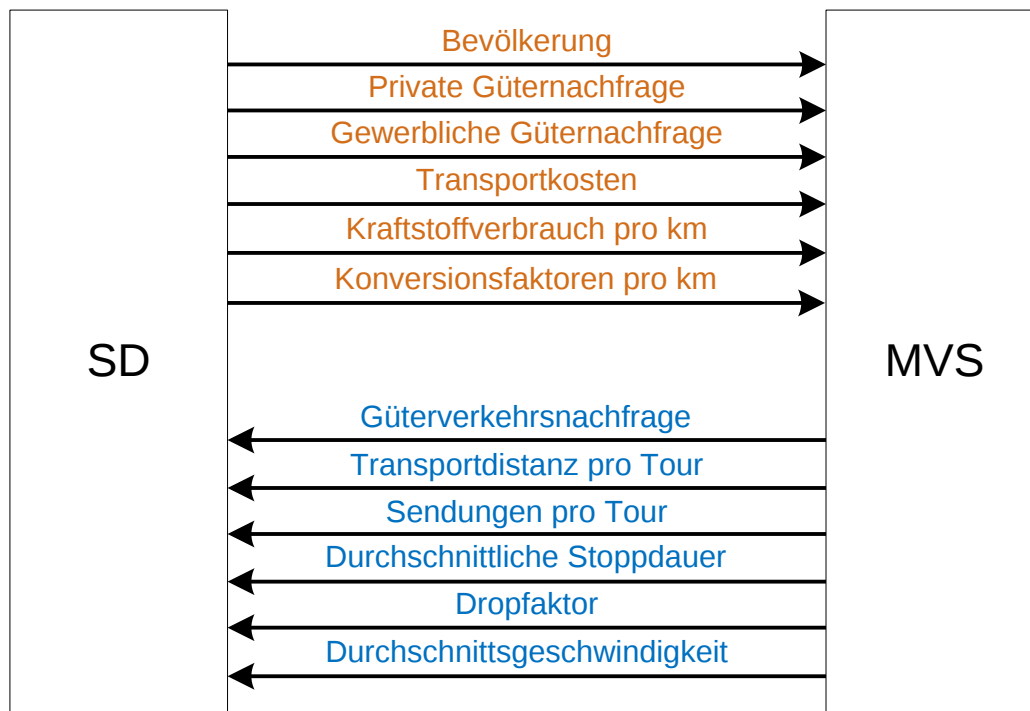
Quelle: Thaller (2018) nach Schröder et al. (2012)

3.5.1.2 Modellierung mittels der Strategischen Verkehrsprognose nach Thaller (2018)

Zur Analyse der verkehrlichen Wirkungen des Sonderfalls „Paketstationen“ wird die Strategische Verkehrsprognose nach Thaller (2018) eingesetzt. Dabei handelt es sich um einen Rückkopplungsansatz zwischen einer Makroskopischen Extrapolation und einer Mikroskopischen Verkehrssimulation. Als Extrapolator wird die Methodik System Dynamics genutzt, als mikroskopische Verkehrssimulation hingegen MATSim und Jsprit. Auch in diesem Fall wird als Untersuchungsgebiet Berlin gewählt.

In Abbildung 67 wird der Rückkopplungsansatz zwischen System Dynamics (SD) und der mikroskopischen Verkehrssimulation MATSim/Jsprit (MVS) aufgezeigt. Hierbei werden auch die Parameter gezeigt, die von SD zur MVS (in orange hinterlegt) und von der MVS zu SD (in blau hinterlegt) transferiert werden. Diese Abbildung zeigt den Rückkopplungsansatz zum Fallbeispiel KEP-Markt in Berlin.

Abbildung 67: Rückkopplungsansatz nach Thaller (2018) für das Fallbeispiel KEP-Markt in Berlin



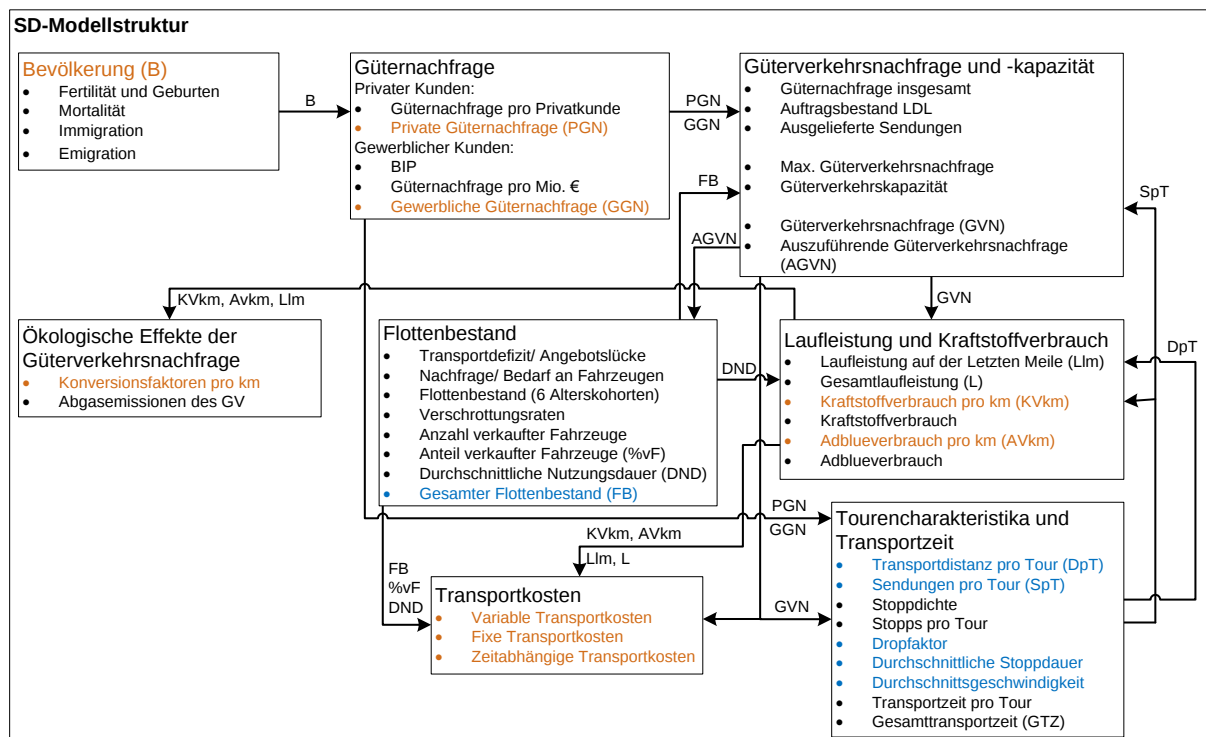
Quelle: Thaller (2018)

Die MVS wird zunächst für das Basisjahr 2009 initialisiert. Mittels MATSim und Jsprit werden die verkehrlichen Wirkungen des KEP-Verkehrs auf disaggregierter, infrastruktureller bzw. räumlicher Ebene abgebildet. Danach erfolgt die Aggregation der Simulationsergebnisse. Hierbei werden die relevanten Werte der Parameter, die zur Initialisierung von System Dynamics benötigt werden, aufbereitet und an SD transferiert. Das SD Modell wird mit den aggregierten Parametern aus der MVS für das Jahr initialisiert. Damit wird nun eine Prognose für das nächste Jahr berechnet. Anschließend werden die Werte der Parameter für das Jahr 2010, die zur Initialisierung der MVS benötigt werden, aufbereitet und an die MVS transferiert. In der MVS werden die herangezogenen Daten aus dem SD-Modell disaggregiert.

Dieser iterative Prozess wird für den Betrachtungshorizont 2009 bis 2030 durchgeführt. Damit ist eine langfristige Prognose unter Berücksichtigung des räumlichen Kontexts möglich.

Da bereits MATSim und Jsprit zuvor präsentiert wurde, wird nun noch im Überblick der strukturelle Aufbau des entwickelten SD-Modells für das Fallbeispiel KEP-Markt gezeigt (siehe Abbildung 68).

Abbildung 68: SD-Modellstruktur zum Fallbeispiel KEP-Markt



Quelle: Thaller (2018)

Das entwickelte Modell besteht aus insgesamt acht Modulen, die in Abhängigkeit zueinander stehen. Mittels des SD-Modells können langfristige Prognosen auf hochaggrierter Ebene durchgeführt werden. Für dieses Fallbeispiel ist der Betrachtungshorizont 2009 bis 2030. In 1-Jahresintervallen wird eine Hochrechnung bis 2030 vorgenommen.

3.5.2 Szenario Same-Day- und Instant-Deliveries

Zur Abschätzung der Wirkungen der **Same-Day- und Instant-Delivery** wird die vorhandene mikroskopische, verhaltensbasierte Verkehrssimulation MATSim (Balmer et al. 2009) und das integrierte Logistik-Modul Jsprit (Schröder et al. 2012) eingesetzt. Dieses Instrument dient vornehmlich zur Abschätzung der verkehrlichen Effekte. Dazu wurde bereits ein Basisszenario zur Simulation des Kurier-, Express- und Paketmarktes in Berlin aufgebaut (Thaller 2018). Zu diesem Zweck wurden die Daten zur Parametrisierung bzw. Initialisierung des Modells für das Jahr 2017 verwendet.

Die Umsetzung der Same-Day- und Instant-Delivery erfordert seitens der Logistikdienstleistungsunternehmen ein anderes Logistikkonzept, das ein anderes Logistiknetzwerk mit integrierten Mikro-Depots sowie eine zweistufige Distribution über diese Mikro-Depots auf der Letzten Meile erfordert. Vor diesem Hintergrund wird das eigentliche Logistikkonzept als Grundlage zur Umsetzung der Same-Day- und Instant-Belieferungsform im Folgenden im Detail untersucht.

Ein bereits implementiertes Maßnahmenzenario betrachtet dabei die Wirkungen innerstädtischer Konsolidierungszentren bzw. Mikro-Depots unter Einsatz von Lastenfahrrädern auf der Allerletzten Meile (Zhang et al. 2018). Dieses Maßnahmenzenario wurde bisher nur für den Bezirk Wilmersdorf umgesetzt und wird im Rahmen des vorliegenden Projektes auf ganz Berlin erweitert.

Hierbei ist noch die Frage zu klären, an welchen Standorten die Mikro-Depots implementiert werden sollen. Hinsichtlich des Szenarios Same-Day- und Instant-Deliveries müssen

Belieferungszeitfenster für die PrivatkundInnen spezifiziert werden. Die folgenden Effekte sind in diesem Fall zu erwarten.

- ▶ Geänderte Routenwahl
- ▶ Geändertes Fahrtenaufkommen je Fahrzeugtyp
- ▶ Geänderte Transportmodi
- ▶ Verbesserung des Verkehrsflusses
- ▶ Reduzierung der Transportkosten
- ▶ Reduzierung der Abgasemissionen

3.5.2.1 Szenarienbeschreibung und Parametrisierung des Modells

In diesem Szenario ist vorgesehen, die Belieferung der privaten (Privatpersonen, B2C) und gewerblichen KundInnen (B2B) durch die KEP-Dienstleistungsunternehmen in Berlin abzubilden.

Im **Basisszenario** wird die Belieferung mittels Lkw mit einem zul. GG von 3,5 t durchgeführt.

Die initiale Welt zur Simulation des KEP-Verkehrs bestehend aus 31 Distributionszentren, 2.305 Abholstellen (u. a. Postfilialen, Paketshops) und 162 Packstationen liegt in georeferenzierter Form vor. Die Standorte der gewerblichen KundInnen wurden mittels OpenStreetMap identifiziert und klassifiziert. Insgesamt befinden sich 19.014 gewerbliche KundInnen in dieser synthetischen Welt. Dabei handelt es sich um die Branchen Einzelhandel, Gastronomie und Dienstleistung. Zudem sind Verwaltungs- und Forschungseinrichtungen enthalten, die auch als KEP-affin eingestuft wurden. Zum Aufbau der Bevölkerungsstruktur wurden die Zensus-Daten von Berlin herangezogen. Hierbei liegt jeweils die Anzahl der Privatpersonen nach Alterskohorten pro Statistischen Block vor. (siehe Thaller 2018)

Die gewerblichen KundInnen geben bei ihrer Bedarfsmeldung an das Logistikdienstleistungsunternehmen ihre Güternachfrage (Anzahl der zu liefernden Paketeinheiten) und das Zeitfenster zur Belieferung an. Diese KundInnen werden grundsätzlich direkt an ihren Standort beliefert. PrivatkundInnen, die sich von KEP-Dienstleistungsunternehmen beliefern lassen, fragen pro Tag nur 1 Paket pro Person nach. Zudem können sie Zeitfenster zur Belieferung und ihre bevorzugte Belieferungsform (u. a. Packstation, Paketshop, Postfilialen, Hauszustellung) angeben.

Die Belieferung privater und gewerblicher KundInnen erfolgt jeweils von ihnen nächst gelegenen Distributionszentrum zu den angegebenen Zeitfenstern – im Basisszenario mit konventionell betriebenen Lkw 3,5 zul. GG.

Im **Szenario Same-Day- und Instant-Delivery** ändert sich nun die Belieferung der KundInnen. Im ersten Schritt erfolgt die Distribution der nachgefragten Paketeinheiten vom Distributionszentrum zu den Mikro-Depots mittels traditionell betriebener Lkw 3,5 zul. GG. Im zweiten Schritt werden die KundInnen von ihnen nächst gelegenen Mikro-Depot zu den angegebenen Zeitfenstern mittels Lastenfahrrädern beliefert. Auch in diesem Fall können die PrivatkundInnen neben der Hauszustellung die Belieferungsformen Packstationen, Paketshops und Postfilialen wählen.

Es wird angenommen, dass Mikro-Depots an Postfilialen, Packstationen und Parkflächen vor Supermärkten sowie an Tankstellen implementiert werden.

Zu den bereits im Basisszenario georeferenzierten 162 Packstationen, wird die initiale Welt mit weiteren georeferenzierten Standorten von potentiellen Standorten für Mikro-Depots für dieses Szenario erweitert. Hierbei wird angenommen, dass Mikro-Depots zudem auf den Parkflächen

vor Supermärkten und Einkaufszentren sowie an Tankstellen implementiert werden. Diese Standorte der Supermärkte, Einkaufszentren und Tankstellen wurden mittels OpenStreetMap identifiziert und klassifiziert. Dementsprechend befinden sich zusätzlich 1.399 Mikro-Depots vor Supermärkten, 120 Mikro-Depots vor Einkaufszentren und 339 Mikro-Depots vor Tankstellen. Insgesamt sind dadurch 2.020 Standorte von Mikro-Depots in Berlin verteilt.

Für dieses Szenario müssen die Zeitfenster zur Belieferung privater KundInnen bestimmt werden.

In Tabelle 37 werden die eingesetzten Parameterwerte des Basisszenarios im Überblick aufgezeigt. Zudem werden die herangezogenen Datenquellen zur Parametrisierung der Szenarien hinterlegt. Zum vertieften Einblick in die Aufbereitung genutzten der Sekundärdaten zur Parametrisierung des Modells wird auf Thaller (2018) verwiesen.

Tabelle 37: Parametrisierung des Basisszenarios für das Fallbeispiel "Same-Day- und Instant-Delivery" (Basisjahr 2017)

Input-Parameter	B	Einheiten	Datenquellen
Güternachfrage B2C	199.858	PE/Tag	BIEK (2018), Manner-Romberg et al. (2015), ASB (2018)
Güternachfrage B2B	254.803	PE/Tag	
Zeitfenster der gewerblichen KundInnen			
	6-<8	Uhr	Thaller (2018)
	8-<10	Uhr	
	10-12	Uhr	
Zeitfenster der privaten KundInnen			
	6-<8	Uhr	
	8-<10	Uhr	
	10-12	Uhr	
Anteil der Belieferungsform für PrivatkundInnen			
Hauszustellung	100	%	Thaller (2018)
Packstationen		%	
Paketshops, Postfilialen		%	
Fahrzeugcharakteristika			
Lkw 3,5 zul. GG			
Fahrzeugkapazität	160	PE/F	BGL (2018), ETM (2017), DAT Group (2018), Mehlhart et al. (2011), MWV (2018), Schulz (2017), Wittenbrink (2014)
Fixe Kosten	50,543655140	€/Tag	
Variable Kosten	0,000351163	€/m	
Zeitabhängige Kosten	0,004200975	€/s	
Dieselvebrauch	0,000112000	l/m	

Input-Parameter	B	Einheiten	Datenquellen
Adblueverbrauch	0,000001501	l/m	
Max. Geschwindigkeit	42	m/s	
Stopptime			
Stopptimekonstante	60	s/St	Thaller (2018)
Stopptimevariable	60	s/PE	

Legende: PE=Paketeinheiten, F=Fahrten, m=Meter, s=Sekunde, l=Liter, St=Stopp

Quelle: Eigene Darstellung

Im Folgenden werden die Daten zu den Fahrzeugcharakteristika für Lastenfahrräder zur Parametrisierung des Szenarios „Same-Day- und Instant-Deliveries“ (SID) aufbereitet. Hierbei werden die Kostensätze von Zhang et al. (2018) für ein Lastenfahrrad mit einem Gesamtgewicht von 370 kg verwendet. (siehe Tabelle 38) Angenommen wird, dass Kapazität eines Lastenfahrrads bei 35 Pakete liegt. Nach Fahrrad-XXL GmbH (2018) variiert die Höchstgeschwindigkeit von Lastenfahrrädern, wobei 25 km/h und 45 km/h am häufigsten gelten. Die Höchstgeschwindigkeit des untersuchten Lastenfahrrads für diese Studie beträgt jedoch standardmäßig 25 km/h. Das elektrische Pedalunterstützungssystem unterstützt die FahrerIn nur, bis die Höchstgeschwindigkeit von 25 km/h erreicht wird, und schaltet dann auf das manuelle Pedalsystem um.

Das in dieser Studie untersuchte Lastenfahrrad hat eine Batteriekapazität von 501 Wh und eine Reichweite von 50 km bei voller Ladung. Die Stromkosten liegen bei 2,80 € pro 1.000 km. Diese ergeben sich aus den Kosten für das Laden der Batterie des Lastenfahrrads. Dabei beträgt der Stromverbrauch 0,25 kWh/km. Die berechneten Werte werden in der folgenden Tabelle 38 aufgezeigt.

Tabelle 38: Fahrzeugcharakteristika eines Lastenfahrrads

Fahrzeugcharakteristika			
Lastenfahrrad 370 kg zul. GG			
Fahrzeugkapazität	35	PE/F	Zhang et al. (2018), Fahrrad-XXL GmbH (2018)
Fixe Kosten	3,26731	€/Tag	
Variable Kosten	0,000103	€/m	
Zeitabhängige Kosten	0,0042009750	€/s	
Stromverbrauch	0,00025	kWh/m	
Max. Geschwindigkeit	6,94444	m/s	

Quelle: Eigene Darstellung

Zudem werden die präferierten Zeitfenster, vornehmlich der privaten KundInnen, basierend aus den Erkenntnissen der erhobenen Primärdaten (siehe Kapitel 3.4.3.5) bestimmt. In Abbildung 58 sind die Ergebnisse dazu aufgezeigt. Das Modell wird diesbezüglich angepasst. Es erfolgt nicht wie im Basisszenario eine zufällige Zustellung der Pakete innerhalb des Zeitfensters 6 bis 12 Uhr, sondern die PrivatkundInnen können konkrete Zeitfenster zur Belieferung auswählen. Die Anteile der PrivatkundInnen je Zeitfenster müssen hierbei als Parameter hinterlegt werden. Dies bedeutet beispielsweise, dass 17% der PrivatkundInnen das Zeitfenster von 8 bis unter 12

Uhr auswählen (siehe Tabelle 39). Unter Berücksichtigung der nachgefragten Zeitfenster der Privathaushalte wird erwartet, dass sich der Güterverkehr nachfragegesteuert anders über den Tag verteilt und es dadurch zu Veränderungen der verkehrlichen Kennwerte kommt.

Tabelle 39: Präferierte Zeitfenster der PrivatkundInnen von Paketdienstleistungsunternehmen

Präferierte Zeitfenster der privaten KundInnen		
17%	8-<12	Uhr
18%	12-<14	Uhr
30%	14-<18	Uhr
35%	18-22	Uhr

Quelle: Eigene Darstellung

Nachdem das Modell vollständig parametrisiert und angepasst wurde, erfolgten die Simulationen mittels MATSim und Jsprit. Abschließend wurden die Simulationsergebnisse in aggregierter Form aufbereitet und interpretiert.

3.5.2.2 Analyse der Simulationsergebnisse

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse für das Szenario „Same-Day- und Instant-Delivery“ (SID) auf der Letzten Meile im Paketmarkt für Berlin im Vergleich zum Basisszenario (B) aufgezeigt. Hierbei liegt der Fokus auf verkehrlichen (Güterverkehrsnachfrage, Fahrleistung), ökonomischen (Transportkosten) und ökologischen Kennzahlen (Emissionen). Die Emissionen werden von ifeu mit TREMOD berechnet. Zu diesem Zweck werden die Jahresfahrleistungen je Fahrzeugtyp für das Jahr 2017 des Basisszenarios und des Szenarios Same-Day und Instant-Delivery an ifeu übergeben.

3.5.2.2.1 Verkehrliche Auswirkungen

Im Basisszenario werden Direktbelieferungen sowohl zu den PrivatkundInnen als auch zu den gewerblichen KundInnen vom Distributionszentrum der Paketdienstleistungsunternehmen vornehmlich mit Lkw 3,5 t zGG durchgeführt. Hierbei werden 147 Sendungen mit 38 Stopps pro Tour ausgeliefert. Hierbei gibt die ZustellerIn im Durchschnitt 3,79 Pakete pro Stopp ab. Die durchschnittliche Stoppzeit beträgt dabei 4,79 Minuten je Stopp. Insgesamt werden 3.088 Touren mit Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 3,5 t an einem durchschnittlichen Werktag in Berlin zur Auslieferung von Paketen an private und gewerbliche KundInnen durchgeführt. In diesem Zusammenhang legt die KEP-FahrerIn pro Tour 53,95 km zurück. Die Tour dauert ca. 5,34 Stunden. Für diese Tagestour fallen annähernd 80,76 Euro Personalkosten, 18,95 Euro variable Kosten und 50,54 Euro fixe Kosten an. Insgesamt kostet die Tagestour das Logistikdienstleistungsunternehmen 150,25 Euro.

Im Gegensatz zum Basisszenario erfolgt im Szenario „Same-Day- und Instant-Delivery“ die Distribution der Pakete für den B2C-Sektor über zwei Stufen. In der ersten Stufe werden vom Distributionszentrum zu den Mikro-Depots die Pakete mit Lkw 3,5 t zGG geliefert. Die Zustellung der Pakete zu den Wohnstandorten der PrivatkundInnen erfolgt mit Lastenfahrrädern von den Mikro-Depots. Die gewerblichen KundInnen werden weiterhin – wie auch bereits im Basisszenario – direkt vom Distributionszentrum beliefert.

Mittels der Lkw 3,5 t zGG werden durchschnittlich 106 Sendungen pro Tour ausgeliefert. Dabei werden 1.872 Touren durchgeführt. Hierbei legt die KEP-FahrerIn pro Tour 17,16 km zurück. Je Tour benötigt ein Lkw 3,5 t zGG 3,75 Stunden. Die Transportzeit pro Fahrzeug und Tag beträgt

bei einem Lkw 3,5 t zGG ca. 7,5 Stunden. Insgesamt sind 936 Lkw 3,5t zGG notwendig, um die Touren an einem durchschnittlichen Werktag auszuführen. Die variablen Kosten pro Tour für einen Lkw 3,5t zGG liegen bei 6,03 Euro pro Tour. Die fixen Kosten pro Fahrzeug und Tag nehmen 50,54 Euro ein. Die Personalkosten kosten das KEP-Dienstleistungsunternehmen 56,71 Euro pro Tour. Insgesamt kostet der Lkw 3,5 t zGG das KEP-Dienstleistungsunternehmen 113,28 Euro pro Tour.

Von den Mikro-Depots erfolgt die Zustellung der Pakete zu den PrivatkundInnen durch Lastenfahrräder. Insgesamt gibt das Paketdienstleistungsunternehmen im Durchschnitt 1,88 Pakete pro Stopp ab. Insgesamt werden 6.813 Touren mit Lastenfahrrädern von den Mikro-Depots zu den Wohnstandorten der PrivatkundInnen durchgeführt. Hierbei werden ca. 29 Sendungen pro Tour ausgeliefert. Die KEP-FahrerIn legt pro Tour mit einem Lastenfahrrad 3,61 km zurück. Je Tour benötigt ein Lastenfahrrad ca. 0,9 Stunden. Dabei können 7 Touren von einem Lastenfahrrad von den Mikro-Depots innerhalb eines Tages durchgeführt werden. Die Transportzeit pro Fahrzeug und Tag beträgt für einen Lastenfahrrad 6,29 Stunden. Insgesamt sind 973 Lastenfahrräder notwendig, um die Touren an einem durchschnittlichen Werktag auszuführen. Die variablen Kosten pro Tour für ein Lastenfahrrad liegen bei 0,37 Euro. Die fixen Kosten für ein Lastenfahrrad pro Tag betragen 3,26 Euro. Für die Personalkosten fallen 13,61 Euro pro Tour an. Insgesamt kostet das Lastenfahrrad 17,24 Euro pro Tour. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Kosten für ein Mikro-Depot nicht berücksichtigt werden.

Im Detail werden in der Tabelle 40 die Kennwerte je betrachteten Parameter aufgezeigt.

Tabelle 40: Simulationsergebnisse des Szenarios "Same-Day- und Instant-Delivery" (SID) im Vergleich zum Basisszenario (B) für den Paketmarkt

Output-Parameter	Lkw-Typ	B	SID	Einheiten
Durchschnittliche Stoppzeit		4,79	4,07	min/St
Drop Faktor		3,79	3,63	PS/St
Drop Faktor B2B		13,40	13,40	
Drop Faktor B2C		1,98	1,88	PE/St
Sendungen pro Tour	Lkw 3,5 t zGG	147,24	106,76	
Sendungen pro Tour	LF 370 kg zGG		29,33	
Anzahl der Touren	Lkw 3,5 t zGG	3.088,00	1.872,00	T
Anzahl der Touren	LF 370 kg zGG		6.813,00	T
Anzahl der Touren	Insgesamt	3.088,00	8.685,00	T
Gesamtlaufleistung	Lkw 3,5 t zGG	166.593,33	32.128,91	km/Tag
Gesamtlaufleistung	LF 370 kg zGG		24.628,20	km/Tag
Gesamtlaufleistung	Insgesamt	166.593,33	56.757,11	km/Tag
Ø Laufleistung	Lkw 3,5 t zGG	53,95	17,16	km/T
Ø Laufleistung	LF 370 kg zGG		3,61	km/T

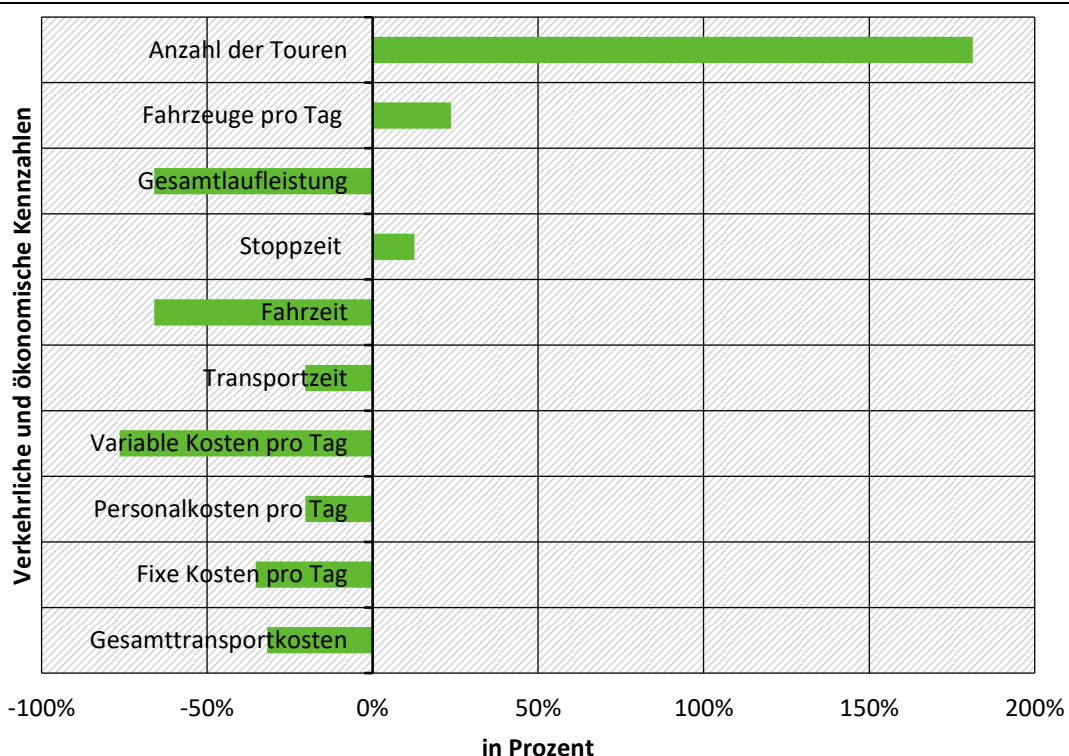
Output-Parameter	Lkw-Typ	B	SID	Einheiten
Stoppzeit	Insgesamt	9.580,00	10.787,78	h
Fahrzeit	Insgesamt	6.922,47	2.355,25	h
Transportzeit	Lkw 3,5 t zGG	16.502,47	7.020,97	h
Transportzeit	LF 370 kg zGG		6.122,06	h
Transportzeit	Insgesamt	16.502,47	13.143,03	h
Transportzeit pro Tour	Lkw 3,5 t zGG	5,34	3,75	h/T
Transportzeit pro Tour	LF 370 kg zGG		0,90	h/T
Variable Kosten pro Tag	Lkw 3,5 t zGG	58.501,38	11.282,49	€/Tag
Variable Kosten pro Tag	LF 370 kg zGG		2.536,70	€/Tag
Variable Kosten pro Tag	Insgesamt	58.501,38	13.819,19	€/Tag
Variable Kosten pro Tour	Lkw 3,5 t zGG	18,94	6,03	€/T
Variable Kosten pro Tour	LF 370 kg zGG		0,37	€/T
Personalkosten pro Tag	Lkw 3,5 t zGG	249.575,27	106.181,71	€/Tag
Personalkosten pro Tag	LF 370 kg zGG		92.587,04	€/Tag
Personalkosten pro Tag	Insgesamt	249.575,27	198.768,75	€/Tag
Personalkosten pro Tour	Lkw 3,5 t zGG	80,76	56,71	€/T
Personalkosten pro Tour	LF 370 kg zGG		13,61	€/T
Fahrzeuge pro Tag	Lkw 3,5 t zGG	1.544	936	F
Fahrzeuge pro Tag	LF 370 kg zGG		973	F/Tag
Fahrzeuge pro Tag	Insgesamt	1.544	1.909	F/Tag
Fixe Kosten pro Tag	Lkw 3,5 t zGG	78.039,40	47.308,86	€/Tag
Fixe Kosten pro Tag	LF 370 kg zGG		3.179,09	€/Tag
Fixe Kosten pro Tag	Insgesamt	78.039,40	50.487,95	€/Tag
Gesamttransportkosten	Lkw 3,5 t zGG	386.116,05	164.773,06	€/Tag
Gesamttransportkosten	LF 370 kg zGG		98.302,83	€/Tag
Gesamttransportkosten	Insgesamt	386.116,05	263.075,89	€/Tag
Gesamttransportkosten pro Tour	Lkw 3,5 t zGG	125,03	88,02	€/T
Gesamttransportkosten pro Tour	LF 370 kg zGG		14,42	€/T

Legende: PE=Paketeinheit, LF=Lastenfahrrad, PS=Paketstation, T=Tour, F=Fahrzeug, km=Kilometer, min=Minuten, h=Stunde, l=Liter, St=Stopp

Quelle: Eigene Darstellung

Im Überblick werden in der Abbildung 69 die relevanten verkehrliche und ökonomische Kennwerte für einen typischen Tag des Basisszenarios und des Szenarios „Same-Day- und Instant-Delivery“ für den Paketmarkt aufgezeigt. Hierbei werden die jeweiligen Werte der betrachteten Kennzahlen der beiden Szenarien in der Summe gegenübergestellt. Zusätzlich wird die prozentuale Abweichung des Szenarios SID vom Basisszenario je Parameter dargelegt. Das Fahrtenaufkommen wächst um den Faktor 1,8 an. Insgesamt werden 8.685 Touren im Vergleich zum Basisszenario, bei dem nur 3.088 Touren notwendig sind, durchgeführt. 365 Fahrzeuge mehr werden im Vergleich zum Basisszenario eingesetzt. Dies entspricht einem Zuwachs von 24 % mehr Fahrzeugen. Dagegen reduzieren sich die zurückgelegten Kilometer um 65,9 %, absolut um 109.836,22 km. Die Transportzeit pro Tag kann hierbei um 20,4 % gesenkt werden. Bei den variablen Kosten können 76,4 % eingespart werden, was an der reduzierten Laufleistung liegt. Die Personalkosten werden um annähernd 20,4 % und die fixen Kosten pro Tag um 35,3 % gesenkt. Insgesamt sinken die Gesamttransportkosten pro Tag für das KEP-Dienstleistungsunternehmen um 31,9 %, aufgrund der eingesparten Gesamtlauflistung und Transportzeit.

Abbildung 69: Prozentuale Abweichung des Szenarios „Same-Day- und Instant-Delivery“ vom Basisszenario für den KEP-Markt

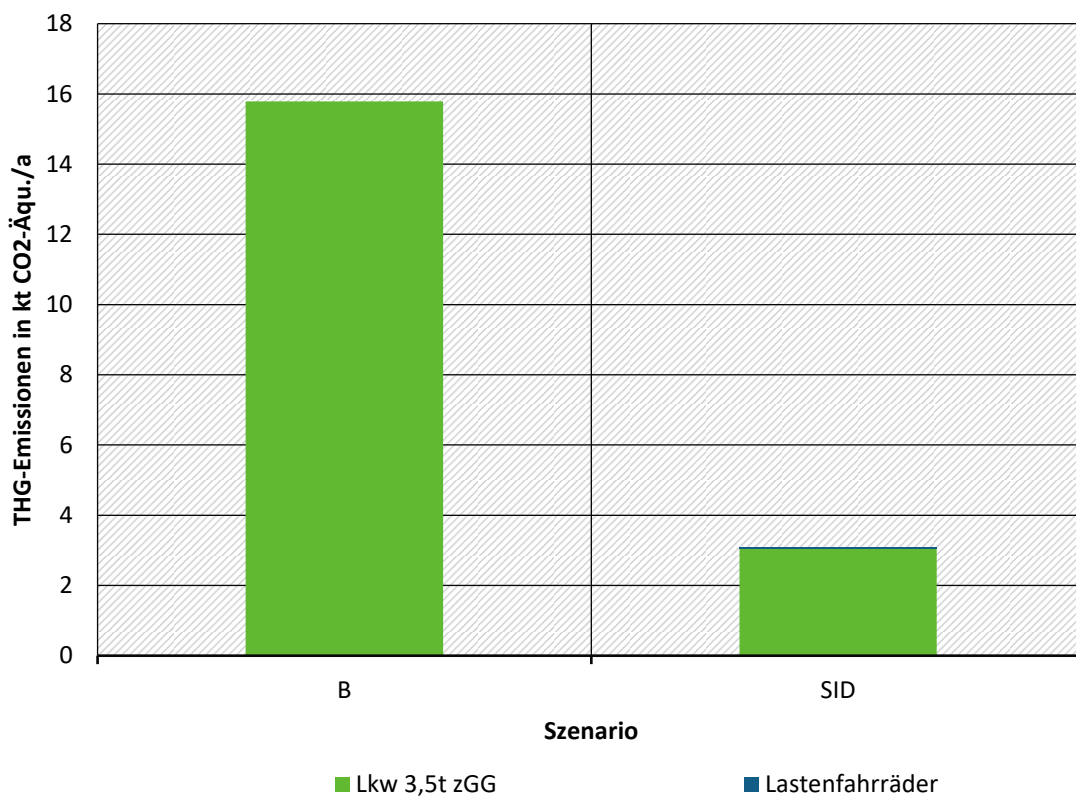


Quelle: Eigene Darstellung, DLR-VF

3.5.2.2.2 Auswirkung auf die Treibhausgasemissionen

Im Basisszenario verursacht die ausschließliche Belieferung im Online-Handel mittels leichter Nutzfahrzeuge jährliche THG-Emissionen in Höhe von 15.7 kt CO₂-Äqu./a. Durch die Nutzung von Mikro-Depots und Distribution mit elektrisch betriebenen Lastenfahrrädern lassen sich die Emissionen auf ca. 3.1 kt CO₂-Äqu./a und damit um 80% gegenüber dem Basisszenario reduzieren. Dieser Effekt geht sowohl auf die Reduktion der Fahrleistung insgesamt als auch auf die Verlagerung von leichten Nutzfahrzeugen auf die – aus Sicht der THG-Emissionen – deutlich effizienteren Elektrolastenräder zurück.

Abbildung 70: THG-Emissionen im Fallbeispiel Same-Day- und Instant-Delivery für Berlin im Jahr 2017



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu. Anmerkungen: Es wurden mittlere THG-Emissionsfaktoren für Innerortsstraßen im Jahr 2017, inklusive Emissionen der Energiebereitstellung (WTW) aus TREMOD 6.01 zugrunde gelegt. Strombereitstellung für E-Lastenräder aus bundesweitem Strommix 2017.

3.5.2.2.3 Schlussfolgerungen

Der Service der KEP-Dienstleister Same-Day- und Instant-Delivery für ihre Kunden ist zeitlich nur durchführbar, wenn sich zusätzlich die logistische Netzwerkstruktur verändert. Hierbei wird die Netzwerkstruktur verdichtet und neben den Distributionszentren meist am Rande eines Agglomerationsgebietes auch Mikro-Depots innerhalb des Siedlungsgebietes als kleines Zwischenlager implementiert.

Durch den Einsatz von Mikro-Depots ist es dann auch möglich, Lastenfahrräder auf der Allerletzten Meile sinnvoll einzusetzen. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass dadurch die Laufleistung insgesamt um 65,9 % reduziert und die Treibhausgasemissionen sogar um 80% durch den Einsatz von elektrisch-betriebenen Lastenfahrrädern mindern. Dies liegt vornehmlich daran, dass

damit über 80,7% an Laufleistung durch Diesel-betriebene Lkw 3,5t zGG eingespart werden können.

Demzufolge ist zu empfehlen, Mikro-Depots und den Einsatz von Lastenfahrrädern zu fördern. Hierbei ist noch die Frage zu klären, welche Flächen sich am besten für das Mikro-Depot eignen und wo diese genau im Netzwerk angeordnet werden müssen. Dafür sind noch weitere Forschungsarbeiten erforderlich, um die Fragen zu klären.

Ferner müsste die Gesetzeslage angepasst werden, um den Kommunen eine rechtliche Handhabung zur Flächenumwidmung zu geben. Die Grundstücke bzw. die Pacht zur Nutzung der Flächen müssen dann die Logistikdienstleister bezahlen.

3.5.3 Szenario Lebensmittellieferungen

Im Folgenden wird das Szenario zur Lebensmittelbelieferung präsentiert. Hierbei wird untersucht, welche verkehrlichen und ökologischen Effekte sich zeigen, wenn Privathaushalte Lebensmittel online bestellen und ihnen diese von KEP-Dienstleistern direkt zu ihrem Wohnort zugestellt werden.

Zur Abschätzung der Wirkungen der **Lebensmittellieferung** wird die vorhandene mikroskopische, verhaltensbasierte Verkehrssimulation MATSim (Balmer et al. 2009) und das integrierte Logistik-Modul Jsprit (Schröder et al. 2012) eingesetzt. Hierbei werden die bereits umgesetzten Fallbeispiele Lebensmitteldistribution (Gabler et al. 2013) und zum KEP-Verkehr (Thaller 2018) in Berlin herangezogen.

Das Basisszenario zur Lebensmitteldistribution muss nicht angepasst werden. Dieses simuliert die Belieferung des Lebensmitteleinzelhandels von den Distributionszentren in Berlin. Dieses Szenario wurde bereits mit traditionellen und elektrisch betriebenen Lkw von Gabler et al. (2013) aufgebaut und wird für die vorliegende Studie herangezogen. Dazu werden die notwendigen Daten zur Parametrisierung bzw. Initialisierung des Modells für das Jahr 2017 erhoben.

Das Basisszenario zum KEP-Verkehr wird um die Nachfrage nach Lebensmitteln seitens privater KundInnen erweitert. Dazu liegen die Standorte der Distributionszentren und Filialen der Lebensmitteleinzelhandelsketten von Berlin in georeferenzierter Form vor, die als Depots für die Lebensmitteldistribution integriert werden können. Von dort werden die Auslieferungen der Lebensmittel an die PrivatkundInnen durchgeführt. Die zu erwartenden Effekte dieses Szenarios werden im Folgenden aufgezeigt.

- Erhöhung kleinteiliger Sendungen
- Erhöhung der klein- bis mittelgroßen Fahrzeuge im Wirtschaftsverkehr
- Erhöhung des KEP-Verkehrs
- Einschränkung des Verkehrsflusses durch Halten in 2. Reihe

3.5.3.1 Szenarienbeschreibung und Parametrisierung des Modells

Basisszenario zur Lebensmittelbelieferung In diesem Szenario ist vorgesehen, nur die Belieferung der Lebensmitteleinzelhandelsfilialen in Berlin abzubilden.

Im Basisszenario wird die Belieferung mittels Lkw mit einem zul. GG von 7,5t, 18t, 26t und 40t durchgeführt. Die 17 Standorte der Distributionszentren der Einzelhandelsketten liegen in georeferenzierter Form vor. Auch wurden die 1.040 Standorte der Filialen der Lebensmitteleinzelhandelsketten adressfein erhoben und georeferenziert. Hierbei wird nach 9 verschiedenen

Einzelhandelsketten unterschieden. Dabei werden die Standorte je Einzelhandelsketten den dazugehörigen Distributionszentren zugeordnet.

Die Güternachfrage je Filiale wird für einen durchschnittlichen Tag abgeleitet. Die verschiedenen Produkte werden dabei in die folgenden drei Gruppen aggregiert.

- Frischwaren (u. a. Fleisch, Wurst, Gemüse, Obst)
- Gefrierwaren (u. a. gefrorene Lebensmittel, Eiscreme)
- Trockenwaren

Die Abschätzung der täglichen Nachfragemenge basiert auf dem jährlichen Umsatz eines Einzelhandelsfiliale (siehe Gabler et al. 2013). Die Güternachfrage je Lebensmitteleinzelhandelsfiliale für Berlin liegt bereits vor und wird im Rahmen dieses Projektes herangezogen.

Die Belieferung von Frischwaren findet innerhalb des Zeitfensters 4:00 bis 9:00 Uhr statt. Dagegen werden Gefrier- und Trockenwaren innerhalb der Zeitfenster 9:00 bis 19:00 Uhr angeliefert.

Jedes Distributionszentrum ist hierbei mit einer eigenen Flotte bestehend aus verschiedenen Lkw-Typen (7,5t, 18t, 26t und 40t) mit ihren entsprechenden Fahrzeugcharakteristika (u. a. zul. GG, Fahrzeugkapazität, Transportkosten, Kraftstoffverbrauch, max. Geschwindigkeit) ausgestattet. Jede Einzelhandelskette ist in diesem Fall sein eigenes Logistikdienstleistungsunternehmen. Die Distributionszentren sind dabei die Depots ihrer Fahrzeuge. Lkw mit 7,5 t zul. GG werden hierbei zur Distribution von Frisch- und Gefrierwaren eingesetzt. Lkw mit 18 t zul. GG dienen zur Belieferung von Trockenwaren. Lkw mit 26 t zul. GG können Frisch-, Gefrier- und Trockenwaren transportieren. Lkw mit 40 t zul. GG werden genutzt, um Trockenwaren auszuliefern. Die Fahrzeugkapazität der Fahrzeuge, die zur Belieferung von Frisch- und Trockenwaren eingesetzt werden, wird nach der max. Anzahl an Europaletten bemessen, die auf die Ladefläche passen. Dagegen wird bei der Fahrzeugkapazität der Fahrzeuge zur Distribution von Gefrierwaren die Bemessungseinheit Gefrierboxen verwendet.

Als Grundlage für die Tourenoptimierung kann festgelegt werden, ob das Logistikdienstleistungsunternehmen über eine feste Anzahl an Lkw zur Verfügung hat oder ob er selbstständig den Bedarf an Fahrzeugen für die Belieferung im Rahmen der Tourenoptimierung ermittelt. In diesem Fall wird unterstellt, dass er über eine infinite Flotte verfügt und die optimale Anzahl an Fahrzeugen zur Distribution der Waren einsetzt. Die Lebensmitteleinzelhandelsfilialen übermitteln dem Logistikdienstleistungsunternehmen einerseits die Güternachfrage, die geliefert werden soll, und andererseits das Zeitfenster, an denen sie beliefert werden sollen. Die Belieferung der KundInnen erfolgt jeweils von ihnen nächst gelegenen Distributionszentrum.

In Tabelle 41 werden die eingesetzten Parameterwerte des Basisszenarios im Überblick aufgezeigt. Zudem werden die herangezogenen Datenquellen zur Parametrisierung des Basisszenarios hinterlegt. Zum vertieften Einblick in die Aufbereitung genutzten der Sekundärdaten zur Parametrisierung des Modells wird auf Gabler (2012) und Gabler et al. (2013) verwiesen.

Tabelle 41: Parametrisierung des Basisszenarios

Input-Parameter	Basisszenario	Einheiten	Datenquellen
Zeitfenster			
Frischwaren	4-9		Gabler (2012)

Input-Parameter	Basisszenario	Einheiten	Datenquellen
Gefrier- und Trockenwaren	9-19		Gabler (2012)

Fahrzeugcharakteristika

Lkw 7,5 t zul. GG zur Belieferung von Frisch- und Trockenwaren sowie Gefrierwaren

Fahrzeugkapazität	15 (70)	PA (B)/F	Europaletten (Gefrierboxen), TPK (2018), Gabler (2012)
Fixe Kosten	65,268767022	€/Tag	BGL (2018), ETM (2017), DAT Group (2018), Mehlhart et al. (2011), MWV (2018), Schulz (2017), Wittenbrink (2014)
Variable Kosten	0,000440626	€/m	
Zeitabhängige Kosten	0,004524287	€/s	
Dieselvebrauch	0,000162500	l/m	
Adblueverbrauch	0,000002178	l/m	
Max. Geschwindigkeit	42	m/s	

Lkw 18 t zul. GG zur Belieferung von Trockenwaren

Fahrzeugkapazität	17	PA/F	Europaletten, TPK (2018)
Fixe Kosten	82,160413306	€/Tag	BGL (2018), ETM (2017), DAT Group (2018), Mehlhart et al. (2011), MWV (2018), Schulz (2017), Wittenbrink (2014)
Variable Kosten	0,000579283	€/m	
Zeitabhängige Kosten	0,004524607	€/s	
Dieselvebrauch	0,000253000	l/m	
Adblueverbrauch	0,000003390	l/m	
Max. Geschwindigkeit	42	m/s	

Lkw 26 t zul. GG zur Belieferung von Frisch- und Trockenwaren sowie Gefrierwaren

Fahrzeugkapazität	18 (160)	PA (B)/F	Europaletten (Gefrierboxen), TPK (2018), Gabler (2012)
Fixe Kosten	93,138209291	€/Tag	BGL (2018), ETM (2017), DAT Group (2018), Mehlhart et al. (2011), MWV (2018), Schulz (2017), Wittenbrink (2014)
Variable Kosten	0,000702103	€/m	
Zeitabhängige Kosten	0,004524767	€/s	
Dieselvebrauch	0,000330000	l/m	
Adblueverbrauch	0,000004422	l/m	
Max. Geschwindigkeit	42	m/s	

Lkw 40 t zul. GG zur Belieferung von Trockenwaren

Fahrzeugkapazität	34	PA/F	Europaletten, TPK (2018)
Fixe Kosten	142,636821158	€/Tag	BGL (2018), ETM (2017), DAT Group (2018), Mehlhart et al. (2011), MWV (2018), Schulz (2017), Wittenbrink (2014)
Variable Kosten	0,000810996	€/m	

Input-Parameter	Basisszenario	Einheiten	Datenquellen
Zeitabhängige Kosten	0,004524767	€/s	
Dieselvebrauch	0,000337867	l/m	
Adblueverbrauch	0,000004527	l/m	
Max. Geschwindigkeit	42	m/s	
Stopzeit			
Stopzeitkonstante	180	s/St	Gabler (2012)
Stopzeitvariable	180	s/PE	Gabler (2012)
Legende: PA=Paletten, B=Boxen, F=Fahrten, m=Meter, s=Sekunde, l=Liter, St=Stopp			

Quelle: Eigene Darstellung

Szenario Lebensmittelbelieferung von Privathaushalten Basierend darauf werden zwei Szenarien entwickelt.

Im **Szenario 1** wird angenommen, dass die Belieferung der Lebensmitteleinzelhandelsfilialen von den Depots in derselben Weise durchgeführt wird, wie im Basisszenario.

Um nun die **Belieferung der Privathaushalten mit Lebensmitteln** abzubilden, werden die **Lebensmitteleinzelhandelsfilialen als Depots bzw. Distributionszentren** betrachtet. Demzufolge sind nun 1.040 Standorte der Filialen der Lebensmitteleinzelhandelsketten als Distributionszentren georeferenziert integriert. Von dort werden die Auslieferungen der Lebensmittel mit Lkw mit einem zul. GG von 3,5t und Lastenfahrrädern an die Wohnstandorte der PrivatkundInnen durchgeführt. Hierbei erfolgt eine Direktbelieferung an den Wohnstandort der PrivatkundInnen. Diese geben dabei jeweils das gewünschte Zeitfenster zur Belieferung an.

Die PrivatkundInnen werden dabei von ihnen nächst gelegenen Filialen zu den angegebenen Zeitfenstern beliefert.

Die Fahrzeugcharakteristika zu den Lkw mit einem zul. GG von 3,5t und zu Lastenfahrrädern liegen bereits für das Szenario „Same-Day- und Instant-Deliveries“ vor (siehe Tabelle 37 und Tabelle 38). Auch die präferierten Zeitfenster, vornehmlich der privaten KundInnen, basierend aus den Erkenntnissen der erhobenen Primärdaten (siehe Kapitel 3.4.3.5) werden aus dem Szenario „Same-Day- und Instant-Deliveries“ für das vorliegende Szenario übernommen (siehe Tabelle 39).

Ferner muss der Anteil an Lebensmittelbestellungen am Online-Handel an Privathaushalte bestimmt werden. Hier wird der Frage nachgegangen, wie hoch der Anteil an KundInnen, die Lebensmittel online bestellen, sowie der Anteil des Sendungsvolumens von Lebensmitteln am Gesamtvolumen ist. Dazu werden in den nächsten Schritten verschiedene Sekundärdatenquellen und internationale Studien zum Online-Lebensmittelhandel und Lebensmitteldistribution an EndkonsumentInnen – auch in anderen Ländern, bei denen bereits der Lebensmittel-Anteil am gesamten Online-Handel höher als in Deutschland ist, ausgewertet.

Zunächst werden jedoch die Ergebnisse aus der Primärdatenerhebung im Rahmen des vorliegenden Projektes herangezogen. Hierbei wurden auch ProbandInnen hinsichtlich ihres Internetkaufsverhaltens beschrieben (siehe Kapitel 3.4.3.4). Von den 914 Personen, die im Internet Waren bestellt haben, haben 18% in den letzten drei Monaten Lebensmittel online gekauft (siehe Abbildung 53). Insgesamt wurden von den 914 Personen 8.961 Käufe getätigt. Hierbei haben 5% der 8.961 getätigten Einkäufe Lebensmittel umfasst (siehe Abbildung 54).

Dementsprechend werden für Szenario 1 zwei Entwicklungspfade bezogen auf die Lebensmittelbestellungen im Internet angenommen.

Im **Entwicklungspfad A** ziehen wir die Erkenntnisse aus der eigenen Primärdatenerhebung heran. Hier gehen wir davon aus, dass 5% der gesamten Online-Bestellungen Lebensmittelbestellungen bzw. -belieferungen darstellen. Insgesamt werden in diesem Fall 9.993 Lebensmittellieferung für einen typischen Tag in Berlin durchgeführt. Weiterführend legen wir auf Basis unserer Primärdatenerhebung fest, dass 18% der potentiellen E-Commerce-KundInnen im Privatsegment auch Lebensmittel online bestellen. Diese stellen die potentiellen KäuferInnen von Lebensmitteln im Internet dar.

Nach Schätzungen von PostNord (2018) sind Lebensmittel das achthäufigste Produkt unter Online-KäuferInnen in Großbritannien und der EU. Galante et al. (2013) zeigen, dass in Frankreich nur 25% der Online-LebensmitteleinkäuferInnen weiterhin regelmäßig einkaufen. Zu den von den KundInnen beschriebenen Abschreckungsfaktoren gehörten höhere Preise und eine geringere Auswahl online verfügbarer Produkte. Galante et al. (2013) identifizieren auch eine latente Nachfrage in der Online-Lebensmittelindustrie anhand einer in Frankreich durchgeführten Umfrage. Die Umfrage ergab, dass 33% der KundInnen, die noch nie online Lebensmittel gekauft hatten, eine „Gewissheit oder Wahrscheinlichkeit“ des Online-Kaufs angaben, falls der Service in ihrer Region verfügbar sein sollte. Der Online-Lebensmitteleinzelhandel hat sich jedoch fünf Jahre nach Veröffentlichung des McKinsey-Berichts (Galante et al. 2013) erheblich verändert (PostNord 2018). In den Niederlanden ist der Online-Einkauf von Lebensmitteln erheblich angestiegen und weist zwischen 2015 und 2018 eine bemerkenswerte Wachstumsrate von mehr als 50% auf.

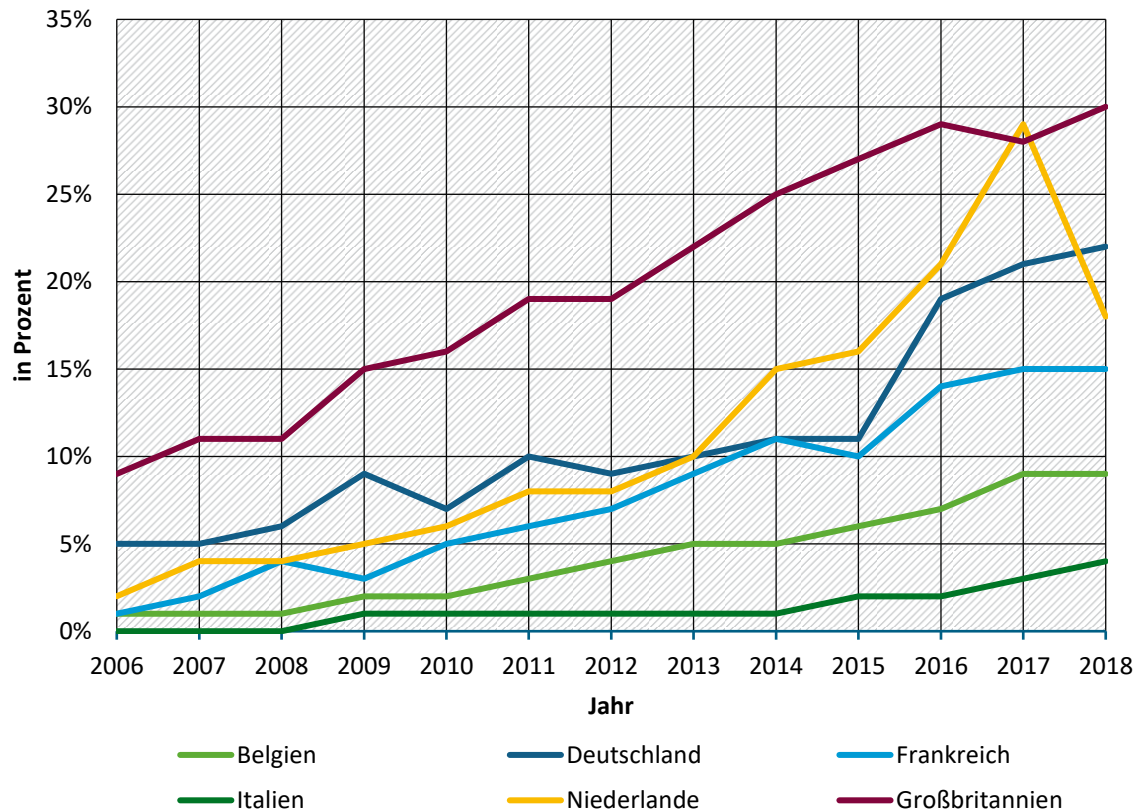
Diese Erkenntnisse werden für den **Entwicklungspfad B** aufgegriffen. Hierbei wird angenommen, dass der Anteil der online gekauften Lebensmittel von 5% auf 10% am Gesamtvolumen ansteigt.

Eine Studie von Centraal Bureau voor de Statistiek (2019) auf Basis der Eurostat-Daten zeigt den Anteil der KundInnen, die von 2006 bis 2018 in ausgewählten europäischen Ländern Lebensmittel online gekauft haben. Hier zeigt sich, dass im Jahr 2018 den höchsten Anteil Großbritannien mit 30% aufweist (siehe Abbildung 71).

Daher nehmen wir nun auch für unsere Fallstudie in Entwicklungspfad B an, dass wir einen Anteil an potentiellen KundInnen für online gekaufte Lebensmittel von 30% haben.

Zusammenfassend gilt für **Entwicklungspfad B**, dass 10%, dementsprechend 19.986 Bestellungen, an den online gekauften Produkten Lebensmittel sind, die von 30% an potentiellen KundInnen gekauft werden.

Abbildung 71: Anteil der KundInnen, die Lebensmittel online kaufen, in ausgewählten EU-Ländern zwischen 2006 und 2018



Quelle: Eigene Darstellung nach Centraal Bureau voor de Statistiek und Eurostat (2019)

Auch im **Szenario 2** wird angenommen, dass die Belieferung der Lebensmitteleinzelhandelsfilialen von den Depots in derselben Weise durchgeführt wird, wie im Basisszenario. Im **Szenario 2** wird ein alternatives Distributionskonzept modelliert. Die Distribution zur EndkundIn erfolgt hierbei direkt von den Distributionszentren aus.

Von den Distributionszentren werden die **Auslieferungen der Lebensmittel** mit Lkw mit einem zul. GG von 3,5t **direkt an die Wohnstandorte der PrivatkundInnen** durchgeführt. Diese geben dabei jeweils das gewünschte Zeitfenster zur Belieferung an. Die PrivatkundInnen werden dabei von ihnen nächst gelegenen Filialen zu den angegebenen Zeitfenstern beliefert.

Die Fahrzeugcharakteristika zu den Lkw mit einem zul. GG von 3,5t und zu Lastenfahrrädern liegen bereits für das Szenario „Same-Day- und Instant-Deliveries“ vor (siehe Tabelle 37 und Tabelle 38). Auch die präferierten Zeitfenster, vornehmlich der privaten KundInnen, basierend aus den Erkenntnissen der erhobenen Primärdaten (siehe Kapitel 3.4.3.5) werden aus dem Szenario „Same-Day- und Instant-Deliveries“ für das vorliegende Szenario übernommen (siehe Tabelle 39).

In Bezug auf die Güternachfrage privater KonsumentInnen im online Lebensmittelsektor werden auch – wie bereits in Szenario 1 – die zwei Entwicklungspfade A und B verfolgt. Dementsprechend gilt für Entwicklungspfad A, dass 5% der gesamten Online-Bestellungen Lebensmittelbestellungen bzw. -belieferungen darstellen, die von 18% der potentiellen KundInnen im Privatsegment online bestellt werden. Für Entwicklungspfad B gilt dagegen, dass 10% an den online gekauften Produkten Lebensmittel sind, die von 30% an potentiellen KundInnen gekauft werden.

Nachdem das Modell vollständig parametrisiert wurde, erfolgten die Simulationsläufe mittels MATSim und Jsprit. Abschließend wurden die Simulationsergebnisse in aggregierter Form aufbereitet und interpretiert.

3.5.3.2 Analyse der Simulationsergebnisse

Bei den Ergebnisanalysen liegt der Fokus auf verkehrlichen (Güterverkehrsnachfrage, Fahrleistung), ökonomischen (Transportkosten) und ökologischen Kennzahlen (Emissionen). Die Emissionen werden von ifeu mit TREMOD berechnet. Zu diesem Zweck wurden die Fahrleistungen je Fahrzeugtyp an ifeu übergeben.

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse für das Szenario „Lebensmittelbelieferung“ im Vergleich zum Basisszenario aufgezeigt.

3.5.3.2.1 Verkehrliche Auswirkungen

Im Basisszenario wird in drei Stopps pro Tour ausgeliefert. Die durchschnittliche Stoppzeit beträgt dabei 31,5 Minuten je Stopp. Insgesamt werden 617 Touren mit traditionellen Lkw (7,5 t, 18 t, 26 t und 40 t zGG) an einem typischen Tag in Berlin zur Belieferung der Lebensmitteleinzelhandelsfilialen durchgeführt. Hierbei sind zu einem hohen Anteil Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 7,5 t und 18 t im Einsatz. In diesem Zusammenhang legt die Lkw-FahrerIn pro Tour 68,5 km zurück. Die Tour dauert ca. 2,7 Stunden. Für diese Tagestour fallen ca. 31 Euro Personalkosten, 38,50 Euro variable Kosten und 79,60 Euro fixe Kosten an. Insgesamt kostet die Tagestour dem Logistikdienstleistungsunternehmen 105,50 Euro.

Bei den weiteren Szenarien 1A und 1B sowie 2A und 2B erfolgt die Filialbelieferung von den Distributionszentren wie zuvor im Basisszenario. Zudem wird beim Szenario 1 die Belieferung der PrivatkundInnen zu Ihrem Wohnstandort direkt von den Filialen durchgeführt, im Szenario 2 dagegen von den Distributionszentren. Bei den Szenarien 1A und 2A werden 5% der Gesamtpaketnachfrage an 18% der potentiellen PrivatkundInnen, die Lebensmittel online bestellen, verteilt. Hingegen werden in den Szenarien 1B und 2B 10% der Pakete an 30% potentieller KundInnen verteilt.

Im Szenario 1A werden 9.992 Lebensmittellieferungen direkt an die Wohnstandorte der PrivatkundInnen von den Lebensmitteleinzelhandelsfilialen zugestellt. Dabei werden im Durchschnitt 1,31 Pakete pro Stopp abgegeben. Auf einer Tour werden ca. 8 Sendungen zugestellt und 6 Stopps durchgeführt. Insgesamt werden 1.221 Touren sowohl mit Lkw 3,5 t zGG als auch mit Lastenfahrrädern durchgeführt.

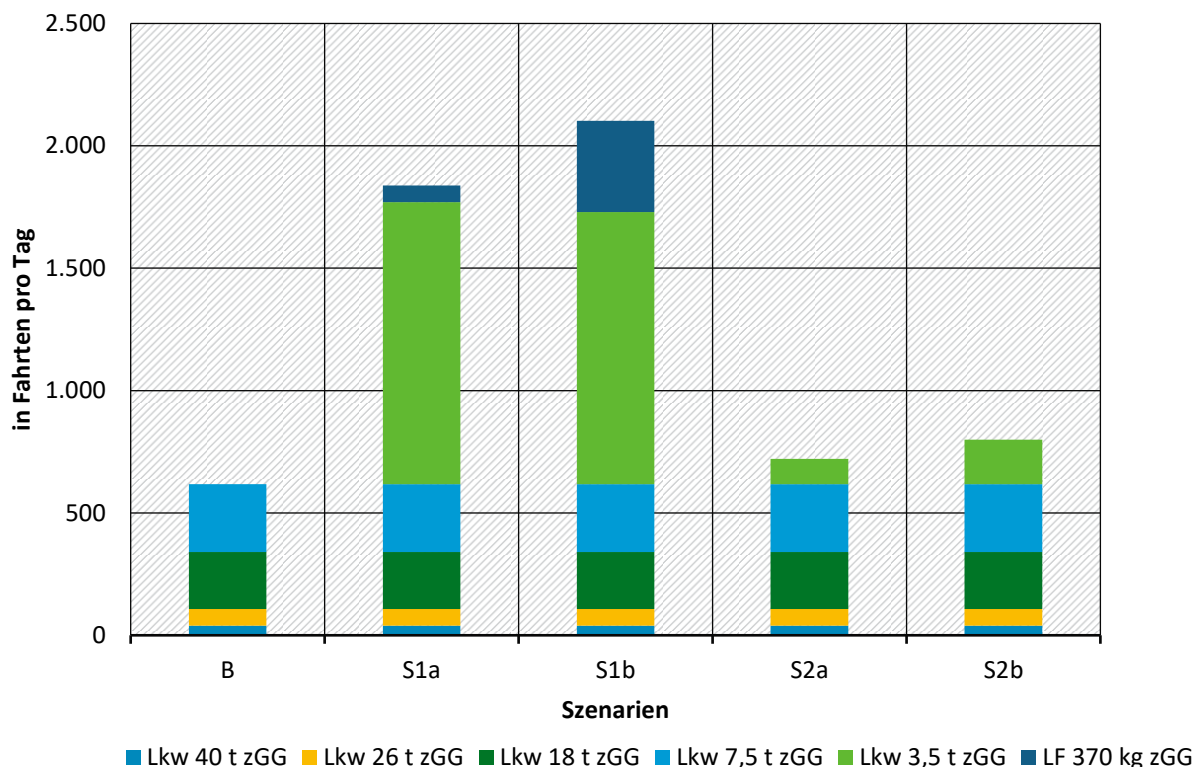
Im Szenario 1B werden nun 19.985 Lebensmittellieferungen von den Filialen zu den PrivatkundInnen zugestellt. Hierbei werden durchschnittlich 13 Sendungen zugestellt. Der Drop Faktor liegt hier bei 1,46 Paketen pro Stopp. Dabei müssen auf einer Tour ca. 9 Stopps durchgeführt werden. Insgesamt werden 1.485 Touren durchgeführt.

Im Szenario 2A werden 9.992 Lebensmittellieferungen direkt an die Wohnstandorte der PrivatkundInnen von den Distributionszentren der Lebensmitteleinzelhandelsketten zugestellt. Dabei werden im Durchschnitt 1,36 Pakete pro Stopp abgegeben. Auf einer Tour werden ca. 96 Sendungen zugestellt und 70 Stopps durchgeführt. Insgesamt werden 104 Touren mit Lkw 3,5 t zGG durchgeführt.

