

Modellgestützte Energie- und CO₂-Bilanz der Letzten Meile des Lieferverkehrs mit quelloffenen Geodaten

Lukas Hardi

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Ralph Kennel

Prüfer:

1. Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner
2. Prof. Dr.-Ing. Klaus Diepold

Die Dissertation wurde am 28.03.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 24.10.2019 angenommen.

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Entwicklung eines Simulationsmodells für Endenergieverbrauch und Kohlenstoffdioxidemissionen der Letzten Meile des Lieferverkehrs beschrieben. Die Methodik beruht dabei auf Monte-Carlo-Simulationen unter Einbezug von quelloffenen Geodaten aus OpenStreetMap. Neben der Möglichkeit zur flexiblen Untersuchung von unterschiedlichen Regionen erlaubt das entwickelte Modell die Integration von innovativen Zustellkonzepten. Zusätzlich wird der Einsatz von Zustellfahrzeugen mit verschiedenen Antriebsvarianten abgebildet. Nach einer detaillierten Beschreibung von Methodik, Struktur und Aufbau des Modells erfolgt eine Plausibilisierung der Simulationsergebnisse. Anschließend wird es beispielhaft für Potentialanalysen in ausgewählten Untersuchungsregionen im Großraum München eingesetzt. Dabei liegt der Fokus auf der Zustellung von Paketsendungen mit Elektrofahrzeugen sowie der Auslieferung von Lebensmitteln anstelle von individuellen Einkaufsfahrten. Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass Elektrofahrzeuge ein deutliches Potential für Endenergieeinsparungen und Reduktion der Kohlenstoffdioxidemissionen auf der letzten Meile haben.

Abstract

This thesis describes the development of a simulation model for final energy consumption and carbon dioxide emissions for the last mile of delivery traffic. The methodology is based on Monte Carlo Simulations in combination with open-source geodata of Open Street Map. Besides to the flexible investigation of different regions, the model addresses the integration of innovative delivery concepts. In addition, the use of delivery vans with varying drive train type is depicted. Following to detailed descriptions of methodology, structure and composition of the model, simulation results are checked for plausibility. Subsequently, the model is used for potential analyses in selected regions of investigation in the area of Munich, Germany. Here, the focus is on the delivery of parcels using electric delivery vans as well as on the substitution of shopping trips by the delivery of groceries. As the results show, electric delivery vans show a notable potential to save final energy and carbon dioxide emissions on the last mile.

Danksagung

Diese Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik an der Technischen Universität München entstanden.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner für die Betreuung der Arbeit, die Begeisterung für das Thema sowie die konstruktiven Gespräche und Diskussionen. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Diepold für die Erstellung des Zweitgutachtens sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Ralph Kennel für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, insbesondere bei Johannes Honold, Patrick Wimmer, Wessam Elbaz, Thomas Zipperle und Dr. Peter Tzscheutschler. Nur durch Diskussionen mit Euch konnte aus einer einfachen Idee schlussendlich diese Arbeit werden. Ebenso gilt mein Dank allen Studierenden, die Interesse an dem Thema dieser Arbeit gezeigt haben.

Liebe Freunde, liebe Geschwister, liebe Familie: Ihr glaubt gar nicht, welchen Wert die kleine Frage „Wie läuft es eigentlich mit deiner Doktorarbeit?“ haben kann! Danke für Eure Unterstützung!

Liebe Eltern, vielen Dank für euer Zuhören, euren Zuspruch und die aufmunternden und motivierenden Worte!

Meiner Frau Anna-Maria gebührt besonderer Dank. Liebe Anna, danke für die vielen Stunden, in denen du auf mich verzichten musstest, danke für deine Unterstützung, danke für deine Zeit, dein offenes Ohr und die vielen Gespräche und Diskussionen über Themen aus der Informatik!

München im November 2019

Lukas Hardi

Atom – átomos – unteilbar

1. Einleitung	1
1.1. Ausgangslage und Motivation	1
1.2. Zielsetzung	3
1.3. Aufbau und Struktur der Arbeit.....	3
2. Besonderheiten und Eigenschaften der letzten Meile	5
2.1. Die letzte Meile als Bestandteil der Logistik	5
2.1.1 Definition des Begriffs Logistik.....	5
2.1.2 Nachhaltigkeit im Logistikbereich	5
2.1.3 Disziplinen der Logistik	6
2.1.4 Logistikdienstleister.....	8
2.2. Begriffsdefinition und Eingrenzung am Beispiel der Paketzustellung.....	8
2.2.1 Vorlauf.....	9
2.2.2 Hauptlauf.....	10
2.2.3 Nachlauf und die Letzte Meile	10
2.3. Zustellkonzepte.....	10
2.3.1 Adresszustellung.....	11
2.3.2 Zustellung an Schließfächer	12
2.3.3 Autonome Zustellung mit Drohnen und Robotern	13
2.3.4 Sonstige Zustellkonzepte.....	13
2.4. Energieverbrauch und Emissionen	14
2.4.1 Wirtschaftliche und energetische Effizienz	14
2.4.2 Energieverbrauch und Emissionen.....	15
2.4.3 Energetische Bilanzräume.....	16
2.5. Zustellfahrzeuge	17
2.5.1 Zustellfahrzeuge mit Verbrennungsmotor.....	17
2.5.2 Batterieelektrische Zustellfahrzeuge.....	17
2.5.3 Sonstige Zustellfahrzeuge	21
3. Vorgehen zur Bestimmung von Energieverbrauch und Kohlenstoffdioxid-Emissionen	24
3.1. Methodik	24
3.1.1 Modellierung der Belieferung.....	25
3.1.2 Bestimmung des spezifischen Endenergiebedarfs.....	27
3.1.3 Zustellwahrscheinlichkeit	27
3.1.4 Abbildung des Fahrzeugmix von Logistikdienstleistern.....	30
3.2. Monte Carlo Simulationen.....	35
3.2.1 Wahrscheinlichkeitstheoretische Begriffe und Definitionen.....	35
3.2.2 Mathematische Theorie	37
3.2.3 Approximationsfehler	38
3.2.4 Anwendungsbeispiele.....	39

4. Energie- und Emissionsmodell: <i>FeVER</i>	46
4.1. Modellkonzeption	46
4.1.1 Modulare Struktur	46
4.1.2 Parallelisierung von Berechnungen	47
4.2. Verarbeitung von Geodaten – <i>FeVER OSMTtools</i>	48
4.2.1 Datenstruktur von OpenStreetMap	48
4.2.2 Berechnung von Entfernungen	50
4.2.3 Extraktion von Geodaten	51
4.2.4 Straßennetzwerkgraph	52
4.2.5 Zuordnung von Haushalten zu Gebäuden	53
4.2.6 Zuordnung von Gebäuden zu Knoten im Straßennetzwerkgraph	54
4.3. Modellierung der Belieferung – <i>FeVER Delivery</i>	55
4.3.1 Erstellung von Zustellgebieten	55
4.3.2 Erzeugung einer Lieferstichprobe und Ableitung von Kenngrößen	57
4.3.3 Routing	58
4.3.4 Distanzmatrix	61
4.3.5 Streckensegmente und Streckenlängen einer Zustelltour	62
4.4. Modellierung des Energieverbrauchs – <i>FeVER VehEnC</i>	63
4.4.1 Erzeugung von Fahrprofilen	63
4.4.2 Fahrzeugenergiebedarfsmodell	71
4.5. Verwaltung der Ergebnisse – <i>FeVER Data Explorer</i>	83
4.5.1 Berechnung von Endenergiebedarf und CO ₂ -Emissionen	83
4.5.2 Datenbankmodell	85
4.6. Plausibilisierung der Ergebnisse	86
4.6.1 Belieferung	86
4.6.2 Endenergiebedarf	95
4.6.3 CO ₂ -Emissionen	99
4.6.4 Zusammenfassung der Plausibilisierungsergebnisse	99
5. Potentialanalysen für ausgewählte Zustellkonzepte	101
5.1. Vorgehen	101
5.1.1 Berechnungsmethodik	101
5.1.2 Eingrenzungen	102
5.1.3 CO ₂ -Emissionsfaktoren	104
5.2. Untersuchungsregionen	108
5.2.1 Haidhausen Süd	110
5.2.2 Putzbrunn im Landkreis München	111
5.2.3 Aying im Landkreis München	112
5.3. Paketzustellung mit Elektrofahrzeugen	113
5.3.1 Energieverbrauch und Emissionen bei der Adresszustellung	115
5.3.2 Zusammensetzung des Endenergiebedarfs am Beispiel von Putzbrunn	122
5.3.3 Energetische Auswirkungen des Depotstandorts am Beispiel von Putzbrunn	123

5.3.4 Einfluss von Fahrzeugkapazität und Fahrzeugtyp.....	124
5.3.5 Konsolidierung von Lieferungen bei der Adresszustellung.....	126
5.3.6 Beeinflussung der CO ₂ -Emissionen durch Abendlieferungen	131
5.3.7 Paketzustellung an Schließfächer	133
5.4. Auslieferung von Lebensmitteln	138
5.4.1 Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen von Einkaufsfahrten für Lebensmittel ...	139
5.4.2 Endenergieeinsparungen durch Lebensmittellieferungen	141
5.4.3 Sensitivität der Endenergieeinsparungen	143
5.4.4 CO ₂ -Einsparungen.....	145
6. Zusammenfassung und Ausblick	148
Anhang	150
A Glossar	150
B Abbildungsverzeichnis	151
C Tabellenverzeichnis	154
D Literaturverzeichnis.....	155

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage und Motivation

Verglichen mit der Zeit vor der industriellen Revolution ab Mitte des 18. Jahrhunderts hat sich die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre deutlich erhöht. Im Jahr 2017 erreichte sie mit 405,5 ppm einen neuen Rekord, was mit einem Anstieg von 146 % im Vergleich zur vorindustriellen Zeit gleichzusetzen ist [1] [2]. Der vermehrte Ausstoß von Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre ist nachweislich der Hauptverursacher für die Erderwärmung durch den Treibhauseffekt. Eine weitere globale Erwärmung hat dabei weitreichende Folgen. Neben Auswirkungen für die Menschheit ist auch das gesamte Ökosystem des Planeten betroffen. Ein Anstieg der Meeresspiegel durch abschmelzende Polkappen sowie anhaltende Dürre in einigen Ländern durch Veränderung des Klimas sind dabei nur einige Beispiele. Zur Begrenzung der Erderwärmung auf einen Wert von 1,5°C bzw. maximal 2°C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter wurde im Jahr 2015 das Internationale Klimaabkommen von Paris durch nahezu alle Staaten der Erde unterzeichnet. Da das sogenannte Zwei-Grad-Ziel nur durch eine globale Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen erreicht werden kann, haben viele Staaten Konzepte zur Emissionsreduktion in ihren Ländern entwickelt. [3]

Die deutsche Bundesregierung hat im Klimaschutzplan 2050 verschiedene Ziele und Maßnahmen zur Einhaltung des Zwei-Grad-Ziels festgehalten. Bis zum Jahr 2050 sollen in allen Verbrauchssektoren Emissionsreduktionen von insgesamt 80-95 % gegenüber dem Jahr 1990 erreicht werden. Dieses Ziel deckt sich dabei auch mit den Bestrebungen der Europäischen Union. Die Reduktion der Treibhausgasemissionen soll dabei schrittweise erfolgen. [4] Bereits in den letzten Jahren konnte ein deutlicher Rückgang der energiebedingten Kohlenstoffdioxidemissionen in Deutschland festgestellt werden. Im Jahr 2015 wurden rund 742 Mio. t CO₂ die Atmosphäre ausgestoßen, was einem Rückgang von rund 24 % im Vergleich zum Jahr 1990 (986 Mio. tCO₂) gleichzusetzen ist. [5] Während beispielsweise in den Verbrauchssektoren Industrie, Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung erste Erfolge verzeichnen [6] [7], zeigen im Bereich der Energiewirtschaft die Bemühungen im Rahmen der Energiewende ihre Wirkung.

Im Gegensatz zu den übrigen Sektoren zeigt sich im Verkehrssektor bisher noch kein großer Umschwung. Im Zeitraum von 1990 bis 2015 sind die energiebedingten CO₂-Emissionen des Sektors nahezu konstant geblieben, obwohl im Klimaschutzplan der Bundesregierung für den Verkehrssektor eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 40-42 % bis zum Jahr 2030 gegenüber dem Referenzjahr 1990 gefordert wird [4] [5]. In der deutschen Endenergiebilanz für das Jahr 2016 entfielen rund 2.690 Petajoule bzw. circa 29,7 % auf den Verkehrssektor, dessen Endenergiebedarf zu rund 94 % aus Erdölprodukten gedeckt wird [8]. Verglichen mit dem Jahr 1960 ist der Endenergiebedarf um rund den Faktor Vier angestiegen. Ansätze zur Energie- und Emissionsreduktion durch Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren, die mit Abstand die wichtigste Antriebsart im Verkehrssektor sind, wurden jedoch nahezu komplett durch die ansteigende Verkehrsleistung ausgeglichen. Experten fordern daher als Pendant zum Bereich der Energiewirtschaft eine Verkehrswende, die sich hauptsächlich auf den Bereich des Straßenverkehrs konzentriert. Der Einsatz von Elektrofahrzeugen zur Substitution von Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschinen ist dabei ein geeignetes Mittel zur Reduktion des Endenergieeinsatzes.

zes und Vermeidung von Treibhausgasemissionen, im Verkehrssektor vornehmlich Kohlenstoffdioxid. [4] [9]

Gleichzeitig mit der Forderung nach einer Verkehrswende wird der Bereich des Straßengüterverkehrs als Teilbereich des Verkehrssektors durch die steigende Internetnutzung beeinflusst [10]. Im Jahr 2017 kauften rund 52 % der rund 82,8 Millionen Einwohner Deutschlands im Internet ein, wobei in einem Zeitraum von drei Monaten rund 38 % drei bis fünf Bestellungen bzw. 31 % ein bis zwei Bestellungen tätigten [11]. Die vermehrte Nutzung des Internets für den Einkauf, zusammengefasst unter dem Begriff E-Commerce, hat wiederum eine Auslieferung der Bestellungen durch Einsatz verschiedener Verkehrsträger zur Folge. Beispielsweise wurden durch Kurier-, Express- und Paketdienstleister in Deutschland im Jahr 2017 rund 3,35 Mrd. Sendungen transportiert, was verglichen mit dem Jahr 2000 nahezu eine Verdopplung der Sendungsmenge bedeutet [12]. Neben Online-Shops, die Produkte für den alltäglichen Gebrauch, Elektronik, Software usw. anbieten, betreten vermehrt auch neue Akteure wie z.B. Supermärkte den Bereich des E-Commerce. Anstatt Einkaufsfahrten für Lebensmittel unternehmen zu müssen, können Kunden den Einkauf bequem von zu Hause aus tätigen.

Die vermehrte Bestelltätigkeit stellt Logistikdienstleister, die für den Transport der Bestellungen zum Kunden verantwortlich sind, vor neue Herausforderungen. Getrieben durch den Wunsch nach höherer Serviceorientierung wurden dabei neue Konzepte für den Erhalt der Sendungen bzw. die eigentliche Auslieferung der Waren entwickelt und erprobt. Beispiele für solche Zustellkonzepte sind unter anderem die Zustellung in Schließfächer und eine Auslieferung in den Abendstunden. Neben Logistikdienstleistern werden aber auch Kommunen mit Problemen durch den vermehrten Einfluss des E-Commerce konfrontiert. Zusätzlich zum Verkehrsaufkommen des motorisierten Individualverkehrs werden Straßen und Umwelt durch die „letzte Meile“ zur Auslieferung von Bestellungen belastet.

Im Allgemeinen bezeichnet die letzte Meile den Transport von Gütern vom letzten Depot bis zum Endkunden bzw. Sendungsempfänger [13]. Da dieser Streckenabschnitt den energie- und kostenintensivsten Abschnitt der gesamten Lieferkette darstellt [14], ist er in den letzten Jahren in den Fokus von Wissenschaft und Forschung gerückt. Zusammen mit den Zielen der Bundesregierung zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor rücken auch immer mehr Elektrofahrzeuge für den Einsatz in diesem Streckenabschnitt in den Fokus von Logistikdienstleistern, Kommunen und Wissenschaft. In verschiedenen Pilotprojekten in deutschen Städten konnte dabei bereits die prinzipielle Eignung nachgewiesen werden [15]. Gleichzeitig eröffnen verschiedene Zustellkonzepte Möglichkeiten zur Reduktion von Energieverbrauch und Emissionen auf der letzten Meile in Kombination mit dem Einsatz von elektrischen Zustellfahrzeugen. Neben dem Aspekt einer Verbesserung der Serviceorientierung werden daher auch Aspekte des Umweltschutzes bzw. Reduktion von Treibhausgasen durch verschiedene Zustellkonzepte und -ansätze adressiert.

Um den Einfluss von neuen Konzepten und Ansätzen auf die Energie- und CO₂-Bilanz bestimmen zu können, wird im Rahmen dieser Arbeit ein Energie- und CO₂-Emissionsmodell für die Letzte Meile des Lieferverkehrs auf Basis von quelloffenen Geodaten entwickelt. Das Modell ermöglicht eine flexible Untersuchung des regionalen Potentials zur Senkung von Energieverbrauch und Kohlenstoffdioxidemissionen durch den Einsatz verschiedener Zustellkonzepte und Integration von alternativen Antriebskonzepten. Im Anschluss an die

detaillierte Beschreibung der Modellentwicklung wird das Potential einiger Zustellkonzepte in Kombination mit elektrischen Zustellfahrzeugen für ausgewählte Regionen im Großraum München beispielhaft analysiert und bewertet.

1.2. Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und Implementierung eines detaillierten Simulationsmodells, mit dem das Potential von Innovationen auf der letzten Meile des Lieferverkehrs zur Einsparung von Energie und Vermeidung von Kohlenstoffdioxidemissionen untersucht werden kann. Das Modell soll verschiedene Sendungsmengen, einen variierenden Einsatz von verschiedenen Zustellfahrzeugen und unterschiedliche Zustellkonzepte abbilden können. Zur Flexibilisierung der Untersuchungen sollen dabei hauptsächlich Open-Source-Daten verwendet werden, wobei das Modell ebenso auf frei zugängliche Daten justiert werden soll. Als Basis für die Modellentwicklung sollen zunächst Struktur, Eigenschaften sowie Begrifflichkeiten aus dem Bereich der Logistik definiert, analysiert und eingeführt werden.

Nach einer Plausibilisierung von ausgewählten Simulationsergebnissen sollen beispielhafte Analysen des regionalen Energie- und CO₂-Einsparpotentials für drei ausgewählte Untersuchungsregionen durchgeführt werden, die ländliche, suburbane und urbane Strukturen im Großraum München repräsentieren. Neben einer Analyse von Einflussfaktoren auf die Potentiale sollen insbesondere die Konzepte

- Adresszustellung mit Elektrofahrzeugen
- Konsolidierung von Einzelsendungen verschiedener Logistikdienstleister
- Abendlieferung und
- Zustellung an Schließfächer

für den Bereich der Paketzustellung betrachtet werden. Der Fokus der Potentialanalysen soll dabei hauptsächlich auf dem Einsatz von Elektrofahrzeugen liegen. Daher sollen die Ergebnisse dem Einsatz von verbrennungsmotorischen Zustellfahrzeugen gegenübergestellt werden. Zusätzlich soll auch die Auslieferung von Lebensmitteln im Vergleich zu individuellen Einkaufsfahrten von Kunden analysiert werden.

1.3. Aufbau und Struktur der Arbeit

Die Arbeit ist in insgesamt sechs Kapitel strukturiert (**Abbildung 1-1**). Im Anschluss an die Beschreibung von Ausgangslage, Motivation und Zielsetzung wird im zweiten Kapitel der Begriff der letzten Meile konkretisiert. Neben einer Einordnung in den Bereich der Logistik werden verschiedene Zustellkonzepte und Zustellfahrzeuge für diesen Bereich der Logistikkette vorgestellt. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird in Kapitel 3 eine Berechnungsmethodik für Energieverbrauch und Kohlenstoffdioxidemissionen auf der letzten Meile entwickelt. Neben der Einführung und Definition der verwendeten Begriffe und Vorgehensweisen wird auch das Konzept der Monte Carlo Simulation detailliert vorgestellt. Im nachfolgenden Kapitel 4 wird das entwickelte Modell *FeVER* beschrieben. Dabei wird besonderer Wert auf die verwendeten energie- bzw. informationstechnischen Modellierungsansätze sowie die Abbildung von Eigenschaften der letzten Meile gelegt. Nach der Plausibilisierung der Ergebnisse werden in Kapitel 5 Potentiale bei einem Einsatz von Elektrofahrzeugen in Kombination mit den verschiedenen Zustellkonzepten analysiert. Folgend auf die Festlegung von Untersuchungsregionen und Einführung von CO₂-Emissionsfaktoren wird zunächst die Zustellung von Paketsendungen betrachtet. Den letzten Teil der Potentialanalysen bildet

die energetische Untersuchung von Lebensmittellieferungen. Das Kapitel 6 beinhaltet eine Zusammenfassung der Ergebnisse und einen Ausblick.

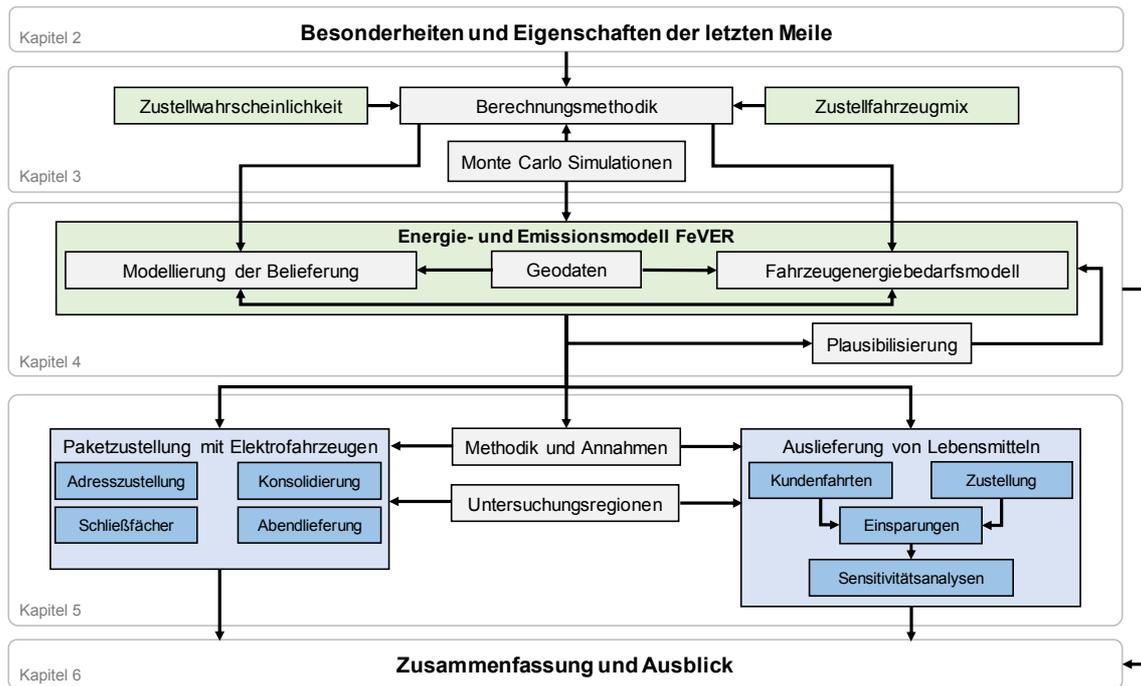


Abbildung 1-1 Aufbau und Struktur der Arbeit

2. Besonderheiten und Eigenschaften der letzten Meile

2.1. Die letzte Meile als Bestandteil der Logistik

2.1.1 Definition des Begriffs Logistik

Der Begriff der Logistik in der heute bekannten Form wurde erstmals in den Kriegen von Napoleon Bonaparte verwendet. Dabei wurde sowohl die Versorgung der Truppen mit Waren und Gütern als auch Lagerhaltung und Verwaltung unter diesem Begriff zusammengefasst. Der praktischen Rechenkunst, was der griechische Wortstamm *logistike* übersetzt bedeutet, wurde dabei eine neue Bedeutung zugeschrieben. [16]

Waren es früher wahrscheinlich noch einfache Bücher, mit denen die Logistik organisiert wurde, dienen heute komplexe, computergestützte Prozesse zur Organisation, die auch als eigene wissenschaftliche Disziplin gesehen werden [17]. Auch beschränkt sich die Logistik heute nicht nur auf die Versorgung einer Gruppe von Adressaten mit bestimmten Gütern, vielmehr wird die gesamte Wertschöpfungskette nahezu aller Wirtschaftsbereiche durch Logistik organisiert. Der im englischsprachigen Raum häufig als Synonym für Logistik verwendete Begriff des *supply chain management* verdeutlicht dies. [18]

Der Begriff der Logistik beinhaltet daher neben der eigentlichen Verteilung bzw. dem Transport der Güter auch die Aspekte der Planung und Organisation bzw. Steuerung und Kontrolle des Flusses eines zu transportierenden Gutes von einem Sender zu einem Empfänger unter wirtschaftlichen Aspekten. Die Weitergabe bzw. der Transport der für die Prozessoptimierung bzw. Kostenreduktion notwendigen Informationen ist dabei meist auch Gegenstand der Definition. [19] [20] Das zu transportierende Gut kann verschiedene Ausprägungen haben. Neben Stückgut kann auch der Transport von Energie, Daten, Dienstleistungen und Personen durch Logistikprozesse bzw. in Logistikketten organisiert sein [21]. Insbesondere der Transport von Energie als Teilgebiet der Energiewirtschaft motiviert einen Vergleich der Ziele der beiden Disziplinen.

2.1.2 Nachhaltigkeit im Logistikbereich

Beim Vergleich der Zieldreiecke der Energiewirtschaft und Logistik (**Abbildung 2-1**) fallen Gemeinsamkeiten auf. Der Aspekt der Wirtschaftlichkeit ist neben der gesicherten (Energiewirtschaft) bzw. zuverlässigen (Logistik) Versorgung Hauptziel der beiden Disziplinen. Durch das Zusammenspiel der verschiedenen Einflussfaktoren ergibt sich in beiden Bereichen jedoch ein Zielkonflikt. Ist der Einsatz von fossilen Energieträgern bei der Stromerzeugung im Bereich der Energiewirtschaft beispielsweise wirtschaftlich und bietet ein hohes Maß an Versorgungssicherheit, ist er gleichzeitig nicht zwingend der umweltverträglichste Weg der Energieversorgung. Das Paradoxon der Logistik hat eine ähnliche Ausprägung. Die schnellste und zuverlässigste Durchführung eines Transports ist nicht immer mit der wirtschaftlichsten, d.h. kostengünstigsten Methode gleichzusetzen.

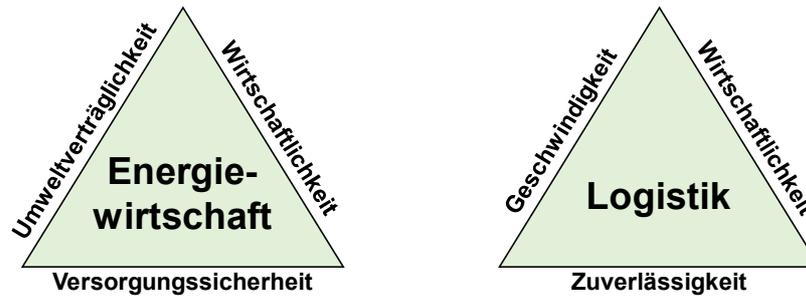


Abbildung 2-1 Zieldreiecke von Energiewirtschaft und Logistik

In den letzten Jahren konnte ein Umbruch in der Logistikbranche festgestellt werden. Die fortschreitende Globalisierung, steigende Kundenanforderungen sowie Transportmengen, beispielsweise ausgelöst durch den Online-Handel, stellen Logistikdienstleister vor neue Herausforderungen [19]. Gleichzeitig sehen sich die Akteure mit neuen regulatorischen Rahmenbedingungen im Bereich des Umweltschutzes und der Nachhaltigkeit konfrontiert. Zusätzlich zu den genannten Aspekten kommt daher immer mehr auch in der Logistikbranche der Gesichtspunkt der Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit zum Zuge. [22] [23] Bemühungen in diesem Bereich werden unter dem Stichwort *Green Logistics* zusammengefasst.

Green Logistics

Durch die Ergänzung der Ziele der Logistik um den Faktor der Umweltverträglichkeit ergibt sich auch eine neue Ausprägung des Paradoxons. Das zuverlässigste, wirtschaftlichste und schnellste Transportmittel ist dabei nicht selbstverständlich mit dem umweltverträglichsten gleichzusetzen [24]. Bemühungen im Bereich der *Green Logistics* setzen daher nicht nur an einem Teilgebiet bzw. Prozess an, sondern beinhalten Änderungen an allen Gliedern der Logistikkette [22]. Neben einer Quantifizierung der Umweltauswirkungen verschiedener Teilprozesse sind Reduktion von Energieeinsatz und Emissionen sowie auch die Vermeidung von Müll als Ziele der grünen Logistik aufzuführen [25]. Um die Ziele zu erreichen, werden Maßnahmen wie z.B. die Vermeidung von Wegstrecken, Verlagerung von Transporten auf andere Verkehrsträger (*Modal Shift*) sowie die Optimierung von Prozessen in den Logistikunternehmen verfolgt [26]. Auf Grund der Komplexität von einigen Logistikprozessen ist die Integration des Aspekts der Umweltverträglichkeit ein langer Entwicklungsprozess, der sich erst in den letzten Jahren langsam durchsetzt [22]. Teilweise müssen sich Unternehmen komplett neu ausrichten oder die Unternehmensstrategie muss angepasst werden [25] [25].

2.1.3 Disziplinen der Logistik

Der Begriff der Logistik bezieht sich, wie bereits erwähnt, auf die gesamte Wertschöpfungskette und kann daher in verschiedene Teilbereiche gegliedert werden. Während sich beispielsweise die Beschaffungslogistik mit dem wirtschaftlichen, zuverlässigen und möglichst schnellen Transport von Gütern und Halbzeugen (Edukten) beschäftigt, organisiert die Produktionslogistik den Prozess der Herstellung von Gütern und Produkten. Die Distributions-, Verteilungs- oder Absatzlogistik hingegen beschreibt die Disziplin der Verteilung von fertigen Gütern oder Waren hin zum Endkunden. Die Entsorgungslogistik beinhaltet alle Prozessschritte für die Verwertung und den Transport von Abfällen. [16] [20]

Marktsegmente der Distributionslogistik

Der Bereich der Distributions-, Verteilungs- bzw. Absatzlogistik kann durch die Betrachtung von Absender und Empfänger als Privatperson oder Unternehmen noch weiter unterteilt werden. Die daraus resultierenden geschäftlichen Beziehungen werden als Marktsegmente bezeichnet (**Tabelle 2-1**).

Tabelle 2-1 Marktsegmente der Distributionslogistik

Marktsegment	Absender	Empfänger
Business to Consumer	B2C	Unternehmen Privatperson
Consumer to Consumer	C2C	Privatperson Privatperson
Business to Business	B2B	Unternehmen Unternehmen

City-Logistik

Durch Anwendung der allgemeinen Definition des Begriffs der Logistik auf Ballungsräume verschiedener Ausdehnung ergibt sich eine Definition für den Begriff der City-Logistik. Demnach wird darunter die Planung und Durchführung aller notwendigen Schritte für eine wirtschaftliche, sichere und schnelle Versorgung einer Kommune verstanden. Im Allgemeinen gibt es für den Begriff der City-Logistik eine Vielzahl von unterschiedlich ausgeprägten Definitionen [27]. Einige davon beziehen alle notwendigen Prozesse einer Logistikkette mit ein [27], andere bezeichnen nur den innerstädtischen Güterverkehr als City-Logistik [28], wobei teilweise auch die Entsorgung eingeschlossen wird [29]. Ebenfalls ist eine Definition auf Basis des Liefer- und Abholverkehrs in Kommunen möglich [30].

Durch eine Ausweitung der Definition auf dem kompletten innerstädtischen Wirtschaftsverkehr, der teilweise auch durch komplexe Logistikprozesse organisiert ist, können auch die einzelnen Disziplinen der Logistik mit dem Begriff der City-Logistik verknüpft werden. Beispiele für daraus resultierende Prozesse zeigt **Tabelle 2-2**. Gemäß der allgemeinen Definition des Begriffs der Logistik kann das transportierte Gut verschiedene Formen annehmen, z.B. Trinkwasser, Lebensmittel, Paketsendungen oder Dienstleistungen wie z.B. die Pflege von Personen.

Tabelle 2-2 Beispiele für verschiedene Disziplinen in der City-Logistik

Logistiksegment	Beispiel in der City-Logistik
Beschaffungslogistik	Versorgung von Ladengeschäften mit Waren (z.B. Belieferung eines Supermarkts), Trinkwasserfernleitungen
Produktionslogistik	Organisation einer Großbäckerei
Distributions-, Verteilungs- oder Absatzlogistik	Auslieferung von Paketen, Medikamenten oder Lebensmitteln, Pflegedienste, Energie-, Fernwärme und Trinkwassernetze
Entsorgungslogistik	Müllabfuhr, Kanalisation, Recycling von Wertstoffen

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff der City-Logistik auf die Auslieferung von Waren und Gütern im Segment der Distributions- bzw. Verteilungslogistik beschränkt. Auch wird der Begriff für Kommunen beliebiger Ausdehnung und Einwohnerzahl identisch verwendet.

2.1.4 Logistikdienstleister

Logistikdienstleister können Anhand Ihres Angebotspektrums in der Logistikkette in verschiedene Kategorien eingeteilt werden [17]. Im Bereich der City-Logistik sind dabei vor allem die sogenannten *Second Party Logistics Provider* (2PL) anzutreffen, die hauptsächlich Transport-, Umschlag- und Lagerungsdienstleistungen (TUL) mit einer beschränkten Anzahl an Verkehrsträgern erbringen. Als Beispiel für 2PL sind Paketdienste zu nennen. [13]

Durch den fortschreitenden Wandel der Logistikbranche, getrieben vor allem durch die zunehmende Globalisierung und der damit bedingten logistischen Vernetzung verschiedener Kontinente [19], spielen auch immer mehr *Third Party Logistics Provider* (3PL) eine Rolle in der City-Logistik. 3PL betreiben im Gegensatz zum 2PL ein weltweit aufgespanntes Logistiknetzwerk, in dem unterschiedliche Verkehrsträger eingesetzt werden. Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist das erweiterte Dienstleistungsspektrum. Neben der eigentlichen Auslieferung der Waren bieten 3PL auch Dienstleistungen im Bereich der gesamten Bestellungsabwicklung an. Bei dem sogenannten *Fullfillment* übernimmt der Third Party Logistics Provider neben dem Transport der Güter auch Aufgaben im Bereich der Bestell- und Zahlungsabwicklung, Kommissionierung der Ware sowie Retourenmanagement. Im Bereich des Fullfillments arbeiten teilweise 3PL und 2PL eng zusammen. [17] [13]

KEP-Dienstleister

Durch Einschränkung der Art des Transportguts auf Kurier-, Express- und Paketsendungen (KEP), kann der Begriff des KEP-Dienstleisters definiert werden, der häufig in enger Verbindung mit dem Begriff der City-Logistik genannt wird. Während 2PL im KEP-Bereich meist als Systemdienstleister bezeichnet werden, ist die Bezeichnung eines 3PL als Integrator üblich. [13]

2.2. Begriffsdefinition und Eingrenzung am Beispiel der Paketzustellung

Im Allgemeinen bezeichnet der Begriff der „letzten Meile“ den letzten Schritt der Logistikkette, d.h. den Transport der Waren oder Sendungen zum Endkunden vom letzten Umschlagpunkt [14]. Dieses Segment wird häufig als das ineffizienteste Glied der gesamten Logistikkette gesehen, da vergleichsweise geringe Distanzen bei einer hohen Transportfrequenz zurückgelegt werden müssen [31]

Der Begriff kann sehr intuitiv durch die Betrachtung der kompletten Prozesskette bei der Versendung eines Pakets durch einen Logistikdienstleisters erklärt werden (**Abbildung 2-2**). Der gesamte Prozess kann in die drei wesentlichen Teilprozesse Vorlauf, Hauptlauf und Nachlauf eingeteilt werden. Die für die Zustellung notwendigen Standorte bzw. Niederlassungen des Logistikdienstleisters formen ein sogenanntes Logistiknetzwerk bzw. im speziellen Fall des Transports von Paketsendungen ein sogenanntes Paketnetz. [13] [21]

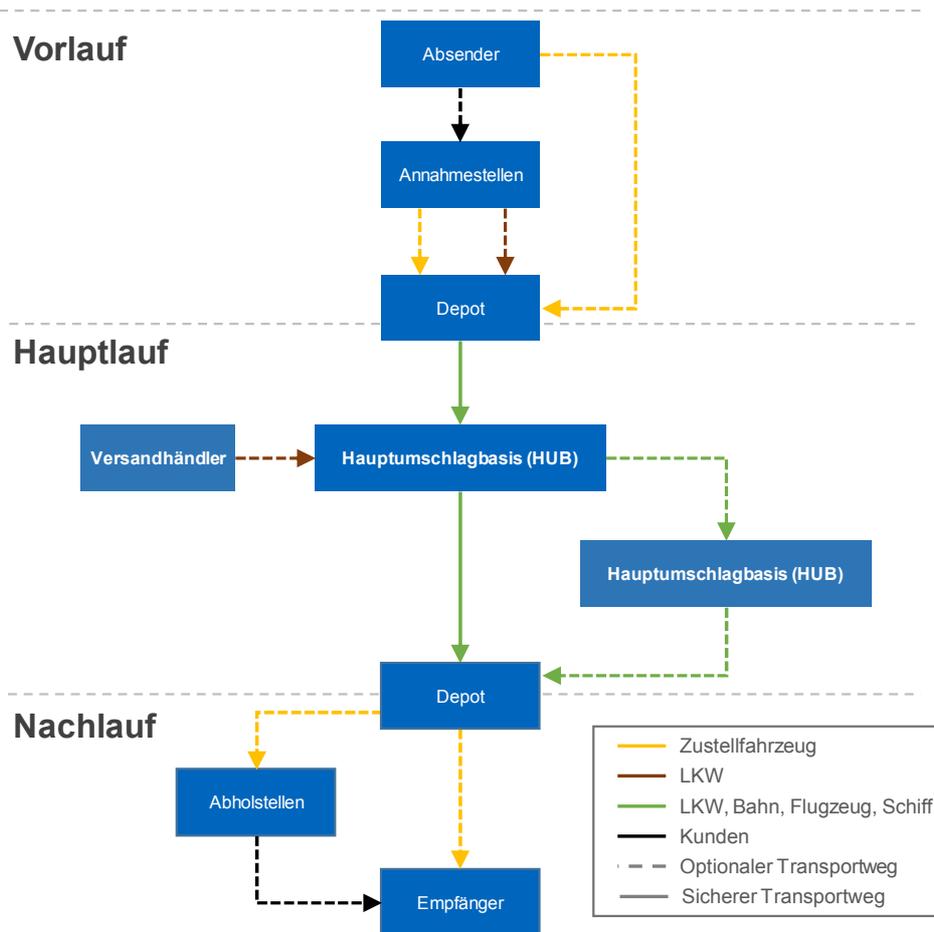


Abbildung 2-2 Prozessstruktur einer Paketzustellung

2.2.1 Vorlauf

Der Vorlauf beinhaltet alle Prozessschritte bis zur Konsolidierung von Einzelsendungen in einem Depot. Dabei können die Sendungen beispielsweise durch Zustellfahrzeuge im Rahmen der Liefertour bei den einzelnen Kunden aufgesammelt werden. Sind in einem Gebiet viele Kunden vorhanden, die Sendungen aufgeben möchten, z.B. einige kleinere Online-Händler, werden gesonderte Abholturen durch die Logistikdienstleister geplant bzw. Fahrzeuge zu diesem Zweck abgestellt. Der Transport von Sendungen, die ein Kunde in Annahmestellen eines Paketdienstleisters abgegeben hat, wird ebenso dem Vorlauf zugeschrieben. Die Annahmestellen sind dabei oft in Supermärkten oder Ladengeschäften integriert. In Abhängigkeit der abgegebenen Sendungsmengen werden diese durch die Zustellfahrzeuge am Ende einer Liefertour angefahren, um einerseits nicht zustellbare Sendungen zur Abholung bereitzustellen und andererseits abgegebene Sendungen zum Depot zu transportieren. In Abhängigkeit der anzutreffenden Sendungsmengen werden im letzteren Fall teilweise auch gesonderte Zustellfahrzeuge bzw. Lastkraftwagen eingesetzt. [13]

Nachdem die einzelnen Sendungen im Depot aus den Fahrzeugen entladen wurden, werden sie nach Kriterien wie Position des Empfängers und Lieferpriorität sortiert und z.B. in Lastkraftwagen verladen, womit der sogenannte Hauptlauf der Sendungen beginnt. [13] Um die Transportwege im Vorlauf möglichst gering zu halten, existieren in Abhängigkeit der Größe der Zustellregion häufig mehrere Depots, die neben einer zentralen Lage auch eine gute infrastrukturelle Anbindung, meist an Autobahnen oder Zubringerstraßen, haben. [32]

2.2.2 Hauptlauf

Der sogenannte Hauptlauf beinhaltet den Transport der Sendungen zwischen den Depots, die von Zustellfahrzeugen angefahren werden. Teilweise werden die Sendungen dabei in einer sogenannten Hauptumschlagbasis (HUB) umgeschlagen, d.h. neu sortiert, verteilt und verladen. Ebenso kann es möglich sein, dass mehrere HUBs Bestandteil des Hauptlaufs sind. Charakteristisch für den Prozessschritt ist eine geringe Transportfrequenz bei gleichzeitig hohem Ladevolumen der Transportmittel. Generell können dabei verschiedene Verkehrsmittel eingesetzt werden. Sind Absender und Empfänger der Sendung z.B. auf unterschiedlichen Kontinenten, kommen neben dem Transport auf der Straße mit Lastkraftwagen auch Verkehrsträger wie z.B. Flugzeuge oder Schiffe zum Einsatz. Ebenso werden Sendungen über längere Strecken teilweise auf der Schiene transportiert. Die Standorte der HUBs haben dabei einen wesentlichen Einfluss auf die wirtschaftliche Effizienz bzw. Möglichkeit zur termingerechten Lieferung. Daher sind diese meist an wichtigen Verkehrsknotenpunkten bzw. Verkehrswegen angesiedelt, z.B. an Flughäfen, Autobahnen oder Hafenanlagen. [13] [33]

Einen besonderen Status in diesem Prozessschritt nehmen große Versandhändler ein. Anstatt die Sendungen über den Vorlauf dem Hauptlauf zuzuführen, haben diese teilweise einen direkten Anschluss an HUBs der Logistikdienstleister. Dabei können die Sendungen entweder über Lastkraftwagen mit sogenannten Wechselbrücken vom Lager des Versandhändlers aus zur HUB transportiert werden, oder es besteht eine direkte Anbindung an die HUB, z.B. über Förderbänder. In diesem Zusammenhang spricht man von der Direkteinspeisung von Sendungen in die Prozesskette. Ebenso ist es möglich, dass Sendungen, insofern es sich um eine ausreichende bzw. für den Logistikdienstleister wirtschaftliche Menge handelt, direkt vom Versandhändler aus zu einem Auslieferungsdepot mit Hilfe der Wechselbrücken transportiert werden, das am Ende des Hauptlaufs angesiedelt ist. [13]

2.2.3 Nachlauf und die Letzte Meile

Sind die Sendungen aus dem Hauptlauf im letzten Depot der Logistikkette angekommen, beginnt der sogenannte Nachlauf der Sendungen bzw. auch die sogenannte letzte Meile. Der Transport erfolgt dabei meist nur noch auf der Straße. Nach einer erneuten Sortierung der angelieferten Sendungen werden diese in Zustellfahrzeuge verteilt, die die Sendungen an die einzelnen Empfänger zustellen. Verglichen mit dem Hauptlauf ist die Fahrzeugkapazität dabei deutlich kleiner, was in kleiner dimensionierten Zustellfahrzeugen resultiert. Dies ist insofern von Vorteil, da die Fahrzeuge z.B. auch durch enge Straßen fahren müssen um die Kunden zu erreichen. Um trotzdem eine bestimmte Zahl an Sendungen ausliefern zu können, werden deutlich mehr Fahrzeuge als im Hauptlauf eingesetzt. Auf Grund von geographischen Begebenheiten ist es dabei allerdings oft nicht mehr möglich die Zustellfahrzeuge optimal auszulasten. Ziel von Zustellungen auf der letzten Meile ist vielmehr eine termingerechte, schnelle und zuverlässige Auslieferung der Sendungen. [13] [34]

2.3. Zustellkonzepte

Der Begriff der Letzten Meile beschreibt an sich den Transport von Gütern vom letzten Depot bis zum Endkunden. Dabei existieren verschiedene Konzepte, wie der Kunde die Güter in Empfang nehmen kann, die unter dem Oberbegriff Zustellkonzept zusammengefasst werden können.

Auf Grund der steigenden Anforderungen der Kunden wurden durch die Logistikdienstleister verschiedene Zustellkonzepte vor allem im KEP-Bereich eingeführt, die dienlich für Serviceorientierung und Zeitkritikalität einer Zustellung sind [35]. Diese verschiedenen Zustellkonzepte können in die in **Abbildung 2-3** dargestellten Kategorien eingeteilt werden.

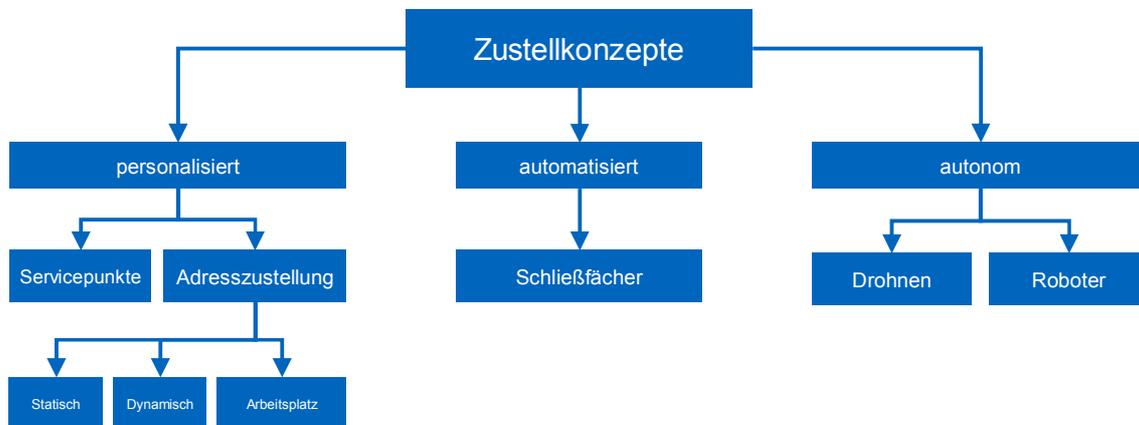


Abbildung 2-3 Überblick und Kategorisierung von verschiedenen Zustellkonzepten (in Anlehnung an [35])

Das Marktsegment, dem eine Zustellung angehört, beeinflusst die Anwendbarkeit von verschiedenen Zustellkonzepten. Im B2B-Bereich wird beispielsweise hauptsächlich die Adresszustellung verwendet, wobei die Erstzustellung der Sendung nahezu immer erfolgreich ist [35]. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass sich der Zeitraum der Liefertouren der Logistikunternehmen meist mit den Geschäftszeiten der Sendungsempfänger, d.h. Unternehmen, deckt. Häufig werden im B2B-Bereich bei der Belieferung auch Sendungen in das Zustellfahrzeug verladen, bei denen das belieferte Unternehmen die Rolle des Absenders übernimmt.

Im Gegensatz zum B2B-Bereich gibt es neben der Adresszustellung in den Marktsegmenten B2C und C2C eine Vielzahl von verschiedenen Zustellkonzepten, die vor allem das Problem der Anwesenheit der Sendungsempfänger während des Zeitraums der Liefertour der Logistikdienstleister adressieren [35]. Im Prinzip wird durch alle Konzepte eine Erhöhung der Erfolgsrate des ersten Zustellversuchs verfolgt, da das Nichtantreffen der Kunden eine Erhöhung der Kosten der Zustellung von bis zu 25 % [36] mit sich bringt. Da trotz neuer Zustellkonzepte jedoch rund 90 % [37] der Kunden die Zustellung nach Hause bevorzugen, haben sich auch im Bereich der Adresszustellung neue Ansätze zur Optimierung der Erstzustellrate etabliert. Auf Grund der vielen neuen Zustellkonzepte in den Marktsegmenten B2C und C2C werden im Nachfolgenden einzelne Ansätze detailliert erläutert.

2.3.1 Adresszustellung

Der Großteil der Sendungen in den Marktsegmenten B2C und C2C wird durch das Konzept der Adresszustellung ausgeliefert [37]. Durch Optimierungen und neue Ansätze werden Erstzustellquoten im Bereich von 84 % [37] bis 95 % [35] erreicht. Die Einteilung in statische und dynamische Adresszustellung wird im Nachfolgenden erläutert.

Statische Adresszustellung

Bei der statischen Adresszustellung wird die Empfängeradresse durch den Zusteller innerhalb seiner Liefertour angefahren. Durch Faktoren wie Tourenplanung, Sendungsmengen

und Lieferdauer pro Sendung kann der Zeitpunkt der Belieferung von Tag zu Tag variieren. Meist wird der Empfänger über ein Informationssystem des Logistikdienstleisters über den Status seiner Sendung benachrichtigt (Sendungsverfolgung). Bei Nichtanwesenheit des Adressaten versuchen die meisten Logistikdienstleister die Sendung beim Nachbarn abzugeben oder an einem vorab festgelegten Ort, z.B. im Mülltonnenhäuschen oder in der Garage, zu deponieren. In beiden Fällen wird der Sendungsempfänger durch eine Wurfkarte und ggf. die Sendungsverfolgung über den Verbleib der Sendung informiert. Sollte die Auslieferung der Sendung nicht möglich sein, werden erneute Zustellversuche unternommen, wobei die Anzahl in Abhängigkeit des Logistikdienstleisters schwankt. Erst nach den gescheiterten Zustellversuchen wird die Sendung an einem Servicestandort zur Abholung durch den Empfänger deponiert oder ggf. (nach Ablauf einer Abholfrist am Servicestandort) zurückgesandt. Ebenso wird hier der Kunde über die Sendungsverfolgung bzw. Wurfkarte informiert. [35]

Eine Innovation im Bereich der statischen Adresszustellung stellt die Deponierung von Paketen im Kofferraum der Privatfahrzeuge der Sendungsempfänger dar. Dabei kann das Fahrzeug durch einen Transponder des Zustelldienstes geöffnet werden, sodass die Sendung zum Beispiel im Kofferraum deponiert werden kann. Voraussetzung für diese Art der Zustellung ist die Kenntnis über den Standort des Ablagefahrzeugs. [38]

Dynamische Adresszustellung

Im Gegensatz zur statischen Adresszustellung kann der Sendungsempfänger bei der dynamischen Adresszustellung in den Prozess der Zustellung eingreifen. Dies muss bei der Tourenplanung des Lieferdienstleisters bereits berücksichtigt werden. Unter anderem kann der Kunde einen Zeitbereich für die Lieferung wählen bzw. bei Nichtanwesenheit auch durch eine sogenannte Umverfügung den Lieferort der Sendung ändern, das heißt zum Beispiel eine Auslieferung in ein Schließfach oder die Hinterlegung in einer Servicestation. Zusätzlich wird der Empfänger der Sendung bei einigen Lieferdiensten auch über den ungefähren Zeitpunkt der Lieferzeit informiert. [35]

Abendlieferung bzw. Same Day Express

Ein Sonderfall der Adresszustellung ist die sogenannte Abendlieferung. Dabei werden die Sendungen, die teilweise erst im Verlauf des Tages bis zu einem gewissen Zeitpunkt bestellt wurden, am gleichen Tag ausgeliefert (Same Day Express Zustellung). Häufig wird dieses Konzept in Verbindung mit einer Information der Sendungsempfänger über verschiedene Medien (E-Mail, SMS etc.) verbunden. Durch die Lieferung in den Abendstunden sind deutlich mehr Kunden direkt anzutreffen, womit sich die Erstzustellquote erhöht. Gleichzeitig muss der zusätzliche Fahrzeug- und Personaleinsatz beim Logistikdienstleister geplant werden. [39]

2.3.2 Zustellung an Schließfächer

Die Zustellung von Sendungen an öffentliche Schließfächer ist in deutschen Kommunen teilweise bereits etabliert. Einige Logistikdienstleister stellen durch dieses Zustellkonzept teilweise bis zu 10 % der Sendungen zu [35]. Im Gegensatz zur Adresszustellung ergibt sich bei diesem Zustellkonzept nicht das Problem des Nichtantreffens des Empfängers, da der Kunde selbst entscheidet, wann er die Sendung abholt. Die Schließfächer werden dabei im Laufe eines Tages durch einen Zusteller bestückt. Sobald die Sendung abholbereit

im Schließfach liegt, kann der Kunde über verschiedene Medien informiert werden und die Sendung rund um die Uhr abholen [40]. Das Zustellkonzept wird prinzipiell nur für die Auslieferung von Paketsendungen genutzt, wobei mehrere Schließfächer zu einer Schließfachstation zusammengefasst werden. Im Mittel bieten die Schließfachstationen rund 76 Ablagemöglichkeiten für Sendungen und sind vor allem in städtischen Siedlungsstrukturen anzutreffen [37]. Meist werden die Stationen nur von einem einzigen Logistikdienstleister betrieben und bestückt.

Im Hinblick auf die Nachhaltigkeit und Effizienz der Schließfächer spielt der Standort eine wesentliche Rolle. Untersuchungen ergaben zum Beispiel, dass ein Standort nahe der Wohnung oder in der Nähe des Arbeitswegs wichtige Kriterien für eine Akzeptanz der Kunden darstellen. Ebenso wurde festgestellt, dass das Vorhandensein von Parkplätzen ein wichtiges Entscheidungskriterium für die Nutzung von Paketschließfächern ist. Liegt der Standort des Schließfaches in unmittelbarer Nähe zum Wohnort, kann vor allem in Städten davon ausgegangen werden, dass die Kunden die Sendung beispielsweise zu Fuß oder mit dem Fahrrad abholen, insofern es die Abmessungen und das Gewicht erlauben. Um die Abholung der Sendungen mit anderen Aktivitäten kombinieren zu können, sind viele Schließfächer unter anderem z.B. an Supermärkten, an zentral gelegenen Filialen von Logistikdienstleistern oder an Bahnhöfen zu finden. [41]

Einen Sonderfall der Schließfachzustellung stellt die Installation eines sicheren Paketablagekastens vor der Wohnung der Empfänger dar. Für die sogenannten privaten Schließfächer existieren verschiedene Ansätze, die von einer Art zusätzlichem Briefkasten bis hin zur temporären und diebstahlsicheren Verankerung von Ablagekästen an den Wohnungs- oder Haustüren reichen. [42] [35]

2.3.3 Autonome Zustellung mit Drohnen und Robotern

Eine in den letzten Jahren viel diskutierte Zustellvariante ist die Zustellung mit Hilfe von autonomen und unbemannten Flugzeugen (Drohnen). Unter anderem wurden dazu in Deutschland Versuche zur Belieferung der Insel Juist sowie der Winklmoosalm nahe der Gemeinde Reit im Winkl in den bayerischen Alpen unternommen. Dabei startete und landete die Drohne an einer speziellen Form eines Paketschließfachs [43]. Andere Logistikdienstleister verfolgen im Gegensatz dazu den Ansatz, dass die Drohnen direkt vom Verteil- bzw. Logistikzentrum aus die Kunden beliefern. Dadurch soll die Dauer von Bestellung bis Auslieferung auf circa 30 Minuten reduziert werden können. [44]

Auch die Zustellung auf der Straße mit Hilfe von autonomen und unbemannten Kleinfahrzeugen wurde in den letzten Jahren getestet. Unter anderem wurden im Jahr 2016 und 2017 Versuche zur Paketzustellung mit Paketrobotern in Hamburg unternommen. [45] [46] [47] Bis zur Etablierung der autonomen Zustellung gilt es allerdings noch einige regulatorische Rahmenbedingungen, z.B. hinsichtlich Datenschutz, abzuklären. [48]

2.3.4 Sonstige Zustellkonzepte

Zustellung am Arbeitsplatz

Das Konzept der Zustellung von Sendungen an den Arbeitsplatz des Sendungsempfängers beruht auf der Tatsache, dass ein Unternehmen, in dem der potentielle Sendungsempfänger beschäftigt ist, mit einer hohen Wahrscheinlichkeit täglich beliefert wird. Anstatt die

Sendungen nach Hause zu schicken, wählen die Mitarbeiter als Zustelladresse die Anschrift des Unternehmens aus. Durch die Möglichkeit, dass Mitarbeiter ihre Sendungen an den Arbeitsplatz zustellen lassen, wird eine sehr hohe Erstzustellquote erreicht. Überdies besteht die Möglichkeit die Sendungen von einzelnen Logistikdienstleistern durch Drittanbieter konsolidieren zu lassen, wobei dann spezielle Abholpunkte in den Unternehmen für die Sendungen an die Mitarbeiter eingerichtet werden. [49] [40]

Servicestandorte

Die Zustellung von Sendungen zu Servicestellen ist ebenfalls als Zustellkonzept zu sehen. Dabei müssen die Kunden, ähnlich wie bei Schließfächern, zur Abholung der Sendung selbst aktiv werden. Rund 5 % der Sendungen werden in Deutschland zu Servicestellen transportiert, wobei die Transporte meist mit größeren Fahrzeugen als bei der Adresszustellung erfolgt. [35] Servicestandorte dienen dabei nicht nur zur Abholung von Sendungen, sondern können auch zur Aufgabe genutzt werden. Die mittlere Distanz zu einem Servicepunkt beträgt in deutschen Städten rund 600 m, auf dem Land sind es rund 3 km [37].

2.4. Energieverbrauch und Emissionen

2.4.1 Wirtschaftliche und energetische Effizienz

Auf Grund der genannten, besonderen Eigenschaften verursacht der Transport von Gütern auf der letzten Meile die höchsten Kosten der gesamten Logistikkette [50], die sich im Bereich von 13-75 % der Gesamtkosten bewegen [51] [52]. Faktoren wie

- Ausprägung der Kundenserviceorientierung,
- Liefertyp,
- angestrebte Zuverlässigkeit,
- geographische Ausdehnung der Zustellregion,
- Marktdurchdringung und Marktdichte sowie auch
- Struktur der Fahrzeugflotte und eingesetzte Fahrzeugtechnologie [14]

zeigen einen deutlichen Einfluss auf die Kosten.

Maßnahmen zur Steigerung der wirtschaftlichen Effizienz

Getrieben durch die hohen Kosten gibt es daher viele Bemühungen zur Effizienzsteigerung auf der letzten Meile. Neben der Kundendichte hat auch die Länge des Zeitfensters für eine Belieferung hohes Potential zur Senkung der Kosten. Durch die Ausdehnung des Zeitfensters für die Belieferung kann beispielsweise eine Reduktion der Kosten erreicht werden. [53] Da bereits vor dem Beladen eines Fahrzeugs bekannt ist, welche Kunden während der Tour beliefert werden müssen, kann durch das Vorgeben einer auf die Kunden zugeschnittenen Fahrzeugroute die zurückzulegende Streckenlänge optimiert werden. Die Verkürzung der Strecke durch das sogenannte *Routing* führt neben der Kostenreduktion durch die Einsparung von Energie auch zu einer Zeiteinsparung bei der Belieferung, die durch die Möglichkeit zur Bedienung von mehr Kunden auch zur Effizienzsteigerung bzw. einer verstärkten Kostenreduktion beiträgt. Viele wissenschaftliche Arbeiten beschäftigen sich mit der Optimierung der Routenführung unter gleichzeitiger Beachtung von z.B. Zeitfenstern für die Lieferung. Einige Logistikdienstleister optimieren die Fahrzeugroute auch nach anderen Kriterien, beispielsweise in Bezug auf die Vermeidung von Abbiegevorgängen nach Links bei vorherrschendem Rechtsverkehr. Da bei diesen Abbiegevorgängen an Kreuzungen mit

zusätzlichen Anfahr- und Bremsvorgängen zu rechnen ist, um beispielsweise dem Gegenverkehr die Vorfahrt zu gewähren, führt eine Vermeidung des Linksabbiegens neben einer Zeitersparnis auch zur Einsparung von Kraftstoff. [54] [55] Viele der genannten Faktoren und Maßnahmen zur Effizienzsteigerung beeinflussen zusätzlich zu den Kosten auch Energieverbrauch und Emissionen auf der letzten Meile.

2.4.2 Energieverbrauch und Emissionen

Neben den höchsten Kosten werden der letzten Meile auch der höchste Energieverbrauch [56] und die höchsten resultierenden Emissionen der gesamten Logistikkette zugeschrieben [14]. Logistikdienstleister haben die Möglichkeit mit dem Verfahren aus der DIN EN 16258 Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen der erbrachten Transportdienstleistung auf Basis von gemessenen Realwerten zu bestimmen. Dabei wird besonderer Wert auf die Allokation auf einzelne Stückgutsendungen beim Einsatz verschiedener Verkehrsträger gelegt. [57]

In den offiziellen Statistiken zu Energieverbrauch und Emissionen nach Verbrauchssektor der Bundesrepublik Deutschland wird der Bereich der letzten Meile nicht direkt ausgewiesen. Ein Teil des Endenergieverbrauchs des Güterverkehrs in Deutschland von 689 PJ oder rund 191,4 TWh im Jahr 2016 ist dabei jedoch diesem Glied der Logistikkette zuzurechnen. Bei einem Anteil des Güterverkehrs von rund 25,5 % am gesamten Endenergieverbrauch des Verkehrssektors entfielen rund 35,3 % der Emissionen auf Straßennutzfahrzeuge einschließlich des Busverkehrs. [58] [59] Für europäische Städte wird davon ausgegangen, dass ein Anteil von 8-15 % des gesamten Verkehrsaufkommens durch den städtischen Wirtschaftsverkehr verursacht wird, der dabei rund 20-30 % der gesamten Emissionen ausstößt. [60]

Beeinflussung von Energieverbrauch und Emissionen

Die genannten Maßnahmen zur Steigerung der wirtschaftlichen Effizienz der letzten Meile eröffnen auch die Möglichkeit zur Reduktion von Energieverbrauch und Emissionen. Neben der Streckenlänge können beispielsweise beim Routing prinzipiell auch Kriterien wie erwarteter Energieverbrauch oder resultierende Emissionen für die Optimierung herangezogen werden [61] [62]. Bei den genannten Eco-Routing-Methoden werden allerdings die Erfahrungen der Fahrer, z.B. über die voraussichtliche Anwesenheit der Kunden oder die Verkehrslage, nicht beachtet, weshalb sich diese Ansätze wiederum negativ auf die Kostenbilanz der letzten Meile auf Grund des Zeitfaktors auswirken können. Einen deutlich einfacheren Ansatz stellt die Schulung der Fahrer von Zustellfahrzeugen dar. Durch eine vorausschauende Fahrweise, d.h. der Vermeidung von vielen Anfahr- und Bremsvorgängen kann der Energieverbrauch der Fahrzeuge zusätzlich beeinflusst werden. [54] [33] Auch beeinflussen die verschiedenen Zustellkonzepte auf der letzten Meile Energieverbrauch und Emissionen, insbesondere wenn Kunden selbst aktiv werden müssen [63].

Bedingt durch den Wandel in der Logistikbranche hin zu *Green Logistics* rücken auch vermehrt neue Antriebstechnologien als Maßnahme zur Beeinflussung von Energieverbrauch und Emissionen auf der letzten Meile in den Fokus. Insbesondere der Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) wird als zukunftsfähiger Ansatz in diesem Bereich gesehen. Auf Grund der hohen Anschaffungskosten ist die Verwendung von BEVs auf der letzten Meile derzeit wirtschaftlich noch fraglich. Der Einsatz von Elektrofahrzeugen bietet

dennoch bereits heute die Möglichkeit zur Reduktion von Energieeinsatz und Emissionen auf der letzten Meile [64]. Auch kann der Einsatz dieser Fahrzeuge Logistikdienstleister heute schon auf etwaige zukünftige Herausforderungen vorbereiten. [65]

Modellierungsansätze

Viele Modellierungsansätze für Energieverbrauch und Emissionen auf der letzten Meile aus Wissenschaft und Forschung nutzen ausgewählte, stichprobenartige Daten über zu beliefernde Kunden zur Untersuchung definierter Szenarien unter Einbezug der genannten Maßnahmen zur Beeinflussung des Energieverbrauchs [41] [66] [67]. Dabei kommen viele verschiedene Modellierungsansätze, z.B. Multi-Agenten- und Regressionsmodelle [68] [69] [70], Monte-Carlo-Methoden in Kombination mit Datenstichproben [67] und auch einfache Modelle zur Abbildung der Veränderung der Wegstrecken in Abhängigkeit verschiedener Fahrzeuge zum Einsatz [71] [32]. Auch wird eine zufällige Auswahl von Punkten, die innerhalb eines definierten Radius um ein Fahrzeugdepot liegen, zur stochastischen Modellierung von Lieferungen auf der letzten Meile genutzt. [63] [72]

2.4.3 Energetische Bilanzräume

Auf Grund der Tatsache, dass Energieverbrauch und Emissionen auf der letzten Meile maßgeblich vom Fahrzeugeinsatz beeinflusst werden, muss zwischen verschiedenen Bilanzräumen bei energiewirtschaftlichen Betrachtungen von Fahrzeugen unterschieden werden.

Tank2Wheel

Die Betrachtung des Endenergiebedarfs von Fahrzeugen oder auch die sogenannte Tank2Wheel-Betrachtung spannt den kleinsten energetisch sinnvollen Bilanzraum auf. Im Gegensatz zur Betrachtung des Nutzenergiebedarfs eines Fahrzeugs, der nur durch die Physik der Fahrzeugfortbewegung beeinflusst wird, werden bei der Tank2Wheel-Betrachtung die Verluste im Fahrzeuge, d.h. die Effizienz des kompletten Fahrzeugs inklusive aller Komponenten berücksichtigt. Der Endenergiebedarf erlaubt damit Aussagen zur Effizienz des Fahrzeugs unter Berücksichtigung der Art des Antriebs. Die Bilanzgrenze einer Well2Wheel-Analyse kann damit an der Fahrzeugkarosserie gezogen werden. [73]

Well2Wheel

Bei der Well2Wheel-Analyse wird der betrachtete Bilanzraum vergrößert, sodass auch die Verluste in den vorgelagerten Ketten bei der Bereitstellung der Endenergie bilanziert werden. Damit entspricht eine Well2Wheel-Analyse der primärenergetischen Betrachtung des Fahrzeugeinsatzes. [73]

Life-Cycle Assessment bzw. kumulierter Energieverbrauch

Bei einer energetischen Lebenszyklusanalyse oder auch *Life-Cycle Assessment* (LCA) wird neben der Nutzung des Fahrzeugs auch der Energieaufwand für Herstellung und Entsorgung bilanziert (kumulierter Energieaufwand [74]). Dabei erfolgt die Angabe der Energieverbräuche auch in Primärenergieeinheiten, sodass die Effizienz bei der Bereitstellung der Energie mit bilanziert wird.

2.5. Zustellfahrzeuge

2.5.1 Zustellfahrzeuge mit Verbrennungsmotor

Der Einsatz von konventionellen Fahrzeugen bzw. Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ist heute in allen Bereichen des Straßenverkehrs der Standard. Die Gründe hierfür liegen einerseits im Stand der technischen Entwicklung der Fahrzeuge als auch in der Verfügbarkeit von Kraftstoff. Heute sorgen insgesamt rund 14.000 Tankstellen für eine flächendeckende Kraftstoffversorgung in Deutschland [75].

Effizienz und Emissionen

Otto- und Dieselmotoren sind die am meisten anzutreffenden Arten von Verbrennungsmotoren im Straßenverkehr. Nahezu alle der 50,7 Millionen [58] in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge werden von Motoren dieser beiden Typen angetrieben. Der effektive Wirkungsgrad von Ottomotoren, der alle Verluste im inneren eines Verbrennungsmotors beinhaltet, liegt etwas niedriger als der von Dieselmotoren. Dies resultiert in einem leicht höheren Kraftstoffverbrauch von Ottomotoren verglichen mit Dieselmotoren. Der maximale Wirkungsgrad der Motoren, der durch den Carnot-Wirkungsgrad limitiert wird, kann dabei von beiden Motoren nicht erreicht werden. Während Ottomotoren vor allem in Personenkraftwagen Einsatz finden, werden Dieselmotoren nahezu in allen Fahrzeugtypen eingesetzt. Durch die Verbrennung von fossilem Kraftstoff beim Betrieb der Motoren entstehen lokale Emissionen, die nicht nur rein auf CO₂ beschränkt sind. Auf Grund der vermehrten Emission von Feinstaub und Stickoxiden von Dieselmotoren sind insbesondere diese in den letzten Jahren immer mehr in den Fokus von Diskussionen gerückt. Einige deutsche Städte mussten bereits Fahrverbote für ältere Dieselmotoren erlassen, um die maximal zulässigen Grenzwerte für Feinstaub- und Stickoxide einhalten zu können. [76]

Zusätzlich zur Verwendung von fossilen Kraftstoffen können Verbrennungsmotoren in Abhängigkeit des Typs prinzipiell auch mit biogenen Kraftstoffen, z.B. Rapsöl, Rapsmethylester oder Ethanol betrieben werden, die sich dementsprechend positiv auf die Emissionsbilanz von Fahrzeugen auswirken können. Ebenso werden Erdgas (LNG), *Liquefied Petrol Gas* (LPG) und auch Wasserstoff als Kraftstoff für die Ottomotoren verwendet. [76]

Einsatz von konventionellen Zustellfahrzeugen auf der letzten Meile

Der Einsatz von konventionellen Fahrzeugen mit Dieselmotor auf der letzten Meile kann heute als Stand der Technik gesehen werden. Trotz der erwähnten Problematik um Fahrverbote sowie tendenziell steigender Kraftstoffpreise in den letzten Jahren haben sich alternative bzw. neue Antriebsvarianten in diesem Segment bisher kaum etabliert. Die Gründe hierfür sind unter anderem:

- eine hohe Verfügbarkeit von Kraftstoff,
- eine flächendeckend vorhandene Betankungsinfrastruktur,
- relativ geringe Anschaffungskosten der Fahrzeuge sowie
- die ausgereifte Technik der Fahrzeuge.

2.5.2 Batterieelektrische Zustellfahrzeuge

Batterieelektrische Fahrzeuge, im Allgemeinen auch häufig nur als Elektrofahrzeug bezeichnet, erlebten in den letzten Jahren weltweit einen deutlichen Aufschwung. Durch För-

dermechanismen in Deutschland, wie z.B. die Einführung einer Kaufprämie und die Befreiung von der Kraftfahrzeugsteuer, versucht die Bundesregierung den Anteil an Elektrofahrzeugen zu erhöhen [77]. Die Gründe hierfür liegen vor allem im Potential der Elektrofahrzeuge zur Energieeinsparung und der damit verbundenen Senkung des CO₂-Ausstoßes des Verkehrssektors.

Aufbau und Effizienz

Ein Elektrofahrzeug besteht aus den Komponenten [73] [78]: (**Abbildung 2-4**):

- Elektrische Antriebsmaschine: Wandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie beim Fahrbetrieb, Betrieb als Generator bei Rekuperation bzw. Nutzbremmung
- Antriebsumrichter: Anpassung der Gleichspannung der Traktionsbatterie an die Bedürfnisse der Antriebsmaschine, d.h. z.B. Erzeugung eines dreiphasigen Drehstroms zur Speisung der Antriebsmaschine bzw. Einstellung von Drehmoment bzw. Drehzahl der Maschine in entsprechenden Grenzen nach Anforderung des Fahrers
- Traktionsbatterie: Speicherung der für den Fahrbetrieb notwendigen elektrischen Energie, Aufnahme von elektrischer Energie bei Nutzbremmung
- Ladegerät: Schnittstelle von Elektrofahrzeug an das Stromnetz bzw. an die Ladesäule, Anpassung von Spannungsart und -ebene an die Anforderungen der Traktionsbatterie, Aufladung der Batterie

Durch die Multiplikation von typischen Nutzungsgraden [73] der einzelnen Komponenten eines Elektrofahrzeugs kann die Tank2Wheel Effizienz eines Elektrofahrzeugs auf circa 78 % abgeschätzt werden. Der Nutzungsgrad liegt damit insgesamt deutlich höher als der von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Ein typisches Fahrzeug mit Dieselmotor erreicht beispielsweise nur Nutzungsgrade im Bereich von rund 20 % [76].

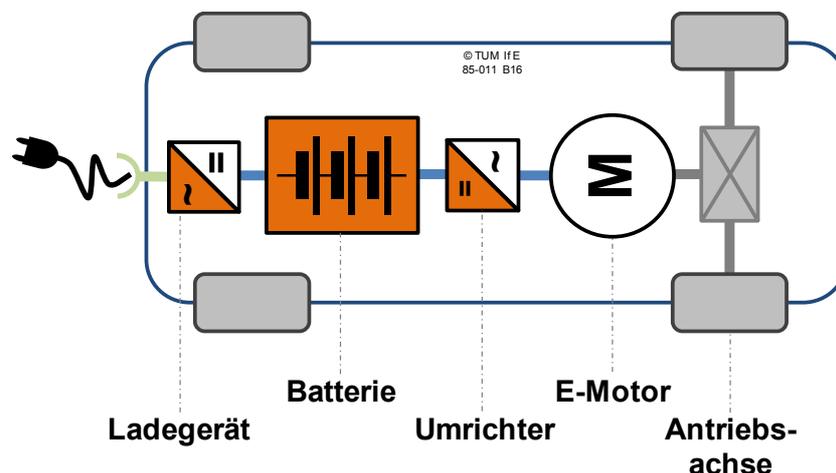


Abbildung 2-4 Schematischer Aufbau eines Batterieelektrofahrzeugs

Design

Generell können die auf dem Markt verfügbaren Elektrofahrzeuge in die zwei Konstruktionsarten Purpose-Design und Conversion-Design gegliedert werden. Während erstere die komplette Neukonstruktion des Elektrofahrzeugs bezeichnet, wird unter der zweiten Konstruktionsart die Elektrifizierung eines bestehenden Großserienfahrzeugs verstanden.

Elektrofahrzeuge, die im Conversion-Design realisiert werden, haben meist eine höhere Fahrzeugleermasse, da die im konventionellen Fahrzeug verwendeten Bauteile (Karosserie, Antriebsstrang etc.) bei der Elektrifizierung nur selten hinsichtlich der Masse optimiert werden. Dem gegenüber besteht bei Elektrofahrzeugen im Purpose-Design die Möglichkeit zur Gewichtsoptimierung, u.a. durch den Einsatz von Leichtbau. [79]

Vorteile

Im Gegensatz zu konventionellen Zustellfahrzeugen bieten Elektrofahrzeuge die Möglichkeit eines lokal emissionsfreien Betriebs. Daher werden sie als sinnvolles Mittel zur Luftreinhaltung u.a. in Städten und Einhaltung der Klimaziele gesehen. Die lokale Emissionsfreiheit bedeutet dabei aber nicht, dass der Betrieb von Elektrofahrzeugen keine Emissionen verursacht. Vielmehr werden durch den Einsatz dieser Fahrzeuge die Emissionen vom Verkehrssektor in den Prozess der Stromgestehung verlagert. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Strommix, der zur Aufladung der Batterien des Fahrzeugs genutzt wird, ergeben sich dementsprechend unterschiedlich hohe Emissionen. Durch die fluktuierende Einspeisung von erneuerbaren Energien resultiert daher zum Beispiel ein Vorteil, wenn der Ladezeitpunkt des Elektrofahrzeugs in den Mittagsstunden ist, zu denen z.B. Photovoltaik oder Windkraft einen großen Anteil an der Stromerzeugung haben.

Neben dem lokal emissionsfreien Betrieb bieten Elektrofahrzeuge auch bei Bremsvorgängen Vorteile. Während beim konventionellen Fahrzeug ein Großteil der kinetischen Energie des Fahrzeugs in den Bremsscheiben bzw. Bremsklötzen in Wärme umgewandelt wird, kann ein Teil der kinetischen Energie beim Bremsen von Elektrofahrzeugen in die Batterie rückgespeist werden. Dabei wird die elektrische Antriebsmaschine des Fahrzeugs als Generator eingesetzt. Durch diese Möglichkeit ergibt sich eine Erhöhung der Reichweite des Fahrzeugs bzw. auch die Möglichkeit zur Energieeinsparung. [73]

Einsatz von Elektrofahrzeugen auf der letzten Meile

Die auf Grund des Energieinhalts der Batterie begrenzte Reichweite eines Elektrofahrzeugs, die bei Privatpersonen ein häufig genannter Grund gegen die Anschaffung ist, stellt keinen Hinderungsgrund für den Einsatz von elektrischen Zustellfahrzeugen auf der letzten Meile dar. Im Regelfall legen Zustellfahrzeuge bei der Belieferung der Kunden nur wenige 10 km zurück [33]. Trotz des etwas höheren Energieverbrauchs, verglichen mit elektrischen Personenkraftwagen, kann die für die Strecke notwendige elektrische Energie auch heute schon problemlos in einer Traktionsbatterie gespeichert werden. Da insbesondere Zustellfahrzeuge häufig anfahren und bremsen müssen, kann die Möglichkeit der Rekuperation bzw. Nutzbremmung von Elektrofahrzeugen gerade im Bereich der letzten Meile als Vorteil gegenüber konventionellen Fahrzeugen aufgeführt werden.

Vor allem auf Grund der in den letzten Jahren gefallenen spezifischen Kosten für Lithium-Batterien, rückt der Einsatz von Elektrofahrzeugen für viele Logistikdienstleister auch aus wirtschaftlicher Sicht in den Fokus. Während Studien aus dem Jahr 2010 für das Jahr 2020 noch spezifische Batteriekosten von rund 300 \$/kWh prognostizierten, gehen aktuelle Studien von Preisen von rund 130-200 \$/kWh in Abhängigkeit der Zellchemie aus. Diese Tendenz kann unter anderem durch den steigenden Absatz von Batteriezellen für Elektrofahrzeuge sowie intensiver Forschung in diesem Bereich begründet werden. [80]

In den vergangenen Jahren haben verschiedene Logistikdienstleister weltweit den Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen für Zustellungen auf der letzten Meile getestet. In vielen deutschen Großstädten werden Elektrofahrzeuge für diesen Anwendungsfall bereits im Wirkbetrieb eingesetzt. [15] Beispielsweise sind in der Stadt München seit Mitte 2017 dreißig elektrische Zustellfahrzeuge eines Logistikdienstleisters im Einsatz. [81] Setzt sich der Trend der fallenden Batteriepreise, welche die Kosten eines Elektrofahrzeugs stark beeinflussen, wie prognostiziert fort, dürfte sich der Einsatz von Elektrofahrzeugen auf der letzten Meile für eine Vielzahl von Logistikdienstleistern in naher Zukunft auch wirtschaftlich lohnen, sodass mit einem vermehrten Einsatz diese Fahrzeuge auf der letzten Meile aus den genannten Gründen zu rechnen ist.

Ladeinfrastruktur

Um Batterieelektrofahrzeuge aufzuladen, wird eine auf die jeweiligen Anforderungen ausgelegte Ladeinfrastruktur benötigt. Die maximale elektrische Leistung, die eine Ladestation zur Verfügung stellt, bestimmt dabei die Zeitdauer, die für das Aufladen der Batterie eines Fahrzeugs benötigt wird. Generell kann zwischen konduktiven und induktiven Ladesystemen unterschieden werden. Induktive Ladesysteme befinden sich derzeit noch in der Erprobungs- bzw. Normungssphase. Das Band der Ladeleistungen erstreckt sich hierbei von 3,3 kW bis hin zu knapp maximal 60 kW. Im Gegensatz zu induktiven Ladesystemen kann die konduktive, d.h. kabelgebundene Ladung von Elektrofahrzeugen heute als Stand der Technik gesehen werden. In Abhängigkeit vom Typ der Ladesäule sowie dem verwendeten Ladestecker ergeben sich maximale Ladeleistungen von circa 44 kW bei Wechselstromladung (AC-Ladung) und circa 350 kW bei Gleichstromladung (DC-Ladung). Die hohen Ladeleistungen von DC-Ladestationen verursachen dabei auch höhere Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur. [82] [73]

Bei der Betrachtung von einem Fahrzeugdepot eines Logistikdienstleisters mit mehreren Ladepunkten für Elektrofahrzeuge ergibt sich generell das Problem, dass der Netzanschlusspunkt des Gebäudes für die benötigten Ladeleistungen ausgelegt sein muss. Vornehmlich bei der parallelen Ladung von mehreren Elektrofahrzeugen kann ein typischer Anschluss am Niederspannungsnetz eventuell nicht mehr ausreichen, sodass ein Anschluss an höhere Spannungsniveaus mit separaten Transformatoren realisiert werden müsste. Diese Problematik ergibt sich nicht nur bei hohen Ladeleistungen mit DC-Ladesystemen. Auch bei der Installation von mehreren AC-Ladesäulen, beispielsweise mit einer maximalen Leistung von 44 kW, wird die maximale Belastungsgrenze des Stromanschlusses der Logistikimmobilie wohl schnell erreicht, da neben der Ladung der Fahrzeuge auch weitere Komponenten des Depots (Beleuchtung, Sortieranlage, Informations- und Kommunikationstechnik etc.) weiterhin betrieben werden müssen. Auf Grund der Tatsache, dass Zustellfahrzeuge meist über Nacht am Depot stehen und geladen werden können, kann die Ladeleistung deutlich reduziert werden. Dementsprechend dauert die Ladung der Fahrzeuge länger, allerdings können Ladeleistungen von rund 3,7 kW bereits ausreichen, um die für die Zustellung am nächsten Tag benötigte Energie in die Batterien zu laden. Die Installation einer Schnellladeinfrastruktur, d.h. einer Ladeinfrastruktur mit hohen Ladeleistungen, wird demnach nahezu überflüssig. [83]

Zusätzlich zu den Restriktionen durch die maximale Last am Netzanschlusspunkt des Fahrzeugdepots lohnt sich die Installation einer Ladeinfrastruktur mit höheren Ladeleistun-

gen auch aus wirtschaftlicher Sicht nicht für einen Logistikdienstleister. Zwar könnten bei flexiblen Stromtarifen Bereiche mit niedrigen Kosten effizienter genutzt werden, allerdings würden die dadurch resultierenden Kosteneinsparungen die Investitions- und Betriebskosten, d.h. zum Beispiel Netzanschluss mit entsprechender Leistung, nicht aufwiegen. [83]

Auch die Verwendung von Batteriewechselstationen scheidet derzeit aus wirtschaftlichen und technischen Gründen für Zustellfahrzeuge aus. [82]

2.5.3 Sonstige Zustellfahrzeuge

Hybride Zustellfahrzeuge

Die Kombination eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor mit einem Batterieelektrofahrzeug ist das sogenannte hybridelektrische Fahrzeug, das meist nur als Hybridfahrzeug bezeichnet wird. In Abhängigkeit von der Verschaltung von Elektro- und Verbrennungsmotor ergeben sich die drei möglichen Antriebsstrukturen

- serieller Hybrid (Serienhybrid),
- paralleler Hybrid (Parallelhybrid) und
- leistungsverzweigter Hybrid (Mischhybrid) [73].

Während beim letzteren ein Planetengetriebe zur stufenlosen Einstellung des Leistungsflusses von Elektro- oder Verbrennungsmotor verwendet wird, können Serien- und Parallelhybride meist technisch einfacher realisiert werden. **Abbildung 2-5** zeigt beispielsweise die Antriebsstruktur eines Parallelhybrids. Der elektrische Antriebsstrang des Fahrzeugs ist dabei identisch zum Batterieelektrofahrzeug (vgl. Abbildung 2-4). Über eine mechanische Kupplung können das Drehmoment bzw. die Drehzahl des verbrennungsmotorischen Antriebsstrangs zum Drehmoment bzw. zur Drehzahl bzw. dem Drehmoment des elektrischen Antriebsstrangs addiert werden. Welche der beiden Größen addiert wird, wird über die Struktur des Getriebes festgelegt. Sind Hybridfahrzeuge mit einem Ladeanschluss für die Batterie ausgestattet, spricht man von sogenannten Plug-In-Hybridfahrzeugen im Gegensatz zum autarken Hybrid. [84] [73]

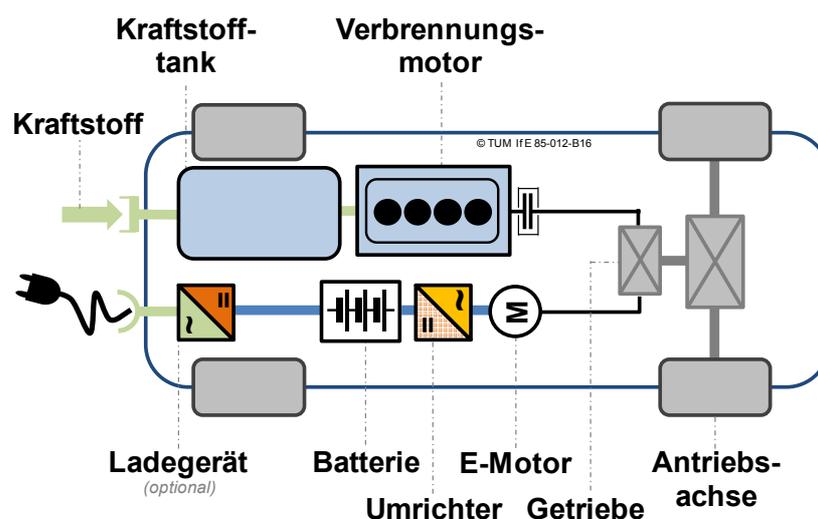


Abbildung 2-5 Schematischer Aufbau eines hybridelektrischen Fahrzeugs

Auf Grund von hohen Verlusten in der Wirkungsgradkette werden Serienhybridfahrzeuge meist nur als sogenannte *Range Extender* eingesetzt. Dabei kann der Verbrennungsmotor,

der auf Grund der Antriebsstruktur des seriellen Hybrids von der Antriebsachse durch den elektrischen Antriebsstrang mechanisch entkoppelt ist, an wirkungsgradoptimalen Betriebspunkten betrieben werden. Die vom Verbrennungsmotor bereitgestellte Leistung bzw. Energie wird schlussendlich zum Laden der Batterie genutzt, falls z.B. längere Wegstrecken zurückgelegt werden müssen. Dementsprechend sind die Verbrennungsmotoren von Serienhybriden meist kleiner dimensioniert als es für den Betrieb des Fahrzeugs notwendig wäre. [84] [73]

Hybridelektrische Zustellfahrzeuge werden bereits durch einige Logistikdienstleister für Zustellungen auf der letzten Meile eingesetzt. Unter anderem kann dabei der Vorteil genutzt werden, dass z.B. der Parallelhybrid sowohl rein elektrisch als auch rein verbrennungsmotorisch fahren kann. Ist die Distanz vom Fahrzeugdepot bis zur ersten Zustellung zum Beispiel relativ groß, dann kann auf dieser Strecke der Verbrennungsmotor genutzt werden. Gleichzeitig wird bei der Anfahrt keine Energie aus der Traktionsbatterie entnommen, sodass für die Zustellung der volle Energieinhalt zur Verfügung steht. Trotzdem können bei den vielen Anfahr- und Bremsvorgängen während der eigentlichen Zustellung die Vorteile des Elektrofahrzeugs optimal genutzt werden. [85]

Brennstoffzellenelektrische Zustellfahrzeuge

Der Einsatz von Brennstoffzellen in elektrischen Straßenfahrzeugen wird bereits seit einigen Jahrzehnten erforscht. Seit wenigen Jahren sind erste Brennstoffzellenelektrofahrzeuge auf dem Markt verfügbar. Dabei kommen hauptsächlich Polymerelektrolytmembranbrennstoffzellen (PEM-Brennstoffzellen) zum Einsatz, die zu den Niedertemperatursystemen gezählt werden. PEM-Brennstoffzellen zeichnen sich durch die Möglichkeit einer dynamischen Lastbereitstellung aus, die z.B. bei Festoxidbrennstoffzellen (*Solid Oxide Fuel Cell SOFC*) oder phosphorsauren Brennstoffzellen (*Phosphoric Acid Fuel Cell PAFC*) nicht gegeben ist. [73]

PEM-Brennstoffzellen arbeiten mit Wasserstoff als Brenngas, der in speziellen Tanks entweder in gasförmiger oder flüssiger Form als *Compressed Gaseous Hydrogen (CGH₂)* oder *Liquefied Hydrogen (LH₂)* im Fahrzeug mitgeführt werden muss. Insbesondere bei der tiefkalten Speicherung des Wasserstoffs als LH₂ in Kryotanks muss dabei eventuell zusätzliche Energie für die Kühlung der Tanks aufgewandt werden. Als Oxidans kann bei PEM-Brennstoffzellen der Sauerstoff aus der Umgebungsluft genutzt werden, sodass keine zusätzlichen Speicher dafür vorgesehen werden müssen. Die Struktur des Antriebsstrangs eines Brennstoffzellenelektrofahrzeugs (**Abbildung 2-6**) hat große Ähnlichkeit zu der eines Batterieelektrofahrzeugs. Die vergleichsweise kleine Traktionsbatterie wird zur Leistungsunterstützung der Brennstoffzelle und zur Aufnahme von Energie bei der Nutzbremmung verwendet. [86] [73]

Hinsichtlich der Emissionen ergibt sich auch bei Brennstoffzellenfahrzeugen ein ähnliches Bild wie bei Batterieelektrofahrzeugen. Während des Betriebs fallen keine lokalen Emissionen an, lediglich Produktwasser bzw. Wasserdampf muss an die Umgebung abgeführt werden. Die Emissionen in den vorgelagerten Ketten werden hauptsächlich durch den Prozess der Wasserstoffgewinnung beeinflusst. Auch hier hat der vermehrte Einsatz von erneuerbaren Energien das Potential die spezifischen Emissionen deutlich zu senken, z.B. bei der Elektrolyse von Wasser zur Gewinnung von Wasserstoff. Im Gegensatz zum Batterieelektrofahrzeug bewegt sich die Dauer des Tankvorgangs von Brennstoffzellenfahrzeugen

gen in der gleichen Größenordnung wie die Aufnahme von Kraftstoff an Tankstellen beim konventionellen Fahrzeug. Als Hemmnisse zur Etablierung von Brennstoffzellenelektrofahrzeugen können die momentan hohen Anschaffungskosten der Fahrzeuge sowie eine fehlende flächendeckende Wasserstoffinfrastruktur, d.h. Tankstellen und Erzeugungsanlagen, gesehen werden. [86]

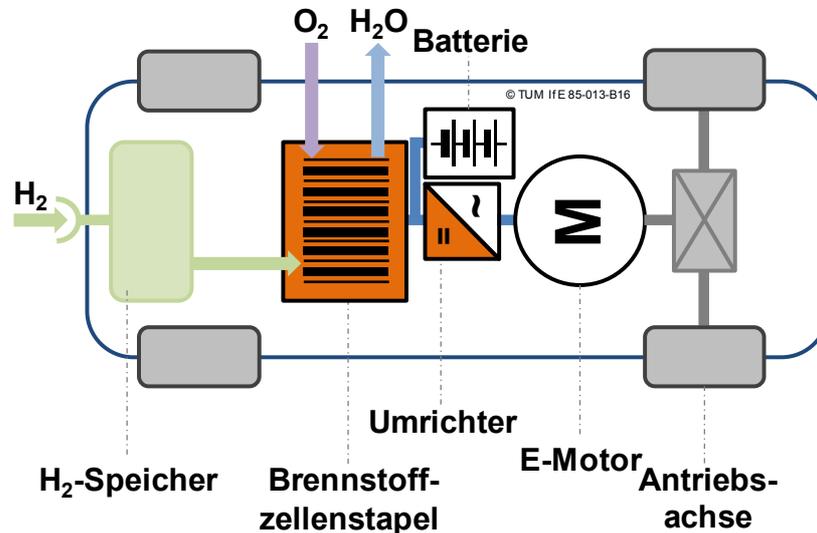


Abbildung 2-6 Schematischer Aufbau eines Brennstoffzellenelektrofahrzeugs

Die zuletzt genannten beiden Gründe hemmen derzeit auch den Einsatz von brennstoffzellenelektrischen Zustellfahrzeugen auf der letzten Meile, Gedanken und Konzepte zum Einsatz dieser Fahrzeuge existieren aber bereits. [87]

Lastenräder

Zusätzlich zu den genannten Fahrzeugkonzepten werden auch Fahrräder für Zustellungen von Sendungen auf der letzten Meile verwendet. Im Gegensatz zu Fahrrädern, mit denen Briefsendungen ausgeliefert werden, sind diese Lastenräder mit einem größeren Stauraum für die Pakete ausgestattet. Prinzipiell impliziert die beschränkte Ladekapazität sehr viele Fahrten vom Depot in die Zustellgebiete und zurück bzw. alternativ den parallelen Einsatz von sehr vielen Fahrrädern. Eine Lösungsmöglichkeit für dieses Problem ist die Aufstellung von mobilen Depots in den einzelnen Zustellgebieten, an denen die Fahrräder beladen werden. Versuche mit diesem Konzept in einigen Stadtbezirksteilen der Stadt München ermöglichen jährliche CO_2 -Emissionseinsparungen von rund 65 t CO_2 . Dabei werden sowohl konventionelle Fahrräder als auch Fahrräder mit elektrischer Tretunterstützung, sogenannte Pedelecs, eingesetzt. [88]

3. Vorgehen zur Bestimmung von Energieverbrauch und Kohlenstoffdioxid-Emissionen

3.1. Methodik

Zur Bestimmung von Energieverbrauch und Kohlenstoffdioxidemissionen auf der letzten Meile wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methodik entwickelt, die flexibel für unterschiedliche Untersuchungsregionen eingesetzt werden kann. Mit dem methodischen Ansatz können

- variierende Sendungsmengen,
- verschiedene Antriebsvarianten und Kapazitäten von Zustellfahrzeugen,
- unterschiedliche Zustellkonzepte,
- Energieverbrauch und CO₂-Emissionen von optionalen Kundenfahrten und
- aktuelle und zukünftige Entwicklungen im Bereich von Lieferungen auf der letzten Meile

in Potentialanalysen integriert werden.

Auf Grund des starken Anstiegs der Sendungsmengen im B2C- und C2C-Bereich [12] und der prinzipiellen Eignung dieser Marktsegmente für die Belieferung mit alternativen Konzepten zur Adresszustellung, wurde die Methodik auf Sendungen in diesem Bereich eingegrenzt. Der vorgestellte Modellierungsansatz wird auch in der Studie „Energie- und Emissionsbilanz der Paketzustellung mit Elektrofahrzeugen in München“ verwendet, die der Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der Technischen Universität München, gefördert durch das Referat für Gesundheit und Umwelt der Landeshauptstadt München, durchführt.

Den Hauptbestandteil der Methodik (**Abbildung 3-1**) bilden zwei Monte-Carlo-Simulationen (vgl. Abschnitt 3.2), mit denen die mittlere zurückzulegende Wegstrecke eines Zustellfahrzeugs \bar{d}_D sowie der mittlere spezifische Endenergiebedarf \bar{e}_D der Zustellfahrzeuge bestimmt werden. Durch Multiplikation der beiden Teilergebnisse kann im Anschluss der Endenergiebedarf E_D eines Zustellfahrzeugs für die Belieferung der Untersuchungsregion bestimmt werden. Mit dem Energieverbrauch können unter Einbezug des jeweils gültigen Emissionsfaktors anschließend die jeweils resultierenden CO₂-Emissionen für Belieferungen in der Untersuchungsregion bestimmt werden.