Im Szenario 2B werden nun 19.985 Lebensmittellieferungen von den Distributionszentren zu den PrivatkundInnen zugestellt. Hierbei werden durchschnittlich 109 Sendungen zugestellt. Der Drop Faktor liegt hier bei 1,53 Paketen pro Stopp. Dabei müssen auf einer Tour ca. 71 Stopps durchgeführt werden. Insgesamt werden 182 Touren durchgeführt.

Um einen direkten Vergleich ausgewählter verkehrlicher Wirkungen zu erlauben, werden im Folgenden die Simulationsergebnisse der Szenarien „Lebensmittelbelieferung“ verglichen. In S1A werden 94,4% der Touren zur Zustellung der online bestellten Lebensmittel, die von den Filialen zu den Wohnstandorten der PrivatkundInnen geliefert werden, mittels Lkw 3,5 t zGG zu- gestellt. Dagegen wird nur ein geringer Anteil von 5,6% der Touren mittels Lastenfahrrädern durchgeführt. Im Szenario 1B werden bereits 25,1% der Touren mittels Lastenfahrrädern, und nur noch 74,9% mittels Lkw 3,5 t zGG durchgeführt. In den Szenarien 2A und B werden vornehmlich Lkw 3,5 t zGG zur Zustellung der Lebensmittel von den Distributionszentren zu den Wohnstandorten der PrivatkundInnen verwendet. (siehe Abbildung 72)

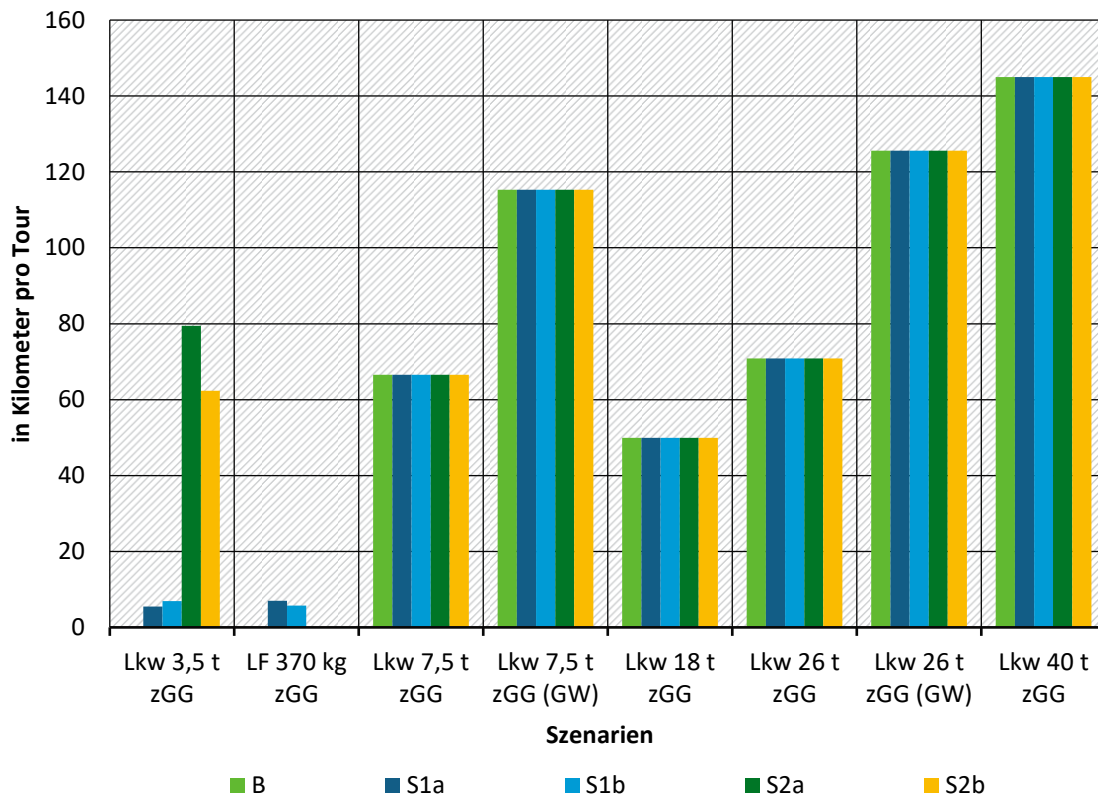
Abbildung 72: Vergleich der Simulationsergebnisse der Szenarien Lebensmittelbelieferung: Fahrtenaufkommen



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

In Abbildung 73 werden die Simulationsergebnisse der Szenarien Lebensmittelbelieferung zur Transportdistanz pro Tour gegenübergestellt. Die Transportdistanz pro Tour bei Lkw 3,5 t zGG liegt bei 5,53 km und bei Lastenfahrrädern bei 7 km im Szenario 1A. Im Vergleich dazu fällt die Transportdistanz pro Tour mittels Lkw 3,5 t zGG um knapp 25% in S1B höher als in Szenario 1A aus und liegt bei 6,9 km. Dagegen ist die durchschnittliche Transportdistanz um 18,4% niedriger im Vergleich zu S1A (5,7 km). Im Szenario 2A wird im Durchschnitt auf einer Tour 79,4 km gefahren, im Vergleich dazu in Szenario 2B 62,3 km. Dementsprechend ist die Transportlänge pro Tour um 21,5% in S2A geringer als in S2B.

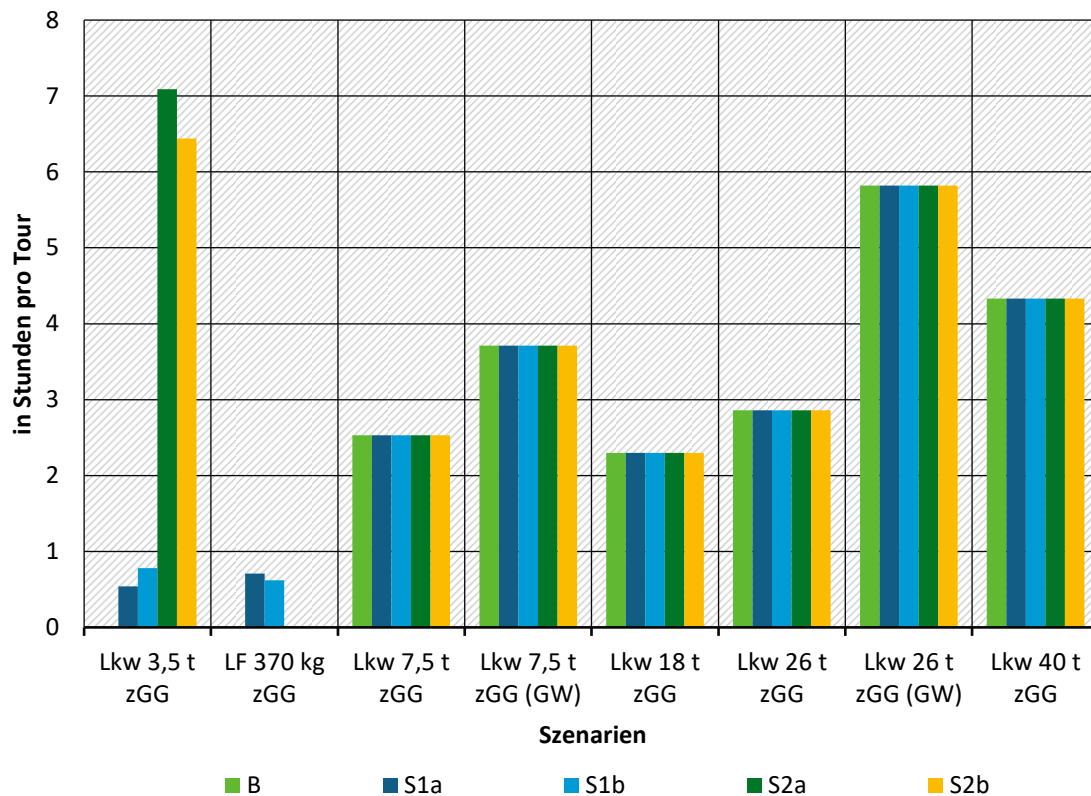
Abbildung 73: Vergleich der Simulationsergebnisse der Szenarien Lebensmittelbelieferung: Transportdistanz pro Tour



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Abbildung 74 zeigt den Vergleich der Simulationsergebnisse der Szenarien Lebensmittelbelieferung zu Transportzeit pro Tour. Die durchschnittliche Transportzeit pro Tour bei den Lkw 3,5 t zGG liegt bei 0,54 h pro Tour in S1A. Dagegen dauert eine durchschnittliche Tour mittels dieser Lkw in S1B 0,78 h und dementsprechend um 44,4% länger als S1A. Eine Tour mit einem Lasten-fahrrad von einer Filiale zu den Wohnstandorten der PrivatkundInnen dauert ca. 0,71 h in S1A, dagegen in S1B 0,62 h, was einem niedrigeren Wert von 12,7% entspricht. In S2A dagegen fährt ein Lkw 3,5 t zGG pro Tour 7,09 h und in S2B insgesamt 6,44 h. Die Transportzeit ist demzufolge in S2B um 9,2% niedriger als in S2A.

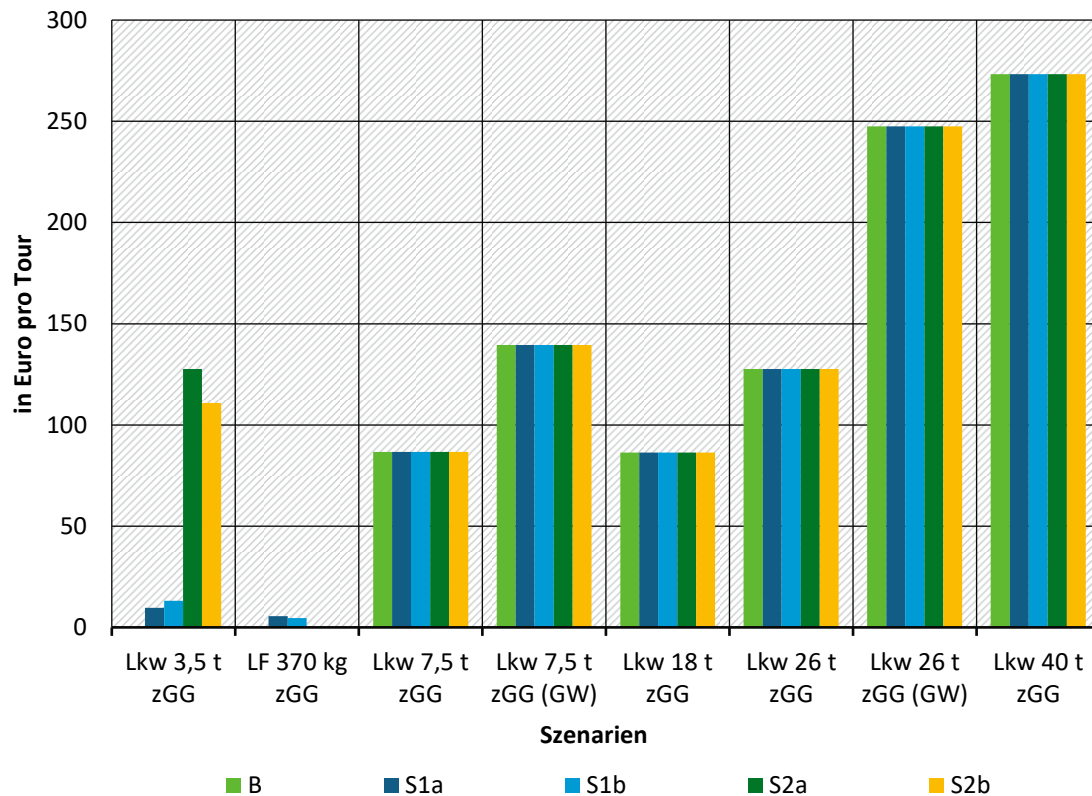
Abbildung 74: Vergleich der Simulationsergebnisse der Szenarien Lebensmittelbelieferung: Transportzeit pro Tour



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

In Abbildung 75 wird der Vergleich der Simulationsergebnisse der Szenarien Lebensmittelbelieferung zu den Gesamtkosten pro Tour je Lkw-Fahrzeugtyp aufgezeigt. Hierbei ist festzustellen, dass die Gesamtkosten pro Tour bei den Lkw 3,5 t zGG in S2A mit 127,70 Euro pro Tour am höchsten ausfallen. In S2B fallen diese Kosten um 13,1% geringer im Vergleich zu S2A aus und liegen absolut bei 110,93 Euro pro Tour. Dagegen liegen die Gesamttransportkosten für diesen Lkw-Typ in S1A nur bei 9,63 Euro und in S1B nur bei 13,08 Euro pro Tour. Dies liegt vornehmlich daran, dass die Transportdauern sowie Transportdistanzen in den Szenarien 1A und B geringer als in den Szenarien 2A und B ausfallen. Die Tour eines Lastenfahrrads kostet insgesamt in Szenario 1A 5,51 Euro und in S1B 4,53 Euro.

Abbildung 75: Vergleich der Simulationsergebnisse der Szenarien Lebensmittelbelieferung: Transportkosten pro Tour



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Im Detail werden in der Tabelle 42 die Kennwerte je betrachteten Parameter aufgezeigt.

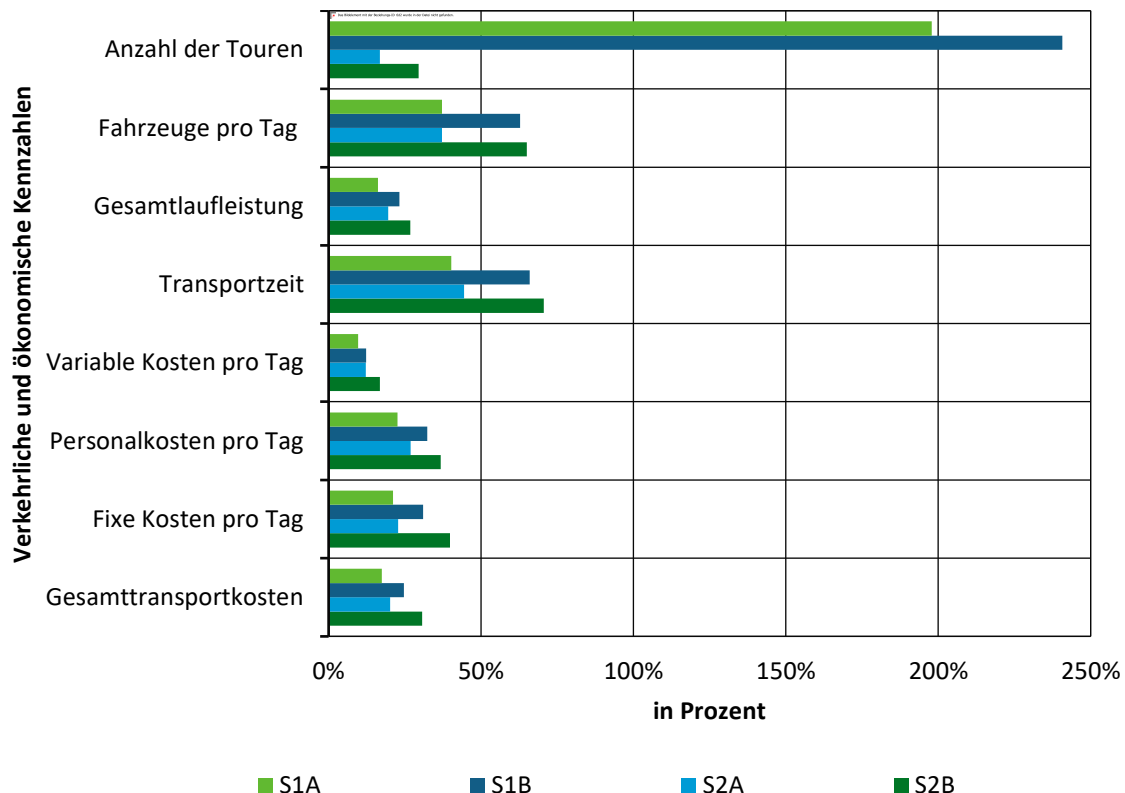
Im Überblick werden in der Abbildung 76 die relevanten verkehrlichen und ökonomischen Kennwerte für einen durchschnittlichen Werktag des Basisszenarios und der Szenarien zur "Lebensmittelbelieferung" aufgezeigt. Hierbei werden die jeweiligen Werte der betrachteten Kennzahlen der beiden Szenarien in der Summe gegenübergestellt. Zusätzlich wird die prozentuale Abweichung der Szenarien vom Basisszenario je Parameter dargelegt.

Dabei ist festzustellen, dass im Szenario 1A die Anzahl der Fahrten um den Faktor von annähernd 2, im Szenario 1B sogar um den Faktor 2,4 zunehmen. Bei S1A werden über 37% Fahrzeuge zusätzlich benötigt, im Gegensatz dazu in S1B sogar annähernd 63% zusätzliche Fahrzeuge, überwiegend Lkw 3,5 t zGG und Lastenfahräder. Die Laufleistung wächst auch in S1A um 16,2% an und im S1B um 23,2%. Die Transportzeit nimmt insgesamt in S1A um 40,2% zu, im S1B hingegen um 66% im Vergleich zum Basisszenario zu. Hinsichtlich der ökonomischen Effekte ist ein Zuwachs von 9,65% an variablen Transportkosten in S1A und 12,3% in S1B festzustellen. Die fixen Kosten pro Tag nehmen in S1A um über 21% zu, in S1B dagegen um annähernd 31%. Die Personalkosten steigen im Zuge der erhöhten Transportzeiten in S1A um 22,6% und in S1B um 32,4% zu. Insgesamt erhöhen sich die Gesamttransportkosten um 17,4 % in S1A und 24,6% in S1B für das Logistikdienstleistungsunternehmen.

Im Gegensatz dazu nimmt das Fahrtenaufkommen bei Direktbelieferung der Lebensmittel zu den Wohnstandorten der Privathaushalte in S2A nur um 16,9% und in S2B um 29,5% zu. Hierbei nimmt das Fahrzeugaufkommen in S2A um 37,1%, vornehmlich Lkw 3,5 t zGG, in S1B sogar um ca. 65% zu. Die Laufleistung wächst in S2A um 19,5% an und im S2B um 26,8%. Die

Transportzeit nimmt insgesamt in S2A um 44,4%, im S2B sogar um 70,6% im Vergleich zum Basisszenario zu. Hinsichtlich der ökonomischen Effekte ist ein Zuwachs von 12,2% an variablen Transportkosten in S2A und 16,8% in S2B festzustellen, was an der höheren Laufleistung jeweils im Vergleich zum Basisszenario liegt. Die fixen Kosten pro Tag nehmen in S2A um über 22,8%, in S2B dagegen um annähernd 40% zu. Die Personalkosten steigen im Zuge der erhöhten Transportzeiten in S2A um 26,9% und in S2B um 36,8% zu. Insgesamt erhöhen sich die Gesamttransportkosten um 20,2% in S2A und 30,7% in S2B für das Logistikdienstleistungsunternehmen.

Abbildung 76: Prozentuale Abweichung der Szenarien „Lebensmittelbelieferung“ vom Basisszenario



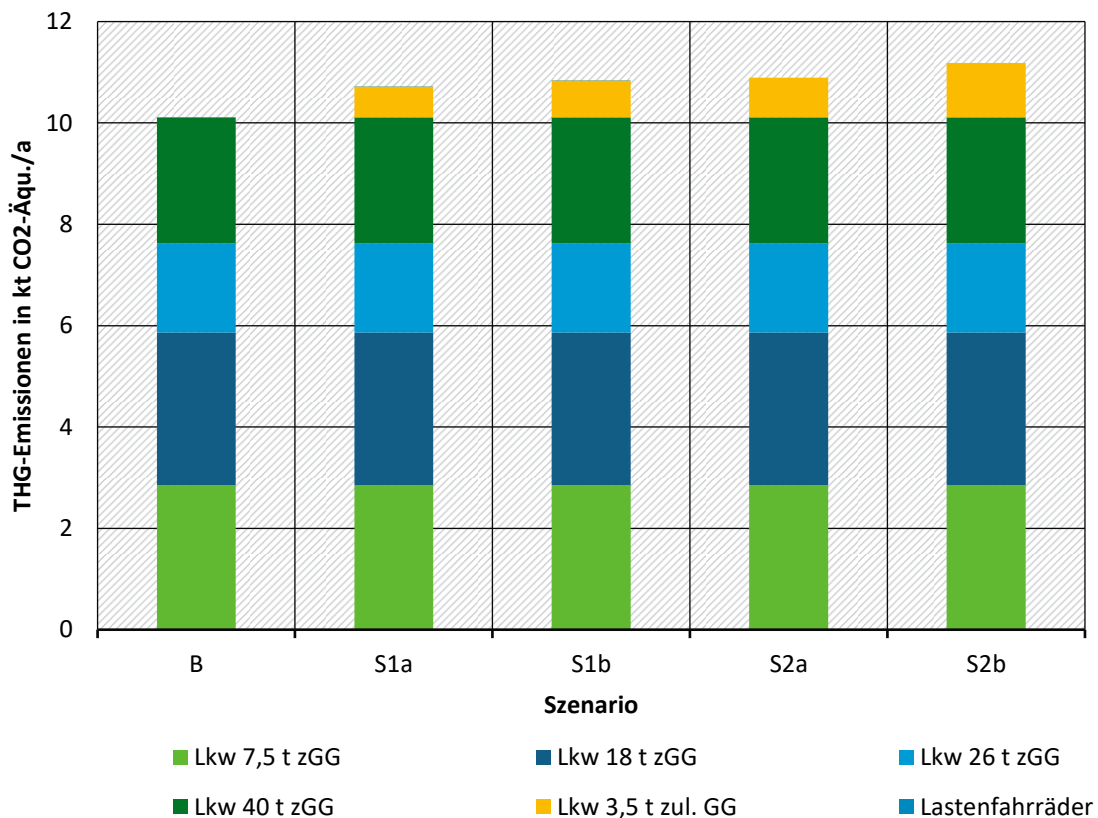
Quelle: Eigene Darstellung, DLR

3.5.3.2.2 Auswirkung auf die Treibhausgasemissionen

Die Lebensmittelbelieferung der Filialen im Basisszenario verursacht jährliche THG-Emissionen in Höhe von ca. 10 Kt CO₂-Äqu. (siehe Abbildung 77). Die Zusatzemissionen durch die direkte Belieferung der Endkunden ist mit ca. 0,6-1 kt/a CO₂-Äqu. dagegen vergleichsweise gering, wobei das Szenario 1 durch die Nutzung von elektrisch betriebenen Lastenrädern die niedrigsten Emissionen aufweist.

Da der private Einkaufsverkehr im Basisszenario nicht erfasst wird, wurden dessen Emissionen auf Basis von Befragungsergebnissen zum privaten Einkaufsverkehr für den täglichen Bedarf mit dem Pkw, welcher u.a. Lebensmittelkäufe enthält, abgeschätzt. Diese liegen mit 478 kt CO₂-Äqu./a um ein Vielfaches höher als die Lebensmittelbelieferung mittels LNF oder Lastenrädern. Daraus kann geschlossen werden, dass die möglichen Zusatzemissionen durch die Lebensmittelbelieferung insgesamt gering sind. Inwiefern sich damit eine Vermeidung privater Einkaufsverkehre mit dem Pkw und damit sogar Emissionsreduktionen ergeben könnten, wäre jedoch in weiteren Forschungsarbeiten zu untersuchen.

Abbildung 77: THG-Emissionen im Fallbeispiel Lebensmittelbelieferung für Berlin im Jahr 2017



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu. Anmerkungen: Es wurden mittlere THG-Emissionsfaktoren für Innerortsstraßen im Jahr 2017, inklusive Emissionen der Energiebereitstellung (WTW) aus TREMOD 6.01 zugrunde gelegt. Strombereitstellung für E-Lastenfahrräder aus bundesweitem Strommix 2017.

Tabelle 42: Simulationsergebnisse des Szenarios „Lebensmittelbelieferung auf der Letzten Meile“

Output-Parameter	Lkw-Typ	B	S1a	S1b	S2a	S2b	E
Anzahl der Touren	Lkw 3,5 t zGG		1.153,0	1.112,0	104,0	182,0	T
Anzahl der Touren	LF 370 kg zGG		68,0	373,0			T
			1.221,0	1.485,0	104,0	182,0	
Anzahl der Touren	Lkw 7,5 t zGG	252,0	252,0	252,0	252,0	252,0	T
Anzahl der Touren	Lkw 7,5 t zGG (GW)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	T
Anzahl der Touren	Lkw 18 t zGG	233,0	233,0	233,0	233,0	233,0	T
Anzahl der Touren	Lkw 26 t zGG	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	T
Anzahl der Touren	Lkw 26 t zGG (GW)	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	T
Anzahl der Touren	Lkw 40 t zGG	39,0	39,0	39,0	39,0	39,0	T
Anzahl der Touren	Insgesamt	617,0	3.059,0	3.587,0	825,0	981,0	T
Gesamtleistung	Lkw 3,5 t zGG		6.380,7	7.680,9	8.259,6	11.343,7	km

Output-Parameter	Lkw-Typ	B	S1a	S1b	S2a	S2b	E
Gesamtleistung	LF 370 kg zGG		476,3	2.131,0	0,0	0,0	km
Gesamtleistung	Lkw 7,5 t zGG	16.780,4	16.780,4	16.780,4	16.780,4	16.780,4	km
Gesamtleistung	Lkw 7,5 t zGG (GW)	2.882,5	2.882,5	2.882,5	2.882,5	2.882,5	km
Gesamtleistung	Lkw 18 t zGG	11.630,7	11.630,7	11.630,7	11.630,7	11.630,7	km
Gesamtleistung	Lkw 26 t zGG	4.182,3	4.182,3	4.182,3	4.182,3	4.182,3	km
Gesamtleistung	Lkw 26 t zGG (GW)	1.130,6	1.130,6	1.130,6	1.130,6	1.130,6	km
Gesamtleistung	Lkw 40 t zGG	5.655,1	5.655,1	5.655,1	5.655,1	5.655,1	km
Gesamtleistung	Insgesamt	42.261,5	49.118,5	52.073,4	50.521,1	53.605,3	km
Ø Leistung	Lkw 3,5 t zGG		5,5	6,9	79,4	62,3	km/T
Ø Leistung	LF 370 kg zGG		7,0	5,7			km/T
Ø Leistung	Lkw 7,5 t zGG	66,6	66,6	66,6	66,6	66,6	km/T
Ø Leistung	Lkw 7,5 t zGG (GW)	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	km/T
Ø Leistung	Lkw 18 t zGG	49,9	49,9	49,9	49,9	49,9	km/T
Ø Leistung	Lkw 26 t zGG	70,9	70,9	70,9	70,9	70,9	km/T
Ø Leistung	Lkw 26 t zGG (GW)	125,6	125,6	125,6	125,6	125,6	km/T
Ø Leistung	Lkw 40 t zGG	145,0	145,0	145,0	145,0	145,0	km/T
Transportzeit	Lkw 3,5 t zGG		618,3	863,1	737,1	1.171,3	h/Tag
Transportzeit	LF 370 kg zGG		48,6	231,2			h/Tag
Transportzeit	Lkw 7,5 t zGG	639,0	639,0	639,0	639,0	639,0	h/Tag
Transportzeit	Lkw 7,5 t zGG (GW)	92,8	92,8	92,8	92,8	92,8	h/Tag
Transportzeit	Lkw 18 t zGG	536,2	536,2	536,2	536,2	536,2	h/Tag
Transportzeit	Lkw 26 t zGG	168,9	168,9	168,9	168,9	168,9	h/Tag
Transportzeit	Lkw 26 t zGG (GW)	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	h/Tag
Transportzeit	Lkw 40 t zGG	169,0	169,0	169,0	169,0	169,0	h/Tag
Transportzeit	Insgesamt	1.658,4	2.325,3	2.752,7	2.395,4	2.829,6	h/Tag
Transportzeit pro Tour	Lkw 3,5 t zGG		0,5	0,8	7,1	6,4	h/T
Transportzeit pro Tour	LF 370 kg zGG		0,7	0,6			h/T
Transportzeit pro Tour	Lkw 7,5 t zGG	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	h/T

Output-Parameter	Lkw-Typ	B	S1a	S1b	S2a	S2b	E
Transportzeit pro Tour	Lkw 7,5 t zGG (GW)	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	h/T
Transportzeit pro Tour	Lkw 18 t zGG	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	h/T
Transportzeit pro Tour	Lkw 26 t zGG	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	h/T
Transportzeit pro Tour	Lkw 26 t zGG (GW)	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	h/T
Transportzeit pro Tour	Lkw 40 t zGG	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	h/T
Variable Kosten pro Tag	Lkw 3,5 t zGG		2.240,7	2.697,2	2.900,5	3.983,5	€/Tag
Variable Kosten pro Tag	LF 370 kg zGG		49,1	219,5			€/Tag
Variable Kosten pro Tag	Lkw 7,5 t zGG	7.393,9	7.393,9	7.393,9	7.393,9	7.393,9	€/Tag
Variable Kosten pro Tag	Lkw 7,5 t zGG (GW)	1.270,1	1.270,1	1.270,1	1.270,1	1.270,1	€/Tag
Variable Kosten pro Tag	Lkw 18 t zGG	6.737,5	6.737,5	6.737,5	6.737,5	6.737,5	€/Tag
Variable Kosten pro Tag	Lkw 26 t zGG	2.936,4	2.936,4	2.936,4	2.936,4	2.936,4	€/Tag
Variable Kosten pro Tag	Lkw 26 t zGG (GW)	793,8	793,8	793,8	793,8	793,8	€/Tag
Variable Kosten pro Tag	Lkw 40 t zGG	4.586,3	4.586,3	4.586,3	4.586,3	4.586,3	€/Tag
Variable Kosten pro Tag	Insgesamt	23.717,9	26.007,6	26.634,6	26.618,3	27.701,4	€/Tag
Variable Kosten pro Tour	Lkw 3,5 t zGG		1,9	2,4	27,9	21,9	€/T
Variable Kosten pro Tour	LF 370 kg zGG		0,7	0,6			€/T
Variable Kosten pro Tour	Lkw 7,5 t zGG	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	€/T
Variable Kosten pro Tour	Lkw 7,5 t zGG (GW)	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	€/T
Variable Kosten pro Tour	Lkw 18 t zGG	28,9	28,9	28,9	28,9	28,9	€/T
Variable Kosten pro Tour	Lkw 26 t zGG	49,8	49,8	49,8	49,8	49,8	€/T
Variable Kosten pro Tour	Lkw 26 t zGG (GW)	88,2	88,2	88,2	88,2	88,2	€/T
Variable Kosten pro Tour	Lkw 40 t zGG	117,6	117,6	117,6	117,6	117,6	€/T
Personalkosten pro Tag	Lkw 3,5 t zGG		4.002,7	4.821,0	5.122,4	7.006,4	€/Tag
Personalkosten pro Tag	LF 370 kg zGG		300,7	1.346,5			€/Tag

Output-Parameter	Lkw-Typ	B	S1a	S1b	S2a	S2b	E
Personalkosten pro Tag	Lkw 7,5 t zGG	7.478,9	7.478,9	7.478,9	7.478,9	7.478,9	€/Tag
Personalkosten pro Tag	Lkw 7,5 t zGG (GW)	1.173,1	1.173,1	1.173,1	1.173,1	1.173,1	€/Tag
Personalkosten pro Tag	Lkw 18 t zGG	5.977,8	5.977,8	5.977,8	5.977,8	5.977,8	€/Tag
Personalkosten pro Tag	Lkw 26 t zGG	1.894,8	1.894,8	1.894,8	1.894,8	1.894,8	€/Tag
Personalkosten pro Tag	Lkw 26 t zGG (GW)	595,8	595,8	595,8	595,8	595,8	€/Tag
Personalkosten pro Tag	Lkw 40 t zGG	1.933,2	1.933,2	1.933,2	1.933,2	1.933,2	€/Tag
Personalkosten pro Tag	Insgesamt	19.053,5	23.356,9	25.221,0	24.175,9	26.060,0	€/Tag
Personalkosten pro Tour	Lkw 3,5 t zGG		3,5	4,3	49,3	38,5	€/T
Personalkosten pro Tour	LF 370 kg zGG		4,4	3,6			€/T
Personalkosten pro Tour	Lkw 7,5 t zGG	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	€/T
Personalkosten pro Tour	Lkw 7,5 t zGG (GW)	46,9	46,9	46,9	46,9	46,9	€/T
Personalkosten pro Tour	Lkw 18 t zGG	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	€/T
Personalkosten pro Tour	Lkw 26 t zGG	32,1	32,1	32,1	32,1	32,1	€/T
Personalkosten pro Tour	Lkw 26 t zGG (GW)	66,2	66,2	66,2	66,2	66,2	€/T
Personalkosten pro Tour	Lkw 40 t zGG	49,6	49,6	49,6	49,6	49,6	€/T
Fahrzeuge pro Tag	Lkw 3,5 t zGG		96,0	139,0	104,0	182,0	F/Tag
Fahrzeuge pro Tag	LF 370 kg zGG		8,0	37,0			F/Tag
Fahrzeuge pro Tag	Lkw 7,5 t zGG	107,0	107,0	107,0	107,0	107,0	F/Tag
Fahrzeuge pro Tag	Lkw 7,5 t zGG (GW)	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	F/Tag
Fahrzeuge pro Tag	Lkw 18 t zGG	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	F/Tag
Fahrzeuge pro Tag	Lkw 26 t zGG	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	F/Tag
Fahrzeuge pro Tag	Lkw 26 t zGG (GW)	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	F/Tag
Fahrzeuge pro Tag	Lkw 40 t zGG	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	F/Tag
Fahrzeuge pro Tag	Insgesamt	280,0	384,0	456,0	384,0	462,0	F/Tag

Output-Parameter	Lkw-Typ	B	S1a	S1b	S2a	S2b	E
Transportzeit pro Fahrzeug	Lkw 3,5 t zGG		6,4	6,2	7,1	6,4	h/F
Transportzeit pro Fahrzeug	LF 370 kg zGG		6,4	6,2			h/F
Transportzeit pro Fahrzeug	Lkw 7,5 t zGG	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	h/F
Transportzeit pro Fahrzeug	Lkw 7,5 t zGG (GW)	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	h/F
Transportzeit pro Fahrzeug	Lkw 18 t zGG	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	h/F
Transportzeit pro Fahrzeug	Lkw 26 t zGG	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	h/F
Transportzeit pro Fahrzeug	Lkw 26 t zGG (GW)	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	h/F
Transportzeit pro Fahrzeug	Lkw 40 t zGG	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	h/F
Fixe Kosten pro Tag	Lkw 3,5 t zGG		4.856,4	7.025,6	5.256,5	9.199,0	€/Tag
Fixe Kosten pro Tag	LF 370 kg zGG		24,7	121,9			€/Tag
Fixe Kosten pro Tag	Lkw 7,5 t zGG	6.983,8	6.983,8	6.983,8	6.983,8	6.983,8	€/Tag
Fixe Kosten pro Tag	Lkw 7,5 t zGG (GW)	1.044,3	1.044,3	1.044,3	1.044,3	1.044,3	€/Tag
Fixe Kosten pro Tag	Lkw 18 t zGG	7.394,4	7.394,4	7.394,4	7.394,4	7.394,4	€/Tag
Fixe Kosten pro Tag	Lkw 26 t zGG	2.701,0	2.701,0	2.701,0	2.701,0	2.701,0	€/Tag
Fixe Kosten pro Tag	Lkw 26 t zGG (GW)	838,2	838,2	838,2	838,2	838,2	€/Tag
Fixe Kosten pro Tag	Lkw 40 t zGG	4.136,5	4.136,5	4.136,5	4.136,5	4.136,5	€/Tag
Fixe Kosten pro Tag	Insgesamt	23.098,2	27.979,3	30.245,6	28.354,7	32.297,2	€/Tag
Gesamttransportkosten	Lkw 3,5 t zGG		11.099,8	14.543,8	13.279,4	20.188,9	€/Tag
Gesamttransportkosten	LF 370 kg zGG		374,4	1.687,9			€/Tag
Gesamttransportkosten	Lkw 7,5 t zGG	21.856,6	21.856,6	21.856,6	21.856,6	21.856,6	€/Tag
Gesamttransportkosten	Lkw 7,5 t zGG (GW)	3.487,4	3.487,4	3.487,4	3.487,4	3.487,4	€/Tag
Gesamttransportkosten	Lkw 18 t zGG	20.109,6	20.109,6	20.109,6	20.109,6	20.109,6	€/Tag
Gesamttransportkosten	Lkw 26 t zGG	7.532,3	7.532,3	7.532,3	7.532,3	7.532,3	€/Tag
Gesamttransportkosten	Lkw 26 t zGG (GW)	2.227,9	2.227,9	2.227,9	2.227,9	2.227,9	€/Tag
Gesamttransportkosten	Lkw 40 t zGG	10.655,8	10.655,8	10.655,8	10.655,8	10.655,8	€/Tag

Output-Parameter	Lkw-Typ	B	S1a	S1b	S2a	S2b	E
Gesamttransportkosten	Insgesamt	65.869,6	77.343,8	82.101,3	79.149,0	86.058,5	€/Tag
Gesamttransportkosten pro Tour	Lkw 3,5 t zGG		9,6	13,1	127,7	110,9	€/T
Gesamttransportkosten pro Tour	LF 370 kg zGG		5,5	4,5			€/T
Gesamttransportkosten pro Tour	Lkw 7,5 t zGG	86,7	86,7	86,7	86,7	86,7	€/T
Gesamttransportkosten pro Tour	Lkw 7,5 t zGG (GW)	139,5	139,5	139,5	139,5	139,5	€/T
Gesamttransportkosten pro Tour	Lkw 18 t zGG	86,3	86,3	86,3	86,3	86,3	€/T
Gesamttransportkosten pro Tour	Lkw 26 t zGG	127,7	127,7	127,7	127,7	127,7	€/T
Gesamttransportkosten pro Tour	Lkw 26 t zGG (GW)	247,5	247,5	247,5	247,5	247,5	€/T
Gesamttransportkosten pro Tour	Lkw 40 t zGG	273,2	273,2	273,2	273,2	273,2	€/T

Legende: LF=Lastenfrad, T=Tour, h=Stunde, F=Fahrzeug

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

3.5.3.2.3 Schlussfolgerungen

Die Belieferung von Privatkunden mit Lebensmitteln erzeugt nur in geringem Maße einen Anstieg an Laufleistung auf der Letzten Meile und daraus resultierend der Treibhausgasemissionen. Dies zeigt sich sowohl bei der Belieferung der Kunden von den Lebensmitteleinzelhandelsfilialen als auch von Distributionszentren außerhalb.

Im Rahmen dieser Abschätzung lag der Fokus jedoch nicht auf dem privaten Einkaufsverkehr, sondern nur auf dem Zustellverkehr.

Es wird davon ausgegangen, dass der private Einkaufsverkehr mehr Kilometer als der Lieferverkehr zurücklegt.

Dieser Hypothese wird im Kapitel 3.6.2 im Detail nachgegangen.

3.5.4 Szenario Zustellungen zu Paketstationen

Im Folgenden wird das Szenario Paketstationen vorgestellt. Ziel dabei ist, die Effekte der Paketstationsnutzung privater Haushalte auf verkehrliche und ökologische Kennwerte aufzuzeigen.

Zur Modellierung des Szenarios Paketstationen kann auf einen bestehenden Ansatz zurückgegriffen werden. Thaller (2018) entwickelte einen Rückkopplungsansatz zwischen einer Makroskopischen Extrapolation mit einer Mikroskopischen Verkehrssimulation zur Strategischen Verkehrsprognose. Als Makroskopische Extrapolation nutzte sie die Methodik System Dynamics, als Mikroskopische Verkehrssimulation wurde hingegen das mikroskopische Verkehrsnachfragemodell MATSim und das integrierte Logistik-Modul Jsprit herangezogen. Im Rahmen eines

Fallbeispiels zum KEP-Markt in Berlin wurde dieser Ansatz operationalisiert. Dieser Ansatz ermöglicht eine langfristige Prognose unter Berücksichtigung des räumlichen Kontexts. Als Erweiterung zum Basisszenario wurde das Maßnahmenzenario Paketstationen implementiert, um im Vergleich zum Basisszenario die Wirkungen der Paketstationen auf den KEP-Verkehr herauszustellen. Betrachtungshorizont war von 2009 bis 2030.

3.5.4.1 Szenarienbeschreibung und Parametrisierung des Modells

Im Basisszenario wird angenommen, dass 100 % der PrivatkundInnen die Belieferungsform Hauszustellung wählen. Im Szenario 1 wird die Annahme getroffen, dass 25 % privater KundInnen die Belieferungsform Paketstationen nutzen. Im Szenario 2 lassen 50 % der PrivatkundInnen ihre Pakete an die Paketstation von KEP-Dienstleistungsunternehmen liefern. Ferner werden in Szenario 3 75 % private Sendungen an die Paketstation geliefert und im Szenario 4 100 %. Ansonsten unterscheiden sich die Parameterwerte der Szenarien 1 bis 4 nicht vom Basisszenario. Zu erwartende Effekte sind in diesem Fall.

- Bündelung der Zustellungen
- Verringerung der Stoppdichte
- Reduzierung des Fahrtenaufkommens
- Reduzierung der Laufleistung und des Kraftstoffverbrauchs
- Reduzierung der Transportkosten
- Reduzierung der Abgasemissionen

In Tabelle 43 werden die eingesetzten Parameterwerte des Basisszenarios im Überblick aufgezeigt. Zudem werden die herangezogenen Datenquellen zur Parametrisierung des Szenarios hinterlegt. Zum vertieften Einblick in die Aufbereitung genutzten der Sekundärdaten zur Parametrisierung des Modells wird auf Thaller (2018) verwiesen. Die Parameterwerte beziehen sich auf das Initialjahr 2009. Ausgehend von diesem Jahr wird die Prognose bis 2030 mittels des Rückkopplungsansatzes durchgeführt.

Tabelle 43: Parametrisierung des Szenarios „Paketstationen“

Input-Parameter	B	Einheiten	Datenquellen
Paketstationen			
Anzahl Paketstationen	147	PS	
Kapazität pro Paketstation	76	PE/PS	
Güternachfrage			
Güternachfrage B2C	99.114	PE/Tag	BIEK (2018), Manner-Romberg et al. (2015), ASB (2018)
Güternachfrage B2B	172.296	PE/Tag	
Zeitfenster der gewerblichen KundInnen			
	6-<8	Uhr	Thaller (2018)
	8-<10	Uhr	
	10-12	Uhr	

Input-Parameter	B	Einheiten	Datenquellen
Zeitfenster der privaten KundInnen			
	6-<8	Uhr	
	8-<10	Uhr	
	10-12	Uhr	
Anteil der Belieferungsform für PrivatkundInnen			
Hauszustellung	100	%	Thaller (2018)
Packstationen	0	%	
Paketshops, Postfilialen	0	%	
Fahrzeugcharakteristika			
Lkw 3,5 t zul. GG			
Fahrzeugkapazität	160	PE/F	BGL (2018), ETM (2017), DAT Group (2018), Mehlhart et al. (2011), MWV (2018), Schulz (2017), Wittenbrink (2014)
Fixe Kosten	47,52223942	€/Tag	
Variable Kosten	0,000317332	€/m	
Zeitabhängige Kosten	0,003223249	€/s	
Dieserverbrauch	0,000102952	l/m	
Adblueverbrauch	0	l/m	
Max. Geschwindigkeit	42	m/s	
Stopzeit			
Stopzeitkonstante	60	s/St	Thaller (2018)
Stopzeitvariable	60	s/PE	

Legende: PE=Paketeinheit, PS=Paketstation, F=Fahrten, m=Meter, s=Sekunde, l=Liter, St=Stopp

Quelle: Eigene Darstellung

3.5.4.2 Analyse der Simulationsergebnisse

Die Simulationen zu den Szenarien zur Sonderform „Paketstationen“ wurden bereits mittels der Strategischen Verkehrsprognose durchgeführt. Im nächsten Schritt wurden die Simulationsergebnisse in aggregierter Form aufbereitet und ausgewertet.

Bei den Ergebnisanalysen liegt der Fokus auf verkehrlichen (Güterverkehrsnachfrage, Fahrleistung), ökonomischen (Transportkosten) und ökologischen Kennzahlen (Emissionen). Die Emissionen werden von ifeu mittels TREMOD berechnet. Zu diesem Zweck werden die Fahrleistungen je Fahrzeugtyp an ifeu übergeben.

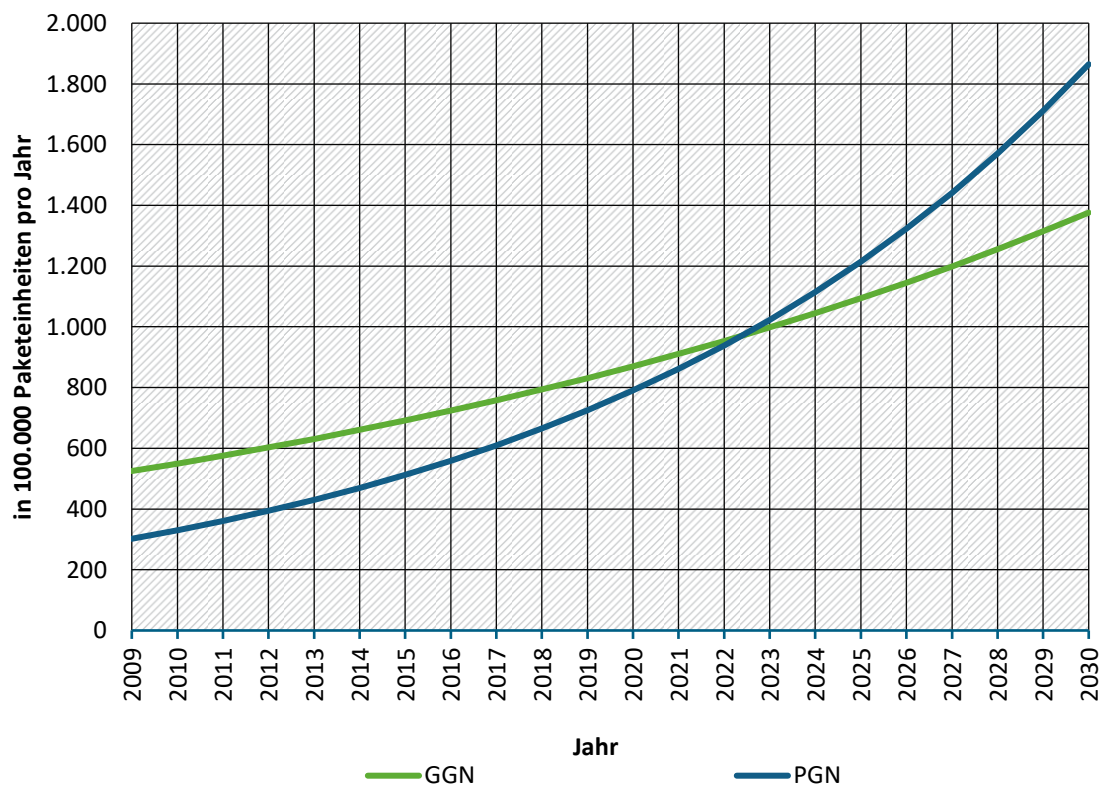
Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse der Szenarien 25 %, 50%, 75% sowie 100% Nutzung von PS seitens der PrivatkundInnen im Vergleich zum Basisszenario – 0% Nutzung von PS – aufgezeigt.

3.5.4.2.1 Auswirkungen auf die Güternachfrage

Im Folgenden wird auf die Simulationsergebnisse zur Güternachfrage bzw. der Paketnachfrage privater und gewerblicher KundInnen pro Jahr näher eingegangen, das vom Rückkopplungsansatz nach Thaller (2018) von 2009 bis 2030 extrapoliert wird.

Im Folgenden werden in Abbildung 78 die Simulationsergebnisse zur Entwicklung der privaten (PGN) und gewerblichen Güternachfrage (GGN) für den Zeitraum von 2009 bis 2030 gezeigt. Demnach werden bis 2022 im privaten Güternachfragesegment weniger Paketeinheiten pro Jahr nachgefragt als im gewerblichen Güternachfragesegment. 2023 schneiden sich die beiden Entwicklungsgraphen und die private Güternachfrage ist ab 2023 höher als die gewerbliche Güternachfrage. Dies liegt daran, dass die gewerbliche Güternachfrage ein geringeres Wachstum im Vergleich zur stark anwachsenden privaten Güternachfrage aufweist. Das prozentuale Wachstum liegt bei der gewerblichen Güternachfrage bei 162 % und bei der privaten Güternachfrage bei 517,3% von 2009 bis 2030. Das signifikant hohe Wachstum der privaten Güternachfrage wird zudem durch die asymptotische Analyse ersichtlich, die eine exponentielle Wachstumsfunktion zeigt. Dagegen nimmt die Entwicklung der gewerblichen Güternachfrage eher gleichmäßig und langsam zu. Bei der Wachstumskurve handelt es sich um eine quadratische Funktion. Der starke Zusammenhang der jeweiligen Simulationsergebnisse von PGN und GGN mit den Trendlinien wird jeweils mittels R^2 mit einem Wert von 1 bestätigt.

Abbildung 78: Fallbeispiel Paketstationen: Vergleich der Simulationsergebnisse zur Güternachfrage pro Jahr



Quelle: Eigene Darstellung, DLR-VF

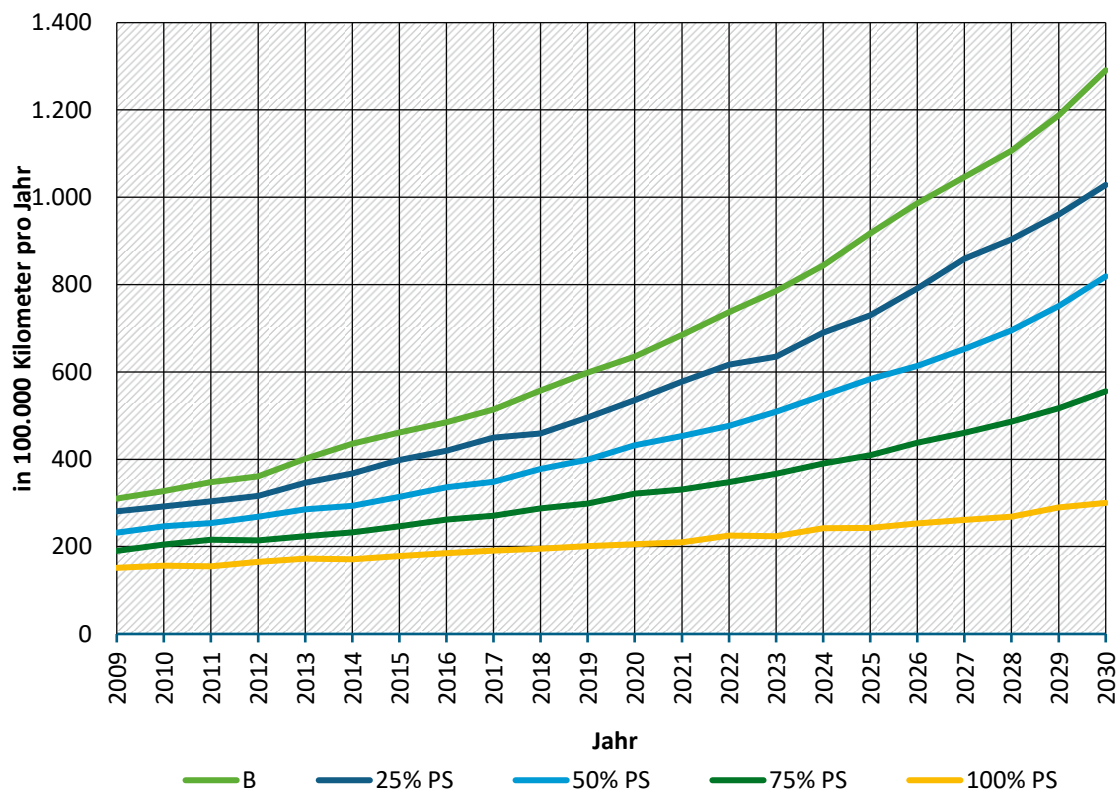
3.5.4.2.2 Auswirkungen auf die Laufleistung

In Abbildung 79 wird die zeitliche Entwicklung der Laufleistung auf der letzten Meile aufgezeigt. Im Basisszenario wird ein Wachstum dieser Variablen von über 284,5% bis 2030 prognostiziert.

Der Entwicklungsgraph des Basisszenarios gehört zur Wachstumsklasse Polynom 2. Grades, die ein quadratisches Wachstum aufweist. Dies wird durch den Wert von R^2 , der 0,9993 beträgt, bestätigt.

Die prozentualen Abweichungen der Simulationsergebnisse zur Laufleistung pro Jahr der Maßnahmenzenarien zum Basisszenario werden in der Abbildung 80 gezeigt. Wird das Szenario 25% PS näher betrachtet, wird eine mittlere, prozentuale Abweichung¹⁰ von annähernd -16 % erkennbar. Dennoch bringt ein Anteil von 25 % privater Nutzung von Packstationen eine Reduzierung der Laufleistung von über -20% im Jahr 2030. Die Laufleistung weicht im Szenario 50% PS um durchschnittlich 32,7 % im Vergleich zum Basisszenario ab. Szenario 75% PS erreicht sogar 2030 eine relative Abweichung von 57%. Im Szenario 100% PS liegt die Laufleistung bereits 2009 unter -50 % Abweichung, die bis zu -77 % im Jahr 2030 abnimmt. Die Abnahme der Laufleistung erfolgt stufenweise. Der Einfluss von Transportdistanz pro Tour macht sich hierbei bemerkbar. Im Mittel werden in diesem Zeitraum 65,8 % Kilometer Laufleistung in der Stadt pro Jahr eingespart. Von 2009 bis 2030 sinkt die Transportdistanz pro Tour im Vergleich zum Basisszenario.

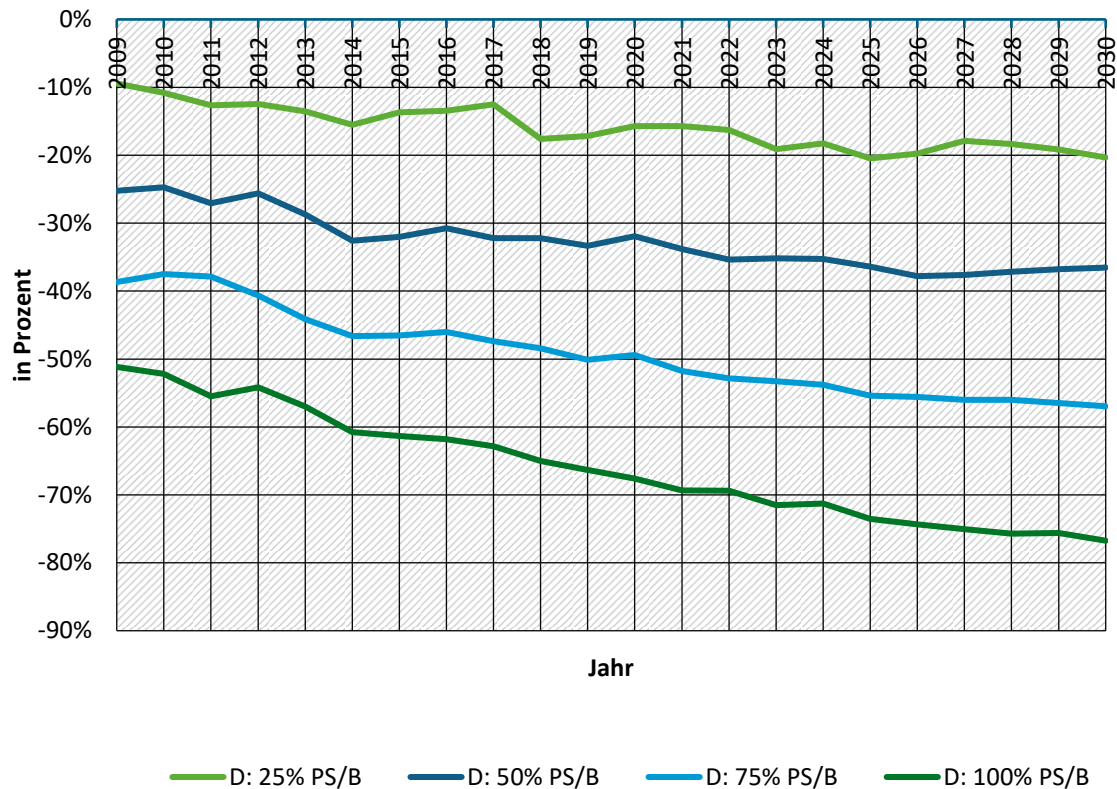
Abbildung 79: Fallbeispiel Paketstationen: Vergleich der Simulationsergebnisse zu Laufleistung pro Jahr



Quelle: Eigene Darstellung, DLR-VF

¹⁰ Entspricht dem Mean Absolute Percentage Error bzw. mittleren absoluten, prozentualen Fehlers (Sterman 1984, Hyndman & Athanasopoulos 2013)

Abbildung 80: Fallbeispiel Paketstationen: Vergleich der Simulationsergebnisse zu Laufleistung pro Jahr (Prozentuale Abweichung)

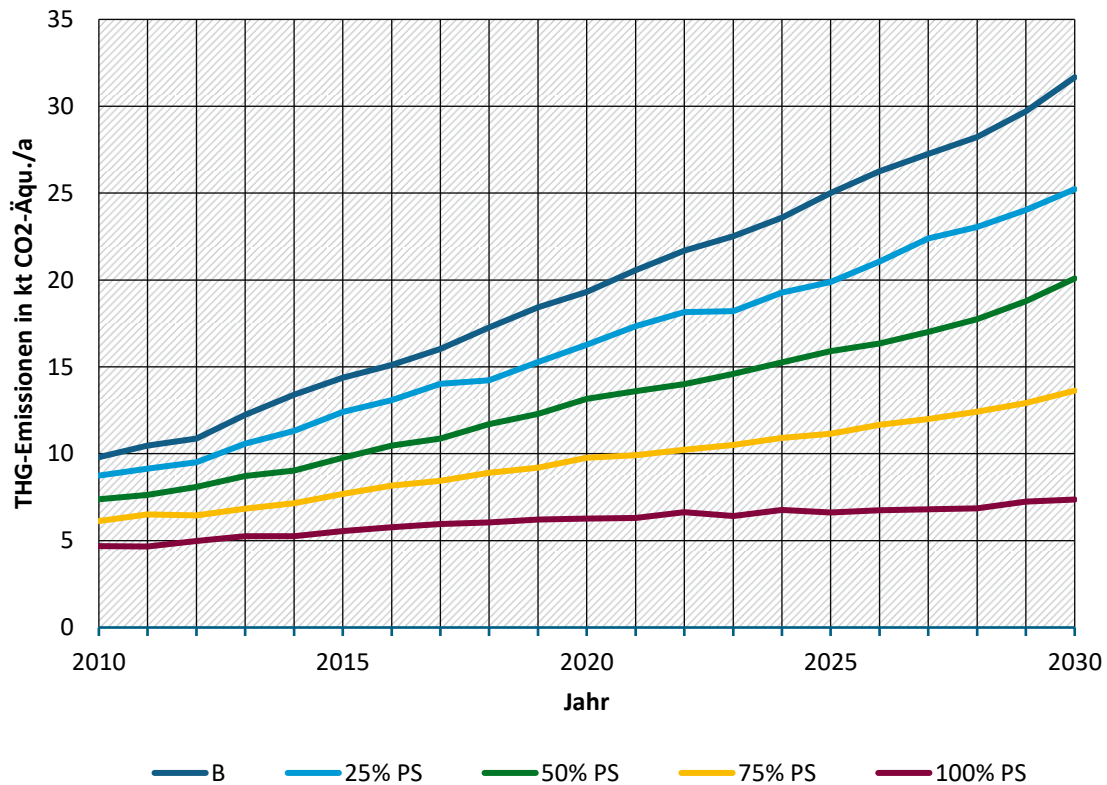


Quelle: Eigene Darstellung, DLR-VF

3.5.4.2.3 Auswirkungen auf die THG-Emissionen

Durch die kontinuierliche Zunahme der Laufleistung pro Jahr steigen die THG-Emissionen im Basisszenario, welches keine Nutzung von Paketstationen beinhaltet, von 10 kt CO₂-Äqu in 2010 auf über 30 kt CO₂-Äqu im Jahr 2030 an (siehe Abbildung 81). Durch die Nutzung von Paketstationen und die damit verbundene Fahrleistungsreduktion können die Emissionen stark reduziert werden. Im Falle, dass alle Pakete an Paketstationen geliefert werden, liegen die THG-Emissionen selbst beim angenommenen Anstieg der Paketlieferungen im Jahr 2030 nur bei ca. 7 kt CO₂-Äqu pro Jahr und damit um 77% niedriger als im Basisszenario 2030. Da die Paketabholung durch die KundInnen nicht untersucht wurde und im Falle der Nutzung von motorisierten Verkehrsmitteln zu Zusatzemissionen führen kann, besteht hierzu jedoch noch weiterer Forschungsbedarf.

Abbildung 81: THG-Emissionen im Fallbeispiel Paketzustellung für Berlin in den Jahren 2010 bis 2030



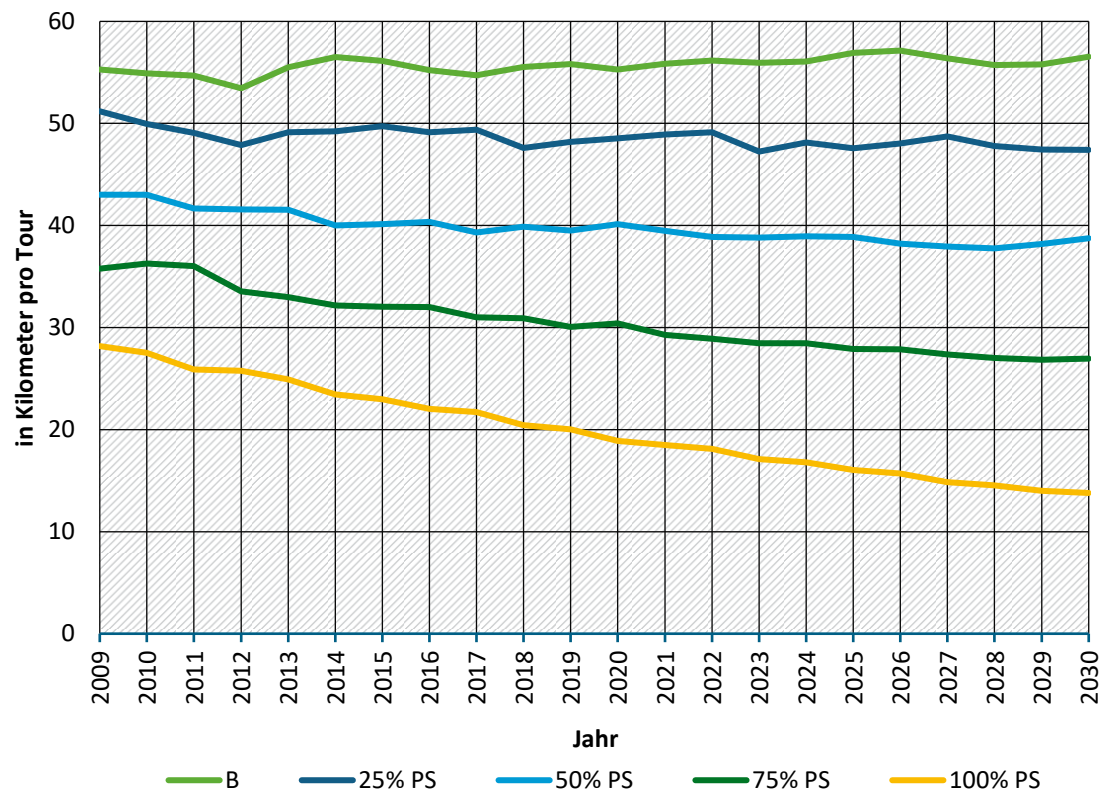
Quelle: Eigene Darstellung, ifeu. Anmerkungen: Es wurden mittlere jährliche THG-Emissionsfaktoren für Innerortsstraßen, inklusive Emissionen der Energiebereitstellung (WTW) aus TREMOD 6.01 zugrunde gelegt.

3.5.4.2.4 Auswirkungen auf die Transportdistanz pro Tour

Der Entwicklungsgraph von Transportdistanz pro Tour zeigt mehrere Schwankungen im Zeitraum von 2009 bis 2030. Die Werte liegen dabei zwischen 53,4 und 57,1 km/F (siehe Abbildung 82). Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen berechnet Bogdanski (2017) einen mittleren Wert der Transportdistanz pro Tour von 63,4 km pro Fahrt in Berlin. In Abbildung 83 werden die relativen Abstände der Transportdistanz pro Tour der Maßnahmenszenarien zum Basisszenario dargestellt.

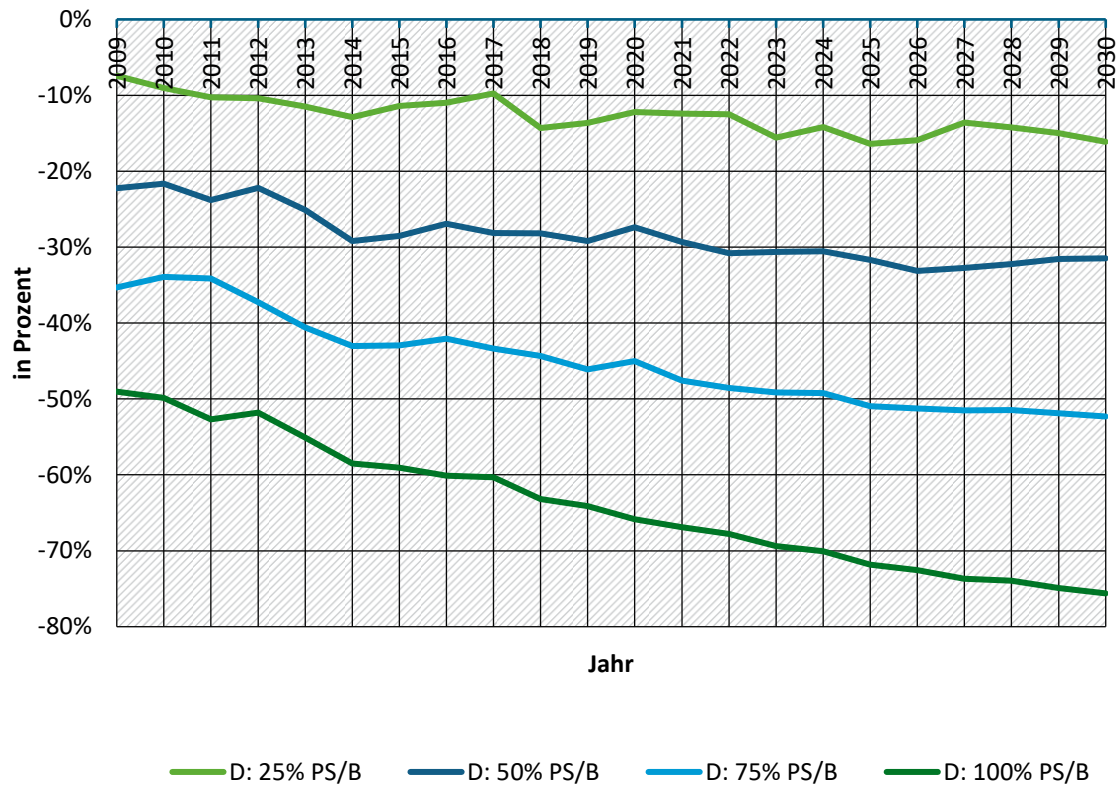
Die relativen Abweichungen des Szenarios 25% PS zum Basisszenario schwanken von 2009 bis 2025 um -10 %. Im Mittel können 12,7 % der Kilometer pro Tour durch eine Privatnutzung der Packstationen von 25 % der Sendungen eingespart werden. Die Einsparung an Wegelänge pro Tour des Szenarios 50% PS im Vergleich zum Basisszenario liegt im Mittel bei 28,5%. 2030 wird sogar bereits eine relative Abweichung von 31,5 % erreicht. Die mittlere Abweichung zwischen Szenario 75% PS liegt bei ca. 45%. 2030 wird hier eine Reduzierung der Transportweite pro Fahrt von über 52% durch die Nutzung von PS erreicht. Im Szenario 100% PS nehmen die relativen Abweichungen der Distanz pro Touren von annähernd 50 % im Jahr 2009 bis zu 75,6 % 2030 ab. Der mittlere prozentuale Abstand zwischen Szenario 100% PS zum Basisszenario beträgt 63,9 %. Dementsprechend werden die Fahrtweiten pro Tour im KEP-Segment durch die Maßnahme Packstationen kürzer, mit Tendenz sinkend bis 2030.