Während der nachfolgenden Ausführungen werden der mit (3.1) bestimmte Endenergiebedarf und die zugehörigen CO₂-Emissionen auch als „mittlerer Endenergiebedarf pro Fahrzeug in der Untersuchungsregion“ bzw. als zugehörige „mittlere CO₂-Emissionen“ bezeichnet, wobei dass das Produkt aus Mittelwerten mathematisch nicht mit dem eigentlichen Mittelwert übereinstimmen muss.

$$E_D = \bar{e}_D \cdot \bar{d}_D \quad (3.1)$$

Die Verknüpfung der Modellierung der Belieferung mit der Bestimmung des spezifischen Endenergiebedarfs ermöglicht eine Integration von Einflussfaktoren wie z.B. unterschiedliche Anzahl an Brems- und Anfahrvorgängen und geringere Distanz zwischen zwei Fahrzeugstopps zur Auslieferung von Sendungen, die hauptsächlich aus Sendungsmengen und

gezogen, d.h. es wird eine zufällige räumliche Verteilung von Empfängern bei einer bestimmten Sendungsmenge abgebildet. Das Konzept erlaubt überdies auch die Abbildung von unterschiedlichen Sendungsmengen in einer Untersuchungsregion. Für die so erstellten Lieferstichproben werden anschließend mit einem Routing-Algorithmus Zustell Touren geplant, d.h. die Reihenfolge der Haushalte wird verändert, sodass die Streckenlänge möglichst minimal wird.

Durch die Betrachtung einer ausreichend großen Anzahl an Lieferstichproben und Einbezug aller Zustellgebiete kann der Erwartungswert der zurückzulegenden Wegstrecke eines Zustellfahrzeugs zur Belieferung der Untersuchungsregion abgeschätzt werden. Mathematisch betrachtet wird durch die Monte Carlo Simulation der Erwartungswert bzw. Mittelwert einer Funktion $f(\vec{B})$ gesucht. Mit der Funktion $f(\vec{B})$ kann dabei die zurückzulegende Streckenlänge eines Zustellfahrzeugs in der Untersuchungsregion in Abhängigkeit der zu beliefernden Kunden bzw. der Lieferstichprobe \vec{B} bestimmt werden. Die Bestimmung der mittleren, von einem Zustellfahrzeug zurückzulegenden Strecke \bar{d}_D bzw. des Erwartungswerts $E[f(\vec{B})]$, kann daher mit dem Monte Carlo Schätzer (vgl. Abschnitt 3.2.2) für n Lieferstichproben approximiert werden:

$$\bar{d}_D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(\vec{B}_i) \approx E[f(\vec{B})]$$

Für die Modellierung der Belieferung werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Zustellfahrzeuge fahren auf optimierten Routen, d.h. dem Fahrer wurde zu Beginn der Tour eine Streckenführung vorgegeben, sodass die Kosten bzw. die zurückgelegte Strecke minimal werden. Der Fahrer hält sich dabei immer an die vorgegebene Route.
- Die Zustellfahrzeuge beliefern beide Straßenseiten zur gleichen Zeit, d.h. es wird nicht unterschieden, auf welcher Seite der Straße die Belieferung stattfindet. Eine Ausnahme hiervon sind Straßen mit getrennter Fahrbahnführung, z.B. durch einen Grünstreifen oder eine Leitplanke.
- Lieferungen werden beim ersten Versuch immer an der Zieladresse erfolgreich zugestellt, d.h. abgegeben oder deponiert. Ein Verbleiben von Sendungen im Fahrzeug auf Grund von fehlenden Zustellmöglichkeiten bzw. der Transport an eine Servicestation werden nicht betrachtet. Ebenso werden während der Liefertour keine Sendungen aufgenommen bzw. abgeholt.
- Für die Belieferung einer Untersuchungsregion werden nur Fahrzeuge mit identischer Fahrzeugkapazität und Antriebstechnologie eingesetzt, d.h. eine Mischung aus verschiedenen Antriebstechnologien und Fahrzeugkapazität wird nicht betrachtet.
- Es werden nur die Belieferungen von Privathaushalten, d.h. die Marktsegmente B2C und C2C betrachtet. B2B-Lieferungen, d.h. Belieferungen von Gebäuden mit vornehmlich großer Grundfläche, d.h. z.B. Gebäude der Industrie und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung werden nicht betrachtet.

3.1.2 Bestimmung des spezifischen Endenergiebedarfs

Zur Bestimmung des mittleren spezifischen Endenergiebedarfs eines Zustellfahrzeugs wird zunächst eine zufällige Stichprobe vorab definierter Größe aus den erzeugten Liefertouren gezogen. Um die unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofile der Zustellfahrzeuge bei variierender Sendungsmenge bzw. räumlicher Verteilung der Empfänger abbilden zu können, werden für die ausgewählten Liefertouren im Anschluss die Verläufe von Geschwindigkeit- und Beschleunigung bzw. ein Fahrprofil synthetisiert. Dadurch werden insbesondere unterschiedliche Anzahlen und Ausprägungen von Brems- und Beschleunigungsvorgängen in die Betrachtung integriert, die einen wesentlichen Einfluss auf den Endenergieverbrauch eines Fahrzeugs haben. Im Gegensatz zur Verwendung eines definierten spezifischen Endenergiebedarfs der Fahrzeuge wird damit ein höherer Detaillierungsgrad erreicht, wobei auch Einflussfaktoren aus dem Bereich der Logistik in die Modellierung eingeschlossen werden. Die simulierten Fahrprofile dienen neben technischen Parametern der Zustellfahrzeuge als Eingang für das Fahrzeugenergiebedarfsmodell, mit Hilfe dessen der spezifische Endenergiebedarf einer Liefertour bestimmt wird.

Die Bestimmung des mittleren spezifischen Endenergiebedarfs eines Zustellfahrzeugs \bar{e}_D kann wiederum mit dem Monte-Carlo-Schätzer beschrieben werden. Vereinfacht kann der spezifische Endenergieverbrauch als Funktion der zurückgelegten Strecke $e(s)$ gesehen werden. Da die zurückgelegte Strecke s eines Zustellfahrzeugs von den zu beliefernden Kunden der Lieferstichprobe abhängt, kann der spezifische Energieverbrauch eines Zustellfahrzeugs für eine Lieferstichprobe als Funktional $e(f(\vec{B}))$ ausgedrückt werden. Durch die zweite Monte-Carlo-Simulation wird daher der Erwartungs- bzw. Mittelwert des Funktionals $e(f(\vec{B}))$ für eine Stichprobe der Größe k aus der Menge aller erzeugten Lieferstichproben geschätzt.

$$\bar{e}_D = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k e(f(\vec{B}_i)) \approx E[e(f(\vec{B}))]$$

Um einen direkten Vergleich des Energieverbrauchs bzw. auch der daraus resultierenden Emissionen zu ermöglichen, wird angenommen, dass die Wahl der Route unabhängig von der verwendeten Antriebsstruktur eines Zustellfahrzeugs ist, d.h. es gibt keine Kopplung des Antriebs an die Tourenplanung. Fahrzeuge mit unterschiedlicher Antriebstechnologie verursachen überdies keine Änderungen des Verhaltens der Fahrer z.B. hinsichtlich Ausnutzung des Beschleunigungsvermögens, d.h. für alle untersuchten Fahrzeuge ist das für die Lieferstichprobe generierte Fahrprofil gültig. Der spezifische Energiebedarf wird demnach nur durch die Charakteristika der Route sowie durch die technischen Parameter der Zustellfahrzeuge bestimmt.

3.1.3 Zustellwahrscheinlichkeit

Bei der Modellierung des Energieverbrauchs und der Emissionen wird in dieser Arbeit in einem Zufallsexperiment mit einer Zustellwahrscheinlichkeit entschieden, ob eine Belieferung erfolgt, d.h. ob in der nahen Vergangenheit eine Bestellung getätigt wurde, die eine Belieferung zur Folge hat. Die Menge an Einzelsendungen, die eine Lieferung beinhaltet, wird bei dieser Definition des Zufallsexperiments und der Zustellwahrscheinlichkeit nicht beachtet, da hierzu die Logistikprozesse des Versenders, insbesondere die Kommissionie-

zung der Sendung bzw. auch das Bestellverhalten von Sendungsempfängern detailliert modelliert werden müssten.

Mathematisch betrachtet wird eine Zufallsvariable $B(X(\omega))$ definiert, die als Ergebnis eine Aussage über eine etwaige Belieferung erlaubt. Der Ergebnisraum des Zufallsexperiments beinhaltet daher nur die beiden Ereignisse „Beliieferung“ und „Keine Belieferung“. Dieses Bernoulli-Experiment [89] wird mit einer gleichverteilten Pseudozufallszahl realisiert, vgl. (3.2), wobei mit der Zustellwahrscheinlichkeit p_z entschieden wird, ob die Belieferung erfolgt.

$$B(X(\omega)) = \begin{cases} \text{Beliieferung} & \text{falls } X(\omega) \leq p_z \\ \text{Keine Belieferung} & \text{falls } X(\omega) > p_z \end{cases} \quad (3.2)$$

Eine anschauliche Darstellung von (3.2) zeigt **Abbildung 3-2**. Bei einer gewählten Zustellwahrscheinlichkeit von $p_z = 0,25$ werden alle Zufallszahlen mit einem Wert von $\omega \in [0; 0,25]$ als Erfolg gewertet. Mit steigender Zustellwahrscheinlichkeit nimmt auch der Bereich zu, der als Erfolg gewertet wird, d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass das Zufallsexperiment das Ergebnis „Beliieferung“ hat, steigt.

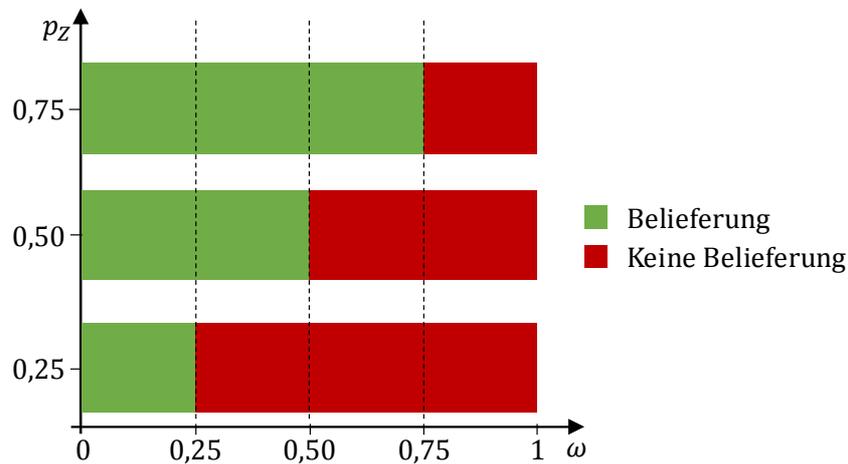


Abbildung 3-2 Entscheidung über die Belieferung eines Haushalts mit einer gleichverteilten Zufallszahl

Bezugsgrößen

Die Zustellwahrscheinlichkeit kann für die Modellierung auf verschiedene Größen bzw. Elemente bezogen werden, die Einfluss auf den Detaillierungsgrad haben (**Abbildung 3-3**).

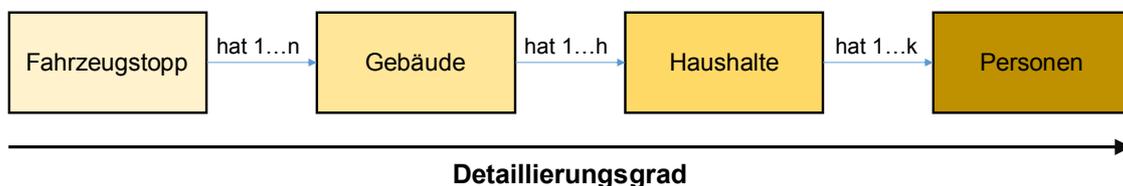


Abbildung 3-3 Detaillierungsgrad der Zustellwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Bezugsgröße

Einem Fahrzeugstopp ist immer mindestens ein Gebäude, einem Gebäude mindestens ein Haushalt und einem Haushalt mindestens eine Person zugeordnet. Für den Fall, dass $n = h = k = 1$ gelten würde, der in der Realität nur sehr selten vorkommt, hat das Bezugselement keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Modellierung. Da die Belieferung

durch die Bestellung einer Person ausgelöst wird, würde mit dem Bezug der Zustellwahrscheinlichkeit auf Personen die höchste Detaillierung erreicht werden. Für Modellierungen mit diesem Detaillierungsgrad werden umfangreiche Daten zur Personenanzahl pro Haushalt benötigt, die eine einfache Übertragbarkeit der Methodik auf verschiedene Untersuchungsregionen nahezu vollständig ausschließt. Überdies müssten Kriterien wie z.B. Alter und Einkommen der Personen in der Modellierung betrachtet werden, da diese Einfluss auf das Bestellverhalten und damit den Erhalt von Lieferungen haben [11]. Durch den Bezug der Zustellwahrscheinlichkeit auf Fahrzeugstopps bzw. Gebäude würde dem hingegen die Größe der belieferten Gebäude bzw. die Anzahl an Haushalten und Personen nicht betrachtet, was den Detaillierungsgrad der Modellierung verringern würde. Bei Verwendung einer identischen Zustellwahrscheinlichkeit für die gesamte Untersuchungsregion würde dies bedeuten, dass jedes Gebäude bzw. jeder Stoppunkt mit der gleichen Wahrscheinlichkeit bedient wird.

Einen Kompromiss zwischen Detaillierungsgrad und Flexibilität bietet die Bezugsgröße Haushalt. Einerseits kann für viele Regionen der Bestand an Privathaushalten einfach bezogen werden, andererseits beinhaltet dieser Ansatz auch die Abbildung der Größe der Gebäude und der damit steigenden Wahrscheinlichkeit einer Belieferung, wenn mehrere Haushalte bzw. auch Kunden in einem Gebäude anzutreffen sind.

Aus den genannten Gründen werden Haushalte als Bezugsgröße für die Zustellwahrscheinlichkeit in der in dieser Arbeit entwickelten Methodik verwendet. Die Zustellwahrscheinlichkeit kann demnach definiert werden als die Wahrscheinlichkeit, dass ein Haushalt während einer Zustelltour beliefert werden muss. Durch diesen Ansatz wird somit auch der Einfluss der Gebäudegröße in die Modellierung integriert. Diese Tatsache kann durch die Betrachtung von mehreren unabhängigen Zufallsexperimenten (vgl. (3.2)) für ein Gebäude mit h Haushalten gezeigt werden. Die Wahrscheinlichkeit für eine Belieferung des Gebäudes p_G , d.h. die Wahrscheinlichkeit dass es bei p_Z durch das Zustellfahrzeug bedient werden muss, kann durch die Bernoulli-Kette der Länge h bestimmt werden, d.h. es werden h unabhängige Zufallsexperimente durchgeführt. p_G entspricht dabei der Wahrscheinlichkeit, dass mindestens eines der h Zufallsexperimente das Ergebnis „Belieferung“ hat (vgl. (3.3)).

$$p_G = 1 - (1 - p_Z)^h \quad (3.3)$$

Ein Beispiel für die Anwendung von (3.3) zeigt **Abbildung 3-4**, in der die Wahrscheinlichkeit für die Belieferung eines Gebäudes p_G für unterschiedliche Zustellwahrscheinlichkeiten über der Anzahl an Haushalten pro Gebäude aufgetragen ist. Während p_G bei nur einem Haushalt identisch zur Zustellwahrscheinlichkeit p_Z ist, nimmt p_G bei steigender Anzahl der Haushalte im Gebäude zu. Bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 50 % ist es beispielsweise ab circa 7 Haushalten im Gebäude statistisch sicher ($p_G = 1$), dass es während der Zustelltour beliefert wird. Bei der Verwendung von Gebäuden als Bezugsgröße für die Zustellwahrscheinlichkeit hätte jedes Gebäude bei unverändertem Auswahlverfahren mit der Zufallsvariable aus (3.2) immer eine identische Wahrscheinlichkeit für eine Belieferung.

Der Verlauf der Wahrscheinlichkeit p_G in **Abbildung 3-4** bzw. (3.3) würde bei unveränderter Definition der Zufallsvariable (3.2) auch bei anderen Bezugsgrößen auf Grund der Bernoulli-

li-Kette gelten, z.B. würde die Wahrscheinlichkeit eines Fahrzeugstopps mit steigender Anzahl an Gebäuden pro Stoppunkt ebenso ansteigen.

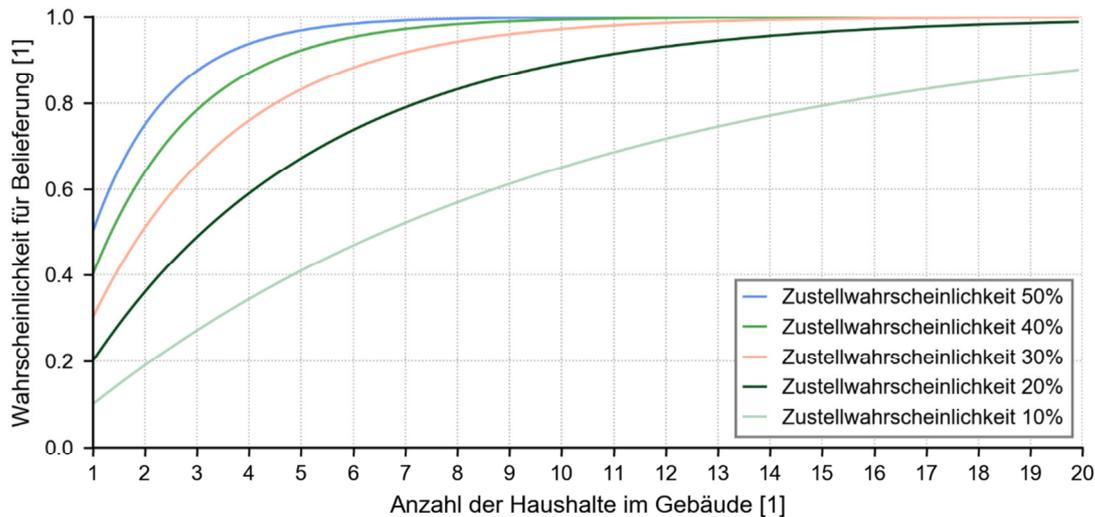


Abbildung 3-4 Wahrscheinlichkeit für Belieferung eines Gebäudes für verschiedene Anzahlen an Haushalten und Zustellwahrscheinlichkeiten

Zusätzlich können mit der Annahme, dass eine Belieferung eines Haushaltes nur eine Sendung beinhaltet, auch spezifische Werte pro Sendung abgeschätzt werden. Da keine Aussagen über die Anzahl an Sendungen bei den Bezugsgrößen Fahrzeugstopp oder Gebäude getroffen werden können, ist dies ein weiterer Grund für die Wahl von Haushalten als Bezugsgröße bei gleichzeitig hoher Flexibilität der Untersuchungsmethodik.

Definition der Fahrzeugkapazität auf Basis der Zustellwahrscheinlichkeit

Die Fahrzeugkapazität eines Zustellfahrzeugs ist in der Regel die absolute, maximale Menge an einzelnen Sendungen, die durch das Fahrzeug transportiert werden kann. Neben dem Laderaumvolumen sind dabei auch maximale Zuladung der Fahrzeuge sowie die maximale Arbeitszeit der Fahrer limitierende Größen.

Entsprechend der Definition der Zustellwahrscheinlichkeit mit Haushalten als Bezugsgröße muss die Definition der Fahrzeugkapazität für die weiteren Untersuchungen angepasst werden. Daher beschreibt die Fahrzeugkapazität im Rahmen dieser Arbeit immer die mittlere Anzahl an Haushalten, die durch ein Zustellfahrzeug beliefert werden kann. Die Definition als Mittelwert im Gegensatz zu einem Maximalwert pro Fahrzeug ist auf die schwankende Menge um den Mittelwert bei der Auswahl der zu belieferten Haushalte durch die Zufallsexperimente zurückzuführen.

3.1.4 Abbildung des Fahrzeugmix von Logistikdienstleistern

Der Fuhrpark von Logistikdienstleistern umfasst in der Regel nicht nur ein spezielles Fahrzeug, sondern besteht aus einer Mischung verschiedener Fahrzeuge von unterschiedlichen Herstellern, Typen und Größen. Zur Abbildung dieser Tatsache im Rahmen dieser Arbeit wurden Fahrzeuge mit typischen Parametern von realen Zustellfahrzeugen definiert, die für die weiteren Untersuchungen genutzt werden. Dazu wurden Datenblätter möglicher Zustellfahrzeuge verschiedener Fahrzeughersteller ausgewertet, wobei sowohl elektrisch angetriebene Zustellfahrzeuge (*Freight Electric Vehicle FEV*) als auch Fahrzeuge mit Dieselmotor (*Internal Combustion Engine Freight Vehicle ICEFV*) beachtet wurden. Von den insge-

samt 37 betrachteten Fahrzeugen sind dabei 28 Fahrzeuge mit Dieselmotor ausgestattet, während 9 Fahrzeuge einen elektrischen Antrieb haben. Die relativ geringe Anzahl an FEVs im Vergleich zu den ICEFVs resultiert aus dem begrenzten Angebot an elektrischen Lieferfahrzeugen auf dem Markt.

Auf Basis des Laderaumvolumens wurden die Fahrzeugen anschließend in drei Größenklassen eingeteilt, denen unterschiedliche Fahrzeugkapazitäten zugewiesen wurden (**Tabelle 3-1**). Die Werte für die mittlere Anzahl an belieferten Haushalten bzw. die Fahrzeugkapazität in den einzelnen Größenklassen beruhen auf Überlegungen und Abschätzungen, wobei Faktoren wie z.B. tägliche Arbeitszeit und reale Transportkapazitäten beachtet wurden. In den Fahrzeugkategorien von 150 und 250 Belieferungen werden dadurch jeweils 11 Fahrzeuge betrachtet, während es in der Kategorie mit 200 Belieferungen 15 Fahrzeuge sind.

Tabelle 3-1 Zuordnung von Laderaumvolumen zu Fahrzeugkapazität

Zugewiesene mittlere Fahrzeugkapazität	Laderaumvolumen		Anzahl Fahrzeuge
	von	bis	
150 Belieferungen	4 m ³	5 m ³	11
200 Belieferungen	5 m ³	9 m ³	15
250 Belieferungen	9 m ³	15 m ³	11

Die Auswertung der maximalen Zuladung über der Leermasse der Fahrzeuge in den entsprechenden Kategorien der Fahrzeugkapazität zeigt **Abbildung 3-5**. Mit steigender Fahrzeugkapazität nimmt bei den FEVs als auch bei den ICEFVs sowohl die Fahrzeugmasse als auch die maximal mögliche Zuladung zu, wobei sich die einzelnen Kategorien der Fahrzeugkapazität deutlich abgrenzen. Die maximal zulässige Gesamtmasse der Fahrzeuge, berechnet aus der Summe von Fahrzeugleermasse (inkl. Kraftstoff) und maximaler Zuladung, erreicht beispielsweise bei Fahrzeugen mit einer Kapazität von 250 Belieferungen ein Maximum von 3,5 t.

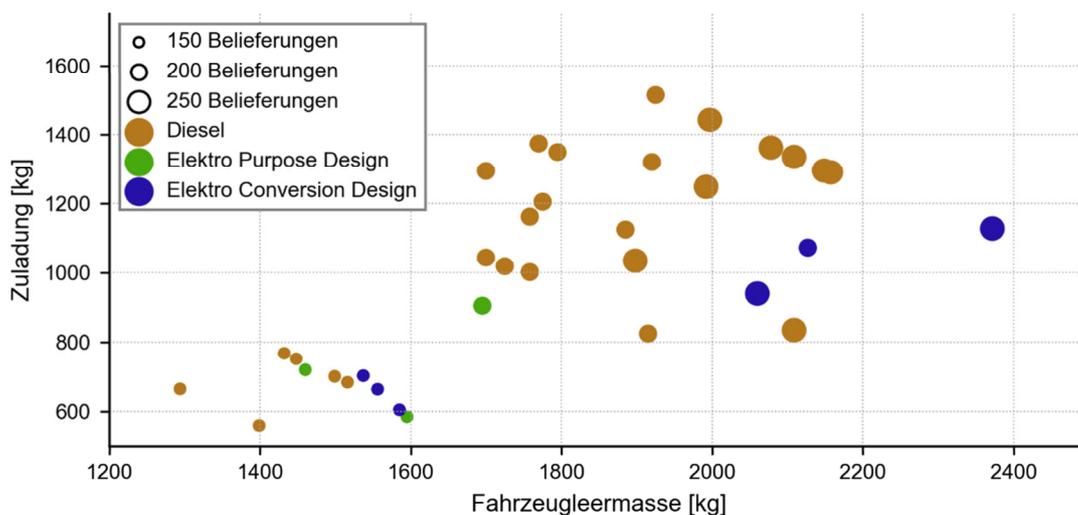


Abbildung 3-5 Fahrzeugleermasse über Zuladung der untersuchten Fahrzeuge

Besonders auffällig bei genauerer Betrachtung der Elektrofahrzeuge ist die Streuung der Fahrzeugleermassen bei annähernd gleicher maximaler Zuladung (vgl. Abbildung 3-5), die auf die beiden Konstruktionswege für Elektrofahrzeuge, d.h. Purpose- und Conversion-Design, zurückzuführen sind. Auf Grund der Tatsache, dass sich die Fahrzeugmasse auch im Energieverbrauch widerspiegelt, werden die recherchierten Elektrofahrzeuge daher noch hinsichtlich des Fahrzeugdesigns unterschieden.

Mit den Daten der Fahrzeughersteller können damit Fahrzeuge für die weiteren Untersuchungen definiert werden. Mit Ausnahme der Fahrzeugkapazität von 250 Belieferungen wird dabei immer neben dem konventionellen Fahrzeug auch jeweils ein Elektrofahrzeug im Conversion- und Purpose-Design betrachtet. Damit ergeben insgesamt acht unterschiedliche Zustellfahrzeuge. **Tabelle 3-2** fasst die Nomenklatur für der Zustellfahrzeuge zusammen.

Tabelle 3-2 Nomenklatur für die definierten Zustellfahrzeuge

Antriebsart (Abkürzung)	Fahrzeugkapazität ¹	Konstruktionsart (Abkürzung)	Beispiel
Freight Electric Vehicle (FEV)	150	Conversion Design (C)	FEV200P
	200		
	250	Purpose Design (P) ²	

Internal Combustion Engine Freight Vehicle (ICEFV)	150	entfällt	ICEFV250
	200		
	250		

¹ Angabe in Haushalten, vgl. Abschnitt 3.1.3

² nicht bei einer Fahrzeugkapazität von 250 Sendungen auf Grund von fehlenden realen Fahrzeugen

Zur Bestimmung von relevanten Fahrzeugparametern für die weitere Verwendung wurden die arithmetischen Mittelwerte der Spezifikationen genutzt. Auf Grund der Tatsache, dass keine Elektrofahrzeuge im Purpose-Design bei einer Fahrzeugkapazität von 250 Belieferungen auf dem Markt verfügbar waren, wurde diese Form des Elektrofahrzeugs auch nicht für weitere Untersuchungen betrachtet. Neben der Bestimmung von mittlerer Fahrzeugleermasse und mittleren Zuladung wurden auch die Werte für

- mittlere Stirnfläche
- mittleren spezifischen Energieverbrauch,
- mittlere Kapazität des Energiespeichers (Batterie bzw. Kraftstofftank) sowie
- mittlere maximale Motorleistung

berechnet.

Die Stirnfläche der Fahrzeuge wurde mit Hilfe der Abmessungen der Fahrzeuge angenähert. Da für den Luftwiderstandsbeiwert keine Daten für alle Fahrzeuge recherchiert werden konnten, wurden Werte auf Basis von einigen Herstellerangaben angesetzt. In **Tabelle 3-3**, **Tabelle 3-4** und **Tabelle 3-5** sind die Parameter der definierten Zustellfahrzeuge für die verschiedenen Fahrzeugkapazitäten zusammengefasst. Bei den Leermassen der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor wurde die Masse des Kraftstoffs miteinbezogen.

Tabelle 3-3 Parameter für Zustellfahrzeuge mit Kapazität von 150 Belieferungen

Fahrzeug	Einheit	FEV150C	FEV150P	ICEFV150
Antrieb	--	Elektrisch	Elektrisch	Dieselmotor
Fahrzeugdesign	--	Conversion	Purpose	--
Leermasse	[kg]	1559	1528	1445
Nutzlast	[kg]	658	653	687
Max. Motorleistung	[kW]	68	48	71
Mittlerer spez. Energieverbrauch	[kWh/100km]	16,1	17,8	45,9
Kapazität des Energiespeichers	[kWh]	38	31	566
Luftwiderstandsbeiwert	[1]	0,32	0,32	0,32
Stirnfläche	[m ²]	2,89	3,4	2,63

Tabelle 3-4 Parameter für Zustellfahrzeuge mit Kapazität von 200 Belieferungen

Fahrzeug	Einheit	FEV200C	FEV200P	ICEFV200
Antrieb	--	Elektrisch	Elektrisch	Dieselmotor
Fahrzeugdesign	--	Conversion	Purpose	--
Leermasse	[kg]	2127	1695	1854
Nutzlast	[kg]	1073	905	1193
Max. Motorleistung	[kW]	84	48	92
Mittlerer spez. Energieverbrauch	[kWh/100km]	19,9	27,6	60,6
Kapazität des Energiespeichers	[kWh]	41	41	754
Luftwiderstandsbeiwert	[1]	0,33	0,33	0,33
Stirnfläche	[m ²]	2,95	3,92	3,25

Tabelle 3-5 Parameter für Zustellfahrzeuge mit Kapazität von 250 Belieferungen

Fahrzeug	Einheit	FEV250C	ICEFV250
Antrieb	--	Elektrisch	Dieselmotor
Fahrzeugdesign	--	Conversion	--
Leermasse	[kg]	2216	2129
Nutzlast	[kg]	1034	1238
Max. Motorleistung	[kW]	58,5	78
Mittlerer spez. Energieverbrauch	[kWh/100km]	35,25	68,6
Kapazität des Energiespeichers	[kWh]	38	758
Luftwiderstandsbeiwert	[1]	0,335	0,335
Stirnfläche	[m ²]	4,13	4,13

Zur Überprüfung der Plausibilität der Parameter von den definierten Zustellfahrzeugen wurde die Fahrzeuggesamtmasse näher betrachtet (**Abbildung 3-6**). Dabei ist erkenntlich, dass

- die maximal zulässige Fahrzeuggesamtmasse mit steigender Fahrzeugkapazität zunimmt,
- die Zustellfahrzeuge im Conversion-Design eine höhere Fahrzeugleermasse als die Elektrofahrzeuge im Purpose-Design haben,
- die Fahrzeugleermasse aller betrachteten Elektrofahrzeuge höher als die von konventionell angetriebenen Fahrzeuge bei gleicher Fahrzeugkapazität ist und
- die Fahrzeuggesamtmasse der FEVs und ICEFVs sich bei einer Kapazität von 150 bzw. 250 Belieferungen fast nicht unterscheiden. Auch das ICEFV200 und das FEV200C haben fast die identische Fahrzeuggesamtmasse. Die geringere Gesamtmasse beim FEV200P kann darauf zurückgeführt werden, dass das betrachtete Fahrzeug annähernd Baugleich zum FEV150P ist, allerdings einen größeren Laderaum aufweist.

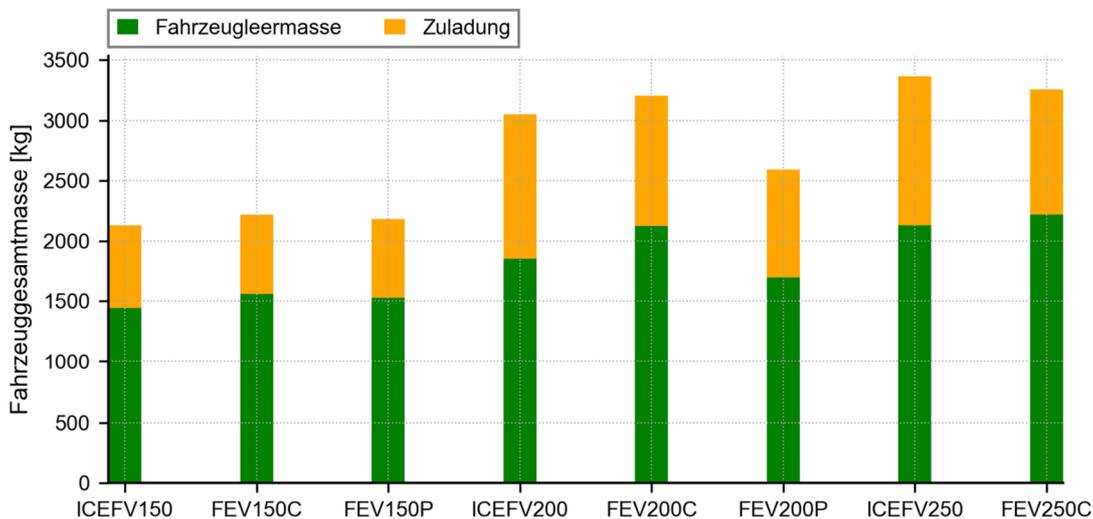


Abbildung 3-6 Gesamtmasse der definierten Fahrzeuge

Bei Betrachtung der in Tabelle 3-3, Tabelle 3-4 und Tabelle 3-5 aufgeführten mittleren spezifischen Endenergieverbräuche lässt sich festhalten, dass Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor in allen Kategorien deutlich höhere Werte als Elektrofahrzeuge aufweisen. Ebenso nimmt der spezifische Energieverbrauch mit steigender Fahrzeuggesamtmasse zu. Während der höhere spezifische Energieverbrauch des Fahrzeugs FEV150P im Vergleich zum FEV150C auf Konstruktionsparameter zurückzuführen ist, kann die Abweichung beim FEV200P im Vergleich zum FEV200C zusätzlich durch einen anderen zugrundeliegenden Testzyklus begründet werden.

Die aus den Herstellerangaben berechneten mittleren spezifische Energieverbräuche werden im Verlauf dieser Arbeit zur Kalibrierung und Validierung des Fahrzeugenergiemodells genutzt.

3.2. Monte Carlo Simulationen

Monte Carlo Simulationen (MC-Simulationen) sind die Basis der in dieser Arbeit entwickelten Methodik zur Bestimmung von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen auf der Letzten Meile des Lieferverkehrs. Daher wird im nachfolgenden Abschnitt dieses Simulationsprinzip eingeführt und anhand einiger Beispiele erläutert.

Ziele und Prinzip

Das Ziel von Monte Carlo Simulationen im Allgemeinen ist die Abschätzung des Erwartungswerts einer Funktion von Zufallsvariablen, die dann selbst auch eine Zufallsvariable ist [89]. Dazu wird der Wert der Funktion für eine große Zahl an unterschiedlichen und zufällig gewählten Eingangswerten bestimmt. Nach dem starken Gesetz der großen Zahlen kann durch die Berechnung des arithmetischen Mittels der so generierten, einzelnen Funktionswerte schlussendlich der Erwartungswert der Funktion statistisch fast sicher bestimmt werden. Voraussetzung für die Gültigkeit dieses Zusammenhangs ist eine infinitesimal große Zahl an Zufallsexperimenten, d.h. Funktionsauswertungen. Da eine infinitesimal große Menge an Zufallsexperimenten praktisch nicht durchführbar ist, spricht man im Zusammenhang von MC-Simulationen meist nur von einer Abschätzung im Gegensatz zur Berechnung des Erwartungswerts. Dennoch erlaubt die heute an Computern zur Verfügung stehenden Rechenleistung die Abschätzung des Erwartungswerts mit relativ geringen Fehlern.

3.2.1 Wahrscheinlichkeitstheoretische Begriffe und Definitionen

Als Basis für die weitere Einführung und Erklärung von MC-Simulationen werden nachfolgend wesentliche Begriffe und Definitionen aus der Wahrscheinlichkeitstheorie zusammengefasst.

Zufallsvariable

Eine Zufallsvariable ist eine Abbildungsvorschrift $X: \Omega \mapsto \mathbb{R}$, die einer den Zufall repräsentierenden Größe ω aus dem Ergebnisraum Ω eine Zahl zuordnet. Im Allgemeinen wird zwischen kontinuierlichen und diskreten Zufallsvariablen unterschieden. Ein oft verwendetes Beispiel für eine diskrete Zufallsvariable ist der Wurf einer fairen Münze, wobei die Anzahl an möglichen Werten der Zufallsvariable z.B. die Menge $\{0,1\}$ ist. Diese Zufallsvariable kann dabei z.B. definiert werden als

$$X(\omega) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \omega = \text{Zahl} \\ 0 & \text{wenn } \omega = \text{Kopf} \end{cases}, \omega \in \Omega = \{\text{Kopf}, \text{Zahl}\}$$

Charakteristisch für Zufallsvariablen sind Verteilung (z.B. Gleichverteilung, Normalverteilung etc.) bzw. auch die Eigenschaften der Verteilung, z.B. Erwartungswert, Varianz und Standardabweichung. Ebenso können mehrdimensionale Zufallsvariablen, z.B. das mehrmalige Werfen einer fairen Münze, sowie Funktionen von Zufallsvariablen definiert werden.

Ist das Ergebnis einer Zufallsvariable eine Zahl, wird die Zufallsvariable häufig auch nur als „Zufallszahl“ bezeichnet. Zufallszahlen mit nahezu beliebiger Verteilung können durch Computer simuliert werden. Dabei unterliegen die vom Computer erzeugten Zahlen nur scheinbar dem Zufall, da Algorithmen zur Generierung der Zahlen verwendet werden. Man

spricht in diesem Zusammenhang auch von sogenannten Pseudozufallszahlen bzw. Pseudozufallszahlengeneratoren.

Zufallsexperiment

Die Realisierung einer Zufallsvariable bzw. die Ausführung des einer Zufallsvariable zugrundeliegenden Versuchs wird als Zufallsexperiment bezeichnet. Ein Beispiel für ein Zufallsexperiment ist z.B. der Wurf einer fairen Münze und anschließender Bewertung des Ergebnisses mit Hilfe einer Abbildungsvorschrift durch eine Zufallsvariable.

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und kumulative Verteilungsfunktion [89]

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_X(x)$ einer Zufallsvariable (WDF), umgangssprachlich auch nur Wahrscheinlichkeitsverteilung genannt, gibt Aufschluss über die Wahrscheinlichkeit, dass die Zufallsvariable X den Wert x annimmt, d.h. $P(\{X = x\})$. Die WDF der Standardnormalverteilung wird mit $\varphi(x)$ bezeichnet.

Die kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung (KDF) einer Zufallsvariable ist definiert als

$$F_X(x) = P(\{X \leq x\}) = \int_{-\infty}^x f_X(\lambda) d\lambda$$

Insbesondere wird mit $\Phi(x)$ die KDF der Standardnormalverteilung bezeichnet, d.h.

$$\Phi(z) = P(\{Z \leq z\}) = \int_{-\infty}^z \varphi(\lambda) d\lambda$$

Ist eine Zufallsvariable Z standardnormalverteilt, dann schreibt man hierfür auch $Z \sim \mathcal{N}(0,1)$

Arithmetischer Mittelwert [89]

Der arithmetische Mittelwert $\overline{X_n}$ einer Folge (X_1, X_2, \dots, X_n) von unabhängigen und identisch verteilten Zufallsvariablen ist definiert als

$$\overline{X_n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \tag{3.4}$$

Insbesondere gilt

$$\overline{X_n} = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s \frac{1}{v} \sum_{l=1}^v X_{k,l} = \frac{1}{\underbrace{s \cdot v}_n} \sum_{k=1}^s \sum_{l=1}^v X_{k,l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \tag{3.5}$$

Der in Formel (3.5) gezeigte Zusammenhang bei der Berechnung des arithmetischen Mittelwerts ist vor allem dann nützlich, wenn die Anzahl an möglichen Zufallsexperimenten auf Grund bestimmter Gegebenheiten bei der Untersuchung limitiert ist, d.h. es können mehrere Sequenzen s mit jeweils v Zufallsvariablen zur Bestimmung des arithmetischen Mittelwerts $\overline{X_n}$ genutzt werden.

Erwartungswert [89]

Der Erwartungswert $E[X]$ oder μ einer Zufallsvariable ist definiert als

$$E[X] = \mu = \int_{\mathbb{R}} x \cdot f_X(x) dx \tag{3.6}$$

Im Falle einer diskreten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zerfällt das Integral in eine Summe, mit der der Erwartungswert bestimmt werden kann:

$$E[X] = \mu = \sum P(X = x) \cdot x \quad (3.7)$$

Varianz und Standardabweichung [89]

Die Varianz σ^2 oder $\text{Var}[x]$ einer Zufallsvariable ist definiert als

$$\sigma^2 = \text{Var}[X] = E[(X - E[X])^2] \quad (3.8)$$

Die Quadratwurzel der Varianz wird als Standardabweichung bezeichnet.

Starkes Gesetz der Großen Zahlen [89]

Das Starke Gesetz der Großen Zahlen stellt eine Beziehung zwischen dem Mittelwert \overline{X}_n einer Folge (X_1, X_2, \dots, X_n) von unabhängigen, identisch verteilten Zufallsvariablen und dem Erwartungswert μ der Zufallsvariablen für eine große Zahl an Zufallsexperimenten, d.h. $n \rightarrow \infty$, her. [90]

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \overline{X}_n = E(X_1) = \mu$$

Die Konvergenz des Grenzwerts ist dabei statistisch fast sicher, d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass die Abweichung des Mittelwerts der Folge von Zufallsvariablen vom Erwartungswert für $n \rightarrow \infty$ gegen den Wert Null konvergiert, ist identisch zum sicheren Ereignis. [91]

$$P\left(\lim_{n \rightarrow \infty} \overline{X}_n = \mu\right) = P\left(\lim_{n \rightarrow \infty} |\overline{X}_n - \mu| = 0\right) = 1$$

Zentraler Grenzwertsatz

Der Zentrale Grenzwertsatz besagt, dass die Verteilungsfunktion des arithmetischen Mittelwerts \overline{X}_n einer Folge (X_1, X_2, \dots, X_n) von unabhängigen, identisch verteilten Zufallsvariablen mit Erwartungswert $E[X_1] = \mu$ und endlicher Varianz $\sigma^2 = \text{Var}[X_1] > 0$ für eine große Anzahl an Zufallsexperimenten, d.h. $n \rightarrow \infty$, asymptotisch gegen die Normalverteilung $\mathcal{N}\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n}\right)$ konvergiert. [89] [91]

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\left(\frac{\sqrt{n}}{\sigma} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - \mu\right) \leq z\right) = \Phi(z)$$

3.2.2 Mathematische Theorie

Für die Erklärung des mathematischen Prinzips von Monte Carlo Simulationen sei eine Funktion $g(X_i)$ für eine Folge von unabhängigen und identisch verteilten Zufallsvariablen (X_1, X_2, \dots, X_n) mit bekannter Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_X(x)$ definiert. Zur Bestimmung des Erwartungswerts $E[g(X_1)]$ bzw. μ muss daher das Integral

$$E[g(X_1)] = \mu = \int_{\mathbb{R}} g(x) \cdot f_X(x) dx$$

berechnet werden [90].

Die Verknüpfung des starken Gesetzes der Großen Zahlen mit der Berechnungsvorschrift für den Erwartungswert resultiert in

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(X_i) \right) = \int_{\mathbb{R}} g(x) \cdot f_X(x) dx = E[g(X_1)] = \mu$$

d.h. durch die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts für unendlich viele Zufallsexperimente bzw. Iterationen ($n \rightarrow \infty$) kann der Erwartungswert der Funktion $g(X_1)$ statistisch fast sicher bestimmt werden. Die genaue Abbildungsvorschrift der Funktion muss dabei nicht zwingend bekannt sein, vielmehr muss sie nur für alle $X_i \in \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ berechenbar bzw. auswertbar sein.

Für eine hinreichend große Anzahl an Iterationen n kann daher der Erwartungswert der Funktion $g(X)$, d.h. die Zielgröße der Monte Carlo Simulation $\hat{\mu}$, abgeschätzt werden. Der sogenannte Monte Carlo Schätzer [92] für die Zielgröße $\hat{\mu}$ bzw. den abgeschätzten Erwartungswert der Funktion $g(X)$ ist damit definiert als

$$\hat{\mu} = E[g(X_1)] \approx \overline{g(X_N)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(X_i) \quad (3.9)$$

3.2.3 Approximationsfehler

Um die Qualität des abgeschätzten Erwartungswerts bestimmen zu können, muss der Fehler des Monte Carlo Schätzers bestimmt werden. Der Zentrale Grenzwertsatz sagt hierzu aus, dass die standardisierte Abweichung des abgeschätzten Erwartungswerts $\hat{\mu}_n$ nach n Iterationen vom realen Erwartungswert μ gegen die Standardnormalverteilung für $n \rightarrow \infty$ konvergiert. [91]

Mit der Stichprobenvarianz s^2 , die für große n gegen die Varianz σ^2 konvergiert,

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (g(X_i) - \hat{\mu}_n)^2 \quad (3.10)$$

gilt daher auch

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left(\left(\frac{\sqrt{n} \cdot \hat{\mu}_n - \mu}{s} \right) \leq z \right) = \Phi(z)$$

Für die Wahrscheinlichkeit, dass die betragsmäßige Abweichung des geschätzten Erwartungswerts vom realen Erwartungswert größer als $\varepsilon > 0$ ist, gilt [91] [90]

$$P \left(|\hat{\mu}_n - \mu| \geq \frac{\varepsilon \cdot s}{\sqrt{n}} \right) = P \left(\sqrt{n} \cdot \frac{\hat{\mu}_n - \mu}{s} \leq -\varepsilon \right) + P \left(\sqrt{n} \cdot \frac{\hat{\mu}_n - \mu}{s} \geq +\varepsilon \right)$$

bzw. mit dem Zentralen Grenzwertsatz

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left(|\hat{\mu}_n - \mu| \geq \frac{\varepsilon \cdot s}{\sqrt{n}} \right) = \Phi(-\varepsilon) + (1 - \Phi(\varepsilon)) \stackrel{\substack{\text{Symmetrie} \\ \text{von } \Phi(z)}}{=} 2\Phi(-\varepsilon) = 2(1 - \Phi(\varepsilon))$$

Mit dem letzten gezeigten Zusammenhang kann damit um den abgeschätzten Erwartungswert ein Bereich angegeben werden, in dem sich der reale Erwartungswert mit einer definierten Wahrscheinlichkeit befindet, d.h. in anderen Worten kann das Konfidenzintervall bzw. der Vertrauensbereich bei Irrtumswahrscheinlichkeit α des Monte Carlo Schätzers angegeben werden. Es gilt daher

$$\mu = \hat{\mu}_n \pm \phi^{-1}\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.11)$$

Einige Werte für $\phi^{-1}(1 - \alpha/2)$, d.h. die sogenannten z-Werte der Standardnormalverteilung, sind für unterschiedliche Konfidenzniveaus in **Tabelle 3-6** zusammengefasst. Generell gilt, dass der Bereich in dem der reale Wert von $\hat{\mu}_n$ liegt, mit steigender Konfidenzwahrscheinlichkeit größer wird. Beispielsweise gilt für diesen Bereich beim 99%-Konfidenzniveau

$$\mu = \hat{\mu}_n \pm 2,576 \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Zur weiteren Eingrenzung des Bereichs bzw. zur Verkleinerung des Bereichs um $\hat{\mu}_n$ gibt es daher prinzipiell die Möglichkeiten

- Erhöhung der Anzahl an durchgeführten Simulationen sowie
- Verringerung der Varianz der Ergebnisse.