Abbildung 82: Fallbeispiel Paketstationen: Vergleich der Simulationsergebnisse zur durchschnittlichen Transportdistanz pro Tour



Quelle: Eigene Darstellung, DLR-VF

Abbildung 83: Fallbeispiel Paketstationen: Vergleich der Simulationsergebnisse zu Transportdistanz pro Tour (Prozentuale Abweichung)



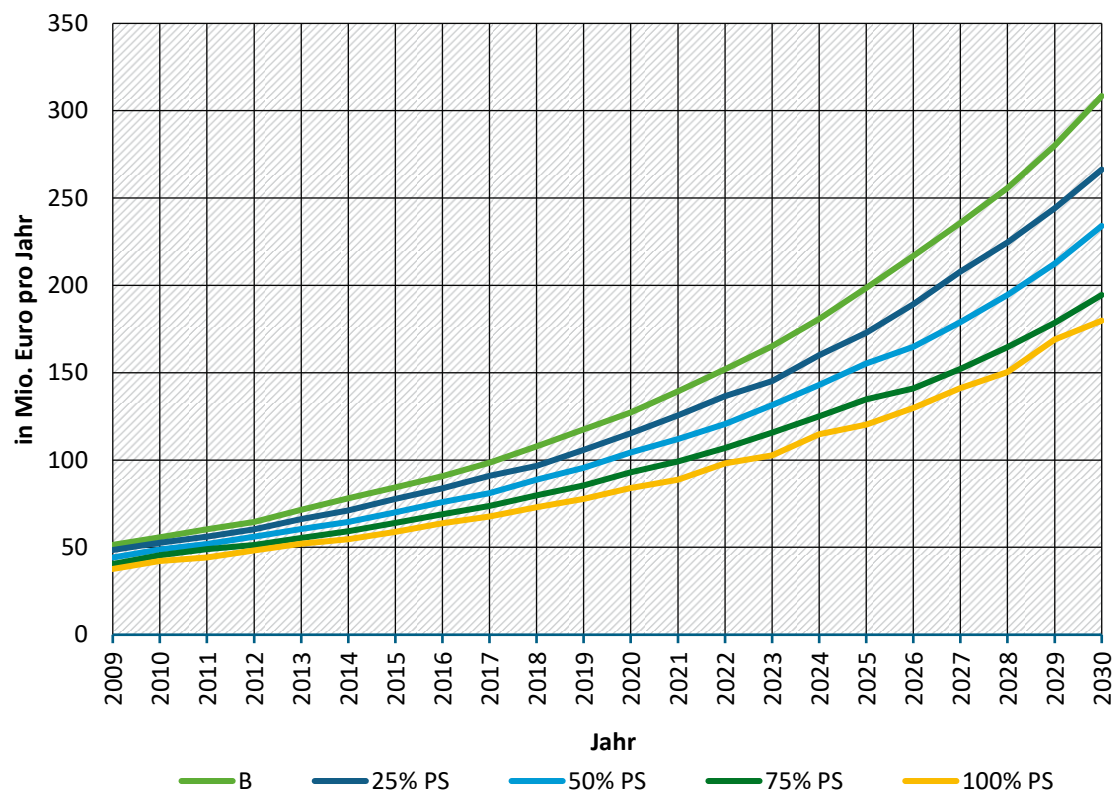
Quelle: Eigene Darstellung, DLR-VF

3.5.4.2.5 Auswirkungen auf die Transportkosten

In Abbildung 84 werden die Simulationsergebnisse der Gesamttransportkosten pro Jahr für den Zeitraum 2009 bis 2030 dargestellt. Die Entwicklungskurve des Basisszenarios zeigt quadratisches Wachstumsverhalten. R^2 von 0,9945 für das Basisszenario bestätigt den starken Zusammenhang zwischen den Simulationsergebnissen und der Trendlinie. Die Gesamttransportkosten steigen im Szenario B um 490,3% bis 2030.

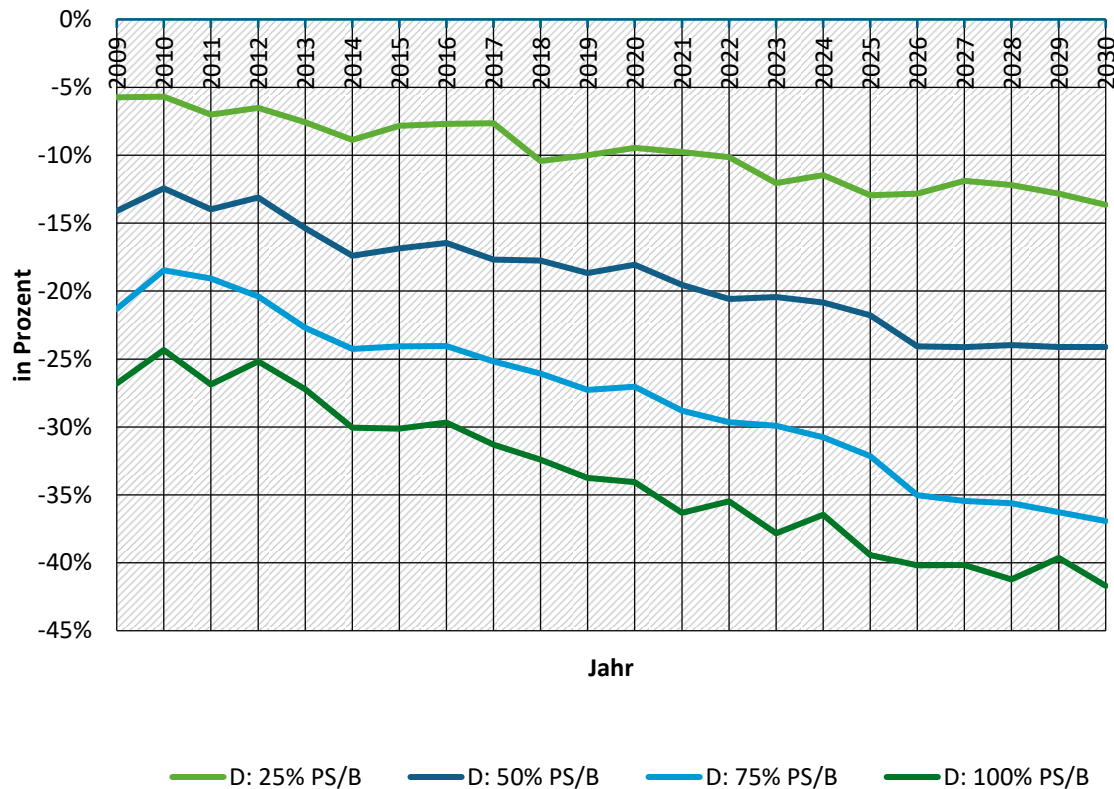
Die Abbildung 85 zeigt die relativen Abstände der Gesamttransportkosten pro Jahr der Maßnahmenszenarien zum Basisszenario für den Betrachtungshorizont von 2009 bis 2030. Die Simulationsergebnisse des Szenarios 25% PS sind zwischen 5% und 13 % niedriger als im Basisszenario. Die Entwicklungskurve des relativen Abstands nimmt dabei von 2009 bis 2030 ab. Der mittlere prozentuale Abstand beträgt dabei 9,7%. Im Vergleich dazu liegt die mittlere prozentuale Abweichung des Szenarios 50% PS zum Basisszenario bei -18,9%. 2030 werden hierbei über 24% an den Gesamttransportkosten eingespart. Im Szenario 75% PS dagegen können bereits annähernd 37% an Kosten im Jahr 2030 eingespart werden. Die prozentuale Abweichung des Szenarios 100% PS im Vergleich zum Basisszenario sinkt von -26,8% im Jahr 2009 auf -41,7% in 2030. In diesem Szenario ergibt sich im Mittel 33,7% Einsparung der Gesamttransportkosten.

Abbildung 84: Fallbeispiel Paketstationen: Vergleich der Simulationsergebnisse zu Gesamttransportkosten pro Jahr



Quelle: Eigene Darstellung, DLR-VF

Abbildung 85: Fallbeispiel Paketstationen: Vergleich der Simulationsergebnisse zu Gesamttransportkosten pro Jahr (Prozentuale Abweichung)



Quelle: Eigene Darstellung, DLR-VF

3.5.4.2.6 Schlussfolgerungen

Nach den Auswertungen ist von einem exponentiellen Wachstum des Sendungsaufkommens im KEP-Markt bis 2030 auszugehen.

Um dieses Wachstum sinnvoll zu steuern und dadurch ansteigenden Negativwirkungen des KEP-Verkehrs zu mindern, hat sich gezeigt, dass Paketstationen eine sinnvolle logistische Maßnahme darstellen, um den KEP-Verkehr zu reduzieren. Durch die Paketstationen nimmt die Anzahl der durchzuführenden Touren, die Länge der Touren und damit die Gesamtleistung ab. Die positiven verkehrlichen Effekte haben auch direkte Auswirkung auf die ökologischen und ökonomischen Effekte. Durch die Einsparung an Laufleistung sind Einsparungen von Treibhausgasemissionen zu verzeichnen. Aber auch die Transportkosten können umfassend für den KEP-Dienstleister reduziert werden.

Daher ist zu empfehlen, das Konzept der anbieteroffenen Paketstationen auch seitens der Verkehrspolitik zu fördern. Bislang wurde dieses Konzept von den Logistikdienstleistern selbst implementiert. Bzgl. der Flächen für diese Stationen waren sie jedoch auch auf die Mitwirkung der öffentlichen Hand oder privatwirtschaftlichen Eigentümern von Flächen stark abhängig. Im Prinzip konnten bislang die Paketstationen bereits auf öffentlichen (z.B. an ÖPNV-Stationen) und privatwirtschaftlichen Flächen (u.a. vor Supermärkten, Tankstellen) implementiert werden. Daher ist bereits jetzt eine Teilnahmebereitschaft auch seitens der Privatwirtschaft erkennbar.

Um diesem Konzept noch mehr Tragweite zu geben, ist jedoch zu empfehlen, diese Paketstationen verpflichtend bei der Immobilienentwicklung berücksichtigen zu müssen. Dies könnte den Zweck Gewerbe, aber auch Wohnen betreffen. Dazu müsste Baugesetzbuch geändert werden.

Ferner wäre es sinnvoll, den Zugang zu den Paketstationen anbieteroffen zu gestalten. Bislang wurden diese Konzepte nur von einzelnen KEP-Dienstleistern umgesetzt. Zu empfehlen wäre hierbei aber, dass ein Netz von anbieteroffenen Paketstationen aufgebaut wird, damit alle KEP-Dienstleister Zugang dazu haben. Damit könnte eine Reduzierung der KEP-Verkehre nach Anzahl der Fahrzeuge, aber auch nach Laufleistung und resultierend daraus eine Minderung der Treibhausgasemissionen erzielt werden.

3.6 Implementierung der quantifizierten Wirkungszusammenhänge in einem Berechnungstool zur Bilanzierung der verkehrlichen Effekte des physischen Einkaufsverkehrs im Vergleich zum KEP-Verkehr

Im folgenden Abschnitt wird ein Berechnungsinstrument präsentiert, das zur Bilanzierung der verkehrlichen Effekte des physischen Einkaufsverkehrs im Vergleich zum KEP-Verkehr dient. Mittels dieses entwickelten Instruments wurden Hochrechnungen für Deutschland durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden die im vorliegenden Projekt erhobenen Primärdaten (siehe Kapitel 3.4.1) zur Parametrisierung sowie die Erkenntnisse aus den Fallstudien zur Quantifizierung der urbanen Lieferverkehre (siehe Kapitel 3.5) herangezogen.

3.6.1 Beschreibung des entwickelten Berechnungstools

Zunächst wird das Vorgehen zu Berechnung der Fahrleistung insgesamt für Deutschland im **physischen Einkaufsverkehr** aufgezeigt.

Dazu wird zunächst die Bevölkerung B , in diesem Fall die Bevölkerung zwischen 18 bis 69 Jahren, die bereits auch im Rahmen unserer Primärdatenerhebung die Untersuchungsgruppe darstellten, differenziert nach der Ortsgröße des Wohnorts der Bevölkerung. Der jeweiligen Anteile von B je Ortsgröße α_S wurde bereits im Vorfeld festgelegt. Somit kann die absolute Verteilung der Bevölkerung differenziert nach den Ortsgrößen bestimmt werden.

$$B_i = B \alpha_S$$

In Kapitel 3.4.2 wurde bereits eine Untersuchung der persönlichen Einkaufswege vorgenommen, auf die in diesem Kontext Bezug genommen wird. Zunächst wurden die Güter in vier übergeordnete Gruppen nach ihrem zeitlichen Bedarf (kurz-, mittel- und langfristigen Bedarf) zusammengefasst. In diesem Kontext wurde zunächst die Häufigkeit der Privateinkäufe E je Gütergruppe differenziert nach den drei Ortsgrößen sowie der Anteil der Häufigkeit α_f je Gütergruppe und Ortsgröße.

Daraus wird nun die absolute Häufigkeit für das betrachtete Jahr berechnet.

$$f_p = E \alpha_f B_i$$

Basierend darauf wird die geleistete Fahrleistung bzw. Verkehrsleistung im Einkaufsverkehr vl_E für Deutschland bestimmt.

Zunächst liegt die einfache Entfernung w_e in Kilometern je Gütergruppe, Ortsgröße und Verkehrsmittel vor. Diese wird jeweils als 25. Perzentil, Median und 75. Perzentil aufgezeigt. Danach berechnen wir daraus den Hin- und Rückweg $w_g = w_e 2$.

$$vl_E = w_g \sum f_p$$

Als Nächstes erfolgt die Bilanzierung der verkehrlichen Effekte der **Online-Bestellungen im B2C-Segment**. Zunächst wird der Anteil der Bevölkerung auf Basis der Auswertungen der Primärdatenerhebung ausgeschlossen, der keine Interneteinkäufe tätigt. Relevant sind hierbei nur die Online-Einkäufer B_{B2C} .

$$B_{B2C} = B_i \alpha_{B2C}$$

Auf der Basis wird die genannte Anzahl der Interneteinkäufe innerhalb der letzten drei Monate als 25. Perzentil, Median und 75. Perzentil aufgezeigt und danach auf ein Jahr hochgerechnet. Daraus ergibt sich die Anzahl der Interneteinkäufe pro Person innerhalb eines Jahres differenziert nach den drei Ortsgrößen I_S .

Um die Interneteinkäufe insgesamt in Deutschland I_D zu kalkulieren, wird die Anzahl der Online-Einkäufer mit den Interneteinkäufen pro Person und Jahr multipliziert.

$$I_D = B_{B2C} I_S$$

Weiterführend müssen die Interneteinkäufe danach unterscheiden werden, wo sie als Sendungen zugestellt werden sollen – dem gewählten Zustellort z_i . In diesem Kontext sind die Anteile der gewählten Zustellorte an den Gesamtnennungen α_z von Interesse.

Damit kann die Anzahl der Sendungen bzw. Lieferungen zu den gewählten Zustellorten der PrivatkundInnen S_z bestimmt werden.

$$S_z = I_D \alpha_z$$

Weiterführend werden die alternativen Zustellorte bestimmt, falls eine Sendung nicht am Wohnstandort zugestellt werden konnte bzw. die Annahme des Pakets verpasst wurde. Hierbei müssen die Anteile der gewählten alternativen Zustellorte an den Gesamtnennungen α_{az} bekannt sein. Auf der Basis erfolgt die Berechnung der verpassten absoluten Sendungen S_p , die zu einem alternativen Zustellort geliefert werden.

$$S_{az} = S_p \alpha_{az}$$

Nun soll die Fahrleistung der Privatpersonen zu den Zustellorten in Deutschland berechnet werden. Die Entfernung liegt zunächst in einfacher Entfernung zum ausgewählten Zustellort differenziert nach den Ortsgrößen w_{ez} vor. Im Folgenden wird nun die Gesamtfahrleistung der Privatpersonen zu den Zustellorten in Deutschland berechnet.

$$vl_z = 2w_{ez} (S_z + S_{az})$$

Die Fahrleistung wird differenziert nach dem gewählten Verkehrsmittel vl_{VMZ} ausgewiesen. Hierzu müssen zunächst die Anteile der Verkehrsmittel je Zustellort und je Ortsgröße α_{VMZ} bekannt sein. Basierend darauf wird die Gesamtfahrleistung differenziert nach Verkehrsmitteln berechnet.

$$vl_{VMZ} = vl_z \alpha_{VMZ}$$

Bei den Rücksendungen wird dasselbe Vorgehen zur Berechnung der verkehrlichen Effekte gewählt.

Als nächstes folgt die Berechnung der Fahrleistung insgesamt für den **Lieferverkehr** in Deutschland. Hierbei muss zunächst Erwähnung finden, dass die herangezogenen Werte zur Parametrisierung des Instruments aus Simulationen gewonnen wurden, bei denen der Untersuchungsraum Berlin war, also dementsprechend ein hochverdichteter Raum.

Zunächst werden zu diesem Zweck die Anteile der Sendungen, die Lieferverkehr generieren, zu den Zustellorten α_z , zu den alternativen Zustellorten α_{az} und zu den Abgabeorten α_R differenziert nach Zustell- bzw. Abgabeorte und nach 25. Perzentil, Median und 75. Perzentil, ausgewählt. Relevant zur Parametrisierung der Simulation ist hierbei das 75. Perzentil der Ortsgröße ≥ 100.000 EinwohnerInnen, da es auch die Rücksendungen enthält. Dementsprechend wird die Simulation mit den folgenden Werten parametrisiert: 60% der Sendungen sollen an die

Privatanschrift erfolgen, 23% zu den Postfilialen, 8% an die Paketshops und 9% an die Paketstationen zugestellt werden.

Weiterführend werden die Sendungen, die Lieferverkehr generieren, u.a. die Sendungen zu den Zustellorten S_z , zu den alternativen Zustellorten S_{az} und den Abgabeorten S_R ausgewählt und die Summe dieser ausgewählten Sendungen bzw. die Güternachfrage $GN = S_z + S_{az} + S_R$ differenziert nach 25. Perzentil, Median und 75. Perzentil gebildet.

Auf der Basis gelingt die Kalkulation der Güterverkehrsnachfrage bzw. der durchgeführten Touren insgesamt. Die Sendungen pro Tour s_T werden zu diesem Zweck aus den Simulationsergebnissen entnommen.

$$GVN = \frac{GN}{s_T}$$

Danach erfolgt die Berechnung der Laufleistung L insgesamt. Auch die Transportdistanz pro Tour d_T ist dabei ein Simulationsergebnis, das zu diesem Zweck herangezogen wird.

$$L = GVN d_T$$

Abschließend erfolgt die Bilanzierung der ökologischen Effekte des physischen Einkaufsverkehrs, der Online-Bestellungen des B2C-Segments und des Lieferverkehrs auf Basis der verkehrlichen Effekte.

Hierfür werden jeweils für den motorisierten Individualverkehr und den Lieferverkehr mittlere Energieverbrauchs- und Emissionsfaktoren pro Kilometer für ein ausgewähltes Bezugsjahr aus dem Modell TREMOD verwendet (siehe Kapitel 0). Diese beinhalten die THG-Emissionen inklusive der Vorkette und die direkten Abgasemissionen von NO_x und PM.

Im Ergebnis wurde ein Berechnungstool entwickelt, das die verkehrlichen und ökologischen Effekte des physischen Einkaufsverkehrs, der Online-Bestellungen des B2C-Segments und des Lieferverkehrs in Deutschland auf Basis der erhobenen Primärdaten (siehe Kapitel 3.4.1) bilanziert.

3.6.2 Ergebnisanalyse

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der Hochrechnungen mittels des entwickelten Instruments für die Bevölkerung in Deutschland 2018 aufgezeigt. Hierbei wird vorrangig auf die verkehrlichen und ökologischen Effekte des physischen Einkaufsverkehrs im Vergleich zum KEP-Verkehr eingegangen.

Um das Modell zu parametrisieren, wird vornehmlich auf die Ergebnisse der Primärdatenerhebung und die Simulationsergebnisse aus der mikroskopischen Güterverkehrssimulation zurückgegriffen.

Für diese Fragestellung wird eine Grundgesamtheit von 56.346.750 Privatpersonen in Deutschland, die zwischen 18 und 69 Jahre alt sind (Stand 2018), betrachtet. Davon leben 40,3% in ländlichen Gebieten und kleinen Städten mit bis zu 19.999 Einwohnern, 27,2% in mittelgroßen Städten mit einer Ortsgröße von 20.000 bis 99.999 Einwohner sowie 32,5% in Großstädten größer als 99.999 Einwohner.

In Tabelle 44 werden die Treibhausgasemissionen in CO_2 -Äquivalenten in Tonnen, die in Deutschland im Jahr 2018 durch den Pkw-Verkehr für Einkaufszwecke erzeugt wurde, aufgezeigt. In ländlichen Regionen entstehen in Summe annähernd 11 Mio. Tonnen, in mittelgroßen Städten 5,7 Mio. Tonnen und in Großstädten 4,7 Mio. Tonnen Treibhausgasemissionen - verursacht durch den motorisierten Einkaufsverkehr. Im direkten Vergleich wird deutlich, dass in Mittelstädten 48% und in Großstädten sogar 57% weniger Einkaufsverkehr mit den Pkw getätigt werden.

Sowohl in ländlichen Gebieten als auch in Mittel- und Großstädten werden für den täglichen Bedarf die meisten Einkaufsfahrten durchgeführt. Der tägliche Bedarf umfasst hierbei die Gütergruppen Lebensmittel, Drogerieartikel, Kosmetik und Parfüm, Medikamente sowie Arzneimittel. Für den mittelfristigen Bedarf der Kategorie 1 (u.a. Bekleidung, Schuhe und Accessoires, Unterhaltungselektronik/Elektronikartikel, Telekommunikation, Handy und Zubehör, Haushaltswaren, Spielwaren) werden in ländlichen Gebieten annähernd 21% der Treibhausgasemissionen erzeugt. In Mittelstädten liegt der Anteil bei 18% und in Großstädten bei 16%. Die erzeugten Treibhausgasemissionen für den Einkaufsverkehr des mittelfristigen Bedarfs der Kategorie 2 (u.a. Heimwerken und Garten, Auto und Motorrad/Zubehör) haben bereits einen deutlich geringeren Anteil. Für den langfristigen Bedarf (u.a. Möbel, Haushaltsgeräte) entstehen die wenigstens Treibhausgasemissionen durch den motorisierten Einkaufsverkehr.

Tabelle 44: Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs in Deutschland (2018)

Treibhausgasemissionen in CO ₂ -Äquivalenten des motorisierten Einkaufsverkehrs in Deutschland			
Ortsgröße des Wohnortes	Gütergruppen	Median (in Tonnen)	%
<20.000	Täglicher Bedarf	6.608.107,35	60,56%
	Mittelfristiger Bedarf Kat. 1	2.290.403,37	20,99%
	Mittelfristiger Bedarf Kat. 2	1.188.660,62	10,89%
	Langfristiger Bedarf	824.545,21	7,56%
20.000 – 99.999	Täglicher Bedarf	3.855.980,12	68,05%
	Mittelfristiger Bedarf Kat. 1	1.011.560,57	17,85%
	Mittelfristiger Bedarf Kat. 2	409.063,68	7,22%
	Langfristiger Bedarf	390.037,46	6,88%
≥100.000	Täglicher Bedarf	3.448.676,83	73,55%
	Mittelfristiger Bedarf Kat. 1	743.954,84	15,87%
	Mittelfristiger Bedarf Kat. 2	219.757,48	4,69%
	Langfristiger Bedarf	276.591,31	5,90%

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der eigenen Primärdatenerhebung im Rahmen dieser Studie.

In Bezug auf das Internetbestellverhalten wird nun im Folgenden näher auf die Personen eingegangen, die Online-Einkäufe tätigen. Der Anteil der Online-Shopper liegt bei 91% der betrachteten Grundgesamtheit. Die Tabelle 45 zeigt die absolute Anzahl an Online-Einkäufern differenziert nach den drei Ortsgrößen.

Tabelle 45: Anzahl an Online-Einkäufern differenziert nach Ortsgrößen in Deutschland (2018)

Untersuchungsgruppe	in Prozent	Anzahl der Einwohner differenziert nach Ortsgrößen (absolut)		
Ortsgröße		bis 19.999 Einwohner	20.000-99.999 Einwohner	100.000+ Einwohner

Untersuchungs- gruppe	in Prozent	Anzahl der Einwohner differenziert nach Ortsgrößen (absolut)		
Online-Shopper	91,00%	20.664.044	13.946.948	16.664.551
Keine Online-Shopper	9,00%	2.043.697	1.379.368	1.648.142

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der eigenen Primärdatenerhebung im Rahmen dieser Studie.

Nachdem die Anzahl der Online-Einkäufer in Deutschland für 2018 bestimmt wurde, stellt sich die Frage nach der Anzahl der Interneteinkäufe insgesamt in Deutschland. Die Interneteinkäufe sollen in diesem Fall als Sendungen betrachtet werden. In Tabelle 46 wird die Anzahl der Sendungen insgesamt differenziert nach den Ortsgrößen sowie das 25% Perzentil, der Median und das 75% Perzentil aufgezeigt. In Deutschland (2018) werden insgesamt 1.458.173.878 Sendungen von Privathaushalten nachgefragt, die von Lieferverkehren – vornehmlich KEP-Dienstleister – zugestellt werden sollen. Von diesen Interneteinkäufen insgesamt werden annähernd 40% in ländlichen Regionen, 30,6% in Mittelstädten und 29,7% in Großstädten getätigt (diese Aussagen beziehen sich jeweils auf den Median).

Tabelle 46: Anzahl der Sendungen differenziert nach Ortsgrößen in Deutschland (2018)

Ortsgröße	Anzahl der Interneteinkäufe (Sendungen) insgesamt in Deutschland (2018)		
	Perzentil 25	Median	Perzentil 75
bis 19.999 Einwohner	247.968.523,53	578.593.221,57	909.217.919,61
20.000-99.999 Einwohner	278.938.951,20	446.302.321,92	781.029.063,36
100.000+ Einwohner	199.974.615,75	433.278.334,13	799.898.463,00

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der eigenen Primärdatenerhebung im Rahmen dieser Studie.

Als nächstes ist die erzeugte Fahrleistung von Interesse, die durch den Privatverkehr zu Zustellorten der Sendungen entsteht. Falls sich also die Privatpersonen nicht nach Hause beliefern lassen, sondern die Sendungen an den Paketshop oder die Paketstation geliefert werden sollen, oder die Person für die Zustellung nicht zuhause ist, und als alternativer Zustellort die Sendung an der Postfiliale oder Paketshop vom Zusteller abgegeben wird, wird Verkehr seitens der Privathaushalte erzeugt, um die Sendung vom Zustellort jeweils abzuholen. Zur Abschätzung der Fahrleistung wird sowohl der Hin- und Rückweg berücksichtigt. Tabelle 47 zeigt die geleistete Fahrleistung durch Privathaushalte zu den Zustellorten Postfiliale, Paketshop und Paketstation differenziert nach Ortsgrößen insgesamt für Deutschland im Jahr 2018 auf.

Die Hochrechnung für ganz Deutschland ergibt, dass insgesamt 3.156.429.363 Kilometer zu diesem Zweck von Privatpersonen in Deutschland 2018 zurückgelegt wurden. Hiervon finden die meisten dieser Verkehre mit annähernd 56% in Kleinstädten und ländlichen Regionen statt. Der Anteil an der Gesamtfahrleistung liegt in Mittelstädten bei 23% und in Großstädten bei 21,3%.

In ländlichen Gebieten werden 86,3% der Fahrleistung durch den Personenverkehr für den Hin- und Rückweg zur Postfiliale getätigt. Dagegen liegt der Anteil für diesen Wegezweck nur bei 74,7% in Mittelstädten und bei 49,3% in Großstädten.

Die getätigte Fahrleistung zu den Paketshops fällt im Vergleich zu den Postfilialen und Paketstationen am geringsten aus. In ländlichen Regionen entsteht hierbei nur 5,6% der Fahrleistung,

Mittelstädten 10,9% und in Großstädten 22,4%. Der höhere Anteil in Großstädten lässt sich dadurch erklären, dass es dort eine höhere Angebotsdichte an Paketshops vorzufinden ist.

Der Anteil der Fahrleistung zu den Paketstationen in ländlichen Gebieten liegt bei 8,2%. In Mittelstädten werden 14,4% der Fahrleistung zu Paketstationen generiert und in Großstädten sogar über 28,3%.

Wird die Fahrleistung insgesamt betrachtet, wird dieser Verkehr vornehmlich mit 75,7% zu Postfilialen und nur mit 10,4% zu Paketshops und 13,9% zu Paketstationen erzeugt.

Tabelle 47: Fahrleistung insgesamt zu Zustellorten differenziert nach Ortsgrößen in Deutschland (2018)

Ortsgröße	Fahrleistung insgesamt zu Zustellorten (inkl. Hin- und Rückweg) in Deutschland (2018)		
	Postfiliale	Paketshop	Paketstation
bis 19.999 Einwohner	1.520.135.229	97.871.199	143.645.887
20.000-99.999 Einwohner	540.226.667	79.160.317	104.068.839
100.000+ Einwohner	330.856.997	150.348.112	190.116.116

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der eigenen Primärdatenerhebung im Rahmen dieser Studie.

2018 wurden von Privatpersonen insgesamt 789.194.078 km getätigt, um Rücksendungen bei Abgabeorten (u.a. Postfilialen, Paketshops, Paketstationen) in Auftrag zu geben. Davon werden mit 60,3% die meisten Kilometer zur Postfiliale zurückgelegt, gefolgt von 31,2% zum Paketshop und 8,5% zur Paketstation.

Annähernd 40% der Fahrleistung zu diesem Zweck wird in ländlichen Gebieten generiert. In Großstädten wird ein Anteil von 32,6% eingenommen, in Mittelstädten dagegen nur 27,5%.

In ländlichen Gebieten liegt der Anteil der Fahrleistung bei 67,2%, zu den Paketshops bei 28% und zur Paketstation nur bei 4,8%. In Mittelstädten ist der Anteil an der Fahrleistung zur Postfiliale bereits deutlich niedriger (57,9%) und die Anteile zu den Paketshops (31,4%) und Paketstationen (11,8%) um einiges höher. In Großstädten liegt der Anteil der Fahrleistung zu Postfilialen bei 54,7%, gefolgt von 34,9% zu Paketshops und von 10,4% zu Paketstationen. (siehe Tabelle 48)

Tabelle 48: Fahrleistung insgesamt zu Abgabeorten differenziert nach Ortsgrößen in Deutschland (2018)

Ortsgröße	Fahrleistung insgesamt zu Abgabeorten (inkl. Hin- und Rückweg) in Deutschland (2018)		
	Postfiliale	Paketshop	Paketstation
bis 19.999 Einwohner	212.003.623	88.334.843	15.143.116
20.000-99.999 Einwohner	123.264.451	68.007.973	25.502.990
100.000+ Einwohner	140.588.215	89.685.585	26.663.282

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der eigenen Primärdatenerhebung im Rahmen dieser Studie.

Tabelle 49 zeigt die Sendungen in Prozent differenziert nach gewähltem Zustell- und Abgabeort, die Lieferverkehre verursachen. Sowohl in ländlichen Regionen als auch in Mittel- und Großstädten lassen sich mehr als zwei Drittel der Online-Einkäufer Ihre Sendungen direkt zu Ihrer Privatanschrift beliefern. In ländlichen Gebieten ist der Anteil am höchsten und liegt bei annähernd 68%. Es werden aber auch über ein Fünftel der Sendungen an die Postfilialen zugestellt. Paketshops und Paketstationen haben für die Online-Einkäufer immer noch einen relativ geringen Stellenwert. Nur 6 bis 7 % der Sendungen werden an Paketshops geliefert. Die Nutzung der Paketstationen ist in Mittel- und Großstädten ausgeprägter als in ländlichen Regionen. Dies liegt aber auch daran, dass die Verfügbarkeit der Paketstationen in ländlichen Regionen geringer ausfällt.

Tabelle 49: Sendungen differenziert nach gewählten Zustell- und Abgabeort differenziert nach Ortsgrößen in Deutschland (2018)

Ortsgröße	Anzahl der Sendungen differenziert nach Zustell- und Abgabeort, die Lieferverkehr verursachen (in %)			
	Private Anschrift	Postfiliale	Paketshop	Paketstation
bis 19.999 Einwohner	67,96%	21,33%	6,18%	4,53%
20.000-99.999 Einwohner	62,75%	22,20%	6,51%	8,55%
100.000+ Einwohner	63,13%	20,90%	6,53%	9,44%

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der eigenen Primärdatenerhebung im Rahmen dieser Studie.

Durch die Nachfrage an Sendungen durch die Online-Einkäufer werden Touren im Lieferverkehr generiert. Im Median entstehen insgesamt 15.936.684 Touren im KEP-Markt in Deutschland (2018). 40% der Touren werden vornehmlich in ländlichen Gebieten durchgeführt. Über 31% der Touren werden in Mittelstädten und über 29% in Großstädten von den KEP-Dienstleistern getätigt. (siehe Tabelle 50)

Tabelle 50: Anzahl der Touren des Lieferverkehrs differenziert nach Ortsgrößen in Deutschland (2018)

Ortsgröße	Anzahl der Touren des Lieferverkehrs insgesamt in Deutschland (2018)		
	Perzentil 25	Median	Perzentil 75
bis 19.999 Einwohner	2.737.474,35	6.387.440,16	10.693.811,19
20.000-99.999 Einwohner	3.066.773,84	4.906.838,15	9.036.868,29
100.000+ Einwohner	2.142.648,62	4.642.405,34	9.108.160,64

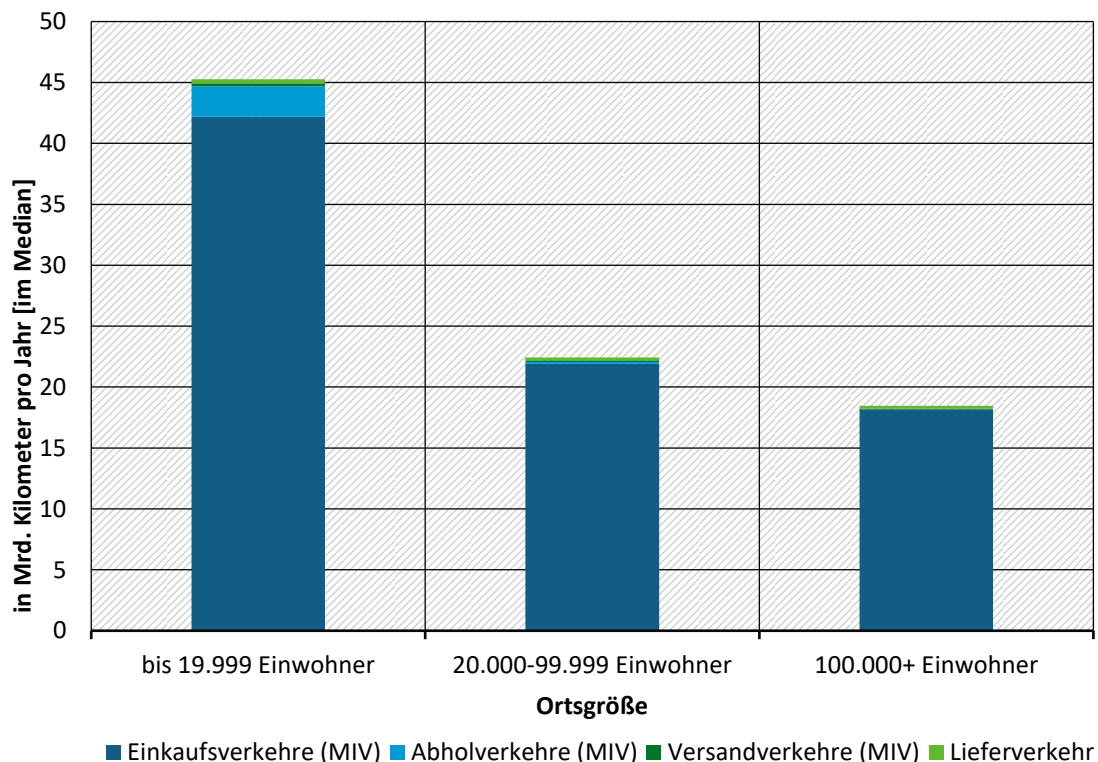
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der eigenen Primärdatenerhebung im Rahmen dieser Studie.

In Abbildung 86 wird die Fahrleistung in Mrd. Kilometern des motorisierten Individualverkehrs für Einkäufe sowie zum Abholen und Versenden von im Internet gekauften Waren im Vergleich zur Laufleistung des Lieferverkehrs differenziert nach der Ortsgröße in Deutschland 2018 aufgezeigt. Zunächst wird deutlich, dass die höchste Fahrleistung insgesamt in den Kleinstädten bzw. im ländlichen Raum zu verzeichnen ist. In Mittelstädten wird bis zu 50% weniger Fahrleistung generiert, und in Großstädten sogar bis zu 60% weniger.

Den höchsten Anteil an der Gesamtfahrleistung nehmen die motorisierten Einkaufsverkehre sowohl in Kleinstädten mit über 93% als auch in Mittel- und Großstädten mit jeweils ca. 98% ein. Die Abhol- und Versandverkehre, die mit dem Pkw durchgeführt werden, liegen über alle Ortsgrößen hinweg deutlich unter 1%. Eine Ausnahme ist bei den Abholverkehren in ländlichen Regionen festzustellen, in denen dieser über 5,5% liegt. Der Lieferverkehr nimmt einen Anteil von 0,7% in Kleinstädten, 1,1% in Mittelstädten und 1,3% in Großstädten ein.

Hierbei ist festzustellen, dass Lieferverkehre in Deutschland immer noch einen marginalen Anteil an der Gesamtfahrleistung einnehmen – im Gegensatz zum motorisierten Individualverkehr für Einkäufe.

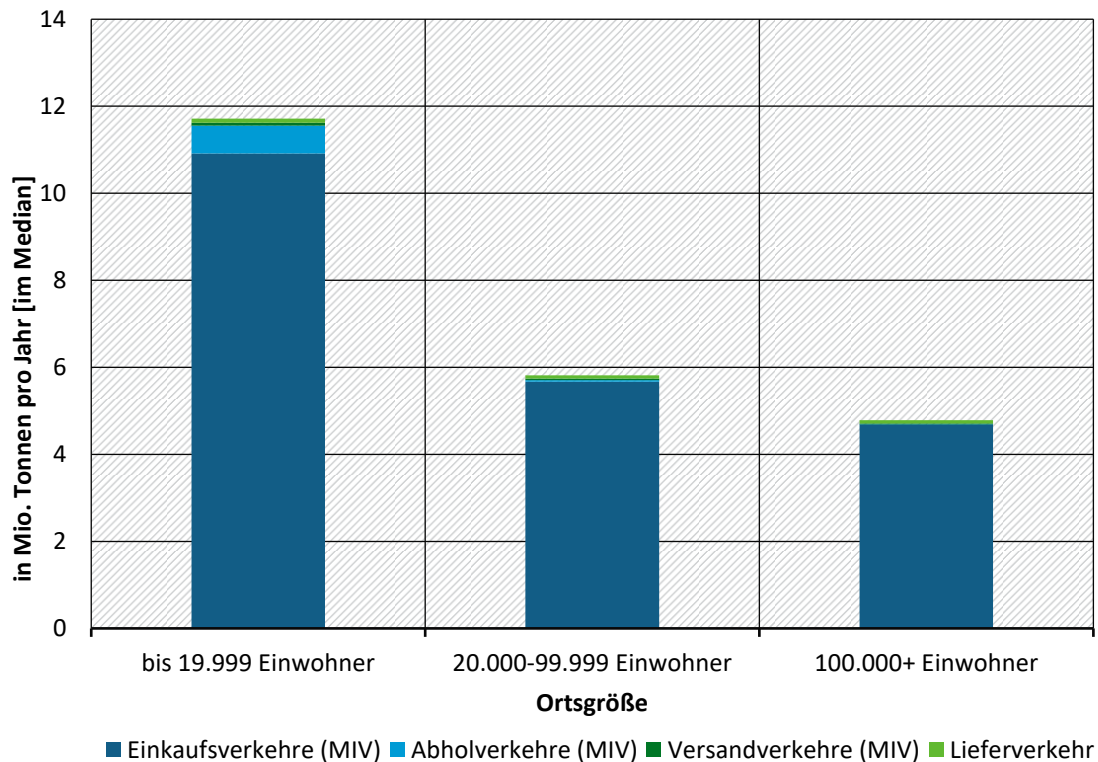
Abbildung 86: Fahrleistung des Einkaufs-, Abhol- und Versandverkehrs des MIV im Vergleich zur Laufleistung des Lieferverkehrs differenziert nach Ortsgröße in Deutschland (2018)



Quelle: Eigene Darstellung, DLR-VF

Da die Treibhausgasemissionen direkt von der erzeugten Fahrleistung abhängen, zeigt sich in Abbildung 87 ein ähnliches Bild ab. Die meisten Treibhausgasemissionen insgesamt entstehen in Kleinstädten bzw. ländlichen Gebieten. Der motorisierte Individualverkehr zu Einkaufszwecken nimmt hierbei in allen drei Ortsgrößen den größten Anteil ein. Abhol- und Versandverkehre (MIV) bleiben deutlich unter 1% mit Ausnahme der Abholverkehre in ländlichen Regionen mit 5,5%. In Großstädten entstehen mit 0,06% kaum Abholverkehre. Lieferverkehre verursachen 0,85% der Treibhausgasemissionen in Kleinstädten, 1,3% in Mittelstädten und 1,5% in Großstädten.

Abbildung 87: Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalenten des Einkaufs-, Abhol- und Versandverkehrs des MIV im Vergleich zur Laufleistung des Lieferverkehrs differenziert nach Ortsgröße in Deutschland (2018)



Quelle: Eigene Darstellung, DLR-VF

Nach der Auswertung wird deutlich, dass der Einkaufsverkehr mittels Pkw im Vergleich zum Lieferverkehr einen massiven Anteil an den Treibhausgasemissionen sowohl in ländlichen Regionen, als auch in Mittel- und Großstädten verursacht. Wobei in Mittelstädten die Treibhausgasemissionen um 50% niedriger und in Großstädten sogar um 60% niedriger im Vergleich zum ländlichen Raum sind. Dies liegt wohl daran, dass in Mittel- und Großstädten entweder die Wege zur nächsten Einkaufsgelegenheit kürzer sind und damit die Nutzung von Fahrrad und zu Fuß attraktiver wird oder das ÖPNV-System besser ausgebaut ist.

Im Folgenden werden die entstehenden Treibhausgasemissionen je Fahrt bzw. Tour im physischen Einkaufsverkehr im Vergleich zu Fahrten zu Abhol- und Rückgabeorte sowie für Liefertouren differenziert nach den drei Ortsgrößen im Median aufgezeigt. Im ländlichen Raum bzw. in der Kleinstadt werden je Einkaufsfahrt mittels eines Pkw ca. 6,47 kg CO₂-Äquivalente (Median) verbraucht. In einer mittelgroßen Stadt sind es dagegen nur 3,88 kg und in einer Großstadt mit 2,72 kg CO₂-Äquivalente noch weniger im Vergleich zum ländlichen Raum. Für eine Fahrt zum Abholort eines Pakets mittels eines Pkws werden im Median in der Kleinstadt 1,03 kg, dagegen in einer mittelgroßen Stadt 0,52 kg und in einer Großstadt 0,91 kg CO₂-Äquivalente ausgestoßen. Auf einer Fahrt mit dem Pkw zum Rücksendeort entstehen 1,04 kg CO₂-Äquivalente. Dies gilt sowohl für Klein-, Mittel- und Großstädte. Im Vergleich dazu wird auf einer typischen Tour auf 50,93 km im Lieferverkehr sowohl in Klein-, Mittel- und Großstädten 15,57 kg CO₂-Äquivalente mittels eines Lkw 3,5t zGG ausgestoßen. (siehe Tabelle 51)

Tabelle 51: THG-Emissionen pro Fahrt bzw. Tour in kg CO₂-Äqu/Tour (inkl. Vorkette) (Median)

Ortsgröße	THG-Emissionen pro Fahrt bzw. Tour in kg CO ₂ -Äqu/Tour (inkl. Vorkette)			
	Fahrt für persönlichen Einkauf mittels Pkw	Fahrt zum Abholort mittels Pkw	Fahrt zum Rückgabeort mittels Pkw	Tour mittels Lkw 3,5t zGG
bis 19.999 Einwohner	6,47	1,03	1,04	15,57
20.000-99.999 Einwohner	3,88	0,52	1,04	15,57
100.000+ Einwohner	2,72	0,91	1,04	15,57

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der eigenen Primärdatenerhebung im Rahmen dieser Studie.

Die Lieferverkehre, vornehmlich hier die KEP-Dienstleister, die Privathaushalte beliefern, nehmen einen sehr geringen Anteil als Verursacher der Treibhausgasemissionen ein. Im ländlichen Raum werden immer noch etwas weniger Lieferverkehre als in den Mittel- und Großstädten nachgefragt.

3.7 Synthese und Handlungsempfehlungen

In Modul B1 wurden die verkehrlichen und ökologischen Wirkungen des Online-Handels gegenüber dem stationären Handel untersucht. Hierfür wurden das Substitutionspotential von persönlichen Einkaufswegen durch Online-Handel, die verkehrlichen Wirkungen in Logistik und Zustellverkehren sowie die direkten ökologischen Wirkungen der Digitalisierung betrachtet. Die zentralen Ergebnisse dieser Analysen werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt, bevor darauf aufbauend Handlungsempfehlungen entwickelt werden.

Alle im Personenverkehr durchgeführten Analysen deuten darauf hin, dass es in Deutschland (noch) nicht zu einer Substitution von persönlichen Einkaufswegen durch den zunehmenden Online-Handel gekommen ist. Dies geht zum einen aus den Untersuchungen auf Basis der großen nationalen Verkehrserhebungen in Deutschland, den USA und England hervor: Während in England der Einkauf im Internet in allen Altersgruppen deutlich stärker ausgeprägt ist als in Deutschland und häufige (mindestens einmal pro Woche) NutzerInnen des Online-Handels in England auch weniger persönliche Einkaufswege zurücklegen als Personen, die selten oder nie im Internet einkaufen, konnten für Deutschland keine Indizien für einen Substitutionseffekt festgestellt werden.

Während es sich demzufolge aufgrund der nationalen Verkehrserhebungen in Großbritannien und den USA abzeichnet, dass eine häufige Nutzung von Online-Handel negativ mit der Anzahl persönlicher Einkaufswege einhergeht, wurde ein solcher Zusammenhang in Deutschland – als ein Indiz für einen sog. Substitutionseffekt – bisher noch nicht festgestellt. Die Nutzungshäufigkeit des Online-Handels scheint in Deutschland daher eher von soziodemographischen Variablen wie dem Bildungsabschluss und dem Einkommen bestimmt zu werden, als von der Aussicht, durch Online-Handel den persönlichen Vor-Ort Einkauf und die verbundenen Einkaufswege einzusparen.

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten multivariaten Analysen auf Basis einer Befragung von 1.011 repräsentativ ausgesuchten Personen stützen diese Hypothese. Hierbei wurden ordinale und multinomiale Regressionsanalysen sowie Clusterverfahren und Regressionsbäume berechnet, um zu untersuchen, inwieweit die Einkäufe im Internet zu einer Substitution von persönlichen Einkaufswegen führen. Allerdings konnte keines der Modelle einen signifikanten Einfluss der Häufigkeit von Einkäufen im Internet auf die Anzahl persönlicher Einkaufswege nachweisen. Somit bleibt festzuhalten, dass auf Basis aller in diesem Projekt vorgenommenen

Analysen noch kein Substitutionseffekt von persönlichen Einkaufswegen durch den zunehmenden Online-Handel in Deutschland festgestellt werden kann.

Zugleich fällt aber auf, dass der Online-Handel in Deutschland im internationalen Vergleich verhältnismäßig wenig genutzt wird. Bei einer Ausweitung des Online-Handels würde sich grundsätzlich ein großes Substitutionspotential ergeben. Das größte Substitutionspotential besteht bei persönlichen Einkaufswegen für Güter des täglichen Bedarfs, wie z.B. Lebensmittel oder Droge-rieartikel. Hier könnten pro Person pro Jahr 146 km an persönlichen Einkaufswegen in Orten mit weniger als 20.000 EinwohnerInnen eingespart werden, wenn alle Güter für den täglichen Bedarf im Internet erworben werden würden. Für Orte mit zwischen 20.000-99.999 bzw. mindestens 100.000 EinwohnerInnen können damit 119 km bzw. 92 km pro Person und Jahr vermieden werden. Die große verkehrliche Wirkung, die diese Substitution entfalten könnte, wird auch dadurch verdeutlicht, dass für den Erwerb aller Gütergruppen die Mehrheit der Einkaufswege mit dem Auto zurückgelegt wird. Dementsprechend könnte es in Zukunft grundsätzlich zu einer starken Substitution von persönlichen Einkaufswegen kommen, wenn die Nutzung des Online-Handels in Deutschland weiter zunimmt.

Dabei muss natürlich berücksichtigt werden, dass sich diese Einschätzung des Einsparpotentials ausschließlich auf die verkehrlichen Effekte bei den persönlichen Einkaufswegen bezieht und somit nicht zwangsweise gesamtgesellschaftlich erstrebenswert sein muss. Wirtschaftliche und soziale Effekte, die sich z.B. durch eine Verlagerung von persönlichen Einkäufen in inhabergeführten Geschäften auf Online-Käufe bei Großunternehmen ergeben könnten, wurden außer Acht gelassen. Außerdem gelten insbesondere inhabergeführte Geschäfte in Innenstädte auch als Orte der sozialen Begegnung mit einem gesellschaftlichen Wert, der nur schwer zu quantifizieren und mit ökologischen und ökonomischen Indikatoren zu vergleichen ist. Dementsprechend wäre es wünschenswert, wenn zukünftige Studien konkretisierten könnten, unter welchen Bedingungen die Einsparung von persönlichen Einkaufswegen durch zunehmenden Online-Handel auch gesamtgesellschaftlich sinnvoll sind.

Die empirische Analyse zeigt weiterhin, dass Instant-, Express- und Same-Day-Versand bislang noch kaum in Anspruch genommen werden. Dies liegt zum einen daran, dass solche Angebote nur in den Großstädten und Ballungszentren angeboten werden. Beispielsweise der Premium-Versand, nimmt hier bereits einen Anteil von 19% ein. Die meisten nehmen jedoch immer noch den Standard-Versand in Anspruch. Hierbei ist ein hohes Substitutionspotential in Richtung Same-Day-, Instant- sowie Express-Delivery abzusehen, was jetzt noch nicht wahrgenommen wird.

Die meisten Privatpersonen (80,3%) lassen sich ihre Pakete nach Hause zustellen, was zu häufigen Stopps auf einer Tour führt. Um Privatpersonen dazu zu motivieren, alternative Zustellorte, wie z.B. Paketstationen und Paketshops, zu nutzen und die Stopps, aber auch den Lieferverkehr damit zu reduzieren, ist den KEP-Dienstleistungsunternehmen zu empfehlen, dass sie die Zustellung zum Wohnort teurer gestalten. Bislang können sich nur knapp über 30% der Privatpersonen vorstellen, bis zu 5 Euro pro Paket extra für die Zustellung zum Privatstandort zu bezahlen.

Erfolglose Zustellversuche verursachen mindestens noch einmal so viele Belastungen wie eine Neuzustellung. Es gilt, diese zu reduzieren. Dies kann durch Paketkästen oder die Annahme in Läden oder durch Hausmeister geschehen. Auch die Vereinbarung eines Zeitfensters mittels einer digitalen Anwendung erhöht die Zustellwahrscheinlichkeit. Bei sehr engen und sehr dynamisch gesetzten Zeitfenstern können die Touren der Zusteller jedoch nicht mehr effizient geplant werden, was wiederum zu ökologischen Mehrbelastungen führt und somit unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten nicht wünschenswert ist.

Für eine klimaneutrale Anlieferung und eine nachhaltige Verpackung sind auch heute bereits annähernd 50% der Befragten bereit, einen Zuschlag bis zu 5 Euro pro Paket zu bezahlen. Eine gebündelte Lieferung ist den Befragten nicht so wichtig, wobei hier zu erwähnen ist, dass bei Bündelung von Paketen Einsparungspotentiale an Lieferverkehren und damit an Emissionen zu erwarten sind.

Auf Basis der Erkenntnisse aus den Fallbeispielen zu Same-Day- und Instant-Delivery, private Lebensmittelbelieferung sowie Paketstationen können folgende **Handlungsempfehlungen** zur Entwicklung eines ökologisch nachhaltigeren Lieferverkehrs in Städten abgeleitet werden.

Die Gestaltung der Belieferungskonzepte für Same-Day- und Instant-Delivery sowie für die private Lebensmittelbelieferung liegt in der Hoheit der Logistikdienstleistungsunternehmen. Um nachhaltige Lieferverkehre in diesem Segment zu erzielen, sollten zunehmende Einfahrbeschränkungen für konventionell angetriebene Fahrzeuge eingeführt werden. Lastenfahrräder sind eine umfeldschonende Option zur Belieferung bestimmter Gebiete und zur Erbringung von Lieferungen im Premium-Bereich. Für den Transport von Gütern mit einem Gewicht von mehr als ca. 100 kg ist es notwendig, sog. Schwerlastenfahrräder zu entwickeln und deren Einsatz auf Fahrradwegen rechtlich zu ermöglichen. Um einer Lastenfahrradnutzung Vorschub zu leisten, ist es zunächst notwendig, eine Norm für Schwerlastenfahrräder zu entwickeln. Basierend darauf können Schwerlastenfahrräder entwickelt werden, die auf den bisherigen Fahrradwegen fahren können.

Der Einsatz von Lastenfahrrädern und von Kleinstlieferfahrzeugen auf der Letzten und Allerletzten Meile verlangt die Kombination mit einem Umschlagszentrum (Mikro-Depot), in denen ein größeres Fahrzeug die Waren an die kleineren Fahrzeuge übergibt. Angesichts der Konkurrenz um bestehende Gebäude und Flächen mit anderen Nutzungsmöglichkeiten, der geringen Margen in der Logistik und den momentan geringen Kostenvorteilen solcher Verteilkonzepte kann es Sinn ergeben, dass die öffentliche Hand gezielt Mikro-Hubs fördert oder unterstützt. Dazu kann sie ihre eigenen Flächen an Logistikunternehmen vergeben, Auflagen machen (ggf. Änderungen im Baugesetzbuch notwendig) oder mit ihren öffentlichen Unternehmen als Betreiber tätig werden. Die kommunalen Flächen sollten dauerhaft für anbieteroffene Mikro-Depot-Anlagen zur Verfügung gestellt und ggf. von kommunalen Unternehmen (z.B. ÖPNV-Betrieb) betrieben werden. Auch können diese Flächen nicht nur von KEP-Dienstleistungsunternehmen genutzt werden, sondern auch beispielsweise zur Lebensmittelbelieferung (u.a. Frischwaren).

Basierend auf den Simulationsergebnissen im Fallbeispiel **Paketstationen** wird ersichtlich, dass Paketstationen eine sinnvolle logistische Maßnahme darstellen, um den KEP-Verkehr zu reduzieren und damit Einsparungen von Treibhausgasemissionen zu erzielen. Aber auch die Transportkosten können nachhaltig für den KEP-Dienstleister reduziert werden.

Daher ist zu empfehlen, das Konzept der Paketstationen auch seitens der Verkehrspolitik zu fördern. Bislang wurde dieses Konzept von den Logistikdienstleistern selber implementiert. Bzgl. der Flächen für diese Stationen waren sie jedoch auch auf die Mitwirkung der öffentlichen Hand oder privatwirtschaftlichen Eigentümern von Flächen stark abhängig. Im Prinzip konnten bislang die Paketstationen bereits auf öffentlichen (z.B. an ÖPNV-Stationen) und privatwirtschaftlichen Flächen (u.a. vor Supermärkten, Tankstellen) implementiert werden. Daher ist bereits jetzt eine Teilnahmereitschaft auch seitens der Privatwirtschaft erkennbar.

Um diesem Konzept noch mehr Tragweite zu geben, ist jedoch zu empfehlen, diese Paketstationen verpflichtend bei der Immobilienentwicklung berücksichtigen zu müssen. Dies könnte den Zweck Gewerbe, aber auch Wohnen betreffen. Dazu müsste Baugesetzbuch geändert werden.

Ferner wäre es sinnvoll, den Zugang zu den Paketstationen anbieteroffen zu gestalten. Bislang wurden diese Konzepte nur von einzelnen KEP-Dienstleistern umgesetzt. Zu empfehlen wäre

hierbei aber, dass ein Netz von anbieteroffenen Paketstationen aufgebaut wird, damit alle KEP-Dienstleister Zugang dazu haben. Dann könnte das volle Potential im Hinblick auf die Reduzierung der KEP-Verkehre und damit der Negativauswirkungen auf die Umwelt ausgeschöpft werden.

Bei KEP-Verkehren in Städten ist das größte von der Öffentlichkeit wahrgenommene Problem das Parken in 2. Reihe, was zu Verkehrsflussstörungen, sog. „Mikrostaus“, führt. Daher ist zu empfehlen, dass Ladezonen für die Lieferfahrzeuge vornehmlich zur Zustellung der B2C-Pakete in Wohngebieten, aber auch der B2B-Pakete an Kleinst- und Kleinunternehmen aus den Dienstleistungs- und Einzelhandelssektoren eingerichtet werden. Zu diesem Zweck ist ein neues Verkehrsschild notwendig, das die Ladezone ausweist und ein absolutes Halteverbot für den motorisierten Individualverkehr verhängt.

Ungeachtet, ob Paketstationen von KEP-Diensten, der Immobilienwirtschaft oder dem Einzelhandel betrieben werden, sollten sie anbieteroffen bzw. kompatibel gestaltet werden.

Auf Basis dieser Ergebnisse wird der weitere Forschungsbedarf deutlich. So sollten sich zukünftige Forschungsarbeiten u.a. verstärkt folgenden Aspekten widmen:

- ▶ Inwieweit verändert die Möglichkeit des Online-Handels das Kaufverhalten und induziert vielleicht sogar Einkäufe, die ohne Online-Handel nie stattgefunden hätten?
- ▶ Unter welchen konkreten Bedingungen ist die Substitution von persönlichen Einkaufswegen durch zunehmenden Online-Handel auch gesamtgesellschaftlich (volkswirtschaftlich, sozial ökologisch etc.) als sinnvoll zu erachten?

4 Komponente B2: Ökologische Optimierungspotentiale der Produktions- und Beschaffungslogistik

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Literaturanalyse zu den aktuellen Trends in der Produktions- und Beschaffungslogistik herausgearbeitet. Für die Zukunft werden Entwicklungssprünge hinsichtlich neuer technologischer Entwicklungen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT), sowie der Digitalisierung und Automatisierung von Produktionsprozessen erwartet. Die Globalisierung der Wertschöpfung, stetig wachsende Bedeutung des E-Commerce, Bewältigung der Anforderungen an die Umwelt, und die Digitalisierung und Dezentralisierung von Produktions- und Arbeitsprozessen stellt die Logistikunternehmen vor große Herausforderungen.

Das Ziel wird sein ein Grundverständnis über die treibenden Trends in der Logistik und Industrie 4.0 zu vermitteln. Der Fokus liegt auf aktuellen Schlüsseltechnologien und deren Funktionsweisen in der industriellen Transformation. Ergänzend dazu werden im Kontext der Industrie 4.0 Konzepte wie das Internet der Dinge, Smart Factory und cyber-physische Systeme thematisiert, die Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0 sind.

4.1 Logistiksektor zwischen Globalisierung, Industrie 4.0 und Online-Handel

Schwemmer (2016, S. 39) und Zanker (2018, S. 14) sehen in den sonst gängigen und traditionellen Aufgaben der Logistik auch jene, die als „Koordinationslogistik“ bezeichneten Unternehmensaufgaben. In diesem Sinne werden die unternehmensinternen und -übergreifenden Planungs-, Steuerungs- und Dispositionsaufgaben, die im Zusammenhang mit den Bemühungen um das integrierte Management ganzer Wertschöpfungsketten zu erledigen sind, gemeint. Innerhalb der Wertschöpfungskette der Logistik ist außerdem von einer Reihe an anderen Aufgaben auszugehen, die in der folgenden Tabelle aufgezeigt werden.

Tabelle 52: Logistikbereiche und ihre Aufgaben im Überblick

Logistikbereich	Logistikaufgabe – Planung und Durchführung von Maßnahmen ...
Beschaffungslogistik	... zur optimalen Gestaltung der Beschaffung ab den Beschaffungsmärkten bis in die Lager bzw. bis in die Produktion
Lagerlogistik	... zur optimalen Standortwahl, zur Gestaltung optimaler Lagersysteme, einer optimalen Lagerorganisation und optimaler Lagertechnik
Produktionslogistik	... zur Gestaltung des Leistungsflusses von der Übernahme der bereitgestellten Produktionsfaktoren bis zur Abgabe der fertig gestellten Produkte an die Distribution
Transportlogistik	... zur Gestaltung des Transports bei der Wahl der Transportmittel, Transportwege, Beladung und Entladung
Ersatzteilllogistik	... zur Beschaffung und Gestaltung der Verfügbarkeit von Ersatzteilen

Logistikbereich	Logistikaufgabe – Planung und Durchführung von Maßnahmen ...
Instandhaltungslogistik	... zur Gewährleistung der ständigen Betriebsbereitschaft der Anlagen
Distributionslogistik	... zur Gestaltung des Leistungsprozesses der Übernahme der Produkte aus der Produktion und deren Weiterleitung und Übergabe an die KäuferInnen
Entsorgungslogistik	... zur kostengünstigen und umweltschonenden Entsorgung nicht mehr benötigter Stoffe und Substanzen
Informationslogistik	... zur Gestaltung eines reibungslosen Informationsflusses

Quelle: Eigene Darstellung nach Ehrmann (2012, S. 30 f.) und Zanker (2018, S. 14)

Die fortschreitende Digitalisierung sowie neue Technologien nehmen heutzutage eine bedeutende Rolle ein. Auch Pistorius (2020) geht davon aus, dass der Einsatz von IKT-Systemen innerhalb globaler Wertschöpfungsketten unabdingbar geworden ist. Die Digitalisierung der Produktion soll unter Einsatz IKT dazu beitragen, Wertschöpfungsprozesse in Zukunft flexibler und effizienter zu gestalten. Sie zielt auf eine Steigerung der Automatisierung und Vernetzung in der Produktion ab, um in Hinblick auf die zukünftige Standortsicherung und den Ausbau von Strukturen, wettbewerbsfähig zu bleiben. Eine horizontale und vertikale Vernetzung innerhalb des gesamten Logistiknetzwerkes und eine stärkere Vernetzung und Kooperation mit sämtlichen Akteuren entlang der Wertschöpfungskette führen zu einer Verlagerung geschäftlicher Aktivitäten von der realen in die virtuelle Umgebung. D.h. es kommt zu einer Entkoppelung des physischen Materialflusses innerhalb des Supply Chain Management (SCM), um Produktionsprozesse zu optimieren und Kosten zu sparen (ten Hompel und Henke 2014, S. 620). Sie sprechen in diesem Kontext von einer digitalen Transformation. Die hohe Vernetzung von inner- und überbetrieblichen Bereichen entlang der Supply Chain wird als die vierte industrielle Revolution (Industrie 4.0) zusammengefasst, so Pistorius (2020, S. 70).

4.2 Industrie 4.0

Dais (2014, S. 630), Windelband (2014), Hermann et al. (2016), Roth (2016) und Pistorius (2020) beschreiben die Industrie 4.0 (I4.0) als eine neue Stufe der Organisation und Steuerung betrieblicher Prozesse. Sie ist gekennzeichnet durch verschiedene Trends wie IKT, der Automation oder der zunehmenden Vernetzung über das Internet (**Internet der Dinge [IoT]**), die die Grenzen von physischer und digitaler Welt sukzessive auflöst, sowie **Cyber Physical Systems (CPS)**, die physische Prozesse innerhalb einer **Smart Factory** überwachen (Roy 2017, S. 1; Hermann et al. 216).

Der Trend der Digitalisierung, Automatisierung und Vernetzung im Kontext der Globalisierung gehen indes einher mit Wettbewerbsdruck und steigenden Anforderungen hinsichtlich Geschwindigkeit, Qualität, Flexibilität, Innovationskraft und des Nachfrageverhaltens der Kunden (Obermaier 2017; Pistorius 2020, S. 5). Die nach Bauernhansl (2014, S. 14) die Waren „zu jeder Zeit“, „schnellstmöglich“ und in immer „kürzeren Abständen“ geliefert haben wollen.