Für den zuletzt genannten Punkt gibt es viele verschiedene Ansätze, z.B. Importance Sampling, Antithetic Variates, Control Variance oder Stratified Sampling, die unter dem Oberbegriff Varianzreduktion zusammengefasst werden. [93]

Tabelle 3-6 z-Werte der Standardnormalverteilung für unterschiedliche Konfidenzniveaus

Konfidenzniveau	Irrtumswahrscheinlichkeit	Konfidenzwahrscheinlichkeit	z-Wert
	α	$1 - \alpha/2$	$\phi^{-1}(1 - \alpha/2)$
0,7	0,3	0,85	1,036
0,8	0,2	0,90	1,282
0,9	0,1	0,95	1,645
0,95	0,05	0,975	1,960
0,99	0,01	0,995	2,576

Zusätzlich kann auf Basis der Konfidenzniveaus des Monte Carlo Schätzers auch die minimal benötigte Anzahl an Iterationen bestimmt werden, sodass das Ergebnis der Simulation maximal um einen Wert $\varepsilon > 0$ vom realen Erwartungswert abweicht.

$$n \geq \Phi^{-1}\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)^2 \cdot \frac{s^2}{\varepsilon^2} \quad (3.12)$$

3.2.4 Anwendungsbeispiele

Zur Erläuterung des Vorgehens werden im Nachfolgenden einige Beispiele für Monte Carlo Simulationen gezeigt. Viele berühmte Beispiele beschäftigen sich mit der Berechnung der transzendenten Kreiszahl π . Ein einfaches und intuitives Beispiel hierzu basiert auf der Bestimmung des Flächeninhalts des Einheitskreises, für den gilt

$$A = r^2 \cdot \pi = 1^2 \cdot \pi = \pi$$

Betrachtet man nur den Flächeninhalt unter dem viertelten Einheitskreis im I. Quadranten, dann ergibt sich entsprechend ein Flächeninhalt von $\pi/4$. Die Fläche des Viertelkreises A_I

kann damit durch Integration der Funktion $g(x)$ für $\{x \in \mathbb{R} | 0 \leq x \leq 1\}$, die den Einheitskreis im ersten Quadranten beschreibt, bestimmt werden. Dazu wird die Funktion des Einheitskreises nach y aufgelöst:

$$x^2 + y^2 = 1 \Rightarrow y = g(x) = \sqrt{1 - x^2}, 0 \leq x \leq 1$$

Für die Bestimmung des Flächeninhalts des Viertelkreises im ersten Quadranten muss also der Wert des Integrals

$$A_I = \int_0^1 g(x) dx = \int_0^1 \sqrt{1 - x^2} dx \quad (3.13)$$

bestimmt werden. Da dieses Integral analytisch lösbar ist, kann auch eine Stammfunktion angegeben werden und der Wert des bestimmten Integrals berechnet werden.

$$A_I = \int_0^1 \sqrt{1 - x^2} dx = \left[\frac{1}{2} \cdot \sqrt{1 - x^2} \cdot x + \arcsin(x) \right]_0^1 = \frac{\pi}{4}$$

Randomisierte Quadratur

Die Berechnung des bestimmten Integrals aus (3.13) kann auch durch eine MC-Simulation erfolgen. Dabei wird die Tatsache genutzt, dass der Monte Carlo Schätzer immer den Wert eines Integrals annähert.

Zur Abschätzung des Flächeninhalts und damit des Werts von $\pi/4$ mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen stehen prinzipiell mehrere Ansätze zur Verfügung. Bei der sogenannten randomisierten Quadratur (engl. *crude Monte-Carlo*) werden zur Bestimmung des Integrals unabhängige, gleichverteilte Pseudozufallszahlen aus dem Intervall $[0,1]$ generiert und der Funktionswert für diese Zufallszahlen bestimmt [94]. Die besondere Eigenschaft der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der gleichverteilten Pseudozufallszahlen hat dabei eine wesentliche Rolle, für die gilt

$$f_X(x) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } x \in [0,1] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Durch diese Eigenschaft der Gleichverteilung vereinfacht sich die Bestimmung des Erwartungswert der Zielgröße auf

$$E[g(X_1)] = \int_0^1 g(x) \cdot f_X(x) dx = \int_0^1 g(x) dx$$

In Kombination mit dem Monte Carlo Schätzer (3.9) kann das Integral über die Funktion $g(x)$ und damit der Flächeninhalt A_I durch unabhängige, gleichverteilte Zufallszahlen also angenähert werden mit

$$A_I = E[g(X_1)] = \int_0^1 g(x) dx \approx g(\bar{X}_N) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(X_i)$$

Durch Berechnung des vierfachen Werts von A_I ergibt sich dementsprechend ein geschätzter Wert von π .

Abbildung 3-7 zeigt die Ergebnisse von drei unabhängigen Simulationsläufen mit jeweils 1.000 Zufallsexperimenten, d.h. Stützstellen für die Bestimmung des Integrals. In allen betrachteten Fällen konvergiert das Ergebnis der Simulation gegen den realen Wert von π .

Zusätzlich ist das für die entsprechende Anzahl an Iterationen gültige 95%-Konfidenzintervall des Monte Carlo Schätzers in den drei Simulationsläufen eingezeichnet (rote Linien). Wie zu erkennen ist, nimmt die Breite des Konfidenzintervalls mit zunehmender Zahl an Iterationen ab, d.h. der Bereich in dem der reale Wert von π geschätzt wird, kann deutlich eingegrenzt werden.

In allen dargestellten Simulationen beinhaltet das Konfidenzintervall den realen Wert nach 1.000 Simulationen. Dies muss jedoch noch nicht zwingend sein, da insbesondere der Zentrale Grenzwertsatz für eine geringe Anzahl an Iterationen noch nicht zwingend gültig sein muss, d.h. die Abweichungen vom realen Wert noch nicht standardnormalverteilt sind. Bei einer geringen Anzahl an Iterationen sollte daher die Student-t-Verteilung anstelle der Standardnormalverteilung zur Bestimmung des z-Wertes genutzt werden. Insgesamt liefert der Monte Carlo Schätzer brauchbare Ergebnisse. In allen Simulationen konnten mindestens zwei gültige Ziffern von π abgeschätzt werden.

Die gezeigte Methode zur Bestimmung von Integralen mit Monte Carlo Simulationen ähnelt stark den Methoden der numerischen Integration. Verglichen mit Verfahren aus diesem Bereich benötigt die randomisierte Quadratur jedoch deutlich mehr Stützstellen um belastbare Ergebnisse zu bekommen. Trotzdem werden diese Formen von Monte Carlo Simulationen zur Berechnung hochdimensionaler Integrale auch heute verwendet. [94]

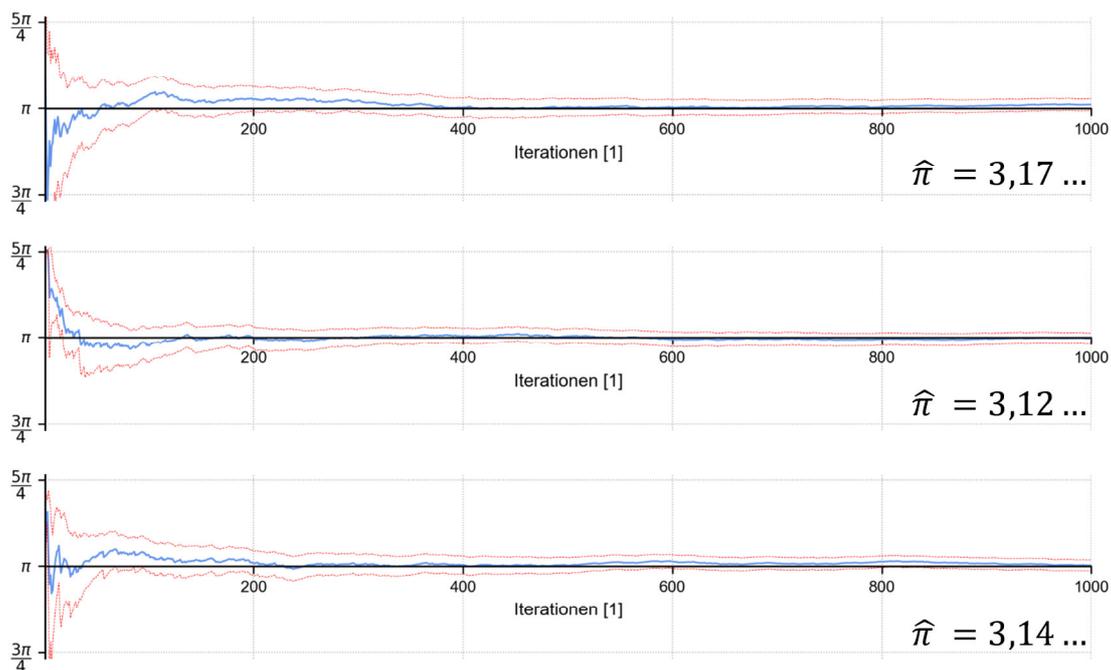


Abbildung 3-7 Bestimmung von π durch randomisierte Quadratur

Hit or Miss Methode

Eine andere, intuitive Methode zur Abschätzung von π durch Monte Carlo Simulationen ist die sogenannte *Hit or Miss Methode* [94]. Dabei werden Zahlentupel (X_i, Y_i) erzeugt, wobei X_i und Y_i gleichverteilte und unabhängige Zufallszahlen im Bereich $[0,1]$ sind. Diese Zahlentupel stellen die Koordinaten von Punkten im I.Quadranten im Bereich $[0,1] \times [0,1]$ dar. Die Lage der Zahlentupel wird anschließend mit einer Zufallsvariable $Z(X_i, Y_i)$

$$Z(X_i, Y_i) = \begin{cases} 1 \text{ bzw. Treffer} & \text{wenn } X_i^2 + Y_i^2 \leq 1 \\ 0 \text{ bzw. Niete} & \text{sonst} \end{cases}$$

bewertet, d.h. alle Punkte die sich im Inneren des Viertelkreises befinden werden als Treffer gewertet, während alle Punkte außerhalb als Niete gezählt werden (**Abbildung 3-8**).

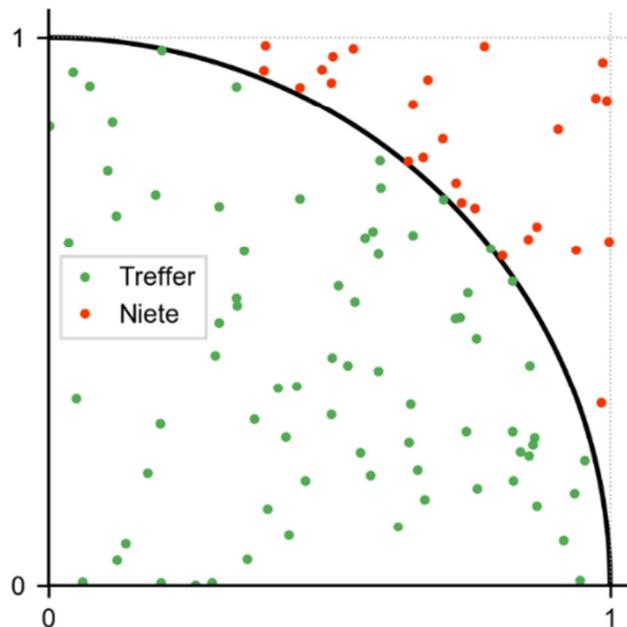


Abbildung 3-8 Hit or Miss Methode zur Bestimmung von π

Das arithmetische Mittel \bar{Z} der Folge der Zufallszahlen (Z_1, Z_2, \dots, Z_n) konvergiert gemäß dem Gesetz der großen Zahlen zum Erwartungswert $E[Z]$, der in diesem Beispiel identisch zur Trefferwahrscheinlichkeit $P(Z = 1)$ ist:

$$E[Z] = P(Z = 1) \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z(X_i, Y_i)$$

Gleichzeitig ist die Trefferwahrscheinlichkeit ein Maß für den Flächeninhalt A_I des viertelten Einheitskreises, womit der Wert von π bestimmt werden kann.

In anderen Worten ausgedrückt, konvergiert das Verhältnis von Anzahl der Treffer zu Anzahl der gesamten Zufallsexperimente, d.h. die relative Häufigkeit für das Ergebnis „Treffer“, gemäß dem Gesetz der großen Zahlen für eine große Anzahl an Zufallsexperimenten zur Trefferwahrscheinlichkeit $P(Z = 1)$, die dem Flächeninhalt des viertelten Einheitskreises im I. Quadranten entspricht. Der Anteil der „Treffer“, multipliziert mit dem gesamten Flächeninhalt des Quadrats $[0,1]^2$ ergibt somit den Flächeninhalt A_I . [94]

Als Beispiel für die Konvergenz der Monte Carlo Simulation mit der *Hit Or Miss Methode* zur Approximation von π zeigt **Abbildung 3-9** die Ergebnisse für 1.000 Simulationsläufe mit je 1.000 Zufallsexperimenten, also insgesamt einer Million Zufallsexperimenten. Die Konvergenz des Mittelwerts bzw. Erwartungswerts gegen den realen Wert von π ist im oberen Diagramm erkennbar. Die Standardabweichung der Stichprobe erreicht einen Wert von rund 0,05 nach 1.000 Iterationen. Im Vergleich mit den Ergebnissen der randomisierten Quadratur wird eine höhere Genauigkeit des Ergebnisses erreicht, da insbesondere mehr

Zufallsexperimente für die Abschätzung genutzt wurden. Auch bei diesem Vorgehen nimmt die Breite des Konfidenzintervalls mit steigender Anzahl an Iterationen ab, d.h. der Bereich, in dem der reale Wert vermutet wird, wird kleiner. Nach 1.000 Iterationen stimmt der abgeschätzte Wert bereits für vier gültige Ziffern mit dem realen Wert von π überein.

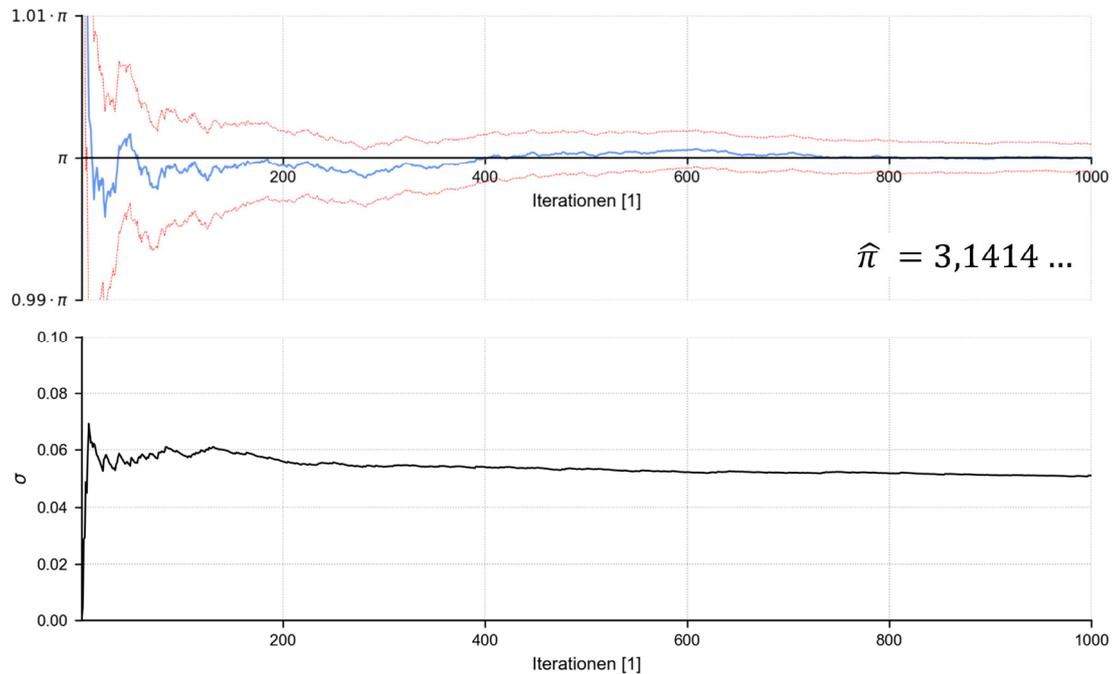


Abbildung 3-9 Bestimmung von Pi durch Hit Or Miss (1.000 Simulationen mit je 1.000 Zufallsexperimenten)

Anhand des Beispiels der *Hit or Miss Methode* kann der Einfluss der Anzahl an Zufallsexperimenten pro Simulation, d.h. die Stichprobengröße, sowie der Einfluss der Anzahl an durchgeführten Simulationen auf die Genauigkeit des Ergebnisses gezeigt werden. Bei der Betrachtung der in **Abbildung 3-10** dargestellten Beispiele wird der Einfluss der Anzahl an durchgeführten Zufallsexperimenten ersichtlich. Beispielsweise hätte der abgeschätzte Wert von π im linken Diagramm bei der Betrachtung von nur diesem einen Experiment einen Wert von Vier, da alle zehn Zufallsexperimente das Ergebnis „Treffer“ haben. Die Steigerung der Anzahl an Zufallsexperimente in der mittleren und rechten Abbildung führt daher auf jeden Fall zu Verbesserungen der Genauigkeit der Abschätzung.

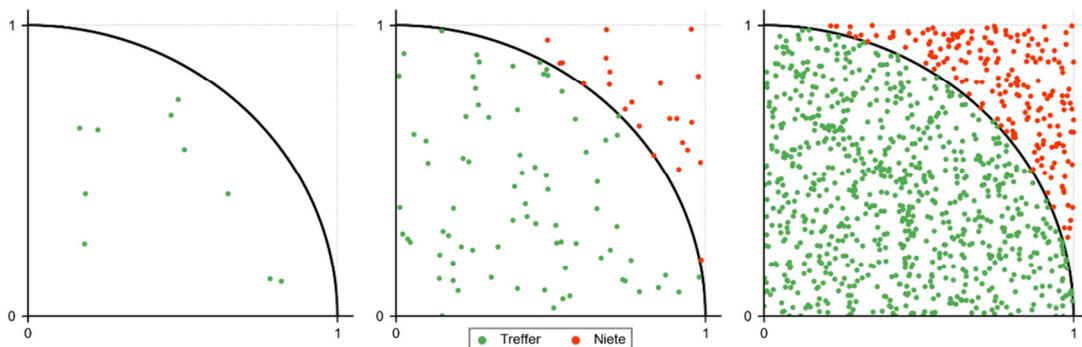


Abbildung 3-10 Berechnung von pi mit Hit Or Miss mit 10, 100 und 1.000 Zufallsexperimenten pro Simulation

Um den Einfluss der Anzahl der Simulationsläufe, d.h. Iterationen und Anzahl der Zufallsexperimente pro Simulationslauf zu zeigen, fasst **Tabelle 3-7** Ergebnisse für den geschätzten Wert von π mit 10, 100 und 1.000 Zufallsexperimenten sowie verschiedene Anzahlen an Simulationsläufen zusammen. Zusätzlich ist die Anzahl der insgesamt durchgeführten Zufallsexperimente $|Z|$ eingetragen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sowohl mit steigender Anzahl an Simulationen als auch mit erhöhter Anzahl an Zufallsexperimenten die Approximation von π deutlich genauer wird, insbesondere mehr Nachkommastellen in Betracht gezogen werden. Dabei ist ersichtlich, dass nur die Anzahl an insgesamt durchgeführten Zufallsexperimenten die Genauigkeit des Ergebnisses beeinflusst. Beispielsweise liefern 100 Iterationen mit jeweils 1.000 Zufallsexperimenten und 1.000 Iterationen mit 100 Zufallsexperimenten Fehler in der gleichen Größenordnung. Ebenso wird deutlich, dass bei einer geringen Anzahl durchgeführter Zufallsexperimente der abgeschätzte Wert nach Beendigung von unabhängigen Simulationen starke Abweichungen zeigt (z.B. $\bar{\pi} = 3,156$ bzw. $\bar{\pi} = 3,052$ bei 10^3 Zufallsexperimenten), was sich auch im relativen Fehler widerspiegelt. Bei einer Approximation mit insgesamt 10^6 Zufallsexperimenten ergibt sich eine Abweichung des geschätzten Werts $\hat{\pi}$ vom realen Wert π von circa 0,01 %. Der Anstieg des Fehlers bei 10^7 Zufallsexperimenten auf rund 0,06 % verdeutlicht, dass es sich bei Monte Carlo Simulationen um Algorithmen handelt, die auf dem Zufall basieren.

Eine anderes Beispiel zur Approximation von π ist die Lösung des *Nadelproblems von Buffon* mit Monte Carlo Simulationen. [91]

Tabelle 3-7 Beispielergebnisse für die Berechnung von π mit Hit and Miss

Simulationen	Anzahl der Zufallsexperimente pro Simulation								
	10			100			1.000		
	$\hat{\pi}$	$ \Delta $	$ Z $	$\hat{\pi}$	$ \Delta $	$ Z $	$\hat{\pi}$	$ \Delta $	$ Z $
10	3,04	10,16 %	10^2	3,052	8,96 %	10^3	3,1304	1,12 %	10^4
100	3,156	1,44 %	10^3	3,1556	1,40 %	10^4	3,14716	0,56 %	10^5
1.000	3,1324	0,92 %	10^4	3,14324	0,16 %	10^5	3,141496	0,01 %	10^6
10.000	3,14136	0,02 %	10^5	3,141708	0,01 %	10^6	3,1410132	0,06 %	10^7

Schlussfolgerungen aus den Beispielen

Die aufgeführten Beispiele verdeutlichen, dass Monte Carlo Simulationen ein brauchbares Werkzeug zur Abschätzung von Mittelwerten bzw. Erwartungswerten durch die Auswertung von zufälligen Stichproben darstellen, das auch für die Lösung von Fragestellungen im energietechnischen bzw. energiewirtschaftlichen Umfeld genutzt werden kann. Durch die Leistungsfähigkeit der heutzutage verfügbaren Computer können problemlos große Zahlen an Zufallsexperimenten realisiert werden, sodass der Fehler durch die Monte Carlo Simulationen reduziert werden kann. Dennoch muss erwähnt werden, dass bei Abschätzungen durch diese Algorithmen ein Restfehler bestehen bleibt, der jedoch meist auf Grund von Ungenauigkeiten im Modell und eventuell getroffener Annahmen nahezu vernachlässigt werden kann. [91] Daher sollte die Anzahl an Iterationen bei der Simulation so gewählt werden, dass der Fehler möglichst reduziert werden kann aber gleichzeitig die benötigte Rechenzeit nicht ins Unermessliche steigt.

Neben der Anwendung zur Bestimmung von Integralen in der Mathematik, wie in den beiden vorherigen Beispielen gezeigt, werden Monte Carlo Simulationen in vielen weiteren Fachgebieten eingesetzt, u.a. in der

- Physik zur Simulation von Teilchenkollisionen,
- Biologie zur Abschätzung von Populationsentwicklungen,
- Finanzwirtschaft zur Abschätzung von Börsenkursen und Risiken sowie in der
- Industrie zur Simulation von Produktionsprozessen. [93] [95]

Im Bereich der Energiewirtschaft werden sie unter anderem zur Planung von Verteilnetzen [96], Abschätzung von Stromgestehungskosten [97] sowie Entscheidungsfindungen für kommunale Energiekonzepte [98] genutzt. Durch Monte Carlo Simulationen wird in [99] zudem die Verfügbarkeit von Elektrofahrzeugen für die Bereitstellung von Primärregelleistung analysiert.

4. Energie- und Emissionsmodell: *FeVER*

Die eingeführte Methodik zur Bestimmung von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen bei Belieferungen auf der letzten Meile wurde im Modell *FeVER* umgesetzt. Die Modellbezeichnung leitet sich dabei aus der Abkürzung von *Freight electric Vehicle Energy Reproduction* ab. Im Nachfolgenden wird der Aufbau und die Struktur des Modells detailliert beschrieben.

4.1. Modellkonzeption

Bei der Planung und Konzeption des Modells wurde besonderer Wert auf Modularität gelegt. Dieses Vorgehen ermöglicht

- die Evaluierung von Teilergebnissen,
- das Testen des Programmablaufs sowie eine
- übersichtliche Programmgestaltung.

Das Modell wurde in Python 2.7 implementiert, wobei die einzelnen Bausteine des Modells als Python-Module unter Anwendung des Prinzips der Objektorientierung programmiert wurden. Nach der abgeschlossenen Verarbeitung jedes Moduls werden die Daten zwischengespeichert, so dass eine Auswertung bzw. Analyse von Zwischenergebnissen ermöglicht wird. Besonderer Wert wurde auch auf die Verwendung von quelloffenen Softwarepaketen und Daten gelegt.

4.1.1 Modulare Struktur

Das Modell wurde, wie **Abbildung 4-1** zeigt, in verschiedenen Modulen gegliedert, die prinzipiell unabhängig voneinander verwendet werden können, insofern die notwendigen Eingangsdaten zur Verfügung stehen. Die Unabhängigkeit der einzelnen Module erlaubt damit auch z.B. eine Integration von realen Daten eines Logistikdienstleisters, sodass das Modell auch für zukünftige energetische Untersuchungen genutzt werden kann.

In den beiden zentralen Modulen *FeVER Delivery* und *FeVER Energy* wurde dabei die entwickelte Methodik zur Bestimmung des Energieverbrauchs auf der letzten Meile integriert. Hierbei beinhaltet

- *FeVER Delivery* die Monte Carlo Simulation zur Bestimmung der mittleren Streckenlänge pro Zustellfahrzeug und
- *FeVER VehEnC* die Monte-Carlo-Simulation zur Bestimmung des spezifischen Energieverbrauchs der Zustellfahrzeuge.

Die für das Modell notwendigen Geodaten, d.h. Informationen zu Gebäuden, Haushalten, Straßen und Streckenlängen, werden aus OpenStreetMap bezogen und durch das Modul *FeVER OSMTools* aufbereitet und verarbeitet. Für die systematische Abspeicherung, Auswertung und Visualisierung der Simulationsergebnisse, werden diese in einer relationalen Datenbank abgelegt, die vom Modul *FeVER DataExplorer* verwaltet wird. Gleichzeitig werden hier die Mittelwerte bzw. Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen bestimmt.

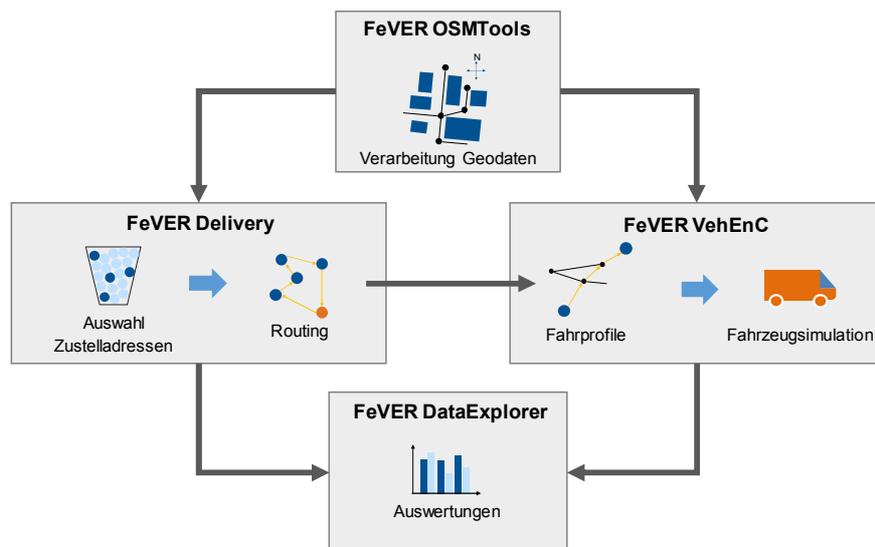


Abbildung 4-1 Modellstruktur

4.1.2 Parallelisierung von Berechnungen

Einige Teile des Modells eröffnen die Möglichkeit zur Einsparung von Rechenzeit durch Parallelisierung. Zu diesem Zweck wurden Teile der Berechnung mit dem Python-Modul *multiprocessing* parallelisiert, d.h. es werden mehrere Berechnungen gleichzeitig durch mehrere Python-Prozesse durchgeführt. Die Anzahl der für die Berechnung sinnvoll nutzbaren Prozesse ist dabei durch die Anzahl der Kerne der CPU limitiert, wobei eine Reserve für die Verwaltung der übrigen Prozesse des Computers durch einen Kern eingeplant werden muss.

Für die Kommunikation der einzelnen Prozesse wurde ein Erzeuger-Verbraucher-System (**Abbildung 4-2**) implementiert. Der Hauptprozess (Erzeuger) des Modells erstellt dabei eine Warteschlange (*Queue*), in der die Rechenaufgaben für die einzelnen Prozesse geschrieben werden. Die Queue arbeitet dabei nach dem *First In First Out Prinzip (FIFO-Prinzip)*, d.h. Aufgaben die zuerst in die Queue geschrieben wurden, werden auch zuerst bearbeitet.

Nach dem Start mehrerer Prozesse für die Berechnung (Verbraucher), holen sich diese die Rechenaufgaben aus der Warteschlange und bearbeiten sie. Die Verteilung der Prozesse auf die einzelnen Kerne der CPU des Computers wird dabei vom Scheduler des Betriebssystems übernommen. Alle Verbraucherprozesse sind dabei so lange aktiv, wie Rechenaufgaben in der Queue vorhanden sind. Zur Erkennung der Abarbeitung aller Aufgaben (leere Queue) werden vom Erzeuger sogenannte *poison pills* in die Queue geschrieben, die einzelne Verbraucherprozesse zum Abschalten veranlassen. Über eine zusätzliche Queue, die von den Verbrauchern befüllt wird, wird eine kontinuierliche Abspeicherung der Ergebnisse erreicht. Zusätzlich kann ein Volllaufen des Arbeitsspeichers des Computers durch das permanente Abholen und Speichern der Ergebnisse auf der Festplatte vermieden werden. Der Prozess zur Abspeicherung der Ergebnisse wird ebenfalls durch *poison pills* abgeschaltet, wobei diese durch die Verbraucherprozesse in die Ergebnis-Warteschlange geschrieben werden, sobald alle Berechnungen abgeschlossen sind. [100]

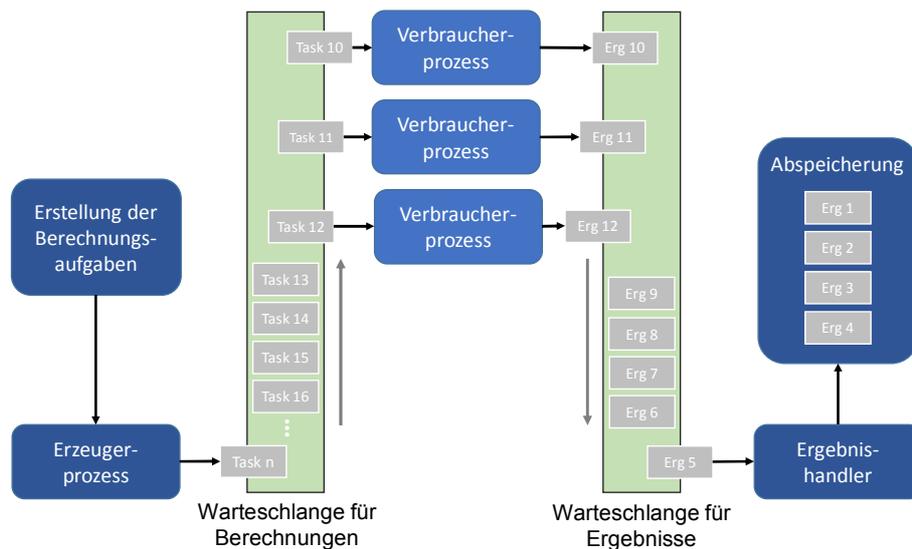


Abbildung 4-2 Erzeuger-Verbraucher-System zur Parallelisierung von Berechnungen

4.2. Verarbeitung von Geodaten – *FeVER OSMTools*

Die für das Modell benötigten georeferenzierten Daten (Geodaten), d.h. Daten für Straßen und Gebäude in der Untersuchungsregion, werden von OpenStreetMap (OSM) [101] bezogen. In diesem Open Source Projekt werden seit dem Jahr 2004 Geodaten in einer frei zugänglichen Datenbank gesammelt und abgelegt [102]. Neben der Darstellung der Geodaten in Form eines Online-Geoinformationssystems [103] können die Datenbankeinträge auch durch verschiedene Schnittstellen [104] [105] abgefragt und nach Objekten mit bestimmten Kriterien durchsucht werden. Zusätzlich können alle in OSM verfügbaren Geodaten für ganze Länder und Regionen als Datenbankauszüge in verschiedenen Dateiformaten heruntergeladen werden. Im Gegensatz zu offiziellen bzw. kommerziellen Quellen werden die Geodaten bei OSM durch viele Mitwirkende gesammelt, aufbereitet, integriert und unentgeltlich zur Verfügung gestellt. In Abhängigkeit der einzelnen Länder bzw. auch Kommunen ergeben sich daher unterschiedliche Qualitäten hinsichtlich der verfügbaren Daten. Die Qualität der Daten reicht dabei von hinterlegten Straßen und Gebäuden bis hin zur Speicherung von Ampeln und Straßenbeleuchtungseinrichtungen in der Geodatenbank. OSM wird inzwischen in vielen Bereichen der Forschung als Quelle für Geodaten genutzt, im Bereich der Energieforschung beispielsweise in [106] und [107]. Mit Blick auf das Modell FeVER ergibt sich durch die Verwendung der Geodaten von OSM eine große Flexibilität, da prinzipiell der Energieverbrauch auf der letzten Meile in Regionen beliebiger Länder untersucht werden kann.

4.2.1 Datenstruktur von OpenStreetMap

Die Datenstruktur von OSM besteht aus drei Grundelementen:

- *Nodes* (Knoten) stellen einen georeferenzierten Punkt dar. Jeder Knoten in OSM hat eine eindeutige Identifikationsnummer sowie eine Angabe zu seiner Position im Koordinatensystem, d.h. geografische Länge und Breite. [108]
- *Ways* (Kanten) stellen die Verbindungslinie zwischen zusammengehörigen Knoten dar. Mit Hilfe von Kanten können alle geometrischen Formen als Polygon dargestellt werden, wobei diese immer Informationen über die zugehörigen Knoten in ge-

ordneter Reihenfolge beinhaltet. In OSM sind insbesondere Gebäude, Grenzen, Straßen etc. als *Way* hinterlegt. [109]

- *Relations* (Relationen): Mit Hilfe von Relationen werden in OSM Verknüpfungen zwischen logisch zusammengehörigen Nodes und Ways hergestellt, die keinen eigenen geographischen Ort aufweisen. Ein Beispiel für eine Relation ist die Route eines Linienbusses, die aus vielen verschiedenen Straßen besteht (dargestellt als Ways) und auch Bushaltestellen (dargestellt als Nodes) beinhaltet. Da die Anordnung der Elemente in einer Relation eine entscheidende Rolle spielt, werden diese in Relationen ebenfalls in logischer Reihenfolge abgelegt. [110]

Die drei Grundelemente enthalten neben etwaigen Referenzen auf andere Elemente weitere Informationen in Form sogenannter Tags, die z.B. zur Identifikation von Gebäuden oder Straßen genutzt werden können.

Gebäude

Abbildung 2-4 zeigt ein Beispiel für die Darstellung eines Gebäudes in OSM, das als geschlossener Polygonzug in Form des Grundelements *Way* dargestellt wird (vgl. OSMXML-Code auf der rechten Seite von Abbildung 2-4). Die Reihenfolge der Nennung der zugehörigen *Nodes* bestimmt die Gebäudegrenzen. Im aufgeführten Beispiel in Abbildung 2-4 sind die Gebäudegrenzen durch die Knoten mit Identifikationsnummern aus der Menge {1;2;3;4;5;6} bestimmt, wobei diese in der Reihenfolge [1;2;5;4;3;6;1] in der Geodatenbank von OSM hinterlegt sind.

Die Identifikation eines Polygons als Gebäudeumriss ist in OSM über die Information *building* in den Attributen möglich, die ggf. auch den Gebäudetyp angibt. Zusätzlich können je nach Detaillierungsgrad der Daten neben der Anschrift auch weitere Informationen des Gebäudes hinterlegt sein. [111] gibt einen Überblick über alle potenziell möglichen Informationen, die für ein Gebäude gespeichert sein können.

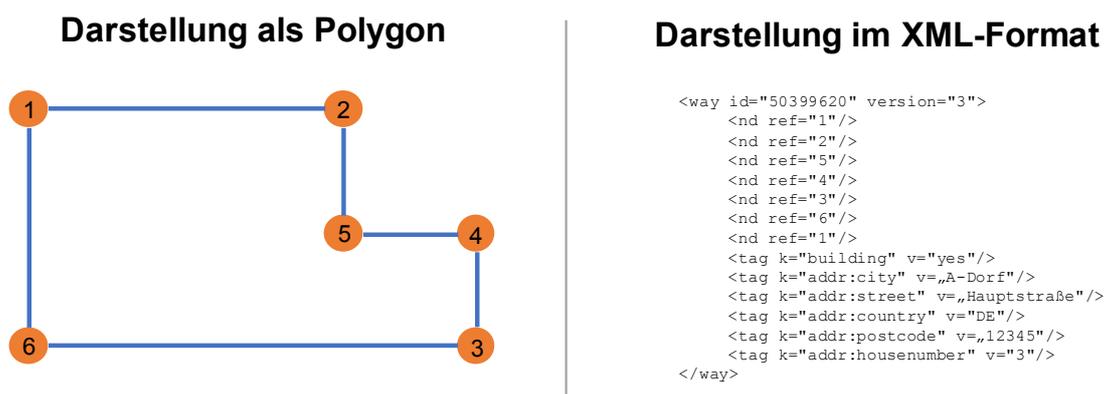


Abbildung 4-3 Darstellung von Gebäuden in OSM

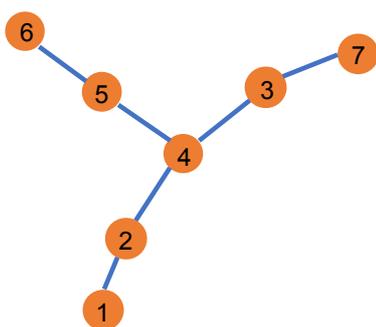
Straßen

Ähnlich wie Gebäude werden Straßen in OSM als Polygonzug in Form des Grundelements *Way* dargestellt. Wie bei Gebäuden, werden auch bei Straßen die zugehörigen Nodes in entsprechender Ordnung abgelegt. **Abbildung 4-4** zeigt ein Beispiel für die Darstellung von Straßen in OSM. Zusammengehörige Straßensegmente bzw. die Verbindung von Straßensegmenten zu Kreuzungen werden durch eine Mehrfachnennung der *Node*, an der

die Verknüpfung liegt, in den entsprechenden *Ways* dargestellt. In Abbildung 4-4 befindet sich eine Kreuzung beispielsweise am Knoten 4.

Je nach Detaillierungsgrad der Geodaten in OSM sind neben Straßentyp und Straßename viele verschiedene Attribute hinterlegt, unter anderem z.B. zulässige Höchstgeschwindigkeit, Straßenoberfläche und Art und Umfang der Beleuchtung. Das Attribut *oneway* gibt Aufschluss über eine etwaige Einbahnregelung für das Straßensegment. In [112] sind alle verfügbaren Attribute für Straßen aufgeführt.

Darstellung als Polygonzug



Darstellung im XML-Format

```
<way id="5069207" version="8">
  <nd ref="1"/>
  <nd ref="2"/>
  <nd ref="4"/>
  <nd ref="3"/>
  <nd ref="7"/>
  <tag k="lit" v="yes"/>
  <tag k="name" v="Hauptstraße"/>
  <tag k="highway" v="primary"/>
  <tag k="surface" v="asphalt"/>
  <tag k="maxspeed" v="50"/>
</way>
<way id="5069210" version="8">
  <nd ref="6"/>
  <nd ref="5"/>
  <nd ref="4"/>
  <tag k="name" v="Kirchenweg"/>
  <tag k="highway" v="residential"/>
  <tag k="surface" v="cobblestone"/>
  <tag k="maxspeed" v="30"/>
  <tag k="oneway" v="yes"/>
</way>
```

Abbildung 4-4 Darstellung von Straßen in OSM

4.2.2 Berechnung von Entfernungen

Georeferenzierte Punkte werden in OSM durch Koordinaten bzw. Angaben zu geographischer Breite und Länge, dargestellt. Diese Koordinatenangaben beziehen sich dabei immer auf die Position auf einem Referenzellipsoid, der an die Form der Erdkugel angenähert ist. Auf Grund der ungleichmäßigen Form der Erdoberfläche existieren verschieden definierte Ellipsoide, die für unterschiedliche Regionen gültig sind. Die Lage des Ellipsoids wird dabei durch ein sogenanntes geodätisches Datum angegeben, für Deutschland wird z.B. häufig das Datum Potsdam verwendet. Gleichzeitig existieren verschiedene Koordinatensysteme (geodätisches Koordinatenreferenzsystem GCRS) zur Abbildung der Position auf dem jeweiligen Referenzellipsoid, z.B. kartesische Koordinaten, Kugelkoordinaten bzw. ellipsoidische Koordinaten. Zur Darstellung der Erdoberfläche z.B. auf Karten wird das GCRS in die zweidimensionale Ebene projiziert, wofür z.B. verschiedene Mercator-Projektionen, u.a. Transversal bzw. Universal Transversal Mercator (UTM) oder auch Web Mercator, genutzt werden. [113] [114]

Das in OSM verwendete World Geodetic System 1984 (WGS84) beinhaltet alle für eine weltweit eindeutige Positionsangabe notwendigen Informationen, d.h.

- einen für die komplette Erde gültigen Referenzellipsoiden,
- ein eigenes Datum,
- sowie ein eigenständiges geodätisches Koordinatenreferenzsystem, hier in Form von Kugelkoordinaten. [115]

Unter anderem wird WGS84 auch für Positionsangaben im Luftverkehr sowie auch beim Global Positioning System (GPS) genutzt.

Häufig ist jedoch nicht nur die Bestimmung der Position eines Punktes von Interesse, sondern auch die Entfernung zwischen zwei Punkten. In guter Näherung wird hierfür das Referenzellipsoid durch eine Kugel angenähert, sodass die Entfernung zwischen zwei Punkten auf der Oberfläche mit der Großkreisdistanz (vgl. (4.1)) berechnet werden kann.

Für die Bestimmung von Entfernungen im Bereich von einigen wenigen Kilometern ist diese Näherung gerechtfertigt und der Fehler vernachlässigbar. Für die Berechnung von größeren Entfernungen müssten hingegen exaktere Berechnungsverfahren gewählt werden. Da insbesondere Straßensegmente in OSM meist nur Längen von wenigen 100 m aufweisen, wird für die Berechnung von Entfernungen in FeVER immer die in (4.1) aufgeführte Formel für die Großkreisdistanz verwendet.

$$d = 2r \arcsin \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)}$$

mit:

r	Erdradius (6371 km)	(4.1)
φ_1	Geographische Breite von Punkt 1	
φ_2	Geographische Breite von Punkt 2	
λ_1	Geographische Länge von Punkt 1	
λ_2	Geographische Länge von Punkt 2	

4.2.3 Extraktion von Geodaten

Da für die Anwendung im Modell nur ein kleiner Auszug aus der Geodatenbank von OSM benötigt wird, kann die zu verarbeitende Datenmenge auf ein Minimum reduziert werden. Hierzu wird zuerst der Kartenausschnitt, in dem die gewählte Untersuchungsregion liegt (z.B. Oberbayern) beispielsweise von [116] im OSMXML-Format [117] [118] heruntergeladen. Im Anschluss daran werden die Grenzen der Untersuchungsregion (Gemeindegrenze, Stadtgrenze etc.) über eine Online-Abfrage an die Datenbank von OSM mit [104] abgerufen und verarbeitet. Mit Hilfe von [119] werden danach alle Elemente, die innerhalb der Grenzen der Untersuchungsregion liegen, aus dem heruntergeladenen Kartenausschnitt extrahiert und für die weitere Verarbeitung abgespeichert. Das Ergebnis dieses Schrittes sind Geodaten im OSMXML-Format für die Untersuchungsregion, die in den nachfolgenden Schritten verarbeitet werden müssen. **Abbildung 4-5** fasst das Vorgehen schematisch zusammen.

In den extrahierten Geodaten für die Untersuchungsregion wird im Anschluss systematisch nach Einträgen, die Gebäude oder Straßen darstellen, gesucht. Die dabei in den Daten von Open Street Map [101] gefundenen Gebäude und Straßen werden zur weiteren Verarbeitung am Ende der Extraktion für jede Untersuchungsregion abgespeichert. Da in dieser Arbeit die Belieferung von Privathaushalten untersucht wird, werden bestimmte Gebäudetypen (z.B. *commercial*, *industrial*, *hospital*) bereits bei der Verarbeitung der Geodaten ausgeschlossen. Auf Grund der teilweise fehlenden Ausweisung als Gebäude eines bestimmten Typs, werden die Gebäude zusätzlich noch Anhand der Gebäudegrundfläche gefiltert. Die Filterung erfolgt dabei mit einer unteren und oberen Begrenzung der Gebäudegrundfläche, sodass sowohl sehr kleine Gebäude (Gartenhäuser, Garagen) als auch

sehr große Gebäude (Industrie- und Gewerbebauten) von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen werden können. Die Ergebnisse der Suche nach Gebäuden in den Daten von OSM wurde auf Grund der großen Menge an Gebäuden in den Untersuchungsregionen stichprobenartig kontrolliert. Da zusätzlich zu Straßen, die mit Fahrzeugen befahren werden können, auch z.B. Pfade im Wald, Feldwege oder Fahrradwege hinterlegt sind, werden auch die Straßen bei der Verarbeitung gefiltert.

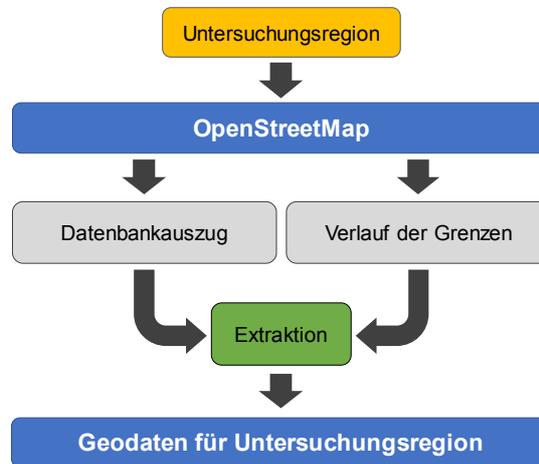


Abbildung 4-5 Schema zur Extraktion der Daten von OSM

4.2.4 Straßennetzwerkgraph

Mit den gefilterten und aufbereiteten Geodaten der Straßen wird mit Hilfe des Python Moduls *NetworkX* [120] ein gerichteter Graph aufgebaut, der neben der Abbildung der Verknüpfung von Knoten und Kanten zu einem Straßennetzwerk auch Informationen zu

- Straßenname (falls vorhanden),
- Straßentyp (falls vorhanden),
- Länge des Straßensegments,
- Zulässige Höchstgeschwindigkeit (falls vorhanden) und
- Verkehrsflussrichtung (Einbahnstraße)

beinhaltet. Durch die Verwendung eines gerichteten Graphen ist eine Beachtung von Einbahnstraßen bei der späteren Planung der Zustell Touren möglich, was insbesondere in städtischen Regionen einen bedeutenden Einfluss auf die Ergebnisse auf Grund der Verkehrsplanung bzw. des Verkehrskonzepts haben dürfte. Zusätzlich zur Untersuchungsregion werden auch der Straßennetzwerkgraph der nächst höheren administrativen Ebene [121] (z.B. Beispiel Landkreis München, Stadt München) erstellt, um z.B. Fahrzeugdepots außerhalb der Untersuchungsregion betrachten zu können.

Zur Vermeidung von Problemen bei der Anwendung von Algorithmen für die Pfadsuche im Straßennetzwerk werden im Anschluss isolierte Straßensegmente vom Netzwerkgraphen entfernt, die nicht von jedem beliebigen Punkt im Graph erreicht werden können. Bei dem in **Abbildung 4-6 links** dargestellten Auszug aus einem Straßennetzwerk (orange Kanten mit schwarzen Knoten) sind beispielsweise die grünen Knoten und blauen Kanten isoliert. Ein Beispiel für einen kompletten Straßengraph ist in **Abbildung 4-6 rechts** dargestellt.

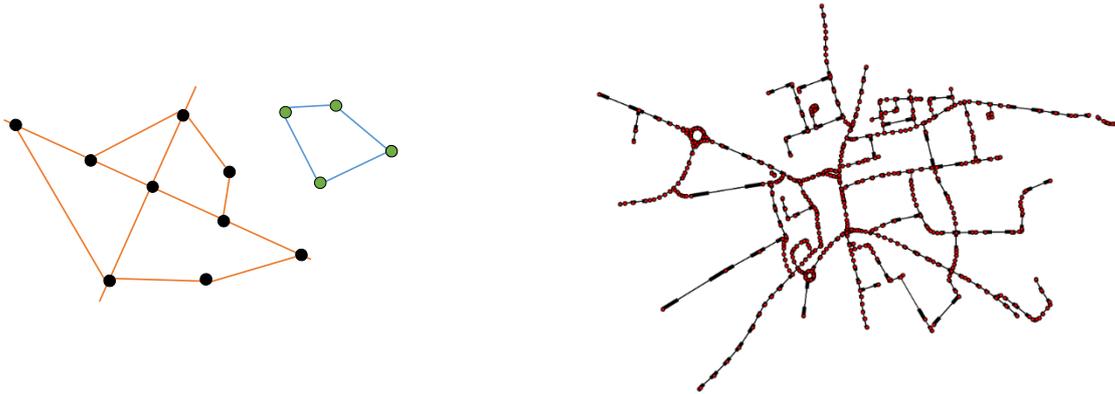


Abbildung 4-6 Beispiel für isolierte Knoten und Kanten und Straßennetzwerkgraph

4.2.5 Zuordnung von Haushalten zu Gebäuden

Für die zufällige Auswahl von Haushalten, die in einem Simulationslauf beliefert werden, muss die Anzahl der Haushalte pro Gebäude bekannt sein. Auf Grund der Tatsache, dass OpenStreetMap diese Informationen nicht beinhaltet, wurde eine Zuordnungsmethodik auf Basis von Gebäudegrundflächen für die weitere Modellierung genutzt. Die unausweichlich mit der Methodik verbundenen Fehler werden für die nachfolgenden Untersuchungen in Kauf genommen, da durch das beschriebene Vorgehen das Modell vereinfacht und flexibel für verschiedene Untersuchungsregionen anwendbar wird. Zwar könnte durch die Verwendung von präziseren Angaben, z.B. Gebäudehöhe, Anzahl der Stockwerke bzw. Daten zum Gebäudebestand (Geschossflächenzahl, Gebäudetyp) der Fehler bei der Zuordnung der Haushalte reduziert werden, allerdings müssten diese Daten für alle untersuchten Regionen (evtl. kommerziell) beschafft werden.

Für das angewandte Verfahren wird im ersten Schritt die mittlere Gebäudegrundfläche pro Haushalt in der Untersuchungsregion berechnet. Dazu wird der Quotient aus der Summe der einzelnen Gebäudegrundflächen und der Anzahl der Haushalte in der Untersuchungsregion gebildet, vgl. Formel (4.2). Die Anzahl der Haushalte im Untersuchungsgebiet kann dabei beispielsweise offiziellen Statistiken entnommen werden. Die Anzahl der Haushalte pro Gebäude wird anschließend mit Formel (4.3) für jedes Gebäude berechnet, wobei dabei immer auf die nächst größere, ganze Zahl aufgerundet wird.

$$a_h = \frac{\sum a_{B,b}}{H} \quad \forall b \in B$$

a_h	Durchschnittliche Gebäudegrundfläche pro Haushalt	(4.2)
$a_{B,b}$	Gebäudegrundfläche des Gebäudes b	
H	Anzahl der Haushalte im Untersuchungsgebiet	
B	Menge aller Gebäude im Untersuchungsgebiet	

$$h_b = \left\lceil \frac{a_b}{a_h} \right\rceil \quad \forall b \in B$$
(4.3)

Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Vorgehens ist das Vorliegen einer annähernd homogenen Verteilung der Gebäudehöhen in der Untersuchungsregion, da die Methodik

ansonsten große Fehler produzieren kann. Bei dem in **Abbildung 4-7** gezeigten Beispiel wird der Einfluss einer inhomogenen Verteilung der Gebäudehöhen deutlich. In den beiden betrachteten Fällen ergibt sich eine identische Anzahl an Haushalten für Gebäude 1 und 2, die aber bei gleicher Gebäudegrundfläche unterschiedlichen Gebäudehöhen haben.

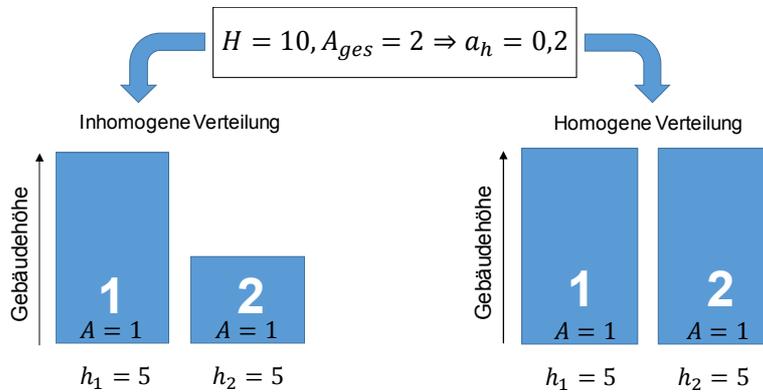


Abbildung 4-7 Einfluss Gebäudehöhe bei Zuordnungsmethodik

4.2.6 Zuordnung von Gebäuden zu Knoten im Straßennetzwerkgraph

Um das Anhalten der Zustellfahrzeuge vor den Gebäuden im Modell abbilden zu können, muss jedem Gebäude ein Punkt im Straßennetzwerk zugeordnet werden. Dabei ist es auch möglich, dass ein Knoten der Haltepunkt für mehrere Gebäude ist (vgl. **Abbildung 4-8**)

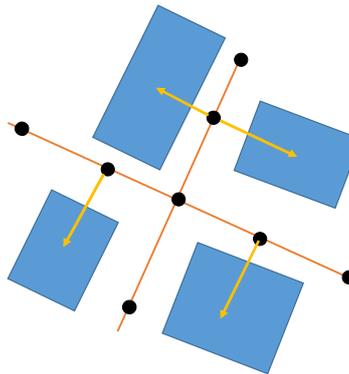


Abbildung 4-8 Haltepunkte für Gebäude im Straßennetzwerkgraph

Für die Berechnung der Haltepunkte wird zunächst der Mittelpunkt des Gebäudepolygons mit dem Python Modul *shapely* [122] bestimmt. Danach wird der Abstand (Luftlinie) vom Gebäudemittelpunkt zu sämtlichen Knoten, die Teil von Straßen in der Untersuchungsregion sind, berechnet. Anschließend werden die Straßensegmente gesucht, die die fünf am nächsten gelegenen Knoten im Straßennetzwerk enthalten. Nach der Auswahl der am nächsten gelegenen Straßensegmente wird das Lot vom Gebäudemittelpunkt auf die Straßensegmente gefällt und der Abstand vom Gebäudemittelpunkt zum dadurch erzeugten Schnittpunkt mit der Straße berechnet bzw. evaluiert. Der Punkt auf dem Straßensegment mit der kürzesten Distanz zum Gebäudemittelpunkt wird dabei immer als Haltepunkt im Straßennetzwerk für das Gebäude ausgewählt und im Straßennetzwerkgraphen integriert. Sollte der Abstand vom erstellten Knoten zu einem bereits existierenden Knoten sehr gering sein, dann wird der bereits existierende Knoten als Haltepunkt gesetzt und der neu erstellte Knoten verworfen. **Abbildung 4-9** fasst das Zuordnungsverfahren zusammen.

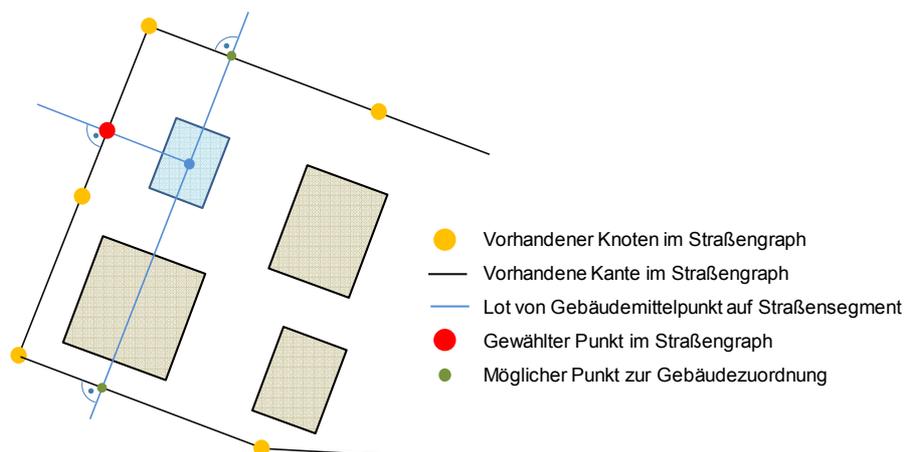


Abbildung 4-9 Zuordnung von Haltepunkten auf dem Straßengraph zu Gebäuden

Durch das gewählte Vorgehen kann zwar nicht gewährleistet werden, dass der Haltepunkt des Fahrzeugs in der gleichen Straße wie die eigentliche (und evtl. in OSM hinterlegte) Adresse des Gebäudes ist, jedoch kann ausgeschlossen werden, dass Gebäuden kein Haltepunkt zugeordnet wird. Der so erstellte Straßennetzwerkgraph mit den Haltepunkten wird abschließend in das Straßennetzwerk der übergeordneten administrativen Ebene eingebaut und für die weitere Verwendung abgespeichert. Ebenso wird für jedes Gebäude die Identifikationsnummer des zugehörigen Knotens im Straßengraph abgespeichert.

4.3. Modellierung der Belieferung – *FeVER Delivery*

4.3.1 Erstellung von Zustellgebieten

Als Zustellgebiet werden im Allgemeinen Regionen bezeichnet, die durch ein Zustellfahrzeug während einer Zustelltour beliefert werden. Logistikdienstleister erstellen Zustellgebiete mit Hilfe von spezieller Software [35], die diese anhand verschiedener Kriterien, wie z.B. erwarteten Sendungsmengen, Dauer der Zustellungen und historische Daten optimiert. Vor allem auf Grund der wochentäglich und saisonal schwankenden Sendungsmengen werden die Zustellgebiete teils täglich angepasst bzw. optimiert [35].

Zur realitätsnahen Abbildung der Belieferung der Kunden werden im Modell Haushalte bzw. Gebäude auch in Zustellgebiete eingeteilt. Die Erzeugung der Zustellgebiete kann prinzipiell als Clustering-Problem formuliert werden, für das allgemein viele verschiedene Algorithmen zur Lösung zur Verfügung stehen. Ein sehr intuitives Beispiel für einen solchen Algorithmus ist *k-means*. Dabei werden im ersten Schritt k Punkte aus der Menge aller zu kategorisierenden Punkte ausgewählt und als Zentren der Cluster (bzw. Schwerpunkte der Cluster) angesetzt. Um bereits zu Beginn des Algorithmus eine gute Startkonfiguration der Cluster zu erhalten, existieren verschiedene Ansätze zur Initialisierung der Clusterzentren, u.a. [123]. Für die übrigen Punkte werden die quadrierten Differenzen zu den erzeugten Clusterzentren berechnet. Ein Punkt wird dabei dem Cluster zugeordnet, das die geringste quadrierte Differenz aufweist. Nach der Zuordnung der Punkte zu den Clustern werden die Zentren der Cluster erneut berechnet (über den Mittelwert der Koordinaten der Punkte im jeweiligen Cluster) und die Punkte erneut den einzelnen Clustern zugewiesen. Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis keine Änderung mehr eintritt bzw. bis die maximale Zahl von Iterationen erreicht wurde. [124]

Die Punkte im sogenannten Algorithmus von Lloyd sind Gebäuden bei der Generierung der Zustellgebiete gleichzusetzen. Da das Verfahren von Lloyd die Clustergröße, d.h. die Anzahl der Elemente pro Cluster nicht beachtet bzw. auch keine gleich großen Cluster erzeugt, wurde der sogenannte *Same Size-k-Means Algorithmus* für die Erzeugung der Zustellgebiete im Modell genutzt [125]. Dabei wird beim Befüllen der Cluster zusätzlich die aktuelle Größe des Clusters, d.h. die Anzahl der Haushalte im Clusters berechnet und geprüft. Sollte das Cluster bereits die maximale Größe erreicht haben, wird ein Gebäude daher ggf. einem nicht optimalen Cluster zugeordnet. Nach der Zuordnung wird durch paarweises Tauschen von Punkten versucht die Clusterkonfiguration zu verbessern. Hierbei wurde sichergestellt, dass immer nur komplette Gebäude (d.h. alle Haushalte eines Gebäudes) zugeordnet bzw. verschoben werden und nicht einzelne Haushalte. Erst wenn keine Tauschpartner mehr zur Verfügung stehen, wird analog zum Algorithmus von Lloyd fortgefahren. Da bereits der k-Means-Algorithmus nicht zwangsläufig optimale Ergebnisse liefert, zeigt auch Same Size-k-Means dieses Problem, insbesondere durch die zusätzliche Bedingung einer maximalen Clustergröße. Daher wurden bei der Generierung der Zustellgebiete immer zehn mögliche Kombinationen an Zustellgebieten errechnet und im Anschluss durch Visualisierung validiert bzw. ausgewählt. Ggf. wurde durch *subclustering* (d.h. Lösung des Clustering-Problems für eine kleinere Menge an Gebäuden) die Clusterkonfiguration weiter verbessert.

Die Größe der einzelnen Cluster h_z wird im Modell mit der Fahrzeugkapazität C_V sowie der Zustellwahrscheinlichkeit p_z berechnet (vgl. (4.4)). Dabei ist h_z gleichbedeutend mit der maximalen Anzahl an Haushalten, die ein Zustellgebiet bei einer gegebenen Zustellwahrscheinlichkeit beinhalten darf, sodass keine Kapazitätsprobleme bei der Belieferung mit dem Zustellfahrzeug auftreten, wenn die Haushalte im Zustellgebiet mit der Zustellwahrscheinlichkeit ausgewählt werden. Gleichzeitig wird damit eine Verkleinerung der Zustellgebiete mit steigender Zustellwahrscheinlichkeit bzw. die Anpassung der Zustellgebiete bei veränderter Sendungsmenge abgebildet.

$$h_z = \frac{C_V}{p_z} \tag{4.4}$$

Die Anzahl der Zustellgebiete bzw. die Anzahl der zu erzeugenden Cluster in der Untersuchungsregion bei gegebener Zustellwahrscheinlichkeit und Fahrzeugkapazität $Z_{p,c}$ kann mit (4.5) berechnet werden. Das Ergebnis muss auf die nächst größere ganze Zahl aufgerundet werden, damit die Restriktionen hinsichtlich Fahrzeugkapazität eingehalten und gleichzeitig alle untersuchten Haushalte bedient werden können.

$$Z_{p,c} = \left\lceil \frac{H}{h_z} \right\rceil = \left\lceil \frac{H \cdot p_z}{C_V} \right\rceil \tag{4.5}$$

4.3.2 Erzeugung einer Lieferstichprobe und Ableitung von Kenngrößen

Nach der Einteilung der Haushalte in Zustellgebiete können unter Einbezug der Zustellgebiete Lieferstichproben erstellt werden. Diese enthalten dabei per Zufall ausgewählte Haushalte in einem Zustellgebiet, die für eine Belieferung eingeplant werden müssen. Eine Lieferstichprobe repräsentiert daher immer die Belieferung eines einzelnen Zustellgebiets der gesamten Untersuchungsregion.

Falls ein Haushalt durch ein Zufallsexperiment für eine Belieferung ausgewählt wurde, wird die Identifikationsnummer des Gebäudes, in dem der Haushalt angesiedelt ist, in einen Vektor \vec{L}_H geschrieben. Da ein Gebäude auch mehrere Haushalte beinhalten kann, werden für jedes Gebäude so viele Zufallsexperimente durchgeführt, wie es Haushalte beinhaltet. Daher kann der Vektor \vec{L}_H auch Duplikate enthalten. (4.6) zeigt ein Beispiel.

$$\vec{L}_H = [1; 1; 1; 3; 5; 6; 8; 11; 12; 12; 18; 22] \quad (4.6)$$

Gleichzeitig können mit Hilfe der Lieferstichprobe einige Kenngrößen für die spätere energetische Bewertung der Belieferung bestimmt werden. Die Länge des Vektors \vec{L}_H ist dabei identisch zur Anzahl an belieferten Haushalten der Lieferstichprobe n_H und repräsentiert die Sendungsmenge im Zustellgebiet:

$$n_H = |\vec{L}_H| \quad (4.7)$$

Im Beispiel aus (4.6) wäre die Anzahl der belieferten Haushalte bzw. die Sendungsmenge daher $n_H = 12$. Durch Entfernen der Duplikate aus \vec{L}_H und der Zusammenfassung im Vektor \vec{L}_G kann die Anzahl der belieferten Gebäude n_G in der Lieferstichprobe bestimmt werden:

$$n_G = |\vec{L}_G| \quad (4.8)$$

Die Anzahl der belieferten Gebäude im Beispiel aus (4.6) ist damit $n_G = 9$. Mit den Daten aus \vec{L}_G wird schlussendlich der Vektor \vec{L}_S erstellt, der die Identifikationsnummern der Stopppunkte der belieferten Gebäude im Straßengraph enthält. Da ein Stopppunkt, wie bereits erwähnt, auch für mehrere Gebäude gültig sein kann, kann nach der Entfernung der Duplikate aus \vec{L}_S die Anzahl der Fahrzeugstopps n_{St} bei der Belieferung des Zustellgebiets in der Lieferstichprobe bestimmt werden.

$$n_{St} = |\vec{L}_S| \quad (4.9)$$

Dabei gilt stets

$$n_{St} \leq n_G \leq n_H \quad (4.10)$$

d.h. die Anzahl der Fahrzeugstopps ist immer kleiner oder gleich der Anzahl der belieferten Gebäude und immer kleiner oder gleich der Anzahl der belieferten Haushalte.

4.3.3 Routing

Im nächsten Schritt wird für jede erstellte Lieferstichprobe eine Zustelltour geplant. Entscheidend für die Planung des Fahrtwegs der Zustelltour sind dabei nicht mehr die Haushalte, sondern lediglich die Haltepunkte bzw. Fahrzeugstopps im Vektor \vec{L}_S . Die Reihenfolge der Fahrzeugstopps in \vec{L}_S ist dabei noch zufällig und spiegelt keine sinnvolle Fahrzeugtour wieder, die ein Zusteller für die Belieferung der Kunden wählen würde. Daher wird mit Hilfe eines Routingalgorithmus die Streckenführung optimiert, d.h. die Reihenfolge der Stoppunkte wird vertauscht, sodass die Strecke, die das Zustellfahrzeug fährt, möglichst minimal wird (vgl. **Abbildung 4-10**). Das Ergebnis dieser Optimierung ist dementsprechend eine Zustelltour, die den realen Streckenverlauf eines Zustellfahrzeugs bei der Belieferung der Kunden aus der Lieferstichprobe repräsentiert.

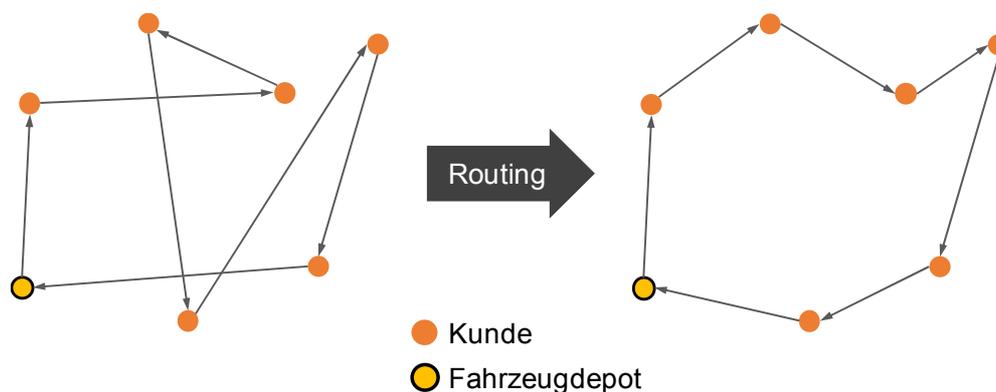


Abbildung 4-10 Routing

Einordnung des Routingproblems

Die Suche nach optimalen Rundtouren gehört zu den bekanntesten Problemen aus der Informatik und Mathematik [126]. Die einfachste Formulierung eines solchen Routingproblems ist das sogenannte Problem des Handlungsreisenden oder *Traveling Salesman Problem (TSP)*. Ziel des TSP ist dabei eine Minimierung der Gesamtstrecke, die ein Reisender zurücklegen muss, um eine definierte Menge von Zielen zu besuchen, wobei Start- und Endpunkt der Reise fest vorgegeben sind. Dabei darf jedes Ziel auf der Rundtour nur genau einmal besucht werden [127]. Im Kontext von Lieferungen auf der letzten Meile entspricht der Reisende dem Zustellfahrzeug, das eine definierte Menge Kunden bzw. Zielen beliefern muss. Start- und Endpunkt der Reise werden durch das Fahrzeugdepot dargestellt.

Durch das Hinzufügen weiterer Nebenbedingungen zum TSP ergeben sich sogenannte *Vehicle Routing Probleme (VRP)*, wobei das TSP als die einfachste Form der aufgeführten Probleme gesehen werden kann, u.a. durch die Betrachtung nur eines einzelnen Fahrzeugs. Ziel aller VRP bleibt die Minimierung der zurückzulegenden Streckenlänge bzw. der Kosten unter gleichzeitiger Einhaltung aller Nebenbedingungen. **Tabelle 4-1** zeigt Beispiele für verschiedene Ausprägungen von VRP. [126–128] Insbesondere durch das Hinzufügen einer Kapazitätsbeschränkung zum TSP ergibt sich das sogenannte *Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)*. Ziel des CVRP ist dabei die Minimierung der Gesamtstrecke einer definierten Anzahl an Fahrzeugen mit bestimmter Kapazität, wobei für jedes Fahrzeug die Nebenbedingungen des TSP gelten. [127]

Dabei kann sich die Kapazitätsbeschränkung z.B. auf

- die Größe des Laderaums, d.h. Anzahl an Sendungen,
- die maximale Reichweite der Fahrzeuge (z.B. bei Elektrofahrzeugen) oder
- die maximale Zeitdauer einer Rundtour

beziehen [127]. Ebenso kann eine Mischung von Fahrzeugen mit unterschiedlicher Kapazität, die Existenz von mehreren Fahrzeugdepots (*Multi Depot Capacitated Vehicle Routing Problem*) sowie der mehrfache Einsatz eines Fahrzeuges für die Belieferung von verschiedenen Kunden durch das CVRP beschrieben werden. Die Lösung des CVRP stellt daher einen Vorschlag zum optimierten Fahrzeugeinsatz dar. Häufig wird das CVRP auch nur als VRP bezeichnet, da es die einfachste Formulierung eines Routing Problems für mehrere Fahrzeuge darstellt.

Tabelle 4-1 Beispiele für Ausprägungen des Vehicle Routing Problems [127]

Bezeichnung	Abkürzung	(Zusätzliche) Nebenbedingungen
Traveling Salesman Problem	TSP	ein Fahrzeug; Start- und Endpunkt sind Depot jeder Punkt wird nur einmal besucht
Capacitated Vehicle Routing Problem	CVRP VRP	mehrere Fahrzeuge mit Kapazitätsbeschränkung, sonst wie TSP
Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows	CVRPTW	mehrere Fahrzeuge mit Kapazitätsbeschränkung; definierte Zeitfenster für Lieferung, sonst wie TSP

Prinzipiell müsste auf Grund der Problembeschreibung für die Simulation von Belieferungen auf der letzten Meile ein CVRP mit n Fahrzeugen der Kapazität C_V gelöst werden. Da die Kapazitätsbeschränkung der Fahrzeuge bereits bei der Erzeugung der Zustellgebiete berücksichtigt wurde (vgl. Abschnitt 4.3.1), zerfällt das Routing-Problem im Kontext dieser Arbeit zu n Traveling Salesman Problemen, die unabhängig voneinander gelöst werden können.

Lösung des Routingproblems

Bei der Betrachtung eines TSP mit k Reisezielen existieren $(k - 1)!$ mögliche Routen. Auf Grund der NP-Vollständigkeit von Routingproblemen wurden verschiedene Verfahren zur Lösung dieser kombinatorischen Optimierungsprobleme entwickelt. **Tabelle 4-2** teilt Beispiele für verschiedene Lösungsverfahren in drei Kategorien ein. Da auf Grund der Vielzahl an möglichen Lösungen und dem Umfang des Optimierungsproblems exakte Verfahren bei einer großen Zahl an Reisezielen bei vielen VRP oder TSP schnell an ihre Grenzen stoßen, werden meist Heuristiken bzw. Metaheuristiken wie z.B. *Tabu Search*, *Simulated Annealing* oder genetische Algorithmen zur Annäherung der Lösung des Optimierungsproblems genutzt. Durch unterschiedliche Ansätze in den Algorithmen wird dabei ausgeschlossen, dass es sich bei der Lösung nur um ein lokales Minimum handelt. [126]

Tabelle 4-2 Lösungsverfahren für TSP [126] [127]

Kategorie	Beispiele
Exakte Verfahren	Lineare Programmierung
	Branch and Bound
	Branch and Cut
Heuristische lokale Such- und Verbesserungsverfahren	Savings-Verfahren
	Cluster First / Route First
	Tabu Search
	Simulated Annealing
Heuristische populationsbasierte Verfahren	Genetische Programmierung
	Scatter Search
	Ant Colony Optimization

Für die Lösung des Routing-Problems bzw. des TSP in dieser Arbeit wurde die *Google Optimization Toolbox* [129] genutzt. Diese bietet einerseits eine Python-Schnittstelle und konnte damit leicht in das Modell integriert werden und ist andererseits quelloffen. Neben der Anwendung für das Routing-Problem können mit der Toolbox prinzipiell auch eine Vielzahl weiterer Optimierungsprobleme gelöst werden, u.a. im Bereich der linearen, gemischt-ganzzahligen sowie kombinatorischen Optimierung (z.B. Rucksackprobleme). [129]

Bei der Lösung von TSP bietet die Toolbox zwei Möglichkeiten zum Abbruch der Optimierung, die entweder auf Basis der Anzahl der berechneten Iterationen oder auf Basis der verstrichenen Zeit die Berechnungen stoppen. Da bei den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit Probleme mit unterschiedlichen Anzahlen an Punkten gelöst werden müssen, wurde als Abbruchkriterium die verstrichene Zeit gewählt. Die gewählte Rechenzeit pro Problem von 150 s stellt dabei einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Dauer der Berechnung dar. Bei insgesamt 1.000 Routen-Optimierungen pro Zustellwahrscheinlichkeit ergibt sich theoretisch eine sequentielle Rechenzeit von rund 41,2 Stunden (keine Betrachtung von Overhead etc.) für eine simulierte Zustellwahrscheinlichkeit. Für die Simulation von 10 verschiedenen Zustellwahrscheinlichkeiten würde damit die Berechnung eine Dauer von rund 17,2 Tage beanspruchen. Auf Grund dieser Tatsache wurden die Berechnungen mit dem Erzeuger-Verbraucher-System parallelisiert, wodurch die Rechenzeit in Abhängigkeit des verwendeten Computersystems deutlich reduziert werden konnte.

Die Toolbox beinhaltet eine Vielzahl von Algorithmen zur Lösung des TSP, z.B. *Simulated Annealing*, *Tabu Search* oder *Guided Local Search*. Im Rahmen dieser Arbeit wurde als Lösungsverfahren *Tabu-Search* gewählt, da es bei der Betrachtung der Ergebnisse verglichen mit anderen Algorithmen die sinnvollsten bzw. plausibelsten Ergebnisse zeigte. Eine detaillierte Beschreibung des Algorithmus ist in [126] zu finden.

Zusätzlich zur Verwendung der *Google Optimization Toolbox* wurden ein genetischer Algorithmus auf Basis von [130] sowie Simulated Annealing mit [131] für die Lösung des TSP implementiert. Beide Ansätze lieferten ebenso brauchbare Ergebnisse, benötigten allerdings deutlich mehr Rechenzeit für die Lösungsfindung, sodass diese für den produktiven Betrieb des Modells nicht geeignet waren.

4.3.4 Distanzmatrix

Als Basis für die Optimierung der Route, unabhängig vom verwendeten Lösungsalgorithmus, wird die Distanzmatrix \tilde{D} (vgl. (4.11)) benötigt. Diese beinhaltet als Einträge die Weglängen $d_{i \rightarrow j}$, die ein Fahrzeug von einem Gebäude i zu jedem anderen Gebäude j zurücklegen muss. Die Matrix hat dabei die Größe $\mathbb{R}^{|B| \times |B|}$, wobei B die Menge aller Gebäude in der Untersuchungsregion ist. Unter Einbezug des Depots erhöht sich die Dimension der Matrix auf $\mathbb{R}^{|B|+1 \times |B|+1}$, insofern das Depot nicht bereits in B enthalten ist.

$$\tilde{D} = \begin{pmatrix} 0 & d_{2 \rightarrow 1} & \dots & d_{b \rightarrow 1} \\ d_{1 \rightarrow 2} & 0 & \vdots & d_{b \rightarrow 2} \\ \vdots & \vdots & 0 & \vdots \\ d_{1 \rightarrow b} & d_{2 \rightarrow b} & \dots & 0 \end{pmatrix}, b = |B| \text{ bzw. } b = |B| + 1 \quad (4.11)$$

Zur Berechnung von \tilde{D} wird der generierte Straßengraph genutzt, sodass die Matrix reale Wegstrecken als Einträge enthält. Dabei wird angenommen, dass der Fahrer des Zustellfahrzeugs zwischen zwei Lieferadressen immer die kürzeste Strecke wählt. Die Berechnung der Wegstrecken kann daher durch eine Suche nach dem kürzesten Pfad von Knoten i zu Knoten j im Straßennetzwerkgraphen ausgedrückt werden, wofür viele verschiedene Algorithmen existieren. Im Modell wird hierzu der A*-Algorithmus [132] genutzt, der im Python Modul *NetworkX* [120] enthalten ist.

In Abhängigkeit der Größe des Straßengraphen ergeben sich unterschiedlich lange Rechenzeiten pro Pfadsuche, da durch den A*-Algorithmus bei der Suche nach dem kürzesten Pfad in großen Graphen wesentlich mehr Möglichkeiten evaluiert werden müssen. Da die Hauptdiagonale der Distanzmatrix keine Werte ungleich Null als Einträge hat, d.h.

$$d_{i,j} = 0 \quad \forall i = j \quad (4.12)$$

kann diese Eigenschaft zur Verkürzung der Rechenzeit genutzt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Einsparung von Rechenzeit wäre eine Vernachlässigung von Einbahnstraßen bzw. die Verwendung eines ungerichteten Graphen für das Straßennetzwerk. Als Resultat dieses Vorgehens wäre die Distanzmatrix symmetrisch zur Hauptdiagonalen, d.h. es würde gelten

$$d_{i \rightarrow j} = d_{j \rightarrow i} \quad \forall i, j \in B \quad (4.13)$$

wodurch die Anzahl der Berechnungen um die Hälfte reduziert werden könnte. Ein TSP, das diese Matrix verwendet, würde in diesem Fall auch als symmetrisch bezeichnet werden [127]. Aus den bereits erwähnten Gründen wird jedoch immer die komplette Distanzmatrix für die Optimierung genutzt. Zur Beschleunigung der Berechnung wurde auch das vorgestellte Verfahren zur Parallelisierung von Prozessen verwendet. **Abbildung 4-11** zeigt als Beispiel einen Ausschnitt eines Ergebnisses für die Suche nach dem kürzesten Pfad zur Berechnung der Distanzmatrix unter Einbezug von Einbahnstraßen. Anhand des Beispiels kann auch die Funktionalität der Pfadsuche bei Einbahnstraßen gezeigt werden. Die grün hinterlegten Straßen sind in beide Richtungen befahrbar, während für rot hinterlegte Straßen eine Einbahnregelung gilt. Das Fahrzeug startet an der blauen Markierung und fährt in Richtung des Kreisverkehrs, wobei die Richtung der Einbahnregelung korrekt erkannt und verarbeitet wird.

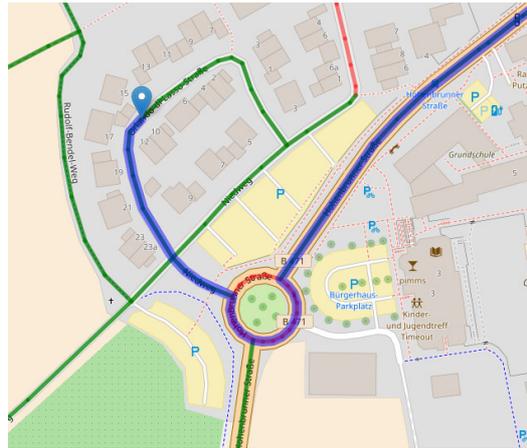


Abbildung 4-11 Kürzester Pfad unter Einbezug von Einbahnstraßen (Karte: [101])

Neben der Nutzung der Distanz zwischen zwei Punkten wären auch Größen wie z.B.

- Fahrtzeit,
- Kosten und
- Energieverbrauch

als Einträge in der Matrix möglich, insofern sie geeignet berechnet werden können. Damit könnte der Routing-Algorithmus prinzipiell auch zur Bestimmung der Rundtour mit minimalem Energieverbrauch oder minimaler Fahrtzeit genutzt werden.

4.3.5 Streckensegmente und Streckenlängen einer Zustelltour

Nach der Beendigung der Optimierung der Streckenlänge wird das Ergebnis des Routings im Vektor \vec{L}_R gespeichert. \vec{L}_R hat dabei immer zwei zusätzliche Einträge im Vergleich zum Vektor \vec{L}_S , die den Halt am Depot zu Beginn und am Ende der Zustelltour darstellen. Für die Länge des Vektors \vec{L}_R gilt daher:

$$n_R = |\vec{L}_R| = |\vec{L}_S| + 2 = n_{St} + 2 \quad (4.14)$$

Wenn $l_{R,j}$ den Eintrag des Vektors \vec{L}_R an der Stelle j bezeichnet, dann können mit Hilfe der Distanzmatrix charakteristische Streckenlängen für die Belieferung eines Zustellgebiets bestimmt werden, die von den jeweiligen Zustellfahrzeugen zurückgelegt werden müssen:

- die Distanz zwischen dem ersten Eintrag $l_{R,1}$ und zweiten Eintrag $l_{R,2}$ repräsentiert die Streckenlänge d_{An} für die Anfahrt in das jeweilige Zustellgebiet
- die Distanz zwischen dem vorletzten Eintrag l_{R,n_R-1} und dem letzten Eintrag l_{R,n_R} stellt die Streckenlänge $d_{Rück}$ für die Rückfahrt vom Zustellgebiet zum Depot dar
- die Summe der Distanzen zwischen dem zweiten Eintrag $l_{R,2}$ und dem vorletzten Eintrag l_{R,n_R-1} ist die Streckenlänge d_L für die Belieferung der Kunden im Zustellgebiet
- die Summe der Distanzen zwischen allen Einträgen des gesamten Vektors ist die gesamte Tourenlänge d_T

Abbildung 4-12 veranschaulicht die Berechnung der charakteristischen Streckenlängen. Die blau markierten Angaben zeigen die Berechnung für das gegebene Beispiel des Vektors \vec{L}_R .

$$d_T = d_{Depot \rightarrow 5} + d_{5 \rightarrow 3} + \dots + d_{6 \rightarrow Depot}$$

$$d_T = \sum_{i=l_{R,1}}^{l_{R,n-1}} d_{l_{R,i} \rightarrow l_{R,i+1}}$$

$$\vec{L}_R = [\text{Depot} ; 5 ; 3 ; 7 ; 2 ; 4 ; 8 ; 9 ; 1 ; 6 ; \text{Depot}]$$

$$d_{An} = d_{l_{R,1} \rightarrow l_{R,2}} \quad d_L = \sum_{i=l_{R,2}}^{l_{R,n-2}} d_{l_{R,i} \rightarrow l_{R,i+1}} \quad d_{Rück} = d_{l_{R,nR-1} \rightarrow l_{R,nR}}$$

$$d_{An} = d_{Depot \rightarrow 5} \quad d_{Rück} = d_{6 \rightarrow Depot}$$

$$d_L = d_{5 \rightarrow 3} + d_{3 \rightarrow 7} + \dots + d_{1 \rightarrow 6}$$

Abbildung 4-12 Berechnung der charakteristischen Streckenlängen einer Zustelltour

Für die eingeführten charakteristischen Strecken gilt insbesondere

$$d_T = d_{An} + d_L + d_{Rück} \quad (4.15)$$

Routing von Sendungsempfängern bzw. Kunden

Zusätzlich zum Routing der Zustellfahrzeuge können auch die Strecken der Sendungsempfänger bzw. Kunden geplant werden. Dies wird insbesondere für Untersuchungen in verschiedenen Szenarien benötigt, in denen Kunden zu einem bestimmten Standort fahren müssen, um die Sendungen abzuholen. Auch beim Routing von Kunden wird der Ansatz verfolgt, dass immer die kürzeste Verbindung zwischen Start und Ende der Route gewählt wird. Daher kann die Distanzmatrix auch zur Bestimmung dieser Streckenlängen genutzt werden.

4.4. Modellierung des Energieverbrauchs – FeVER VehEnC

Auf Basis von zufällig ausgewählten Fahrzeugrouten aus dem Modell FeVER Delivery wird der spezifische Endenergiebedarf der Zustellfahrzeuge bestimmt. Da der Verlauf von Geschwindigkeit und Beschleunigung über der Zeit wesentlicher Bestandteil zur Bestimmung des Endenergiebedarfs eines Fahrzeugs ist, wird zunächst das Vorgehen zur Synthese von Fahrprofilen erläutert.

4.4.1 Erzeugung von Fahrprofilen

Für die Synthese von Fahrprofilen stehen viele verschiedene Ansätze zur Verfügung, die einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad der Ergebnisse haben. Ein Fahrprofil bezeichnet im allgemeinen den zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeit eines Fahrzeugs, auf Basis derer auch die Beschleunigung als Änderungsrate der Geschwindigkeit über der Zeit berechnet werden kann. Mit Hilfe von Verkehrssimulationen [133] [134], die meist mit agentenbasierten Modellen arbeiten, kann unter anderem der Verkehrsfluss (z.B. Stau oder „Stop and Go“) abgebildet werden, der sich über die Auslastung der jeweiligen Straße ergibt. Ebenso kann der Einfluss von Wartezeiten an Ampeln und Vorfahrtsregeln („Rechts vor Links“,

Stoppschildern und Vorfahrtsstraßen) durch diese Modelle beachtet werden. Da die genannten Punkte sich deutlich im Geschwindigkeitsprofil eines Fahrzeugs widerspiegeln, sind Verkehrssimulationen als prinzipiell geeignete Möglichkeit für die Erzeugung der Fahrprofile anzusehen.

Da Verkehrssimulationen jedoch sehr viele Eingangsdaten für die realitätsnahe Abbildung der Verkehrsbedingungen benötigen, u.a. Daten zum Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer (Startzeiten, Ziele etc.), wurde in dieser Arbeit der Algorithmus aus [135] zur Erzeugung der Fahrprofile genutzt und für die Verwendung mit Daten von OSM und dem Einsatz in FeVER angepasst. Im Gegensatz zur Verkehrssimulation können in diesem Algorithmus die Verkehrsbedingungen und Vorfahrtsregeln nicht abgebildet werden, jedoch werden bei der verwendeten Methodik

- Geschwindigkeitsreduktionen z.B. in Kurven oder beim Abbiegen an Kreuzungen,
- Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie
- Maxima und Minima von Beschleunigung und Geschwindigkeit

des Fahrzeugs in Betracht gezogen werden. Damit wird im Gegensatz zur in [136] vorgestellten Vorgehensweise eine höhere Genauigkeit erreicht. Ein wesentlicher Bestandteil der angewandten Methodik ist neben einer Limitierung der maximalen und minimalen Beschleunigung der Fahrzeuge auch die Begrenzung der Änderungsrate der Beschleunigung über der Zeit, der in der Physik auch als Ruck j bezeichnet wird.

$$j = \frac{da(t)}{dt} = \frac{d^2v(t)}{dt^2} = \frac{d^3s(t)}{dt^3} \quad (4.16)$$

Da das Ziel die Berechnung des mittleren spezifischen Energieverbrauchs für eine Stichprobe der Zustelltouren ist, könnten prinzipiell Vorfahrtsregeln durch zusätzliche Zufallsexperimente in die Simulation integriert werden. Da durch das Hinzufügen dieser Entscheidung über das etwaige Anhalten des Fahrzeugs an einer Kreuzung jedoch eine größere Stichprobe, d.h. mehr synthetisierte Fahrprofile, für die Konvergenz der Ergebnisse benötigt werden, wurde zur Vereinfachung des Modells auf dieses Vorgehen verzichtet. Auf Grund der Tatsache, dass Zustellfahrzeuge bei der Belieferung meist in Wohn- und Anliegerstraßen fahren, die vom starken Verkehrsfluss während der Hauptverkehrszeiten tendenziell nicht tangiert werden, wurde auch auf die Abbildung einer Geschwindigkeitsreduktion durch diesen Faktor verzichtet.

Für die Erzeugung der Fahrprofile wird die Fahrzeugtour einer ausgewählten Lieferstichprobe in einzelne Teilabschnitte, die zwischen den Stopps zur Belieferung der Kunden liegen, zerlegt. Um Rechenzeit bei der Synthese einzusparen, wird auch hier auf das Erzeuger-Verbraucher-System zur Parallelisierung von Berechnungen zurückgegriffen, wobei die einzelnen *Consumer* immer die Berechnung eines Fahrprofils zwischen zwei Stopps als Aufgabe zugewiesen bekommen.

Berechnung der maximalen Geschwindigkeit in Kurven und beim Abbiegen

Ein wichtiger Aspekt im verwendeten Algorithmus zur Erzeugung der Fahrprofile ist die Beachtung von Geschwindigkeitsreduktionen bei der Fahrt durch Kurven. Die maximale Geschwindigkeit, die ein Fahrzeug in einer Kurve bzw. beim Abbiegen fahren kann, lässt sich mit Hilfe der Querschleunigung sowie dem Kurvenradius mit Hilfe der Formel für die

Zentrifugalkraft bestimmen, vgl. Formel (4.17). Der Wert der Querbewegung wird dabei durch viele Faktoren bestimmt, z.B.

- Fahrbahnbeschaffenheit (z.B. Asphalt oder Kies)
- Witterung (z.B. Schneeglätte auf der Fahrbahn)
- Haftung der Reifen (Profilbeschaffenheit)
- Schwerpunkt des Fahrzeugs (Verhinderung des Umkippen) [79]

$$v_{max,Kurve} = \sqrt{a_{quer} \cdot r_{Kurve}} \quad (4.17)$$

mit:

$v_{max,Kurve}$ Maximale Kurvengeschwindigkeit

a_{quer} Querbewegung

r_{Kurve} Kurvenradius

Der Kurvenradius für die Synthese der Fahrprofile im Modell wird dabei über den Radius des Umkreises des Dreiecks berechnet, das jeweils drei aufeinanderfolgende Punkte eines Straßensegments aufspannen [135], vgl. **Abbildung 4-13**.

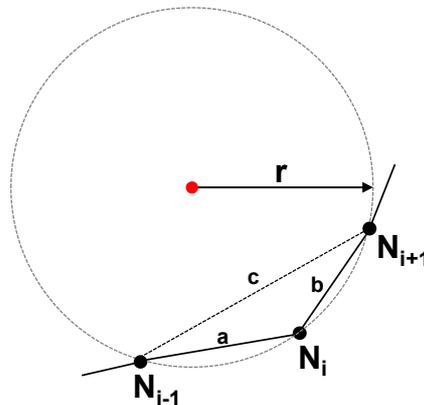


Abbildung 4-13 Bestimmung des Kurvenradius aus Geodaten (in Anlehnung an [135])

Im Gegensatz zu [135] wird der Streckenverlauf nicht über eine Spline-Interpolation von Geokoordinaten bestimmt, sondern ist auf Grund der vorgegebenen Abbildung von Streckenverläufen in OSM als Polygonzug bereits ausreichend interpoliert. Insbesondere nimmt die Länge der einzelnen Streckensegmente der Polygonzüge ab, wenn enge Kurven in OSM abgebildet werden.

Der Radius des Umkreises des Dreiecks kann mit (4.18) berechnet werden, wobei der Flächeninhalt mit Hilfe des Satz von Heron (vgl. (4.19)) bestimmt wird. Die Kantenlängen des Dreiecks werden über die Geokoordinaten der Ecken des Dreiecks und der Formel zur Bestimmung der Großkreisdistanz berechnet. [135]

$$r = \frac{a \cdot b \cdot c}{4 \cdot A} \quad (4.18)$$

mit:

r Radius des Umkreises des Dreiecks N_{i-1}, N_i, N_{i+1}

a, b, c Kantenlängen des Dreiecks

A Flächeninhalt des Dreiecks

$$A = \sqrt{s(s-a) \cdot (s-b) \cdot (s-c)} \quad (4.19)$$

$$s = \frac{a+b+c}{2}$$

mit:

a, b, c Kantenlängen des Dreiecks

Vorgehen zur Synthese der Fahrprofile [135]

Für die Erzeugung eines Fahrprofiles wird zu Beginn die Geschwindigkeitsbegrenzung entlang der Route aus dem Straßengraph extrahiert sowie die maximal mögliche Geschwindigkeit auf Basis der Kurvenradien bestimmt, sodass diese beiden Kenngrößen auf Basis der momentanen Position des Fahrzeugs abgefragt werden können.

Beginnend bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit $v_{Fzg} = 0$ (Fahrzeug steht am Startpunkt) wird eine geschwindigkeitsabhängige Strecke in Front des Fahrzeugs, die eine Vorausschau des Fahrers darstellt, nach Punkten durchsucht, bei denen das Fahrzeug abbremsen muss (kritischer Punkt). Die Länge der Strecke der Vorausschau wird dabei über die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeugs und den vorgegebenen, konstanten Wert der zeitlichen Vorausschau berechnet. Anschließend wird für jeden Zeitschritt auf Basis dieser Punkte entschieden, welchen Zustand das Fahrzeug einnimmt:

- Fahrzeug muss beschleunigen, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit nicht der maximal möglichen Geschwindigkeit entspricht und kein kritischer Punkt in Sichtweite ist
- Fahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit der maximal möglichen Geschwindigkeit entspricht und kein kritischer Punkt in Sichtweite ist.
- Fahrzeug muss abbremsen, wenn ein kritischer Punkt in Sichtweite ist

Die maximal mögliche Geschwindigkeit wird dazu immer über das Minimum von Geschwindigkeitsbegrenzung, Kurvengeschwindigkeit und zulässiger Fahrzeughöchstgeschwindigkeit an der aktuellen Fahrzeugposition bestimmt.

Nach der Bestimmung der Beschleunigungen bzw. Bremsverzögerungen zur Erreichung der vorgegebenen Geschwindigkeit werden diese noch auf Basis des Rucks und der maximal erlaubten Werte, wie in [135] beschrieben, limitiert. Durch die Grundgesetze der Kinematik wird im Anschluss die Fahrzeuggeschwindigkeit und -position aktualisiert und mit dem nächsten Zeitschritt fortgefahren, beginnend wieder bei der Suche nach Punkten in der Vorausschau zur etwaigen Geschwindigkeitsreduktion. Die Synthese des Fahrprofils stoppt schlussendlich, wenn das Fahrzeug die Endposition des Tourensegments erreicht.

Parametrierung des Algorithmus

Zur Parametrierung der Methodik zur Erzeugung der Fahrprofile hinsichtlich Beschleunigung und Ruck wurde der *Baltimore Parcel Delivery Cycle* [137] des *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) genutzt. Dieser Testzyklus wurde basierend auf real gemessenen Fahrten von Zustellfahrzeugen in Baltimore im US-Bundesstaat Maryland erzeugt und wird unter anderem zur energetischen Bewertung von alternativen Antrieben für die Paketzustellung in den Vereinigten Staaten von Amerika genutzt. Der Fahrzyklus mit einer Dauer von 3853 Sekunden bzw. rund einer Stunde zeichnet sich durch insgesamt

41 Fahrzeugstopps bei einer gesamt zurückgelegten Entfernung von etwa 33 Kilometern bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 30,75 km/h aus [137].