Um die Prozesse im Produktionsumfeld effizienter zu gestalten, ist nach Pistorius (2020) die Vernetzung von Maschinen, Fahrzeugen, Werkzeugen, Materialien, Werkstücken erforderlich. Auf diese Weise entstehen für Unternehmen neue Geschäftsmodelle. Dadurch kann jedes Objekt

im IoT durch eine eigene Internetadresse identifizierbar gemacht werden und über das Netzwerk autonom mit anderen Teilnehmern interagieren (Pistorius 2020, S. 9).

Nach Kleinemeier (2014, S. 572) sind hierfür Technologien wie die **RFID (Radiofrequenzidentifikation)** erforderlich. Die RFID ist eine Technik (Smart Labels oder Tags), bei der ein kontaktloser und funkgesteuerter Datenaustausch stattfindet (Wannenwetsch 2005, S. 331). Diese Technologie ermöglicht, dass Maschinen bzw. Roboter Arbeitsschritte mithilfe Cyber-Physischer Systeme (CPS) selbstständig ausführen können, so Pistorius (2020). Die einzelnen Arbeitsschritte, werden nach Pistorius (2020) über einen automatischen Soll-/Ist-Vergleich der rückgemeldeten Informationen kontrolliert. Außerdem ermöglichen RFID-Anwendungen nach Siepmann und Graef (2016), Lieberoth-Leden et al. (2017) und Kasper (2019, S. 25) die Lokalisierung, Steuerung, Autorisierung, Identifikation, Dokumentation oder Authentifikation (Tracking und Tracing) von Objekten. Das Tracking und Tracing (T&) impliziert die Sendungsverfolgung und gehört nach Louw und Walker (2018, S. 256) zu den wichtigsten Technologiekonzepten in einer globalen Wertschöpfungskette. Nach Wolfond (2003) beschreibt das Tracking die echtzeitnahe Lokalisierung bzw. das Verfolgen von einzelnen Transportschritten von Waren und Gütern. Von der Auskunft über die Auslieferung, den aktuellen Standort bis hin zur Ankunft der Sendungen bei der EmpfängerIn (Wolfond 2003, S. 6ff.). Das Tracing wiederum erlaubt, so Wolfond (2003), den Verlauf der Ware abzurufen und bezieht sich dabei auf den kompletten Sendungsverlauf. Das **Internet der Dinge (IoT) und Dienste** stellt hierfür die technische Rahmenbedingung dar. Nach Wegener (2014, S. 346) gilt das IoT als die wichtigste Veränderung und Voraussetzung für die Digitalisierung der industriellen Prozess- und Produktentwicklungen. Pistorius (2020) versteht darunter die Verknüpfung physischer Objekte aus der realen Welt mit der virtuellen Welt. Dies eröffnet die Möglichkeit Produktionsprozesse aus der Ferne dezentral zu steuern.

4.3 Smart Factory, Cyber-physische Systeme und Smart Products

Die **Smart Factory** (zu Deutsch: intelligente Fabrik) steht im Zentrum der I4.0. und stellt eine flexible und dynamische Produktionsumgebung zur Verfügung, die sich laut Fraunhofer-Allianz (2017, S. 28) im Idealfall ohne menschlichen Eingriff selbst (autonom) steuert und organisiert. Mit dem Ziel Personen von bisherigen Steuerungsaktivitäten abzulösen (Kasper 2019, S. 27). Die Basis der Smart Factory bilden, so Wegener (2014) und Bauernhansl (2016) sog. **cyberphysische Systeme (CPS)**, intelligente Objekte, die miteinander vernetzt sind und sich selbstständig (dezentral) steuern (engl. embedded systems). Nach Bauernhansl (2014, S.16) zeichnen sich CPS durch ihren hohen Grad der drahtlosen Vernetzung und ihren Informationsaustausch zwischen Maschine, Anlage oder Roboter aus. Sie agieren und interagieren menschenähnlich, sodass standardisierte Prozesse und Routinetätigkeiten von Maschine und Software übernommen werden können (VDI 2016, S. 4f.). Auf diese Weise unterstützen sie den Menschen in der Interaktion mit der Maschine, gleichzeitig bleibt der Mensch ein zentraler Bestandteil in der Produktion. In der Industrie 4.0 werden der Einsatz von Produkten die auf die individuellen Kundenwünsche abgestimmt sind, als **Smart Products** bezeichnet (Vogel-Heuser 2014, S. 42.). Sie führen nach Vogel-Heuser (2014) mittels RFID-Labels Daten über Prozess- und Produktzustände vom ersten Produktionsschritt, über die Nutzung vom Kunden, bis hin zum Recycling für ihr eigenes virtuelles Abbild mit sich.

4.4 Tracking and Tracing in der Transportlogistik

Im Supply Chain Management wird die RFID Technologie vor allem für die Speicherung von Identifikations- und Seriennummern genutzt (vgl. Siepmann & Graef 2016; Kasper 2019, S. 25). Der Vorteil der RFID Technologie ist laut Akbari et al. (2015), Joseph und Joby (2016) und Louw

und Walker (2018, S. 256), dass Objekte auf eine relativ große Distanz geortet und identifiziert werden können, während sie gleichzeitig eine große Menge an Daten speichern können.

4.5 Data Science (Data Mining, Big Data, Machine Learning)

Laut Pistorius (2020) wird das Cloud-Computing als eine Basis-Technologie von I4.0 verstanden. Sie ermöglicht die Vernetzung von Computersystemen und garantiert eine dezentrale und flexible Bereitstellung von Daten über das Internet. Auch Zühlke (2013), Lanza et al. (2018) und Kasper (2019) sehen das **Cloud-Computing** als ein entscheidendes Werkzeug in der Bereitstellung von Daten.

Es ergeben sich insbesondere für Unternehmen eine Vielzahl an Vorteilen. Bauernhansl und Lickfett (2014) sowie Pistorius (2020) gehen davon aus, dass Cloud-Computing große Kosteneinsparpotenziale sowie die Möglichkeit des orts- und personenunabhängigen Zugriffs mit sich bringt. Zugleich profitieren von der flexiblen Nutzung und Bezahlung der Dienste auch die Anwender, so Pistorius (2020).

Die Digitalisierung, Autonomisierung und die Automatisierung spielen in der Logistik und Supply Chain eine große Rolle hinsichtlich der Effizienz (Helmke 2019, S. 187). **Machine Learning** und **Künstliche Intelligenz (KI)** sorgen dafür, so Helmke (2019), dass Lagersysteme das Wissen aus Datensammlungen generieren, um eigenständig Muster zu erkennen und Korrelationen zwischen diesen zu bilden, welche dann Rückschlüsse auf eine Optimierung zulassen.

Die Fraunhofer-Allianz (2017) beschreibt die **Künstliche Intelligenz (KI)** engl. Artificial Intelligence (AI), als Methode, die es technischen Systemen ermöglicht selbstständig und menschenunabhängig zu agieren, ihre Umwelt wahrzunehmen und das Wahrgenommene zu verarbeiten. Pistorius (2020) spricht der KI kognitive Fähigkeiten zu, die ähnlich dem Menschen sind.

Nach LeCun et al. (2015) und einer Studie der acatech (2016) kann das Machine Learning (ML) gleichgesetzt werden mit der KI. Genau genommen gilt es als ein Kernelement bzw. eine Schlüsseldisziplin der KI, und ist die Voraussetzung für viele technische Innovationen im Bereich der Logistik 4.0 und Industrie 4.0. Das **Machine Learning** im Gegensatz zum Deep Learning, so Pistorius (2020) sorgt dafür, dass Maschinen selbstständig Prozesse verstehen, sich anpassen und Fehler beheben, ohne vorher explizit programmiert zu werden. Auch nach Huber und Kaiser (2017, S. 23) ist das System in der Lage, auf bisher unbekannte Situationen selbstständig zu reagieren.

Laut acatech (2016) nutzt das **Deep Learning** hingegen große Datenmengen und Rohdaten, wie Bilder, Videos oder Sensormesswerte aus der realen Welt, analysiert und verarbeitet diese und lernt daraus (acatech 2016, S. 38). Laut Göpfert (2019b) stützt sich die Deep Learning Methode auf neuronale Netze und große Datenmengen und orientiert sich dabei an der Funktionsweise des menschlichen Gehirns. Nur so können abstrakte Muster entdeckt und in weiterem Kontext mit anderen Erkenntnissen in Zusammenhang gebracht werden so Göpfert (2019b, S. 249).

4.6 Virtual und Augmented Reality

Das Internet der Dinge erzeugt große Datenmengen, die mittels der **Augmented Reality (AR)** übersichtlich und möglichst real dargestellt werden können. Nach Pistorius (2020) soll die Augmented Reality dem Benutzer dazu dienen, die Realität sinnvoll zu ergänzen, anstatt diese wie bei VR vollständig zu ersetzen. Dadurch kann die reale Umgebung mit virtuellen Objekten in Echtzeit überlagert werden, sodass der Eindruck entsteht, als würden diese zusammen mit den realen Objekten in einem Raum existieren, so Pistorius (2020).

Nach Günther (2006b) verfolgt die **Virtual Reality (VR)** das Ziel, für Menschen eine Visualisierung von komplexen Daten widerzugeben, um ein möglichst realistisches Abbild eines Produktionsprozesses nachzubilden. Für die Umsetzung sind mobile Geräte wie das Smartphone, Tablet oder Smartglasses notwendig, die mit relativ großen Displays, Kameras und Touch-Funktionen ausgestattet sind.

4.7 Forschungsbedarf zu ökologischen Optimierungspotentialen in der Produktions- und Beschaffungslogistik

In diesem Bereich gibt es bislang keine quantitativen Aussagen zu den Optimierungspotentialen in der Produktion und Beschaffungslogistik durch den Einsatz neuer technologischer Entwicklungen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT), sowie der Digitalisierung und Automatisierung von Produktionsprozessen. Insofern können an dieser Stelle nur Forschungsnotwendigkeiten aufgezeigt werden.

Zunächst ist es hierbei notwendig, die gesamte Wertschöpfungskette zu betrachten und die einzelnen Komponenten Produktion, Transport, Lagerung und Umschlag sowie Reverse Logistics zu berücksichtigen.

Zielsetzung sollte dabei sein, die Trends und Entwicklungen des Produktions- und Logistiksektors im Zuge der Industrie bzw. der Logistik 4.0 modellbasiert zu untersuchen, um deren ökologische Auswirkungen abschätzen zu können.

Es sollte eine Wirkungsabschätzung zum Einsatz folgender Technologien in Wertschöpfungsnetzwerken untersucht werden.

- ▶ Vernetzte Sensorik und Aktorik
- ▶ Internet of Things
- ▶ Cyber-Physical Systems
- ▶ Smart Factory
- ▶ RFID Technologie
- ▶ Smart Products
- ▶ Tracking and Tracing in der Transportlogistik
- ▶ Big Data
- ▶ Cloud-Computing
- ▶ Smart Services

Dazu muss zunächst die Wertschöpfungskette mit den Komponenten im Detail modelliert werden. Dabei sind Materialflüsse, die in der Produktion, im Lager oder am Umschlagknoten ablaufen, abhängig von den Transportflüssen zwischen diesen Knoten abzubilden.

Zentrale Forschungsfragen sind hierbei, welche ökonomischen und ökologischen Einsparpotentiale diese neuen Technologien in der Produktion und der Logistik haben.

Hierbei stellt sich zusätzlich die Frage, wie diese neuen Technologien zur vollständigen Vernetzung, Überwachung, Optimierung und Automatisierung logistischer Prozesse entlang der Wertschöpfungskette beitragen können.

Forschungsschwerpunkt sollte dabei auf dem Bereich Data Science liegen, der die Schlagworte Cloud Computing, Big Data, Machine Learning, Data Mining, etc. umfasst. Data Science soll hierbei zur operativen Steuerung der Distribution herangezogen werden. Zusätzlich ermöglicht es neue Formen der kooperativen Logistik, z.B. Organisation von Transporten im Rahmen der Sharing Economy (SE), App-basierte Transport- und Logistiklösungen oder die direkte Kommunikation mit den KundInnen bspw. mit dem Logistikdienstleistungs- und Fuhrparkunternehmen.

5 Quellenverzeichnis

acatech (2012): Menschen und Güter bewegen – Integrative Entwicklung von Mobilität und Logistik für mehr Lebensqualität und Wohlstand, Berlin.

Achtnicht, M., Kesternich, M., u. Sturm, B. (2018). Die "Diesel-Debatte": Ökonomische Handlungsempfehlungen an die Politik. ZEW policy brief, 18.

ADAC (2019). ADAC Autokosten Herbst/Winter 2019/2020 - Kostenübersicht für über 1.600 aktuelle Neuwagen-Modelle. In: ADAC Fahrzeugtechnik, 2019, 30277, Allgemeiner Deutscher Automobil-Club, München.

Agora Verkehrswende (2020): Auto tankt Internet. Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen, Datenübertragung und Infrastruktur.

Akbari, A., Mirshahi, S., Hashemipour, M. (2015): Comparison of RFID system and barcode reader for manufacturing processes, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 502-506.

Al Razib, Md. Shamim, Rahman, Faysal Ibna 2017: Determination of Trip Attraction Rates of Shopping Centers in Uttara Area, Dhaka. American Journal of Management Science and Engineering. Vol 2, No. 5, pp. 150-155

Allekotte, M.; Hans-Jörg Althaus; Kirsten Biemann; Wolfram Knörr; Daniel Sutter (2020): Umweltfreundlich mobil! Umweltbundesamt.

Alvim, A., & Taillard, É. (1. 8 2013). POPMUSIC for the world location-routing problem. EURO Journal on Transportation and Logistics, 2(3), 231-254.

Amazon (2017): Same-Day (Evening-Express) Lieferung. <https://www.amazon.de/gp/help/customer/display.html?nodeId=201911030> (11.06.2018).

Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (ASB) (2018): Bevölkerungsstand Berlin 2017. Online. <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/webapi/jsf/tableView/tableView.xhtml#>. Version: 2018. – Abgerufen am 09.11.2018.

Andersen, J., Sutcliffe, S. (2000): Intelligent Transport Systems (ITS) - An Overview. IN: IFAC Proceedings Volumes, 33, 18, pp. 99-106.

Anderson, J. M., Kalra, N., Stanley, K. D., Sorensen, P., Samaras, C., Oluwatola, O. A. (2016). Autonomous vehicle technology: A guide for policymakers, Rand Corporation.

Arnold, D. (2006): Intralogistik. Potentiale, Perspektiven, Prognosen. Berlin, Heidelberg: Springer.

Arroyo López, R., u. Colmer Ferrándiz, V. (2016): Analysis of the Logistics of Home Delivery of Food and Household Goods. Implementation in Consum in the Valencia Area. Proposals for Improvement. In: Transportation Research Procedia, 2016, 18, Elsevier B.V, S.189-196

Axhausen, K. W., Glemser, A., Jödden, C., Sauer, A., Ehreke, I., Hess, S., Nagel, K., Weis, C. (2015): Schlussbericht: FE-Projekt-Nr. 96.966/2011, Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf der Basis eines Modells für modale Verlagerungen im nicht-gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung, Zürich.

Balakrishnan, A., Ward, J., & Wong, R. (1. 1 1987). Integrated facility location and vehicle routing models: Recent work and future prospects. American Journal of Mathematical and Management Sciences, 7(1-2), 35-61.

Balmer, M., Rieser, M., Meister, K., Charypar, D., Lefebvre, N., Nagel, K., Axhausen, K.W. (2009): MATSim-T: Architecture and Simulation Times. In: Bazzan, A.L.C., Klügl, F. (eds.): Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering. Information Science Reference, Hershey, S. 57–78.

Bardt, Hubertus (2016): Autonomes Fahren: Eine Herausforderung für die deutsche Autoindustrie. In: IW-Trends – Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung, Institut der deutschen Wirtschaft Köln (IW), Köln, 43, 2, Köln, S. 39-55.

- Barnhart, C., Krishnan, N., Kim, D., u. Ware, K. (2002). Network design for express shipment delivery. In: Computational Optimization and Applications, 2002, 21, 3, Springer US, S. 239-262.
- Barreto, S., Ferreira, C., Paixão, J., & Santos, B. (16. 6 2007). Using clustering analysis in a capacitated location-routing problem. European Journal of Operational Research, 179(3), 968-977.
- Bass, F. M. (1969). A new product growth for model consumer durables. Management science, 15(5), 215-227.
- BAST (2018): BAST 2017 - Automatische Straßenverkehrszählung. In: Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen. https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/zaehl_node.html. (11.10.2019).
- Bauer, W., Schlund, S., Marrenbach, D., Ganschar, O. (2014): Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Studie: Berlin, Stuttgart: BITKOM, Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft.
- Bauernhansl, T. (2014): Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. IN: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 6-35.
- Bauernhansl, T. (Hrsg.) (2016): Industrie 4.0: Entwicklungsfelder für den Mittelstand. Aktuelle Hemnisse und konkrete Bedarfe. Stuttgart: Fraunhofer IPA.
- Bauernhansl, T., Lickefett, M. (Hrsg.) (2014): Strukturstudie. Industrie 4.0 für Baden-Württemberg. Baden-Württemberg auf dem Weg zu Industrie 4.0. Abgerufen von https://wm.badenwuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/mwm/intern/Dateien_Downloads/Innovation/IPA_Strukturstudie_Industrie_4.0_BW.pdf [25.07.2019].
- Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Bäumer, M., et al. (2017): Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Verkehrstechnik, Heft V 291, Bergisch Gladbach.
- Bäumler, I., Kotzab, H. (2016): Assessing research on intelligent transport systems for roadfreight transport from the viewpoint of different stakeholders. IN: Ojala, L., Töyli, J., Solakivi, T., Lorentz, H., Laari, S., Lehtinen, N. (eds.): Nofomo 2016 - Proceedings of the 28 annual Nordic logistics research network conference, Turku, Finland, pp. 52-68.
- BDI - Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (2017): Herausforderungen und Perspektiven für die Logistik 2025. Unter welchen Vorzeichen stehen die Veränderungen in der Industrie und in der Logistik in Deutschland? Abgerufen von www.bdi.eu/publikation/news/Herausforderungen-Perspektiven-Logistik-2025 [24.09.2019].
- Beckmann, R. M., Hangebruch, N. (2016). "Lokale Online-Marktplätze: ein Ansatz zur Vernetzung von Fußgängerzone und Internet."
- Ben-Akiva, M. E., Lerman, S. R., & Lerman, S. R. (1985). Discrete choice analysis: theory and application to travel demand (Vol. 9). MIT press.
- Bendel, O. (2017): Achtung, sie kommen! In: UnternehmerZeitung, 4, Basel, S. 34-35.
- Berbeglia, G., Cordeau, J-F., Laporte, G. (2010): Dynamic pickup and delivery problems. In. European Journal of Operational Research, 2010, 202, 1, Elsevier B.V., S. 8-15.
- Bergenheim, C., Shladover, S., Coelingh, E. (2012): Overview of platooning systems. Proceedings of the 19th ITS World Congress, Oct 22-26, Vienna, Austria (2012), - b.
- Bergenheim, C., Hedin, E. u. Skarin, D. (2012): Vehicle-to-Vehicle Communication for a Platooning System. In: Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012, 48, Elsevier B.V., S.1222 – 1233, - a.
- Berger, R. (2016). On the road toward the autonomous truck. Studien, Medien, Roland Berger.

Bertram, I. (2017): Hermes startet Test mit Starship-Robotern in London. URL: <https://newsroom.hermes-world.com/hermes-startet-test-mit-starship-robotern-in-london-12325/> (23.03.2018).

BIEK (2018): KEP-Studie 2018 – Analyse des Marktes in Deutschland. Eine Untersuchung im Auftrag des Bundesverbandes Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK).

Birkner, Thomas (1994): Innerstädtischer Parksuchverkehr: Eine Unbekannte Größe? (Straßenverkehrstechnik, Heft 7).

Bischoff, J., Maciejewski, M., & Nagel, K. (2017, October). City-wide shared taxis: A simulation study in berlin. In 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) (pp. 275-280). IEEE.

BMW AG, D., DB Rent GmbH, Landeshauptstadt München, Universität der Bundeswehr München, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (2016). Wirkung von E-Car Sharing Systemen auf Mobilität und Umwelt in urbanen Räumen (WiMobil).

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2011): Intelligente Logistik Teil 1: Cluster 1 – 4. Abgerufen von https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/intelligente-logistik.pdf?__blob=publicationFile&v=5 [26.09.2019].

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2015): Erschließen der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand. Studie, 06/2015. Abgerufen von https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/erschliessen-der-potenziale-der-anwendung-von-industrie-4-0-im-mittelstand.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D5 [24.09.2019].

Bogdanski, R. (2017): Innovation auf der letzten Meile. Bewertung der Chancen für die nachhaltige Stadtlogistik von morgen. Nachhaltigkeitsstudie 2017 im Auftrag des Bundesverbandes Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK). Abgerufen von https://www.biek.de/publikationen/studien.html?file=tl_files/biek/Nachhaltigkeitsstudie%202017/BIEK_Nachhaltigkeitsstudie_2017.pdf [01.10.2019].

Bogdanski, R. (2019): Quantitative Untersuchung der konsolidierten Zustellung auf der letzten Meile. Am Beispiel zweier KEP-Unternehmen in den Städten Nürnberg und München. Studie im Auftrag des Bundesverbandes Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK). Abgerufen von <https://www.biek.de/presse/meldung/konsolidierte-zustellung.html> [01.10.2019].

Bohg, I. u. Leger, L. (2013): Lebensmittel online bestellen? Frauen als Zielgruppe der Lebensmittel-Onlinehändler. In: Kampmann B., Keller B., Knippelmeyer M., Wagner F.: Die Frauen und das Netz. Gabler Verlag, Wiesbaden, S. 97 – 108.

Bousonville T. (2017) Konzeptionelle Grundlagen von Logistik 4.0, essentials. Springer Gabler, Wiesbaden.

BpB 2019a: Bundeszentrale für politische Bildung, Online-Quelle: <https://www.bpb.de/nachschlagen/lexika/lexikon-der-wirtschaft/21108/warenkorb>, aufgerufen am 23.01.2019

BpB 2019b: Bundeszentrale für politische Bildung, Online-Quelle: <https://www.bpb.de/nachschlagen/lexika/lexikon-der-wirtschaft/20318/verbraucherpreisindex>, aufgerufen am 23.01.2019

Brandt, A.; Jentzsch, G.; Pradka, A. (2019): EDDI – Elektronische Deichsel -Digitale Innovation. https://www.mantruckandbus.com/man/media/de/content_medien/doc/global_corporate_webs-ite_1/presse_und_medien_1/2019_5/190510_MTB_Platooning_EDDI_Zusammenfassung.pdf (11.10.2019).

Breidenbach, P. u. Rauh, J. (2010): Internet-Einzelhandel bei Multi-Channel-Unternehmen. In: Lenz, B., Kulke, E., Nehrlich, A., Rauh, J. u. Vogt, W. [Hrsg.]: Produktion – Distribution – Konsum. – Auswirkungen von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) auf Wirtschafts- und Versorgungsverkehr, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 51-73.

Breidenbach, P., Rauh, J., Nerlich, M. R., Schiffner, F., Vogt, Walter (2005). "IKT, Handel und die Auswirkungen von eCommerce (B2C) auf den Verkehr."

Bullinger, D. (2013). "Onlinehandel, stationärer Einzelhandel und Shopping-Center: gegeneinander oder miteinander?" Geografische Handelsforschung 34: 38-43.

Bullinger, H.-J. (2007): Vorwort. Intelligenteres Leben im „Internet der Dinge“ – RFID als Grundlage für autonome Objekte und selbstorganisierende Systeme in intelligenten Umgebungen. IN: Bullinger, H.-J., ten Hompel, M. (Hrsg.): Internet der Dinge. Berlin, Heidelberg, New York: Springer. S. XXIII-XXVII.

Bundesinstitut für Bau-, S.-u. R. (2011). Ohne Auto einkaufen. Nahversorgung und Nahmobilität in der Praxis. Werkstatt: Praxis. Berlin. 76.

Bundesinstitut für Bau-, S.-u. R. (2012). Raumordnungsprognose, Bevölkerungsprognose, Datenquelle. Bonn.

Bundesinstitut für Bau-, S.-u. R. (2017). "Online-Handel – Mögliche räumliche Auswirkungen auf Innenstädte, Stadtteil- und Ortszentren."

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2020): ATLaS – Automatisiertes und vernetztes Fahren in der Logistik. Chancen für mehr Wertschöpfung. Kurzfassung zum Verbundvorhaben. Online im Internet. URL: https://www2.tuhh.de/atlas/wp-content/uploads/sites/11/2020/08/ATLaS_Kurzfassung-des-Schlussberichts.pdf (Stand: 30.03.2021).

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2015): Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren. Leitanbieter bleiben, Leitmarkt werden, Regelbetrieb einleiten, Berlin.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2016). Bundesverkehrswegeplan 2030. Berlin.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2019). Regionalstatistische Raumtypologie (RegioStaR). URL: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/regionalstatistische-raumtypologie.html>

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2019). Mobilität in Deutschland, Datenquelle. Berlin.

Bundesministerium für Verkehr, B. u. S. (2011). "Nahversorgung und Nahmobilität: Verkehrsverhalten und Zufriedenheit."

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2017): Den digitalen Wandel gestalten. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/digitalisierung.html>, (25.05.2018).

Bundesregierung (2019): Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). S. 38.

Bundesregierung (2021): Mehr E-Mobilität. In: Neue Perspektiven im Klimaschutz. Verkehr. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/verkehr-1672896>. (25.03.2021).

Bundesverband E-Commerce und Versandhandel e.V. (2017). "Die Wirtschaftslage im Deutschen Interaktiven Handel B2C 2016/2017."

Bundesverband Güterkraftverkehr, Logistik und Entsorgung e.V. (BGL) (2018): Kostenentwicklung im Güterkraftverkehr. Nationaler Nahverkehr 2010-2018. Online. http://www.bgl-ev.de/web/der_bgl/informationen/branchenkostenentwicklung.htm?v=2#form. Version: 2018. – Abgerufen am 09.11.2018.

Burgschweiger, S., Wolfermann, A., Liedtke, G. (2017): A macroscopic freight transport demand model to analyse effects of transport planning in Germany. In: Proceedings of the 3rd Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic 2017, Darmstadt, Germany.

BVU Beratergruppe Verkehr+Umwelt GmbH, TNS Infratest, Karlsruher Institut für Technologie (2012): Entwicklung eines Modells zur Berechnung von modalen Verlagerungen im Güterverkehr für die Ableitung konsistenter Bewertungsansätze für die Bundesverkehrswegeplanung.

Cao, W. u. Yang, W. (2017): A Survey of Vehicle Routing Problem. Tagung: 13th Global Congress on Manufacturing and Management (GCMM 2016), MATEC Web Conf. 100.

- Cao, X., Douma, F., Cleaveland, F. (2010). "The influence of E-shopping on Shopping Travel: Evidence from Twin Cities."
- Comans, C. (2014): Onlinehandel mit Lebensmitteln – Mit den Projekten „ELKE“ und „G@zielt“ auf dem Weg zu einer funktionierenden Überwachung des Onlinehandels. In: Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL): Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, 2015, 10, 2, S. 109–116.
- Commission of the European Communities (2008): Communication from the Commission: Action Plan for deployment of Intelligent Transport Systems in Europe, 16 Dezember. Abgerufen von http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:08_86:FIN:EN:PDFb [21.07.2019].
- Crainic, T. G., Gendreau, Michel, Potvin, J.-Y. (2009): Intelligent freight-transportation systems: Assessment and the contribution of operations research. IN: Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 17/6, pp. 541-557.
- Cullinane, S. (2009): From Bricks to Clicks: The Impact of Online Retailing on Transport and the Environment. In: Transport Reviews, 2009, 29, 6, Taylor & Francis, United Kingdom, S. 759-776.
- Cupic, A. u. Teodorovic, D. (2013): A multi-objective approach to the parcel express service delivery problem. In: Journal of Advanced Transportation, 2013, 48, 7, Hindawi, London, S. 701-720.
- Daimler AG (2018) Der Mercedes Vision Van. URL: <https://www.daimler.com/innovation/specials/vision-van/> (06.06.2018-a.)
- Daimler AG (2018): Der Mercedes-Benz Elektro-Lkw. Connectivity trifft eMobility. <https://www.daimler.com/produkte/lkw/mercedes-benz/weltpremiere-mercedes-benz-elektro-lkw.html>, (22.03.2018-b).
- Dais, S. (2014): Industrie 4.0 – Anstoß, Vision, Vorgehen. IN: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 625-634.
- Dannenberg, F. u. Franz, M. (2014): Essen aus dem Internet. Online-Supermärkte auf dem Weg aus der Experimentierphase? In: Standort, 2014, 38, 4, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 237–243.
- Dannenberg, P., Willkomm, M., Zehner, K. (2017). "Einzelhandel und räumliche Entwicklung – aktuelle Dynamiken in Deutschland."
- DAT – Deutsche Automobil Treuhand GmbH (2019): DAT Report 2019
- Daziano, Ricardo A.; Sarrias, Mauricio; Leard, Benjamin (2017): Are Consumers Willing to Pay to Let Cars Drive for Them? Analyzing Response to Autonomous Vehicles. In: SSRN Journal. DOI: 10.2139/ssrn.2851943.
- de Kervenoael, R., Elms, J., Hallsworth, A. (2015). "Influencing online grocery innovation: Anti-choice as a trigger for activity fragmentation and multi-tasking."
- Deliveroo (2017): Deliveroo. Berlin: URL: https://deliveroo.de/de?change_location (25.09.2015).
- Deutsche Automobil Treuhand GmbH (DAT Group) (2018): Gebrauchtfahrzeugwerte. Online. <https://www.dat.de/gebrauchtfahrzeugwerte.html#/start>. Version: 2018. – Abgerufen am 09.11.2018.
- Deutschland, H. (2017). "Handel digital. Online Monitor 2017."
- DHL (2018): ExpressEasy Versand. URL: <https://www.dhl.de/de/privatkunden/pakete-versenden/deutschland-weit-versenden/express-easy.html> (29.11.2018).
- DHL Trend Research (2014): Self-Driving Vehicles in Logistics, Troisdorf.
- Diaz-Bone, R. (2018): Die „Economie des conventions“. Grundlagen und Entwicklungen der neuen französischen Wirtschaftssoziologie. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2., Aufl.

- Dierkes et al. (2019): Infrastrukturbedarf automatisierten Fahrens – Grundlagenprojekt. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik, 130, Bergisch Gladbach.
- DIW, DLR, Kraftfahrt-Bundesamt (2018). Verkehr in Zahlen 2018/2019. 47. Jahrgang. B. f. V. u. d. Infrastruktur. Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg.
- Donath, A. (2016): Mercedes stellt elektrischen Lkw mit 200 km Reichweite vor. <https://www.go-lem.de/news/urban-etruck-mercedes-stellt-elektrischen-lkw-mit-200-km-reichweite-vor-1607-122391.html>, (22.03.2018).
- Dörrzapf, L., Mitteregger, M., Berger, M. (2017): Die Crowd-Community als Lieferant auf der letzten Meile? IN: Schrenk, M., Popovich V. V., Zeile, P., Elisei, P., Beyer, C. (Hrsg.): REAL CORP 2017 Proceedings/Tagungsband. CORP - Competence Center of Urban and Regional Planning, Wien. Abgerufen von https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_249530.pdf [08.10.2019].
- Dost, F. u. Maier, E. (2017). E-Commerce Effects on Energy Consumption. A Multi-Year Ecosystem-Level Assessment. In: Journal of Industrial Ecology, 2017, 22, 4, S. 799-812. DOI: 10.1111/jiec.12639.
- DPD (2016): Autonomes Fahren in der Paketzustellung. Aschaffenburg. URL: https://www.dpd.com/.../20161103_DPD_Autonomes%20Fahren_Thesenpapier_und, (04.06.2018).
- DSLV - Deutscher Speditions- und Logistikverband e. V. (2015): Zahlen · Daten · Fakten aus Spedition und Logistik. Abgerufen von [https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/gfx/6CFE028FC9D5A06BC1257E5B003C8189/\\$file/DSLV_Zahlen-Daten-Fakten_2015-Downloadversion.pdf](https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/gfx/6CFE028FC9D5A06BC1257E5B003C8189/$file/DSLV_Zahlen-Daten-Fakten_2015-Downloadversion.pdf) [26.09.2019].
- Ducret, R. (2014): Parcel deliveries and urban logistics: Changes and challenges in the courier express and parcel sector in Europe — The French case. In: Research in Transportation Business & Management, 2014, 11, Elsevier B.V., S. 15-22.
- Dugge, B. (2006). Ein simultanes Erzeugungs-, Verteilungs-, Aufteilungs- und Routenwahlmodell (EVA-U). Dresden, Techn. Univ., Inst. für Verkehrsplanung und Straßenverkehr.
- eComTraf (2015). "Auswirkungen von E-Commerce auf das Gesamtverkehrssystem."
- Edwards, J.B., McKinnon, A.C., Cullinane, S.L. (2010). Comparative analysis of the carbon footprints of conventional and online retailing. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2010, 40, 1/2, S. 103-123. DOI 10.1108/09600031011018055.
- Ehrmann, H. (2012): Logistik. Herne: Kiehl (Kompendium der praktischen Betriebswirtschaft), 7., überarb. und aktual. Aufl.
- Einav, L., Levin, J., Popov, I., Sundaresan, N. (2014). "Growth, Adoption, and Use of Mobile E-Commerce." American Economic Review: Papers & Proceedings 104(5): 489-494.
- eine Studie der Fraunhofer Arbeitsgruppe für Supply Chain Services SCS. Hamburg: DVV Media Group GmbH.
- emobil BW GmbH (2015): Automatisiert. Vernetzt. Elektrisch. Potenziale innovativer Mobilitätslösungen für Baden-Württemberg. Stuttgart.
- emobil BW GmbH (2017): Automatisiertes Fahren im Personen- und Güterverkehr. Auswirkungen auf den Modal-Split, das Verkehrssystem und die Siedlungsstrukturen. Stuttgart. Online verfügbar unter https://www.emobilbw.de/files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/PDF_2017/Studie_AutomatisiertesFahren.pdf.
- Escobar, J., Linfati, R., Baldoquin, M., & Toth, P. (2014). A Granular Variable Tabu Neighborhood Search for the capacitated location-routing problem. Transportation Research Part B: Methodological, 67, 344-356.
- Eßig, M., Hofmann, E., Stölzle, W. (2013): Supply Chain Management. München: Vahlen.

Europäische Kommission (2015). Consumer Conditions Scoreboard. Consumers at home in the Single Market. Luxembourg.

European Commission (2018): CHAUFFEUR II. URL: <https://trimis.ec.europa.eu/project/promote-chauffeur-ii>, (15.03.2018).

Eurostat: Anonymised Road Carriage (RC) micro-data. <https://circabc.europa.eu/w/browse/0b3b09c5-af47-47f7-ae7f-570291f9d067>

EuroTransportMedia Verlags- und Veranstaltungs-GmbH (ETM) (2017): Transportkosten für Lkw-Typen. In: Der lastauto omnibus KATALOG, Nr. 47.

Evers, H., Kasties, G. (1999): Kompendium der Verkehrstelematik. Technologien, Applikationen, Perspektiven. 4. Akt.-Lief. August 1999, Köln: TÜV-Verlag.

Fabian, B., Günther, O., Ivantysynova, L., Spiekermann, S., Ziekow, H. (2007): Sicherer Informationsaustausch im Internet der Dinge. IN: Bullinger, H.-J., ten Hompel, M. (Hrsg.): Internet der Dinge. Berlin, Heidelberg, New York: Springer. S. 179-190.

Fagnant, Daniel J.; Kockelman, Kara (2015): Preparing a nation for autonomous vehicles. Opportunities, barriers and policy recommendations. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice 77, S. 167–181. DOI: 10.1016/j.tra.2015.04.003.

Farag, S. (2006). "E-shopping and its interactions with in-store shopping."

Feichtinger, S. u. Gronalt, M. (2021). The Environmental Impact of Transport Activities for Online and In-Store Shopping: A Systematic Literature Review to Identify Relevant Factors for Quantitative Assessments, In: Sustainability, 13, 2981, S. 1-23. <https://doi.org/10.3390/su13052981>.

Ferrucci, F., u. Bock, S. (2014). Real-time control of express pickup and delivery processes in a dynamic environment. In: Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 63, Elsevier B.V., S. 1-14.

Flämig, H. (2015): Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransportes. In: Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B. u. Winner, H. [Hrsg.]: Autonomes Fahren. Technisch, rechtlich und gesellschaftliche Aspekte. Springer Vieweg, Wiesbaden, S. 377-398.

Florian Arnold, & Kenneth Sörensen. (2018). Efficient Heuristic for Routing and Integrated Logistic. University Antwerpen.

Flügge, B. (2016): Smart Mobility. Trends, Konzepte, Best Practices für die intelligente Mobilität. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Föhring, R. u. Zelewski, S. (2015): AFEX: an autonomous freight exchange concept. In: Transportation Research Procedia, Delft, 2015, 10, , Elsevier B.V., S. 644 – 651.

Follmer, R. et al. (2018): Mobilitäts in Deutschland, Kurzreport, Verkehrsaufkommen – Struktur – Trends, Ausgabe Dezember 2018, Bonn.

Foodora (2017): Foodora. <https://www.foodora.de/> (25.09.2017).

Forecasting, O. E. (2005). The impact of the express delivery industry on the global economy. Unpublished report, S. 1-43.

Fraedrich, E., Lenz, B. (2015). Vom (Mit-) Fahren: autonomes Fahren und Autonutzung. Autonomes Fahren, Springer: 687-708.

Franckx, L. (2017): Courier Network Services. Abgerufen von <https://mobilitybehaviour.eu/2017/08/04/courier-network-services/> [02.10.2019].

Franz, M. G., I. (2016). "Online-Handel ist Wandel - eine Einordnung." Geografische Handelsforschung 24.

- Frauendienst, B. (2011). "Mobilität und Verkehr im städtischen Raum." Zwischen Basel, Bochum und Toronto: Einblicke in die Geographie postindustrieller Stadtentwicklungen 11: 165.
- Frauenhofer - Institut für Materialfluss und Logistik (IML) (o.J.): Zellulare Transportsysteme –Shuttlesysteme für den flexiblen Einsatz. Dortmund.
- Friedrich, Bernhard (2015): Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge. In: Markus Maurer, J. Christian Gerdes, Barbara Lenz und Hermann Winner (Hg.): Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 331–350.
- Gabler, M. (2012): Analyse und agentenbasierte Modellierung des städtischen Distributionsverkehrs im Lebensmitteleinzelhandel. Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung (IWW), Lehrstuhl für Netzwerkökonomie.
- Gabler, M.; Schröder, S.; Friedrich, H.; Liedtke, G. (2013): Generierung der Nachfragestrukturen für die mikroskopische Simulation des städtischen Distributionsverkehrs im Lebensmittelhandel. In: Wirtschaftsverkehr 2013. Berlin/Heidelberg : Springer Vieweg, 2013, S. 32–48.
- Gerdes, J., Heinemann, G. (2019): Urbane Logistik der Zukunft - ganzheitlich, nachhaltig und effizient. IN: Heinemann, G., Gehrckens, H. M., Täuber, T., Accnture GmbH (Hrsg.): Handelt mit Mehrwert. Digitaler Wandel in Märkten, Geschäftsmodellen und Geschäftssystemen. Wiesbaden: Springer Fachmedien. S. 397-420.
- Ghajargar, M., Zenezini, G. u. Montanar, T. (2016): Home delivery services: innovations and emerging needs. In: IFAC-PapersOnLine., 2016, 49, 12, Elsevier B.V., S. 1371-1376.
- Giannopoulos, G., Mitsakis, E., Salanova, J. M. (2012): Overview of Intelligent Transport Systems (ITS) developments in and across transport modes. IN: JRC Scientific and Policy Reports.
- Göpfert, I. (2019a): Logistik der Zukunft – Logistics for the Future. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 8., aktual. und erw. Aufl.
- Göpfert, I. (2019b): Ein Zukunftsmodell für die Handelslogistik im Jahr 2036 IN: Göpfert, I. (Hrsg.): Logistik der Zukunft – Logistics for the Future. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 8., aktual. und erw. Aufl., S. 232-252.
- Gorecky, D., Schmitt, M., Loskyll, M. (2014): Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter. IN: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 524-542.
- Goudz, D.-I. (2015). Beitrag zum Einsatz von Forecast-Methoden zur Modellierung dynamischer Location-Routing Probleme mit stochastischer Nachfrage.
- Gudehus, T. (2012): Logistik 2. Netzwerke, Systeme und Lieferketten. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, Studienausgabe der 4., aktual. Aufl.
- Guemri, O., Beldjilali, B., Bekrar, A., & Belalem, G. (2016). Two-stage heuristic algorithm for the large-scale capacitated location routing problem. International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation, 7(1), 97-119.
- Guerra, L., Murino, T., & Romano, E. (2007). The Location-Routing Problem: an innovative approach. Department of Materials Engineering and Operations Management, University of Naples "Federico II" .
- Günter, W. A. (2016): Automatische Be- und Entladesysteme, München.
- Günther, P. (2006): Eine Branche entdeckt ihre Potentiale. Intralogistik – eine starke Branche stellt sich vor. IN: Arnold, D. (Hrsg.): Intralogistik. Potentiale, Perspektiven, Prognosen. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 5-16.
- Günthner W., Klenk E., Tenerowicz-Wirth P. (2017): Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0. In: Vogel-Heuser B., Bauernhansl T., ten Hompel M. [Hrsg.]: Handbuch Industrie 4.0. 4. Auflage. Springer Vieweg, Heidelberg, berlin.

- Habbel, F.-R. (2015): Gastkommentar. IN: Sandrock, M. (Hrsg.): Intelligente Verkehrssysteme und Telematikanwendungen in Kommunen. Best Practices. Wiesbaden: Springer, S. 129-132.
- Haberkorn, J. (2015). "Shopping-Center im Zeitalter des Online-Handels: Auswirkungen am Beispiel der Pasing Arcaden (München) und des Milaneo (Stuttgart)." *Geografische Handelsforschung* 38: 12-19.
- Handelsverband Deutschland 2017: Handel digital. Online-Monitor 2017.
- Harks, T., König, F., & Matuschke, J. (2013). Approximation algorithms for capacitated location routing. *Transportation Science*, 47(1), 3-22.
- Harthan, R. O.; Repenning, J.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Bürger, V.; Cook, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Ludig, S.; Matthes, F. C.; Mendelevitch, R.; Moosmann, L.; Scheffler, M.; Wiegmann, K.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Mandel, T.; Rehfeldt, M.; Steinbach, J. (2020): Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung. Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES GmbH.
- Hausmann, L, Hermann, N-A., Krause, J. & Netzer, T. (2014): Same-day delivery: The next evolutionary step in parcel logistics. <https://www.mckinsey.com/industries/travel-transport-and-logistics/our-insights/same-day-delivery-the-next-evolutionary-step-in-parcel-logistics> (29.11.2017).
- Hengst, M. S., G. (2012). "Multi-Channel-Konzepte als Chance für eine nachhaltige und zukunftsfähige Entwicklung der Innenstädte?" *Proceedings REAL CORP 2012 Tagungsband*.
- Herhausen, D., Binder, J., Schoegel, M., Herrmann, A. (2015). "Integrating Bricks with Clicks: Retailer-Level and Channel-Level Outcomes of Online–Offline Channel Integration." *Journal of Retailing* xxx.
- Hermann, M., Pentek, T., Otto, B. Otto (2016): Design principles for industrie 4.0 scenarios, *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. S. 3928-3937.
- Himpele, K (2016): Von der Share zur fair Economy. Herausforderungen der Share Economy für die kommunalpolitische Steuerung. IN: Kurswechsel (Hrsg.): Digitale Arbeit und Plattformkapitalismus. 2/2016. S. 23-31.
- Hiselius, L. W., Rosqvist, L. S., Adell, E. (2015). "TRAVEL BEHAVIOUR OF ONLINE SHOPPERS IN SWEDEN." *Transport and Telecommunication* 16(1): 21-30.
- Hoffmann; Glatz; Wrobel (1997): Untersuchung der Auswirkungen der Verkehrsbeeinflussungsanlage auf der A5 Friedberg - Frankfurt auf Verkehrsablauf, Verkehrssicherheit und Reisezeit. im Auftrag des hessischen Landesamts für Straßen- und Verkehrswesen.
- hybriLOG (2016): Last Mile – Paket-Drohne: Pro & Contra. Dresden. URL: <https://www.hybrilog.de/details/last-mile-paket-drohne-pro-contra.html>, (06.06.2018).
- Hyndman, R. J., Athanasopoulos, G. (2013). *Forecasting: principles and practice*. URL: <https://www.otexts.org/fpp/2/5>. Version: 2013, (12.06.2017).
- Ika (2012): Forschungsprojekte - Fahrerassistenz und Fahrzeugführung KONVOI. <https://www.ika.rwth-aachen.de/de/forschung/projekte/fahrerassistenz-und-fahrzeugf%C3%BChrung/1635-konvoi.html>, (15.03.2018).
- Ika (2018): Forschungsprojekte - Energie- und Antriebsmanagement. <https://www.ika.rwth-aachen.de/de/forschung/projekte/energie-und-antriebsmanagement/1263-sartre.html>, (15.03.2018).
- International Transport Forum (2015): Automated and autonomous driving – regulation under uncertainty. <https://www.itf-oecd.org/automated-and-autonomous-driving>, (02.11.2020)
- Janecki, R., Krawiec, S., Sierpinski, G. (2010): Telematics and the transportation system's value. IN: *IFAC Proceedings Volumes*, 23 (2010), S. 43-49.
- Jensen, A. F., Cherchi, E., Mabit, S. L., & Ortúzar, J. D. D. (2016). Predicting the potential market for electric vehicles. *Transportation Science*, 51(2), 427-440.

- Jermann, J.; Oehry, B.; Bosch, R.; Schmid, T.; Gasser, Y.; van Driel, C.; Kryeziu, G. (2017): Chancen und Risiken des Einsatzes von Abstandshaltesystemen sowie des Platooning von Strassenfahrzeugen - Machbarkeitsanalyse. https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/abteilung_strassennetzeallgemein/bericht_platooning.pdf.download.pdf/170811_ASTRA_Platooning_Bericht_V5.0.pdf.
- Jiang, Y., Sun, B., Li, G., Lin, Z., Zheng, C., u. Shen, X. (2017): Highway Passenger Transport Based Express Parcel Service Network Design: Model and Algorithm. In: Journal of Advanced Transportation, 2017, Wiley Hindawi, S. 1-17.
- Joseph, A. S., Joby, N. J. (2016): Analyzing RFID Tags in a Distributed Environment, Procedia Technology, 24, pp. 1483-1490.
- Jung, J., Hampe, J. F. (2001): Konzeption einer Architektur für ein Flottenmanagement- System. IN: Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik, 23/2001.
- Jung, J., Van Laak, B. L. (2001): Flottenmanagementsysteme – Grundlegende Technologien, Funktionen und Marktüberblick. In: Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik, 28/2001.
- Jungheinrich (2018): Fahrerlose Transportsysteme. URL: <https://www.jungheinrich.de/produkte/automatisierte-komponenten/fahrerlose-transportsysteme>, (16.03.2018).
- Kagermann, H. (2014): Chancen von Industrie 4.0 nutzen. IN: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 601-613.
- Kagermann, H. (2017): Die Mobilitätswende: Die Zukunft der Mobilität ist elektrisch, vernetzt und automatisiert. In: Hildebrandt, A. u. Landhäußer, W. [Hrsg.]: CSR und Digitalisierung, Management-Reihe Corporate Social Responsibility, Springer-Verlag, Wiesbaden, S. 357-372.
- Kasper, B. (2019): Industrie 4.0: Technologieentwicklung und sicherheitstechnische Bewertung von Anwendungsszenarien. Dortmund, Berlin, Dresden: BAuA. doi: 10.21934/baua:bericht20190204
- KBA – Kraftfahrtbundesamt (2019): Neuzulassungen im Jahr 2018 nach Marken, Herstellern. URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MarkenHersteller/marken_hersteller_node.html
- Keisidou, E., Sarigiannidis, L., Maditinos, D. (2011). "Consumer characteristics and their effect on accepting online shopping, in the context of different product types." Int. Journal of Business Science and Applied Management 6(2).
- Kesting, Arne; Treiber, Martin; Helbing, Dirk (2010): Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity. In: Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences 368 (1928), S. 4585–4605. DOI: 10.1098/rsta.2010.0084.
- Klaußner, S., u. Irtenkauf, P. (2013). Autonome Kolonnenfahrt auf Autobahnen–Stand der Technik, Umsetzung, Auswirkungen auf den Verkehrsfluss. Universität Stuttgart Institut für Straßen-und Verkehrswesen. http://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/lehre/Studentenarbeiten/downloads/SA_Klaussner_Irtenkauf_Ausarbeitung.Pdf (02.06.2018).
- Klein, D., Tran-Gia, P. u. Hartmann, M. (2013): Big Data. In: Informatik Spektrum, 2013, 36, 3, Springer, Würzburg, S. 319-323.
- Kleinemeier, M. (2014): Von der Automatisierungspyramide zu Unternehmenssteuerungsnetzwerken. IN: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 571-579.
- Knörr, W., Heidt, C., Gores, S., Bergk F. (2016): Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMODO) für die

Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014). Im Auftrag des Umweltbundesamtes. In Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut, Heidelberg. S. 1–97.

Knörr, W.; Heidt, C.; Allekotte, M.; Biemann, K.; Colson, M.; Gores, S. (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018) - Berichtsteil "TREMOD." Umweltbundesamt, Dessau -Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/aktualisierung-tremod-2019>.

Ködel, A., von Danwitz, S. (2017): Crowd-Logistik – Eine Potenzialanalyse für den deutschen KEP-Markt. Studie der Universität Köln. Abgerufen von https://logistik-heute.de/sites/default/files/public/data-fachartikel/crowd_logistik_logistik_heute_summary_final_v2_pdf_11563.pdf [08.10.2019].

Kolarova, V., Steck, F., Bahamonde-Birke, F. J. (2019): Assessing the effect of autonomous driving on value of travel time savings: A comparison between current and future preferences, *Transportation Research Part A* 129 p. 155 – 169, published by Elsevier.

Krause, S.; Motamedidehkordi, N.; Hoffmann, S.; Busch, F.; Hartmann, M.; Vortisch, P. (2017): Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur. Berlin: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V (FAT-Schriftenreihe 296).

Krewinkel, A., Tolg, B. u. Fritsche, J. (2011): Online-Lebensmittelhandel und Strategien zur Kontrolle des virtuellen Lebensmittelmarktes. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit [Hrsg.]: *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 2011, 6, 3, Springer, S.395-400.

Krings, M. (2019): Herausforderung für das Supply Chain Management im Omnichannel-Handel. IN: Göpfert, I. (Hrsg.): *Logistik der Zukunft – Logistics for the Future*. Wiesbaden: Springer, 8., aktual. und erw. Aufl., S. 157-180.

Kröger, L., Kuhnimhof, T., Trommer, S. (2018): Does context matter? A comparative study modelling autonomous vehicle impact on travel behaviour for Germany and the USA, Institute of Transport Research, German Aerospace Center, Berlin. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856417301180/pdf?md5=65355d19746c6ea4626a7b1ef219513c&pid=1-s2.0-S0965856417301180-main.pdf>, (09.11.2018).

Laghaei, J., Faghri, A., Li, M. (2015). "Impacts of home shopping on vehicle operations and greenhouse gas emissions: multi-year regional study." *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*.

Lanza, G., Nyhuis, P., Fisel, J., Jacob, A., Nielsen, L., Schmidt, M., Stricker, N. (2018): Wandlungsfähige, menschenzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0 (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften), München: Herbert Utz.

Le Vine, Scott; Zolfaghari, Alireza; Polak, John (2015): Autonomous cars. The tension between occupant experience and intersection capacity. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 52, S. 1–14. DOI: 10.1016/j.trc.2015.01.002.

Lee, D., Jeong, H., Cho, J., Jeong, J., Moon, J. (2015). "Grocery Shopping via T-Commerce in Korea: New Shopping Channel Adoption Behavior Based on Prior E-Commerce Experience." *International Food and Agribusiness Management Review* 18(2).

Leimeister, J. M., Durward, D.; Zogaj, S. (2016): Crowd Worker in Deutschland: Eine empirische Studie zum Arbeitsumfeld auf externen Crowdsourcing-Plattformen. Study 323. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung.

Liedtke, G., Sonntag, H. (2018): Wirkungen verkehrspolitischer Rahmenbedingungen auf den Modal Split am Beispiel Deutschlands. (noch nicht veröffentlicht)

Lim, Y. J., Osman, A., Salahuddin, S. N., Romle, A. R., Abdullah, S. (2016). "Factors Influencing Online Shopping Behavior: The Mediating Role of Purchase Intention." *Procedia Economics and Finance* 35: 401-410.

- Lin, J., Zhou, W. u. Du, L. (2017): Is on-demand same day package delivery service green? In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 61, Elsevier B.V., S. 118-139.
- LINDER, M. u. RENNHAKE, C. (2012): Lebensmittel-Onlinehandel in Deutschland. Reutlinger Diskussionsbeiträge zu Marketing & Management, 2012, 04. <http://hdl.handle.net/10419/60471>, (21.08.2017).
- Liu, Jun; Kockelman, Kara M.; Nichols, Aqshems (2017): Anticipating the emissions impacts of smoother driving by connected and autonomous vehicles, using the MOVES model (Presented at the 96th Annual Meeting of the Transportation Research Board).
- Louw, L., Walker, M. (2018): Design and implementation of a low cost RFID track and trace system in a learning factory. IN: Mourtzis, D., Chryssolouris, G. (Eds.): Advanced Engineering Education & Training for Manufacturing Innovation 8th CIRP Sponsored Conference on Learning Factories (CLF 2018). Procedia Manufacturing, Vol. 23, pp. 255-260. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.026>
- Lu, Q., Tettamanti, T., Hörcher, D., Varga, I. (2020): The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity: an experimental analysis by microscopic traffic simulation. In: Transportation Letters 12, 8, S. 540-549.
- Lucke, D., Görzig, D., Kacir, M., Volkmann, J., Haist, C., Sachsenmaier, M., Rentschler, H. (2014): Strukturstudie. Industrie 4.0 für Baden-Württemberg. Baden Württemberg auf dem Weg zur Industrie 4.0. Fraunhofer Institut IPA. Studie, Bauernhansl, T., Lickefett, M. (Hrsg.) Stuttgart: Fraunhofer IPA.
- Mangiaracina, R., Marchet, G., Perotti, S., Tumino, A. (2015). A review of the environmental implications of B2C e-commerce: a logistics perspective, In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 45, 6, S. 565-591. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-06-2014-0133>.
- Manner-Romberg, H.; Kille, C.; Müller-Steinfahrt, U. (2015): Marktuntersuchung und Entwicklung von Kurier-, Express- und Paketdienstleistungen 2015 / MRU GmbH. Hamburg, Würzburg. – Gutachten.
- Mauro, V., Franco, G. (2004): Using Transport Telematics to Help Developing Countries Achieve a More Sustainable Transport Infrastructure. In: IFAC Proceedings Volumes, 37/19, pp.41-46.
- McFadden, D. (1973): Conditional logit analysis of quantitative choice behavior, In: Frontiers in economics, p. 105-142, Academic Press: New York,
- McKinsey & Company (2016): Delivering Change. Die Transformation des Nutzfahrzeugsektors bis 2025. München.
- Mehlhart, G.; Merz, C.; Akkermans, L.; Jordal-Joergensen, J. (2011): European second-hand car market analysis. Final Report / Öko-Institut. Darmstadt. – Forschungsbericht.
- Mehmann, J., Frehe, V., Teuteberg, F. (2015): Crowd Logistics - A Literature Review and Maturity Model; IN: Kersten, W., Blecker, T., Ringe, C. M. (Hrsg.): Innovations and Strategies for Logistics and Supply Chain. Hamburg International Conference of Logistics (HICL), Berlin: epubli GmbH, S. 117-145.
- MiD 2017 Tabellenband. Mobilität in Deutschland. Tabellarische Grundausswertung. http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Tabellenband_Deutschland.pdf, aufgerufen am 18.08.2019
- Min A-*, H., Jayaraman, V., & Srivastava, R. (1998). Theory and Methodology Combined location-routing problems: A research directions synthesis and future. European Journal of Operational Research, 108, 1-15
- Mineralölwirtschaftsverband e.V. (MWV) (2018): Jährliche Verbraucherpreise für Mineralölprodukte 1950-2018. Online. <https://www.mwv.de/verbraucherpreise/?loc=8>. Version: 2018. – Abgerufen am 09.11.2018.
- Moder, N. (2010): Standard-Vorgehensweise zur Analyse und Optimierung der Distributionslogistik im Bereich Business to Consumer. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, Fakultät Maschinenbau.

- Morganti, E. u. Gonzales-Feliu, J. (2015): City logistics for perishable products. The case of the Parma's Food Hub. In: Case Studies on Transport Policy. 3, 2, Elsevier B.V., S. 120-128.
- Morganti, E., Dablanc, L. u. Fortin, F. (2014): Final deliveries for online shopping: The deployment of pickup point networks in urban and suburban areas. In: Research in Transportation Business & Management, 2014, 11, Elsevier B.V., S. 23-31 -a.
- Morganti, E., Seidel, S., Blanquart, C., Dablanc, L., u. Lenz, B. (2014). The impact of e-commerce on final deliveries: alternative parcel delivery services in France and Germany. In: Transportation Research Procedia, 2014, 4, Elsevier V.V., S. 178-190 -b.
- Morganti, E., Seidel, S., Blanquart, C., Dablanc, L., u. Lenz, B. (2014). "The impact of e-commerce on final deliveries: alternative parcel delivery services in France and Germany." Transportation Research Procedia, 4: 178-190.
- Muley, D., Bunker, J., Ferreira, L. (2009): Investigation into Travel Modes of TOD Users: Impacts of Personal and Transit Characteristics, International Journal of ITS Research, Vol. 7, No. 1, Queensland. URL: <http://www.its-jp.org/journal/papers/63.pdf>
- Müller, S., Wolfermann, A., Burgschweiger (2015): Analysing the connection between gross value added of industries and freight transport demand, ICPLT.
- Murray, C. C. & Chu, G. C. (2015): The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 54, Elsevier B.V., S. 86-109.
- Nagy, G., & Salhi, S. (2007). Location-routing: Issues, models and methods *. Centre for Heuristic Optimisation, Kent Business School, The University of Kent, Canterbury, Kent, U.K.
- Nielsen Company (Germany) GmbH (2012). Food retail sector in Germany – Data base. Online.URL:www.nielsen.com/de/de (state: 2012)
- Notter, B.; Cox, B.; Jamet, M.; Keller, M.; Cox, B. (2019): HBEFA 4.1 Development Report.
- Obermaier, R. (2017). Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe: Strategische und operative Handlungsfelder für Industriebetriebe. In: Obermaier, R. (Hrsg.), Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe (2. Aufl., S. 3-34). Springer Gabler, Wiesbaden.
- Ortúzar, J. D., Willumsen, L. G. (2011): Modelling transport, 4th Edition, published by WILEY, Chichester, West Sussex.
- Ottmann, P. (2010). Abbildung demographischer Prozesse in Verkehrsentstehungsmodellen mit Hilfe von Längsschnittdaten, KIT Scientific Publishing.
- Pålsson, H., Petterson, F., Hiselius, L.W. (2017). Energy consumption in e-commerce versus conventional trade channels - Insights into packaging, the last mile, unsold products and product returns, In: Journal of Cleaner Production, 164, S. 765-778. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.242>.
- Patier, D., David, B., Chalon, R. u. Deslandres, V. (2014): A New Concept for Urban Logistics Delivery Area Booking. In: Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2014, 125, Elsevier B.V. S. 99-110.
- Pehnt, D. M.; Mellwig, P.; Blömer, S.; Hertle, H.; Nast, M.; Oehsen, A. von; Lempik, J.; Langreder, N.; Thamling, N.; Hermelink, D. A.; Offermann, M.; Pannier, P.; Müller, M. (2018): Untersuchung zu Primärenergiefaktoren. Endbericht im Auftrag des BMWi. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu). Prognos AG. Ecofys. dena - Deutsche Energie-Agentur GmbH, Heidelberg, Berlin
- Piendl, R., Matteis, T., Liedtke, G. (2018): A machine learning approach for the operationalization of latent classes in a discrete shipment size choice model. In: Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review.

- Pistorius, J. (2020). Industrie 4.0–Schlüsseltechnologien für die Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Pluta, W. (2015): Daimler investiert in Starship Technologies. URL: <https://www.golem.de/news/zustellroboter-daimler-investiert-in-starship-technologies-1701-125553.html>, (23.03.2018).
- Popovich, Natalie Danielle & Handy, Susan 2015: Downtown, strip centers, and big-box stores: Mode choice by shopping destination type in Davis, California. The journal of transport and land use, Vol. 8, No. 2, pp. 149-170
- Preston, F., Kukrika, N., Matthews, H.S., Jaller Martelo, M.A. (2020). Insights 02: The Carbon Footprint of Retail: ecommerce vs bricks & mortar. Generation Investment Management LLP. <https://www.generationim.com/our-thinking/insights/the-carbon-footprint-of-retail-ecommerce-vs-bricks-mortar/> [30.11.2021]
- Prins, C., & Prodhon, C. (1. 10 2014). A survey of recent research on location-routing problems. European Journal of Operational Research, 238(1), 1-17.
- Prins, C., & Prodhon, C. (2008). A memetic algorithm with population management (MA|PM) for the periodic location-routing problem. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 5296 LNCS, S. 43-57. Springer Verlag.
- Prins, C., Prodhon, C., Ruiz, A., Soriano, P., & Calvo, R. (2007). Solving the capacitated location-routing problem by a cooperative Lagrangean relaxation-granular tabu search heuristic. Transportation Science, 41(4), 470-483.
- PTV Group, TCI Röhling, Mann, H. (2016): Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030, Für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur; Karlsruhe, Berlin, Waldkirch, München
- Punakivi, M. Yrjölä, H. u. Holmström, J. (2001): Solving the last mile issue: reception box or delivery box? In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2001, 31, 6, S. 427-439.
- Ramsauer, C. (2013): Industrie 4.0 – die Produktion der Zukunft. Wingbusiness. Hft. 3.
- Randelhoff, M (2018): Organisatorische, technische und stadträumliche Ansätze zur Bewältigung des steigenden Paketaufkommens im städtischen Umfeld. Abgerufen von <https://www.zukunft-mobilitaet.net/168827/konzepte/organisatorische-technische-und-stadtraeumliche-ansaeetze-zur-bewaeltigung-des-steigenden-paketaufkommens-im-staedtischen-umfeld/> [01.10.2019].
- Randelhoff, M. (2017). Automatisierung des Straßengüterfernverkehrs. <https://www.zukunft-mobilitaet.net/113531/analyse/automatisierung-strassengueterverkehr-selbstfahrende-lkw-autonom-automatisierte-nfz-nutzfahrzeuge/#automatisierte-nfz> [19.03.2018].
- Reinhold, T. (1999): Die Bedeutung des Parksuchverkehrs: eine quantitative Abschätzung am Beispiel von zwei Stadtgebieten in München. In: Internationales Verkehrswesen 51 (6), S. 250–255.
- research, i. (2017). "Einkaufsverhalten im digitalen Zeitalter. Status quo und zukünftige Trends 2017."
- Rickenberg, T. A., u. Breitner, M. H. (2014). Nachhaltigerer Gütertransport—eine Machbarkeitsstudie mit Entscheidungsunterstützungssystem. In: Wirtschaftsinformatik & Management, 2014, 6, 4, S. 52-60.
- Rohm, A. J., Swaminathan, V. (2004). "A typology of online shoppers based on shopping motivations." Journal of Business Research 57: 748-757.
- Roy, D., T. (2017): Industrie 4.0 – Gestaltung cyber-physischer Logistiksysteme zur Unterstützung des Logistikmanagements in der Smart Factory. Dissertation. Berlin: Universitätsverlag TU-Berlin.
- Ruile, H. (2019): Vom Internet der Dinge zum Geschäftsmodell. IN: Göpfert, I (Hrsg.): Logistik der Zukunft – Logistics for the Future (8., aktual. und erw. Aufl.). Wiesbaden: Springer Fachmedien
- Rutter, A., Bierling, D., Lee, D., Morgan, C., u. Warner, J. (2017): How Will E-commerce Growth Impact Our Transportation Network? Texas A&M Transportation Institute, Document No. PRC 17-79 F.

- SAE International (2014): Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. SAE document J3016. issued 2014-01-16. http://standards.sae.org/j3016_201401/.
- Salhi, S., & Rand, G. (24. 3 1989). The effect of ignoring routes when locating depots. *European Journal of Operational Research*, 39(2), 150-156.
- Scania (2015): Platooning saves up to 12 percent fuel. URL: <https://www.scania.com/group/en/platooning-saves-up-to-12-percent-fuel/>, (16.03.2018).
- Scherf, J. (2019): Was ist Logistik 4.0? Alles zum Thema Digitalisierung & Logistik. Abgerufen von <https://www.mm-logistik.vogel.de/was-ist-logistik-40-alles-zum-thema-digitalisierung-logistik-a-692722/> [24.09.2019].
- Schmiechen, F. (2016). Lieferroboter: Hier kommt der ziemlich niedliche Experte für die letzte Meile. <https://www.gruenderszene.de/allgemein/starship-liefer-roboter>, (23.05.2018).
- Schneider, M., & Drexler, M. (1. 12 2017). A survey of the standard location-routing problem. *Annals of Operations Research*, 259(1-2), 389-414.
- Schröder, S., Zilske, M., Liedtke, G. & Nagel, K. (2012). Towards a multi-agent logistics and commercial transport model: The transport service provider's view. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, S. 649–663.
- Schulz, H. (2017). Arbeitstage und Werkstage zwischen dem 1.1.2009 und dem 31.12.2100 für Berlin. Online. <https://www.schnelle-online.info/Tage-bis-zur-Rente-berechnen.html?from=01.01.2009&to=31.12.2100#ergebnis>. Version: 2017. – Abgerufen am 12.07.2017.
- Schwemmer, M. (2016). Top 100 der Logistik. Marktgrößen, Marktsegmente und Marktführer;
- Shladover, Steven; Su, Dongyan; Lu, Xiao-Yun (2012): Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2324 (4), S. 63–70. DOI: 10.3141/2324-08.
- Shobeirinejad, M., Burke, Ma., & Sipe, N. (2012). Analysing retail travel behavior using an Australian data set. *Australasian Transport Research Forum 2012 Proceedings*, 26-28 September 2012, Perth, Australia
- Siemens AG (2017): eHighway: Lösung für den elektrifizierten Straßengüterverkehr, Berlin.
- Simchi-Levi, D. (2000): The Master of Design. An Interview with David Simchi-Levi, In: *Supply Chain Management Review*, 4. Jg., Hft. 5, S. 74-80.
- Slabinac, M. (2015). Innovative solutions for a “Last-Mile” delivery—a European experience. *Business Logistics in Modern Management*.
- Soder, J. (2014). Use Case Production: Von CIM über Lean Production zu Industrie 4.0. In: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (Hrsg.), *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration* (S. 85-102). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Sokol, D. D (2003): Express Delivery and the Postal Sector in the Context of Public Sector Anti-Competitive Practices. In: *Nw. J. Int'l L. & Bus*, 2003, 23, 2, S. 353-381.
- Song, L., Cherrett, T., McLeod, F., & Guan, W. (2009). Addressing the last mile problem: transport impacts of collection and delivery points. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2009, 2097, Elsevier B.V., S. 9-18.
- Sonntag, H., & Liedtke, G. (2015). Studie zu Wirkungen ausgewählter Maßnahmen der Verkehrspolitik auf den Schienengüterverkehr in Deutschland - Modal Split der Transportleistungen und Beschäftigung.