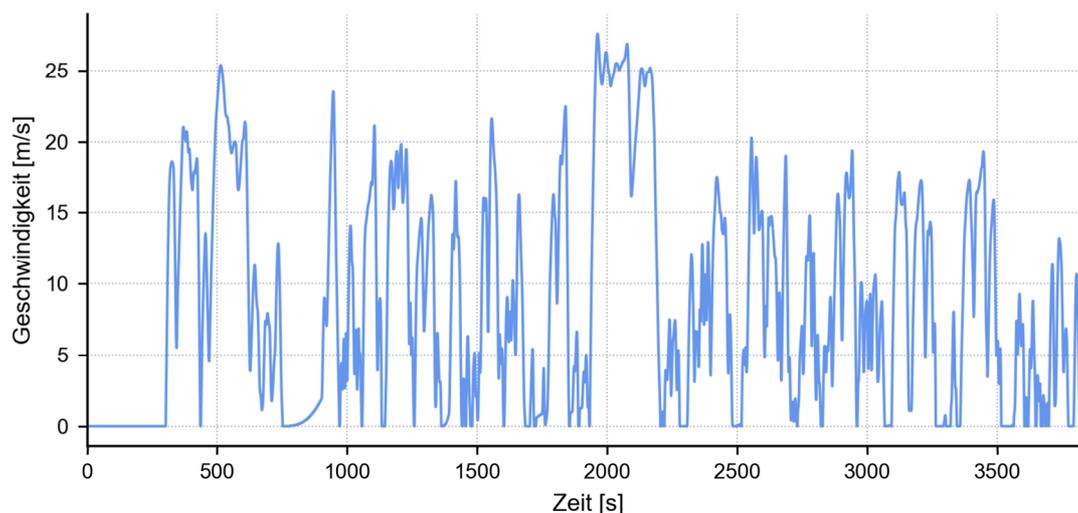


Abbildung 4-14 Geschwindigkeitsprofil des NREL Baltimore Parcel Delivery Cycle (Daten aus [137])

Auf Grund der Tatsache, dass keine realen Fahrprofile für die Anpassung der synthetisierten Fahrprofile zur Verfügung standen, wird angenommen, dass die maximalen Werte von Beschleunigung und Bremsverzögerung sowie maximaler und minimaler Ruck des *NREL Baltimore Parcel Delivery Cycle* repräsentativ für die Zustellfahrzeuge in allen Untersuchungsregionen im Modell sind. **Tabelle 4-3** fasst die gewählten Parameter für die Synthese der Fahrprofile zusammen.

Tabelle 4-3 Parameter für die Fahrprofilssynthese

Parameter	Wert
Zeitliche Auflösung für die Synthese	0,5 s
Maximale Beschleunigung	1,8 m/s ²
Maximale Bremsverzögerung	-2,9 m/s ²
Maximaler Ruck	1,74 m/s ³
Minimaler Ruck	-2,95 m/s ³
Maximale Querbeschleunigung	2,5 m/s ²
Maximale Geschwindigkeit	85 km/h
Zeitliche Vorausschau	5,5 s

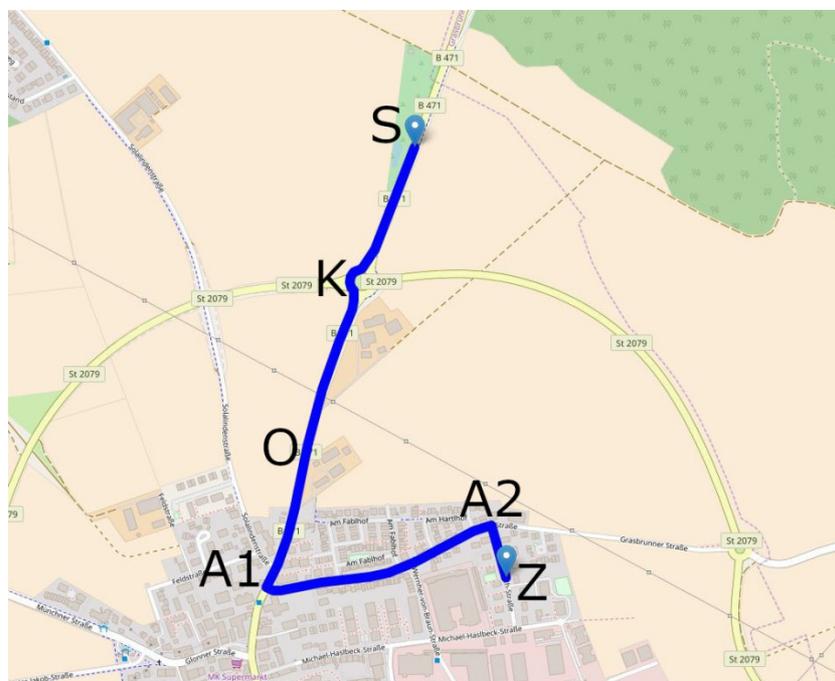
Zusätzlich wurden typische Geschwindigkeiten für verschiedene Straßentypen im Modell hinterlegt, falls die Geodaten aus OSM keine Informationen zur Geschwindigkeitsbegrenzung auf dem Straßensegment beinhalten (**Tabelle 4-4**).

Tabelle 4-4 Geschwindigkeitsbegrenzungen für verschieden Straßentypen

Straßentyp [112]	Bezeichnung OSM	V _{Max}
Bundesstraßen	<i>primary</i>	80 km/h
Landes-, Staats- oder Kreisstraßen	<i>secondary</i>	50 km/h
Straßen in und an Wohngebieten	<i>residential</i>	30 km/h
Nebenstraßen	<i>unclassified</i>	20 km/h
Innerstädtische Vorfahrtsstraßen	<i>tertiary</i>	30 km/h

Beispiele für synthetisierte Fahrprofile

Das in **Abbildung 4-16** dargestellte Fahrprofil zeigt die synthetisierten Verläufe von Geschwindigkeit und Beschleunigung für die Fahrt auf der in **Abbildung 4-15** gezeigten Route.

**Abbildung 4-15** Route für Fahrprofil (Karte: [101])

Beginnend am Startpunkt S beschleunigt das Fahrzeug bis zu einer Geschwindigkeit von rund 70 km/h. Die Geschwindigkeitsbegrenzung wird vom Fahrzeug dabei nicht erreicht, da der Kreisverkehr K in Sichtweite des Fahrzeugs kommt, in dem nur geringere Geschwindigkeiten auf Grund der Fahrbahnkrümmung möglich sind. Das Fahrzeug beginnt daher zu Bremsen um die maximal mögliche Geschwindigkeit von circa 18 km/h bei der Einfahrt im Kreisverkehr zu erreichen. Nach der Einfahrt in den Kreisverkehr kann es wieder geringfügig beschleunigen und muss für die Ausfahrt aus dem Kreisverkehr erneut die Geschwindigkeit reduzieren. Nachdem das Fahrzeug den Kreisverkehr passiert hat, beschleunigt es erneut um nach einer Zeit von circa 60 Sekunden das Ortsschild O zu erreichen, ab dem eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h gilt. Zum Abbiegen in die Wohnstraße am Punkt A1 muss es die Geschwindigkeit reduzieren, um dann in dieser Straße mit circa

30 km/h zu fahren. Nach dem erneuten Abbiegen am Punkt A2 bremst das Fahrzeug ab, um am Zielpunkt Z der Route zum Stehen zu kommen.

Das leichte Über- bzw. Unterschwingen der Geschwindigkeit beim Beschleunigen bzw. Abbremsen an manchen Punkten (u.a. bei circa 22 s, 28 s und 60 s) kann durch die Limitierung des Rucks begründet werden. Auf Grund der Tatsache, dass der Ruck, d.h. die Änderungsrate der Beschleunigung über der Zeit begrenzt ist, erlaubt der Algorithmus keine Anpassung der Werte in dem Maße, in dem es für die direkte Erreichung der gewünschten Geschwindigkeit in der verbleibenden Zeit notwendig wäre.

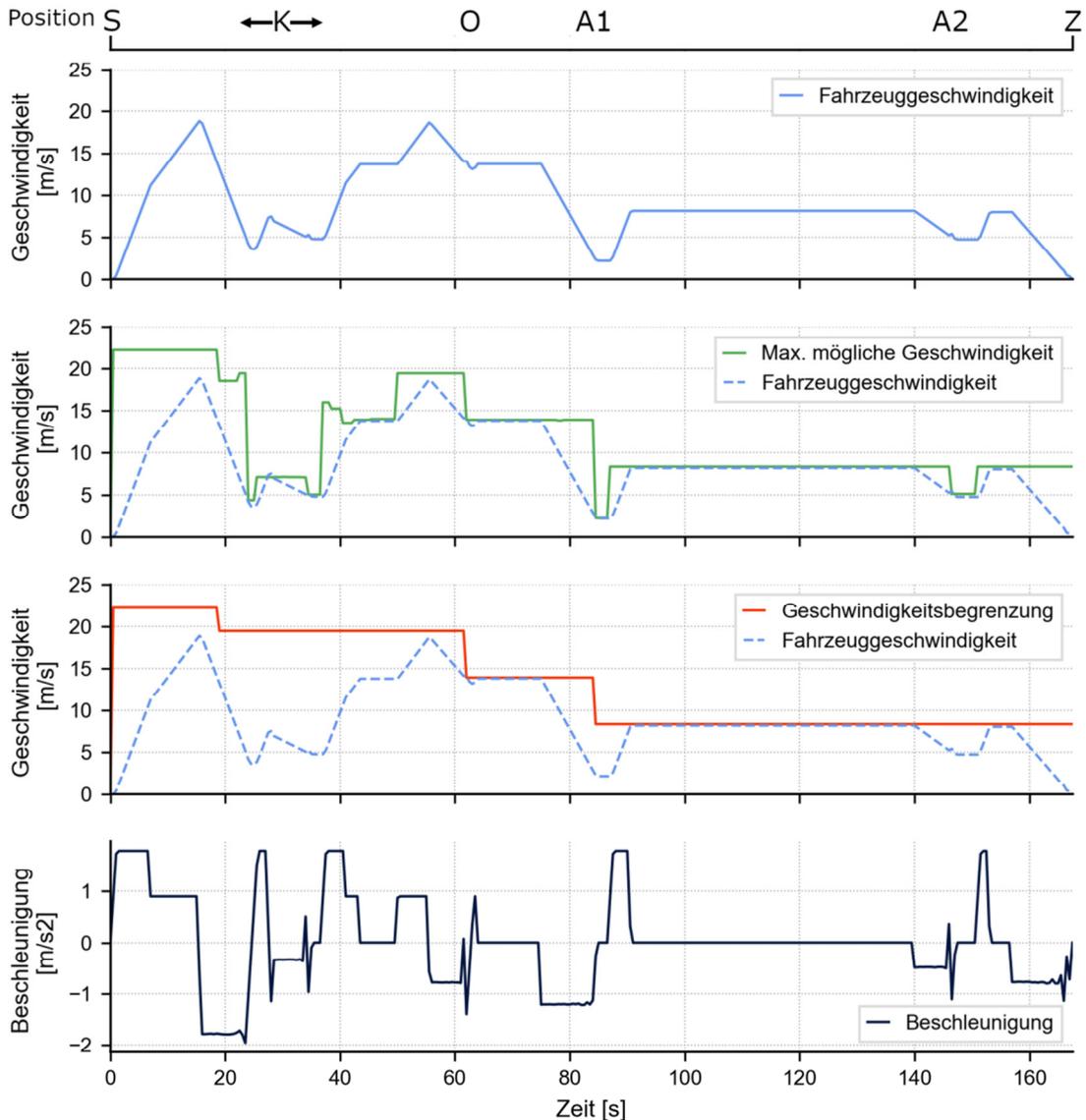


Abbildung 4-16 Beispiel für ein synthetisiertes Fahrprofil

Eine andere Visualisierung zur Verdeutlichung der Detaillierungstiefe der Fahrprofilsynthese zeigt **Abbildung 4-17**. Im Gegensatz zur Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Geschwindigkeit bietet diese Visualisierung die Möglichkeit einer örtlich aufgelösten Interpretation entlang der Fahrzeugroute. Auch hier erkennt man deutlich das Abbremsen des Fahrzeugs in Kurven.

In Abhängigkeit des Kurvenradius ergibt sich dabei teilweise eine deutliche Geschwindigkeitsreduktion. Bei Abbiegevorgängen mit einem Winkel von nahe 90° reduziert der Algorithmus die Geschwindigkeit des Fahrzeugs erheblich (vgl. Abbiegevorgang links oben in Abbildung 4-17). In Kurven mit größeren Radien ist diese errechnete Geschwindigkeitsreduktion deutlich geringer ausgeprägt. Zusätzlich zur Darstellung der Fahrzeuggeschwindigkeit verdeutlicht die Abbildung auch erneut die Unterscheidung und Einhaltung von Fahrspuren bei der Erstellung der Fahrzeugrouten.

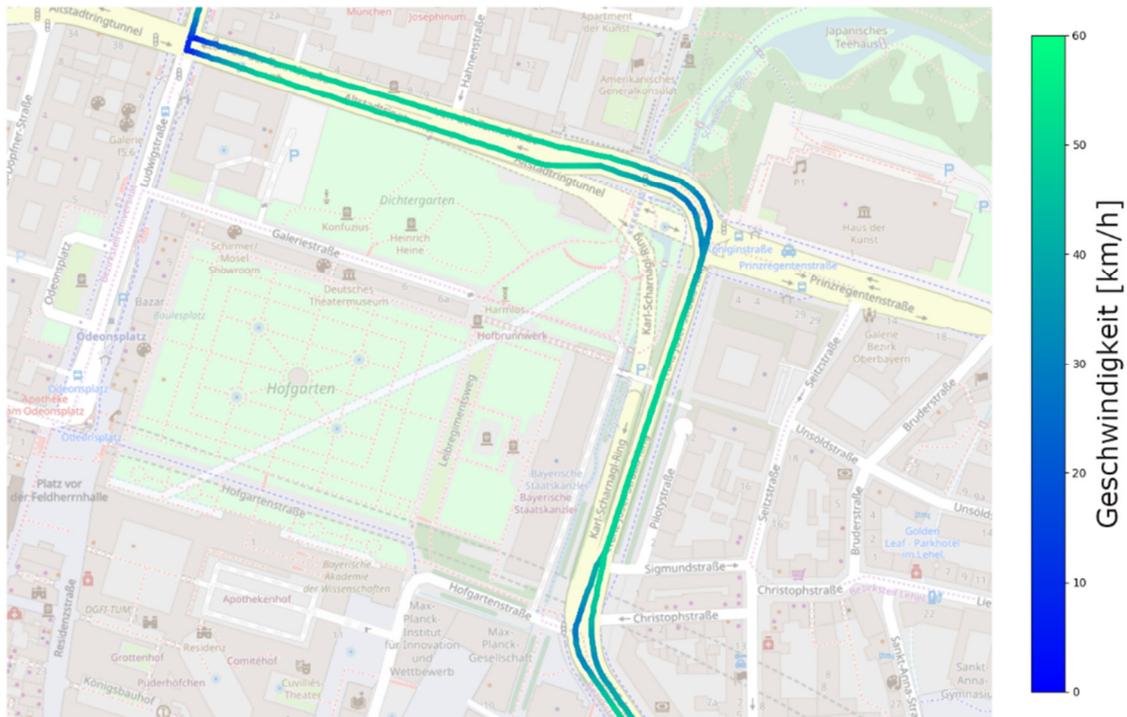


Abbildung 4-17 Reduktion der Geschwindigkeit in Kurven (Karte: [101])

Erstellung von Fahrprofilen für eine Zustelltour

Die einzeln erzeugten Fahrprofile für die Abschnitte der Zustelltour werden nach der Synthese zu einem kompletten Fahrprofil für die Zustellung ergänzt. Um die Einflüsse der verschiedenen Streckenabschnitte bei der Belieferung auch analysieren zu können, werden pro Zustelltour Fahrprofile für

- die Anfahrt in das Zustellgebiet,
- die Fahrt im Zustellgebiet,
- die Rückfahrt zum Depot sowie
- die komplette Zustelltour

erzeugt. Da davon ausgegangen wird, dass die Fahrer beim Anhalten das Zustellfahrzeug abschalten (d.h. die Zündung abstellen), können die einzelnen Fahrprofile bei der Erstellung der Fahrprofile für die Fahrt im Zustellgebiet und für die komplette Zustelltour direkt aneinandergereiht werden. Die vier pro Zustelltour erstellten Fahrprofile dienen im Anschluss als Eingangsdaten für das Fahrzeugenergiebedarfsmodell.

4.4.2 Fahrzeugenergiebedarfsmodell

Zur Bestimmung des Energiebedarfs während der Zustelltour wurde ein Modell auf Basis der Längsdynamik des Fahrzeugs [138] implementiert. Das Fahrzeugenergiebedarfsmodell beruht auf der Berechnung des mechanischen Leistungsbedarfs am Rad, der durch die Gesetze der Fahrmechanik sowie Fahrzeugkenngrößen bestimmt werden kann. Der so für jeden Punkt des Fahrprofils, d.h. für jedes Tupel aus Beschleunigung und Geschwindigkeit, bestimmte Leistungsbedarf wird als Eingangsgröße für die Berechnung des Endenergieverbrauchs genutzt. Dazu werden die Verluste in verschiedenen Komponenten bzw. energetisch relevanten Baugruppen des Fahrzeugs, d.h.

- mechanischer Antriebsstrang,
- Antriebsmotor,
- Nebenverbraucher und
- Energiespeicher

in Form von Komponentenmodellen (**Abbildung 4-18**) bilanziert. Die Modelle der jeweiligen Komponenten benötigen dabei teilweise zusätzliche technische oder fahrzeugspezifische Informationen, um z.B. auslastungsabhängige Wirkungsgrade zu beachten.

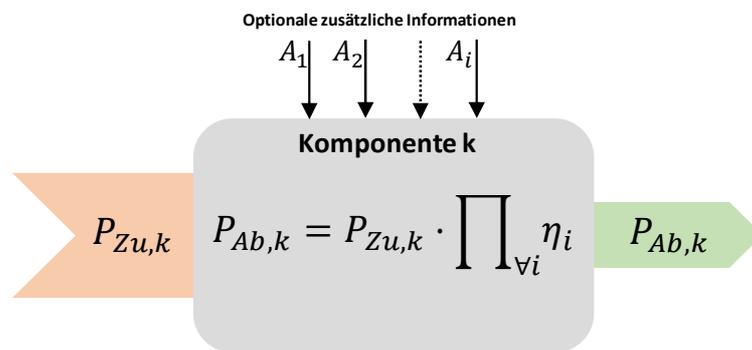


Abbildung 4-18 Komponentenmodell für energetisch relevante Baugruppen

Nach der Bilanzierung der auftretenden Verluste, kann mit zeitlicher Integration des Leistungsbedarfs bzw. der Aufsummierung der einzelnen Leistungen und Multiplikation mit der Dauer eines Zeitintervalls der Endenergiebedarf des Fahrzeugs bestimmt werden:

$$E(t = \tau) = \int_0^{\tau} P(t) dt = \sum_{i=0}^{\tau} P_i(t) \Delta t \quad (4.20)$$

Leistungsbedarf am Rad

Der Leistungsbedarf am Rad wird mit den Gesetzen der Fahrmechanik berechnet. Dabei werden die vier Fahrwiderstände

- Luftwiderstand F_L (4.21),
- Steigungswiderstand F_{St} (4.22)
- Rollwiderstand F_R (4.23) und
- Beschleunigungswiderstand F_B (4.24)

in Betracht gezogen. [139] [138] [79]

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_L c_W A_{St} v^2(t) \quad (4.21)$$

mit:

ρ_L	Dichte von Luft (1,204 kg/m ³)
c_W	Luftwiderstandsbeiwert
A_{St}	Stirnfläche des Fahrzeugs
$v(t)$	Momentane Geschwindigkeit des Fahrzeugs

$$F_S = m_{Fzg} g \sin(\alpha)$$

mit:

m_{Fzg}	Fahrzeugmasse	(4.22)
g	Erdbeschleunigung	
α	Winkel der Fahrbahneigung gegenüber der Horizontalen	

$$F_R = m_{Fzg} g f_R \cos \alpha$$

mit:

m_{Fzg}	Fahrzeugmasse	(4.23)
g	Erdbeschleunigung	
f_R	Rollreibungsbeiwert	
α	Winkel der Fahrbahneigung gegenüber der Horizontalen	

$$F_B = \lambda m_{Fzg} a(t)$$

mit:

λ	Drehmassenzuschlagsfaktor	(4.24)
m_{Fzg}	Fahrzeugmasse	
$a(t)$	Momentane Beschleunigung des Fahrzeugs	

Für die Berechnung der Fahrwiderstände werden folgende Annahmen getroffen:

- Windstille: Die Annahme von Windstille ermöglicht die Nutzung der Fahrzeuggeschwindigkeit v_{Fzg} für die Berechnung des Luftwiderstands ohne vektorielle Betrachtungen. Auf Grund der Modellierung der Längsdynamik wird davon ausgegangen, dass sich der Luftwiderstand auch bei Kurvenfahrten nicht ändert, d.h. Stirnfläche und c_W -Wert müssen nicht immer an die Fahrbedingungen angepasst werden.
- Ebene Fahrbahn: Da die Geodaten aus OpenStreetMap keine Höheninformationen beinhalten, wird angenommen, dass das Fahrzeug nur auf einer ebenen Fahrbahn fährt, d.h. für den Steigungswiderstand an allen Zeitpunkten in den Fahrprofilen gilt $F_{St} = 0$ N.
- Geschwindigkeitsunabhängiger Rollreibungsbeiwert f_R : Die Unabhängigkeit des Rollreibungsbeiwerts von der Fahrzeuggeschwindigkeit in Kombination mit der Annahme einer ebenen Fahrbahn resultiert in einer ausschließlich verbleibenden Masseabhängigkeit des Rollwiderstands. Nach [138] ist der Rollreibungsbeiwert für Geschwindigkeiten bis circa 85 km/h annähernd konstant, sodass diese Annahme in Kombination mit der festgelegten Fahrzeughöchstgeschwindigkeit von 85 km/h gerechtfertigt ist.

- Drehmassenzuschlagsfaktor: Der Drehmassenzuschlagsfaktor bildet das Trägheitsmoment aller rotierenden Teile des Fahrzeugs (z.B. Räder, Motor etc.) ab. Als Wert wird für alle untersuchten Fahrzeuge $\lambda = 1,1$ angesetzt.

Nach der Berechnung der Fahrwiderstände wird durch Multiplikation der Summe der einzelnen Fahrwiderstände mit der momentanen Fahrzeuggeschwindigkeit der Leistungsbedarf am Rad mit (4.25) bestimmt.

$$P_{Rad}(t) = \sum_i F_i(t) \cdot v(t) = (F_L(t) + F_S(t) + F_R(t) + F_B(t)) \cdot v(t) \quad (4.25)$$

Fahrzeugmasse

Wie die Gleichungen (4.21) bis (4.24) verdeutlichen, hat die Fahrzeuggesamtmasse m_{Fzg} einen bedeutenden Einfluss auf den Energie- und Leistungsbedarf des Fahrzeugs. Da die Masse der Zustellfahrzeuge während einer Zustelltour auf Grund der ausgelieferten Sendungen abnimmt, wurde die Gewichtsreduktion des Zustellfahrzeugs durch die Belieferung von Kunden im Modell abgebildet. Die Fahrzeuggesamtmasse bekommt dadurch eine zeitliche Abhängigkeit, wobei die berechnete Fahrzeugmasse immer für einen Abschnitt der Zustelltour zwischen zwei Kunden, d.h. zwischen zwei Fahrzeugstopps, gültig ist.

Gleichung (4.26) zeigt die verwendete Berechnungsvorschrift für die Fahrzeuggesamtmasse der Zustellfahrzeuge. Die Anzahl der verbleibenden Belieferungen im Fahrzeug, gültig für die Berechnungen zwischen Stopp i und $i + 1$ wird dabei immer am Fahrzeugstopp $i + 1$ um die Anzahl der Belieferungen bei $i + 1$ reduziert.

$$m_{Fzg}^{i \rightarrow i+1} = m_{Leer} + \overline{m}_A \cdot N_L^{i \rightarrow i+1} \quad (4.26)$$

mit:

$m_{Fzg}^{i \rightarrow i+1}$ Fahrzeuggesamtmasse zwischen Stopp i und $i+1$

m_{Leer} Fahrzeugleermasse

\overline{m}_A Durchschnittliche Masse einer Belieferung

$N_L^{i \rightarrow i+1}$ Anzahl der verbleibenden Belieferungen im Fahrzeug zwischen Stopp i und $i+1$

Als Beispiel zeigt **Abbildung 4-19** den Verlauf der Fahrzeugmasse über der Zeit für die komplette Liefertour eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor und einer Fahrzeugkapazität von 150 Belieferungen (Fahrzeugtyp ICEFV150), wobei der Verlauf der Fahrzeuggesamtmasse für eine durchschnittliche Sendungsmasse von 2,5 kg und 3,5 kg dargestellt ist. Zu Beginn fährt das Fahrzeug, beladen mit 136 Sendungen in das Zustellgebiet, d.h. die Fahrzeugmasse bleibt konstant. Im Zeitbereich von circa 1.000 s bis 5.000 s werden die Kunden beliefert, was durch eine Abnahme der Fahrzeuggesamtmasse charakterisiert ist. Ab circa 5.000 s beginnt für das Fahrzeug die Rückfahrt in das Depot, wobei alle Sendungen ausgeliefert wurden, d.h. die Fahrzeuggesamtmasse ist identisch mit der Fahrzeugleermasse. Wie bereits erwähnt, wird angenommen, dass der Fahrer das Fahrzeug bei der Belieferung komplett abstellt, d.h. die Zündung bzw. Motor abstellt. Daher müssen die Zeitdauern für die Belieferung nicht beachtet werden, d.h. die Zeitdauer aus **Abbildung 4-19** für die Belieferung der 136 Haushalte ist reine Fahrzeit.

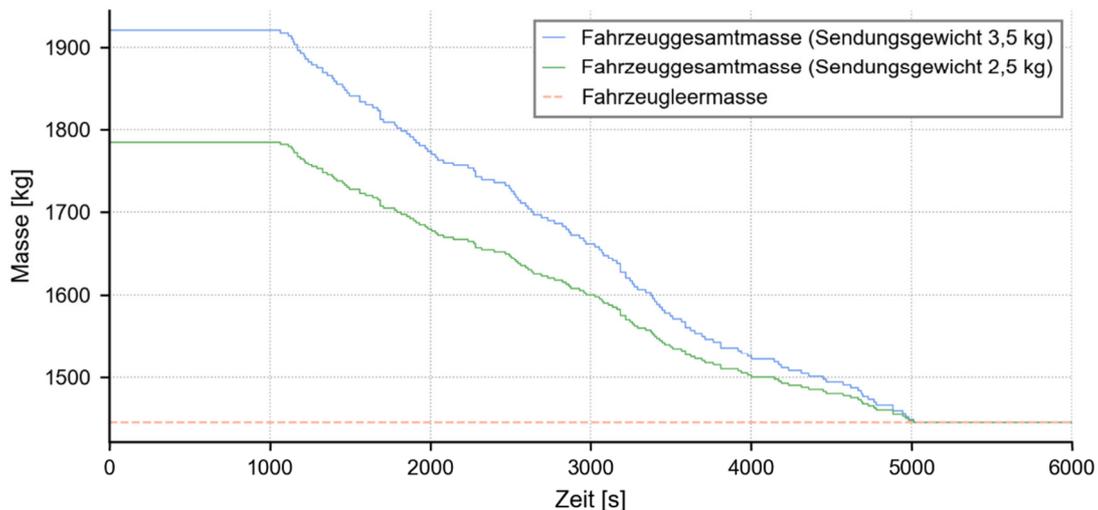


Abbildung 4-19 Zeitliche Abhängigkeit der Fahrzeugmasse

Verluste im mechanischen Antriebsstrang

Die im mechanischen Antriebsstrang von Fahrzeugen auftretenden Verluste in Getriebe, Differential, Lagern etc. werden über den konstanten Wirkungsgrad η_G modelliert. Mit Hilfe von (4.27) kann damit die mechanische Leistung an der Motorwelle berechnet werden:

$$P_{MW} = \frac{P_{Rad}}{\eta_G}$$

mit:

P_{MW} Leistung an der Motorwelle

P_{Rad} Leistung am Rad

η_G Wirkungsgrad des mechanischen Antriebsstrangs

(4.27)

Modellierung von Antriebsmotor und Nebenverbrauchern

Durch das häufige Anfahren und Bremsen der Zustellfahrzeuge wird der Antriebsmotor an vielen unterschiedlichen Betriebspunkten betrieben. Eine Abbildung des Antriebsmotors mit einem konstanten Wirkungsgrad im Modell, wie z.B. beim Getriebe, würde daher unvermeidlich zu Ungenauigkeiten führen. In FeVER werden die Wirkungsgrade der Antriebsmotoren daher in Abhängigkeit der Auslastung modelliert.

Verbrennungskennlinienfelder bzw. Muscheldiagramme zeigen den Motorwirkungsgrad bzw. die Kraftstoffeffizienz in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment eines Verbrennungsmotors. Zur Bestimmung des Wirkungsgrads an einem definierten Betriebspunkt müssten demnach die beiden Größen bestimmt werden. Auf Grund der Tatsache, dass die Leistung, die der Motor zur Verfügung stellen muss, von Drehmoment und Drehzahl abhängig ist, müsste bei diesem Vorgehen zur Bestimmung des Wirkungsgrads ein detailliertes Getriebemodell erstellt werden. Neben einer Abbildung von unterschiedlichen Übersetzungsverhältnissen in verschiedenen Gängen müssten auch die auftretenden Schaltvorgänge, z.B. in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit bzw. dem Nutzerverhalten, modelliert werden. [76]

Im Gegensatz dazu wird in [139] der Verlauf des Wirkungsgrads über der Auslastung des Motors, sowohl für einen Verbrennungsmotor als auch für einen Elektromotor, mit gegebenen Stützstellen des Wirkungsgrads berechnet. Da bei diesem Vorgehen kein detailliertes Getriebemodell notwendig ist, wurde dieses Vorgehen im Modell umgesetzt. Die Auslastung des Motors lässt sich allgemein mit der in (4.28) gezeigten Formel berechnen.

$$g(t) = \frac{P_{MW}(t)}{P_{MW,max}}$$

mit:

$g(t)$ Momentane Auslastung des Motors

$P_{MW}(t)$ Momentane Leistung an der Motorwelle

$P_{MW,max}$ Maximale Leistung an der Motorwelle (Herstellerangabe)

(4.28)

Die Bestimmung des Verlaufs von Wirkungsgrad über der Auslastung des Motors erfolgt mit Hilfe von Wirkungsgradangaben an vier vorgegebenen Stützstellen mit bekannter Auslastung. Nach einer stückweise linearen Interpolation zwischen den Stützstellen wird die Eingangsleistung des Motors bei diesem Wirkungsgradverlauf für den kompletten Bereich der Ausgangsleistung des Motors berechnet. Die so berechnete Eingangsleistung wird im Anschluss mit einem Polynom 4. Ordnung interpoliert. Der Verlauf des Wirkungsgrads kann abschließend durch die Division der abgegebenen Motorleistung und der interpolierten Eingangsleistung des Motors berechnet werden. [139]

Als Stützstellen für die Berechnung des Wirkungsgradverlaufs werden im Modell die in **Tabelle 4-5** zusammengefassten Daten für Verbrennungsmotoren und Elektromotoren aus [139] genutzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Stützstellen für alle untersuchten Leistungsklassen der verschiedenen Antriebsmotoren gültig sind.

Tabelle 4-5 Stützstellen für die Berechnung des Wirkungsgrads von Verbrennungs- und Elektromotoren [139]

Verbrennungsmotor		Elektromotor	
Motorauslastung	Wirkungsgrad	Motorauslastung	Wirkungsgrad
0,00	0,10	0	0,3
0,10	0,28	0,09	0,86
0,28	0,36	0,65	0,88
1,00	0,26	1,00	0,86

Die aus dem beschriebenen Vorgehen resultierenden Wirkungsgradverläufe für Verbrennungs- und Elektromotoren über der Auslastung zeigt **Abbildung 4-20**. Eine Auswertung bzw. Diskussion der Annahme eines identischen Wirkungsgradverlaufs für alle Leistungsklassen erfolgt in einem späteren Abschnitt dieses Kapitels.

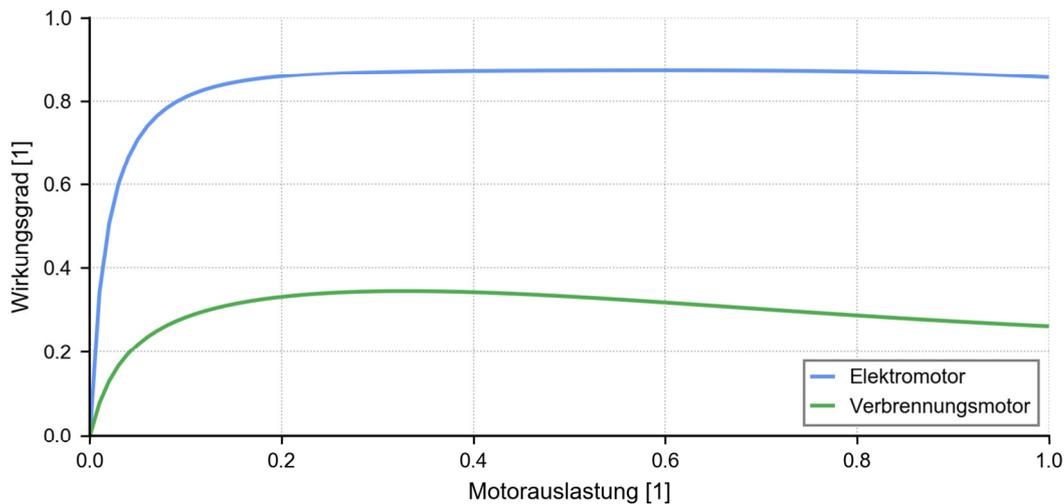


Abbildung 4-20 Wirkungsgradverlauf für Verbrennungs- und Elektromotor

Zusätzlich zum Leistungsbedarf für die Fortbewegung müssen auch Nebenverbraucher bei der energetischen Bilanzierung eines Fahrzeugs betrachtet werden. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor wird dabei im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, dass der Leistungsbedarf der Nebenverbraucher, die direkt mit dem Antrieb in Zusammenhang stehen (d.h. z.B. Öl- und Kühlwasserpumpe, Hydraulikpumpe für die Lenkungsunterstützung, Bremskraftverstärker), bereits im Wirkungsgrad des Motors berücksichtigt werden. Damit müssen lediglich elektrische Nebenverbraucher wie z.B. Navigationssystem, Radio, Fahrerassistenzsysteme, Luftzirkulation in der Fahrerkabine sowie evtl. die Beleuchtungs- und Signalanlage gesondert betrachtet werden. Der Leistungsbedarf dieser elektrischen Nebenverbraucher wird im Modell als unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit bzw. Motorauslastung modelliert und über einen pauschalen Wert von 1200 W berücksichtigt. Durch Betrachtung der Prozesskette zur Bereitstellung der elektrischen Energie durch Lichtmaschine mit Antrieb und Verbrennungsmotor ergibt sich damit ein elektrischer Nebenverbrauch in der Größenordnung von rund 250 W. Im Gegensatz zum konventionellen Fahrzeug müssen beim Elektrofahrzeug einige der genannten mechanischen Nebenverbraucher gesondert angetrieben werden. Wie bei den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor wird dieser zusätzliche Leistungsbedarf mit einem pauschalen Wert von in diesem Fall 500 W berücksichtigt. Mit der Betrachtung des Wirkungsgrads des zugehörigen Antriebs kann auf einen Leistungsbedarf der Nebenaggregate in der Größenordnung von rund 450 W geschlossen werden. [140] [78]

Der Energieverbrauch der Fahrzeugheizung und -klimatisierung wird bei der Modellierung aller Fahrzeuge vernachlässigt, da insbesondere durch das häufige Öffnen- und Schließen der Fahrertüren während der Liefertouren keine Aussagen über Luft- und Wärmeaustausch und somit Verluste, die von der Fahrzeugheizung bzw. Fahrzeugklimaanlage gedeckt werden müssen, getroffen werden können. Ein Anteil des konstanten Leistungsbedarfs der Nebenverbraucher kann jedoch den Ventilatoren für die Luftzirkulation in der Fahrerkabine zugeschrieben werden.

Mit (4.29) kann schlussendlich der Leistungsbedarf für die Fahrzeugfortbewegung bestimmt werden, der sich aus der Summe der Leistung von Antriebsmotor und Nebenverbraucher ergibt. Im Falle von Elektrofahrzeugen wird die Antriebsleistung noch durch den

Wirkungsgrad des Umrichters, der für die Einstellung von Drehzahl bzw. Drehmoment der elektrischen Maschine genutzt wird, dividiert. Wie bei der Berechnung der Verluste im mechanischen Antriebsstrang wird der Wirkungsgrad des Umrichters als konstant angesetzt.

$$P_{Fahren} = P_{An} + P_{NV} = \frac{P_{MW}}{\eta_M(g) \cdot \eta_{Um}} + P_{NV}$$

mit:

P_{Fahren}	Leistungsbedarf für die Fahrzeugfortbewegung	
P_{An}	Antriebsleistung	(4.29)
P_{NV}	Leistungsbedarf der Nebenverbraucher	
P_{MW}	Leistung an Motorwelle	
$\eta_M(g)$	Auslastungsabhängiger Wirkungsgrad des Antriebsmotors	
η_{Um}	Wirkungsgrad des Antriebsumrichters (entfällt bei konventionellen Fahrzeugen, bzw $\eta_{Um} = 1$)	

Energiespeicher

Zusätzlich zu den bereits vorgestellten Teilmodellen wurde auch ein einfaches Energiespeichermodell, das sowohl für Kraftstofftanks als auch für Batterien anwendbar ist, im Modell integriert. Zur Bilanzierung der Verluste beim Ein- und Ausspeichern werden dazu ein Wirkungsgrad für den Ladebetrieb sowie ein Wirkungsgrad für den Entladebetrieb des Speichers genutzt. Dieses Vorgehen kann durch den Vergleich einer Batterie mit einem Kraftstofftank motiviert werden. Im Falle eines Kraftstofftanks können die Entladeverluste durch den Leistungsbedarf der Kraftstoffpumpe begründet werden, wobei der Energieinhalt des Energiespeichers messbar ist. Da beim Betanken des Fahrzeugs keine Verluste im Fahrzeug auftreten, ist der Ladewirkungsgrad bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor identisch zu 100 % zu setzen. Bei elektrischen Energiespeichern hingegen kann der Energieinhalt im Inneren des Speichers beim Laden bzw. Entladen nicht direkt bestimmt bzw. gemessen werden. Meist wird daher die Effizienz mit dem Zyklusnutzungsgrad energetisch bewertet, der die Verluste beim Laden und Entladen in einem Vollzyklus der Batterie beinhaltet. Da im Modell aber nicht immer ein kompletter Zyklus in Betracht gezogen wird, wird auch für Batterien ein hypothetischer Lade- und Entladewirkungsgrad definiert, der

- Verluste des Batteriemanagementsystems sowie
- elektrochemische Ein- und Ausspeicherverluste

abbildet. Dementsprechend muss bei der Bilanzierung des Energieverbrauchs von Elektrofahrzeugen beachtet werden, dass beim Entladen der Batterie im Fahrbetrieb sowie beim Laden der Batterie am Stromnetz und bei der Nutzbremmung im Fahrzeug Verluste auftreten.

Die Leistung im Inneren des Speichers kann demnach mit Formel (4.30) bestimmt werden, wobei zwischen Lade- und Entladevorgang unterschieden werden muss.

$$P_{\text{Speicher}} = \begin{cases} \frac{P_{\text{Fahren}}}{\eta_{\text{Dchg}}} & \text{falls } P_{\text{Fahren}} \geq 0 \text{ (Speicher wird entladen)} \\ P_{\text{Fahren}} \cdot \eta_{\text{Chg}} & \text{falls } P_{\text{Fahren}} < 0 \text{ (Speicher wird geladen)} \end{cases}$$

mit:

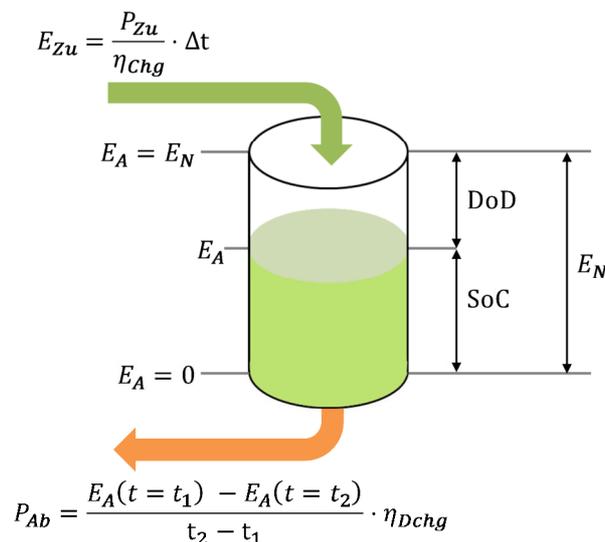
 P_{Speicher} Leistungsbedarf im Inneren des Speichers η_{Dchg} Entladewirkungsgrad des Speichers η_{Chg} Ladewirkungsgrad des Speichers

(4.30)

Neben der Bilanzierung beim Ein- und Ausspeichern von Energie kann mit dem Speichermodell überprüft werden, ob der Energiespeicher ausreichend für die jeweiligen Anforderungen dimensioniert ist. **Abbildung 4-21** zeigt das verwendete, einfache Speichermodell. Der Energiespeicher wird durch den konstanten Nennenergieinhalt E_N charakterisiert. Zur Bestimmung dieses Energieinhalts im Falle von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor wird daher das Volumen des Kraftstofftanks mit dem Heizwert von Dieseldieselkraftstoff in Energieeinheiten umgerechnet. Auf Basis des aktuellen Energieinhalts des Speichers können damit die Kenngrößen

- State of Charge (SoC) sowie
- Depth of Discharge (DoD)

sowohl für einen Kraftstofftank als auch für eine Batterie berechnet werden. Die beim Fahrbetrieb aus dem Inneren des Speichers entnommene bzw. beim Aufladen dem Speicher zugeführte Energiemenge kann mit den beiden in **Abbildung 4-21** dargestellten Formeln berechnet werden, wobei jeweils eine Umrechnung von Leistung in Energie (bzw. umgekehrt) durchgeführt werden muss.

**Abbildung 4-21** Energiespeichermodell

Rekuperation / Nutzbremmung von Elektrofahrzeugen

Die bei der Rekuperation bzw. Nutzbremmung eines Elektrofahrzeugs in die Batterie rückspeisbare Energiemenge hängt von vielen Parametern ab. Das Maximum wird dabei immer durch die am Rad beim Bremsen verfügbare Leistung auf Grund der Fahrwiderstände festgelegt. Da bei geringen Geschwindigkeiten die Leistung beim Bremsen abnimmt und

gleichzeitig auch der Fahrer evtl. noch die mechanische Bremse zur Verzögerung des Fahrzeugs nutzt, nimmt auch der Anteil der rückgewinnbaren Leistung mit sinkender Geschwindigkeit ab. Um das Fahrzeugenergiebedarfsmodell zu vereinfachen, wurde die in (4.31) gezeigte Sigmoid-Funktion aus [139] zur Abbildung des genannten Verhaltens verwendet.

$$x_{Regen}(v_{Fzg}) = \frac{1}{1 + a \cdot e^{-b \cdot v_{Fzg} + 1}}$$

mit:

a	Faktor zur Bestimmung der Sigmoid-Form ($a = 1.000$)	(4.31)
b	Faktor zur Bestimmung der Sigmoid-Form ($b = 0,9$)	
v_{Fzg}	Fahrzeuggeschwindigkeit in Meilen pro Stunde 1 Meile = 1,60934 Kilometer	

Mit der Annahme, dass der elektrische Antriebsmotor im Motor- und Generatorbetrieb einen identischen Wirkungsgradverlauf hat, kann die Leistung, die bei der Nutzbremmung der Elektrofahrzeuge durch die Batterie aufgenommen wird, mit (4.32) berechnet werden:

$$P_{Speicher,Rekuperation} = P_{Rad} \cdot \eta_G \cdot \eta_M(g) \cdot \eta_{Um} \cdot \eta_{Chg} \cdot x_{Regen}(v_{Fzg})$$

mit:

P_{Motor}	Leistung an der Motorwelle	(4.32)
P_{MW}	Leistung am Motoreingang	
$\eta_M(x)$	Auslastungsabhängiger Wirkungsgrad des Antriebsmotors	

Berechnung des Endenergiebedarfs

Nach der Bilanzierung des Energiespeichers kann der absolute Endenergiebedarf des Fahrzeugs mit Formel (4.33) berechnet werden. Dabei muss wie bereits erwähnt der Ladewirkungsgrad beachtet werden, der die Verluste beim Laden des Energiespeichers betrachtet, sodass die Grenzen des Bilanzraums sowohl für Fahrzeuge mit Elektro- als auch mit Verbrennungsmotor eingehalten werden.

$$E(t = \tau) = \int_0^\tau \frac{P_{Speicher}(t)}{\eta_{Chg}} dt = \frac{1}{\eta_{Chg}} \int_0^\tau P_{Speicher}(t) = \frac{1}{\eta_{Chg}} \sum_{i=0}^{\tau} P_{Speicher,i} \cdot \Delta t \quad (4.33)$$

Dabei wird, wie bei der Modellierung der Zustellung, auch zwischen den einzelnen charakteristischen Streckensegmenten für Anfahrt, Zustellung, Rückfahrt sowie der gesamten Zustelltour unterschieden. Mit dem absoluten Endenergiebedarf für die Zustellung in den vier erstellten Fahrprofilen pro Zustelltour wird mit Formel (4.34) schlussendlich der spezifische Energieverbrauch des Zustellfahrzeugs ermittelt.

$$e = \frac{E_{Fzg}}{s} \cdot 100 \text{ km} \quad (4.34)$$

mit:

e	Spezifischer Energieverbrauch in [kWh/100km]
E_{Fzg}	Absoluter Energieverbrauch des Fahrzeugs
s	Länge der gefahrenen Strecke

Parametrierung und Validierung des Fahrzeugenergiebedarfsmodells

Auf Grund der Tatsache, dass keine real gemessenen Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche für die Parametrierung des Fahrzeugmodells zur Verfügung standen, wurde das Modell auf die Herstellerangaben, die sich meist auf den Endenergieverbrauch im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) beziehen, kalibriert. Dazu wurden Simulationen der definierten Zustellfahrzeuge im NEFZ durchgeführt, wobei als Wirkungsgrad für die einzelnen Komponenten des Fahrzeugmodells zunächst typische Werte [73] angesetzt wurden. Der Wirkungsgradverlauf der jeweiligen Antriebsmaschine wurde dabei, wie bereits erwähnt, für alle Fahrzeuge identisch gewählt. Zusätzlich wurde angenommen, dass die Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten für alle Fahrzeuge mit gleicher Antriebstechnologie gültig sind. Da bei der Ermittlung der Kraftstoffverbräuche im NEFZ Nebenverbraucher nicht beachtet werden [76], wurden diese bei der Kalibrierung des Fahrzeugmodells ebenfalls nicht betrachtet. Ebenso wurden die Fahrzeuge ohne Beladung simuliert, d.h. nur die Fahrzeugleermasse wurde betrachtet.

Die simulierten Endenergieverbräuche wurden im Anschluss mit den mittleren Endenergieverbräuchen aus den Herstellerangaben für die einzelnen Zustellfahrzeuge verglichen. Gegebenenfalls wurden die Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten in typischen Bereichen verändert, sodass die Abweichungen der Simulationsergebnisse von den mittleren Herstellerangaben reduziert werden konnten. Die schlussendlich durch dieses Vorgehen bestimmten Wirkungsgrade für die beiden untersuchten Antriebstechnologien, die durch das beschriebene Vorgehen ermittelt wurden und für die nachfolgenden Untersuchungen verwendet werden, fasst **Tabelle 4-6** zusammen.