- Spath, D. (2013). Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Studie. In: Spath, D. (Hrsg.), Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Srivastava, R. (1986). Algorithms for solving the location routing problem. The Ohio State University.
- Srivastava, R., & Benton, W. (1990). The location-routing problem: Considerations in physical distribution system design. *Computers and Operations Research*, 17(5), 427-435.
- Statista 2019 (2018). Statistisches Bundesamt; SSP Consult, BMVI; BAG; KBA;. Von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12195/umfrage/anteil-der-lkw-am-gueterverkehr-in-deutschland/> abgerufen
- Statistisches Bundesamt (2008). NST-2007. Einheitliches Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik – 2007. Wiesbaden 2008
- Statistisches Bundesamt (2017). Deutscher Außenhandel. Export und Import im Zeichen der Globalisierung. Ausgabe 2017. Wiesbaden.
- Steck, F., Kolarova, V. (2019). Estimating impact of autonomous driving on value of travel time savings for long-distance trips using revealed and stated preference methods.
- Sterman, J. D. (1984). Appropriate summary statistics for evaluating the historical fit of system dynamics models. In: *Dynamica* 10, Nr. 2, S. 51-66.
- Stich, V., Adema, J., Blum, M., Reschke, J. (2015). Supply Chain 4.0: Logistikdienstleister im Kontext der vierten industriellen Revolution. In: Voß, P., H. (Hrsg.), *Logistik – eine Industrie, die (sich) bewegt* (S. 63–74). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Strategy & PWC. (2016). Truck Study 2016. The Era of Digitized Trucking.
- Sukennik, P., Zeidler, V., et al. (2018): Technical report on data collection and validation. (CoEXist deliverable 2.6). Online abrufbar unter: <https://www.h2020-coexist.eu/>
- Sussman, J. M. (2005): *Perspectives on Intelligent Transportation Systems (ITS)*. New York: Springer Science+Business Media.
- SVI (2015): *Optimale Geschwindigkeiten in Siedlungsgebieten*. Norderstedt: Books on Demand.
- Szimba, E.; Hartmann, M. (2018): *Assessing Travel Time Savings and User Benefits of Automated Driving – A Case Study for a Commuting Relation*. Karlsruhe (working paper).
- ten Hompel, M (2007). Wie das „Internet der Dinge“ die Welt der Logistik verändert. In: Bullinger, H.-J., ten Hompel, M. (Hrsg.): *Internet der Dinge* (S. XXIX-XXXIV). Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Ten Hompel, M., Henke, M. (2014). Logistik 4.0. IN: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration* (S. 615-624). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Ternès, A., Towers, I., u. Jerusel, M. (2015). *Konsumentenverhalten im Zeitalter der Digitalisierung: Trends: E-Commerce, M-Commerce und Connected Retail*. Springer-Verlag, Wiesbaden.
- Thaller, C. (2018): *Strategische Verkehrsprognose – Rückkopplungsansatz einer Makroskopischen Extrapolation mit einer Mikroskopischen Verkehrssimulation*. Doktorarbeit, Technische Universität Dortmund, Fakultät Maschinenbau, Dortmund. DOI: 10.17877/DE290R-19348.
- Tientrakool, Patcharinee; Ho, Ya-Chi; Maxemchuk, Nicholas F. (2011). Highway Capacity Benefits from Using Vehicle-to-Vehicle Communication and Sensors for Collision Avoidance. In: *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2011. 5 - 8 Sept. 2011, San Francisco, California
- Train, K. E. (2009). *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge university press.

- Treiber, M. (2016). Skript zur Vorlesung, Verkehrsökonomie, Methoden und Modelle, Wintersemester 2015/2016. I. f. W. u. V. Technische Universität Dresden. Dresden.
- Treiber, M.; Kesting, A. (Hg.) (2014): Automatic and efficient driving strategies while approaching a traffic light. 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).
- Trommer, S., Kolarova, V., Fraedrich, E., Kröger, L., Kickhöfer, B., Kuhnimhof, T., Lenz, B., Phleps, P. (2016): Autonomous driving, The impact of vehicle automation on mobility behaviour, institute of mobility research, München.
- Tsugawa, S. (2014). Results and issues of an automated truck platoon within the energy ITS project, Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, IEEE, 8-11 June 2014, Dearborn, MI, USA.
- Tsugawa, S., Jeschke, S., u. Shladover, S. E. (2016). A review of truck platooning projects for energy savings. In: IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1, 1, S. 68-77.
- UBA (2016): Wirkungen von Tempo 30 an Hauptverkehrsstraßen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen>.
- UBA (2020): Fahrleistungen, Verkehrsaufwand und „Modal Split“, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#fahrleistung-im-personen-und-guterverkehr>, (02.11.2020).
- UBA (2021): Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. In: Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. Text, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>. (25.03.2021).
- University of California (2017): Truck Platooning. <http://www.path.berkeley.edu/research/connected-and-automated-vehicles/truck-platooning-0>, (16.03.2018).
- Van Loon, P., Deketele, L., Dewaele, J., McKinnon, A., Rutherford, C. (2014). A comparative analysis of carbon emissions from online retailing of fast moving consumer goods, In: Journal of Cleaner Production, 106, S. 478-486. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.060>.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2016): Statusreport Arbeitswelt Industrie 4.0. Düsseldorf.
- Verband der Automobilindustrie (VDA) (2015): Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. Berlin.
- Verl, A., Lechner, A. (2014): Steuerung aus der Cloud. IN: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 234-247.
- Visser, J., Nemoto, T., & Browne, M. (2013): Home delivery and the Impacts on the urban freight transport: A review. Urban areas recent advances in city logistics: Proceedings of the VII international conference on city logistics, June 17–19, Bali, Indonesia.
- Visser, J., Toshinori, N., Browne, M. (2014). "Home Delivery and the Impacts on Urban Freight Transport: A Review." Procedia - Social and Behavioral Sciences 125: 15-27.
- Voccia, S. A., Campbell, A. M., u. Thomas, B. W. (2017). The same-day delivery problem for online purchases. Transportation Science.
- Vogel-Heuser, B. (2014): Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik. IN: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 36-48.

- Völpel, D. (2014): Ein Verkehrsknotenpunkt zum Wohlfühlen. Der Bahnhof von morgen ist vernetzt. IN: Universität Stuttgart (Hrsg.): Digitale Gesellschaft. Forschung Leben. 02/2014. S. 65-71.
- Wannenwetsch, H. (2005): Vernetztes Supply Chain Management. SCM-Integration über die gesamte Wertschöpfungskette. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Waßmann, Y. (2017): Digitalisierung der Transport- und Logistikbranche -Chancen und Risiken von Telematik Anwendungen im Flottenmanagement. IN: Kotzab, H. (Hrsg.): Schriftenreihe des Lehrstuhls für Logistikmanagement, 17, Bremen: Universität Bremen.
- Waymo (2018): Journey. <https://waymo.com/journey/>, (04.06.2018).
- Wegener, D. (2014): Industrie 4.0 – Chancen und Herausforderungen für einen Global Player. IN: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 333-358.
- Weinmann, O., Bitzer, F., Boos, N. u. Burkhardt, M. (2014): LANG-Lkw PERFERNBEDIENUNG RANGIEREN. In: ATZ, 2014, 9, S.12-17.
- Wittenbrink, P. (2014): Transportmanagement: Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe. Wiesbaden : Springer Gabler.
- Wolfermann, Axel (2016) Transport cost: An aggregated model for surface freight transport based on cost components and market segments. Konferenz "Verkehrsökonomik und -politik", 2.-3. Jun. 2016, Berlin
- Wolfond, E. (2003): Tracking- und Tracing der Transportlogistik. Diplomarbeit. Eisenstadt: Diplomatic GmbH.
- Wuttke, W. (2017): Wenn der autonome Starship-Roboter Pakete bringt. <https://www.daimler.com/innovation/next/rollende-lieferboxen.html>, (23.03.2018).
- Wyman, O. (2021). Is E-Commerce good for Europe. Economic and environmental impact study. Executive Summary. S. 1-12. <https://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2021/apr/is-e-commerce-good-for-europe.html>, [30.11.2021]
- Zanker, C. (2018): Branchenanalyse Logistik: Der Logistiksektor zwischen Globalisierung, Industrie 4.0 und Online-Handel. Studie der Hans-Böckler-Stiftung. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf, Bd. 390.
- Zeidler, Verena (2018): Evaluierung und Weiterentwicklung der Simulation autonomen Fahrverhaltens mit der Software PTV Vissim (Masterarbeit). abgerufen aus KIT-repository: <http://ifv.kit.edu/veroeffentlichungen>
- ZF-Zukunftsstudie (2016): ZF-ZUKUNFTSSTUDIE 2016. Die letzte Meile. Friedrichshafen.
- Zhang, L., Matteis, T., Thaller, C., Liedtke, G. (2018): Simulation-based Assessment of Cargo Bicycle and Pick-up Point in Urban Parcel Delivery. In: Procedia Computer Science, 130, S. 18–25.
- Zhang, W., Jenelius, E. u. Ma, X. (2018): Freight transport platoon coordination and departure time scheduling under travel time uncertainty. In: Transportation Research Part E 98, 2017, Elsevier B.V., S. 1-23.
- Zühlke, D. (2013): Die Cloud ist Voraussetzung für Industrie 4.0. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), 25. Juni.

A Anhang

A.1 Modellierungsergebnisse im Personenverkehr

Tabelle 53: Jahresverkehrsleistung und Jahresfahrleistung nach Verkehrsmittel im Basisjahr und in den Szenarien

Verkehrsmittel	Basisjahr 2017		Referenzszenario A: 2030		Referenzszenario A: 2040		Szenario B: 2030		Szenario B: 2040		Szenario B+: 2040		Maximalszenario 1: 2040		Maximalszenario 2a: 2040		Maximalszenario 2b: 2040	
	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil
Ggf. nach Segment																		
zu Fuß	34,11	2,9%	34,17	2,8%	34,22	2,7%	34,00	2,7%	33,18	2,5%	36,29	2,8%	30,42	2,2%	79,83	6,2%	45,18	3,3%
Fahrrad	41,01	3,5%	41,89	3,4%	42,56	3,3%	41,59	3,3%	40,20	3,0%	41,15	3,2%	34,23	2,5%	135,47	10,5%	57,40	4,2%
MIV-Mitfahrenden	238,29	20,5%	252,14	20,5%	263,30	20,7%	257,27	20,6%	277,25	20,8%	276,89	21,3%	293,87	21,0%	-	-	214,67	15,7%
MIV-Fahrenden - Klein	121,39	18,9%	123,88	18,9%	124,05	18,7%	130,55	19,1%	146,39	19,0%	122,55	19,1%	172,90	18,8%	-	-	93,77	15,9%
MIV-Fahrenden – Mittel	233,86	36,3%	241,56	36,8%	243,94	36,7%	251,58	36,7%	282,54	36,7%	234,81	36,6%	341,70	37,2%	-	-	191,00	32,5%

Verkehrsmittel	Basisjahr 2017		Referenzszenario A: 2030		Referenzszenario A: 2040		Szenario B: 2030		Szenario B: 2040		Szenario B+: 2040		Maximalszenario 1: 2040		Maximalszenario 2a: 2040		Maximalszenario 2b: 2040	
MIV-FahrerInnen - Groß	288,23	44,8%	291,62	44,4%	296,46	44,6%	302,67	44,2%	340,53	44,3%	284,39	44,3%	405,05	44,0%	-	-	236,09	40,1%
MIV-FahrerInnen - Gesamt	643,49	55,3%	657,06	53,5%	664,45	52,2%	684,81	54,8%	769,46	57,8%	641,75	49,3%	919,65	65,9%	-	-	588,49	42,9%
ÖPNV - Bus	63,45	30,5%	73,67	30,5%	82,93	30,9%	72,13	31,0%	70,24	33,4%	57,91	29,4%	44,47	37,6%	121,44	16,2%	59,18	18,9%
ÖPNV - Bahn	41,55	20,0%	49,63	20,5%	55,54	20,7%	48,85	21,0%	49,22	23,4%	37,31	18,9%	27,84	23,5%	67,54	9,0%	48,79	15,6%
ÖV - Fernbus	32,16	15,5%	38,56	15,9%	43,09	16,1%	36,50	15,7%	35,05	16,7%	36,61	18,6%	20,51	17,3%	230,03	30,6%	77,50	24,7%
ÖV - Fernzug	52,38	25,2%	59,14	24,5%	63,94	23,8%	54,96	23,6%	38,46	18,3%	47,52	24,1%	15,04	12,7%	309,89	41,2%	111,40	35,6%
ÖV - Gesamt	207,79	17,8%	241,88	19,7%	268,11	21,1%	232,73	18,6%	210,43	15,8%	196,91	15,1%	118,27	8,5%	751,77	58,2%	313,32	22,9%
ACS/ARS -	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	109,38	8,4%	-	-	324,50	25,1%	151,69	11,1%

Ver- kehrs- mittel	Basisjahr 2017		Referenzszena- rio A: 2030		Referenzszena- rio A: 2040		Szenario B: 2030		Szenario B: 2040		Szenario B+: 2040		Maximalszena- rio 1: 2040		Maximalszena- rio 2a: 2040		Maximalszena- rio 2b: 2040	
Ver- kehrs- leis- tung																		
ACS/A RS - Fahr- leis- tung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90,34	-	-	-	294,1 2	-	123,5 1	-
Summ e	1164, 68	100,0 %	1227, 13	100,0 %	1272, 64	100,0 %	1250, 40	100,0 %	1330, 53	100,0 %	1302, 36	100,0 %	1396, 45	100,0 %	1291, 57	100,0 %	1370, 75	100,0 %

Tabelle 54: Jahresfahrleistung nach Streckentyp im Basisjahr und in den Szenarien

Streckentyp	Basisjahr 2017		Referenzszenario A: 2030		Referenzszenario A: 2040		Szenario B: 2030		Szenario B: 2040		Szenario B+: 2040		Maximalszenario 1: 2040		Maximalszenario 2a: 2040		Maximalszenario 2b: 2040	
	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil	Mrd. km	Anteil
Autobahn - MIV-FahrerInnen	173,95	100,0%	181,68	100,0%	185,70	100,0%	192,44	100,0%	229,58	100,0%	214,19	97,5%	281,66	100,0%	-	-	176,08	92,0%
Autobahn - ACS/ARS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,41	2,5%	-	-	39,56	100,0%	15,39	8,0%
Autobahn - Gesamt	173,95	27,0%	181,68	27,7%	185,70	27,9%	192,44	28,1%	229,58	29,8%	219,60	30,0%	281,66	30,6%	39,56	13,5%	191,47	26,9%
innerorts - MIV-FahrerInnen	177,55	100,0%	179,97	100,0%	179,58	100,0%	186,30	100,0%	202,57	100,0%	147,80	74,6%	246,45	100,0%	-	-	133,34	69,4%
innerorts - ACS/ARS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50,42	25,4%	-	-	100,45	100,0%	58,86	30,6%

inner- orts - Gesamt	177,5 5	27,6%	179,9 7	27,4%	179,5 8	27,0%	186,3 0	27,2%	202,5 7	26,3%	198,2 2	27,1%	246,4 5	26,8%	100,4 5	34,1%	192,2 0	27,0%
außer- orts - MIV- Fahre- rInnen	291,9 8	100,0 %	295,4 1	100,0 %	299,1 7	100,0 %	306,0 7	100,0 %	337,3 1	100,0 %	279,7 6	89,0%	391,5 4	100,0 %	-	-	279,0 8	85,0%
außer- orts - ACS/AR S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34,51	11,0%	-	-	154,1 0	100,0 %	49,25	15,0%
außer- orts - Gesamt	291,9 8	45,4%	295,4 1	45,0%	299,1 7	45,0%	306,0 7	44,7%	337,3 1	43,8%	314,2 7	42,9%	391,5 3	42,6%	154,1 0	52,4%	328,3 3	46,1%
Summe	643,4 9	100,0 %	657,0 6	100,0 %	664,4 5	100,0 %	684,8 1	100,0 %	769,4 6	100,0 %	732,0 9	100,0 %	919,6 5	100,0 %	294,1 2	100,0 %	712,0 0	100,0 %

A.2 Ergebnisse der Netzmodellierung mit PTV Validate

Abbildung 88: Belastungsänderung im Güterverkehr für die Szenarien 2040 A und B im Vergleich zu 2017

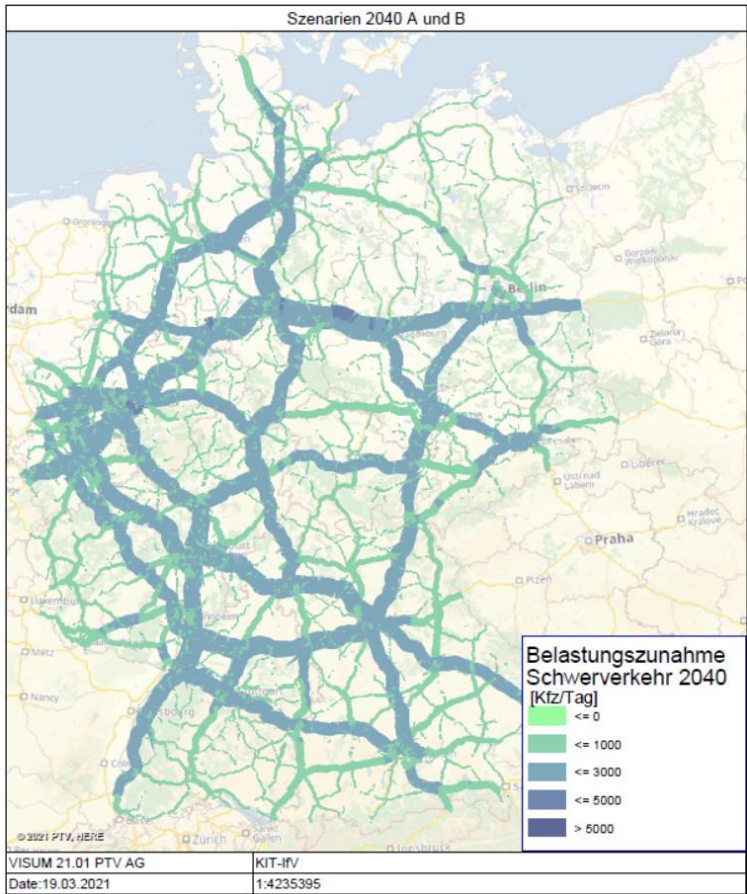


Abbildung 89: Belastungsänderung im Personenverkehr 2040 A im Vergleich zu 2017

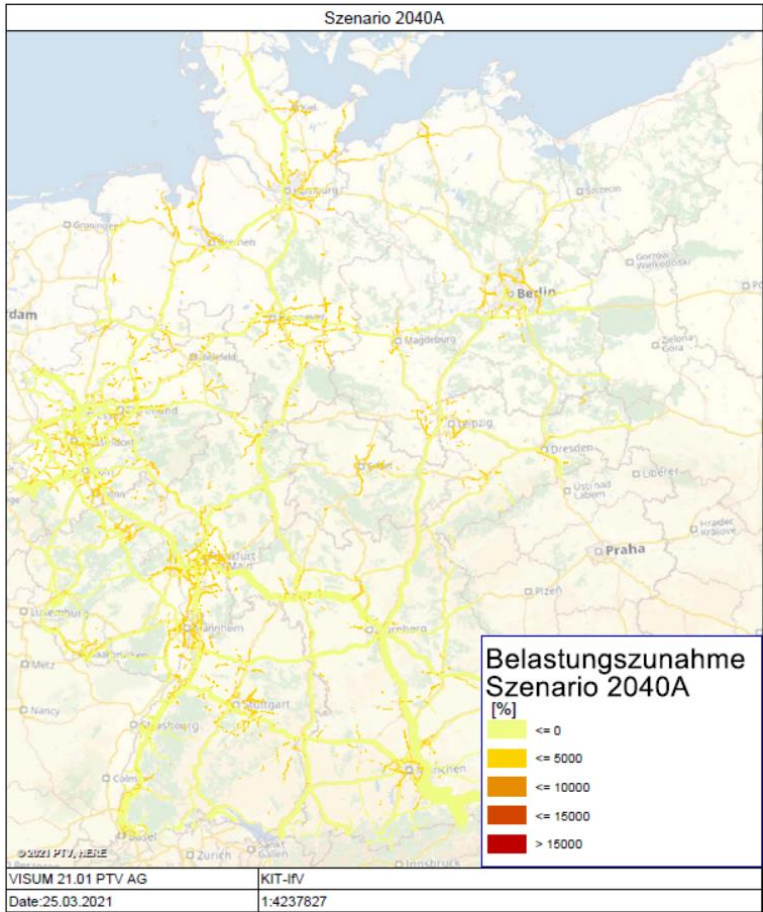


Abbildung 90: Belastungsänderung im Personenverkehr 2040 B im Vergleich zu 2017

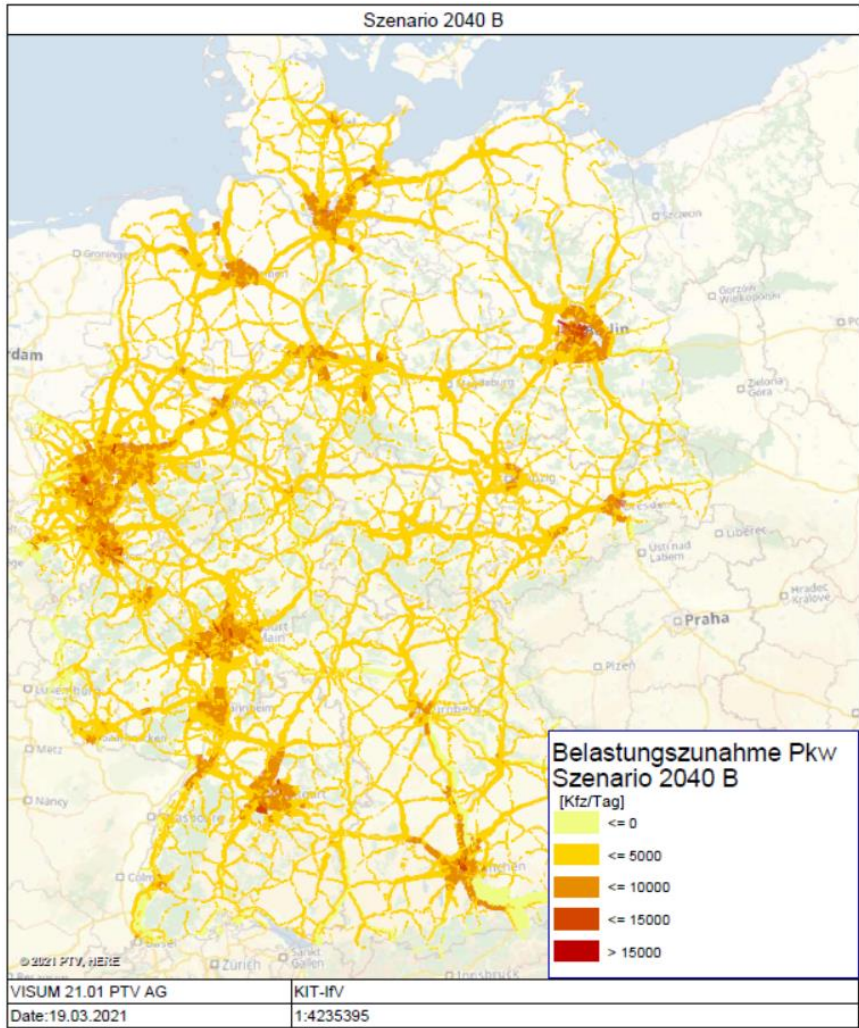


Abbildung 91: Belastungsänderung im Personenverkehr Maximalszenario 2b im Vergleich zu 2017

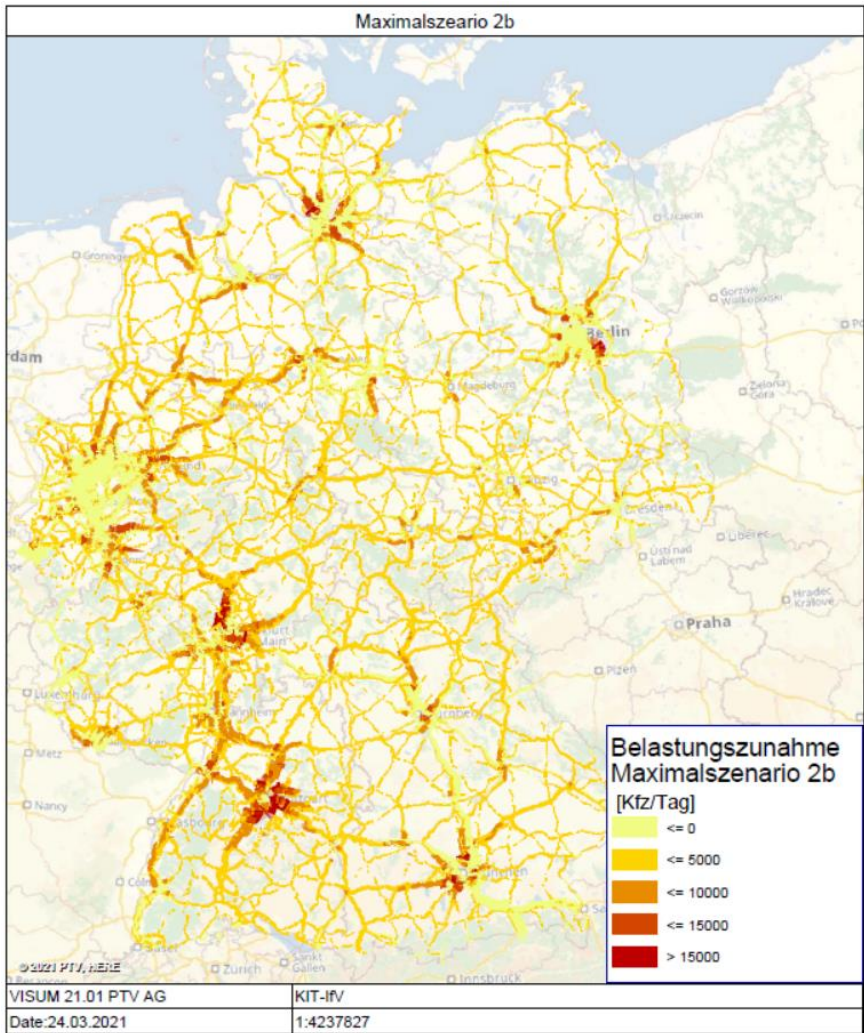


Abbildung 92: Streckenauslastung im Basisfall 2017

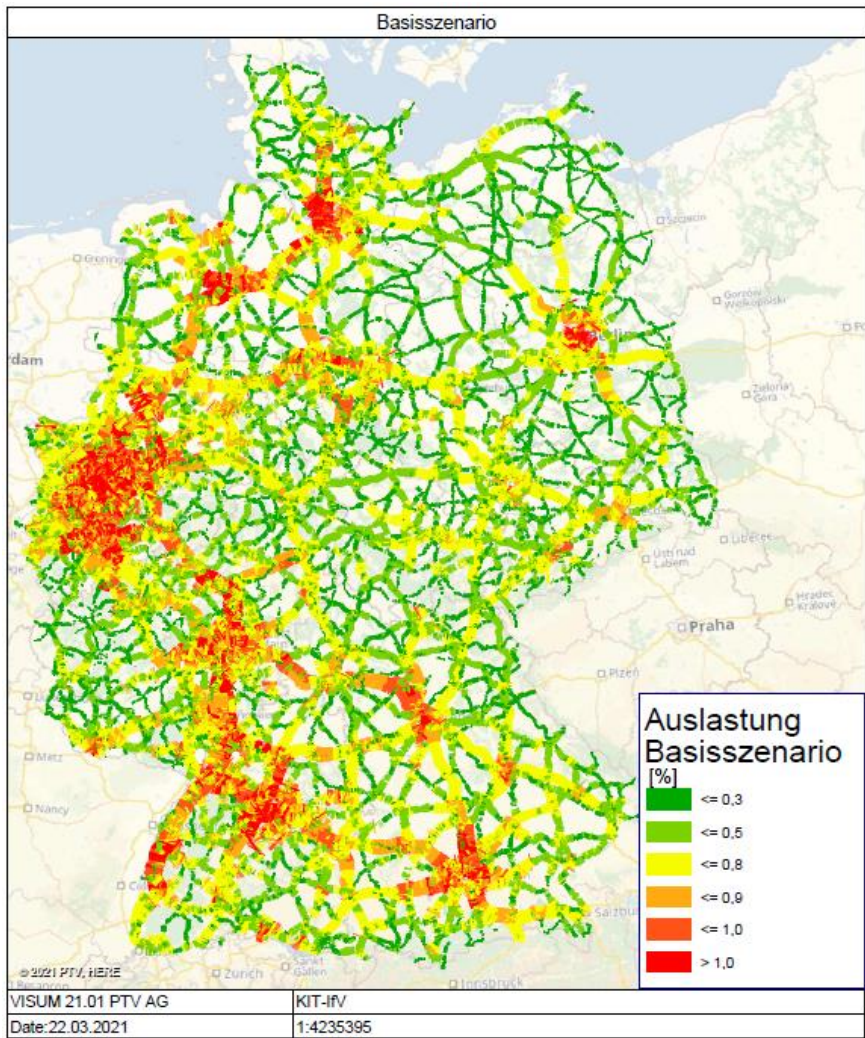


Abbildung 93: Streckenauslastung im Szenario 2040 A

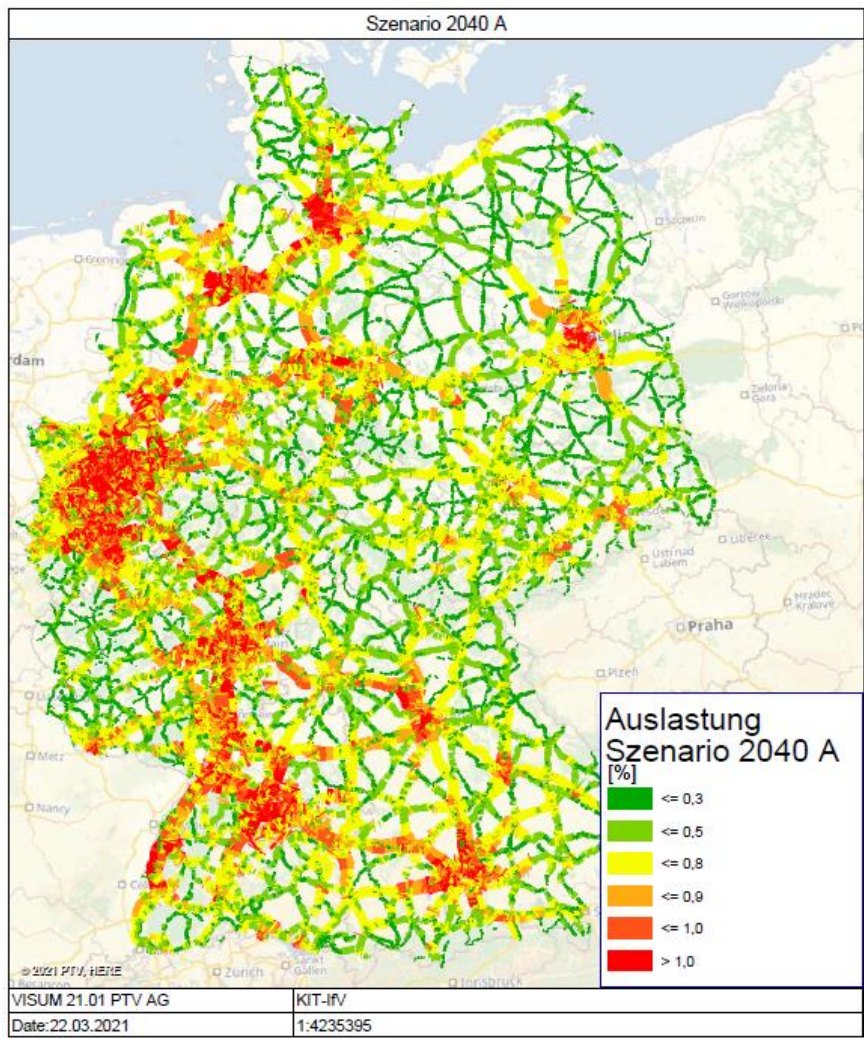


Abbildung 94: Streckenauslastung im Szenario 2040 B

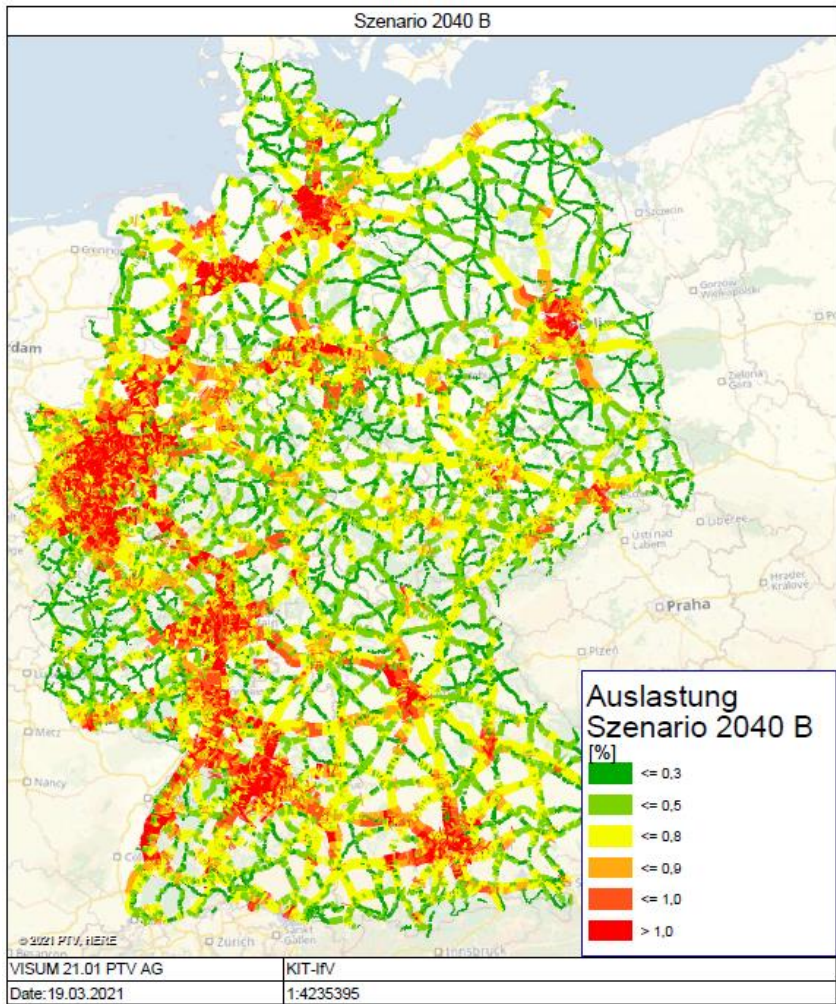
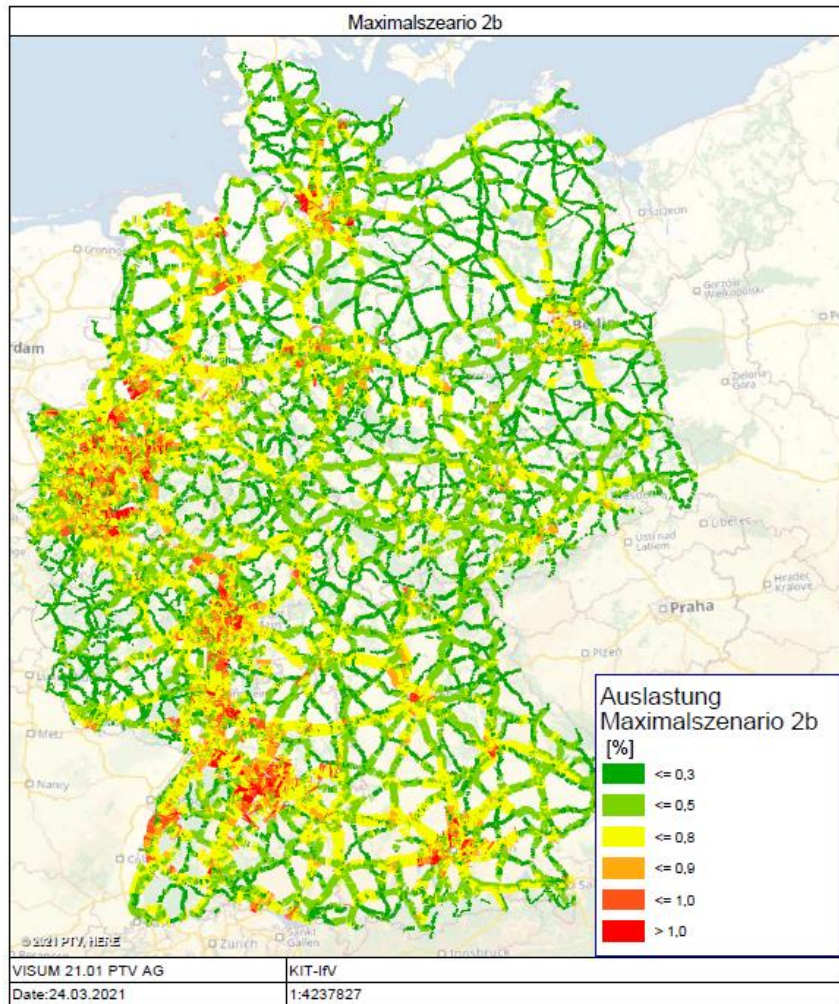


Abbildung 95: Streckenauslastung im Maximalszenario 2b



A.3 Fragebogen Digitalisierungsstudie

Themen:

- ▶ Verkehrsmittelnutzung und Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln
- ▶ Persönlicher Einkaufsverkehr
- ▶ Interneteinkäufe
- ▶ Lieferung und Versand
- ▶ Soziodemografie

Einleitung und Screening		
	Alle	In dieser Befragung für das Umweltbundesamt geht es um Ihr Mobilitätsverhalten und die Häufigkeit, mit der Sie Einkäufe sowohl im Handel als auch über das Internet durchführen. Diese Befragung wird vom Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR) im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt. • Das Beantworten des Fragebogens dauert ca. 15 Minuten. • Die Teilnahme an der Studie ist selbstverständlich freiwillig, aber sehr wichtig für ein zuverlässiges Gesamtbild. • Alle Daten werden ausschließlich in anonymisierter Form ausgewertet. • Im Rahmen dieser Studie werden insgesamt 1.000 Personen befragt.
S1	Alle	Können Sie uns zunächst bitte sagen, wie alt Sie sind? numerisch: max. 110 <i>Prog: Wenn Person < 18 Jahre -> Ende Interview und folgenden Text einblenden:</i> Für diese Studie werden nur Personen ab 18 Jahren gesucht. Sie können daher leider nicht teilnehmen. Wir bedanken uns herzlich für Ihre Teilnahmebereitschaft!
Verkehrsmittelnutzung / Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln		
V1	Alle	Besitzen Sie einen Pkw-Führerschein? 1: ja 2: nein 8: weiß nicht 9: keine Angabe
V2_1-4	Alle	Bei den folgenden Fragen geht es um Ihr Mobilitätsverhalten.

	<i>Items a-d randomisieren, sofern technisch umsetzbar</i>	Wie häufig nutzen Sie die unten genannten Verkehrsmittel für Ihre alltäglichen Wege in Ihrer Region? a: Fahrrad b: Auto (Fahrer, Mitfahrer, auch Taxi) c: Bus und/oder Bahn (Öffentliche Verkehrsmittel) d: Wege ausschließlich zu Fuß (keine Wege zum Auto, zur Bus-/Bahnhofstation) e: Sonstige Verkehrsmittel: _____ <i>Anwortskala</i> 1: täglich bzw. fast täglich 2: an 1-3 Tagen pro Woche 3: an 1-3 Tagen pro Monat 4: seltener als monatlich 5: nie bzw. fast nie 6: habe kein solches Verkehrsmittel (<i>PROG: nur bei Item 1 und 2</i>) 8: weiß nicht 9: keine Angabe
V3	<i>Alle</i>	Wie viele Autos gibt es in Ihrem Haushalt? Gemeint sind auch Fahrzeuge wie Dienstwagen oder Leasing-Fahrzeuge, die Ihrem Haushalt dauerhaft auch privat zur Verfügung stehen. 0: kein Auto 1: ein Auto 2: zwei Autos 3: drei oder mehr Autos 8: weiß nicht 9: keine Angabe
Persönlicher Einkaufsverkehr		
E1	<i>alle</i>	Wie häufig gehen Sie in die entsprechenden Geschäfte, um folgende Produkte einzukaufen? a: Lebensmittel b: Drogerieartikel, Kosmetik und Parfüm c: Bekleidung, Schuhe und Accessoires d: Bücher, Schreibwaren und Bürobedarf e: Unterhaltungselektronik/Elektronikartikel, Telekommunikation, Handy und Zubehör f: Medikamente, Arzneimittel g: Haushaltswaren, Spielwaren h: Möbel, Haushaltsgeräte (u. a. Kühlschrank etc.) i: Heimwerken und Garten, Auto und Motorrad/Zubehör j: Sonstige: _____ <i>Anwortskala</i>

		1: Täglich 2: an 1-3 Tagen pro Woche 3: an 1-3 Tagen pro Monat 4: an 1-3 Mal im halben Jahr 5: Seltener oder nie 8: weiß nicht 9: keine Angabe
E2_a-j	$E1_a < 5$ oder $E1_b < 5$ oder $E1_c < 5$ oder $E1_j < 5$ <i>Items 1-4 randomisieren, sofern technisch umsetzbar</i>	Welche Verkehrsmittel nutzen Sie in der Regel auf dem Weg zum Einkaufen Ihrer Produkte? Bitte geben Sie jeweils das am häufigsten verwendete Verkehrsmittel für den entsprechenden Weg an. a: E1_a und/oder b: E1_b und/oder c: E1_c und/oder j: E1_j 1: Fahrrad 2: Auto (Fahrer, Mitfahrer, auch Taxi) 3: Bus und/oder die Bahn (Öffentliche Verkehrsmittel) 4: Wege ausschließlich zu Fuß (keine Wege zum Auto, zur Bus-/Bahnhofstation) 5: Sonstige Verkehrsmittel: _____ 998: weiß nicht 999: keine Angabe
E3_a-j	$E1_a < 5$ oder $E1_b < 5$ oder $E1_c < 5$ oder $E1_j < 5$	Welche Entfernung müssen Sie normalerweise aus zurücklegen, um Ihre Einkäufe zu tätigen? Sagen Sie uns zudem bitte, wie viel Zeit Sie benötigen, um an den jeweiligen Einkaufsort zu gelangen. Wir meinen hier die einfache Strecke, also nur z.B. den Hinweg. Wenn Sie es nicht genau wissen, schätzen Sie bitte. Wenn Sie verschiedene Geschäfte für Ihre Einkäufe nutzen, geben Sie die Entfernung und Dauer bitte für das am häufigsten aufgesuchte Geschäft an. Falls Sie Ihre Einkäufe immer mit anderen Wegen kombinieren (z. B. Einkauf auf dem Rückweg von der Arbeit), dann schätzen Sie bitte die zusätzliche Strecke, die Sie durch den Einkauf zurücklegen. a: E1_a und/oder b: E1_b und/oder c: E1_c und/oder j: E1_j 1: Entfernung zur Einkaufsstätte (km): ____ numerischer Wert 2: Zeit in Minuten: ____ numerischer Wert

Interneteinkäufe		
01_a-j	alle	Haben Sie eines der nachfolgenden Produkte in den letzten drei Monaten per Internet gekauft? a: Lebensmittel b: Drogerieartikel, Kosmetik und Parfüm c: Bekleidung, Schuhe und Accessoires d: Bücher, Schreibwaren und Bürobedarf e: Unterhaltungselektronik/Elektronikartikel, Telekommunikation, Handy und Zubehör f: Medikamente, Arzneimittel g: Haushaltswaren, Spielwaren h: Möbel, Haushaltsgeräte (u. a. Kühlschrank etc.) i: Heimwerken und Garten, Auto und Motorrad/Zubehör j: Sonstige: _____ 1: ja 0: nein 98: weiß nicht 99: keine Angabe
02_a-j	01_a = 1 oder 01_b = 1 oder 01_c = 1 oder ... 01_j = 1	Bitte schätzen Sie, wie viele einzelne Lieferungen von der jeweiligen Produktgruppe Sie in den letzten drei Monaten über das Internet bestellt haben. a: 01_a und/oder b: 01_b und/oder c: 01_c und/oder ... j: 01_j = 1 1: Anzahl Lieferungen: ____ numerischer Wert, Max. = 90 98: weiß nicht 99: keine Angabe
03_1-4	01_a = 1 oder 01_b = 1 oder 01_c = 1 oder ... 01_j = 1 <i>Frage nur anzeigen, wenn irgendwo bei 01_a bis 01_j mit Ja (1) geantwortet wird</i>	Wie haben Sie Ihre im Internet gekauften Produkte in der Regel ausgewählt? Bitte kreuzen Sie nur die Antwortmöglichkeit an, die am ehesten auf Sie zutrifft. 1: Ich habe das Produkt ausschließlich im Internet recherchiert und ausgesucht. 2: Ich habe das Produkt vorher im Geschäft angesehen. 3: Ich habe im Internet recherchiert UND das Produkt im Geschäft angesehen. 4: Ich wusste genau, was ich kaufen möchte und brauchte im Vorfeld keine weiteren Informationen. 98: weiß nicht 99: keine Angabe

Lieferung und Versand <i>01_a = 1 oder</i> <i>01_b = 1 oder</i> <i>....</i> <i>bis 01_j = 1</i> → Fragekomplex nur anzeigen, wenn irgendwo bei 01_a bis 01_j mit Ja (1) geantwortet wird		
L1_1-5		Welche Versandarten nutzen Sie für Ihre im Internet getätigten Bestellungen? Sie können dazu gerne mehrere Antwortmöglichkeiten auswählen. 1: Standardversand (Lieferung 1-3 Werktage nach Versand) 2: Premiumversand (am nächsten Tag) 3: Same-Day-Lieferung (Lieferung am Bestelltag (meistens) zwischen 18 und 22 Uhr) 4: Instantversand (Lieferung innerhalb von 90 Minuten) 5: Expressversand (Lieferung zu einem ausgewählten Zeitfenster oder Zeitpunkt) 8: weiß nicht 9: keine Angabe
L2_1-6	<i>L1>1 oder</i> <i>L<8</i>	Welches Zeitfenster ist Ihnen für die Zustellung von Paketen am liebsten? Bitte kreuzen Sie nur <u>eine</u> Antwortmöglichkeit an. 1: Vormittags (8 bis 12 Uhr) 2: Mittags (12 bis 14 Uhr) 3: Nachmittags (14 bis 18 Uhr) 4: Abends (18 bis 22 Uhr) 5: Das Zeitfenster ist egal. 6: Sonstiges: _____ 8: weiß nicht 9: keine Angabe
L3_1-6	<i>L1>1 oder</i> <i>L<8</i> <i>und</i> <i>L2=1 oder</i> <i>L2=2 oder</i> <i>L2=3 oder</i> <i>L2=4 oder</i> <i>L2=6</i>	Wie viel wären Sie grundsätzlich bereit zusätzlich zum normalen Preis zu zahlen, um eine Lieferung in dem genannten Zeitfenster zu erhalten? Bitte kreuzen Sie nur <u>eine</u> Antwortmöglichkeit an. 1: Gar nichts 2: unter 1 Euro 3: 1 bis unter 2,50 Euro 4: 2,50 bis unter 5 Euro 5: 5 bis unter 7,50 Euro 6: 7,50 bis unter 10 Euro 7: 10 Euro und mehr 98: weiß nicht 99: keine Angabe

L4_1-8		Welchen der folgenden Zustellorte nutzen Sie in der Regel für Ihre Bestellungen? Bitte kreuzen Sie nur <u>eine</u> Antwortmöglichkeit an. Wenn Sie mehrere Zustellorte verwenden, kreuzen Sie bitte den am häufigsten genutzten an. 1: Private Anschrift (Wohnort) 2: Postfiliale 3: Paketshop 4: Paketstationen 5: Zustellung zum Nachbarn im Fall, dass keiner zum Zustellzeitpunkt zuhause ist 6: Mit dem Paketdienstleister (z.B. DHL, Hermes oder UPS) vereinbarter Ablageort 7: Arbeitsplatz 8: Sonstiges: _____ 8: weiß nicht 9: keine Angabe
L5_1-6	L4 = 1	Gerade wird seitens der Logistikdienstleister diskutiert, die Lieferung an die private Anschrift (Wohnort) von den Kunden bezahlen zu lassen. Wie viel wären Sie bereit zusätzlich zum normalen Preis zu zahlen, damit eine Lieferung trotzdem an Ihre private Anschrift geschickt wird? Bitte kreuzen Sie nur <u>eine</u> Antwortmöglichkeit an. 1: Gar nichts 2: unter 1 Euro 3: 1 bis unter 2,50 Euro 4: 2,50 bis unter 5 Euro 5: 5 bis unter 7,50 Euro 6: 7,50 bis unter 10 Euro 7: 10 Euro und mehr 98: weiß nicht 99: keine Angabe
L6_1-5	L4 = 1	Falls Sie einen Zustellungsversuch des Logistikdienstleisters zuhause verpasst haben, wohin wird Ihnen das Paket in der Regel zugestellt? Bitte kreuzen Sie nur <u>eine</u> Antwortmöglichkeit an. 1: Postfiliale 2: Paketshop 3: Paketstationen 4: Zustellung zum Nachbarn 5: Sonstiges: _____ 8: weiß nicht 9: keine Angabe

L7	L4 = 2	Wie weit ist Ihre bevorzugt genutzte Postfiliale von Ihrem Wohnort entfernt? Wir meinen hier die einfache Strecke, also nur z.B. den Hinweg. Wenn Sie es nicht genau wissen, schätzen Sie bitte. Angabe in km: ____ 998: weiß nicht 999: keine Angabe
L8_1-5	L4 = 2 <i>Items 1-4 randomisieren, sofern technisch umsetzbar</i>	Mit welchem Verkehrsmittel holen Sie in der Regel Ihre Pakete von der bevorzugt genutzten Postfiliale ab? Bitte geben Sie jeweils das am häufigsten verwendete Verkehrsmittel für den entsprechenden Weg an. 1: Fahrrad 2: Auto (Fahrer, Mitfahrer, auch Taxi) 3: Bus und/oder die Bahn (Öffentliche Verkehrsmittel) 4: Wege ausschließlich zu Fuß (keine Wege zum Auto, zur Bus-/Bahnhofstation) 5: Sonstige Verkehrsmittel: _____ 8: weiß nicht 9: keine Angabe
L9_1-2	L4 = 2	Verbinden Sie das Abholen Ihrer Pakete von der Postfiliale mit anderen Erledigungen, z. B. Einkaufen, Freizeitaktivitäten, Behördengängen oder ihrem Arbeitsweg? 1: Ja 2: Nein 8: weiß nicht 9: keine Angabe
L10_1-5	L4 = 2 und L9 = 1	Mit welchen Erledigungen verbinden Sie das Abholen Ihrer Pakete von der Postfiliale? Sie können dazu gerne mehrere Antwortmöglichkeiten auswählen. 1: Einkaufen 2: Freizeit 3: Arbeit 4: Ausbildung 5: Sonstige: _____ 8: weiß nicht 9: keine Angabe
L11	L4 = 3	Wie weit ist Ihr bevorzugt genutzter Paketshop von Ihrem Wohnort entfernt? Wir meinen hier die einfache Strecke, also nur z.B. den Hinweg. Wenn Sie es nicht genau wissen, schätzen Sie bitte. Angabe in km: ____ 998: weiß nicht 999: keine Angabe

L12_1-5	L4 = 3 <i>Items 1-4 randomisieren, sofern technisch umsetzbar</i>	Mit welchem Verkehrsmittel holen Sie in der Regel Ihre Pakete an dem Paketshop ab? Bitte geben Sie jeweils das am häufigsten verwendete Verkehrsmittel für den entsprechenden Weg an. 1: Fahrrad 2: Auto (Fahrer, Mitfahrer, auch Taxi) 3: Bus und/oder die Bahn (Öffentliche Verkehrsmittel) 4: Wege ausschließlich zu Fuß (keine Wege zum Auto, zur Bus-/Bahnhofstation) 5: Sonstige Verkehrsmittel: _____ 8: weiß nicht 9: keine Angabe
L13_1-2	L4 = 3	Verbinden Sie das Abholen Ihrer Pakete vom Paketshop mit anderen Erledigungen, z. B. Einkaufen, Freizeitaktivitäten, Behördengängen oder ihrem Arbeitsweg? 1: Ja 2: Nein 8: weiß nicht 9: keine Angabe
L14	L4 = 3 und L13 = 1	Mit welchen Erledigungen verbinden Sie das Abholen Ihrer Pakete vom Paketshop? Sie können dazu gerne mehrere Antwortmöglichkeiten auswählen. 1: Einkaufen 2: Freizeit 3: Arbeit 4: Ausbildung 5: Sonstige: _____ 8: weiß nicht 9: keine Angabe
L15	L4 = 4	Wie weit ist Ihre bevorzugt genutzte Paketstation von Ihrem Wohnort entfernt? Wir meinen hier die einfache Strecke, also nur z.B. den Hinweg. Wenn Sie es nicht genau wissen, schätzen Sie bitte. Angabe in km: _____ 998: weiß nicht 999: keine Angabe
L16_1-5	L4 = 4 <i>Items 1-4 randomisieren, sofern technisch umsetzbar</i>	Mit welchem Verkehrsmittel holen Sie in der Regel Ihre Pakete an der bevorzugt genutzten Paketstation ab? Bitte geben Sie jeweils das am häufigsten verwendete Verkehrsmittel für den entsprechenden Weg an. 1: Fahrrad 2: Auto (Fahrer, Mitfahrer, auch Taxi) 3: Bus und/oder die Bahn (Öffentliche Verkehrsmittel)

		4: Wege ausschließlich zu Fuß (keine Wege zum Auto, zur Bus-/Bahnhofstation) 5: Sonstige Verkehrsmittel: _____ 8: weiß nicht 9: keine Angabe
L17_1-2	$L4 = 4$	Verbinden Sie das Abholen Ihrer Pakete aus der Paketstation mit anderen Erledigungen, z.B. Einkaufen, Freizeitaktivitäten, Behördengängen oder ihrem Arbeitsweg? 1: Ja 2: Nein 8: weiß nicht 9: keine Angabe
L18_1-5	$L4 = 4$ und $L17 = 1$	Mit welchen Erledigungen verbinden Sie das Abholen Ihrer Pakete aus der Paketstation? Sie können dazu gerne mehrere Antwortmöglichkeiten auswählen. 1: Einkaufen 2: Freizeit 3: Arbeit 4: Ausbildung 5: Sonstige: _____ 8: weiß nicht 9: keine Angabe
L19		Sie haben zuvor angegeben, in den letzten drei Monaten „Summe der Lieferungen aus O2“ Lieferungen Ihrer über das Internet bestellten Produkten erhalten zu haben. Wie viele dieser Lieferungen haben Sie ganz oder zum Teil wieder zurückgeschickt? Anzahl der Rücksendungen: _____ numerischer Wert; Maximal: „Summe der Lieferungen aus O2“ 998: weiß nicht 999: keine Angabe
L20_1-4	$L19 > 0$	Wo geben Sie Ihre Rücksendungen in der Regel auf? Bitte kreuzen Sie nur <u>eine</u> Antwortmöglichkeit an. 1: Postfiliale 2: Paketshop 3: Paketstationen 4: Abholen lassen bei privater Anschrift (Wohnort) 5: Sonstige: _____ 8: weiß nicht 9: keine Angabe

L21	<i>L19>0</i> <i>und</i> <i>L20=1 oder L20=2 oder L20=3 oder L20=5</i>	Welche Strecke müssen Sie in der Regel zurücklegen, um Ihre Rücksendung aufzugeben? Wir meinen hier die einfache Strecke, also nur z.B. den Hinweg. Wenn Sie es nicht genau wissen, schätzen Sie bitte. Angabe in km: ____ <i>Prog. Max = 50</i> 98: weiß nicht 99: keine Angabe
L22_1-5	<i>L19>0</i> <i>und</i> <i>L20=1 oder L20=2 oder L20=3 oder L20=5</i> <i>Items 1-4 randomisieren, sofern technisch umsetzbar</i>	Welches Verkehrsmittel nutzen Sie in der Regel, wenn Sie eine Rücksendung abgeben? Bitte geben Sie jeweils das am häufigsten verwendete Verkehrsmittel für den entsprechenden Weg an. 1: Fahrrad 2: Auto (Fahrer, Mitfahrer, auch Taxi) 3: Bus und/oder die Bahn (Öffentliche Verkehrsmittel) 4: Wege ausschließlich zu Fuß (keine Wege zum Auto, zur Bus-/Bahnhofstation) 5: Sonstige Verkehrsmittel: _____ 8: weiß nicht 9: keine Angabe
L23_1-2	<i>L19>0</i> <i>und</i> <i>L20=1 oder L20=2 oder L20=3 oder L20=5</i>	Verbinden Sie das Abgeben Ihrer Rücksendungen mit anderen Erledigungen, z.B. Einkaufen, Freizeitaktivitäten, Behördengängen oder ihrem Arbeitsweg? 1: Ja 2: Nein 8: weiß nicht 9: keine Angabe
L24_1-5	<i>L19>0</i> <i>und</i> <i>L20=1 oder L20=2 oder L20=3 oder L20=5</i> <i>und</i> <i>L23=1</i>	Mit welchen Erledigungen verbinden Sie das Abgeben Ihrer Rücksendungen? Sie können dazu gerne mehrere Antwortmöglichkeiten auswählen. 1: Einkaufen 2: Freizeit 3: Arbeit 4: Ausbildung 5: Sonstige: _____ 8: weiß nicht 9: keine Angabe

L25		Wie viel wären Sie bereit zusätzlich zum normalen Preis zu zahlen, um die folgenden alternativen Bestelloptionen auswählen zu können? a: Bestellung in Teillieferungen zur schnellst möglichen Lieferung b: Bündelung einzelner Teillieferungen zu einem gemeinsamen Liefertermin c: Nachhaltige Verpackung (Mehrwegverpackung) d: Klimaneutrale Anlieferung (Lieferung nur mit Lastenfahrrädern bzw. Elektrofahrzeugen oder CO₂-Kompensation) Hinweis für technische Umsetzung: nach den Kategorien a-f jeweils ein Dropdown-Menü zur Auswahl der folgenden Antwortmöglichkeiten: 1: Gar nichts 2: unter 1 Euro 3: 1 bis unter 2,50 Euro 4: 2,50 bis unter 5 Euro 5: 5 bis unter 7,50 Euro 6: 7,50 bis unter 10 Euro 7: 10 Euro und mehr 98: weiß nicht 99: keine Angabe
Soziodemografie		
S2	Alle	Abschließend haben wir einige Fragen für die Statistik. Sind Sie 1: eine Frau 2: ein Mann 9: keine Angabe
S3	Alle	Welche der Aussagen zur Tätigkeit trifft auf Sie am besten zu? 1: Vollzeit berufstätig 2: Teilzeit berufstätig (11 bis unter 35 Stunden pro Woche) 3: Auszubildende(r) 4: Schüler(in) / Student(in) 5: zur Zeit arbeitslos / vorübergehend freigestellt 6: in Mutterschafts-, Erziehungsurlaub, Elternzeit oder sonstiger Beurlaubung 7: Hausmann/Hausfrau 8: Rentner(in), Pensionär(in) 9: Sonstiges 98: weiß nicht 99: keine Angabe
S4	Alle	Welchen höchsten formalen Bildungsabschluss haben Sie? 1: Schule beendet ohne Abschluss 2: Volks- oder Hauptschulabschluss POS 8. Klasse 3: Mittlere Reife Realschulabschluss POS 10. Klasse 4: Fachhochschulreife Berufsausbildung mit Abitur 5: Hochschulreife Abitur EOS 12. Klasse

		7: Fachhochschul- oder Universitätsabschluss 8: anderer Abschluss 9: bin noch Schüler Schülerin 98: weiß nicht 99: keine Angabe
S5	Alle	Wie viele Personen leben ständig insgesamt in Ihrem Haushalt, Sie selbst miteingeschlossen? Anzahl der Personen in Ihrem Haushalt: ____ (Range: 1-20) 98: weiß nicht 99: keine Angabe
S6	S5 > 1	Und wie viele Personen davon sind ... a) unter 18 Jahren: ____ numerisch b) zwischen 18 Jahren und 64 Jahren: ____ numerisch c) 65 und älter: ____ numerisch <i>PROG: Summe a bis c <= Haushaltsgröße (Sx)</i> 98: weiß nicht 99: keine Angabe
S7	Alle	Wie hoch ist das Nettoeinkommen Ihres Haushalts? Unter Nettoeinkommen wird das Einkommen verstanden, das Ihrem Haushalt nach Abzug aller Abgaben, Steuern und Beiträge für Pflichtversicherungen für den privaten Verbrauch und zum Sparen zur Verfügung steht. 1: unter 500 Euro 2: 500 bis unter 900 Euro 3: 900 bis unter 1.500 Euro 4: 1.500 bis unter 2.000 Euro 5: 2.000 bis unter 2.600 Euro 6: 2.600 bis unter 3.000 Euro 7: 3.000 bis unter 3.600 Euro 8: 3.600 bis unter 4.000 Euro 9: 4.000 Euro bis unter 4.600 Euro 10: 4.600 bis unter 5.000 Euro 11: 5.000 bis unter 5.600 Euro 12: 5.600 bis unter 6.000 Euro 13: 6.000 bis unter 6.600 Euro 14: 6.600 bis unter 7.000 Euro 15: mehr als 7.000 Euro 98: weiß nicht 99: keine Angabe
S8	Alle	Welche Postleitzahl hat Ihr Wohnort? PLZ: ____ <i>Prog:</i> Alle Daten werden ausschließlich in anonymisierter Form ausgewertet. Diese Angaben dienen lediglich der Zuordnung der Ergebnisse zu

		bestimmten Gebietstypen. Selbstverständlich ist Ihre Angabe freiwillig, aber für dieses Interview wichtig. 999998: weiß nicht 999999: keine Angabe
	<i>Alle</i>	Sie haben nun die Möglichkeit, allgemeine Hinweise, Kommentare und Anmerkungen zu dieser Befragung an uns zu richten. Bitte nutzen Sie zu diesem Zweck das folgende Textfeld. (Textfeld mit max. 200 Zeichen)

Wir freuen uns, dass Sie sich die Zeit genommen haben, an unserer Befragung teilzunehmen.

Vielen Dank für Ihre Unterstützung!

A.4 Ordinale Regression auf die Nutzungshäufigkeit des Online-Handels in Deutschland

Kategorie	MiD 2017
Intercept (häufig gelegentlich)	-3,10**
Intercept (gelegentlich selten/nie)	-0,84
Geschlecht (Mann)	0,37**
Führerscheinbesitz (ja)	-0,03
Anzahl der Einkaufswege pro Tag (1)	-0,11*
Anzahl der Einkaufswege pro Tag (2)	0,10
Anzahl der Einkaufswege pro Tag (3 oder mehr)	0,12
Alter (21-39 Jahre)	-0,54**
Alter (40-49 Jahre)	-0,23
Alter (50-69 Jahre)	0,61**
Alter (älter als 69 Jahre)	135,88**
Regionstyp des Wohnortes (ländliche Region)	0,03
Pkw-Verfügbarkeit am Stichtag (ja, teilweise)	0,08
Pkw-Verfügbarkeit am Stichtag (nein, gar nicht)	0,38**
Höchster formaler Bildungsabschluss (Volks- oder Hauptschule)	-0,16
Höchster formaler Bildungsabschluss (mittlere Reife, Realschulabschluss)	-0,54**
Höchster formaler Bildungsabschluss (Fachhochschulreife, Abitur)	-0,73**
Höchster formaler Bildungsabschluss (Fachhochschul- oder Universitätsabschluss)	-0,90**
Haushaltsnettoeinkommen pro Monat (500 bis unter 900 €)	-0,18
Haushaltsnettoeinkommen pro Monat (900 bis unter 1.500 €)	-0,35
Haushaltsnettoeinkommen pro Monat (1.500 bis unter 2.000 €)	-0,44
Haushaltsnettoeinkommen pro Monat (2.000 bis unter 2.600 €)	-0,67
Haushaltsnettoeinkommen pro Monat (2.600 bis unter 3.000 €)	-0,63
Haushaltsnettoeinkommen pro Monat (3.000 bis unter 3.600 €)	-0,97*
Haushaltsnettoeinkommen pro Monat (3.600 bis unter 4.000 €)	-109,63**
Haushaltsnettoeinkommen pro Monat (4.000 bis unter 4.600 €)	-111,95**
Haushaltsnettoeinkommen pro Monat (5.000 bis unter 5.600 €)	-101,89*
Haushaltsnettoeinkommen pro Monat (5.600 bis unter 6.000 €)	-115,35**

Kategorie	MiD 2017
Haushaltsnettoeinkommen pro Monat (6.000 bis unter 6.600 €)	-108,69*
Haushaltsnettoeinkommen pro Monat (6.600 bis 7.000 €)	-129,47**
Haushaltsnettoeinkommen pro Monat (mehr als 7.000 €)	-134,91**
Mobilitätseinschränkung (nein)	-132,32**
Berufstätig (nein)	0,32**
N (Anzahl der Beobachtungen)	
Abweichung der Residuen (Residual Deviance)	
AIC (Akaike Information Criterion)	
* Signifikanzniveau: 95%	
** Signifikanzniveau: 99%	

A.5 Ordinale Regression auf die Nutzungshäufigkeit des Online-Handels in den USA

Kategorie	NHTS 2017
Intercept (häufig gelegentlich)	-3,41**
Intercept (gelegentlich selten/nie)	-1,71**
Geschlecht (Mann)	0,35**
Führerscheinbesitz (ja)	-0,62**
Anzahl der Einkaufswege pro Tag (1)	-0,19**
Anzahl der Einkaufswege pro Tag (2)	-0,14**
Anzahl der Einkaufswege pro Tag (3 oder mehr)	-0,28**
Alter (21-39 Jahre)	-0,30**
Alter (40-49 Jahre)	-0,06
Alter (50-69 Jahre)	0,27**
Alter (älter als 69 Jahre)	0,80**
Regionstyp des Wohnortes (urbane Region)	0,03**
Pkw-Verfügbarkeit allgemein (ja)	0,24**
High school graduate or GED	-0,65**
Some college or associates degree	-1,26**
Bachelor degree, Graduate degree or professional degree	-1,65**
Haushaltsnettoeinkommen pro Jahr (25.000 bis unter 35.000 \$)	-0,33**
Haushaltsnettoeinkommen pro Jahr (35.000 bis unter 100.000 \$)	-0,75**
Haushaltsnettoeinkommen pro Jahr (100.000 bis unter 200.000 €)	-1,17**
Haushaltsnettoeinkommen pro Jahr (200.000 \$ oder mehr)	-1,58**
Mobilitätseinschränkung (ja)	-0,08**
Berufstätig (ja)	-0,11**
N (Anzahl der Beobachtungen)	186.958
Abweichung der Residuen (Residual Deviance)	368.339,25
AIC (Akaike Information Criterion)	368.383,25
* Signifikanzniveau: 95%	
** Signifikanzniveau: 99%	

A.6 Ordinale Regression auf die Nutzungshäufigkeit des Online-Handels in England

Kategorie	NTS 2016
Intercept (häufig gelegentlich)	-0,87**
Intercept (gelegentlich selten/nie)	1,37**
Geschlecht (Mann)	0,01
Führerscheinbesitz (ja)	-0,07
Anzahl der Einkaufswege pro Tag (1)	0,07
Anzahl der Einkaufswege pro Tag (2)	0,05
Anzahl der Einkaufswege pro Tag (3 oder mehr)	0,13
Alter (21-39 Jahre)	0,26**
Alter (40-49 Jahre)	0,30**
Alter (50-69 Jahre)	0,81**
Alter (älter als 69 Jahre)	1,53**
Regionstyp des Wohnortes (urbane Region)	0,26**
Pkw-Verfügbarkeit allgemein (ja)	-0,02
Bildungsabschluss (ja)	-0,27
Haushaltsnettoeinkommen pro Jahr (25.000 bis unter 50.000 £)	-0,35**
Haushaltsnettoeinkommen pro Jahr (50.000 £ oder mehr)	-0,93**
Mobilitätseinschränkung (ja)	-0,14
Berufstätig (ja)	-0,02
N (Anzahl der Beobachtungen)	15.793
Abweichung der Residuen (Residual Deviance)	31.571,31
AIC (Akaike Information Criterion)	31.608,31
* Signifikanzniveau: 95%	
** Signifikanzniveau: 99%	

A.7 Funktionsweise der eingesetzten Modelle

Im Folgenden werden die Funktionsweisen der eingesetzten Modelle zur Abbildung der Vernetzung und Automatisierung im Personen- und Güterverkehr im Detail erklärt.

A.7.1 Pkw-Besitz-Modellierung mit dem CAST-Modell

Aufbau des Grundmodells:

„CAST“ modelliert Haushaltsentscheidungen zum Pkw-Besitz dynamisch, in dem es jährliche Kauf- oder Nicht-Kauf-Entscheidungen sowie Haltedauerverteilungen beachtet.

Für die Modellierung werden die folgenden drei hierarchisch angeordneten Submodelle miteinander kombiniert.

1. Auf der obersten Ebene fällen die Haushalte jährlich eine Entscheidung über einen möglichen Kauf eines Fahrzeugs. Im Falle eines Kaufs erfolgt zudem die Entscheidung über den Kaufmarkt. Hierbei wird zwischen dem privaten Neuwagenmarkt, dem privaten Gebrauchtwagenmarkt und dem Dienstwagenmarkt unterschieden.
2. Auf der mittleren Ebene wird im Fall der Entscheidung für den Gebrauchtwagenmarkt zwischen jungen, mittleren und alten Gebrauchtwagen unterschieden.
3. Auf der untersten Ebene erfolgt innerhalb des gewählten Marktes die Entscheidung für das Fahrzeugsegment und die -technologie.

Die theoretische Basis für die drei Entscheidungsmodelle ist die Modellierung diskreter Entscheidungen (Ben-Akiva/Lerman 1985). Das erste sowie dritte Submodell sind jeweils als Mixed-Logit-Modell konzipiert. Das zweite Submodell ist als Ordered-Logit-Modell definiert. Die methodischen Hintergründe dieser spezifischen Modellformen finden sich z. B. in Train (2009).

Einflussvariablen sind zum einen die Charakteristika der Haushalte, zum anderen exogene Angaben über Preise im Zeitverlauf. Die Parameterschätzungen der Modelle basieren auf dem Haushalts- und Fahrzeugdatensatz der Studie „Mobilität in Deutschland 2008 (MiD 2008)“ (BMVBS 2008), da in diesen Datensätzen (im Vergleich zur Studie „Mobilität in Deutschland 2017 (MiD 2017)“) vergleichsweise detaillierte Angaben (z.B. Kaufjahr) zu den Fahrzeugen vorliegen. Für die Kalibrierung des Modells (z. B. um die exakten Kaufzahlen, Segment- und Antriebsverteilungen im Zeitverlauf sowie Haltedauerverteilungen unterschiedlicher Kaufsegmente zu treffen) wurden Korrekturparameter eingeführt. Als Quellen für die Eckwerte der Kalibrierung wurden insbesondere KBA- und DAT-Daten genutzt (KBA 2019, DAT 2019).

Im Folgenden sind für die drei Submodelle die Einflussvariablen dargestellt (vgl. Tabelle 55).

Tabelle 55: Übersicht der Einflussvariablen der drei Submodelle in CAST

	Kauf- entscheidung	Gebrauchtwagenmarkt-ent- scheidung	Fahrzeugtechnologie- entscheidung
Betrachtete Merkmale	Haushaltseinkommen		
	Anzahl Beschäftigte im Haushalt		

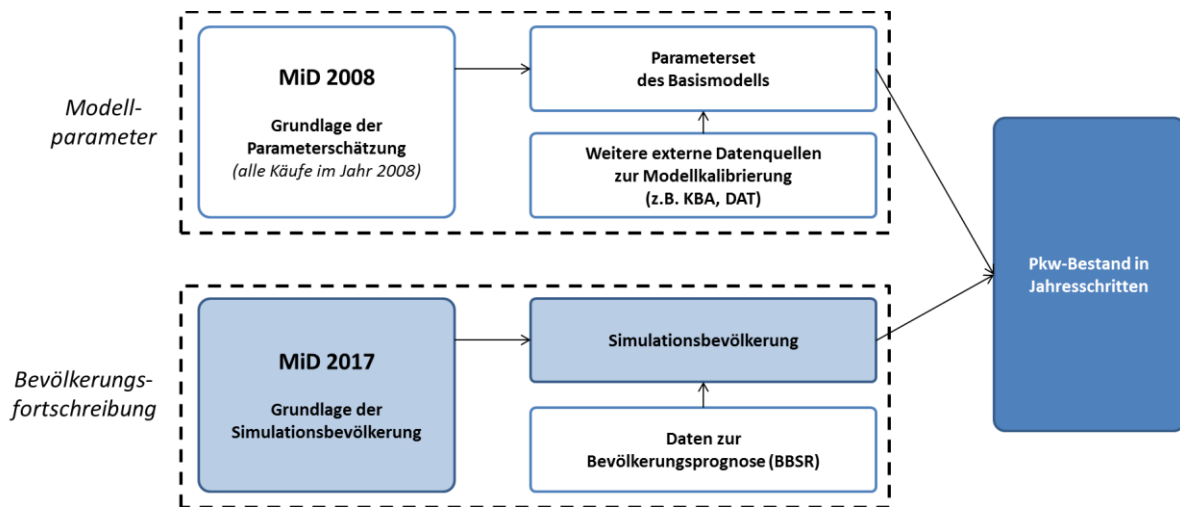
	Kauf- entscheidung	Gebrauchtwagenmarkt-ent- scheidung	Fahrzeugtechnologie- entscheidung
	Anzahl Pkw im Haushalt		Kaufpreis
	Anzahl Führerscheine im Haushalt		Kaufsegment (privater Neuwa- gen, Dienstwagen, Gebraucht- wagen)
	Raumtyp		Jahresfahrleistung und Energie- kosten
	Alternativen spezifische Konstante für Kaufseg- ment		Alternativen spezifische Kon- stante für Fahrzeugsegment (KBA)
			Alternativen spezifische Kon- stante für Antriebstechnologie

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Abbildung 96 stellt die Übersicht der Daten- und Parameterverwendung des CAST-Grundmodells dar. Es ist dabei zwischen den einmal geschätzten Modellparametern auf Basis der „MiD 2008“ und der jährlich modellierten Bevölkerungsfortschreibung zu unterscheiden. Das Parameterset des Basismodells der drei Submodelle wurde wie oben genannt anhand der MiD 2008 und weiteren externen Quellen kalibriert. Für die Anwendung des dynamischen Modells ist zudem eine Bevölkerungsfortschreibung notwendig.

Die Stichprobe der synthetischen Bevölkerung (mit Pkw-Besitz im Ausgangszustand) basiert auf dem Haushalts- und Fahrzeugdatensatz der Studie „MiD 2017“ (BMVI 2019). Die Fortschreibung der Verteilung der Haushalte anhand soziodemographischer Prognosen erfolgt analog zur Darstellung im Verkehrsnachfragemodell anhand von Regewichtungen auf Basis von Datenquellen des BBSR (BBSR 2012). Die Daten der MiD 2017 können aufgrund der an entscheidenden Stellen eingeschränkten Konzeption der Befragung nicht für eine erneute Schätzung der Parameter genutzt werden. Es fehlen z. B. die Informationen über das Kaufjahr von Fahrzeugen. Aufgrund dessen können keine Gebrauchtwagenkäufe im Stichjahr identifiziert werden. Dies wäre für die Definition der Zielvariablen bei der Parameterschätzung notwendig.

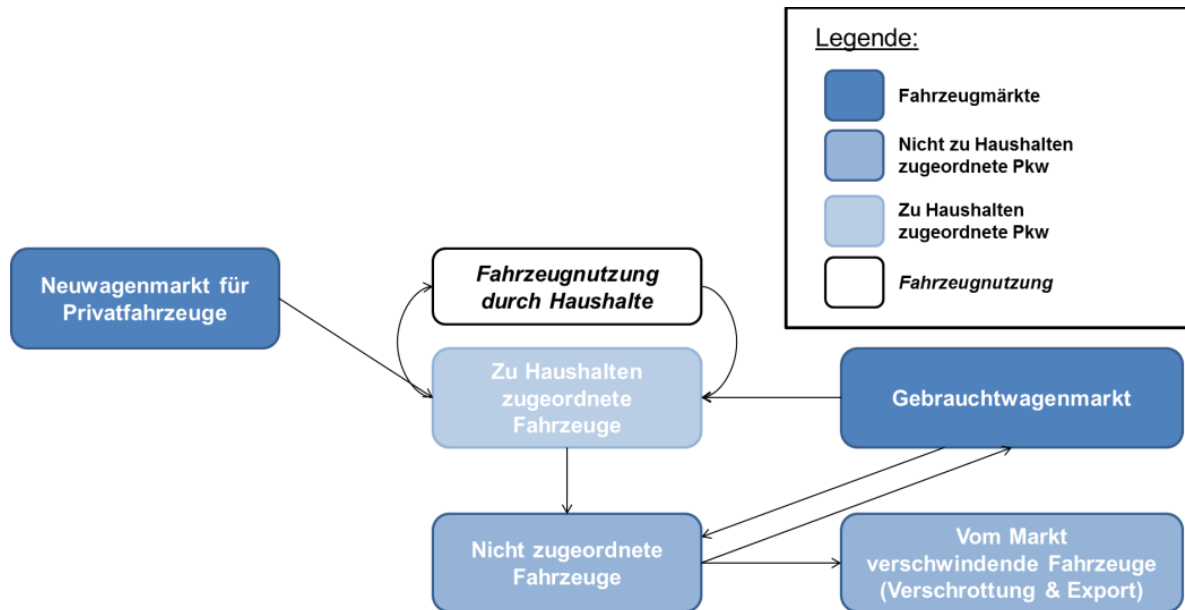
Abbildung 96: Übersicht des CAST-Grundmodells



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

CAST bildet den Gesamtlebenszyklus einzelner Fahrzeuge im Grundmodell ab (vgl. Abbildung 97). Fahrzeuge kommen als Neuwagen auf den Markt und werden dann von Haushalten während der aus einer Haltedauerverteilung gezogenen Haltedauer genutzt. Im Anschluss werden die dann nicht zugeordneten Fahrzeuge im Modell entweder dem Gebrauchtwagenmarkt zugeordnet oder entsprechend einer Wahrscheinlichkeitsfunktion vom Markt eliminiert. Sofern die Fahrzeuge dem Gebrauchtwagenmarkt zugeordnet werden, können die Fahrzeuge als Gebrauchtwagen wieder in den Besitz und zur Nutzung von Privathaushalten kommen. Nach Ablauf der Haltedauer wird die Entscheidung, das Fahrzeug wieder in den Gebrauchtwagenmarkt zu überführen oder das Fahrzeug zu eliminieren wiederholt. Dieser Kreislauf kann sich mehrfach wiederholen. Das Modell ist in der Weise kalibriert, dass sowohl die Gesamtzahl der Fahrzeuge, als auch die Anzahl der Käufe innerhalb der jeweiligen Segmente möglichst gut eingehalten werden. Zudem erfolgt eine Kalibrierung anhand der Haltedauern innerhalb der jeweiligen Segmente, sowie der Lebensdauern und Lebensfahrleistungen der Fahrzeuge im Mittelwert.

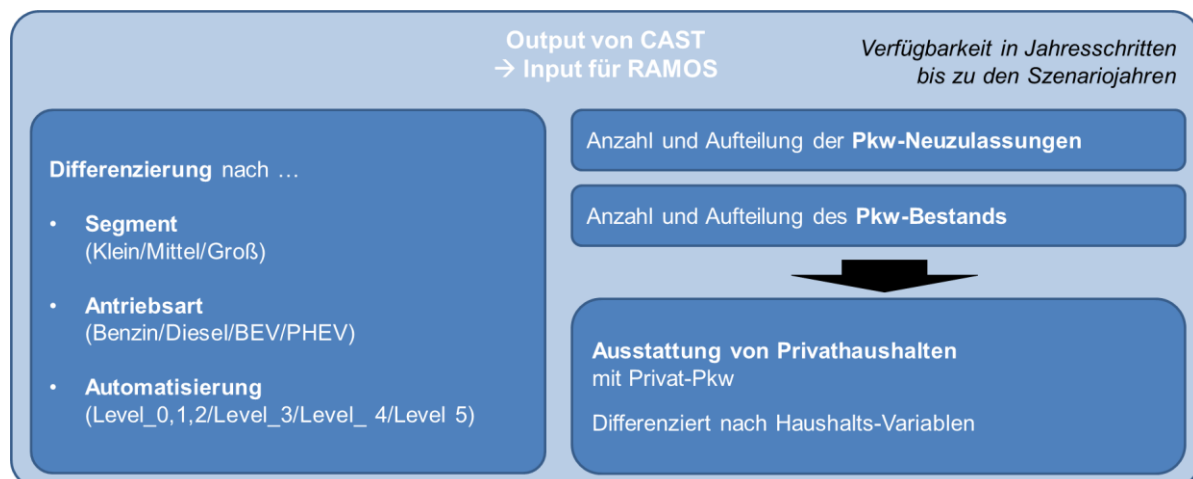
Abbildung 97: Schematische Übersicht der Abläufe des Fahrzeuglebenszyklus in CAST



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

In CAST werden in Jahresschritten die Käufe und der Gesamtbestand der Privat-Pkw fortgeschrieben. Ausgegeben werden kann einerseits die Zusammensetzung der Haushalte differenziert nach den Haushaltsvariablen und den Eigenschaften der dem jeweiligen Haushalt zugehörigen Pkw. Andererseits ist auch die Ausgabe der Zusammensetzung der Pkw-Flotte differenziert nach Haushaltsmerkmalen möglich. Beide Ausgaben können neben den Ausgaben für den Pkw-Bestand auch für die Neuzulassungen ausgegeben werden, um z. B. Informationen über die Marktanteile der Automatisierungstechnologien am Neuwagenmarkt im jeweiligen Jahr zu erhalten (vgl. Abbildung 98).

Abbildung 98: Übersicht des Outputs von CAST



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

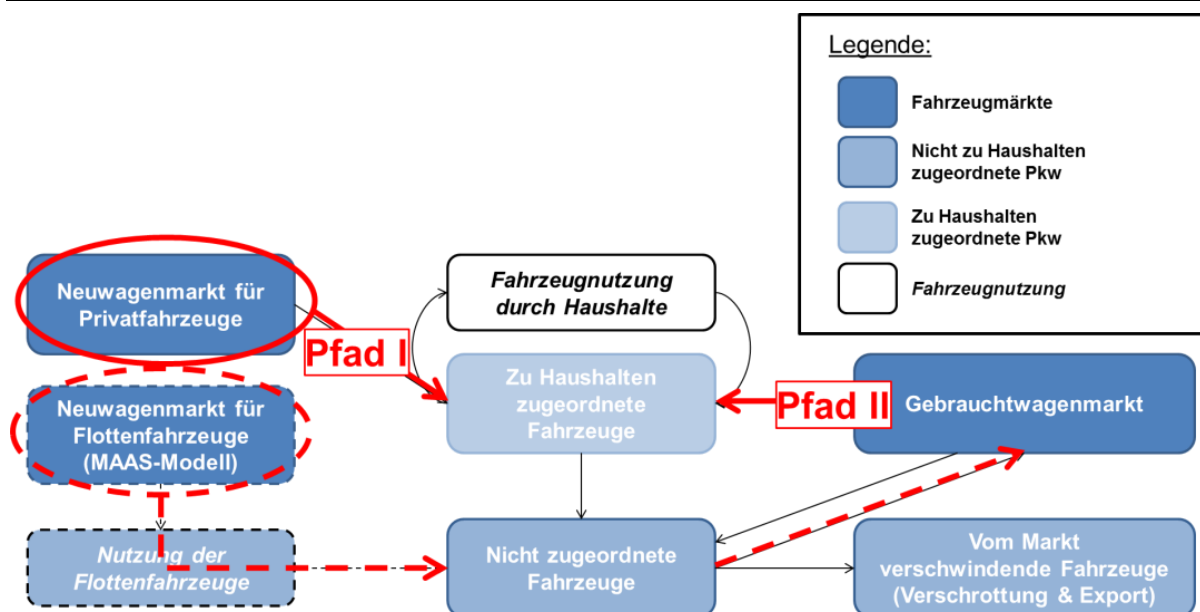
Ergänzung neuer Technologien

Um Diffusionsraten der Automatisierungstechnologien innerhalb der Privat-Pkw-Flotte ermitteln zu können, müssen die Automatisierungstechnologien (ebenso wie alternative Antriebstechnologien, z. B. Batterie-elektrischer Fahrzeuge) im Wahlmodell berücksichtigt werden. In CAST erfolgt dies im dritten Submodell bei der Entscheidung für die Fahrzeugtechnologien. Alternative Antriebstechnologien werden analog zu den bereits berücksichtigten ergänzt. Zusätzlich müssen Parameter gesetzt und Kostenannahmen auf Basis einer Literaturrecherche der Mehrkosten gesetzt werden.

Die Berücksichtigung der Automatisierungsstufen ist an dieser Stelle etwas komplexer, da im Modell noch keine analoge Technologie berücksichtigt wird. Dazu wird nachgelagert ein multinomiales Logit-Modell als Entscheidungsmodell für die Wahl der Automatisierungsstufe eingesetzt. Die Einflussgrößen sind hierbei der Preis der Technologien im Zeitverlauf und eine Bewertungskonstante, die sich ebenfalls im Zeitverlauf verschiebt. Inhaltlich wird hierdurch abgebildet, dass anfängliche Vorbehalte ggü. der neuen Technologie sowie fehlende Erfahrungswerte ein Hemmnis für die Akzeptanz darstellen. Dies entspricht den Grundlagen der Theorie von Diffusionsmodellen wie z. B. dem Bass-Modell (vgl. Bass 1969, Jensen et al. 2016).

Die Diffusion der Automatisierungstechnologien in die Privat-Pkw-Flotte kann auf zwei Wegen erfolgen (vgl. Abbildung 99): Neben der Einflottung neuer Technologien als private oder dienstlich genutzte Neuwagen (Pfad I) besteht zudem die Möglichkeit der Einflottung in Automatisierte Carsharing (ACS)- bzw. Automatisierte Ridesharing (ARS)-Flotten und der anschließenden Nachnutzung im Privat-Pkw-Markt als Gebrauchtwagen (Pfad II).

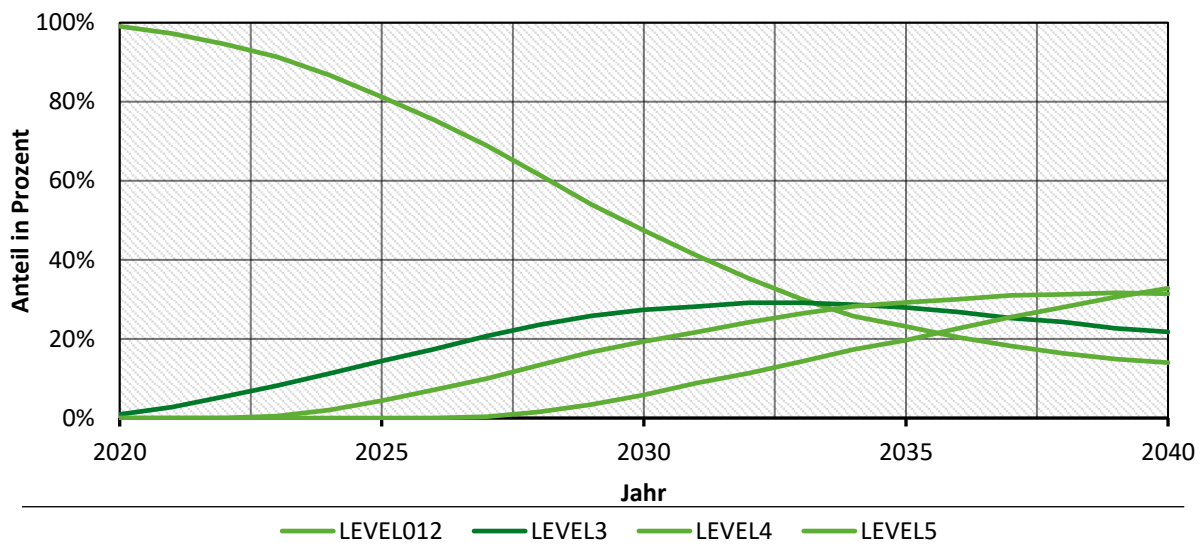
Abbildung 99: Mögliche Pfade der Einflottung automatisierter Fahrzeuge in die Privat-Pkw-Flotte



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

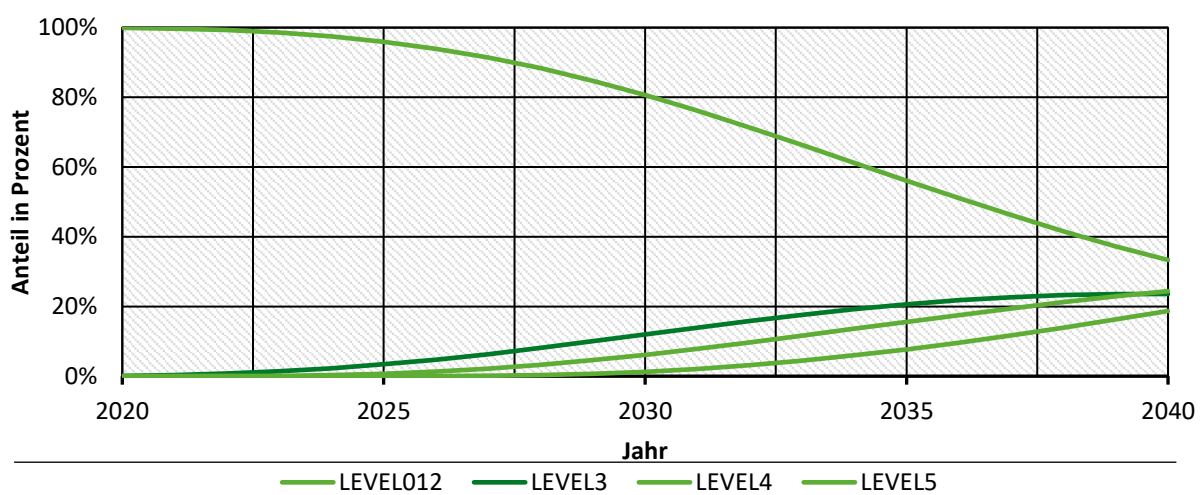
Der Verlauf der Anteilswerte der Automatisierungstechnologien an den Neuzulassungen und dem Bestand von Privat-Pkw weist für die unterschiedlichen Automatisierungslevel jeweils einen S-Kurven-förmigen Verlauf auf. Je nach Setzung der Einführungszeiträume, NutzerInnenakzeptanz und Kosten im Zeitverlauf stellt sich der Verlauf der Kurven gemäß dem Modell wie folgt dar (siehe Abbildung 100 und Abbildung 101).

Abbildung 100: Anteile der Automatisierungslevel an den Neuzulassungen in CAST im Zeitverlauf



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Abbildung 101: Anteile der Automatisierungslevel am Pkw-Bestand in CAST im Zeitverlauf



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

A.7.2 Aggregierung der verkehrlichen Wirkungen in deutschlandweitem Netzmodell PTV Validate

Kapazitätsanpassung

Für jedes Szenario werden die auf Basis der Literaturanalyse getroffenen Annahmen und vorhandenen Forschungsergebnisse entsprechend der aus dem CAST-Modell ermittelten Marktdurchdringungsgrade automatisierter und vernetzter Fahrzeuge angepasst. Für die verkehrstechnischen Auswirkungen ist neben den Automatisierungsfunktionen die Vernetzung von Fahrzeugen wichtig, die durch die Klassifikation in SAE-Level nicht explizit einer

Automatisierungsstufe zugeordnet wird. Da einige zentrale Vorteile der Automatisierung wie das Platooning nur durch fahrzeugseitige Kommunikation zu erreichen sind, läuft diese Entwicklung parallel. Es wird daher davon ausgegangen, dass Fahrzeuge der SAE-Stufen 4 und 5 untereinander vernetzt sind. Aufgrund des unterschiedlichen Erkenntnisstands hinsichtlich der Entwicklung von Kapazitäten wurde zwischen Kapazitätsänderungen auf Autobahnstrecken, in der Stadt und auf Landstraßen unterschieden.

Die zwei zentralen Aspekte der Auswirkungen vernetzter, automatisierter Fahrzeuge auf den Verkehrsablauf auf Autobahnen sind die Harmonisierung des Verkehrsflusses im Hinblick auf gefahrene Geschwindigkeiten, Zeitlücken und Beschleunigungsverhalten sowie die Verkürzung von Zeitlücken zwischen miteinander vernetzten Fahrzeugen. Eine Simulation verschiedener Streckentypen unter realistischen und gut dokumentierten Annahmen zur Quantifizierung dieser Effekte im Autobahnnetz wurde in vorangegangenen Forschungsarbeiten vorgenommen und ist in Krause et al. (2017) dokumentiert. Aufbauend auf diesen Arbeiten wurden Kapazitätsänderungen für die Durchdringungsraten der verschiedenen Szenarien bestimmt (siehe Tabelle 56). Den Kapazitätsberechnungen liegen mehrere Annahmen zugrunde. In den Maximalszenarien wird von einem technischen Entwicklungsstand ausgegangen, der Zeitlücken von 0,5 Sekunden zwischen den kommunizierenden Fahrzeugen ermöglicht. Ebenfalls wird angenommen, dass automatisierte Fahrzeuge auf Autobahnen mit Richtgeschwindigkeit fahren. Darüber hinaus verhalten sich automatisierte Fahrzeuge zwar kooperativ, das Fahrverhalten wird aber nicht zentral gesteuert oder optimiert. Tabelle 56 gibt Durchschnittswerte für Bundesautobahnen, Landstraßen und städtische Netze an. Tatsächlich unterscheiden sich Kapazitätsänderungen auf Autobahnen jedoch nach dem Typ des Netzelements. Daher weichen lokale Kapazitäten von dem gemittelten Wert in Tabelle 56 deutlich ab.

Tabelle 56: Differenzierte Kapazitätsänderungen der Straßeninfrastruktur durch die Automatisierung

Szenario		2030 A	2040 A	2030 B	2040 B	2040 B+	Max 1	Max 2a	Max 2b
Kapazitäts- änderung	BAB	0	-5	-0,5	+3	+4	+40	+40	+40
	Stadt	0	-2,8	-0,3	+5	+8	+20	+20	+20
	Land	0	-2,9	0	+3,8	+5,7	+30	+30	+30

Quelle: Eigene Darstellung

Im städtischen Verkehr wird der Einfluss des nicht-motorisierten und nicht-vernetzten Verkehrs mindestens bestehen bleiben und Kapazitäten unabhängig von der technischen Entwicklung in Kraftfahrzeugen begrenzen. Systeme wie der Grünlichtassistent können zwar auch in Szenarien geringer Automatisierung als wahrscheinlich angenommen werden, da sie technisch bereits ausgereift sind. Auch die Wirkungen sind durch verschiedene Simulationsstudien gut erforscht. Allerdings sind die dadurch erwarteten Kapazitätszugewinne gering. Für städtische Netze kann die Abschätzung möglicher Kapazitätsveränderungen auf die Betrachtung signalisierter Knotenpunkte begrenzt werden. Daher wurden analog zur Berechnungsmethode nach Friedrich (2015) rechnerische Abschätzungen vorgenommen. Die Ergebnisse liegen im Bereich der Simulationsergebnisse zweier Netzmodelle von Lu et al. (2020). Größere Veränderungen der Kapazitäten können nach aktuellem Stand der Forschung erst bei einer weitreichenden Vernetzung der Fahrzeuge erreicht werden. In diesem Fall können durch ein vollständig automatisiert koordiniertes

Fahrverhalten an Kreuzungspunkten die Abstände zwischen kreuzenden und aufeinander folgenden Fahrzeugen deutlich verringert und dadurch die Kapazitäten von Knotenpunkten weiter erhöht werden. Die Berücksichtigung des nicht-motorisierten Verkehrs ist in einem solchen Szenario allerdings nicht möglich weshalb diese Art der Steuerung nicht betrachtet wurde.

Zu Kapazitätsänderungen auf Landstraßen gibt es keine Forschungsarbeiten. Landstraßen können autobahnähnlich ausgebaut sein (Autostraßen), führen aber auch über signalisierte und vorfahrtsregelte Knotenpunkte und werden teilweise ebenfalls durch den nicht-motorisierten Verkehr genutzt. Es kann daher angenommen werden, dass abschnittsweise Kapazitätsveränderungen mal im Bereich des städtischen Verkehrs, mal im Bereich von Autobahnen liegen können. Für eine Abschätzung wurden daher die jeweiligen Änderungsraten für Stadt und Autobahn gewichtet nach Anteil der Bundesstraßen innerhalb der Außerorts-Fahrleistungen gemäß Bäumler et al. (2017) miteinander verrechnet.

Anpassung der Verkehrsnachfrage Level 4/5

Um eine integrierte Verkehrszustandsbewertung vornehmen zu können, muss die Entwicklung im Personen- und Güterverkehr in PTV Validate abgebildet werden. Die jeweils unterschiedlichen nachfrageorientierten Szenarien müssen also in geeigneter Weise kombiniert werden. Für beide Entwicklungsstränge A und B im Personenverkehr sind dies die entsprechenden Szenarien 2030 und 2040. Die Maximalszenarien im Personenverkehr wurden mit dem Szenario Multimodalität+ (Szenario 2) im Güterverkehr kombiniert.

Die Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Nachfragemodellierung (siehe Kapitel 2.1.3.3) erfolgt über eine Umrechnung der Nachfragematrizen aus Validate. Da es sich bei Validate um ein Tagesmodell handelt und die Verkehrsnachfragemodellierung auf ein Jahr bezogen ist, werden statt der absoluten Ergebnisse die Änderungen gegenüber dem jeweiligen Basisszenario betrachtet. Zunächst werden die Umrechnungsfaktoren für das Basisszenario 2017 ermittelt. Für den Personenverkehr wurde dieser Umrechnungsfaktor aus den Jahresfahrleistungen im Straßenpersonenverkehr der Jahre 2012 (Bezugsjahr Validate) und 2017 (Bezugsjahr RAMOS) nach Verkehr in Zahlen (BMVI 2020) bestimmt. Für den Güterverkehr wurde der Hochrechnungsfaktor mithilfe von am Güterverkehrsnachfragemodell kalibrierten TREMOD-Ergebnissen bestimmt. Die Umrechnungsfaktoren für die weiteren Szenarien ergeben sich direkt aus den Ergebnissen der Nachfragemodellierung.

Für den Personenverkehr lagen die Nachfrageveränderungen differenziert nach Raumtypen vor. Verwendet wurde eine Einteilung auf Basis der RegioStaR7 Raumtypologie mit der folgenden Zuordnung:

- Urban: RegioStaR Typen 71, 72
- Suburban: RegioStaR Typen 73, 74
- Ländlich: RegioStaR Typen 75, 76, 77

Die Zuteilung der Raumtypen wurde auf Basis der Gemeindekennzahlen in das Modell eingepflegt und die Fahrleistungen nach Quellbezirken entsprechend dieser Einteilung im Basismodell 2017 ausgewertet und mit den Ergebnissen aus RAMOS verglichen. Dieser Vergleich ergab eine sehr gute Übereinstimmung (siehe Tabelle 57). Zur Abbildung der Szenarien wurden daher die jeweiligen Umrechnungsfaktoren raumtypenspezifisch angewendet. Die Umrechnung der

Nachfragematrizen und die darauffolgende Verkehrsumlegung werden z.T. iteriert, sodass die resultierende Verkehrsleistung ungefähr den Veränderungen entspricht, die in der Nachfragemodellierung berechnet wurden. In Szenarien mit hohen Auslastungsgraden kommt es durch eine veränderte Routenwahl allerdings zu einem starken Einfluss auf die Gesamtverkehrsleistung. In diesen Fällen wurden Abweichungen der resultierenden Fahrleistung im Personenverkehr von bis zu 3 % akzeptiert.

Tabelle 57: Vergleich der Anteile am Verkehrsaufkommen nach Raumtyp in RAMOS und Validate

Regionstyp	Anteil Verkehrsaufkommen RAMOS	Anteil Quellverkehrsaufkommen Validate
urban	24.7 %	25.4 %
suburban	33.9 %	33.3 %
ländlich	41.4 %	41.3 %

Quelle: Eigene Darstellung, KIT

Berechnung der Verkehrszustände

Zur Emissionsermittlung mithilfe des Handbuchs Emissionsfaktoren im Straßenverkehr (HBEFA) sind bei gegebener Flotte zwei Komponenten notwendig: die Verkehrsleistung nach Straßentyp und der Verkehrszustand. Letzterer wird nach HBEFA in vier Klassen eingeteilt, von schwach belastet bis Stop-and-Go-Verkehr. Da eine erhebliche Wirkung auf die Emissionen durch Verstetigung des Verkehrs angenommen wird, ist die Prognose dieser Verkehrszustände eine wichtige Voraussetzung für die Emissionsberechnung. PTV Validate bietet die Möglichkeit, über die Berechnung des Auslastungsgrades einzelner Straßensegmente den Verkehrszustand im Gesamtnetz zu ermitteln. Der Auslastungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis der Verkehrsnachfrage zur planerischen Kapazität eines Streckensegments. Die Grenzen zur Bestimmung der jeweiligen HBEFA-Klasse sind dabei nicht festgelegt. Üblich sind die in Tabelle 58 dargestellten Bereiche.

Für die Berechnung der Emissionen muss im gesamten Netz bestimmt werden, welcher Anteil der Fahrleistung in welchem Verkehrszustand (d.h. LOS-Stufe des HBEFA) erbracht wird. Für den heutigen Zustand ist diese Information in TREMOD enthalten. Da die zukünftigen Szenarien mit Validate berechnet werden, mussten die Modelle TREMOD und Validate in Einklang gebracht werden. Dazu wurden die Parameter in Validate so eingestellt, dass sich für die heutige Situation die gleichen Fahrleistungsanteile in den einzelnen Verkehrszuständen ergeben, wie sie TREMOD vorgibt, d.h. die Berechnung der Verkehrszustände in Validate wurde an TREMOD kalibriert.

In einem makroskopischen Verkehrsumlegungsmodell kann der Verkehrszustand auf einer Strecke direkt aus dem Auslastungsgrad der Strecke abgeleitet werden. Der Auslastungsgrad ist der Quotient aus der Verkehrsbelastung, die für die Strecke durch die Verkehrsumlegung berechnet wurde, und der Streckenkapazität, die der Strecke beim Modellaufbau zugewiesen wurde.

Der Begriff der Kapazität ist in diesem Zusammenhang nicht unproblematisch, weil bei der Umlegungsrechnung nicht die gleichen Werte wie bei einer verkehrstechnischen Betrachtung eingesetzt werden. Bei letzterer ist die Kapazität im Wesentlichen die höchste Verkehrsstärke, die durch die Strecke fließen kann. In einem Umlegungsmodell ist die Kapazität ein Parameter der Widerstandsfunktion, mit der berechnet wird, wie lange die Durchfahrung der Strecke bei einer

bestimmten Verkehrsbelastung dauert. Je nach dem, auf welchen Zeitraum (z.B. eine Stunde oder ein Tag) sich die Umlegung bezieht, werden verschiedene Kapazitätswerte eingesetzt.

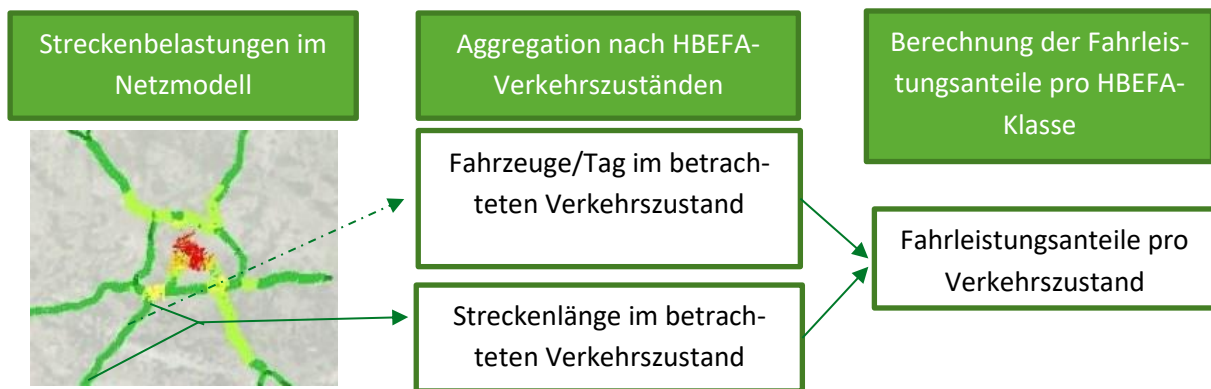
Im Idealfall würde für eine Emissionsberechnung wie oben beschrieben eine stundenfeine, dynamische Verkehrsumlegung verwendet. Die Verkehrsnachfrage und die Streckenkapazität würden sich auf eine Stunde beziehen und in der Regel ähnliche Werte wie die verkehrstechnische Kapazität haben. Eine solche dynamische Umlegung hat etwa den 500-fachen Rechenbedarf wie eine Umlegung des Tagesverkehrs. Für ein deutschlandweites, relativ detailliertes Modell wie Validate ist schon die Umlegung der Tageswerte sehr aufwändig; die dynamische Berechnung aller Szenarien wäre unrealistisch gewesen. Deshalb wurden die Fahrleistungsanteile auf Basis einer Tagesumlegung bestimmt.

Bei einer Verkehrsumlegung mit Tageswerten wird der Kapazitätsparameter der Widerstandsfunktion an der Menge des Verkehrs orientiert, die insgesamt am Tag durch die Strecke fahren kann. Es wird aber nicht der tatsächliche Maximalwert verwendet, sondern eine deutlich niedrigere Zahl, um zu berücksichtigen, dass in der Regel der Verlauf der Verkehrsbelastung über den Tag nicht gleichmäßig ist, sondern ein oder zwei Spitzen aufweist. Die Kapazitätswerte zwischen Stunden- und Tagesumlegungen können also nicht direkt verglichen werden. Außerdem werden bei Tagesumlegungen Widerstandsfunktionen verwendet, die oberhalb der Kapazität deutlich weniger stark als bei Stundenumlegungen ansteigen. (Das heißt, im Vergleich zur Stundenumlegung wird die Kapazität gegenüber dem verkehrstechnischen Höchstwert stärker reduziert, dafür steigt aber die Widerstandsfunktion bei Kapazitätsüberschreitung weniger stark an.)

Bei der Ableitung der Verkehrszustände aus dem Auslastungsgrad muss berücksichtigt werden, dass die Kapazitätswerte bei Tagesumlegungen anders interpretiert werden müssen. Die für Stundenumlegungen empfohlenen Auslastungsgrenzen für die Verkehrszustände können nicht verwendet werden, sondern es mussten neue Klassengrenzen für die Tagesumlegung bestimmt werden. Die Auslastungsgrenzen wurden so festgelegt, dass für den heutigen Zustand die Fahrleistungsanteile der Verkehrszustände erreicht werden, wie sie in TREMOD vorgegeben waren. Das Ergebnis ist in Tabelle 58 dargestellt. Die auf den ersten Blick hohen Werte für die Auslastungsgrenzen müssen vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Modellierungsmethodik gesehen werden.

Die Kapazität einer Strecke kann nicht in Kfz/h Stunde angegeben werden, weil der Verkehr sich aus Pkw und Lkw zusammensetzt und diese Fahrzeugarten unterschiedlich viel Zeit für die Überfahrung eines Fahrbahnquerschnitts brauchen. Es ist deshalb in der Modellierung (wie in der Bemessung) üblich, die Kapazität in Pkw-Einheiten anzugeben (offizielle Bezeichnung ist eigentlich Pkw-Gleichwerte) und den nicht aus Pkw bestehenden Verkehr umzurechnen. Typische Werte sind 1,5 Pkw-E pro Lkw und 2,0 Pkw-E für Lastzüge. Bei der Umlegungsrechnung muss dann auch die Verkehrsbelastung entsprechend umgerechnet werden. (Genau genommen müssten die Umrechnungsfaktoren abhängig vom Verkehrszustand sein; je flüssiger der Verkehr fließt, umso geringer ist der Unterschied von Lkw und Pkw. Diese Betrachtung hat sich aber bei der Bemessung noch nicht durchgesetzt.)

Abbildung 102: Ermittlung der HBEFA-Anteile im Gesamtnetz



Quelle: Eigene Darstellung, KIT

Tabelle 58: Klassengrenzen zur Ermittlung der HBEFA-Verkehrszustände im Validate-Modell

Verkehrszustand	Auslastungsgrad (Standardwerte)	Auslastungsgrad (kalibriert)
Frei	0-65%	0-105%
Dicht	> 65-85%	>105-140%
Gesättigt	> 85-100%	>140-170%
Stop+Go/Stau	> 100%	>170%

Quelle: Eigene Darstellung, KIT

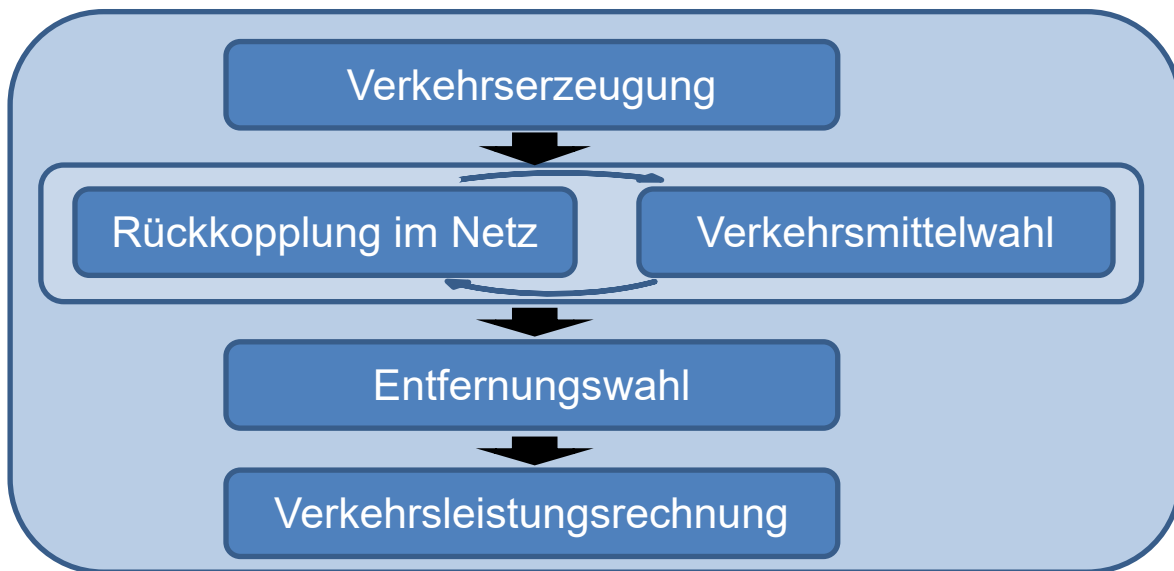
A.7.3 Aggregiertes, raumloses Verkehrsnachfragemodell RAMOS

Das für die Modellierung der Nachfrageeffekte genutzte aggregierte Verkehrsnachfragemodell (RAMOS) ähnelt einem herkömmlichen Vier-Stufen-Verkehrsnachfragemodell. Die Stufen der Verkehrserzeugung, Verkehrsmittelwahl (mit iterativer Berechnung der Rückkopplung im Netz) sowie der Zielwahl (hier: Entfernungswahl) werden hierbei durchlaufen. Auf eine Verkehrsumlegung auf der Ebene eines Streckennetzes wird jedoch verzichtet. Hingegen wird die räumliche Ebene nach Raumtypen aggregiert dargestellt. Anstelle der Angabe zu Quellen und Zielen wird bei der Zielwahl die Entfernung eines Weges genutzt.

Die aggregierte Darstellung ermöglicht verhältnismäßig schnelle Modellberechnungen. Da Anpassungen im Modell recht rasch umsetzbar sind, können Auswirkungen neuer Trends effizient und schnell abgebildet werden. Diese Art von Modell lässt es zu, Nachfragewirkungen ausgelöst durch automatisiertes Fahren für ganz Deutschland und nach Raumtypen differenziert zu

modellieren und zu analysieren. Das Modell wurde mithilfe der Programmiersprache „R“ entwickelt.

Abbildung 103: Stufen der aggregierten Nachfragemodellierung



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Für die Erstellung des aggregierten Nachfragemodells sind mehrere Dateneingaben bzw. Inputgrößen erforderlich. Diese umfassen einerseits feststehende Daten. Andererseits betrifft dies ebenfalls Informationen und Daten, welche den Szenariohorizont betreffen, zu denen derzeit teilweise noch keine festgesetzten Daten existieren. Hierfür wurden Annahmen getroffen, welche je nach Szenario-Kontext variabel zu setzen sind. Einen Überblick, welche festgesetzten sowie variablen Daten in das aggregierte Nachfragemodell einfließen, bietet Tabelle 59. Auf die einzelnen Inputgrößen wird innerhalb der entsprechenden Modellschritte näher eingegangen.

Tabelle 59: Inputgrößen für das aggregierte Nachfragemodell

Modellschritt	Unveränderlich	Variabel (auf Annahmen basierend)
Verkehrserzeugung	MiD 2017 Raumordnungsprognose (BBSR)	Fortschreibung der Pkw-Verfügbarkeit Automatisierung der Flotte Nutzergruppen automatisierter Fahrzeuge Umgang mit gesundheitlich eingeschränkten und Jugendlichen Bevölkerungsfortschreibung (iterative Gewichtung)
Verkehrsmittelwahl	Verkehrsprognose (BVWP) Zeitwerte (+ Veränderung durch Automatisierung)	Verkehrsmittelwahl Eigenschaften (Kosten, Zu- und Abgangszeiten, Geschwindigkeiten)

Modellschritt	Unveränderlich	Variabel (auf Annahmen basierend)
Rückkopplung im Netz		Gesetzte Gesamtkapazitäten für Deutschland Anpassung der Kapazität im Szenariofall (KIT)
Entfernungswahl		Ausschöpfung des „generalisierten Kostenbudgets“

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Verkehrserzeugung

Der erste Schritt innerhalb der Verkehrsnachfragemodellierung stellt die Verkehrserzeugung dar, bei der das Verkehrsaufkommen im Untersuchungsraum ermittelt wird. Die Datenbasis hierfür sind die Datensätze zu Haushalten, Personen und Wegen der Studie MiD 2017 (Mobilität in Deutschland) (BMVI 2019). Hierdurch wird die Anzahl der Wege nach sozio-demographischen Eigenschaften und Mobilitätsmerkmalen (wie Wegezweck oder Pkw-Besitz) der Personengruppen bestimmt. Gewichtet repräsentieren diese Daten die Gesamtbevölkerung von Deutschland und bilden somit die Grundlage für die weiteren Schritte der Modellierung.

Um die Bevölkerungsdaten für den Szenariohorizont zu erstellen, mit denen die Szenarien für die Jahre 2030 und 2040 gerechnet werden sollen, sind an den Datensätzen Anpassungen notwendig. Bis zu diesen Szenariojahren werden sich bezüglich der Soziodemografie sowie der Mobilitätsmerkmale Änderungen ergeben, die hierbei berücksichtigt werden müssen. Ein wichtiges Instrument zur Abbildung dieser Änderungen stellen die Gewichtungen der Personen innerhalb des Personendatensatzes dar. Diese können z.B. für bestimmte Altersgruppen unterschiedlich gewichtet werden, je nachdem ob sich der Anteil der jeweiligen Altersgruppe an der Gesamtbevölkerung über die Jahre vergrößert oder verkleinert.

Die Regewichtung der Bevölkerungsdaten der MiD 2017 wird mittels einer iterativen Gewichtung nach der Methode des Iterative Proportional Fitting (IPF) für das gewünschte Prognosejahr durchgeführt. Die Fortschreibung der Bevölkerung erfolgt dabei auf Basis der Raumordnungsprognose des BBSR aus dem Jahr 2012 (BBSR 2012). Sie ist nach Alter, Geschlecht und Regionstyp gegliedert und reicht derzeit lediglich bis zum Jahr 2035. Für das Jahr 2040 wurden die entsprechenden Angaben auf Basis einer Regression mit den BBSR-Daten ermittelt.

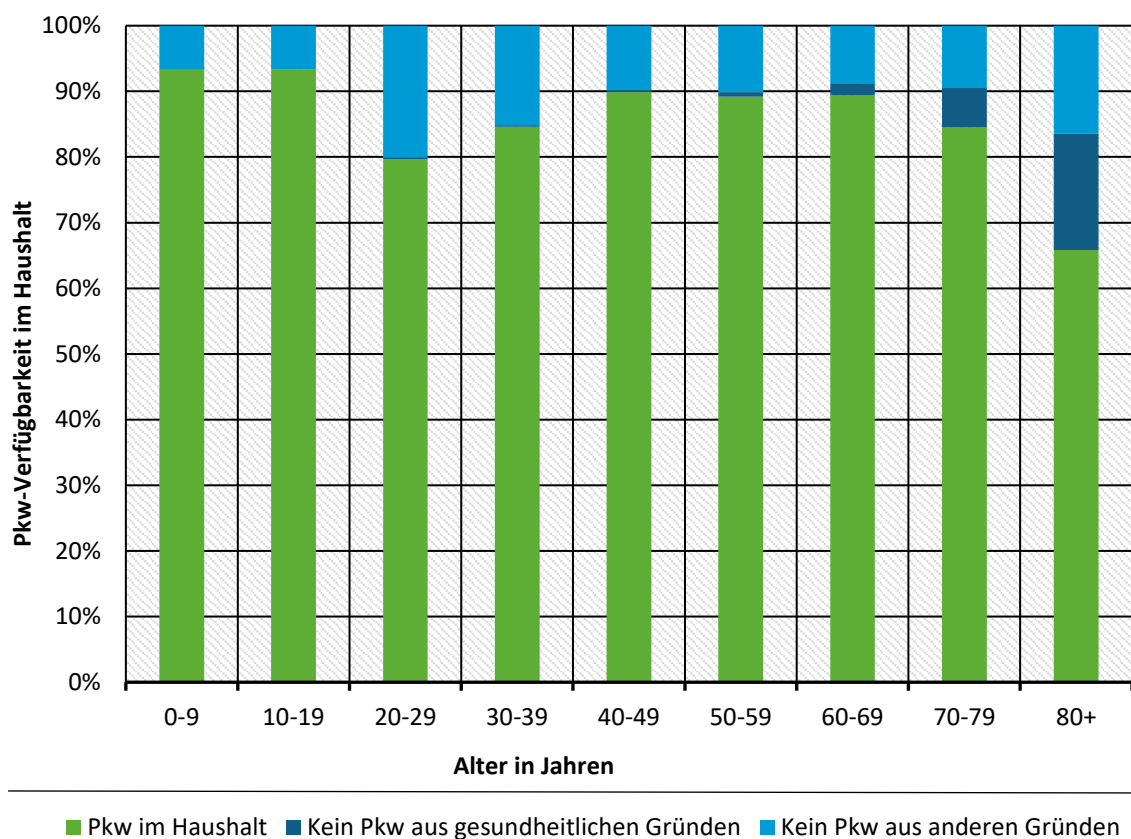
Zusätzlich werden innerhalb der Regewichtung der Bevölkerungsdaten Veränderungen in der Pkw-Verfügbarkeit im Haushalt abgebildet. Dieser Aspekt ist von übergeordneter Bedeutung, da die Pkw-Verfügbarkeit im Haushalt das Mobilitätsverhalten maßgeblich beeinflusst. Im Zuge der Automatisierung könnten noch mehr Menschen die Automobilität nutzen und somit einen Pkw zur Verfügung haben. Daraus ergibt sich eine potentielle Pkw-Verfügbarkeit. Wie bei der Fortschreibung der Pkw-Verfügbarkeit im Haushalt genau vorgegangen wird, wird im darauffolgenden Abschnitt erläutert. Eine Gewichtung nach Wochentagen ist ebenso erforderlich, um sicherzustellen, dass alle Wochentage gleich stark im Modell berücksichtigt werden. Damit ergeben sich für die Regewichtung folgende Randverteilungen.

1. Regionstyp, Alter und Geschlecht
2. Potentielle Pkw-Verfügbarkeit
3. Wochentage

Ermittlung potentieller NutzerInnen automatisierter Fahrzeuge

Mittels einer Potentialermittlung wurde zunächst bestimmt, wie viele Menschen von einem selbst fahrenden Pkw profitieren würden. Zusätzlich zu Personen mit einem Pkw im Haushalt könnten gesundheitlich Eingeschränkte (vor allem ältere Menschen) und junge Menschen unter 18 Jahren (bzw. 17 Jahren beim begleiteten Fahren ab 17) automatisierte Fahrzeuge der Stufe 5 nutzen, da hierfür kein Eingriff durch den Fahrer mehr notwendig ist. Im Zuge der Einführung des automatisierten Fahrens könnten für den Pkw somit neue NutzerInnengruppen gewonnen werden. Diese erhielten damit die Chance, ihre Mobilität selbstständiger zu gestalten und ihren Aktionsradius zu erweitern (vgl. Anderson et al. 2016, S. 16f.). Die für das Modell genutzten Daten auf Basis der MiD 2017 werden in Abbildung 104 dargestellt.

Abbildung 104: Potentielle NutzerInnen für das automatisierte Fahren im Jahr 2017



Quelle: Eigene Darstellung nach MiD 2017, DLR

Die Summe der Personen mit einem Pkw im Haushalt und denen, die aus gesundheitlichen Gründen kein Auto besitzen, ergibt die Anzahl der potentiellen NutzerInnen eines automatisiert fahrenden Pkw. Personen, die aus anderen Gründen keinen Pkw besitzen, kommen innerhalb des Modells für die Nutzung eines automatisierten Fahrzeugs nicht in Frage. Dazu zählt, dass auf einen Pkw bewusst verzichtet oder kein Pkw benötigt wird. Es ist davon auszugehen, dass sich diese Personen auch in einer Zukunft mit automatisierten Fahrzeugen gegen den Pkw-Besitz entscheiden würden (Pkw-Nutzung ist für die Pkw-Nichtbesitzer unter Umständen dennoch möglich. Dies wurde bereits in der Modellierung berücksichtigt). Wurde neben dem Nicht-Besitz

aus gesundheitlichen Gründen zusätzlich einer der anderen beiden Gründe genannt, wurde diese Person der Kategorie „kein Auto aus anderen Gründen“ zugeordnet, da in diesem Fall offensichtlich der gesundheitliche Grund nicht der alleinige war und die Person dennoch keinen Pkw nutzen möchte.

93 % der jungen Menschen bis zu einem Alter von 19 Jahren leben in Haushalten mit Pkw. Da diese die Pkw-Nutzung durch die mit ihnen im Haushalt lebenden Erwachsenen miterleben können und die Verkehrsmittelwahl von Kindern durch ihre Eltern stark geprägt wird (vgl. Frauentrend 2011, S. 176), erscheint es plausibel, dass in einer Zukunft mit automatisierten Pkw auch Jugendliche von Haushalten mit derartigen Fahrzeugen diese nutzen würden. Diese ist somit eine wichtige neue NutzerInnengruppe.

Die Auswertung zeigt zudem, dass zwischen dem zwanzigsten und dreißigsten Lebensjahr die Pkw-Verfügbarkeit im Haushalt merklich auf 80 % abnimmt. Bis zum vierzigsten Lebensjahr steigt diese allmählich wieder auf einen Wert von 90 % an. Erst nach dem siebzigsten Lebensjahr nimmt die Pkw-Verfügbarkeit im Haushalt wieder ab und erreicht in der letzten Altersgruppe (80 Jahre und älter) einen Wert von unter 70 %.

Grundsätzlich ist zu erkennen, dass der Anteil an Personen ohne privaten Pkw im Haushalt aufgrund gesundheitlicher Gründe mit dem Alter steigt. Diejenigen, bei denen dies eine ausschlaggebende Rolle spielt, könnten bei einem Angebot des automatisierten Fahrens weiterhin den Pkw nutzen. Diese sind somit eine weitere wichtige neue NutzerInnengruppe. In den nächsten zwei Dekaden sind jedoch weitere Änderungen in diesem Kontext zu erwarten (siehe Abbildung 106).

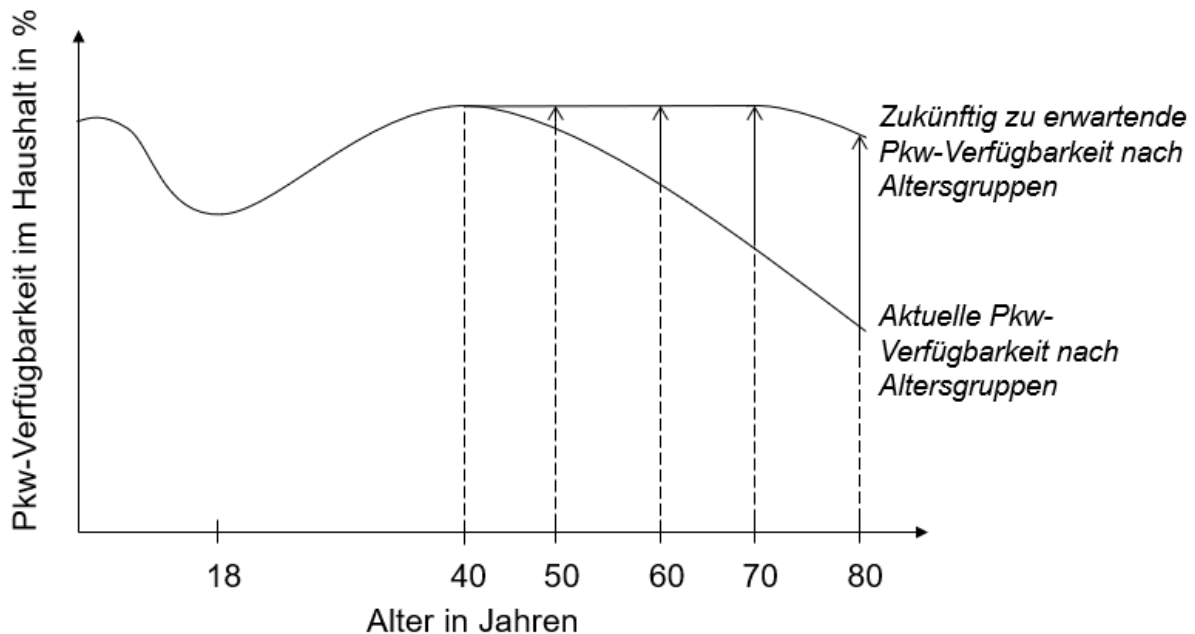
Zur Prognose des zukünftigen Pkw-Besitzes ohne und mit automatisierten Fahrzeugen ist folgende Unterscheidung notwendig.

- Die Pkw-Besitz-Quote beschreibt den Anteil der Personen, die in einem Haushalt mit Pkw leben (dunkelblauer Bereich in Abbildung 106)
- Das Pkw-Besitz-Potential beschreibt die Summe der Anteile der Personen, die in einem Haushalt mit Pkw leben und die aus rein gesundheitlichen Gründen kein Auto haben. Dies bedeutet, dass diese Personen vermutlich automatisierte Privat-Fahrzeuge nutzen würden, wenn diese zur Verfügung stehen. (Zusätzlich ist denkbar, dass sich zukünftig Personen, die heute keinen Pkw besitzen, weil sie nicht gerne Autofahren, für den Besitz eines automatisierten Fahrzeugs entscheiden. Die Anzahl dieser Personen lässt sich aber nicht sinnvoll quantifizieren. Aus diesem Grund wird dieser Effekt im Folgenden außer Acht gelassen.)

Um das zukünftige Pkw-Besitz-Potential unterschiedlicher Altersgruppen im Modell realistisch abzubilden, wurde ein Kohorteneffekt angenommen. Hierfür wird angenommen, dass bis zu einem Alter von 40 Jahren die Verteilung der potentiellen Pkw-Verfügbarkeit im Haushalt in den jeweiligen Altersgruppen beibehalten wird. Bisherige Beobachtungen zeigen, dass ab dem vierzigsten Lebensjahr Pkw-Besitzgewohnheiten im zunehmenden Alter weitgehend beibehalten werden. Aus diesem Grund wurde ab dem vierzigsten Lebensjahr ein Kohorteneffekt angenommen. Denn diejenigen, die im Erhebungsjahr 40 Jahre alt waren, sind im Prognosejahr um die Differenz zum Erhebungsjahr älter. Bis zum Jahr 2030 z. B. wären es 13 Jahre. Die damals Vierzigjährigen wären im Jahr 2030 also 53 Jahre alt. Dementsprechend wird der Anteil der Personen mit Pkw-Besitz-Potential je Geburtsjahrgangskohorte für die Dauer vom Erhebungsjahr der MiD bis zum Projektionsjahr fortgeschrieben, wie in Abbildung 105 schematisch dargestellt.

Danach setzt die Entwicklung des direkt im Anschluss angesetzten Pkw-Besitz-Verhaltens wieder ein.

Abbildung 105: Schematische Darstellung des Kohorteneffekts



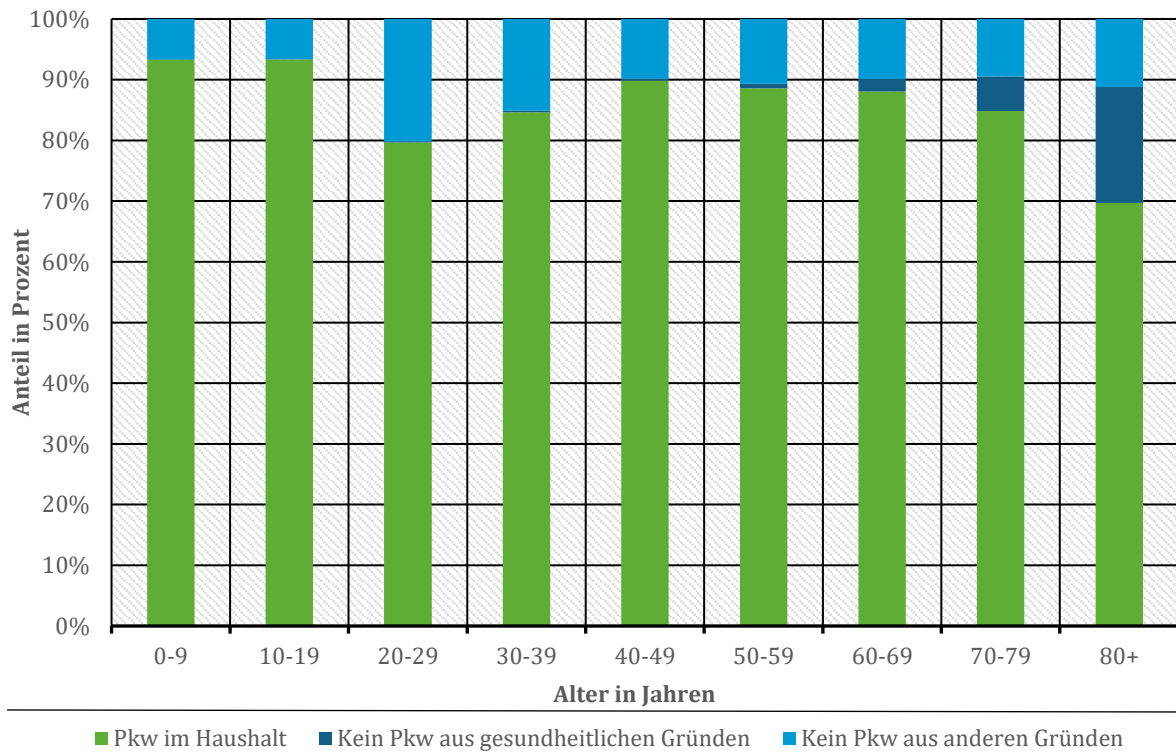
Quelle: Eigene Darstellung, DLR

In einer Zukunft ohne automatisierte Fahrzeuge wäre nun anzunehmen, dass der Anteil der potentiellen Pkw-BesitzerInnen, die aus gesundheitlichen Gründen kein Auto haben, ähnlich ist wie heute. Nach Abzug dieses Anteils ergibt sich somit eine wahrscheinliche Pkw-Besitz-Quote in einem Szenario ohne automatisierte Fahrzeuge.