Tabelle 4-6 **Verwendete Wirkungsgrade**

Komponente	Formelzeichen	Elektrofahrzeug	Konventionelles Fahrzeug
Antriebsstrang	η_G	0,96	0,93
Umrichter	η_{Um}	0,97	entfällt
Ladewirkungsgrad	η_{Chg}	0,95	1,0
Entladewirkungsgrad	η_{Dchg}	0,98	0,99

Die simulierten spezifischen Endenergieverbräuche der Fahrzeuge, die sich aus der Summe von Nutzenergiebedarf und Verlusten im Fahrzeug abzüglich der ggf. durch Rekuperation rückgespeisten Energiemenge ergeben, decken sich unter Verwendung der Wirkungsgrade aus Tabelle 4-6 für die meisten Fahrzeuge sehr gut mit den mittleren Herstellerangaben. **Tabelle 4-7** fasst die Simulationsergebnisse zusammen. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ergeben sich sehr geringe Abweichungen von den mittleren Herstellerangaben im Bereich von -0,31 % bis +1,94 % bei allen Fahrzeugkapazitäten. Die relativ starke Abweichung des Simulationsergebnisses von der Herstellerangabe beim Elektrofahrzeug FEV200C um -23,46 % lässt sich auf ein anderes Testverfahren für die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs der Hersteller zurückführen. Die Verbrauchsangaben des realen Fahrzeugs, das dem hypothetischen Fahrzeug zu Grunde liegt, wurde dabei mit der *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP)* ermittelt, deren Geschwindigkeitsprofil sich deutlich vom NEFZ unterscheidet.

Im Gegensatz dazu beruht die Abweichung von rund -31,7 % bei FEV250C auf der Angabe von gemittelten, realen Verbrauchswerten eines Fahrzeugherstellers, die unter anderem den Energieverbrauch von Nebenverbrauchern sowie Heizung- und Klimatisierung beinhalten. Ebenfalls unterscheidet sich ein realer Fahrzyklus im Geschwindigkeitsprofil deutlich vom NEFZ. Die simulierten spezifischen Endenergieverbräuche der übrigen Elektrofahrzeuge decken sich ähnlich gut mit den Herstellerangaben wie die der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Die vergleichsweise große Abweichung von 7,01 % bei FEV150C lässt sich auf die stark streuenden Motorleistungen der zugrundeliegenden Fahrzeuge bei annähernd identischem Endenergieverbrauch zurückführen. Der Mittelwert von 68 kW für das FEV150C unterscheidet sich dabei wesentlich von den Angaben der Hersteller, die sich im Bereich von 44 kW bis 80 kW bewegen. Bei einer Betrachtung der Motorauslastung mit Herstellerangaben im Vergleich zur Motorauslastung mit dem Mittelwert ergeben sich demnach höhere bzw. geringere Werte, die in einer Veränderung des simulierten Wirkungsgrads der Antriebsmaschine und damit des Endenergiebedarfs resultieren. Dennoch lässt sich festhalten, dass die Annahme eines identischen Wirkungsgradverlaufs der für alle Antriebsmaschinen gleicher Bauform zu plausiblen und validen Ergebnissen bei allen untersuchten Fahrzeugen führt.

Tabelle 4-7 Simulationsergebnisse des Fahrzeugmodells

Fahrzeug	Simulation im NEFZ			Mittelwerte Hersteller- angaben (Endenergie)	Abweichung	
	Nutz- energie	End- energie	Verluste		Absolut	Relativ
	[kWh/100km]	[kWh/100km]	[kWh/100km]	[kWh/100km]	[kWh/100km]	[%]
FEV150C	13,50	17,20	3,70	16,1	1,13	7,01%
FEV150P	14,18	17,79	3,61	17,8	-0,03	-0,19%
ICEFV150	12,43	46,80	34,37	45,9	0,89	1,94%
FEV200C	16,91	21,12	4,21	27,6	-6,48	-23,46%
FEV200P	16,18	20,23	4,06	19,9	0,33	1,68%
ICEFV200	15,91	60,44	44,53	60,6	-0,19	-0,31%
FEV250C	19,54	24,08	4,53	35,25	-11,17	-31,68%
ICEFV250	19,06	68,42	49,36	68,6	-0,21	-0,30%

Auch die Simulationsergebnisse zum spezifischen Nutzenergiebedarf der einzelnen Zustellfahrzeuge zeigen plausibles Verhalten. Da mit zunehmender Fahrzeugkapazität auch die Fahrzeugleermasse zunimmt, steigt auch der simulierte spezifische Nutzenergiebedarf der Fahrzeuge an. Bei der Betrachtung der Antriebstechnologien in den einzelnen Fahrzeugkategorien zeigen die Elektrofahrzeuge höhere Nutzenergieverbräuche, da diese verglichen mit den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor größere Fahrzeugleermassen aufweisen. Ebenso zeigt die Betrachtung der Verluste im Fahrzeug das erwartete Verhalten. Bei annähernd identischem Nutzenergiebedarf von Fahrzeugen mit gleichen Kapazitäten zeichnen sich die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor durch wesentlich höhere Verluste im Fahrzeug aus, die auf den schlechteren Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren im Vergleich zu elektrischen Maschinen zurückgeführt werden kann.

Um den Einfluss des Fahrzyklus auf den Energieverbrauch zu validieren, wurden auch Simulationen der Zustellfahrzeuge im *NREL Baltimore Parcel Delivery Cycle* durchgeführt. **Abbildung 4-22** zeigt die Simulationsergebnisse für diesen Fahrzyklus im Vergleich zu den Ergebnissen aus dem NEFZ.

Da der *Baltimore Parcel Delivery Cycle* (BPDC) deutlich stärkere Beschleunigungsvorgänge im Vergleich zum NEFZ aufweist, ergeben sich für alle Zustellfahrzeuge höhere Werte des spezifischen Nutzenergiebedarfs. Gleichwohl reduzieren sich die Verluste im Fahrzeug bei der Simulation im NREL-Zyklus im Vergleich zum NEFZ bei allen Elektrofahrzeugen, während sich die Verluste bei den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor erhöhen. Dieses Verhalten kann auf die Wirkungsgradverläufe der Antriebsmaschinen zurückgeführt werden. Durch die stärkeren Beschleunigungsvorgänge im BPDC ergeben sich insgesamt höhere mittlere Motorauslastungen. Während der Wirkungsgradverlauf der Elektromaschinen bei kleinen Auslastungen stark ansteigt um dann über einen großen Auslastungsbereich annähernd konstant zu bleiben, zeigt der Verlauf beim Verbrennungsmotor eine Kuppelform. Ab einer Motorauslastung von circa 35 % nimmt der zunächst steigende Wirkungsgrad dabei wieder bis zur maximalen Auslastung ab. Eine Erhöhung der Motorauslastung bewirkt demnach eine Verbesserung bzw. kaum eine Veränderung des Wirkungsgrads beim Elektromotor, während sich der Wirkungsgrad beim Verbrennungsmotor verschlechtert. Insgesamt betrachtet haben aber die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor auch beim BPDC die größeren Verluste.

Bedingt durch die vielen Brems- und Anfahrvorgänge im BPDC erhöht sich auch die durch Rekuperation zurückgewonnene Energiemenge bei den Elektrofahrzeugen im Vergleich zum NEFZ. Bei allen Elektrofahrzeugen kann dabei fast die doppelte Menge an Energie in die Batterie zurückgespeist werden.

Während die Rekuperation der Elektrofahrzeuge den Fahrzeugnutzungsgrad im BPDC deutlich erhöht, ist der im Vergleich zum NEFZ etwas gestiegene Nutzungsgrad der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor auf den Betrieb der Motoren an besseren Betriebspunkten, d.h. mit höherem Wirkungsgrad zurückzuführen. Insgesamt ergeben sich für alle definierten Fahrzeuge höhere spezifische Endenergieverbräuche im BPDC verglichen mit dem NEFZ. Auch dieses Verhalten ist auf das sich deutlich unterscheidende Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil von NEFZ und BPDC zurückzuführen. Im Mittel ergibt sich bei den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor dabei ein Verbrauchsanstieg von rund 12 %. Bei den Elektrofahrzeugen führt die Fahrt im BPDC zu einem im Mittel 7 % erhöhten Endenergieverbrauch im Vergleich zum NEFZ.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass der Modellierungsansatz für den Energieverbrauch der Zustellfahrzeuge zu validen und nachvollziehbaren Ergebnissen führt. Trotz der Kalibrierung des Fahrzeugmodells auf den Energieverbrauch im NEFZ führt auch eine Simulation in anderen Fahrzyklen zu plausiblen Ergebnissen.

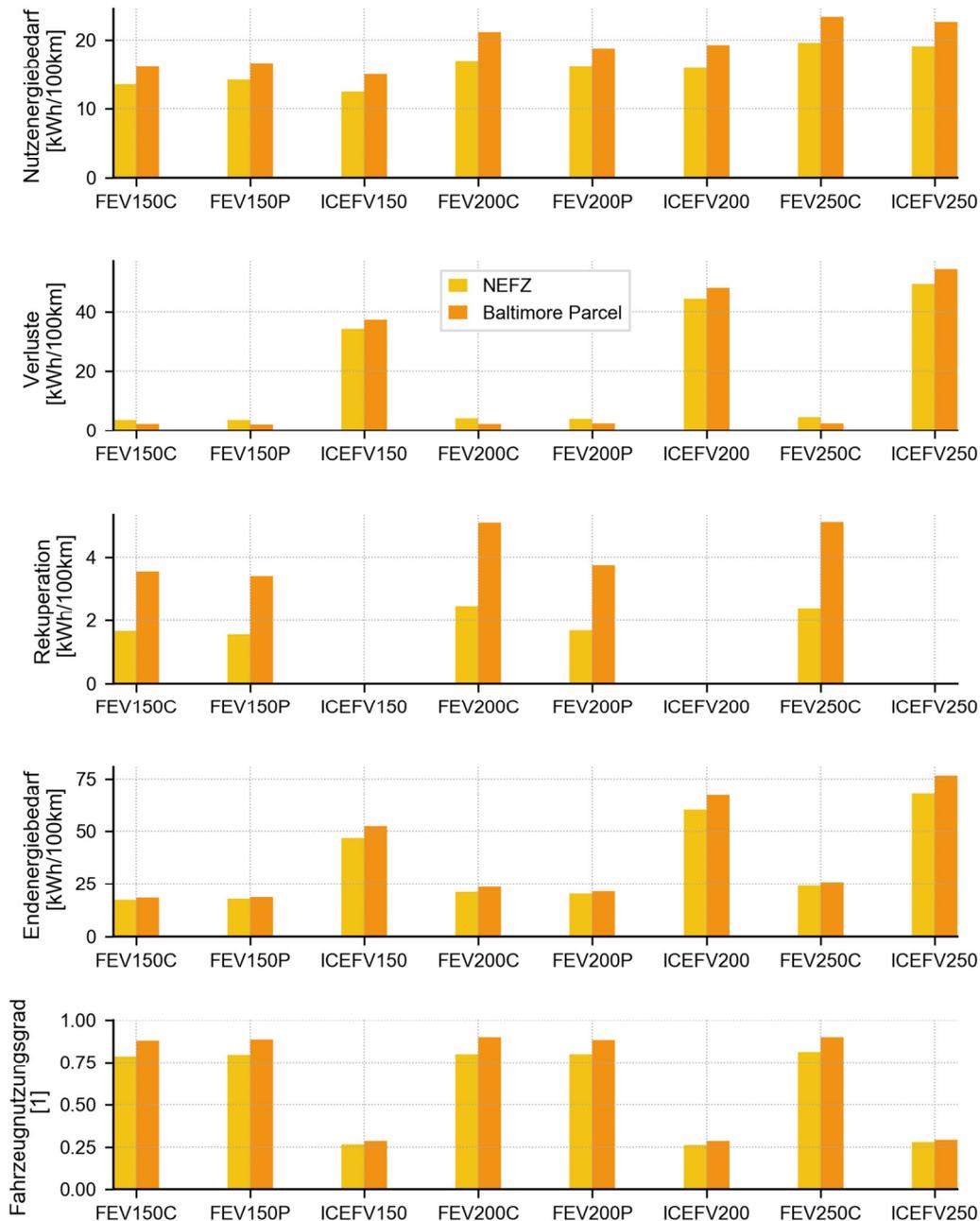


Abbildung 4-22 Vergleich der Simulationsergebnisse des Fahrzeugmodell für NEFZ und Baltimore Parcel Delivery Cycle

4.5. Verwaltung der Ergebnisse – FeVER Data Explorer

4.5.1 Berechnung von Endenergiebedarf und CO₂-Emissionen

Nach der Verarbeitung der einzelnen Lieferstichproben sowie der Bestimmung des spezifischen Energieverbrauchs können der mittlere Endenergieverbrauch sowie die mittlere resultierende CO₂-Emissionen der Zustellfahrzeuge auf der letzten Meile bestimmt werden. Dazu müssen die Ergebnisse der einzelnen Stichproben zusammengefasst und ausgewertet werden.

Hierzu wird zunächst der mittlere spezifische Endenergieverbrauch eines Zustellfahrzeugs bei einer bestimmten Zustellwahrscheinlichkeit auf Basis des für einige Lieferstichproben

simulierten spezifischen Endenergieverbrauchs bestimmt. Für eine hinreichend große Zahl an Stichproben konvergiert dieser Mittelwert (vgl. Kapitel 3.2.2) gegen den Erwartungswert des spezifischen Energieverbrauchs eines Zustellfahrzeugs bei der jeweiligen Zustellwahrscheinlichkeit, d.h. die Berechnungsvorschrift gleicht der Definition eines Monte Carlo Schätzers für den Erwartungswert des spezifischen Endenergieverbrauchs. Die Berechnung der Werte erfolgt dabei differenziert nach den einzelnen charakteristischen Streckenabschnitten einer Zustelltour. (4.35) zeigt beispielsweise die Formel zur Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs für den Streckenabschnitt Belieferung.

$$\bar{e}_L = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k e_{L,i} \approx E[e_L] \quad (4.35)$$

Mit der Kenntnis über die mittleren spezifischen Energieverbräuche können anschließend die absoluten Endenergieverbräuche in den charakteristischen Streckenabschnitten aller Lieferstichproben einer Zustellwahrscheinlichkeit für die einzelnen Zustellfahrzeuge mit (4.36) bestimmt werden.

$$E_L = \bar{e}_L \cdot d_L \quad (4.36)$$

Durch Mittelwertbildung über alle Lieferstichproben wird schlussendlich der mittlere absolute Endenergieverbrauch in den charakteristischen Streckensegmenten mit (4.37) bestimmt. Analog zur Bestimmung des mittleren spezifischen Endenergiebedarfs ist die Berechnung dieser Mittelwerte identisch zur Abschätzung des Erwartungswerts mit dem Monte Carlo Schätzer. Auf Grund des Assoziativgesetzes ist es dabei unerheblich, ob der mittlere absolute Endenergieverbrauch über Mittelwerte von Streckenlänge und mittlerem Endenergieverbrauch aller Lieferstichproben oder über die Mittelung des absoluten Endenergieverbrauchs aller Lieferstichproben berechnet wird.

$$E_L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{e}_L \cdot d_{L,i} = \bar{e}_L \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{L,i} = \bar{e}_L \cdot \bar{d}_L \approx E[E_L] \quad (4.37)$$

Der so bestimmte mittlere absolute Endenergieverbrauch stellt dabei immer den Verbrauch

- eines Zustellfahrzeugs mit definierter Antriebstechnologie und Fahrzeugkapazität,
- während einer Liefertour (bzw. den charakteristischen Strecken einer Liefertour),
- bei der Belieferung einer Untersuchungsregion und
- bei einer bestimmten Zustellwahrscheinlichkeit

dar. Analog zur Bestimmung des mittleren absoluten Endenergieverbrauchs können auch die mittleren absoluten CO₂-Emissionen mit Hilfe der jeweils gültigen Emissionsfaktoren bestimmt werden. Dabei wird bei Elektrofahrzeugen vorausgesetzt, dass nur die für die Belieferung notwendige Energie in die Batterie geladen wurde, sodass keine „Vermischung“ von Strom unterschiedlicher Kohlenstoffdioxidintensität in der Batterie erfolgt.

Auf Basis der so berechneten Werte können zudem auch der mittlere Endenergiebedarf und die mittleren CO₂-Emissionen für die Belieferung einer definierten Region hochgerechnet werden. Dazu werden die pro Fahrzeug bestimmten Werte über die für eine Zustellwahrscheinlichkeit gültige Zahl an Zustellgebieten multipliziert. Überdies erlaubt das Vorgehen prinzipiell auch die Bestimmung von Energieverbräuche in größeren Bilanzräumen, d.h. z.B. die Bestimmung des Primärenergieeinsatzes. Ebenso können absoluter Endener-

giebedarf und absolute CO₂-Emissionen auch auf verschiedene Größen, z.B. Anzahl an belieferten Haushalten oder Anzahl an belieferten Gebäuden bezogen werden, die weitere Aussagen und Bewertungen ermöglichen.

4.5.2 Datenbankmodell

Zur einfachen Berechnung von spezifischen Kennwerten sowie der systematischen Abfrage von Ergebnissen für Vergleiche und Auswertungen werden alle relevanten Daten und Ergebnisse von *FeVER Delivery* und *FeVER VehEnC* in einer *SQLite*-Datenbank abgespeichert. Hierbei ermöglicht die SQL-Syntax auch eine einfache Berechnung von Mittelwerten bzw. der Monte-Carlo-Schätzers für die Zielgrößen der Simulation. Die Datenbank ist dabei mit dem Konzept der objektrelationalen Abbildung (*Object-Relational Mapping*) [141] an das Modell angebunden, wobei das Python Modul *SQLAlchemy* [142] zur Verwaltung der Datenbank genutzt wird. **Abbildung 4-23** zeigt die implementierte Datenbankstruktur bzw. das Datenbankmodell.

Die Tabelle *DeliverySamples* steht im Zentrum und beinhaltet die Kerndaten einer Lieferstichprobe. Über eine Identifikationsnummer bzw. einen Schlüssel sind weitere Tabellen für logistischen Kenngrößen (*Logistic Data*), charakteristische Streckenlängen (*Routing*), spezifischen Energieverbrauch (*Specific Energy*), absoluten Energieverbrauch (*Energy*) und CO₂-Emissionen (*Emissions*) mit dieser Tabelle verknüpft. Überdies werden für die ermittelten spezifischen Energieverbräuche auch wichtige Simulationsergebnisse der Energiebedarfssimulation in der Tabelle *Specific Energy Meta* abgelegt.

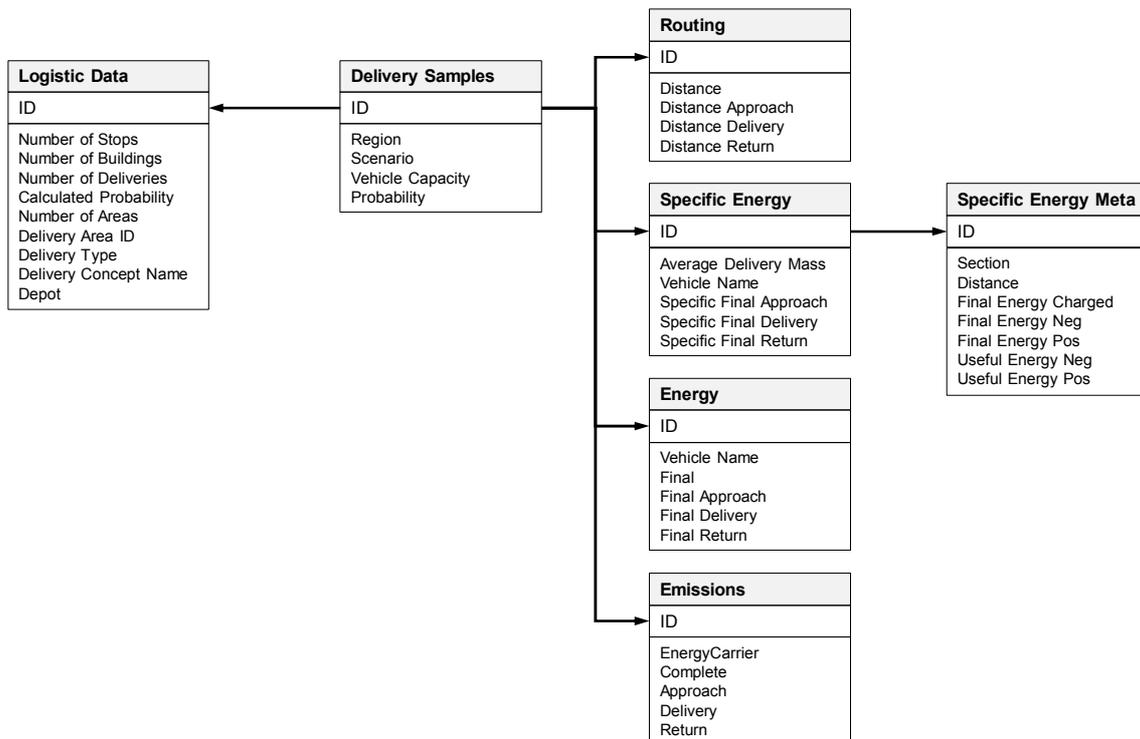


Abbildung 4-23 Datenbankstruktur FeVER-Data Explorer

4.6. Plausibilisierung der Ergebnisse

Auf Grund des Postgeheimnisses, das im 10. Artikel des deutschen Grundgesetzes [143] verankert ist, dürfen Logistikdienstleister keine Kundendaten veröffentlichen. Daher können weder die Lieferstichproben noch die daraus erzeugten Fahrzeugtouren, die durch das Modell erstellt werden, mit realen Daten validiert werden. Ebenso sind für viele der auf dem Markt verfügbaren Zustellfahrzeuge keine Werte zum Endenergiebedarf bzw. Kraftstoffverbrauch im Realbetrieb veröffentlicht. Daher werden die Ergebnisse von FeVER im Nachfolgenden anhand einiger Überlegungen und Auswertungen plausibilisiert. Als Untersuchungsregion wird dazu die Gemeinde Putzbrunn im Landkreis München gewählt. Um auch zukünftige Entwicklungen bzw. Tendenzen für die Plausibilisierung des Modells nutzen zu können, wurden Zustellwahrscheinlichkeiten von 5 % bis 50 % in Schritten zu 5 % untersucht. Für jede Zustellwahrscheinlichkeit wurden dazu zunächst 1.000 Lieferstichproben erstellt, für die eine Zustelltour geplant wurde. Aus dieser Grundgesamtheit wurden 100 Liefertouren bzw. 10 % zufällig zur Bestimmung des spezifischen Energieverbrauchs ausgewählt.

4.6.1 Belieferung

Zustellgebiete und Fahrzeugauslastung

Zur Plausibilisierung der erzeugten Zustellgebiete muss zuerst die Anzahl der notwendigen Zustellgebiete bzw. benötigten Zustellfahrzeuge bei unterschiedlichen Fahrzeugkapazitäten und Zustellwahrscheinlichkeiten genauer betrachtet werden. **Abbildung 4-24** zeigt hierzu die Anzahl der zu erzeugenden Zustellgebiete für die Gemeinde Putzbrunn (insgesamt 2750 Haushalte) bei den verschiedenen Fahrzeugkapazitäten (siehe Kapitel 3.1.4). Die sich in Abbildung 4-24 teilweise nicht ändernde Anzahl an Zustellgebieten (z.B. bei einer Fahrzeugkapazität von 200 Belieferungen und einer Zustellwahrscheinlichkeit von 15 % und 20 %) kann durch die Definition der Fahrzeugkapazität begründet werden.

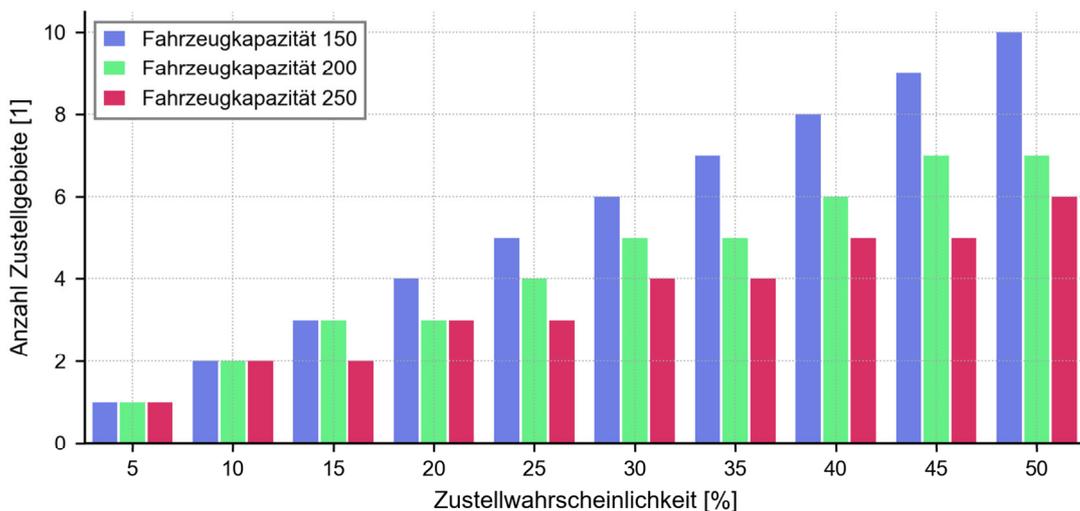


Abbildung 4-24 Anzahl der Zustellgebiete für verschiedene Zustellwahrscheinlichkeiten und Fahrzeugkapazitäten (Gemeinde Putzbrunn)

Für eine tiefergehende Plausibilisierung dieses Verhaltens muss die zu erwartende Sendungsmenge bei einer definierten Zustellwahrscheinlichkeit in Betracht gezogen werden, vgl. (4.38).

$$\widehat{n}_H = H \cdot p_Z \quad (4.38)$$

Während beispielsweise bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 15 % im Mittel 412,5 Haushalte in Putzbrunn mit insgesamt 2.750 Haushalten beliefert werden, sind bei 20 % im Mittel 550 Sendungen zu erwarten. Da bei einer Fahrzeugkapazität von 200 Sendungen der Einsatz von zwei Fahrzeugen nicht für die Belieferung der gesamten Untersuchungsregion bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 15 % ausreicht, werden drei Fahrzeuge eingesetzt und entsprechend auch drei Zustellgebiete erzeugt. Die erwartete Sendungsmenge von im Mittel 550 zu belieferten Haushalten bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 20 % kann dabei ebenso noch mit drei Zustellfahrzeugen bzw. drei Zustellgebieten gedeckt werden. Dieses Verhalten führt zu einer Schwankung der mittleren Fahrzeugauslastung der Zustellfahrzeuge.

Abbildung 4-25 zeigt eine Auswertung zur mittleren Auslastung der Zustellfahrzeuge für unterschiedliche Fahrzeugkapazitäten und Zustellwahrscheinlichkeiten. Die linear zunehmende Anzahl an Zustellgebieten in der Gemeinde Putzbrunn bei einer Fahrzeugkapazität von im Mittel 150 Belieferungen resultiert in einer konstanten Fahrzeugauslastung von rund 90 % bei allen untersuchten Zustellwahrscheinlichkeiten. Das im obigen Beispiel beschriebene Verhalten bei einer mittleren Fahrzeugkapazität von 200 Sendungen resultiert dabei in einer stärkeren Auslastung der Zustellfahrzeuge bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 20 % verglichen mit der Auslastung bei 15 %. Gleichzeitig kann das Beispiel zur Begründung der schwankenden Auslastung bei anderen Zustellwahrscheinlichkeiten, sowohl für Fahrzeuge mit einer mittleren Fahrzeugkapazität von 200 Sendungen als auch 250 Sendungen, herangezogen werden.

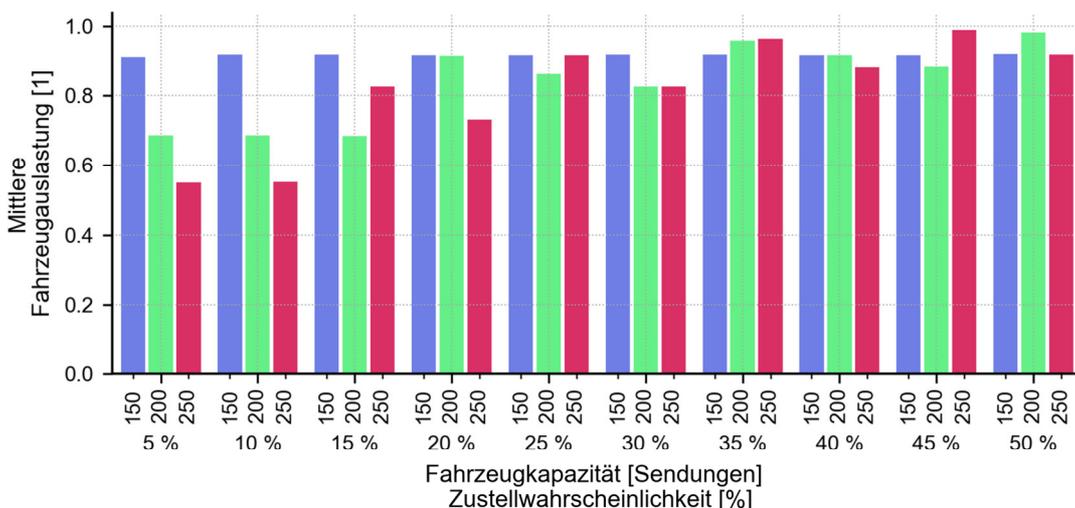


Abbildung 4-25 Mittlere Fahrzeugauslastung bei unterschiedlichen Zustellwahrscheinlichkeiten und Fahrzeugkapazitäten (Gemeinde Putzbrunn)

Der Effekt einer schwankenden Auslastung der Zustellfahrzeuge bei verschiedenen Zustellwahrscheinlichkeiten tritt auf Grund der saisonal fluktuierenden Sendungsmengen wohl

auch in der Realität auf, wobei ein Lieferdienst die verbleibende Fahrzeugkapazität eventuell noch zur Belieferung von Haushalten in einer anderen Region nutzen würde. Da die Grenzen der Untersuchungsregionen in dieser Arbeit strikt festgelegt sind, wird die Nutzung der verbleibenden Kapazität nicht betrachtet. Ebenso wird eine Mischung von Zustellfahrzeugen unterschiedlicher Fahrzeugkapazitäten zur Vermeidung von Kapazitätsproblemen nicht betrachtet.

Zur Plausibilisierung der Zustellgebiete muss jedoch nicht nur die Anzahl, sondern auch die geographische Anordnung betrachtet werden. Ein Beispiel für eine Einteilung der Haushalte in Zustellgebiete zeigt **Abbildung 4-26**. Die vier bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 25 % und einer Fahrzeugkapazität von 200 Belieferungen zu erstellenden Zustellgebiete zeichnen sich dabei durch eine sinnvolle räumliche Gliederung aus. Teilweise beinhalten die Zustellgebiete jedoch nicht die maximal mögliche Anzahl an Haushalten. Eine Auffüllung der Zustellgebiete durch Haushalte anderer Zustellgebiete zur besseren Ausnutzung der Fahrzeuge würde jedoch in keiner sinnvollen räumlichen Abgrenzung der Zustellbezirke resultieren.



Abbildung 4-26 Beispiel für Zustellgebiete in der Gemeinde Putzbrunn (Fahrzeugkapazität 200 Belieferungen)

Lieferstichproben

Zur weiteren Plausibilisierung von *FeVER Delivery* können die erzeugten Lieferstichproben bzw. daraus abgeleitete Kennwerte genutzt werden. **Abbildung 4-27** zeigt hierzu die mittlere Anzahl an Fahrzeugstopps, die mittlere Anzahl an belieferten Gebäuden sowie die mittlere Anzahl an belieferten Haushalten aller Lieferstichproben für die Gemeinde Putzbrunn bei einer Fahrzeugkapazität von 150 Belieferungen für unterschiedliche Zustellwahrscheinlichkeiten. Durch die Mittelwertbildung über aller Lieferstichproben sind die dargestellten Kenngrößen für ein einzelnes Zustellfahrzeug, das die Untersuchungsregion belie-

fert gültig, d.h. es werden Eigenschaften aller Zustellgebiete, wie z.B. Haushaltsdichte und auch Zuordnung von Gebäuden zu Stopppunkten, betrachtet.

Die mittlere Anzahl an belieferten Haushalten (Belieferung) pro Fahrzeug ist in diesem Fall für alle Zustellwahrscheinlichkeiten annähernd konstant, während die Anzahl der Fahrzeugstopps sowie die Anzahl der belieferten Gebäude mit steigender Zustellwahrscheinlichkeit abnehmen. Ist für den zuerst genannten Punkt die konstante Fahrzeugkapazität bei allen Zustellwahrscheinlichkeiten verantwortlich, kann das Verhalten der anderen beiden Kenngrößen dadurch erklärt werden, dass mit steigender Zustellwahrscheinlichkeit

- durchschnittlich mehr Haushalte in einem Gebäude beliefert werden, damit
- die Anzahl an zu beliefenden Gebäuden für die Auslieferung aller Sendungen eines Zustellfahrzeugs abnimmt und damit
- die Anzahl an Stopppunkten ebenfalls abnimmt bzw. auch
- im Mittel weniger Gebäude und potenzielle Stopppunkte pro Zustellgebiet vorhanden sind.

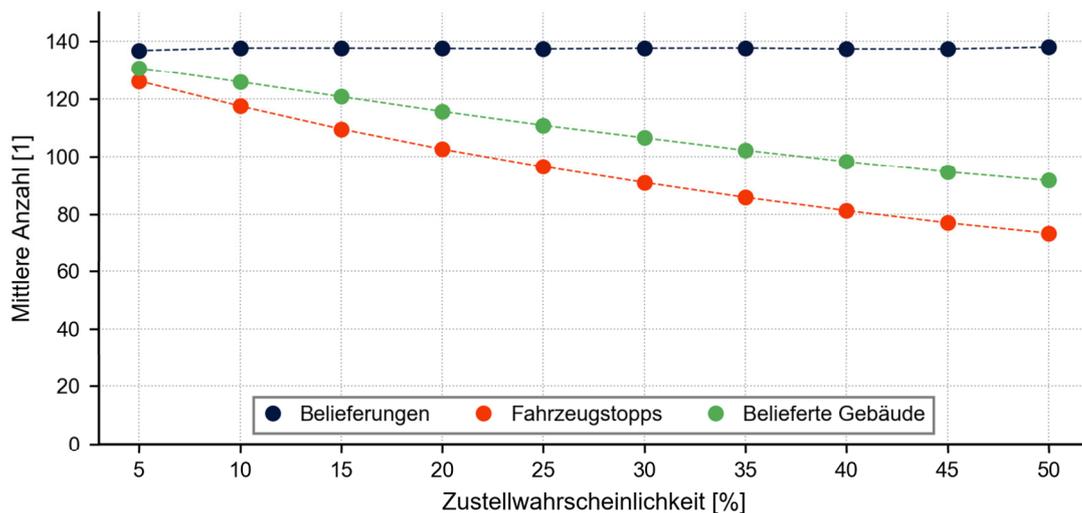


Abbildung 4-27 Entwicklung der mittleren Anzahl an Fahrzeugstopps, belieferten Gebäuden und belieferten Haushalte über der Zustellwahrscheinlichkeit (Werte pro Fahrzeug, Fahrzeugkapazität 150 Belieferungen, Putzbrunn)

Die Entwicklung der mittleren Anzahl an belieferten Haushalten pro Fahrzeugstopp zeigt **Abbildung 4-28**. Die Kenngröße nimmt für die Gemeinde Putzbrunn linear von rund 1,10 Belieferungen pro Stopp bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 5 % auf circa 1,88 Belieferungen pro Stopp bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 50 % zu. Hierbei hat die Fahrzeugkapazität keinen Einfluss, da die Kenngröße nur durch geographische Eigenschaften der Untersuchungsregion bestimmt wird. Für Gebiete mit einer anderen Haushaltsdichte, bzw. anderer mittlerer Anzahl an Haushalten pro Gebäude ergeben sich entsprechend andere Werte für diese Kenngröße. Für die Anzahl an belieferten Gebäuden pro Fahrzeugstopp und belieferten Haushalten pro beliefertem Gebäude gilt dies ebenso.

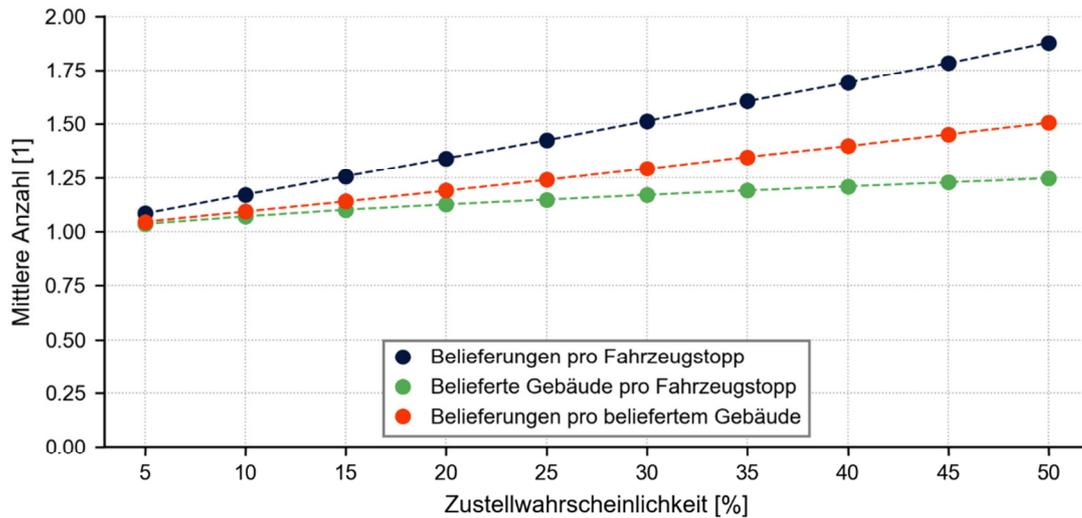


Abbildung 4-28 Entwicklung der mittleren Anzahl an Belieferungen pro Fahrzeugstopp, Belieferungen pro beliefertem Gebäude und belieferte Gebäude pro Fahrzeugstopp (Putzbrunn)

Die Hochrechnung

- der gesamten mittleren Anzahl an Belieferungen,
- der gesamten mittleren Anzahl an Fahrzeugstopps sowie
- der gesamten mittleren Anzahl an belieferten Gebäuden

in der Untersuchungsregion über die Mittelwerte pro Fahrzeuge sowie der Anzahl an Zustellgebieten kann ebenso zur Evaluierung der Lieferstichproben genutzt werden. **Tabelle 4-8** vergleicht dazu die mittlere erwartete Anzahl an belieferten Haushalten mit hochgerechneten Werten der gesamten Gemeinde Putzbrunn für eine mittlere Fahrzeugkapazität von 150 Belieferungen. Durch die gezeigten Ergebnisse kann das gewählte Verfahren zur Erzeugung von Lieferstichproben plausibilisiert werden. Insgesamt ergibt sich eine maximale Abweichung von im Mittel höchstens 5,2 Belieferungen bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 50 %. In allen anderen Fällen zeigt die Simulation eine Abweichung im Bereich von im Mittel -0,7 bis 1,5 Belieferungen, d.h. die Menge an Belieferungen der Lieferstichproben stimmt mit den erwarteten Werten für die Untersuchungsregion überein.

Tabelle 4-8 Vergleich der mittleren Sendungsmengen für eine Fahrzeugkapazität von 150 Belieferungen

Parameter (Mittelwerte)	Zustellwahrscheinlichkeit									
	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
Erwartete mittlere Anzahl an Belieferungen	137,5	275,0	412,5	550,0	687,5	825,0	962,5	1100,0	1237,5	1375,0
Simulierte Anzahl an Belieferungen	136,8	275,4	413,1	550,4	687,2	826,0	964,0	1099,3	123,7	1380,2
Abweichung [1]	-0,7	0,4	0,6	0,4	-0,3	1,0	1,5	-0,7	0,8	5,2

Als Ergänzung zu Tabelle 4-8 zeigt **Abbildung 4-29** die Entwicklung absoluten Anzahl an Belieferungen, der absoluten Anzahl an belieferten Gebäuden sowie der absoluten Anzahl an Fahrzeugstopps, jeweils hochgerechnet über die Mittelwerte pro Fahrzeuge sowie der Anzahl an Zustellgebieten. Auch bei dieser Auswertung spielt die Fahrzeugkapazität keine

Rolle, da die Kenngrößen nur durch die geographischen Eigenschaften der Untersuchungsregion beeinflusst werden. Die gesamte Anzahl an Lieferungen steigt dabei linear mit der Zustellwahrscheinlichkeit an. Während bei kleinen Zustellwahrscheinlichkeiten alle drei dargestellten Kenngrößen nahezu identische Werte aufweisen, d.h. pro Stopp im Mittel circa ein Gebäude und ein Haushalt beliefert wird, ergibt sich für höhere Zustellwahrscheinlichkeiten eine deutliche Spreizung, d.h. pro Stopp werden mehrere Gebäude und gleichzeitig auch mehrere Haushalte beliefert. Bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von z.B. 50 % bedeutet dies, dass in Putzbrunn pro Stopp rund 1,24 Gebäude beliefert werden bzw. pro Stopp 1,88 Haushalte bedient werden. Dieses Verhalten ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass mit steigender Zustellwahrscheinlichkeit auch die Wahrscheinlichkeit ansteigt, dass mehr Haushalte in einem Gebäude beliefert werden.

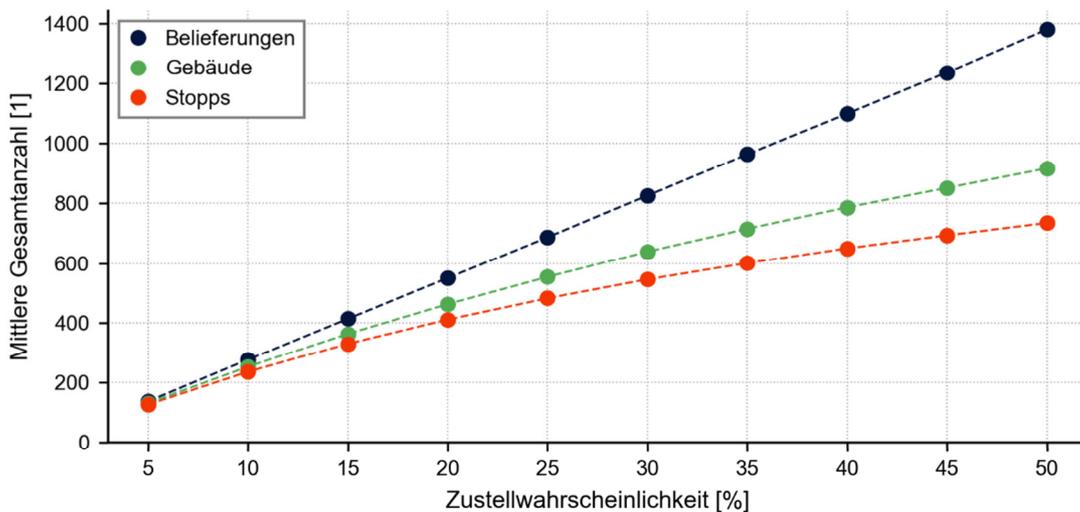


Abbildung 4-29 Mittlere Gesamtanzahlen an Belieferungen, belieferten Gebäuden und Fahrzeugstopps

Konvergenz der Monte Carlo Simulation und Fehlerabschätzung

Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben wurde, kann der Erfolg einer Monte Carlo Simulation u.a. mit der Betrachtung der Entwicklung von Mittelwert und Standardabweichung der Zielgröße über der Anzahl der Simulationsläufe analysiert werden. Zusätzlich kann mit den beiden Kenngrößen auch der Approximationsfehler des Monte-Carlo-Schätzers bestimmt werden.

Um Aussagen über den Erfolg der Monte Carlo Simulation von FeVER-Delivery treffen zu können, zeigt **Abbildung 4-30** als Beispiel die Konvergenz des abgeschätzten Mittelwerts der charakteristischen Streckenlänge für Belieferungen \bar{d}_l für eine Zustellwahrscheinlichkeit von 20 % bei einer Fahrzeugkapazität von 200 Belieferungen. Sowohl der Mittelwert als auch die Standardabweichung der Stichprobe konvergieren zu stabilen Werten von rund 12 km bzw. ca. 1,5 km. Zusätzlich ist im oberen Diagramm der Vertrauensbereich des Monte Carlo Schätzers für ein Konfidenzniveau von 95 % eingetragen. Mit zunehmender Zahl an Iterationen nimmt der Bereich, in dem der reale Erwartungs- bzw. Mittelwert durch den Schätzer vermutet wird ab, d.h. die Ergebnisse werden verlässlicher bzw. genauer. Nach 1.000 Iterationen bzw. erzeugten Lieferstichproben und gelösten Routing-Problemen wird hier beispielsweise der Mittelwert im Bereich von 12,14km±82m bei einem Konfidenzniveau von 95 % abgeschätzt, was einer maximalen relativen Abweichung von rund ±0,7 %

gleichbedeutet ist. Die Standardabweichung von rund 1,2 km ist dabei auf die unterschiedliche geographische Ausprägung der Zustellgebiete zurückzuführen. Insgesamt kann festgehalten werden, dass die zunächst nur angesetzte Anzahl von 1.000 Lieferstichproben zu brauchbaren Ergebnissen führt und auch einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit darstellt.

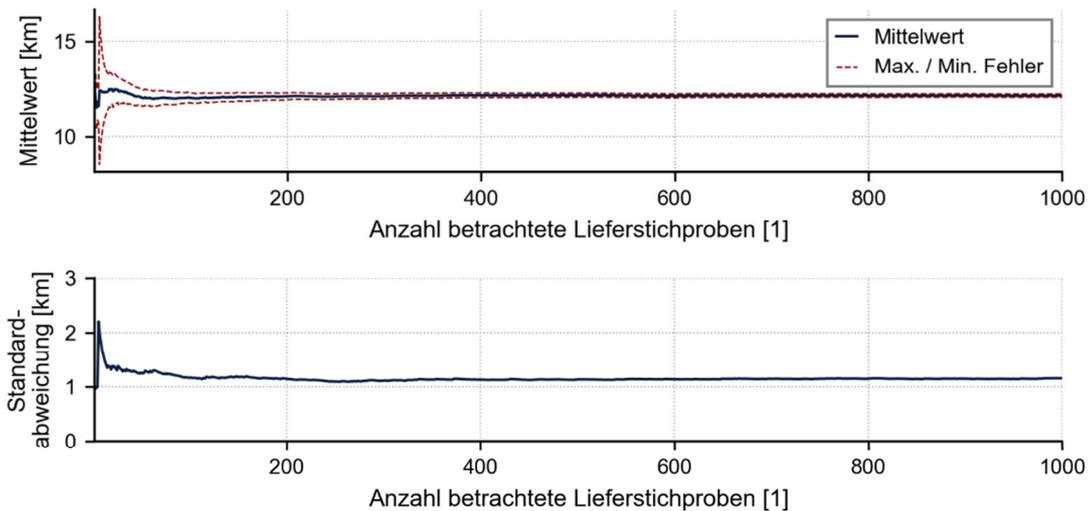


Abbildung 4-30 Konvergenz von Mittelwert und Standardabweichung für eine Zustellwahrscheinlichkeit von 20% (Konfidenzniveau 95 %, Streckensegment Belieferung)

Einen umfassenderen Überblick über die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation zur Bestimmung der mittleren charakteristischen Streckenlänge bei unterschiedlichen Zustellwahrscheinlichkeiten gibt **Tabelle 4-9**. Die mittleren Streckenlängen für An- und Abfahrt können dabei mit Abstand am genauesten abgeschätzt werden. Der maximale Fehler von rund ± 25 m ist dabei auf die relativ geringe Stichprobenstandardabweichung von maximal rund 0,6 km zurückzuführen. Auch bei der Betrachtung der charakteristischen Streckenlängen für die Belieferung sowie für die gesamte Liefertour ergeben sich geringe relative Fehler des Monte Carlo-Schätzers von maximal rund ± 6 %. Es sei hier trotzdem noch einmal erwähnt, dass die Fehlerabschätzung des MC-Schätzers eine annähernde Normalverteilung der Abweichung des abgeschätzten vom realen Wert voraussetzt.

Auf Grund des meist relativ geringen zu erwartenden Fehlers des Monte-Carlo-Schätzers kann für die nachfolgenden Auswertungen davon ausgegangen werden, dass das Simulationsergebnis dem realen Mittel- bzw. Erwartungswert entspricht. Diese Annahme kann darauf zurückgeführt werden, dass der Fehler des MC-Schätzers im Vergleich zum Gesamtfehler des Modells durch die getroffenen Annahmen wahrscheinlich sehr gering ist. Auf Grund der relativ kleinen Standardabweichungen der Ergebnisse, besonders bei geringen Zustellwahrscheinlichkeiten, wird diese für die weiteren Auswertungen in Form von Potentialanalysen in Kapitel 5 nicht weiter betrachtet.