In einem Szenario mit automatisierten Fahrzeugen wäre wie bereits beschrieben zu erwarten, dass gesundheitliche Gründe kein Hindernis zum Pkw-Besitz mehr darstellen. Die Pkw-Verfügbarkeit im Haushalt könnte damit auf das Pkw-Besitz-Potential je Altersgruppe steigen.

Mithilfe der für das Jahr 2030 gewichteten Bevölkerung kann somit das zukünftige Potential für automatisierte Fahrzeuge berechnet werden (siehe Abbildung 106). Der Verlauf ist ähnlich wie im Jahr 2017. Ein Unterschied ist jedoch, dass der Pkw aufgrund des Kohorteneffekts länger im Besitz der Haushalte bleibt und das Potential sich für die Nutzung von automatisierten Fahrzeugen im Alter vergrößert. Insgesamt steigt dieses Potential von ca. 1,5 Mio. Menschen im Jahr 2017 auf 2,1 Mio. Menschen im Jahr 2030. Dieses Potential zeigt auf, wie viele Menschen im Jahr 2030 ein autonomes Fahrzeug nutzen könnten, die derzeit aufgrund von gesundheitlichen Gründen keines besitzen. Kinder im Alter von 14 bis 17 Jahren, welche derzeit in einem Haushalt mit Pkw leben, aber noch keine Fahrerlaubnis besitzen, stellen jedoch auch eine neue NutzerInnengruppe dar. Werden diese in das Potential miteinbezogen, steigt die Zahl von ca. 4,6 Mio. Menschen im Jahr 2017 auf ca. 4,9 Mio. Menschen im Jahr 2030.

Abbildung 106: Potentielle NutzerInnen für das automatisierte Fahren im Jahr 2030



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Schnittstelle zum CAST-Modell – Implementierung von Automatisierung

In einem nächsten Schritt wird in dem Simulationsdatensatz die Implementierung von Automatisierung vorgenommen. Dies ist notwendig, um den Einfluss automatisierter Privat-Pkw in der Verkehrsmittelwahlmodellierung abbilden zu können. Für die Entscheidung, in welchem Haushalt automatisierte Fahrzeuge einer bestimmten Stufe bestehen, sind komplexe Prozesse erforderlich, die mit dem aggregierten Nachfragemodell nicht abgedeckt werden können. Aus diesem Grund wurde hier eine Schnittstelle zum Pkw-Besitz-Modell (CAST-Modell) entwickelt, in dem genau diese Prozesse abgewickelt werden (siehe Abschnitt 2.1.3.1). Die Ausgabe des CAST-Modells sind Diffusionsraten automatisierter Fahrzeuge je SAE-Level im Pkw-Bestand. Diese Werte werden in den Fahrzeugdatensatz der „MiD 2030/2040“ überführt. Die Zuteilung der Automatisierungsstufen erfolgt nach folgenden Variablen.

- Jahresfahrleistung
- Fahrzeugsegment
- Regionstyp
- Kinder im Haushalt

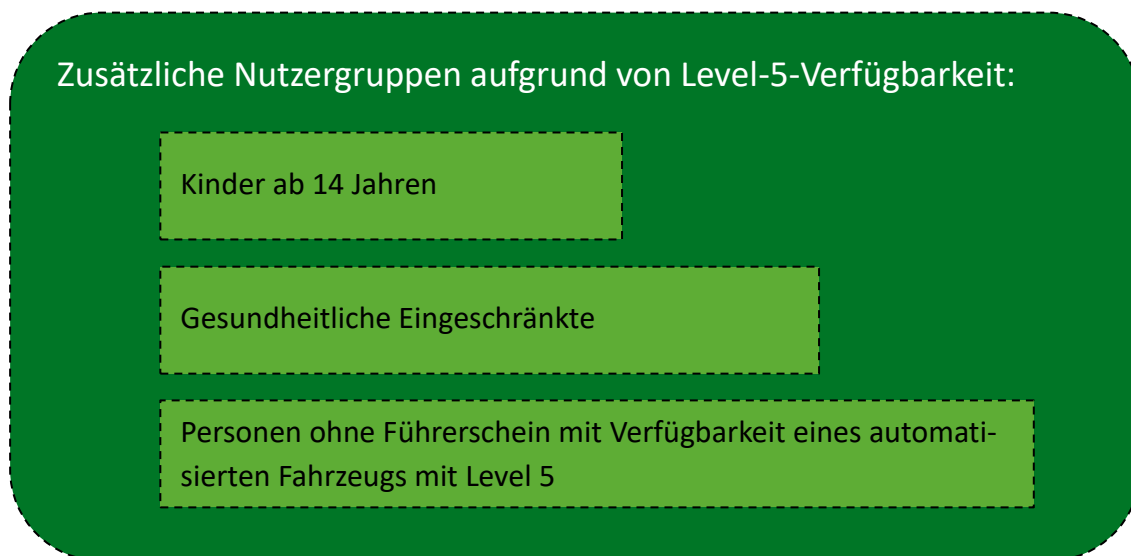
Diese Aspekte erklären die Verteilung von Fahrzeugen mit entsprechenden Automatisierungsstufen maßgeblich. Aus diesem Grund wurde die genannte Auswahl getroffen. Mit diesem Vorgehen kann jedem Fahrzeug im Datensatz der MiD eine Automatisierungsstufe von 0 (keine Automatisierung) bis 5 (Vollautomation) zugeteilt werden. Im Anschluss erfolgt die Zuteilung der

Automatisierungsstufen an die Personen. Dies geschieht in mehreren Stufen, da zwischen verschiedenen Personengruppen unterschieden werden muss, für die jeweils bzgl. der Zuteilung der Automatisierungsstufen unterschiedliche Annahmen zugrunde liegen. Dies betrifft folgende Gruppen.

- ▶ Erwachsene mit Pkw im Haushalt
- ▶ Minderjährige ab 14 Jahren mit Pkw im Haushalt
- ▶ Gesundheitlich Eingeschränkte ohne Pkw im Haushalt
- ▶ Personen, welche aus anderen Gründen keinen Pkw besitzen

Bei Erwachsenen mit Pkw im Haushalt wird ein entsprechendes Fahrzeug aus dem Haushalt zugeteilt. Steht im Haushalt mehr als ein Fahrzeug zur Verfügung, wird über die Jahresfahrleistung der Pkw und die am Stichtag zurückgelegten Kilometer der im Haushalt lebenden Personen entschieden, welches Fahrzeug welcher Person zugeordnet wird. Minderjährige können nur dann ein automatisiertes Fahrzeug nutzen, falls ein vollautomatisiertes Fahrzeug (SAE-Level 5) im Haushalt verfügbar ist. In diesem Fall wird ihnen dieses Fahrzeug und somit die Automatisierungsstufe 5 zugeteilt. Hier liegt die Annahme zu Grunde, dass nur vollautomatisierte Fahrzeuge von Personen ohne Fahrerlaubnis genutzt werden dürfen, da nur bei diesen Fahrzeugen für alle Fahrsituationen ein fahrerloses Fahren gewährleistet werden kann. Dies betrifft neben Minderjährigen ohne Fahrerlaubnis auch gesundheitlich Eingeschränkte sowie Erwachsene ohne Fahrerlaubnis.

Abbildung 107: Zusätzliche Nutzergruppen automatisierter Fahrzeuge



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Die Zuteilung der Automatisierungsstufen wird für gesundheitlich Eingeschränkte ohne Pkw im Haushalt sowie für Personen, die aus anderen Gründen keinen Pkw besitzen, entsprechend der Diffusionsraten im Pkw-Besitz nach Geschlecht, Altersgruppe und Raumtyp des Wohnortes vorgenommen. Doch nur diejenigen, denen eine Automatisierungsstufe 5 zugeordnet wird, dürfen diesen Pkw nutzen. Bei gesundheitlich Eingeschränkten besteht jedoch zusätzlich die

Herausforderung, dass diese durch die Nutzung von automatisierten Fahrzeugen ihren Aktionsradius maßgeblich erweitern können und somit ihr Mobilitätsverhalten anpassen könnten. Die im Datensatz hinterlegten Wegeabläufe würden hierdurch nicht mehr diesem angepassten Verhalten entsprechen. Aus diesem Grund wird der Datensatz dahingehend modifiziert, dass für diese Personen ein Verhalten wie für Personen ohne gesundheitliche Einschränkungen mit den gleichen sozio-demografischen Eigenschaften abgebildet wird. Dies wird anhand einer Gewichtung implementiert.

Verkehrsmittelwahlmodell

Für die Modellierung der Verkehrsmittelwahl ist es notwendig, zu verstehen, wodurch die Verkehrsmittelwahl maßgeblich beeinflusst wird. Ortúza und Willumsen (2011) stellen dar, dass die Entscheidung für die Wahl eines bestimmten Verkehrsmittels von einem spezifischen Nutzen, der von dem jeweiligen Verkehrsmittel ausgeht, abhängig ist. Messbare Parameter wie Kosten und Geschwindigkeit sind hierbei maßgebend (vgl. ebd., S. 230ff.) Jedoch auch subjektiv bewertete Parameter wie Flexibilität, Sicherheit, Komfort oder Verfügbarkeit wirken auf die Entscheidung (vgl. Fraedrich und Lenz 2015, S. 690).

Dieser Zusammenhang kann durch die in Abbildung 108 dargestellte Nutzenfunktion mathematisch beschrieben werden, welche die Grundlage für die Schätzung des Verkehrsmittelwahlmodells bildet. Die messbaren Parameter beschreiben den deterministischen Nutzen und fließen in den generalisierten Aufwand in Zeiteinheiten (GA) ein, welcher als erklärende Variable in das Modell eingeht. Die nicht betrachteten Parameter werden in dem Störterm ϵ berücksichtigt, der einen stochastischen Anteil in der Nutzenfunktion ausmacht. Die abhängige Variable ist das Hauptverkehrsmittel, bei dem genau eine Alternative gewählt werden kann. Für diesen Fall eignet sich ein diskretes Wahlmodell. Aus diesem Grund wird hierfür ein multinomiales Logit-Modell angewendet (vgl. Ortúza, Willumsen 2011, S. 230ff.).

Abbildung 108: Nutzenfunktion und Generalisierter Aufwand

$$U_i = ASC_i + \dots + \beta_{t,i} TIME_i + \beta_{c,i} COSTS_i + \dots + \epsilon_i$$

$$V_i = ASC_i + \beta_{ga} \left(TIME_i + \frac{COSTS_i}{VOT_i} \right)$$

Generalisierter Aufwand

$$VOT_i = \frac{\beta_{t,i}}{\beta_{c,i}}$$

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

In den generalisierten Aufwand gehen die Grenzkosten sowie die Fahrzeit ein, welche auf der durchschnittlichen Geschwindigkeit des jeweiligen Verkehrsmittels und der Streckenlänge des zurückgelegten Wegs beruhen (siehe Abbildung 108).

Um die marginalen Kosten in Zeiteinheiten umzuformen, ist die Nutzung des Zeitwerts (Value of Time [VOT]) eine geeignete Methode. Dieser Wert sagt aus, wie viel Geld die Verkehrsteilnehmende bereit wären zu zahlen, um eine Stunde, die mit dem jeweiligen Verkehrsmittel zurückgelegt wird, zu sparen. Axhausen et al. (2015) ermittelte mithilfe einer Revealed- und Stated

Preference-Befragung Zeitwerte, welche auf tatsächlichen Kosten der Wege basieren. Aus diesem Grund werden Fuß- und Radwege nicht berücksichtigt. Innerhalb dieser Untersuchung konnten zu den Zeitwerten Unterschiede zwischen den Wegezwecken festgestellt werden. Für dieses Modell relevant ist die Unterscheidung zwischen Pendelwegen (beziehen Arbeits- und Ausbildungswege mit ein) sowie Freizeit- und Einkaufswegen wie in Tabelle 60 einzusehen (vgl. ebd., S. 77).

Im Zuge der Automatisierung könnten sich diese Werte anpassen, da bei einer automatisierten Fahrt während der Fahrzeit anderen Aktivitäten nachgegangen werden kann. Die Wahrnehmung der Zeit während der Fahrt könnte sich demnach deutlich ändern. Hierzu hat Kolarova et al. (2019) ebenfalls mithilfe einer Revealed- und Stated Preference-Befragung analysiert, wie stark die Anpassungen der Zeitwerte sein könnten. Die Kernaussage ist, dass sich der VOT für Pendelwege, die mit einem automatisierten Fahrzeug zurückgelegt werden, im Vergleich zum herkömmlichen Pkw um 41 % reduziert. Dies bedeutet, dass die Zahlungsbereitschaft für die Vermeidung der Fahrzeit in einem automatisierten Fahrzeug sinkt, da Pendelwege insgesamt in solch einem Fahrzeug weniger negativ als in einem herkömmlichen Fahrzeug wahrgenommen werden. Im Gegensatz hierzu bleibt der VOT für Freizeit- und Einkaufswegen nahezu gleich. Bei allen anderen Verkehrsmitteln ergaben sich keine signifikanten Änderungen (vgl. ebd., S. 155, 165). Diese Ergebnisse betreffen jedoch nur den Nahverkehr. In einer weiteren Untersuchung konnte ermittelt werden, dass sich für Fahrten über 100 km in einem vollautomatisierten Fahrzeug für den VOT eine Reduktion um 22 % ergibt, unabhängig vom Wegezweck (vgl. Steck et al. 2019, S. 1).

Tabelle 60: Zeitwerte für den Analyse- und Szenariohorizont

Verkehrsmittel	Zweck	Zeitwerte [€/h]*	Reduktion durch Automatisierung	
			Nahverkehr (<100 km)**	Fernverkehr (>100 km)***
MIV FahrerInnen	Pendeln	4,73	41 %	22 %
	Andere	4,32	-	22 %
ÖV	Pendeln	4,46	-	-
	Andere	4,66	-	-
ACS	Alle	-	1,3 %	-
ARS	Alle	-	-5,1 %	-

Quelle: * Axhausen et al. 2015, S. 77; ** Kolarova et al. 2019, S. 165; *** Steck et al. 2019, S. 8

Neben den Zeitwerten werden für die Ermittlung des generalisierten Aufwands noch weitere Eigenschaften zu den Verkehrsmittel-Alternativen benötigt, welche in Tabelle 61 dargestellt werden. Dazu zählen einerseits Grenzkosten, welche Kosten angeben, die aufgrund eines zusätzlich gefahrenen Kilometers einer Fahrt anfallen. Für den Kraftstoffpreis des Kfz-Verkehrs wurden 0,10 Euro je Kilometer angenommen, die sich aus durchschnittlichem Verbrauch und durchschnittlichen Kraftstoffkosten ergeben. Andererseits werden Annahmen zu Zu- und

Abgangszeiten der einzelnen Verkehrsmittel berücksichtigt, welche aus Vorgängerprojekten übernommen wurden (vgl. Trommer et al. 2016, S. 63).

Tabelle 61: Annahmen zu den Verkehrsmittel-Alternativen

Verkehrsmittel	Grenzkosten [€/km]	Zu- und Abgang [min]	Geschwindigkeit
Zu Fuß	0	0	4 km/h
Fahrrad	0	3	Funktion
MIV FahrerInnen	0,10 (basiert auf mittleren Verbräuchen und Durchschnittskosten, 2017) (steigende Realkosten um 0,5 %/a)	5	Funktion (raum- und distanzabhängige Regressionsanalysen, MiD)
AV	Wie für MIV	3	Wie für MIV
ACS	Raumabhängige NutzerInnenkosten je km	Wartezeit → Input aus MAAS-Modell	Wie für MIV
ARS	Raumabhängige NutzerInnenkosten je km	Wartezeit → Input aus MAAS-Modell	Wie für MIV, zusätzlich abhängig von Umwegen
ÖV	Funktion (steigende Realkosten um 0,89 %/a)	15	Funktion (raumabhängige Regressionsanalysen, MiD)

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Wie im vorhergehenden Abschnitt dargestellt, spielen die Reisezeiten und somit die Geschwindigkeiten eine zentrale Rolle für die Verkehrsnachfrage und insbesondere für die Verkehrsmittelwahl. Diese wurden im Modell über Geschwindigkeitsfunktionen abgebildet, die die Fahrgeschwindigkeit je Verkehrsmittel nach der Weglänge wiedergeben. Die Geschwindigkeitsfunktionen für Fußwege, Fahrradfahrten und für den öffentlichen Verkehr wurden aus Vorgängerprojekten übernommen (vgl. Kröger et al. 2018, S. 7). Für den MIV wurde die Geschwindigkeitsfunktion neu ermittelt, um die Rückkopplung zwischen Verkehrsnachfrage und Verkehrsaufkommen im Netz abbilden zu können, die vor allem beim MIV eine Rolle spielt. Hierfür wurde zusätzlich der Zusammenhang von Raumtypen und der Straßenverkehrsauslastung auf die Geschwindigkeit einbezogen (siehe nächster Abschnitt).

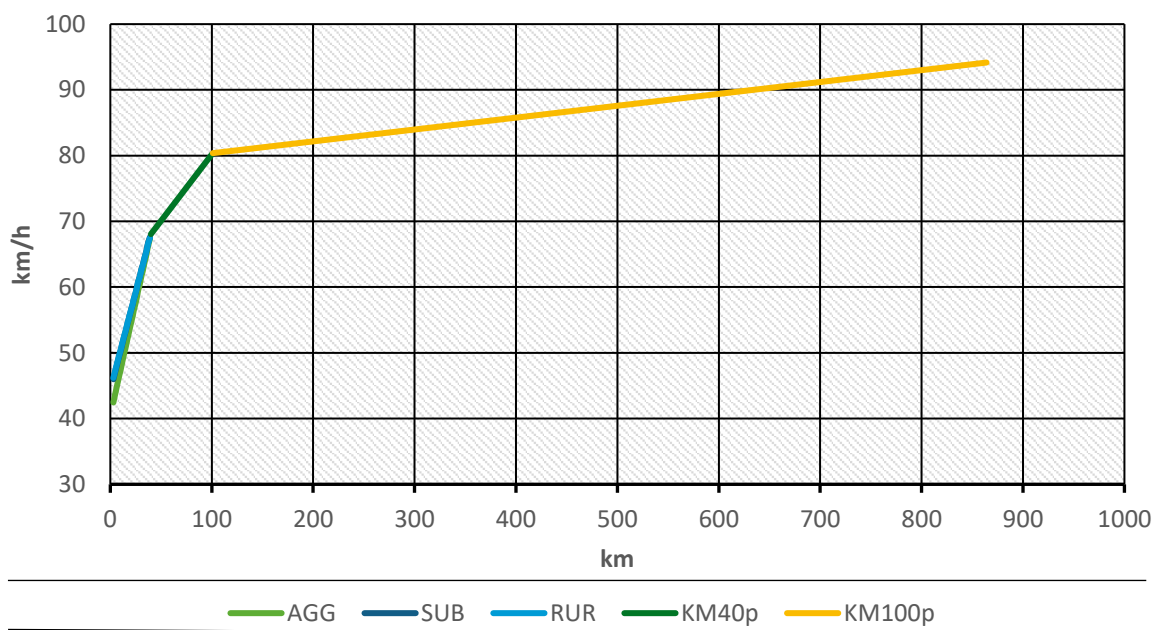
Auf der Grundlage eingehender Analysen des Zusammenhangs zwischen Geschwindigkeit (km/h) und Entfernung (km) bei Pkw-Fahrten konnte gezeigt werden, dass dieser Zusammenhang mit mehreren linear verlaufenden Funktionen hinreichend gut beschrieben werden kann (siehe Abbildung 109). Ein Unterschied dieses Zusammenhangs zwischen den drei verschiedenen siedlungsstrukturellen Regionstypen des BBSR Agglomeration (AGG), suburbaner Raum (SUB) und ländlicher Raum (RUR) wurde vornehmlich bis zu Distanzen von 40 km festgestellt.

Dies ist damit zu erklären, dass die Strecken unter dieser Distanzgrenze stark von der jeweiligen Raumkategorie geprägt sind und vorrangig genau in einem dieser Räume zurückgelegt werden. Ab 40 km könnten die Fahrten bereits zu einem gewissen Teil im übergeordneten Straßennetz bewältigt worden sein, sodass hier nicht mehr nach diesen Räumen trennscharf unterschieden werden kann. In Agglomerationsräumen sind oftmals die Straßen stärker als in suburbanen oder

ländlichen Räumen belastet, sodass die Geschwindigkeiten bis zu einer Streckenlänge von 40 km in diesen hochverdichteten Räumen im Durchschnitt geringer sind. Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten zwischen suburbanen und ländlichen Räumen hingegen unterscheiden sich kaum. Die Linien dieser Graphen liegen aus diesem Grund nahezu übereinander.

Der Trend ist in allen Räumen jedoch gleich: Mit zunehmender Streckenlänge nimmt die durchschnittliche Fahrtgeschwindigkeit deutlich zu. Ab einer Streckenlänge von 40 km (KM40p) nimmt dieser Anstieg der Geschwindigkeiten etwas ab und ab 100 km Streckenlänge (KM100p) steigt die Geschwindigkeit kaum noch an. Da die Fallzahl für Langstreckenwege innerhalb der MiD 2017 gering ist, kann für den weiteren Verlauf des Zusammenhangs zwischen Geschwindigkeit und Kilometerzahl kein sicheres Ergebnis ausgesagt werden. Allerdings dürfte sich die durchschnittliche Geschwindigkeit bei innerdeutschen Strecken über 600 km zwischen 90 und 100 km/h einpendeln. Vermutlich steigt die durchschnittliche Fahrtgeschwindigkeit durch Pausen und weitere Haltevorgänge nicht weiter bzw. nur geringfügig an.

Abbildung 109: Geschwindigkeit nach Streckenlänge (und Raumtyp)



AGG: Urbaner Raum, SUB: suburbaner Raum, RUR: ländlicher Raum, KM40p: Wegelänge von 40 bis unter 100km, KM100p: Wegelänge ab 100km

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

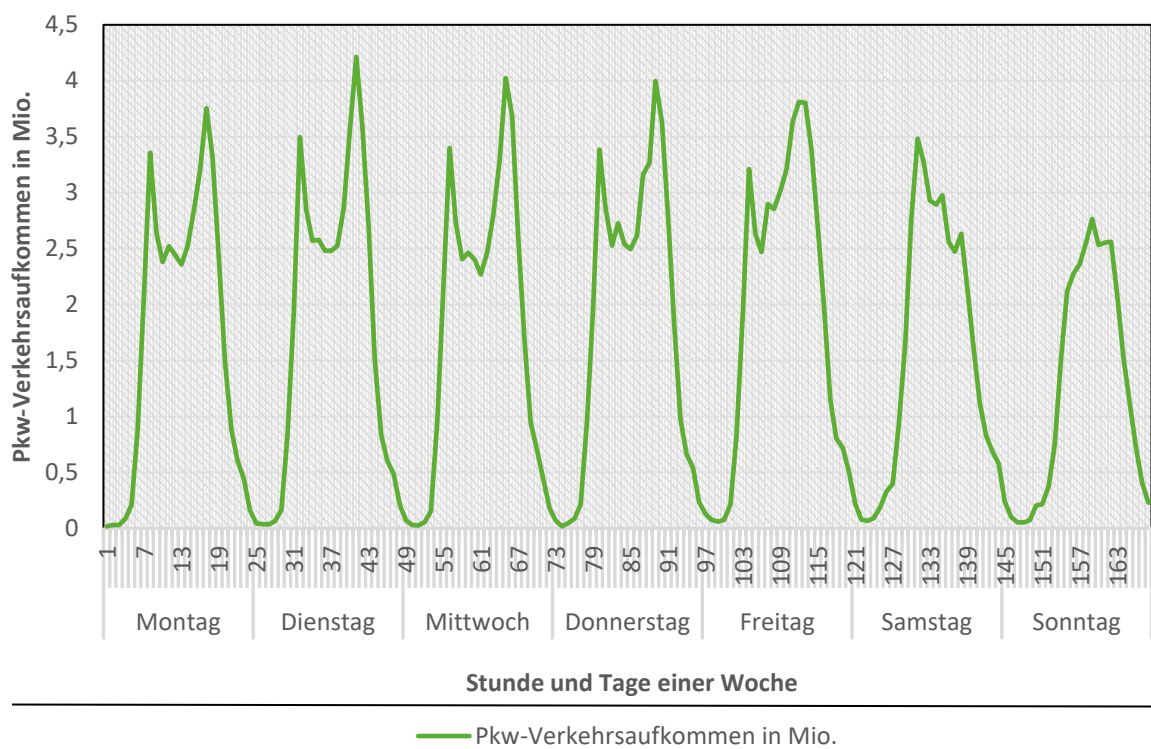
Zusätzlich zu den obigen Einflussfaktoren auf die Geschwindigkeit (Raumtyp und Entfernung) wird die Fahrgeschwindigkeit auch von der Verkehrsdichte und somit der Anzahl der gleichzeitig im Netz befindlichen Fahrzeuge beeinflusst. Da die Geschwindigkeit einen direkten Einfluss auf den generalisierten Aufwand und damit auf den Nutzen des Verkehrsmittels hat, sollte somit auch die momentane Verkehrsnachfrage in das Verkehrsmittelwahlmodell einfließen. In einem herkömmlichen Verkehrsmodell werden dabei einzelne Streckenabschnitte sowie deren belastungsabhängige Reisezeiten betrachtet.

Im vorliegenden aggregierten Modell wird hingegen berücksichtigt, wie viele Fahrzeuge sich gleichzeitig deutschlandweit im Straßennetz befinden. Dieser Wert wird für alle Stunden der

Woche differenziert und abhängig vom jeweils modellierten Szenario ermittelt. Somit ist ein Blick auf einen bestimmten Streckenabschnitt nicht möglich, sondern der stündliche Durchschnittswert für das gesamte Netz wird berechnet. Bei starken durchschnittlichen Netzbelastungen könnten sich somit Verlagerungen vom Pkw auf andere Verkehrsmittel ergeben, da sich aufgrund der niedrigeren möglichen Geschwindigkeiten der generalisierte Aufwand für die Pkw-Fahrt erhöht. Jedoch könnte sich in Zukunft auch ein Rebound-Effekt einstellen: Wenn sich aufgrund einer harmonisierten Fahrweise durch automatisierte Fahrzeuge die Kapazität des Netzes erhöht, könnte die Netzauslastung vorerst sinken. Die Nutzung von automatisierten Fahrzeugen wird somit attraktiver und die Anzahl dieser Fahrten könnte zunehmen.

Die Rückkopplungseffekte mit dem Netz werden über Auslastungsgrade je Stunde einer Woche im Verkehrsmittelwahlmodell berücksichtigt. Da die durchschnittliche Kapazität des gesamten Netzes unbekannt ist, orientiert sich der Auslastungsgrad an der Stunde mit dem stärksten Verkehrsfluss. Abbildung 110 zeigt, dass die Spitzenstunde ein Verkehrsaufkommen von 4,2 Mio. Kfz aufweist. Mit fünf Mio. Kfz pro Stunde wird für das Modell eine Kapazität angenommen, die 20 % über dem Verkehrsaufkommen der Spitzenstunde liegt.

Abbildung 110: Tagesganglinien von Montag bis Sonntag nach der MiD 2017



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Da sich die Kapazitäten der Verkehrsanlagen aufgrund automatisierten Fahrens ändern können und dies Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl haben kann, ist es bedeutsam, in diesem Modell Kapazitätseffekte einzubeziehen. Hierzu wurde eine Schnittstelle zu dem Netzmodell PTV Vali-date von KIT implementiert. Dabei werden die in diesem Modell für ganz Deutschland ermittelten Kapazitätseffekte als prozentuale Änderungen in das aggregierte Nachfragemodell über-führt. Auf diese Weise können im Schritt der Rückkopplung im Netz die Auslastungsgrade

angepasst werden. Die daraus folgenden Wirkungen auf die Geschwindigkeiten und somit Fahrzeiten für die Pkw-Fahrten werden anschließend in der Verkehrsmittelwahl innerhalb des iterativen Prozesses berücksichtigt.

Logit-Modell und Verkehrsmittelwahlprozess

Da das Verkehrsmittelwahlverhalten stark davon abhängt, zu welchem Zweck die Person unterwegs ist und ob diese über einen Pkw verfügt, wurde bei der Modellierung nach diesen Merkmalen unterschieden. Bei den Verkehrszwecken ist dabei vor allem entscheidend, ob es sich um einen Pendelweg handelt. Als Pendelweg wurden Fahrten zur Arbeit, dienstliche oder geschäftliche Wege sowie Fahrten zur Ausbildungsstätte definiert. Es wurden die folgenden vier Gruppierungen vorgenommen, bei denen die Aspekte Pkw-Verfügbarkeit und Pendelweg miteinander kombiniert wurden.

- a) Pendelweg und Pkw im Haushalt verfügbar
- b) Pendelweg und kein Pkw im Haushalt verfügbar
- c) Kein Pendelweg und Pkw im Haushalt verfügbar
- d) Kein Pendelweg und kein Pkw im Haushalt verfügbar

Jeder Weg kann genau einer dieser Kategorien zugeordnet werden. Damit ergeben sich vier trennscharfe Gruppen, die im Verkehrsmittelwahlmodell gesondert betrachtet werden. Um diese Unterscheidung innerhalb des Modells vornehmen zu können, wurden für jedes Verkehrsmittel Dummy-Variablen entsprechend den Gruppen angelegt. Der generalisierte Aufwand eines Weges wird jeweils nur in der entsprechenden Gruppe berücksichtigt, für alle weiteren Fälle wird er auf „0“ gesetzt. Da der FußgängerInnenverkehr die Referenz innerhalb des Modells darstellt, wurde dieser bei den Dummy-Variablen nicht berücksichtigt. Diese Variablen fließen als erklärende Variablen in die Modellschätzung ein. Mithilfe dieser Vorgehensweise wurde es möglich, die Koeffizienten zur Verkehrsmittelwahl für diese unterschiedlichen Gruppen in einem einzigen multinomialen Logit-Modell zu schätzen. Die Ergebnisse aller Koeffizienten sind hochsignifikant. Der Wert für das Pseudo- R^2 nach McFadden beträgt 0,19, was nach allgemeinen Erfahrungen eine zufriedenstellende Modellgüte für ein derartiges Verkehrsmittelwahlmodell ist (vgl. Muley et al. 2009). Anschließend wurde für jedes Verkehrsmittel die Wahrscheinlichkeit berechnet, das jeweilige Verkehrsmittel für den jeweiligen Weg zu nutzen.

Zuerst wurde die Modellschätzung im Analysehorizont für das Erhebungsjahr 2017 durchgeführt, welches im Anschluss im Szenariohorizont mit einer Modellschätzung für das gewünschte Szenariojahr in Relation gebracht wird. Ist die Wahrscheinlichkeit, dass im Erhebungsjahr genutzte Verkehrsmittel zu wählen, im Szenariojahr gegenüber dem Analysejahr gesunken, wird mittels einer Monte-Carlo-Simulation entschieden, ob ein anderes Verkehrsmittel stattdessen gewählt wird. Diese Methode wird eingesetzt, da bei der Berechnung der Wahlwahrscheinlichkeit lediglich die deterministischen Parameter Einfluss haben. Mittels dieser stochastischen Simulation kann die Zufallskomponente, die von dem Störterm der Nutzenfunktion ausgeht, berücksichtigt werden. Die Zuteilung der Verkehrsmittel für die in der Monte-Carlo-Simulation gewählten Wege erfolgt im nächsten Schritt. Dabei kann nur auf Verkehrsmittel gewechselt werden, deren Nutzungswahrscheinlichkeit entweder gleichbleibt oder sich im Szenariojahr erhöht. Mittels einer weiteren Monte-Carlo-Simulation wird das alternative Verkehrsmittel gewählt.

Da eine Änderung in der Verkehrsmittelwahl Einfluss auf die Auslastung des Straßennetzes hat, wird nach dieser Modellschätzung die Verkehrsbelastung sowie der Auslastungsgrad je Stunde

einer Woche neu berechnet, was wiederum Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl hat. Aus diesem Grund wurde eine iterative Angleichung implementiert. Dieser Vorgang wird beendet, sobald die Anzahl der Verkehrsmittelwechselnde gleich Null ist oder sich die Anzahl dieser in den letzten beiden Iterationsläufen nicht mehr ändert.

In dem bisher beschriebenen aggregierten Nachfragemodell ist es noch nicht möglich, autonomes Car- und Ridesharing abzubilden. Diese Angebote stellen jedoch weitere Verkehrsmittelalternativen dar, welche sich im Zuge des vollautomatisierten Fahrens zu relevanten Verkehrsmitteloptionen herausbilden könnten und deren Betrachtung sich demnach als notwendig erweist. Hierzu wurde Schnittstelle mit dem MAAS-Modell geschaffen.

Innerhalb des Verkehrsmittelwahlprozesses werden mithilfe der erforderlichen angebotsseitigen Informationen dieses Modells die zwei weiteren Mobilitätsangebote (ACS/ARS) in das aggregierte Nachfragemodell implementiert und neben den konventionellen Verkehrsmitteln als weitere Alternativen angeboten. Hierzu erforderliche Informationen sind Wartezeiten, Fahrzeiten und NutzerInnenpreise. Dabei werden für das ARS die Fahrzeiten abhängig von Umwegfaktoren und Besetzungsgraden berechnet. Der Fahrpreis wird bei ARS jedoch für die direkte Strecke, also ohne gefahrene Umwege, ermittelt. Diese Informationen werden innerhalb der Iterationen zur Verkehrsmittelwahl und Rückkopplung im Netz weiterverarbeitet und genutzt.

Auf Basis der geschätzten Alternativen spezifischen Konstante der konventionellen Verkehrsmittel werden innerhalb dieser Schnittstelle die jeweiligen Alternativen spezifischen Konstanten für ACS/ARS bestimmt. ACS ist in der Charakteristik des Verkehrsmittelangebots zwischen dem privaten Pkw und dem ÖPNV einzuordnen, da einerseits das Fahrzeug während der Fahrt allein genutzt werden kann, doch andererseits das Fahrzeug sequentiell geteilt wird und öffentlich zur Verfügung gestellt wird. Aus diesem Grund wird für die Alternativen spezifische Konstante für das ACS der Mittelwert zwischen der Konstante für Pkw und ÖPNV gewählt. ARS ist hingegen ein Angebot, bei dem das Fahrzeug auch während der Fahrt mit fremden Passagieren geteilt wird. Diese Verkehrsmittelalternative kann somit genauso wie der ÖPNV bewertet werden und erhält somit dessen Alternativen spezifische Konstante.

Für alle Verkehrsmittel werden anschließend der Nutzen auf Basis des generalisierten Aufwands sowie der Alternativen spezifischen Konstanten neu bestimmt, um darauffolgend die Wahlwahrscheinlichkeiten aller Modi ermitteln zu können. Dies erfolgt innerhalb des iterativen Prozesses der Verkehrsmittelwahl. Da sowohl die ACS-Fahrzeuge als auch die ARS-Fahrzeuge jeweils den öffentlichen Straßenraum nutzen werden, werden diese Fahrzeuge ebenfalls in der Rückkopplung im Netz berücksichtigt.

Entfernungswahl

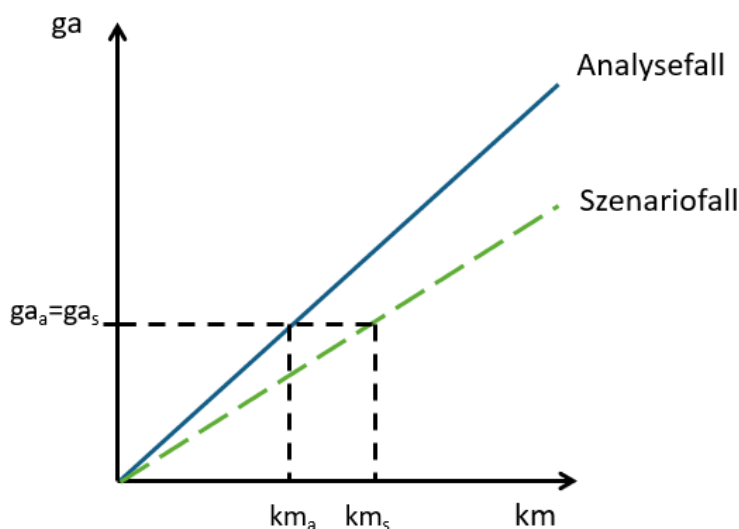
Dieser Modellschritt des aggregierten Nachfragemodells wird in einem konventionellen Vier-Stufen-Modell häufig auch „Zielwahl“ genannt, da in diesem Fall nach der Verkehrserzeugung auf Basis der Verkehrsmengen je Quellzelle und der jeweiligen Wegezwecke die Zielzelle und somit eine Quell-Ziel-Beziehung erzeugt wird sowie die Verkehrsströme verteilt werden (Verkehrsverteilung). In diesem Modell erfolgt der Mechanismus auf eine andere Weise, da die Haushaltserhebung MiD 2017 Daten zu bereits durchgeführten Wegen bereitstellt. Hierbei stehen die Wege mit deren Wegelängen bereits fest, sodass keine weitere Modellierung notwendig ist. Ein weiterer Aspekt ist, dass durch die aggregierte Modellierung keine detaillierte räumliche Betrachtung stattfindet und somit keine Quell-Ziel-Beziehungen zwischen Verkehrszellen ermittelt werden. Die Information zur Ortsveränderung wird lediglich durch die Distanz des Weges ausgedrückt.

Bei der Ermittlung der Entfernungswahl gehen wir nun davon aus, dass der generalisierte Aufwand, der für jeden Weg berechnet wird, im Analyse- und Szenariohorizont gleichbleibt, da die NutzerInnen stets das gesamte generalisierte Kostenbudget ausnutzen möchten. Da sich aber im Szenariofall der VOT aufgrund von Automatisierungseffekten und geringeren Realkosten je Kilometer ändert, ergeben sich auch niedrigere Gesamtkosten für den jeweiligen Weg. Die Kostenersparnis durch die Automatisierung kann somit dazu führen, dass ein bestimmter Weg die NutzerInnen weniger kostet, als sie bereit sind dafür auszugeben.

In diesen Fällen wird angenommen, dass die NutzerInnen eine weitere Strecke zurücklegen und somit ein entfernter liegendes Ziel ansteuern, von dem eine erhöhte Attraktivität ausgeht, um ihr gesamtes für diesen Weg zur Verfügung stehendes Kostenbudget auszuschöpfen. Dieser Effekt wird in Abbildung 111 dargestellt. Er wird sich vorrangig auf Pendelstrecken beziehen, da die in dem Fahrzeug verbrachte Zeit als weniger negativ wahrgenommen wird (Kolarova et al. 2019). Denn es ist möglich, sich in vollautomatisierten Fahrzeugen (SAE-Level 4 und 5) anderen Aktivitäten zu widmen.

Dieser Zusammenhang kann auch mittels der Gleichung zur Ermittlung des generalisierten Aufwands nachvollzogen werden, wie in Abbildung 112 dargestellt. Bei Umstellen dieser Gleichung können die für einen Weg weiteren zurückgelegten Kilometer berechnet werden. Dabei fallen für jeden weiteren zurückgelegten Kilometer weiterhin Kosten an. Darüber hinaus wird zur Berechnung des generalisierten Aufwands für den Szenariohorizont ein Anpassungsfaktor genutzt. Hier gehen wir davon aus, dass die Zeit im Szenariofall aufgrund von Automatisierung im Vergleich zum Analysefall unterschiedlich wahrgenommen wird. Mit dem Anpassungsfaktor kann dieser Unterschied ausgeglichen werden. Da für jeden Weg das gesamte generalisierte Kostenbudget ausgenutzt wird, handelt es sich um eine Maximalabschätzung für die Pkw-Verkehrsleistung.

Abbildung 111: Zusammenhang zwischen generalisiertem Aufwand und Distanz



ga: generalisierter Aufwand, ga_a : generalisierter Aufwand im Analysefall, ga_s : generalisierter Aufwand im Szenariofall, km: Distanz in Kilometern, km_a : Distanz in Kilometern im Analysefall, km_s : Distanz in Kilometern im Szenariofall

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Abbildung 112: Gleichung zur Ermittlung der Fahrweiten im Szenariohorizont

$$GA_{Analyse} = GA_{Szenario} \quad (1)$$

$$GA_{Analyse} = AF * ZEIT_{Szenario} + \frac{Kosten_{Szenario}}{VOT_{Analyse}} \quad (2)$$

$$GA_{Analyse} = AF * \frac{Km_{Szenario}}{v_{Szenario}} + \frac{Kkm_{Szenario} * Km_{Szenario}}{VOT_{Analyse}} \quad (3)$$

$$GA_{Analyse} = Km_{Szenario} * \left(\frac{AF}{v_{Szenario}} + \frac{Kkm_{Szenario}}{VOT_{Analyse}} \right) \quad (4)$$

$$Km_{Szenario} = \frac{GA_{Analyse}}{\frac{AF}{v_{Szenario}} + \frac{Kkm_{Szenario}}{VOT_{Analyse}}} \quad (5)$$

$GA_{Analyse}$: Generalisierter Aufwand im Analysefall, $GA_{Szenario}$: Generalisierter Aufwand im Szenariofall, $ZEIT_{Szenario}$: Wegedauer im Szenariofall, $Kosten_{Szenario}$: Kosten im Szenariofall, $VOT_{Analyse}$: Zeitwert im Analysefall, $v_{Szenario}$: Geschwindigkeit im Szenariofall, $Kkm_{Szenario}$: Kosten je Kilometer im Szenariofall, AF = Anpassungsfaktor, $Km_{Szenario}$: Wegelänge in Kilometern im Szenariofall

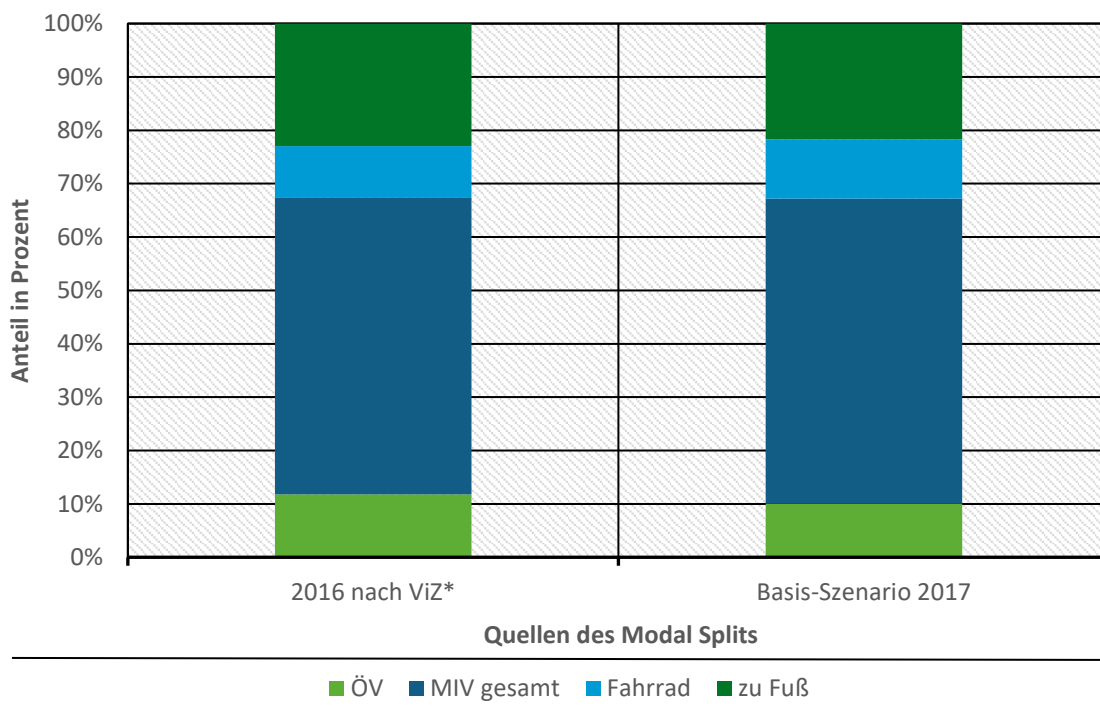
Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Prüfen des Verkehrsmittelwahlmodells

Bevor mit dem Modell die Projektszenarien zur Automatisierung gerechnet wurden, erfolgten Tests auf Plausibilität sowie Funktionalität. Hierfür wurden Modellrechnungen für das Basisjahr 2017 durchgeführt, da somit ein Vergleich zur Realität möglich ist. In diesen Modellrechnungen wurden keine Änderungen bei den Eingangsparametern vorgenommen. Somit stellt dieses Basisjahr den Status-Quo dar. Die im Modell berechnete Jahresverkehrsleistung für die MIV-FahrerInnen ist dabei näherungsweise äquivalent zur Jahresverkehrsleistung im Jahr 2017, welche 950,4 Mrd. Personenkilometer beträgt (DIW et al. 2018, S. 219).

Im Modell wurde jedoch die Jahresfahrleistung in Pkw-Kilometern berechnet und nicht die Jahresverkehrsleistung in Personenkilometern. Aus diesem Grund muss die Jahresverkehrsleistung für das Jahr 2017 durch den Besetzungsgrad dividiert werden, um die gefahrene Distanz nach Fahrzeugen zu erhalten. Der Wert für einen Besetzungsgrad ist der MiD 2017 zu entnehmen, der im Durchschnitt 1,5 Personen pro Pkw-Fahrt beträgt (Follmer et al. 2018, S. 7). Im Jahr 2017 wurden demnach ca. 633,6 Mrd. Pkw-Kilometer im MIV zurückgelegt. Hingegen beträgt die modellierte Jahresfahrleistung 645 Mrd. Pkw-Kilometer. Bei einem Vergleich der Werte fällt ein Unterschied von ca. 1,8 % auf.

Abbildung 113: Gegenüberstellung der Modal Splits der ViZ und des Basis-Szenarios



Quelle: Eigene Darstellung (*Quelle: DIW et al. 2018, S. 222f.)

Der aktuelle Modal Split für innerdeutsche Wege kann der Studie „Verkehr in Zahlen 2018/2019“ (ViZ) entnommen werden. Wie in Abbildung 113 erkennbar, entspricht der modellierte Modal Split für das Basisjahr 2017 fast genau jenem der ViZ aus dem Jahr 2016 (vgl. DIW et al. 2018, S. 222f.). Marginale Unterschiede sind jedoch vorhanden. Diese wurden weiter geprüft und zur Kalibrierung des Modells herangezogen. Mithilfe weiterer Szenarien, in denen Parameter zur Geschwindigkeit bzw. zu Kosten geändert wurden, konnte die Sensitivität des Modells geprüft werden.

Neben den festgesetzten Dateneingaben innerhalb der Verkehrserzeugung werden noch weitere Daten innerhalb des Modells genutzt, welche teilweise festgesetzt oder variabel sind und somit auf Annahmen basieren. Dabei haben die verschiedenen Daten und strukturellen Anpassungen unterschiedliche Wirkungen auf das Verkehrsmittelwahlverhalten (siehe Tabelle 62). Besonders starken Einfluss haben finanzielle Anpassungen der Mobilitätsangebote. Diese gehen einerseits von den zu erwartenden Preisentwicklungen, die der Verkehrsprognose zu entnehmen sind, aus. Andererseits kann durch gezielte Maßnahmen finanzieller Art Einfluss auf das Verkehrsverhalten ausgeübt werden. Darüber hinaus hat die Pkw-Verfügbarkeit im Haushalt einen entscheidenden Einfluss auf das Verkehrsverhalten, weswegen deren Fortschreibung und Einbindung in die iterative Gewichtung zur Erstellung der Simulationsbevölkerung von großer Bedeutung ist. Alle weiteren Faktoren sind ebenfalls für die Verkehrsmittelwahl relevant, doch deren Einfluss ist im Vergleich etwas gemäßigter.

Tabelle 62: Einflussstärke der Inputgrößen und strukturellen Anpassungen

Modellschritt	Unveränderlich	Variabel (auf Annahmen basierend)
Verkehrs-erzeugung	MiD 2017* Raumordnungsprognose (BBSR)*	⊕ Fortschreibung der Pkw-Verfügbarkeit ⊕ Automatisierung der Flotte ⊕ NutzerInnengruppen automatisierter Fahrzeuge ⊕ Umgang mit gesundheitlich Eingeschränkten und Jugendlichen ⊕ Bevölkerungsfortschreibung (iterative Gewichtung)
Verkehrsmittelwahl	⊕ Verkehrsprognose (BVWP) ⊕ Zeitwerte (Veränderung durch Automatisierung)	⊕ Verkehrsmittelwahleigenschaften (Kosten, Zu- und Abgangszeiten, Geschwindigkeiten)
Rückkopplung im Netz		+ Gesetzte Gesamtkapazitäten für Deutschland + Anpassung der Kapazität im Szenariofall (KIT)
Entfernungswahl		+ Ausschöpfung des „generalisierten Kostenbudget“

* Datengrundlage

⊕ starke Einflussgröße

+ gemäßigte Einflussgröße

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

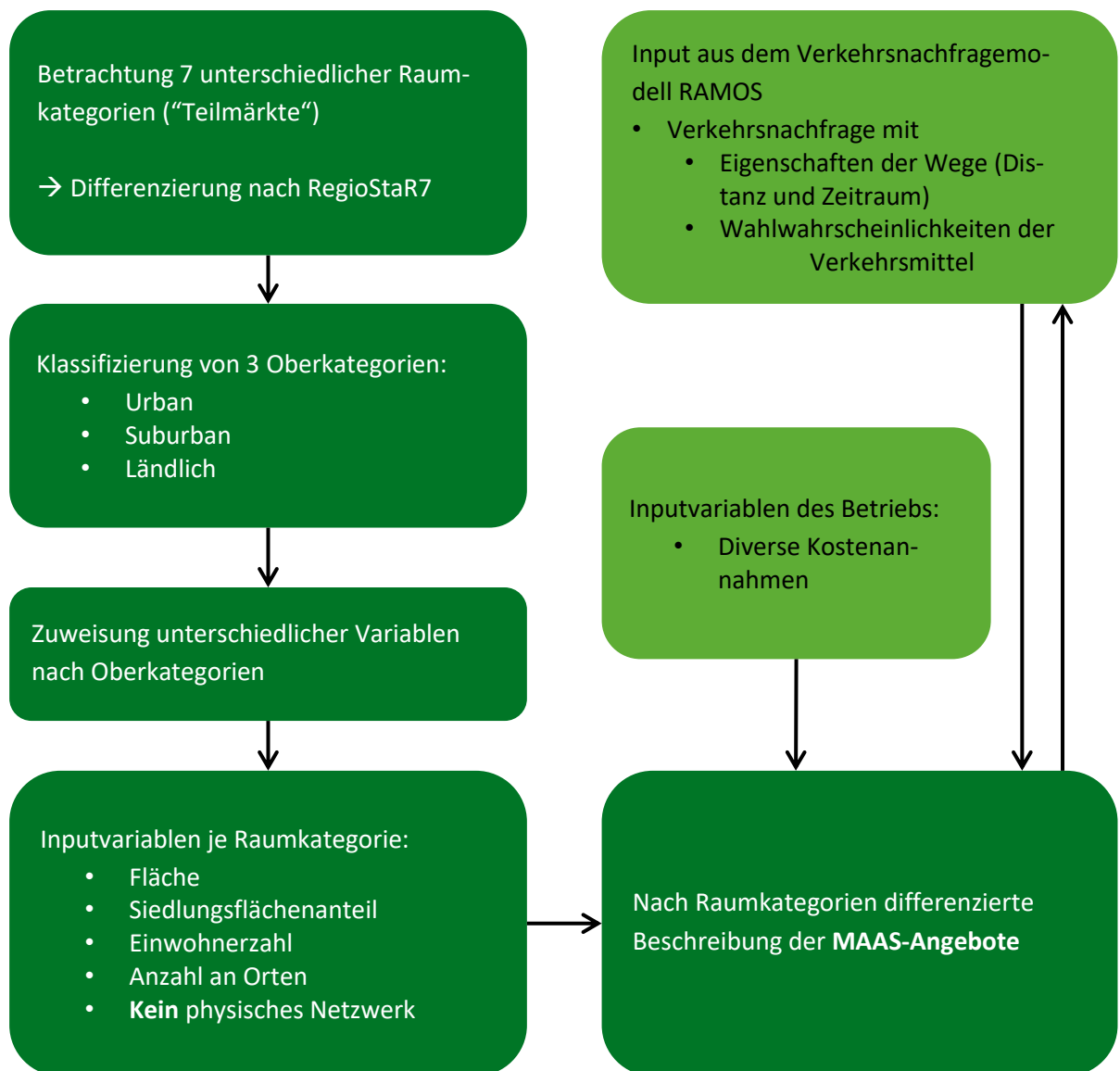
A.7.4 Modellierung neuer Mobilitätsangebote (ACS/ARS) mit dem MaaS-Modell

Modellierung

Die Modellierung des Angebots und der Nachfrage nach ACS und ARS erfolgt aufgrund unterschiedlicher Siedlungsflächenanteile und Bevölkerungsdichten räumlich differenziert. Die Einteilung erfolgt zweistufig auf Basis der RegioStaR7-Kategorien (BMVI 2018). Die erste Aufteilung ist eine feingliedrige Aufteilung auf sieben Teilmärkte entsprechend der sieben Raumkategorien. Die zweite Einteilung in sogenannte Oberkategorien erfolgt anhand einer Zuweisung der RegioStaR7-Kategorien zum urbanen, suburbanen und ländlichen Raum.

Die Zuweisung von Parameter-Sets und Annahmen zur Berechnung der Wartezeiten und Lee-fahrtenlängen erfolgen auf Basis der Oberkategorien. Die konkrete Modellierung anhand der Nachfrage- und Angebotsdichten erfolgt innerhalb der einzelnen Teilmärkte.

Abbildung 114: Übersicht der räumlichen Klassifizierungen und der Inputvariablen des MaaS-Modells



Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Je Teilmarkt werden mehrere Input-Variablen berücksichtigt, die für die Berechnung der Nachfrage- und Angebotsdichten relevant sind. Hierzu zählen die Gesamtfläche, der Siedlungsflächenanteil, die Einwohnerzahl und die Anzahl an Orten. Für den urbanen Raum wird eine insgesamt geschlossene Fläche angenommen. Die Variable der Ortspunkte fällt hier daher weg, der Siedlungsflächenanteil wird dennoch berücksichtigt (vgl. Abbildung 114).

Die Betrachtung der Teilmärkte erfolgt differenziert nach Zeitintervallen (Frühspitze, Spätspitze, Nachtzeit und sonstige Tageszeiten). Die Nachfrage in der Nachtzeit ist am geringsten. Beim ARS ist daher die Wahrscheinlichkeit des Poolings im Nachtverkehr am geringsten. Die Wartezeiten auf das nächste freie Leerfahrzeug beim ACS sind jedoch ebenso gering, da die Anzahl der effektiv verfügbaren Fahrzeuge am höchsten ist. Die tatsächliche Zuweisung der Verkehrsleistung zu

Zeitbereichen für die Berechnung der Kapazitätsauslastungsfunktion erfolgt im Verkehrsnachfragemodell in detaillierteren Zeitabschnitten.

Entscheidende Inputvariablen für die Modellierung sind die NutzerInnenpreise (in €/km) und die Angebotsdichte (in Fahrzeugen/1.000 EinwohnerInnen). Für die Modellierung der konkreten Angebotseigenschaften des ACS bzw. ARS werden innerhalb der bereits benannten Teilmärkte die verfügbare Angebotskapazität und die Nachfragemenge aufsummiert und die Angebotseigenschaften anhand von Verteilungsfunktionen ermittelt.

Zur Ermittlung der Verfügbarkeit der Fahrzeuge wird initial die Anzahl der Fahrzeuge mit der Gesamtintervalllänge multipliziert. Bei der Frühspitze sind dies z. B. drei Stunden täglich. Es ergibt sich dadurch eine Gesamtverfügbarkeit in Fahrzeug-Stunden. Im iterativen Prozess wird dann jeweils eine als „effektive Gesamtverfügbarkeit“ definierte Größe betrachtet, die sich nach Abzug der Summe der Fahrzeiten mit oder ohne NutzerInnen (Leerfahrten) ergibt.

Beim ARS ist zusätzlich das Pooling zu bestimmen. Hierfür werden Nachfragevektoren fiktiv im Raum verteilt. Es wird ein Raster mit einer Kantenlänge von einem Kilometer angenommen und sechs (ländlich, suburban) bzw. acht (urban) Himmelsrichtungen betrachtet. Die nachgefragte Verkehrsleistung unter Berücksichtigung von Umwegfaktoren wird so auf die Himmelsrichtungen der Rasterfelder verteilt. Dies erfolgt innerhalb von Intervallen (10 Minuten im urbanen und suburbanen Raum, 15 Minuten im ländlichen Raum). Die Zuweisung der Nachfrage erfolgt wiederum anhand einer ganzzahligen Poisson-Verteilung. Auf diese Weise werden Poolingraten bestimmt und den NutzerInnen zugewiesen. In einem iterativen Verfahren sind die Poolingraten wiederum zum Bestimmen der Umwegfaktoren anzuwenden.

Für die Berechnung der Zufahrtszeiten zu den NutzerInnen werden dann je nach Oberkategorie zwei Verfahren angewandt. Im suburbanen und ländlichen Raum werden zunächst die effektiv verfügbaren Fahrzeuge der Anzahl an Orten gegenübergestellt. Anhand ganzzahliger Poisson-Verteilungen werden die Fahrzeuge je Ort zufallsverteilt ermittelt. Bei höherer Kapazitätsauslastung ist die Wahrscheinlichkeit geringer, dass unmittelbar im Ort ein Fahrzeug verfügbar ist. Die NachfragerInnen werden ebenfalls zufällig über die Orte verteilt. Muss ein Fahrzeug aus einem Nachbarort geholt werden, werden entsprechend der Kantenlängen der Raster Ortsabstände aufsummiert. Innerhalb der Orte mit verfügbaren Fahrzeugen und im urbanen Raum im Allgemeinen erfolgt die Zuweisung anhand einer stetigen Zufallsverteilung. Hierbei wird berücksichtigt, dass die Fahrzeuge nicht optimal rasterverteilt aufzufinden sind, andernfalls würden tatsächliche Zufahrtslängen in vielen Fällen unterschätzt. Die beschriebene Methodik gilt beim ACS im Allgemeinen und beim ARS bei der Zufahrt von Leerfahrzeugen. Die berechneten Zufahrtszeiten stellen zugleich die Wartezeiten der NutzerInnen dar, die in der Nutzenfunktion berücksichtigt werden. Zufahrtszeiten oberhalb von 5 Minuten werden nur zur Hälfte als Wartezeiten für die Nutzenberechnung berücksichtigt. Hierbei wird angenommen, dass eine längere vorhersehbare Wartezeit teilweise noch produktiv genutzt werden kann.

Im Allgemeinen gelten folgende Zusammenhänge.

- Je höher der Modal-Split-Anteil des ARS und je höher die Bevölkerungsdichte, desto höher sind die Pooling-Besetzungsgrade.
- Je höher die einzelnen Pooling-Besetzungsgrade, desto höher sind die einzelnen Umwegfaktoren. Allerdings gilt für den Gesamtzusammenhang: Je höher der Modal-Split-Anteil des

ARS, desto geringer ist der Anstieg der Umwegfaktoren beim Anstieg des Pooling-Besetzungsgrades.

Zum Abbilden der Umwegfaktoren und des Pooling-Besetzungsgrades wurden funktionale Zusammenhänge entsprechend der genannten Abhängigkeiten aufgestellt. Diese orientieren sich an ersten Veröffentlichungen zu Mikrosimulationen in diesem Bereich (z. B. Bischoff et al. 2017), sind jedoch noch stark annahmenbasiert.

Bei Anwendung der Zufallsverteilungen ist es grundsätzlich wichtig, dass die für die Zuweisung gezogenen Zufallszahlen im iterativen Prozess konstant gehalten werden, um einen stabilen Zustand zu erreichen und ein Oszillieren zu verhindern.

Für die Betrachtung der Anbieterperspektive wird im Sinne einer Geschäftsrechnung bestimmt und geprüft, welche Angebotsdichten unter gegebenen Kostenstrukturen und Nutzungspreisen profitabel angeboten werden können. Je Teilmarkt werden dafür die Verkehrsleistungen differenziert nach Nutzungs- und Leerkilometern (im Fall des ARS unter Berücksichtigung der Umwegfaktoren und Besetzungsgrade) aufsummiert und mit den entsprechenden Kostenbestandteilen verrechnet.

Die Betriebskosten des ACS und ARS lassen sich in viele Einzelkomponenten unterteilen. Diese sind teils distanz- und teils zeitabhängig (vgl. Tabelle 63). Für die Bewertung der Profitabilität, die für die Definition von Nutzungspreisen von Bedeutung sein kann, sind zudem Leerfahrtenanteile und im Fall des ARS Besetzungsgrade und Umwegfaktoren zu berücksichtigen. Diese Einflussgrößen sind raum- und zeitabhängig unterschiedlich.

Tabelle 63: Übersicht der Kostenkomponenten und Werte der Betriebskosten des ACS bzw. ARS

Kostenkomponente	Berücksichtigung & Bezugsgröße im Modell	Wert ACS	Wert ARS	Bemerkungen
Kosten der Fahrzeuge		30.000 €		Annahme Kompaktwagen, z.B. VW-Golf
Lebensfahrleistung		250.000 km		Anstieg ggü. MiD-Durchschnitt wg. Automatisierung
Abschreibung	Pro Fahrzeug-km	0,12 €/km		
Kraftstoffpreis bzw. Strompreis		1,50 €/l bzw. 0,30 €/kWh		Hier: Realpreise
Verbrauch Kraftstoff bzw. Strom		6,7 l/100 km bzw. 20 kWh/100 km		
Kraftstoff bzw. Strom	Pro Fahrzeug-km	0,10 €/km bzw. 0,06 €/km		Benzin vs. BEV
Steuern	Pro Jahr	80 €		Referenzwerte konventionell
Versicherungen	Pro Jahr	650 €		Referenzwerte konventionell

Kostenkomponente	Berücksichtigung & Bezugsgröße im Modell	Wert ACS	Wert ARS	Bemerkungen
Reparaturen/ Werkstatt	Pro Jahr (Pro Fahrzeug-km möglich)	3.000 €		Inkl. TÜV / Reifenwechsel / Ölwechsel, etc.
Parkgebühren	Pro Jahr	0-1.000 €		raumabhängig
Maut	Pro Tag	0 €		bisher nicht berücksichtigt
Fahrzeugreinigung	Pro Nutzungs-km	0,06 €/km		Anzahl NutzerInnen je Reinigung, Distanz je Nutzer
Personalkosten	Pro Jahr	3.500 €		Annahme zu Brutto-Overhead-Lohn je MA und Anzahl Fz je MA
Mehrwertsteuer	Aufschlag auf Nettobetriebskosten	7 %		Wert für den ÖPNV
Gewinnmarge	Aufschlag auf Bruttobetriebskosten	3 %		

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Im Modell lassen sich folgende Zusammenhänge bzgl. eines Nutzungspreises im Fall eines „Nullgewinns“ nachweisen.

- ▶ Je niedriger die Leerfahrtenanteile, desto niedriger ist der niedrigste realisierbare Nutzungspreis.
- ▶ Je höher die Jahresfahrleistung der Fahrzeuge bei gegebenem Leerfahrtenanteil, desto geringer ist der niedrigste realisierbare Nutzungspreis.
- ▶ Beim ARS führt zudem ein höherer Besetzungsgrad bei gegebenem Umwegfaktor zu einem niedrigeren realisierbaren Nutzungspreis, sowie umgekehrt ein niedrigerer Umwegfaktor bei gegebenem Besetzungsgrad zu einem niedrigeren realisierbaren Nutzungspreis führt.

Neben der Setzung des Nutzungspreises, orientiert am „Nullgewinn“ der Unternehmen, lassen sich auch andere Nutzungspreisbestimmungen definieren. Dies wäre z. B. der Nutzungspreis für den Fall eines Monopolgewinns, sowie unter Zuhilfenahme ergänzender Berechnungsgrundlagen ein Nutzungspreis für den einem Zielsystem zugehörigen wohlfahrtsoptimalen Punkt. Neben dem Nutzungspreis muss jeweils auch eine zugehörige Angebotsdichte an ACS- bzw. ARS-Fahrzeugen im jeweiligen Raum definiert werden.

A.7.5 Abschätzung der ökologischen Effekte: Methodisches Vorgehen

TREMOD

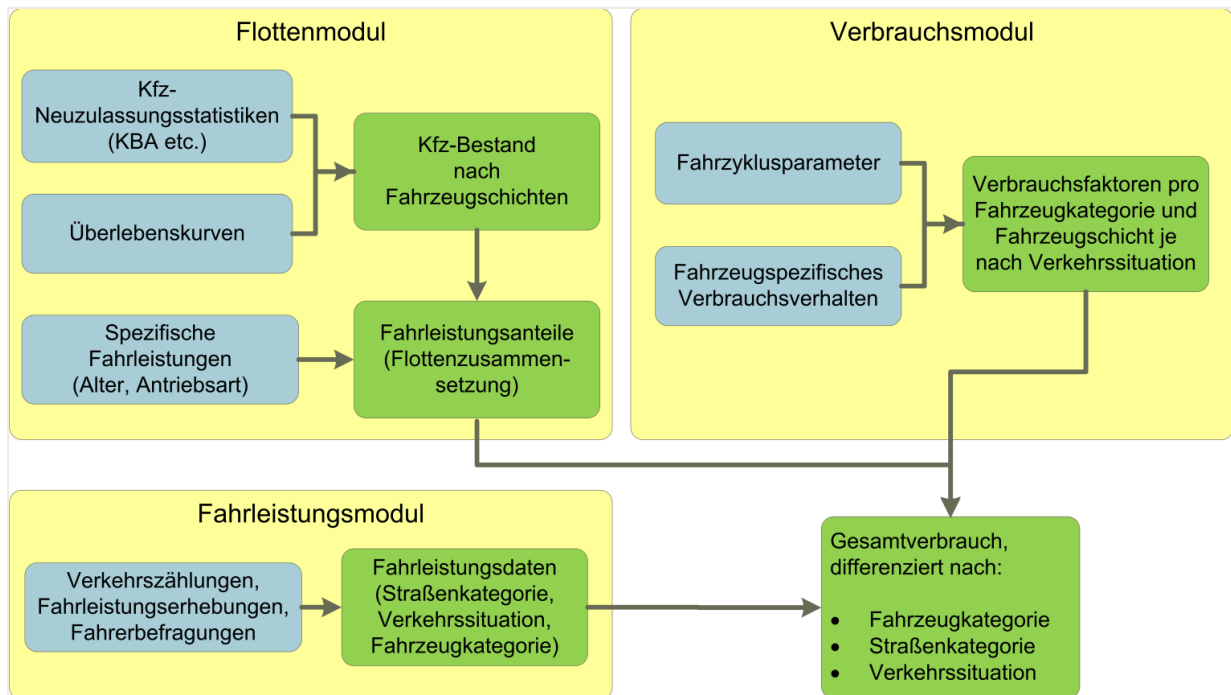
Die Modellierung der deutschlandweiten Emissionen erfolgt methodisch auf Basis des Modells TREMOD (TRansport-Emissions-MODEll), das von ifeu im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickelt wurde und das auch für die offiziellen Berichtspflichten der Bundesregierung eingesetzt wird. Die zugrundeliegende Version 6.01 ist in Knörr et al. (2020) dokumentiert. In TREMOD werden Energieverbrauch und Emissionen aller in Deutschland betriebenen Personenverkehrsmittel (Pkw, motorisierte Zweiräder, Busse, Bahnen, Schiffe, Flugzeuge) und Güterverkehrsmittel (Lkw und Zugmaschinen, Bahnen, Schiffe, Flugzeuge) sowie der sonstige Kfz-Verkehr seit dem Basisjahr 1960 erfasst.

Der Verbrauch und die Emissionen im Straßenverkehr werden in TREMOD für jedes Bezugsjahr in folgenden Teilschritten berechnet.

- ▶ Aufbereitung des Fahrzeugbestands und dessen Fahrleistungsverteilung nach emissionsrelevanten Fahrzeugschichten und Fahrzeugalter für jede Fahrzeugkategorie. Die Aufteilung des Fahrzeugbestandes wurde für die Szenarienbetrachtung für den Zeitraum 2010 bis 2040 aus dem TREMOD-Trendszenario übernommen (siehe Knörr et al. 2020). Hieraus wurden mittlere fahrzeugspezifische Basis-Emissionsfaktoren abgeleitet (siehe 0)
- ▶ Aufteilung der Jahresfahrleistung auf die Straßenkategorien und Verkehrssituationen je Fahrzeugkategorie. Diese Daten wurden für die Berechnungen der deutschlandweiten Emissionen der verschiedenen Automatisierungsszenarien im Personen- und Güterverkehr angepasst (siehe 0 und 2.1.3.5).
- ▶ Aufbereitung der Emissionsfaktoren für jede relevante Fahrzeugschicht und Verkehrssituation. Hierbei werden die Energieverbrauchs- und Emissionsfaktoren des HBEFA 4.1 zugrunde gelegt (siehe nächster Abschnitt zum HBEFA).

Abschließend werden die Teilergebnisse verknüpft, und der jährliche Energieverbrauch und die Emissionen sowohl für den Straßenverkehr insgesamt als auch für alle gewünschten Aufteilungen und Aggregationen berechnet. Abbildung 115 gibt einen Überblick über den Ablauf der Berechnung.

Abbildung 115: Schematische Darstellung des Berechnungsablaufs in TREMOD



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu

HBEFA

Das Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr (HBEFA) beinhaltet Emissionsfaktoren für eine Vielzahl von Fahrzeugtypen. Diese unterscheiden sich in sogenannte Fahrzeugschichten nach Fahrzeugkategorie, Antrieb und Abgasstufe (z.B. Pkw Diesel Euro 6-d) und Verkehrssituationen (Notter et al. 2019).

Durch regelmäßige Aktualisierungen und Weiterentwicklungen beinhaltet das HBEFA stets Daten aus einer Vielzahl von aktuellen Rollenprüfstands- und Portable Emission Measurement System (PEMS)-Messungen aus verschiedenen europäischen Ländern. Die aktuelle Version ist das HBEFA 4.1.

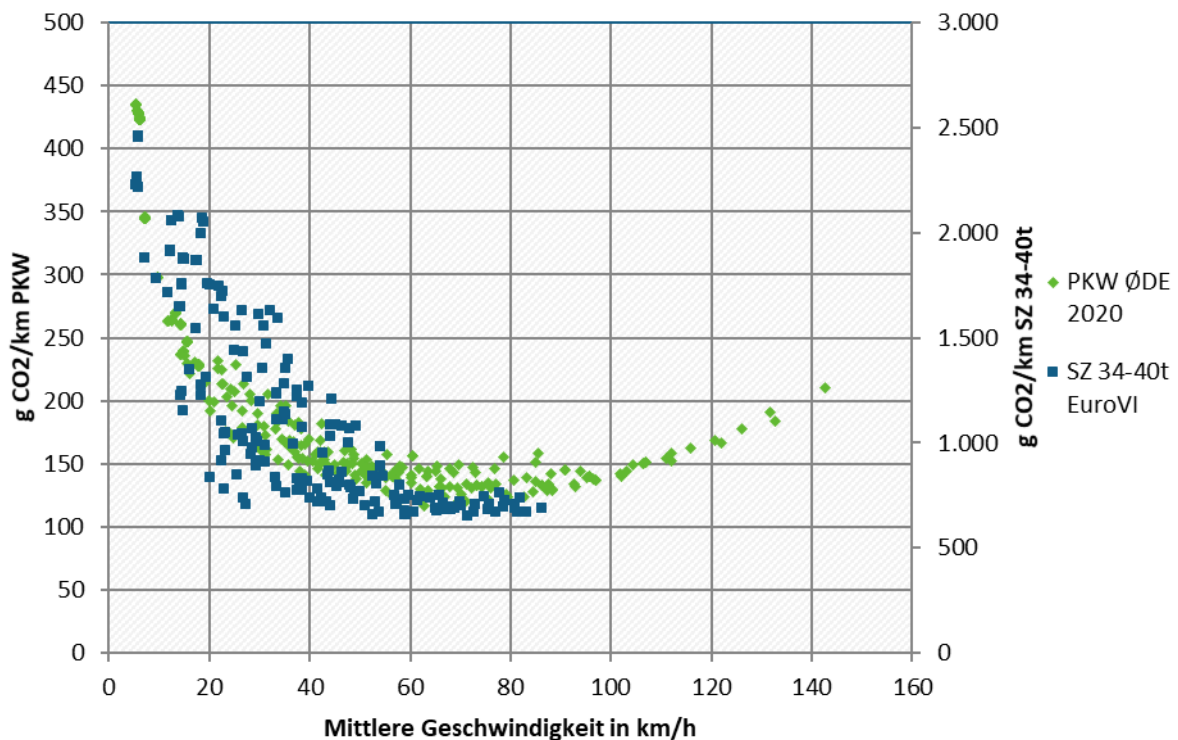
Für die vorliegende Studie war der Einfluss des Verkehrsflusses auf das Fahrverhalten von besonderer Bedeutung, da der spezifische Energieverbrauch und die Emissionen von Kraftfahrzeugen stark von der Fahrdynamik, insbesondere Geschwindigkeit und Beschleunigung, beeinflusst werden. Das HBEFA bildet diese Einflussparameter über die Definition sogenannter Verkehrssituationen ab, wobei jede Verkehrssituation durch ein Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm definiert ist.

Abbildung 116 stellt die spezifischen CO₂-Emissionen aller 365 Verkehrssituationen für Pkw und Sattelzüge, aufgetragen nach der mittleren Geschwindigkeit, dar. Dabei zeigt sich, dass die Emissionen bei Geschwindigkeiten von ca. 60 bis 80 km/h ein Minimum erreichen, da der Verbrennungsmotor hierbei die meiste Zeit in einem optimalen Betriebspunkt arbeitet. Bei geringeren Geschwindigkeiten steigen die Emissionen aufgrund zunehmender Fahrdynamik und damit verbundenen Brems-, Schalt- und Beschleunigungsvorgängen deutlich an. Bei höheren Geschwindigkeiten kompensieren hingegen zunehmende Fahrwiderstände die Effekte des optimalen Betriebspunktes, wodurch die Emissionen wieder leicht ansteigen. Aufgrund der in Deutschland

geltenden Geschwindigkeitsbegrenzungen von Lkw auf 80 km/h trifft letzteres nur für Pkw auf Autobahnen zu.

Ferner zeigen sich auch innerhalb ähnlicher mittlerer Geschwindigkeiten Unterschiede in den spezifischen Emissionen aufgrund der unterschiedlichen Fahrdynamik der jeweiligen Verkehrssituation. Dabei haben Verkehrssituationen mit stetigerem Verkehrsfluss geringere Emissionen als solche mit Störungen oder Stau, und damit höherer Dynamik.

Abbildung 116: CO₂-Emissionen von Pkw und Sattelzügen in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit nach HBEFA 4.1



Quelle: Eigene Darstellung, ifeu nach HBEFA 4.1. Anmerkung: Auf der linken Achse werden Werte für einen durchschnittlichen Pkw im Jahr 2020, auf der rechten Achse für einen durchschnittliche beladenen Euro VI Sattelzug der Klasse 34-40t zGG dargestellt.

Basis-Emissionsfaktoren

Die Basis-Emissionsfaktoren pro Fahrzeugtyp, Antriebsart, Emissionsstufe und Verkehrssituation ergeben sich aus den Daten des HBEFA 4.1 (siehe voriges Kapitel) und dem Bestands- und Fahrleistungsgerüst aus TREMOD 6.01. Für 2010 und 2017 handelt es sich um Realdaten aus verschiedenen Statistiken. Für die Jahre 2030 und 2040 wurden im Wesentlichen die Annahmen aus dem TREMOD-Trendszenario übernommen (siehe Knörr et al. 2020).

THG-Emissionsfaktoren

Die Treibhausgasemissionsfaktoren ergeben sich aus dem spezifischen Energieverbrauch, der Energieart und der Energiebereitstellung.

Der spezifische Energieverbrauch sinkt im Trendszenario aufgrund der folgenden Effekte.

- Die Fahrzeuge und Antriebe werden insgesamt effizienter, wodurch der spezifische Kraftstoffverbrauch, z.B. in Liter Benzin/100 km, sinkt. Grund dafür sind zum einen die europäischen CO₂-Flottenzielwerte für Pkw, leichte Nutzfahrzeuge (für 2020 EU-RL 443/2009 und EU-RL 510/2011, für 2025 und 2030 Verordnung (EU) 2019/631) und schwere Nutzfahrzeuge (für 2025 und 2030 Verordnung (EU) 2019/1242) im Jahr 2030, und weitere bis 2040 angenommene Effizienzsteigerungen. Auch für den Schienen- und Binnenschiffsverkehr wird angenommen, dass sich die spezifischen Energieverbräuche durch die Umsetzung von Effizienzpotentialen weiter reduzieren.
- Der Anteil von Elektrofahrzeugen, welche einen höheren Wirkungsgrad als Verbrenner haben, nimmt zu. Deutliche Änderungen gibt es vor allem beim Pkw-Bestand. Im Jahr 2030 gibt es im zugrundeliegenden Szenario im Bestand etwa 10 Mio. Elektro-Pkw (davon 6,5 Mio. BEV und 3,5 Mio. PHEV) und im Jahr 2040 ca. 23 Mio. Elektro-Pkw (davon 15 Mio. BEV und 8,2 Mio. PHEV). Das Ziel der Bundesregierung von 7 bis 10 Mio. Elektro-Fahrzeuge für 2030 wird damit erfüllt (Bundesregierung 2021). Weiterhin tragen die elektrisch betriebenen Fahrzeuge auch zur Einhaltung der CO₂-Flottenzielwerte bei, da hier nur tank-to-wheel Emissionen berücksichtigt werden. Dennoch besteht im Jahr 2040 immer noch die Mehrheit der Fahrzeugflotte mit ca. 28 Mio. Pkw aus Verbrennern. Bei den Lkw und insbesondere der Klasse N3 spielen Elektro-Fahrzeuge im zugrundeliegenden Szenario dagegen eine untergeordnete Rolle. Im Personenschienenverkehr steigt der Anteil der Elektro-Traktion an der Verkehrsleistung von 89% in 2017 auf 94% in 2040.

Tabelle 64: Pkw-Bestand in den Szenarien nach Antriebsarten in Millionen Fahrzeugen

Antrieb	2017	2030	2040
Benzin	30,4	30,7	21,0
Diesel	15,2	12,1	6,8
CNG, LPG	0,5	0,3	0,1
<i>Summe Verbrenner</i>	<i>46,1</i>	<i>43,1</i>	<i>27,9</i>
BEV	0,04	6,5	15,0
PHEV	0,03	3,5	8,2
<i>Summe Elektro</i>	<i>0,1</i>	<i>10,0</i>	<i>23,2</i>
<i>Summe insgesamt</i>	<i>46,2</i>	<i>53,1</i>	<i>51</i>

Quelle: Eigene Darstellung, ifeu

In der Summe sinkt der mittlere spezifische Endenergieverbrauch in Megajoule pro Kilometer zwischen 2017 und 2040 für Pkw um 35% und für Lkw zwischen 2010 und 2040 um 33%.

Weiterhin gibt es im Trendszenario eine Zunahme des Anteils von Biodiesel, -ethanol und -methan bei den Verbrennern und des Anteils an erneuerbaren Energien im Strommix für Elektrofahrzeuge. Beide Effekte führen zu einer Reduktion der spezifischen Treibhausgasemissionen pro Megajoule. Die Entwicklung der Basisemissionsfaktoren in den Jahren 2017, 2030 und 2040 für alle Verkehrsmittel zeigt Tabelle 65.

Tabelle 65: Basis-THG-Emissionsfaktoren für den Personen- und Güterverkehr

Verkehrsart	Verkehrsmittel/Straßenkategorie	Einheit	2017	2030	2040
Personenverkehr	Pkw/Autobahn	g CO ₂ -Äqu/km	231	197	149
	Pkw/Innerorts	g CO ₂ -Äqu/km	255	211	146
	Pkw/Außerorts	g CO ₂ -Äqu/km	172	148	106
	Bahn	g CO ₂ -Äqu/Pkm	47	36	20
	Bus	g CO ₂ -Äqu/Pkm	48	42	32
Güterverkehr	Lkw 7,5 t	g CO ₂ -Äqu/km	497	398	318
	Lkw 12 t	g CO ₂ -Äqu/km	594	451	353
	Lkw 18 t	g CO ₂ -Äqu/km	729	564	462
	Lkw 26 t	g CO ₂ -Äqu/km	863	673	562
	Lkw >26t und SZM)	g CO ₂ -Äqu/km	1015	790	668
	Schiene	g CO ₂ -Äqu/tkm	23	13	7
	Binnenschiff	g CO ₂ -Äqu/tkm	29	23	21

Fahr- und Verkehrsleistungen

Da die Verkehrsnachfragemodelle des DLR und TREMOD mit unterschiedlichen Datenquellen arbeiten, kommt es zu Abweichungen bei den Fahr- und Verkehrsleistungen. Im Personenverkehr sind diese von geringer Relevanz für die Gesamtemissionen und betreffen vor allem die Verteilung des öffentlichen Nah- und Fernverkehrs auf der Straße und der Schiene. Im Güterverkehr kommt es zu Unterschieden bei den Verkehrsleistungen der Schiene und der Binnenschifffahrt sowie bei den Fahrleistungen des Straßengüterverkehrs nach Lkw-Größenklassen. Dies liegt vornehmlich daran, dass das herangezogene Güterverkehrsmodell DEMO-GV nicht nur die deutschen Güterverkehrsflüsse betrachtet, sondern auch Güterflüsse aus und in das europäische Ausland.

Die Fahr- und Verkehrsleistungen wurden daher mit den Daten aus TREMOD kalibriert, welche sich auf die Straßenverkehrszählungen und Fahrleistungserhebung der BAST, auf Verkehr in Zahlen (VIZ) und weitere Erhebungen stützen. Zusätzlich werden in TREMOD die daraus hochgerechneten Energieverbräuche mit den Absatzdaten der AG Energiebilanzen abgestimmt. Da für die Berechnung der Umwelteffekte auch die Energieverbrauchs- und Emissionsfaktoren aus TREMOD verwendet werden, führt diese Vorgehensweise zu einem in sich konsistenten Datensatz aus Verkehrs- und Emissionsdaten.

Im Personenverkehr wurden somit die Fahr- und Verkehrsleistungen für das Basisjahr 2017 aus TREMOD übernommen. Für die übrigen Szenarien wurden die Fahr- und Verkehrsleistungen des Modells RAMOS von DLR-PEV um die relative Abweichung im Basisjahr 2017 gegenüber TREMOD korrigiert und übernommen.

Im Güterverkehr wurden für das Basisszenario 2010, 2030 und 2040 die Fahr- und Verkehrsleistungen direkt aus dem TREMOD-Trendszenario übernommen. Für die Szenarien Multimodalität (M) und Multimodalität+ (M+) wurden die Differenzen zum Basisszenario aus DEMO-GV herangezogen. Die für die Umwelteffekte zugrunde gelegten Daten sind in den Tabellen Tabelle 66 bis Tabelle 69 dargestellt.

Tabelle 66: Bundesweite Fahrleistungen im Pkw-Verkehr in Mrd. Fahrzeug-km

Verkehrsmittel	2017	2030 A	2030 B	2040 A	2040 B	2040 B+	2040 Max 1	2040 Max 1a	2040 Max 2b
Pkw privat	655	669	698	678	787	660	941	0	603
Pkw ACS/ARS	0	0	0	0	0	88	0	294	122

Tabelle 67: Bundesweite Verkehrsleistungen im öffentlichen Personenverkehr in Mrd. Pkm

Verkehrsmittel	2017	2030 A	2030 B	2040 A	2040 B	2040 B+	2040 Max 1	2040 Max 1a	2040 Max 2b
Bahn	38	44	43	49	42	34	26	72	35
Bus	73	87	85	97	86	65	49	118	85

Tabelle 68: Bundesweite Fahrleistungen im Lkw-Verkehr in Mrd. Fahrzeug-km

Lkw-Klasse	2010	2030 Basis	2030 M	2040 Basis	2040 M+
SNF N2 (<=12t)	11	10	10	10	9
SNF N3 (>12t)	46	61	61	64	67

Tabelle 69: Bundesweite Verkehrsleistungen im Güterverkehr in Mrd. Tkm

Verkehrsart	2010	2030 Basis	2030 M	2040 Basis	2040 M+
Schiene	108	154	153	170	146
Straße	441	607	608	661	697
Binnenschiff	62	65	65	64	56

A.7.6 DEMO-GV: Modellierung der Verkehrsträger- und Verkehrsmittelwahl im Güterverkehr

Das Verkehrsnachfragemodell DEMO-GV ist ein 6-stufiges Modell, das die folgenden Modellierungsschritte beinhaltet, die aufeinander aufbauen bzw. zueinander rückgekoppelt sind: (I) Erzeugung, (II) Verteilung, (III) Transportkosten, (IV) Utility, (V) Modal Split sowie (VI) Transport Means Split. In diesem Modell wird eine Güterverkehrsprognose für die Szenariojahre 2030 und 2040 möglich. Die drei bodengebundenen Verkehrsträger für den Modal Split sind „Schiene“, „Straße“ und „Wasserstraße“. Der Untersuchungsraum ist Deutschland, das in 431

Verkehrszellen aufgeteilt ist. Dazu kommen noch 170 ausländische Verkehrszellen, die den weiteren europäischen Raum abbilden. In diesem makroskopischen Ansatz können wir den Güterverkehr zwischen den Verkehrszellen in den Jahren 2030 und 2040 untersuchen.

Die betrachteten Güterflüsse werden hierbei nach den NST-2007-Güterklassen sowie dem maritimen und kontinentalen Kombinierten Verkehr (KV) differenziert. Beim KV gibt es zum Hauptlauf auf dem entsprechenden Modus noch ein Vor- und Nachlauf auf der Straße. Der maritime KV beginnt oder endet mindestens an einem Überseehafen. Beim maritimen KV auf der Straße handelt es sich um die „letzte Meile“ auf der Straße zwischen Überseehafen, als letzten Umladepunkt im Seehafen-Hinterlandverkehr, und einer anderen Verkehrszelle. Des Weiteren werden den Gutarten c noch „Segmente“ s zugeordnet, die übergeordnete Gütergruppen bilden. Der Kombinierte Verkehr wird mit 0 gekennzeichnet. Um Überschneidungen bei der Modellierung zu vermeiden, beinhalten Gutarten $c \neq 0$ keinen KV. Dieser wird bei Gutart $c = 0$ betrachtet: $s = 1$ (maritimer KV) und $s = 2$ (kontinentaler KV).

Die Prognosen für 2030 und 2040 werden auf die ermittelten Güterverkehrsnachfragen aus dem Jahr 2010 kalibriert, um eine möglichst gute Prognose zu treffen (Verkehrsmatrix 2010, siehe PTV Group, TCI Röhling, Mann 2016).

(I) Erzeugung

Im ersten Schritt werden die in jeder Verkehrszelle produzierten (Quelle) und benötigten Güter (Senke) in Tonnen berechnet. Die Güter werden mit Hilfe der Bruttowertschöpfung in jeder Verkehrszelle kalkuliert. Die Beziehung zwischen Bruttowertschöpfung und transportierten Gütern wird in Müller et al. (2015) dargelegt.

Die Berechnung der Tonnagen in den Quellen und Senken erfolgt nach den folgenden fünf Schritten.

1. Berechnung der Tonnagen, die aus und nach Deutschland transportiert werden, einschließlich Seetransport
2. Berechnung der Tonnagen, die nur innerhalb Deutschlands transportiert werden
3. Hinzufügen fehlender ausländischer Tonnagen im Seetransport
4. Kalibrierung jeder Quelle (je Gutart), d.h. der Quellverkehr
5. Optional: Anpassung der Tonnagen durch Energiewende im Verkehr

(II) Verteilung

Im zweiten Schritt werden die Güter aus den Quellen und Senken auf die einzelnen Quelle-Senke-Beziehungen verteilt. Dabei wird der folgende Gravitationsansatz zwischen den einzelnen Verkehrszellen angewandt.

$$\exp(\beta_c \cdot EMU_{ij}) \cdot m_i^q \cdot m_j^s$$

$$EMU_{ij} = \ln(e^{u_{rail}} + e^{u_{road}} + e^{u_{iww}})$$

wobei

- β_c : Abklingrate der Gutart c zwischen Quelle und Senke [1]
- m_i^q : Gesamtmasse einer Gutart c , die von der Quelle i aus transportiert wird [t]
- m_j^s : Gesamtmasse einer Gutart c , die zu einer Senke j aus transportiert wird [t]
- u_m : Wohlfahrt/Utility zwischen Quelle i und Senke j für eine Gutart c für den Modus m [1]

EMU_{ij} : "Estimated Maximum Utility" zwischen Quelle i und Senke j [1]

Die Abklingrate β_c (die zwischen 0 und 1 liegt) berücksichtigt, dass bei „schweren“ Segmenten (bzw. Gutarten) die Güter möglichst nicht weit transportiert werden: eine höhere Abklingrate hat bei geringeren Utilities/Wohlfahrt (EMU_{ij} ist somit kleiner) eine geringere Berücksichtigung in der Verteilungsmatrix zur Folge. Die Berechnung der Utilities erfolgt vor der Berechnung der Verteilungsmatrix und wird in Abschnitt (IV) beschrieben.

Mit Hilfe des Gravitationsansatzes und den Gesamttonnagen in den Quellen und Senken wird im Anschluss das Verfahren „Iterative Proportional Fitting“ (IPF) durchgeführt. Damit werden für jede Gutart die transportierten Massen auf die Quelle-Senke-Beziehungen verteilt.

Zum Schluss folgt noch eine Anpassung an die Güterverkehrsnachfragen aus dem Jahr 2010 (Verkehrsmatrix 2010, siehe PTV Group, TCI Röhling, Mann, H. 2016).

$$m_{i,j,c,s}^{2030/40*} = \begin{cases} d_{i,j,c,s}^{2030/40} + c_{i,j,c,s}^{2010} - d_{i,j,c,s}^{2010}, & \text{wenn } d_{i,j,c,s}^{2010} = 0 \text{ oder } \frac{c_{i,j,c,s}^{2010}}{d_{i,j,c,s}^{2010}} > 1 \\ d_{i,j,c,s}^{2030/40} \cdot \frac{c_{i,j,c,s}^{2010}}{d_{i,j,c,s}^{2010}}, & \text{wenn } \frac{c_{i,j,c,s}^{2010}}{d_{i,j,c,s}^{2010}} \leq 1 \end{cases}$$

$$m_{i,j,c,s}^{2030/40} = m_{i,j,c,s}^{2030/40*} \cdot \frac{fg_{sum}}{m_{sum}^{2030/40*}} \cdot \frac{m_{sum}^{2010}}{fg_{2010}}$$

wobei

$m_{i,j,c,s}^{2030/40*}$:	Zwischenergebnis von $tons_{i,j,c,s}^{2030/40}$ (s. obige Definition) [t]
$d_{i,j,c,s}^{2030/40}$:	Aus dem IPF-Verfahren berechnete Masse zwischen Quelle i und Senke j differenziert nach Gutart c und Segment s (Segment s entspricht Gütereinteilung nach BVU et al. 2012) im Szenariojahr [t]
$c_{i,j,c,s}^{2010}$:	Insgesamt transportierte Masse zwischen Quelle i und Senke j differenziert nach Gutart c und Segment s im Kalibrierungsjahr 2010 [t]
$d_{i,j,c,s}^{2010}$:	Aus dem IPF-Verfahren berechnete Masse zwischen Quelle i und Senke j differenziert nach Gutart c und Segment s im Kalibrierungsjahr 2010 [t]
$m_{i,j,c,s}^{2030/40}$:	Insgesamt transportierte Masse zwischen Quelle i und Senke j differenziert nach Gutart c und Segment s im Szenariojahr [t]
fg_{sum} :	Summe aller Senken einer Gutart für das Szenariojahr
$m_{sum}^{2030/40*}$:	Summe aller Werte von $m_{i,j,c,s}^{2030/40*}$ (einer Gutart, d.h. Segment 1 und 2 zusammen)
m_{sum}^{2010} :	Summe alle Einträge der „beobachteten“ Verkehrsmatrix für eine Gutart im Jahr 2010
fg_{2010} :	Summe aller Senken einer Gutart für das Jahr 2010

Die Berechnung der transportierten Tonnagen im Szenariojahr benötigt daher einen Vorlauf, in dem für das Kalibrierungsjahr 2010 die transportierten Tonnagen berechnet werden ($c_{i,j,c,s}^{2010}$).

Dafür ist die Berechnung der Transportkosten und der Utilities im Kalibrierungsjahr 2010 notwendig (siehe Abschnitt III und IV).

(III) Kosten

Im dritten Schritt werden die Kosten für einen durchschnittlichen Transportauftrag zwischen jeder Quelle und Senke je Modus und Gutart berechnet. Die Kosten für die Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße werden wie folgt berechnet.

$$c_{y,i,j,c,s,m}^{\text{delivery}} = c_{y,i,j,c,s,m}^{\text{ton}} \cdot p_{c,s,m} \cdot l_{c,s,m} \cdot f_{i,j,m}^{\text{correction}}$$

$$c_{y,i,j,c,s,m}^{\text{ton}} = c_{y,c,s,m}^{\text{fixed}} + d_{i,j,m} \cdot c_{y,c,s,m}^{\text{distance}} + \frac{t_{i,j,m}}{60} \cdot c_{y,c,s,m}^{\text{time}}$$

wobei

$c_{y,i,j,c,s,m}^{\text{delivery}}$:	Kosten eines durchschnittlichen Transportauftrages zwischen i und j der Gutart c und des Segments s [€]
$c_{y,i,j,c,s,m}^{\text{ton}}$:	Kosten für den Transport einer Tonne der Gutart c und des Segments s zwischen i und j [€/t]
$p_{c,s,m}$:	Nutzlast: max. Masse, die für eine Gutart-Segment-Kombination transportiert werden kann [t]
$l_{c,s,m}$:	Anteil der Nutzlast, die bei einem Transport in einer Gutart-Segment-Kombination genutzt wird [1]
$f_{i,j,m}^{\text{correction}}$:	Korrekturfaktor der Beladung zwischen i und j [1]
$c_{y,c,s,m}^{\text{fixed}}$:	Fester Preis für den Transport einer Tonne der Gutart c und des Segments s [€/t]
$d_{i,j,m}$:	Entfernung zwischen i und j im Modus m [km]
$t_{i,j,m}$:	Zeit für den Transport auf dem Modus m zwischen i und j [min]
$c_{y,c,s,m}^{\text{distance}}$:	Entfernungspreis für den Transport einer Tonne der Gutart c und des Segments s je km [€/km/t]
$c_{y,c,s,m}^{\text{time}}$:	Zeitlicher Preis für den Transport einer Tonne der Gutart c und des Segments s je h [€/h/t]

Die obigen Variablen zur Kostenberechnung gelten für die Modi m Schiene und Wasserstraße und für das Jahr y (2010/2030/2040).

Die Berechnung der Kosten eines durchschnittlichen Transportauftrages für den Modus Straße erfolgt über die Kosten für jedes Straßenverkehrsmittel tm :

$$c_{y,i,j,c,s,tm}^{\text{delivery}} = c_{y,tm}^{\text{fixed}} \cdot \frac{t_{i,j,m=2}}{60 \cdot t_{\text{workingDay}}} +$$

$$+ d_{i,j,m=2} \cdot c_{y,tm}^{\text{distance}} \cdot (1 + f_{i,j,tm}^{\text{empty}}) +$$

$$+ \frac{t_{i,j,m=2} + t_c^{\text{transfer}}}{60} \cdot c_{y,tm}^{\text{time}} \cdot (1 + f_{i,j,tm}^{\text{empty}}) +$$

$$+ d_{i,j}^{\text{toll}} \cdot \frac{c_{y,tm}^{\text{toll}}}{100} \cdot (1 + f_{i,j,tm}^{\text{empty}})$$

wobei

$c_{y,i,j,c,s,tm}^{\text{delivery}}$:	Kosten eines durchschnittlichen Transportauftrages (zwischen i und j, Gutart c, Segment s) je Straßenfahrzeug tm [€]
$c_{y,tm}^{\text{fixed}}$:	Fixkosten je Straßenfahrzeug tm [€], je Regional- und Fernverkehr
$t_{i,j,m=2}$:	Zeit für den Transport auf dem Modus $m=2$, Straße zwischen i und j [min]
$t_{\text{workingDay}}$:	Zeit, die eine FahrerIn am Tag arbeitet bzw. fahren kann [h]
$d_{i,j,m=2}$:	Entfernung zwischen i und j im Modus $m=2$, Straße [km]
$c_{y,tm}^{\text{distance}}$:	Variable Kosten je Straßenfahrzeug tm [€/km], je Regional- und Fernverkehr

t_c^{transfer} :	Umschlagszeit für Gutart c [min]
$c_{y,tm}^{\text{time}}$:	Zeitabhängige Kosten je Straßenfahrzeug tm [€/h], je Regional- und Fernverkehr
d_{ij}^{toll} :	Mautpflichtige Strecke zwischen i und j auf der Straße [Maut-km]
$c_{y,tm}^{\text{toll}}$:	Mautpreis für das Straßenfahrzeug tm [ct/Maut-km], je Regional- und Fernverkehr
$f_{i,j,tm}^{\text{empty}}$:	Leerfahrtenfaktor des Straßenfahrzeuges tm zwischen i und j [1]

Die obigen Variablen zur Kostenberechnung gelten für den Modus Straße $m = 2$ und für das Jahr y (2010/2030/2040).

Für den Modus Straße werden die Kosten erst für jedes Straßenverkehrsmittel bzw. jeden Lkw-Typ einzeln bestimmt und dann über die Beladung gemittelt, um die Gesamtkosten auf der Straße zu ermitteln.

Für den KV mit den Verkehrsträgern Schiene oder Wasserstraße werden die Kosten im Vor- und Nachlauf mit einer Sattelzugmaschine (SZM) noch hinzuaddiert:

$$\begin{aligned}
 c_{\text{pre/post},y}^{\text{single}} &= c_y^{\text{fixedSZM}} \cdot \frac{t_{\text{pre/post}}}{\text{time}_{\text{workingDay}}} + \\
 &+ d_{\text{pre/post}} \cdot c_y^{\text{distanceSZM}} + \left(t_{\text{pre/post}} + \frac{t_{c=0}^{\text{transfer}}}{60} \right) \cdot c_y^{\text{timeSZM}} + \\
 &+ c_{\text{transfer}} \\
 t_{\text{pre/post}} &= \frac{d_{\text{pre/post}}}{v_{\text{SZM}}} \\
 c_{\text{pre/post},y} &= c_{\text{pre/post},y}^{\text{single}} \cdot r_{\text{pre/post}} \\
 c_{y,i,j,c,s,tm}^{\text{combined}} &= c_{y,i,j,c,s,tm}^{\text{uncombined}} + c_{\text{pre},y} + c_{\text{post},y}
 \end{aligned}$$

wobei

$c_{\text{pre/post},y}^{\text{single}}$:	Kosten für eine Fahrt mit der SZM im Vor- oder Nachlauf im Jahr y [€]
c_y^{fixedSZM} :	Fixe Kosten der SZM im Jahr für einen Arbeitstag [€]
$t_{\text{pre/post}}$:	Benötigte Zeit einer SZM im Vor- oder Nachlauf [h]
$d_{\text{pre/post}}$:	Einfache Entfernung, die im Vor-/Nachlauf zum/vom KV-Zentrum zurückgelegt wird [km]
$c_y^{\text{distanceSZM}}$:	Variable Kosten der SZM, im Jahr y [€/km]
$t_{c=0}^{\text{transfer}}$:	Umschlagszeit für den KV [min]
c_y^{timeSZM} :	Zeitabhängige Kosten der SZM, im Jahr y [€/h]
c_{transfer} :	Umschlagskosten für Vor- oder Nachlauf im KV [€], 20 €
v_{SZM} :	Geschwindigkeit der SZM [km/h], 20 km/h
$c_{\text{pre/post},y}$:	Kosten für einen Vor- oder Nachlauf im Jahr y [€]
$r_{\text{pre/post}}$:	AUFGERUNDETES Verhältnis aus Beladung in Hauptlauf und Beladung bei SZM (Sattelzüge und Gliederzüge) im Vor- und Nachlauf
$c_{y,i,j,c,s,tm}^{\text{uncombined}}$:	Kosten für einen durchschnittlichen Transportauftrag im nichtkombinierten Verkehr [€]

$c_{y,i,j,c,s,tm}^{combined}$:

Kosten für einen durchschnittlichen Transportauftrag im KV [€]

Die obigen Variablen zur Kostenberechnung im KV gelten für die Modi m Schiene oder Wasserstraße und im Jahr y (2010/2030/2040).

Mit $d_{pre/post}$ wird die Entfernung bezeichnet, die im Vor- bzw. Nachlauf einmalig von einer SZM von einer Quelle bzw. zu einer Senke zum bzw. vom nächsten KV-Zentrum zurückgelegt wird. Dies ist unabhängig davon, wie viele Fahrten durch die Sattelzugmaschinen notwendig sind, um die Masse eines durchschnittlichen Transportauftrages auf der Schiene bzw. mittels der Binnenschifffahrt im Vor- bzw. Nachlauf zu transportieren. Daher handelt es sich bei $d_{pre/post}$ um die einfache Entfernung.

Die ausländischen Verkehrszellen in DEMO-GV sind wesentlich größer als die deutschen Verkehrszellen, die den deutschen NUTS3-Zellen entsprechen. Aufgrund der Größe ausländischer Verkehrszellen wird davon ausgegangen, dass sich in jeder ein KV-Zentrum zum Umschlag der Güter für den Vor- und Nachlauf befindet. Daher wird die einfache Entfernung zum/vom nächsten KV-Zentrum $d_{pre/post}$ bei einer ausländischen Verkehrszelle standardmäßig mit 26 km angesetzt. Startet bzw. endet der KV in Deutschland, d.h. Quelle bzw. Senke ist eine deutsche Verkehrszelle, wird für $d_{pre/post}$ die Entfernung auf der Straße zur bzw. von der nächsten deutschen Verkehrszelle mit KV-Zentrum genommen. Sollte im Umkreis von 70 km kein KV-Zentrum auf der Straße existieren, wird $d_{pre/post} = \infty$ angesetzt: der KV ist hier somit nicht möglich.

Sollte beim maritimen KV weder in der Quelle, noch in der Senke ein Überseehafen existieren, wird $c_{y,i,j,c,s,tm}^{combined} = \infty$ gesetzt. Dasselbe gilt im kontinentalen KV, wenn in der Quelle oder Senke ein Überseehafen liegt. Mit unendlich hohen Kosten wird sichergestellt, dass dann auch kein Transport im entsprechenden KV stattfindet.

Die hinter den Berechnungen liegenden Transportkostensätze lassen sich in DEMO-GV individuell für verschiedene Szenarien in den jeweiligen Prognosejahren anpassen. Damit ist gewährleistet, dass DEMO-GV für verschiedene Arten von Szenarien genutzt werden kann.

(IV) Utility

Im vierten Schritt werden die Wohlfahrten („Utilities“) berechnet, die der Logistik-EntscheiderIn entstehen, wenn er einen Transportauftrag einer Gutart bzw. im KV von der Quelle zum Ziel in einem Modus fahren lässt. Die Berechnung einer Utility/Wohlfahrt u erfolgt nach BVU et al. (2012):

$$u_{y,i,j,c,s,m} = \beta_s^C BC(c_{y,i,j,c,s,m}, \lambda_s^C) + \beta_s^T BC(t_{i,j,c,s,m}, \lambda_s^C) + \beta_s^P p_{y,type,m} + \beta_s^D BC(d_{y,type,m}, \lambda_s^D)$$

$$BC(x, \lambda) = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda}, & \text{wenn } 0 < \lambda \leq 1 \\ \ln(x), & \text{wenn } \lambda = 0 \end{cases}$$

wobei

- $u_{y,i,j,c,s,m}$: Utility/Wohlfahrt für einen Transportauftrag zwischen i und j für eine Gutart oder im (maritimen/kontinentalen) KV im Modus m und im Jahr y [1]
- $BC(x, \lambda)$: Box-Cox-Transformation bzw. Box-Cox-Funktion
- $c_{y,i,j,c,s,m}$: Kosten für einen durchschnittlichen Transportauftrag zwischen i und j für eine Gutart oder im (maritimen/kontinentalen) KV im Modus m und im Jahr y [€]
- $t_{i,j,c,s,m}$: Transportzeit zwischen i und j für eine Gutart oder im (maritimen/kontinentalen) KV im Modus m [min]
- $p_{y,type,m} | d_{y,type,m}$: Pünktlichkeit [%] und Verspätung [min] im Modus m, im Jahr y und im Verkehrstyp type (KV der nicht KV)
- $\beta_s^C, \beta_s^T, \beta_s^P, \beta_s^D$: Gewichtungsparemeter je Segment, nach BVU et al. (2012)
- $\lambda_s^C, \lambda_s^T, \lambda_s^P, \lambda_s^D$: Parameter für die BoxCox-Transformation (je Segment)

Die Bestimmung der Utility ist notwendig, um die Wahrscheinlichkeit für den Transport in einem Modus zu bestimmen (McFadden 1973):

$$p_{i,j,c,s,m} = \frac{\exp(u_{i,j,c,s,m}^{\text{calibrated}})}{\sum_{\text{mode}} \exp(u_{i,j,c,s,\text{mode}}^{\text{calibrated}})}$$

wobei

- $p_{i,j,c,s,m}$: Wahrscheinlichkeit, einen Transportauftrag einer Gutart c oder im (maritimen/kontinentalen) KV von Quelle i zur Senke j im Modus m zu transportieren [1]
- $u_{i,j,c,s,m}^{\text{calibrated}}$: Kalibrierte Utility/Wohlfahrt für einen durchschnittlichen Transportauftrag einer Gutart c oder im (maritimen/kontinentalen) KV zwischen i und j im Modus m [1]
- $\sum_{\text{mode}} \exp(u_{i,j,c,s,\text{mode}}^{\text{calibrated}})$: Summe aller kalibrierten Utilities/Wohlfahrten über alle drei Modi m, für einen durchschnittlichen Transportauftrag einer Gutart c oder im (maritimen/kontinentalen) KV zwischen i und j [1]

Die kalibrierte Utility $u_{i,j,c,s,m}^{\text{calibrated}}$ wird aus der (unkalibrierten) Utility $u_{i,j,c,s,m}$ und der Konstanten $\alpha_{i,j,c,s,m}$ berechnet:

$$u_{i,j,c,s,m}^{\text{calibrated}} = u_{i,j,c,s,m} + \alpha_{i,j,c,s,m}$$

Die Konstanten $\alpha_{i,j,c,s,m}$ berechnen sich aus den transportierten Massen aus dem Jahr 2010 (Kalibrierungsjahr). Dies geschieht mit Hilfe der Verteilungsmatrix 2010 (siehe PTV Group, TCI Röhling, Mann 2016).

$$ts_{i,j,c,s,m} = \frac{m_{i,j,c,s,m}}{\sum_{\text{mode}} m_{i,j,c,s,\text{mode}}}$$

$$\alpha_{i,j,c,s,m} = \begin{cases} x_{i,j,c,s,m}, & \text{wenn } m = \text{Schiene} \\ 0, & \text{wenn } m = \text{Straße} \\ y_{i,j,c,s,m}, & \text{wenn } m = \text{Binnenschiffahrt} \end{cases}$$

$$x_{i,j,c,s,m} = \ln(ts_{i,j,c,s,m=\text{Schiene}}) - \ln(ts_{i,j,c,s,m=\text{Straße}}) + u_{i,j,c,s,m=\text{Straße}}^{2010} - u_{i,j,c,s,m=\text{Schiene}}^{2010}$$

$$y_{i,j,c,s,m} = \ln(ts_{i,j,c,s,m=\text{Binnensch.}}) - \ln(ts_{i,j,c,s,m=\text{Straße}}) + u_{i,j,c,s,m=\text{Straße}}^{2010} - u_{i,j,c,s,m=\text{Binnensch.}}^{2010}$$

wobei

$m_{i,j,c,s,m}$:	Tonnen einer Gutart c oder im (maritimen/kontinentalen) KV, die zwischen i und j im Jahre 2010 im Modus m transportiert wurden (Verteilungsmatrix 2010) [t]
$ts_{i,j,c,s,m}$:	Zielanteil einer Gutart c oder im (maritimen/kontinentalen) KV, der 2010 zwischen i und j im Modus m transportiert wurde [1]
$u_{i,j,c,s,m}^{2010}$:	(Unkalibrierte) Utility/Wohlfahrt für einen Transportauftrag zwischen i und j für eine Gutart oder im (maritimen/kontinentalen) KV im Modus m und im Jahre 2010 [1]

Durch die Kalibrierung der Utilities wird sichergestellt, dass die berechneten Wahrscheinlichkeiten für 2010 genau dem Zielanteil der Verteilungsmatrix 2010 entsprechen.

Sollte ein Zielanteil $ts_{i,j,c,s,m}$ gleich 0 sein, so ist dessen Logarithmus gleich $-\infty$ ($\ln 0 = -\infty$). Sollte im Jahr 2010 gar keine Masse zwischen einer Quelle und Senke transportiert worden sein ($ts_{i,j,c,s,m} = 0/0$), so sind alle drei $\alpha_{i,j,c,s,m} = -\infty$.

(V) Verkehrsträgerwahl bzw. Modal Split

Im fünften Schritt wird die Verkehrsträgerwahl bzw. der Modal Split berechnet. Dabei wird der Anteil an Tonnen bestimmt, der zwischen einer Quelle und einer Senke in einem Modus transportiert wird (für jede Gutart, maritimen KV und kontinentalen KV). Dafür werden die aus dem Schritt (IV) berechneten Wahrscheinlichkeiten $p_{i,j,c,s,m}$ benötigt.

$$m_{i,j,c,s,m} = p_{i,j,c,s,m} \cdot m_{i,j,c,s}$$

wobei

$m_{i,j,c,s,m}$:	Tonnen einer Gutart c oder im (maritimen/kontinentalen) KV, die zwischen i und j im Modus m transportiert werden [t]
$p_{i,j,c,s,m}$:	Wahrscheinlichkeit, eine Masse der Gutart c oder im (maritimen/kontinentalen) KV von Quelle i zur Senke j im Modus m zu transportieren [1]
$m_{i,j,c,s}$:	Tonnen einer Gutart c oder im (maritimen/kontinentalen) KV, die zwischen i und j insgesamt transportiert werden [t]

Die Berechnung des Modal Splits erfolgt für das Kalibrierungsjahr 2010 und das jeweilige Szenariojahr 2030/2040. Es werden dabei folgende Ergebnisse für die beiden Jahre produziert.

- Verkehrsaufkommen je Gutart, Segment, Modus sowie je Quelle-Senke-Beziehung [t]
- Verkehrsleistung je Gutart, Segment, Modus sowie je Quelle-Senke-Beziehung [tkm]

(VI) Verkehrsmittelwahl bzw. Transport Mean Split auf der Straße

Nach der Berechnung des Modal Splits für alle drei Modi in DEMO-GV folgt das Modul Verkehrsmittelwahl bzw. der Mean Split. Hierbei erfolgt die Aufteilung der auf der Straße transportierten Tonnagen auf die möglichen Straßenverkehrsmittel, hier verschiedene Lkw-Typen tm . Zur Berechnung wurden die Parameter α und γ mittels einer Maximum-Likelihood-Schätzung an einer ausreichend großen Stichprobe kalibriert, um eine verlässliche Aussage zum Mean Split zu treffen (siehe Tabelle 71). Die Kalibrierung erfolgte mittels Eurostat-Daten aus dem Jahre 2011 (Eurostat 2011). Bei den Parametern α wird berücksichtigt, dass es sich bei dem Transport um Regional- (Entfernung ≤ 150 km) oder Fernverkehr (Entfernung >150 km) handelt.

$$u_{i,j,c,s,m=\text{road},tm} = (\alpha_{\text{regional},cl} \cdot c_{i,j,c,s,tm}^{\text{ton}} + \gamma_{\text{regional},cl,tm}) \cdot \delta_{ij}^{\text{regional}} +$$

$$+ (\alpha_{\text{longDistance},cl} \cdot \ln(c_{i,j,c,s,tm}^{\text{ton}}) + \gamma_{\text{longDistance},cl,tm}) \cdot \delta_{ij}^{\text{longDistance}}$$

$$p_{i,j,c,s,m=\text{road},tm} = \frac{\exp(u_{i,j,c,s,m=\text{road},tm})}{\sum_{tmR} \exp(u_{i,j,c,s,m=\text{road},tmR})}$$

$$m_{i,j,c,s,m=\text{road},tmRoad} = p_{i,j,c,s,m=\text{road},tmRoad} \cdot m_{i,j,c,s,m=\text{road}}$$

wobei

- $u_{i,j,c,s,m=\text{road},tm}$: Utility für Straßenverkehrsmittel tm auf der Straße zwischen i und j bei Gutart c und Segment s
- $c_{i,j,c,s,tm}^{\text{ton}}$: Kosten je Tonne der Nutzlast bei durchschnittlichem Transportauftrag für tm zwischen i und j bei Gutart c und Segment s [€]
- $\alpha_{\text{regional},cl}$: Generischer Parameter für „commodityCluster“ cl im Regionalverkehr (Entfernung ≤ 150 km)
- $\alpha_{\text{longDistance},cl}$: Generischer Parameter für „commodityCluster“ cl im Fernverkehr (Entfernung > 150 km)
- $\gamma_{\text{regional},cl,tm}$: Alternativen spezifische Konstante für tm und „commodityCluster“ cl im Regionalverkehr
- $\gamma_{\text{longDistance},cl,tm}$: Alternativen spezifische Konstante für tm und „commodityCluster“ cl im Fernverkehr
- $\delta_{ij}^{\text{regional}}$: 1, wenn Regionalverkehr zwischen ij ; 0, wenn Fernverkehr zwischen ij
- $\delta_{ij}^{\text{longDistance}}$: 1, wenn Fernverkehr zwischen ij ; 0, wenn Regionalverkehr zwischen ij
- $p_{i,j,c,s,m=\text{road},tm}$: Wahrscheinlichkeit des Transports einer Masse mittels eines Straßenverkehrsmittel tm zwischen i und j für die Gutart $c \neq 0$ und Segment $s \neq 1; 2$ (kein KV); bedingte Wahrscheinlichkeit nach Modus Straße
- $m_{i,j,c,s,m=\text{road},tm}$: Masse, die zw. ij mittels Lkw-Typ tm transportiert wird
- $m_{i,j,c,s,m=\text{road}}$: Masse, die zwischen ij auf der Straße transportiert wird; Gutart $c \neq 0$ und Segment $s \neq 1; 2$ (kein KV)

Die obigen Variablen zur Mean-Split-Berechnung gelten für die Gutarten $c \neq 0$ und die Segmente $s \neq 1; 2$ (kein KV).

Die Parameter α und γ sind nach Güterklassen geordnet, den sog. „commodityCluster“ bzw. Güter-Clustern cl (siehe Tabelle 70). Jede Gutart wird eindeutig einem cl zugeordnet. Durch diese Zuordnung wird sichergestellt, dass Gutarten mit ähnlichem Mean-Split-Eigenschaften auf der Straße dieselben Parameter α und γ besitzen.

Tabelle 70: Zuordnung jeder Güterklassen (NST-2007-Klassifikation) nach Güter-Cluster

	Güterklasse nach der NST-2007-Klassifikation	cl
1 ($c = 10$)	Landwirtschaftliche Erzeugnisse, Forstprodukte	1
2 ($c = 21, 22$)	Steinkohle, Braunkohle, Rohöl	1
3 ($c = 31, 32$)	Erze, Düngemittel, Steine, Erden	1
4 ($c = 40$)	Nahrungs- und Genussmittel, Getränke	2
5 ($c = 50$)	Textilien	3

	Güterklasse nach der NST-2007-Klassifikation	<i>cl</i>
6 (c = 60)	Holz, Forstprodukte, Papier	4
7 (c = 71, 72)	Koks, Mineralprodukte	5
8 (c = 80)	Chemische Produkte	6
9 (c = 90)	Sonstige Mineralprodukte	7
10 (c = 100)	Stahl, Eisen	8
11 (c = 110)	Maschinen, Ausrüstung	9
12 (c = 120)	Fahrzeuge und Fahrzeugteile	9
13 (c = 130)	Möbel, sonst. Halb- und Fertigwaren	10
14 (c = 140)	Recyclingprodukte, Abfälle	11
15 (c = 150)	Post, Pakete	12
16 (c = 160)	Geräte und Material für die Güterbeförderung	13
17 (c = 170)	Umzugsgut und sonstige nichtmarktbestimmte Güter	14
18 (c = 180)	Sammelgut	15
19 (c = 190)	Gutart unbekannt	15

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

In DEMO-GV sind die Lkw-Typen *tm* durch das zulässige Gesamtgewicht (zGG) klassifiziert. Aktuell sind in DEMO-GV folgende Lkw-Typen integriert.

- Lkw $\leq 7,5$ t zGG
- Lkw ≤ 12 t zGG
- Lkw ≤ 18 t zGG
- Lkw ≤ 26 t zGG
- Lkw > 26 t zGG

Es ist zu beachten, dass DEMO-GV den Straßenverkehr von Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von bis zu 3,5 t nicht berücksichtigt. Dieser Lkw-Typ ist auch nicht in der Verflechtungsmatrix 2010 enthalten (siehe PTV Group, TCI Röhling, Mann 2016).

In Tabelle 71 werden nun die Werte der Parameter α und γ , die auf Basis der Eurostat-Daten geschätzt wurden (Eurostat 2011), aufgezeigt. Beim Parameter α wird hierbei zwischen Regional- und Fernverkehr unterschieden, hingegen bei γ wird zusätzlich noch nach Lkw-Typen differenziert.

Tabelle 71: Geschätzte Parameterwerte von α und γ in Abhängigkeit der Güter-Cluster

cl	α_{Regional}	$\alpha_{\text{Fernverkehr}}$	Lkw-Typen	γ_{Regional}	$\gamma_{\text{Fernverkehr}}$
1	-0,0666	-14,1295	zGG $\leq$ 7,5 t	0,0	0,0
			zGG $\leq$ 12 t	-0,2020	-5,0015
			zGG $\leq$ 18 t	0,6289	-8,5511
			zGG $\leq$ 26 t	0,8596	-19,6004
			zGG $>$ 26 t	1,7581	-28,6727
2	-0,0031	-39,9483	zGG $\leq$ 7,5 t	0,0	0,0
			zGG $\leq$ 12 t	1,9469	-18,5706
			zGG $\leq$ 18 t	1,8210	-28,5111
			zGG $\leq$ 26 t	1,9736	-59,8493
			zGG $>$ 26 t	3,4913	-92,0767
3	-0,0075	-33,3404	zGG $\leq$ 7,5 t	0,0	0,0
			zGG $\leq$ 12 t	2,5868	-16,5032
			zGG $\leq$ 18 t	1,9200	-25,1775
			zGG $\leq$ 26 t	1,6550	-50,7727
			zGG $>$ 26 t	2,9734	-78,1543
4	-0,0197	-35,1831	zGG $\leq$ 7,5 t	0,0	0,0
			zGG $\leq$ 12 t	0,8536	-17,2268
			zGG $\leq$ 18 t	0,6166	-25,9691
			zGG $\leq$ 26 t	0,4119	-53,2911
			zGG $>$ 26 t	1,9615	-81,2624
5	-0,0542	-23,3637	zGG $\leq$ 7,5 t	0,0	0,0
			zGG $\leq$ 12 t	0,8025	-9,6561
			zGG $\leq$ 18 t	2,1381	-14,4891
			zGG $\leq$ 26 t	0,7037	-40,3735
			zGG $>$ 26 t	1,9530	-60,9324
6	-0,0041	-26,8237	zGG $\leq$ 7,5 t	0,0	0,0
			zGG $\leq$ 12 t	1,9564	-12,4963
			zGG $\leq$ 18 t	1,5100	-19,9296
			zGG $\leq$ 26 t	1,6989	-40,3735

<i>cl</i>	α_{Regional}	$\alpha_{\text{Fernverkehr}}$	Lkw-Typen	γ_{Regional}	$\gamma_{\text{Fernverkehr}}$
7	-0,0142	-20,8030	zGG > 26 t	3,6828	-60,9324
			zGG ≤ 7,5 t	0,0	0,0
			zGG ≤ 12 t	0,6414	-9,1327
			zGG ≤ 18 t	1,4273	-14,4250
			zGG ≤ 26 t	1,5071	-30,1759
			zGG > 26 t	3,0978	-45,5494
8	-0,0126	-32,3496	zGG ≤ 7,5 t	0,0	0,0
			zGG ≤ 12 t	0,6576	-15,8822
			zGG ≤ 18 t	0,4387	-24,4507
			zGG ≤ 26 t	0,1502	-49,4068
			zGG > 26 t	1,6691	-74,9913
9	-0,0034	-15,4871	zGG ≤ 7,5 t	0,0	0,0
			zGG ≤ 12 t	1,9455	-7,2974
			zGG ≤ 18 t	1,3909	-11,9179
			zGG ≤ 26 t	1,2890	-23,5931
			zGG > 26 t	3,3312	-34,3984
10	-0,0126	-5,1522	zGG ≤ 7,5 t	0,0	0,0
			zGG ≤ 12 t	1,0393	-1,0676
			zGG ≤ 18 t	0,7283	-3,3401
			zGG ≤ 26 t	0,3015	-6,6114
			zGG > 26 t	1,7267	-9,1864
11	-0,0578	-37,2558	zGG ≤ 7,5 t	0,0	0,0
			zGG ≤ 12 t	-0,5249	-17,9591
			zGG ≤ 18 t	0,9104	-27,0068
			zGG ≤ 26 t	0,5668	-54,8296
			zGG > 26 t	0,2401	-85,6601
12	-0,0297	-39,3356	zGG ≤ 7,5 t	0,0	0,0
			zGG ≤ 12 t	1,9076	-20,3303
			zGG ≤ 18 t	-0,1757	-32,1532
			zGG ≤ 26 t	0,1866	-59,9923

cl	α_{Regional}	$\alpha_{\text{Fernverkehr}}$	Lkw-Typen	γ_{Regional}	$\gamma_{\text{Fernverkehr}}$
13	-0,0261	-11,7985	zGG > 26 t	0,7333	-92,4919
			zGG ≤ 7,5 t	0,0	0,0
			zGG ≤ 12 t	-0,0402	-4,6567
			zGG ≤ 18 t	1,0748	-7,9602
			zGG ≤ 26 t	0,3457	-16,4108
			zGG > 26 t	0,4448	-23,9779
14	-0,0299	-18,8339	zGG ≤ 7,5 t	0,0	0,0
			zGG ≤ 12 t	0,1080	-6,9510
			zGG ≤ 18 t	-0,1812	-12,7215
			zGG ≤ 26 t	-0,6668	-27,0126
			zGG > 26 t	0,1766	-40,9722
15	-0,0021	-31,0948	zGG ≤ 7,5 t	0,0	0,0
			zGG ≤ 12 t	2,8530	-15,0064
			zGG ≤ 18 t	1,6212	-23,76246
			zGG ≤ 26 t	1,9601	-47,1867
			zGG > 26 t	4,0257	-71,5085

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Die Berechnung des Mean Splits auf der Straße erfolgt für das Kalibrierungsjahr 2010 und das jeweilige Szenariojahr 2030/2040. Es werden dabei folgende Ergebnisse für die beiden Jahre produziert.

- Verkehrsaufkommen je Gutart, Lkw-Typ sowie je Quelle-Senke-Beziehung [t]
- Verkehrsleistung je Gutart, Lkw-Typ sowie je Quelle-Senke-Beziehung [tkm]
- Fahrleistung je Gutart, Lkw-Typ je Quelle-Senke-Beziehung [km]

A.7.7 Loßgrößenwahlmodell für den Straßengüterverkehr

Für die vorliegende Studie soll das Losgrößenwahlmodell nach Piendl et al. (2018) eingesetzt werden, um die Effekte der fahrzeugseitigen Automatisierung auf die Losgrößenwahl im Straßengüterverkehr aufzuzeigen. Das Losgrößenwahlmodell modelliert die Wahl der drei Losgrößenklassen „Bis zu 3 Tonnen“ (gleichzusetzen mit Stückgütern), „3 Tonnen bis 12 Tonnen“ (gleichzusetzen mit Teilladungen) und „Mehr als 12 Tonnen“ (gleichzusetzen mit Ganzladungen) in Abhängigkeit von Informationen zum jährlichen Güterfluss zwischen dem Versender und dem Empfänger Q [Tonnen/Jahr], der Warenwertdichte v [Euro/Tonne] sowie der zurückzulegenden Transportdistanz d [km]. Die Relevanz dieser Einflussgrößen ist theoretisch durch das

(erweiterte bzw. approximierte) Economic Order Quantity (EOQ)-Modell begründet, und empirisch in einer Reihe von Studien überprüft. Das EOQ-Modell geht davon aus, dass Transporte aus langfristigen Geschäftsbeziehungen resultieren, die einen jährlichen Güterfluss zwischen VersenderInnen und EmpfängerInnen implizieren. Es stellt eine Formel für die Gesamtlogistikkosten der EntscheiderIn auf, die wesentlich durch die Aufteilung des Gesamtgüterflusses in einzelne Sendungen bestimmt werden. Im EOQ-Modell werden die Transportkosten in fixe Transportkosten, die unabhängig von der Losgröße sind, und variable, von der Losgröße abhängige, Transportkosten unterteilt. Zudem wird bzgl. Kosten für gebundenes Kapital (während des Transports und im Lager) und bzgl. Lagerhaltungskosten differenziert. Da eine größere Anzahl an Sendungen zu höheren fixen Transportkosten führt, dabei aber die Lagerhaltungskosten gesenkt werden können, balanciert das Modell im Kern den Trade-Off zwischen diesen Kostenkomponenten aus und findet eine analytisch optimale Lösung (Economic Order Quantity).

Formal lassen sich die Gesamtlogistikkosten C_n einer EntscheiderIn n schreiben als:

$$C_n(q_i) = \frac{Q_n}{q_i} F_n + Q_n c_n(q_i) + \frac{q_i}{2} (w_n + r v_n) \quad (1)$$

Wobei

- Q_n : Konstanter und stetiger Güterfluss von EntscheiderIn n pro Zeitperiode (Tonne/Jahr)
- q_i : Losgrößenklasse i pro Transport von EntscheiderIn n , um der Gesamtnachfrage Q_n gerecht zu werden (Tonne/Sendung)
- F_n : Fixkosten pro Versendung für EntscheiderIn n , unabhängig von der Losgröße (€/Sendung)
- $c_n(q_n)$: Variable Transportkosten für EntscheiderIn n , abhängig von der Losgröße (€/Tonne)
- w_n : Lagerhaltungskosten pro Einheit des Gutes pro Jahr für EntscheiderIn n (€/Tonne)
- r : Zinssatz zur Bewertung des gebundenen Kapitals in Form von Lagerhaltungskosten
- v_n : Wertdichte der transportierten Güter (€/Tonne)

In der Praxis müssen vereinfachende Annahmen an das Modell gestellt werden. Aufgrund der Fokussierung auf interregionalen Lkw-Transport mit großen und schweren Fahrzeugen, die alle eine ähnliche Kostenstruktur haben, können die Fixkosten als konstant innerhalb der Losgrößenklassen angenommen werden. Hier ist zu beachten, dass die Fixkosten zwar unabhängig von der Losgröße, jedoch nicht von der durch die Losgröße als Proxy implizierten Art des Verkehrs (Ganzladungs-, Teilladungs- oder Stückgutverkehr) sind. Nimmt man zusätzlich an, dass die variablen Transportkosten $c_n(q_n)$ proportional zur Losgröße steigen, ergeben sich im vorliegenden Ansatz Transportkostenfunktionen, die sich nur durch Differenzen im fixen Anteil widerspiegeln. Da bei diskreten Entscheidungsmodellen lediglich die Differenzen zwischen den Losgrößenkategorien ausschlaggebend sind, diese jedoch per Annahme für die variablen Transportkosten für alle Losgrößenkategorien gleich sind, fällt der Ausdruck $c(q_i) \cdot Q_n$ aus der zu schätzenden Gleichung heraus. Außerdem wird vereinfachend angenommen, dass auch die Lagerhaltungskosten nur zwischen den verschiedenen Losgrößenklassen variieren. Dies führt zu folgender, vereinfachter Gesamtlogistikkostengleichung:

$$C_n(q_i) = \frac{q_i w_{qi}}{2} + \frac{F_{qi}}{q_i} Q_n + \frac{q_i r}{2} v_n \quad (2)$$

Auf Basis dieser Gleichung wird die Losgrößenklasse mittels Discrete-Choice-Theory und einem Random-Utility-Ansatz geschätzt. Dazu wird die Kostenfunktion als negative Nutzenfunktion interpretiert und durch ein multinomiales Logit-Modell abgebildet. Ein Gumbel-verteilter Zufallsterm ε_{qi} wird an die Gleichung addiert. Die Transportdistanz d_n wird als erklärende Variable in das Modell mit aufgenommen, da etliche Studien einen signifikanten räumlichen Einfluss auf die Losgröße aufzeigen. Die Lagerhaltungskosten werden aufgrund der Datenverfügbarkeit ausschließlich durch die Warenwertdichte abgebildet.

Es ergibt sich folgende, parametrisierte Funktion:

$$-U_{qi,n} = C_n(q_i) + \varepsilon_{qi,n} = \alpha_{qi} + \beta_{qi,1} \cdot Q_n + \beta_{qi,2} \cdot v_n + \beta_{qi,3} \cdot d_n + \varepsilon_{qi,n}. \quad (3)$$

Die alternativen spezifischen Konstanten werden mit α_{qi} und die zu schätzenden Parameter der exogenen Variablen mit $\beta_{qi,1}$, $\beta_{qi,2}$ und $\beta_{qi,3}$ bezeichnet.

Ferner hat sich gezeigt, dass das Modell verbessert werden kann, wenn es versucht, dem heterogenen Charakter der versendeten Güter Rechnung zu tragen. Daher schätzen Piendl et al. (2018) in einem ersten Schritt ein Latentes-Klassen-Modell mit vier Klassen unter Einbezug von Informationen zu Charakteristika der versendeten Waren (zerbrechlich, wertvoll, temperaturgeführt, Lebensmittel, gefährliches Gut usw.), und bedingen die Losgrößenwahl dann auf die Zugehörigkeit zu diesen Klassen – d.h. sie entwickeln für jede der vier Klassen (Segmente 1-4) ein eigenes Losgrößenwahlmodell. Die vier Klassen lassen sich folgendermaßen charakterisieren:

- Segment 1: Zeitkritische Güter
- Segment 2: Spezielles
- Segment 3: (Temperaturgeführte) Lebensmittel
- Segment 4: Zeitunkritische Güter, inkl. Schüttgut

Das Ergebnis der Modellschätzung ist in Tabelle 72 dargestellt (t-Werte in Klammern).

Tabelle 72: Losgrößenwahlmodell nach Segmenten

	Alternative	Segment 1	Segment 2	Segment 3	Segment 4
Konstante	$q_2: 3t - 12t$	-2.8158 (-1.1044)	-1.4303 (-0.4390)	6.5828 (1.0164)	-2.9913 (-1.1154)
	$q_3: > 12t$	-7.5343 (-2.4505)	-1.5637 (-0.3897)	8.7452 (0.9982)	-2.3895 (-0.8002)
Q_n	$q_2: 3t - 12t$	0.0041 (3.9814)	0.0042 (2.7159)	0.0046 (2.2747)	0.0036 (3.4101)
	$q_3: > 12t$	0.0051 (4.9044)	0.0052 (3.2878)	0.0057 (2.7496)	0.0044 (4.1345)
$\log v_n$	$q_2: 3t - 12t$	-0.2080 (-0.9485)	-0.2084 (-0.7984)	-1.2279 (-1.6650)	-0.1237 (-0.6535)
	$q_3: > 12t$	-0.5428 (-2.1063)	-0.7696 (-2.3658)	-2.1380 (2.0290)	-1.1096 (-3.7666)

	Alternative	Segment 1	Segment 2	Segment 3	Segment 4
$\log d_n$	$q_2: 3t - 12t$	0.5690	0.4059	0.0446	0.4985
		(1.5301)	(0.8456)	(0.0475)	(1.1857)
	$q_3: > 12t$	1.5276	1.0265	0.4321	1.5733
		(3.3001)	(1.7095)	(0.3011)	(3.3431)
Anzahl Beobachtungen		162	92	42	191
Final log-likelihood		-110.9	-66.5	-24.5	-101
Adj. McFadden R^2		0.3109	0.2487	0.2959	0.3992
Likelihood ratio test		123.27	65.29	34.31	160.8

Quelle: Eigene Darstellung, DLR

Das Modell eignet sich zur Evaluierung von Szenarien, da es sensitiv gegenüber Szenarien-basierten Veränderungen der Kostenkomponenten ist. Konkret überführt das Modell veränderte Rahmenbedingungen durch Anpassungen der Parameter in Veränderungen der Wahrscheinlichkeiten zur Wahl verschiedener Losgrößenklassen. Die Losgrößenklassen sind dabei so gewählt, dass sie als Proxy für resultierende Ganzladungs-, Teilladungs- und Stückgut-Verkehre verstanden werden können.