Tabelle 4-9 Ergebnisse der Monte Carlo Simulation für eine Fahrzeugkapazität von 200 Belieferungen bei einem Konfidenzniveau von 95 %

	Zustellwahrscheinlichkeit									
	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
Belieferung d_L										
Mittelwert [km]	23,78	14,27	10,23	12,14	9,05	7,45	7,87	7,17	5,45	6,35
Standardabweichung [km]	1,74	1,45	2,57	1,15	1,81	1,21	0,83	2,55	1,90	2,03
Max. Fehler [m]	±188	±130	±408	±82	±202	±90	±43	±404	±223	±255
Rel. Max. Fehler [%]	±0,79	±0,91	±3,99	±0,68	±2,23	±1,21	±0,55	±5,63	±4,09	±4,02
Anfahrt d_{An}										
Mittelwert [km]	12,37	12,75	12,99	12,78	12,95	13,05	13,03	12,94	13,02	13,07
Standardabweichung [km]	0,12	0,49	0,55	0,48	0,61	0,59	0,58	0,57	0,52	0,54
Max. Fehler [m]	±1	±15	±19	±14	±23	±22	±21	±20	±17	±18
Rel. Max. Fehler [%]	±0,01	±0,12	±0,15	±0,11	±0,18	±0,17	±0,16	±0,15	±0,13	±0,14
Rückfahrt $d_{Rück}$										
Mittelwert [km]	12,28	12,74	12,95	12,7	12,86	12,99	12,97	12,85	12,95	12,99
Standardabweichung [km]	0,11	0,52	0,54	0,48	0,6	0,6	0,59	0,59	0,54	0,55
Max. Fehler [m]	±1	±17	±18	±14	±23	±22	±21	±21	±18	±19
Rel. Max. Fehler [%]	±0,01	±0,13	±0,14	±0,11	±0,18	±0,17	±0,16	±0,16	±0,14	±0,15
Gesamt d_T										
Mittelwert [km]	48,44	39,77	36,18	37,62	34,86	33,48	33,88	32,95	31,42	32,4
Standardabweichung [km]	1,73	1,74	2,1	1,76	2,35	1,72	1,44	1,94	1,94	1,96
Max. Fehler [m]	±185	±80	±273	±193	±342	±183	±129	±233	±234	±239
Rel. Max. Fehler [%]	±0,38	±0,20	±0,75	±0,51	±0,98	±0,55	±0,38	±0,71	±0,74	±0,74

Streckenlängen und Liefertouren

Für die Plausibilisierung der generierten Liefertouren bzw. der charakteristischen Streckenlängen zeigt **Abbildung 4-31** die Zusammensetzung der gesamten Streckenlänge eines Zustellfahrzeugs für die drei untersuchten Fahrzeugkapazitäten von 150, 200 und 250 Belieferungen, jeweils für Zustellwahrscheinlichkeiten im Bereich von 5 % bis 50 %. Bei allen gezeigten Ergebnissen wird ein real existierendes Fahrzeugdepot in rund 13 km Entfernung nördlich von Putzbrunn in Aschheim bei München als Ausgangs- und Zielposition der Zustellfahrzeuge verwendet.

Wie die Simulationsergebnisse zeigen, werden die Anfahrt in das Zustellgebiet sowie die Rückfahrt zum Fahrzeugdepot nur in geringem Umfang von der Zustellwahrscheinlichkeit beeinflusst. Durch das Hinzukommen von zusätzlichen Zustellgebieten mit steigender Zustellwahrscheinlichkeit müssen einige Fahrzeuge eine etwas längere Strecke fahren, um das Zustellgebiet zu erreichen bzw. haben auch einen etwas längeren Rückweg. Diese Tatsache spiegelt sich in der leicht ansteigenden mittleren Streckenlänge für An- und Rückfahrt wider, wobei beide Strecken nahezu die gleiche Entfernung aufweisen. Da bei allen betrachteten Fahrzeugkapazitäten mit steigender Zustellwahrscheinlichkeit mehr Zustell-

gebiete für die Belieferung der Untersuchungsregion benötigt werden, zeigen alle dargestellten Auswertungen dieses Verhalten.

Bei der Betrachtung der Streckenlängen für die Fahrt im Zustellgebiet kann bei allen Fahrzeugkapazitäten eine nichtlinear fallende Tendenz mit zunehmender Zustellwahrscheinlichkeit erkannt werden. Dieses Verhalten kann durch die verringerte Anzahl an Haushalten pro Zustellgebiet erklärt werden, d.h. das Zustellfahrzeug muss auf Grund der Dimensionierung der Zustellgebiete eine geringere Fahrtstrecke zurücklegen um alle Sendungen auszuliefern. Zusätzlich kann das Verhalten auf die Definition der Zustellwahrscheinlichkeit zurückgeführt werden. Bei einer steigenden Zustellwahrscheinlichkeit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Gebäude beliefert werden muss bzw. dass ein Zustellfahrzeug am Gebäude anhalten muss, nichtlinear mit der Anzahl an Haushalten pro Gebäude. Die teilweise auftretenden Sprünge bei dieser charakteristischen Streckenlänge bei Fahrzeugkapazitäten von 200 und 250 Belieferungen kann durch die schwankende Auslastung der Zustellfahrzeuge (vgl. Abbildung 4-25) erklärt werden. Für das bereits genannte Beispiel kann beispielsweise der Anstieg der Distanz bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 15 % und 20 % und einer Fahrzeugkapazität von 200 Sendungen erklärt werden. Bei beiden Zustellwahrscheinlichkeiten werden drei Zustellgebiete für die Belieferung der Untersuchungsregion benötigt. Da bei der Zustellwahrscheinlichkeit von 15 % jedoch mehr Sendungen ausgeliefert werden, muss das Fahrzeug auch eine längere Distanz zurücklegen, um die Sendungen zu verteilen. Im Allgemeinen bedeutet eine höhere Auslastung der Zustellfahrzeuge bei gleichbleibender Anzahl an Zustellgebieten auch eine größere zurückzulegende Distanz.

Auf Grund der Tatsache, dass die Strecke für An- und Rückfahrt nahezu unabhängig von der jeweiligen Zustellwahrscheinlichkeit ist, zeigen sich die Sprünge auch bei der Betrachtung der Gesamtstreckenlängen bei den einzelnen Zustellwahrscheinlichkeiten. Insbesondere bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 5 % ergibt sich für alle Fahrzeuge annähernd der gleiche Wert von rund 50 km, da hier bei allen untersuchten Fahrzeugkapazitäten nur ein einziges Zustellgebiet benötigt bzw. Zustellfahrzeug eingesetzt wird.

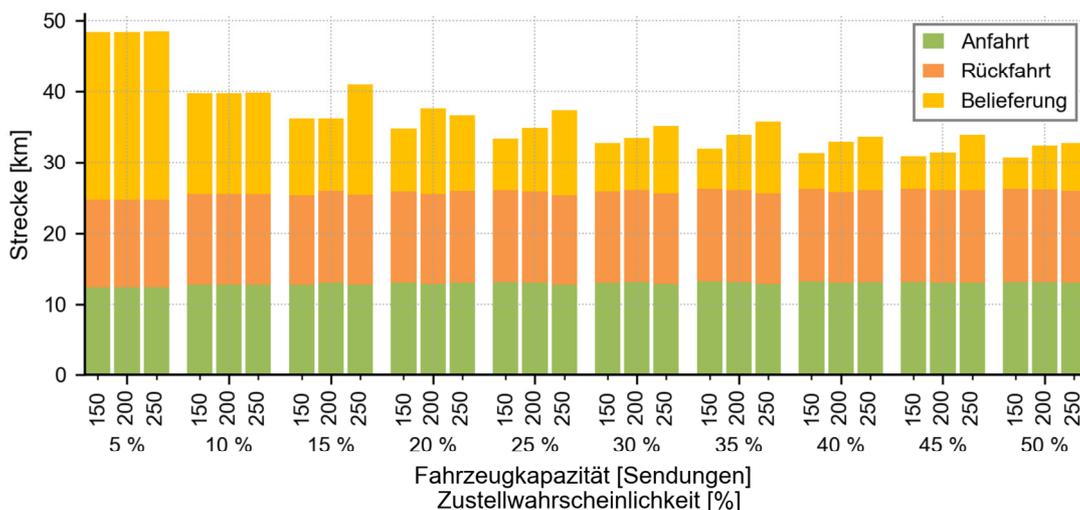


Abbildung 4-31 Mittlere Streckenlängen einer Zustelltour bei unterschiedlichen Zustellwahrscheinlichkeiten und Fahrzeugkapazitäten

4.6.2 Endenergiebedarf

Konvergenz der Monte Carlo Simulation zur Bestimmung des mittleren spezifischen Endenergiebedarfs

Analog zum vorherigen Abschnitt kann die Konvergenz der MC-Simulation zur Bestimmung des mittleren spezifischen Energieverbrauchs bzw. des Erwartungswerts des mittleren spezifischen Energieverbrauchs evaluiert werden. **Abbildung 4-32** zeigt hierzu als Beispiel die Konvergenz des mittleren spezifischen Energieverbrauchs eines FEV150C bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 20 %. Als mittlere Masse einer Sendung wurde für diese Plausibilisierung ein Wert von 2,5 kg angesetzt. Durch die Verwendung von 100 unterschiedlichen Zustellrouten bzw. Lieferstichproben zur Bestimmung des spezifischen Endenergiebedarfs wird der Mittelwert von rund 20 kWh/100km mit einem Fehler von rund $\pm 0,3$ % bei einem Konfidenzniveau von 95 % durch die MC-Simulation abgeschätzt. Da für die Eingrenzung des Fehlers die Standardabweichung der Stichprobe benötigt wird (vgl. Kapitel 3.2.3), beginnt die Darstellung des minimalen bzw. maximalen Fehlers erst ab der 2. Iteration. Die Standardabweichung der Ergebnisse der MC-Simulation konvergiert nach der Betrachtung der 100 Liefertouren zu einem Wert von rund 500 Wh/100 km.

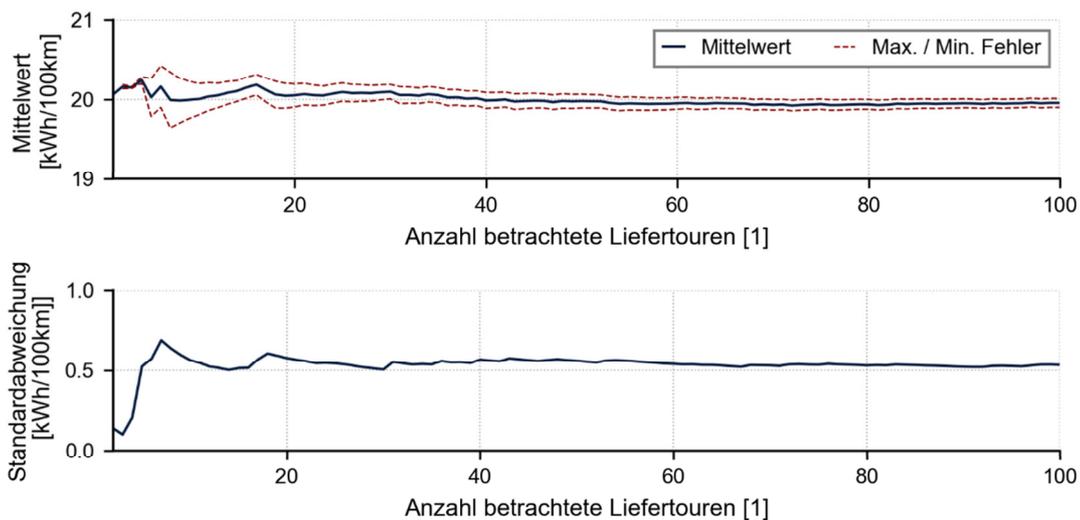


Abbildung 4-32 Konvergenz der Monte Carlo Simulation zur Bestimmung des spezifischen Endenergiebedarfs (Zustellwahrscheinlichkeit 20 %, Fahrzeug FEV150C, gesamte Liefertour)

Die Tatsache, dass die Betrachtung von mehr als rund 60 Liefertouren kaum Änderungen am abgeschätzten Mittelwert bzw. Erwartungswert hervorrufen, kann auf ähnliche Charakteristika der Fahrprofile zurückgeführt werden. Da sich die einzelnen Zustellgebiete einer Untersuchungsregion meist durch ähnliche räumliche bzw. siedlungsbauliche Strukturen auszeichnen, kann auch auf eine ähnliche Anzahl von Brems- und Beschleunigungsvorgängen bzw. Strecken mit konstanter Geschwindigkeit in den Liefertouren zurückgeschlossen werden, die wiederum den spezifischen Endenergiebedarf maßgeblich beeinflussen. Die daraus resultierende geringe Streuung der Simulationsergebnisse für den spezifischen Endenergiebedarf führt dabei zur schnellen Konvergenz der MC-Simulation. Daher kann auch festgehalten werden, dass die zunächst nur abgeschätzte Größe der Stichprobe von

100 Liefertouren ausreichend zur Bestimmung des mittleren spezifischen Endenergiebedarfs ist. Eine Erhöhung der Stichprobengröße würde insbesondere die Rechenzeit des Modells erhöhen, da für jede zusätzliche in Betracht gezogene Liefertour das zugehörige Fahrprofil synthetisiert bzw. auch der spezifische Endenergiebedarf mit dem Fahrzeugmodell bestimmt werden müsste.

Spezifischer Endenergiebedarf

Da nicht nur die Konvergenz ausschlaggebend für die Plausibilisierung der Ergebnisse des Modells ist, zeigt **Abbildung 4-33** die Entwicklung des mittleren spezifischen Endenergiebedarfs eines FEV150C über der Zustellwahrscheinlichkeit. Dabei ergeben sich für Anfahrt des Zustellfahrzeugs nahezu konstante Werte, d.h. der spezifische Endenergiebedarf des Zustellfahrzeugs ist unabhängig von der Zustellwahrscheinlichkeit. Dieses Verhalten lässt sich darauf zurückführen, dass immer das gleiche Depot als Ausgangspunkt der Liefertouren verwendet wurde, d.h. dass Streckenführung bzw. Fahrprofil bei allen betrachteten Zustellwahrscheinlichkeiten fast identisch sind. Lediglich zum Erreichen des Zustellgebiets in der eigentlichen Untersuchungsregion, vereinfacht betrachtet ab dem Ortsschild, ergeben sich geringfügige Änderungen in der Route bzw. dem Fahrprofil, die die Ergebnisse aber kaum beeinflussen. Da neben einer identischen Fahrzeugkapazität bzw. Sendungsmenge bei der dargestellten Auswertung auch eine konstante Masse pro Sendung angesetzt wurde, ergeben sich im Mittel für alle Zustellwahrscheinlichkeiten fast gleiche Fahrzeuggesamtmassen bei der Anfahrt, die sich ebenso in dem konstanten Verlauf des spezifischen Energiebedarfs in diesem Streckensegment widerspiegeln.

Die Differenz der spezifischen Endenergieverbräuche zwischen An- und Rückfahrt ist dem hingegen auf die unterschiedlichen Gesamtmassen des Zustellfahrzeugs in diesen beiden Streckensegmenten zurückzuführen. Da das Fahrzeug per Definition alle Sendungen während der Liefertour entlädt, reduziert sich für die Rückfahrt die Fahrzeuggesamtmasse um die Masse der Sendungen, d.h. nur die Fahrzeugleermasse wird für die Bestimmung des Endenergiebedarfs bei der Rückfahrt betrachtet. Diese ist dabei nur abhängig vom betrachteten Fahrzeug und resultiert in Kombination mit den fast identischen Streckenführungen und Fahrprofilen auf Grund des gleichen Depotstandorts im ebenso fast konstanten Endenergiebedarf bei der Rückfahrt.

Im Gegensatz zu An- und Abfahrt ergibt sich für den spezifischen Endenergiebedarf bei der Fahrt im Zustellgebiet bzw. der eigentlichen Belieferung eine deutliche Abhängigkeit von der Zustellwahrscheinlichkeit. Mit steigender Zustellwahrscheinlichkeit nimmt dabei der spezifische Endenergiebedarf zu. Eine Verzehnfachung der Zustellwahrscheinlichkeit von 5 % auf 50 % resultiert dabei in einer Verbrauchszunahme von rund 5 kWh/100km. Mit steigender Zustellwahrscheinlichkeit nimmt einerseits die Anzahl an Stopps pro Fahrzeug ab (vgl. Abbildung 4-27), gleichzeitig werden aber mehr Sendungen pro Stopp ausgeliefert (vgl. Abbildung 4-28), sodass das Fahrzeug eine geringere Strecke im Zustellgebiet zurücklegen muss (vgl. Abbildung 4-31). Die Verknüpfung dieser einzelnen Faktoren führt zur Reduktion der Distanz zwischen den einzelnen Fahrzeugstopps bzw. einem Anstieg der Anzahl an Stopps pro Distanz, sodass das Fahrzeug tendenziell auch häufiger pro Streckeneinheit anfahren und bremsen muss. Dies wiederum führt hauptsächlich zu einem steigenden spezifischen Nutzenergiebedarf, der in Kombination mit dem sich leicht ändernden Motorauslastungen bzw. Wirkungsgraden des Fahrzeugmodells in einem Anstieg

des spezifischen Endenergiebedarfs resultiert. Insbesondere ist die sich bei der Belieferung im Vergleich zu An- und Abfahrt allgemein deutlich abzeichnende Verbrauchssteigerung auf die höhere Anzahl an Brems- und Anfahrvorgängen zurückzuführen. Die Möglichkeit zur Rekuperation bei Elektrofahrzeugen spielt nur eine untergeordnete Rolle, da mit steigender Sendungsmenge auch die mittlere Geschwindigkeit zwischen zwei Fahrzeugstopps abnimmt und damit das Rekuperationspotential zurückgeht.

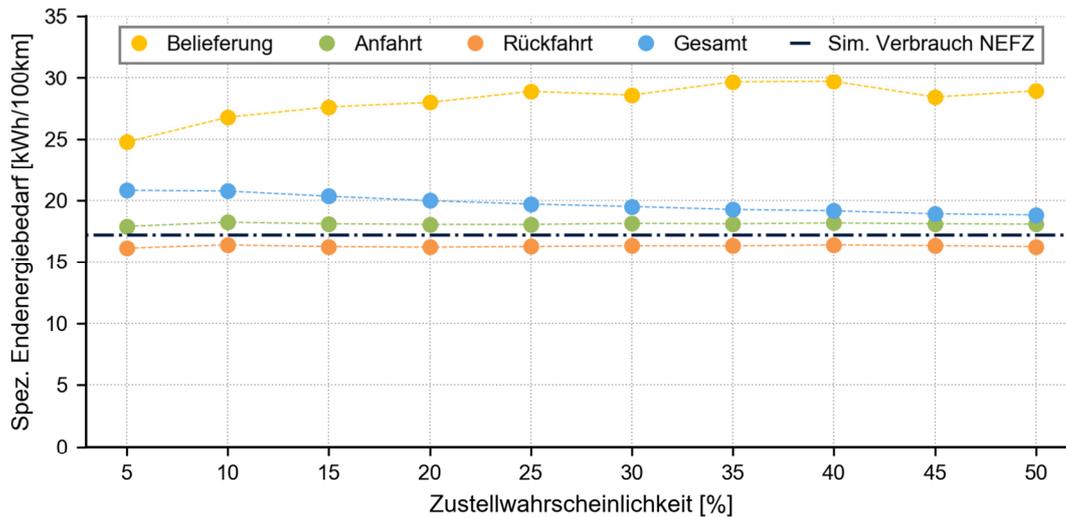


Abbildung 4-33 Entwicklung des spezifischen Endenergiebedarfs über der Zustellwahrscheinlichkeit (Fahrzeug: FEV150C)

Der spezifische Endenergiebedarf der gesamten Liefertour, der das gewichtete Mittel von spezifischem Endenergieverbrauch in den einzelnen Streckensegmenten und der Länge des jeweiligen Streckensegments darstellt, nimmt mit steigender Zustellwahrscheinlichkeit leicht ab. Da ein Anstieg der Zustellwahrscheinlichkeit in einem Rückgang der Streckenlänge für das Segment Belieferung resultiert (Abbildung 4-31), wird auch der Einfluss des deutlich höheren Energieverbrauchs in diesem Streckensegment auf den gesamten spezifischen Energieverbrauch der Zustelltour geschmälert.

Zusätzlich zur Darstellung der Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs über der Zustellwahrscheinlichkeit ermöglicht Abbildung 4-33 einen Vergleich der ermittelten spezifischen Energieverbräuche mit den Simulationsergebnissen des FEV150C im Neuen Europäischen Fahrzyklus, auf den das Fahrzeugmodell kalibriert ist. Mit Ausnahme der Rückfahrt des Zustellfahrzeugs zum Depot ergeben sich dabei deutlich unterschiedliche Werte. Der geringere Energieverbrauch bei der Rückfahrt ist dabei auf längere Strecken mit annähernd konstanter Geschwindigkeit in den synthetisierten Fahrprofilen verglichen mit dem NEFZ zurückzuführen. Insbesondere die Betrachtung des Unterschieds der Ergebnisse im Streckensegment Belieferung rechtfertigt die Synthese von Fahrprofilen, die eine detailliertere Analyse der Entwicklungen von Energieverbrauch und Emissionen in zukünftigen Szenarien ermöglicht.

In [144] sind reale Verbrauchswerte eines elektrischen Zustellfahrzeugs, das in die Kategorie der definierten Fahrzeuge mit einer Kapazität von 150 Belieferungen fällt, angegeben. Bei einer Batteriekapazität von 20 kWh kann mit diesem Fahrzeug im Lieferverkehr eine Strecke von 80 km zurückgelegt werden, was in einem spezifischen Endenergiebedarf von

rund 25 kWh/100km resultiert. Da davon auszugehen ist, dass sich diese Angaben auf die komplette Zustelltour inklusive An- und Abfahrt vom Depot beziehen, sind die Ergebnisse des Modells zum spezifischen Endenergiebedarf tendenziell etwas zu gering. Diese Abweichung ist jedoch auf die Vernachlässigung des Nebenverbrauchs von Heizung und Klimatisierung der Zustellfahrzeuge zurückzuführen, die insbesondere bei Elektrofahrzeugen einen wesentlichen Einfluss auf die Reichweite bzw. den Endenergiebedarf haben. Ebenso ist das Fahrzeugmodell auf den NEFZ kalibriert, was auf etwas geringere Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten im Realverkehr schließen lässt. Insgesamt ergeben sich aber durch die Simulation plausible und nachvollziehbare Ergebnisse, die für die Potentialanalysen und eine Betrachtung von Entwicklungen geeignet sind.

Absoluter Endenergiebedarf

Neben der Betrachtung des spezifischen Endenergiebedarfs der Zustellfahrzeuge muss auch der absolute Endenergiebedarf plausibilisiert werden. **Abbildung 4-34** zeigt hierzu den mittleren Endenergiebedarf der verschiedenen Zustellfahrzeuge bei einer Fahrzeugkapazität von 200 Belieferungen für unterschiedliche Zustellwahrscheinlichkeiten. Insgesamt ergibt sich bei allen betrachteten Fahrzeugen eine fallende Tendenz des mittleren Endenergiebedarfs mit steigender Zustellwahrscheinlichkeit. Die teilweise auftretenden Sprünge sind auf die schwankende mittlere Fahrzeugauslastung zurückzuführen. Neben dem Transport von mehr Sendungen bei höheren Fahrzeugauslastungen und daher einer höheren Fahrzeugmasse müssen die Zustellfahrzeuge dabei auch längere Strecken zurücklegen um die Pakete auszuliefern. Die Kombination von tendenziell steigendem spezifischen Endenergiebedarf und der längeren zurückzulegenden Strecke resultiert dabei auch in einem Anstieg des Endenergiebedarfs. Das konventionelle Zustellfahrzeug ICEFV200 zeigt überdies bei allen Zustellwahrscheinlichkeiten einen deutlich höheren Verbrauch als die Elektrofahrzeuge. Der geringere Verbrauch der FEV200P verglichen mit FEV200C ist auf die kleinere Leermasse der Elektrofahrzeuge im Purpose-Design zurückzuführen.

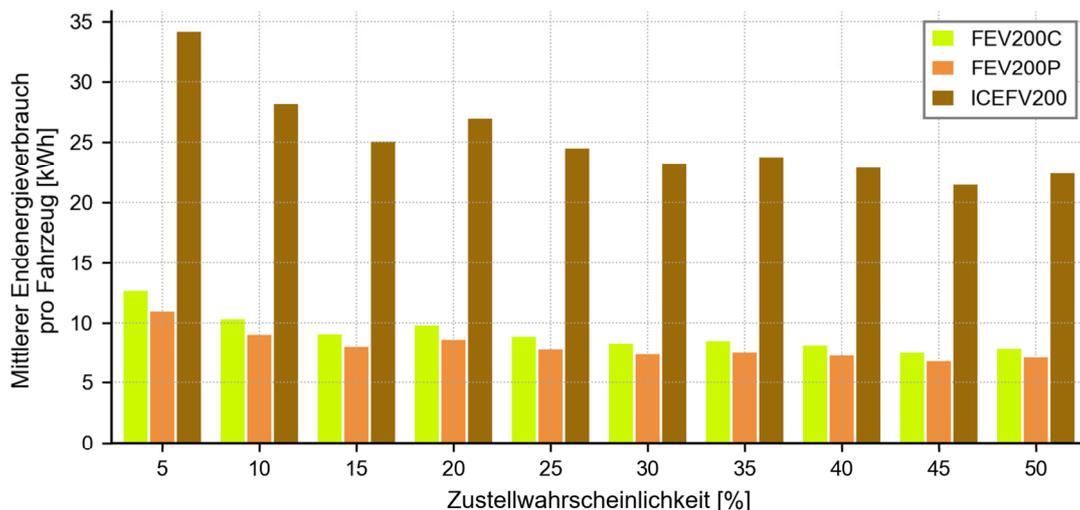


Abbildung 4-34 Endenergiebedarf der Zustellfahrzeuge in Putzbrunn bei einer Fahrzeugkapazität von 200 Belieferungen (gesamte Liefertour)

4.6.3 CO₂-Emissionen

Mit Hilfe des absoluten Endenergiebedarfs der Zustellfahrzeuge können auch die mittleren CO₂-Emissionen der einzelnen Fahrzeuge bei unterschiedlichen Zustellwahrscheinlichkeiten bestimmt werden. **Abbildung 4-35** zeigt für die Plausibilisierung der Ergebnisse die mittleren CO₂-Emissionen pro Fahrzeug für Belieferungen der Gemeinde Putzbrunn bei einer Fahrzeugkapazität von 200 Belieferungen. Als Emissionsfaktor für den Ladestrom des Elektrofahrzeugs wurde ein Jahresmittelwert von 515,5 gCO₂/kWh im Jahr 2016 [145] verwendet, für Diesel der Wert von 266,4 gCO₂/kWh [146]. Die Emissionen spiegeln, wie erwartet, insgesamt den Verlauf des Endenergiebedarfs wider. Der deutliche Unterschied zwischen den beiden Elektrofahrzeugen und dem konventionellen Fahrzeug bei der Betrachtung des Endenergiebedarfs aus Abbildung 4-34 ist deutlich geschmälert, da der Emissionsfaktor des Ladestroms nahezu doppelt so groß wie der von Dieselmotoren ist.

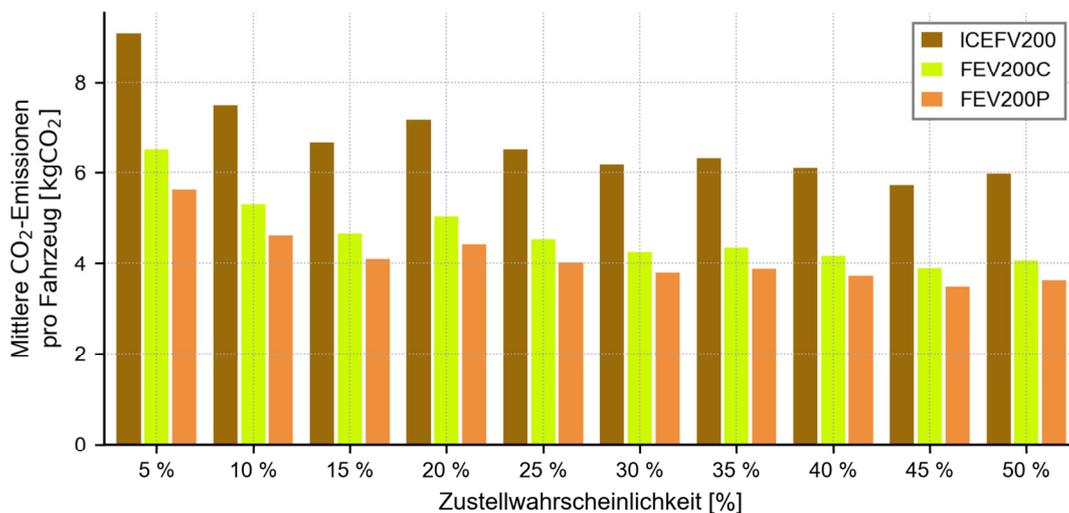


Abbildung 4-35 Mittlere CO₂-Emissionen der Zustellfahrzeuge bei einer Fahrzeugkapazität von 200 Belieferungen (gesamte Liefertour)

4.6.4 Zusammenfassung der Plausibilisierungsergebnisse

Insgesamt betrachtet liefert die entwickelte Methodik zur Bestimmung von Energieverbrauch und Emissionen auf der letzten Meile plausible und nachvollziehbare Ergebnisse. Die zunächst nur abgeschätzte Anzahl von 1.000 Lieferstichproben, von denen wiederum 100 zur Synthese von Fahrprofilen genutzt wurden, zeigte sich als ausreichend dimensioniert. Bei der näheren Betrachtung der Eigenschaften der Lieferstichproben konnte plausibles Verhalten festgestellt werden. Ebenso zeigen Auswertungen zur Länge der charakteristischen Streckensegmente einer Zustelltour nachvollziehbare Ergebnisse. Durch die Generierung von Fahrprofilen für die Zustellfahrten zur Bestimmung des spezifischen Endenergiebedarfs wird eine größere Genauigkeit erreicht, da der Einfluss von Sendungsmengen, Zustellgebieten und Strecken bzw. unterschiedlichen Brems- und Anfahrvorgängen bei unterschiedlichen Zustellwahrscheinlichkeiten abgebildet werden kann. Diese Tatsache konnte durch die Plausibilisierung des spezifischen Endenergiebedarfs gezeigt werden. Die Simulationsergebnisse für den mittleren absoluten Endenergiebedarf und die mittleren CO₂-Emissionen, die als Eingangsgrößen für die nachfolgenden Potentialanalysen dienen, zeigen ebenso nachvollziehbare und plausible Ergebnisse.

Wie bereits erwähnt, besteht keine Möglichkeit zur Validierung bzw. zum Abgleich der Ergebnisse des Modells mit realen Daten. Daher wird für die nachfolgenden Analysen angenommen, dass die mit der vorgestellten Methodik ermittelten Werte unter Einbezug der getroffenen Annahmen repräsentativ für reale Werte von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen sind. Zusätzlich wird in den nachfolgenden Auswertungen auf den Hinweis verzichtet, dass es sich bei allen Ergebnissen um abgeschätzte Mittelwerte handelt.

5. Potentialanalysen für ausgewählte Zustellkonzepte

5.1. Vorgehen

5.1.1 Berechnungsmethodik

Die Analyse des Potentials bzw. des Einflusses eines Zustellkonzepts auf Energieverbrauch und Emissionen erfolgt in ausgewählten Untersuchungsregionen. Für definierte Waren- bzw. Sendungsmengen, die aktuelle und zukünftige Entwicklungen abbilden, werden zwei Konzepte (Referenz und Alternative) für die Belieferung der Untersuchungsregion gegenübergestellt. Durch Ableitung bzw. Annahme einer Zustellwahrscheinlichkeit werden für diese beiden Konzepte Energieverbrauch und Kohlenstoffdioxidemissionen mit dem Modell FeVER bestimmt. Durch Saldierung kann im Anschluss daran das Potential zur Senkung des Energieeinsatzes bzw. Reduktion von Kohlenstoffdioxidemissionen durch die Verwendung des alternativen Konzeptes anstelle der Referenz bestimmt werden (**Abbildung 5-1**).

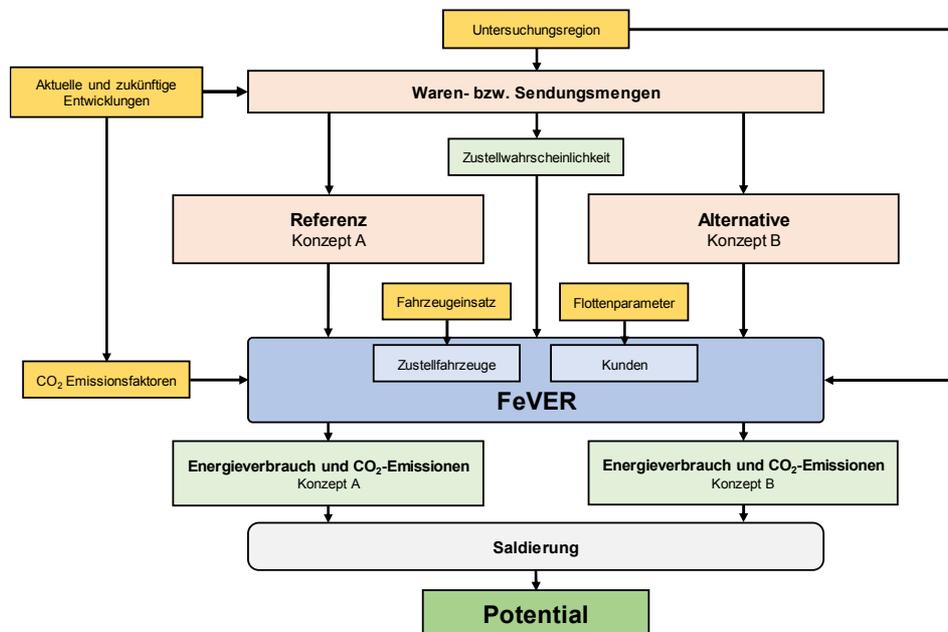


Abbildung 5-1 Methodik der Potentialanalysen

Um den Einfluss von unterschiedlichen räumlichen Strukturen auf die Ergebnisse analysieren zu können, werden eine ländliche, suburbane und urbane Region im Großraum München für die Auswertungen genutzt. Bei der Bestimmung von Energieverbrauch und Emissionen auf der letzten Meile werden sowohl elektrisch als auch verbrennungsmotorisch angetriebene Zustellfahrzeuge mit unterschiedlichen Transportkapazitäten für Sendungen betrachtet (vgl. Kapitel 3.1.4). Energieverbrauch und CO₂-Emissionen von Kunden bzw. der Kundenfahrzeugflotte können entweder als Referenz dienen bzw. werden bei der energetischen Bilanzierung des Zustellkonzepts betrachtet, falls diese aktiv für den Erhalt der Waren bzw. Sendungen in der Prozessstruktur der letzten Meile integriert sind. **Tabelle 5-1** gibt einen Überblick über die untersuchten Zustellkonzepte, die Ziele der Analysen sowie die betrachteten Zustellfahrzeuge.

Tabelle 5-1 Szenarienüberblick

Sendungstyp	Zustellkonzept	Analyse des Einflusses von	Betrachtete Fahrzeuge
Pakete	Adresszustellung mit Elektrofahrzeugen	Depotstandort Fahrzeugkapazität Fahrzeugtyp	Elektrische und konventionelle Zustellfahrzeuge
	Konsolidierung von Lieferungen bei der Adresszustellung	Anzahl Lieferdienste Lieferwellen	Elektrische und konventionelle Zustellfahrzeuge
	Abendlieferung	Ladezeitpunkt	Elektrisches Zustellfahrzeug FEV200
	Schließfächer	Beteiligung der Kunden im Zustellprozess	Elektrische und konventionelle Zustellfahrzeuge, konventionelle Privatfahrzeuge
Lebensmittel	Adresszustellung	Privatfahrzeugnutzung Distanz der Einkaufsfahrten	Elektrische und konventionelle Zustellfahrzeuge, elektrische und konventionelle Privatfahrzeuge

5.1.2 Eingrenzungen

Energetischer Bilanzraum

Als Bilanzraum wird immer der komplette Prozess der Zustellung von Sendungen auf der letzten Meile in einer Untersuchungsregion betrachtet. Daher werden neben der eigentlichen Auslieferung auch An- und Rückfahrt des Zustellfahrzeugs bilanziert. Die so ermittelten Werte für Energieverbrauch und Emissionen der Zustellfahrzeuge beziehen sich daher immer auf die Belieferung innerhalb der Grenzen der Untersuchungsregion. Die Möglichkeit zur Belieferung von Kunden in angrenzenden Regionen durch überschüssige Fahrzeugkapazitäten wird daher nicht betrachtet bzw. nicht bilanziert, weshalb durch diese Vorgehensweise Energieverbrauch und Emissionen ausschließlich für die Belieferung der Untersuchungsregion bestimmt werden. Eine Untersuchungsregion ist durch die offiziellen Gemeinde-, Stadt- oder Stadtteilgrenzen beschränkt. Etwaige Bereichsabgrenzungen von Logistikdienstleistern, die sich nicht mit den offiziellen Grenzverläufen decken, werden nicht betrachtet. Die Bilanzierung des Energieverbrauchs erfolgt auf Basis der Endenergie (Tank2Wheel-Betrachtung, vgl. Kapitel 2.4.3). Zur Bilanzierung der CO₂-Emissionen werden die Emissionsfaktoren des jeweiligen Energieträgers verwendet.

Energieverbrauch von Sendungsempfängern

Energieverbrauch und Emissionen von Fahrzeugen der Sendungsempfänger werden in der Bilanz berücksichtigt, insofern sie in die Logistikkette der letzten Meile integriert sind. Dabei wird der spezifische Kraftstoff- bzw. Endenergieverbrauch von Personenkraftwagen in Deutschland verwendet. Zur Bestimmung des mittleren Endenergieverbrauchs der deutschen Personenkraftwagenflotte werden mittlere Kraftstoffverbräuche genutzt. Die Werte für Otto- und Dieselmotor von 6,8 Liter_{Diesel}/100 km bzw. 7,7 Liter_{Ottokraftstoff}/100 km [58], gewichtet mit dem Anteil der jeweiligen Art des Antriebsmotors am Bestand an Personenkraftwagen in Deutschland, resultieren dabei in einem mittleren spezifischen Energieverbrauch von 65,80 kWh/100 km für die deutsche Personenkraftwagenflotte. Andere An-

triebstechnologien bzw. Kraftstoffe, z.B. Elektrofahrzeuge bzw. LPG, LNG oder biogene Treibstoffe, werden dabei vernachlässigt, da der Anteil dieser Fahrzeuge am gesamten Fahrzeugbestand in Deutschland gering ist. Für ausgewählte Sensitivitätsanalysen wird eine komplette Elektrifizierung der deutschen PKW-Flotte betrachtet. Dafür wird ein spezifischer Endenergiebedarf von 15 kWh/100 km angesetzt, der eine Flotte aus Elektrofahrzeugen mit einer Batteriekapazität von 30 kWh und einer Reichweite von durchschnittlich 200 km repräsentiert.

Energieverbrauch der Zustellfahrzeuge

Zur Bestimmung von Energieverbrauch und Emissionen der Zustellfahrzeuge wird dabei das in Kapitel 3 und 4 eingeführte Modell *FeVER* verwendet. Wie in der Plausibilisierung des Modells werden 1.000 Lieferstichproben zur Bestimmung der mittleren Streckenlängen verwendet, wovon 100 zur Bestimmung des mittleren spezifischen Energieverbrauchs der Zustellfahrzeuge verwendet werden. Als durchschnittliche Masse einer Sendung wird, wie in der Plausibilisierung, ein Wert von 2,5 kg angenommen.

Bereits die ausgewählten Ergebnisse der Plausibilisierung zeigen den Trend, dass Endenergieeinsatz und Emissionen pro Fahrzeug bei steigender Zustellwahrscheinlichkeit zurückgehen. Betrachtet man allerdings Belieferungen der kompletten Untersuchungsregion, d.h. beachtet man den Einsatz aller Zustellfahrzeuge bei einer Zustellwahrscheinlichkeit, dann ergibt sich der im unteren Teil von **Abbildung 5-2** dargestellte Endenergieverbrauch der Fahrzeuge im Streckensegment Belieferung. Wie das Beispiel für die Gemeinde Putzbrunn und Fahrzeugen mit einer Kapazität von 200 Belieferungen zeigt, steigt der Endenergiebedarf für die gesamte Untersuchungsregion mit zunehmender Zustellwahrscheinlichkeit. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass wegen der mit der Zustellwahrscheinlichkeit steigenden Sendungsmenge auf Grund der begrenzten Fahrzeugkapazität mehr Zustellfahrzeuge zur Versorgung einer Untersuchungsregion eingesetzt werden müssen. Da der Bilanzraum entlang der Gemeindegrenzen festgelegt wurde, wird bei allen nachfolgenden Auswertungen der Endenergiebedarf von sämtlichen eingesetzten Zustellfahrzeugen verwendet.

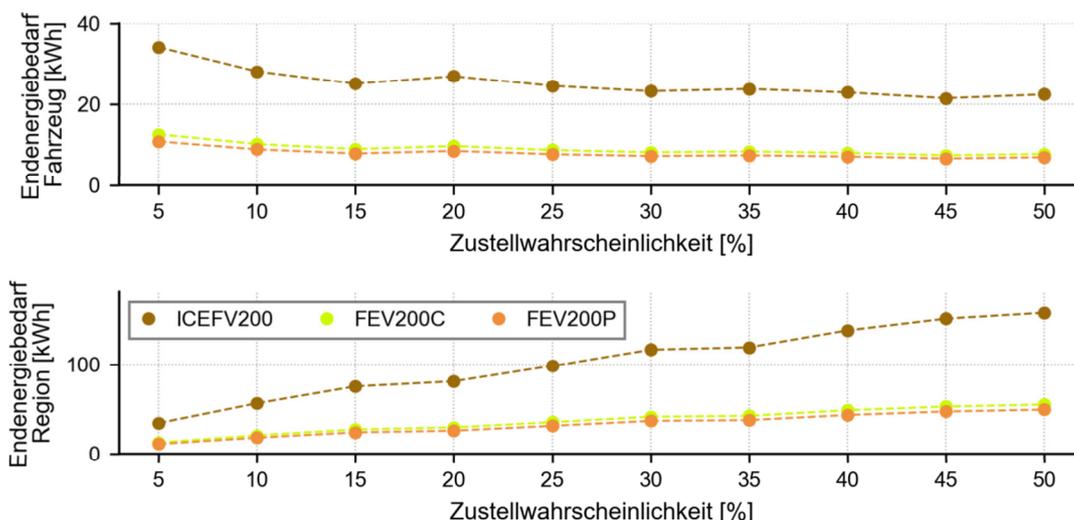


Abbildung 5-2 Endenergiebedarf im Streckensegment Belieferung für ein Fahrzeug und die gesamte Untersuchungsregion (Putzbrunn, Fahrzeugkapazität 200 Belieferungen)

5.1.3 CO₂-Emissionsfaktoren

Das Konzept der Emissionsfaktoren bzw. der energiespezifischen Emissionen ermöglicht die Bestimmung der resultierenden Emissionen beim Einsatz eines Energieträgers. Als Bezugsgrößen für Emissionsfaktoren sind prinzipiell alle in Kapitel 2.4.3 genannten energetischen Bilanzräume denkbar. In Abhängigkeit des verwendeten Bilanzraumes ergeben sich demnach für einen identischen Energieträger unterschiedlich hohe Emissionsfaktoren, da verschiedene Verluste bzw. Umwandlungsnutzungsgrade ggf. nicht bilanziert werden.

Insbesondere bei der Bilanzierung der Emissionen auf Basis der Endenergie kann ein Emissionsfaktor für direkte und indirekte Emissionen angegeben werden. Die direkten Emissionen beziehen sich dabei immer auf die bei der Verbrennung eines Energieträgers entstehenden Emissionen, während beim indirekten Emissionsfaktor auch Transportstrecken bzw. Herstellung und Aufbereitung des Endenergieträgers aus Primärenergieträgern bilanziert werden.

Prinzipiell kann ein Emissionsfaktor für alle bei der Verbrennung resultierenden Emissionen, z.B. Kohlenstoffdioxid, nitrose Gase oder Schwefeldioxid, angegeben werden. Neben der Angabe eines Emissionsfaktors für Kohlenstoffdioxid ist auch die Verwendung von Emissionsfaktoren in CO₂-Äquivalenten üblich. Dabei werden andere Emissionen, die bei der Verbrennung entstehen, über ihre Klimaschädlichkeit bzw. das *Global Warming Potential* (GWP) gewichtet dem Emissionsfaktor für Kohlenstoffdioxid aufgeschlagen.

Da sich die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit auf Deutschland beschränken, werden die für Deutschland gültigen Emissionsfaktoren verwendet. Es werden nur die resultierenden CO₂-Emissionen auf Basis der Endenergie bilanziert.

Dieselmotorkraftstoff

Der Emissionsfaktor von Diesel wird durch die Zusammensetzung des Kraftstoffs beeinflusst. In [146] zusammengefasste Stichproben aus verschiedenen Raffinerien in Deutschland ergaben keine große Schwankungsbreite des resultierenden Emissionsfaktors. Auch

hat die Beimischung von Zusatzstoffen bei Winterdiesel keinen bedeutenden Einfluss [146]. Als direkter Emissionsfaktor von Dieselmotoren wird der Wert von 74,0 t CO₂/TJ bzw. 266,4 gCO₂/kWh verwendet [146]. Dieser Wert entspricht den Emissionen, die bei der Verbrennung von Dieselmotoren im Verbrennungsmotor bei vollständiger Verbrennung entstehen. Bei der Betrachtung von vorgelagerten Ketten in der Bilanz, d.h. von Raffinerungs- und Transportprozessen des Dieselmotoren, würde sich der Wert auf 299 gCO₂/kWh [147] erhöhen.

Kraftstoffmix

Der Emissionsfaktor des Kraftstoffmix wird identisch zum spezifischen Endenergiebedarf der deutschen Personenkraftwagenflotte bestimmt. Die direkten Emissionsfaktoren von 266,4 gCO₂/kWh für Diesel bzw. 263,2 gCO₂/kWh für Ottomotoren bzw. Superbenzin [146] werden dabei mit den Anteilen der Motorenart am gesamten Fahrzeugbestand an Personenkraftwagen gewichtet. Der daraus resultierende direkte Emissionsfaktor von 264,2 gCO₂/kWh für die deutsche Personenkraftwagenflotte wird für die Bilanzierung der CO₂-Emissionen von konventionellen Privatfahrzeugen verwendet.

Strommix

Zur Bestimmung der CO₂-Emissionen von Elektrofahrzeugen auf der letzten Meile werden die spezifischen Emissionen des deutschen Strommix benötigt. Auf Grund der Tatsache, dass die Emissionen bei Elektrofahrzeugen im Gegensatz zu Fahrzeugen mit Dieselmotor nicht direkt am Ort des Einsatzes entstehen, muss darauf geachtet werden, dass die Bilanzräume beim Vergleich der Emissionen eingehalten werden.

Durch die Verwendung eines Emissionsfaktors für den Stromverbrauch beim Endkunden, d.h. vor der eigentlichen Energieanwendung des Stroms, ist ein direkter Vergleich der Emissionen von Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Dieselmotor möglich. Kohlendioxidemissionen, verursacht durch Kraftwerkseigenbedarf und Verluste beim Stromtransport, werden dabei vorgelagerten Ketten zugeschrieben, ähnlich der Raffinerung und dem Transport von Dieselmotoren. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Elektrofahrzeug zusätzlich zur elektrischen Energie gleichzeitig auch die bei der Stromerzeugung entstandenen Emissionen lädt bzw. beim Fahrbetrieb entsprechend verursacht.

Abbildung 5-3 zeigt die Jahresmittelwerte der spezifischen Kohlendioxidemissionen des deutschen Strommix bezogen auf den Stromverbrauch beim Endkunden. Durch den vermehrten Ausbau von regenerativen Erzeugungsanlagen in den letzten Jahren konnten die spezifischen Emissionen des deutschen Strommix im Zeitraum 1990 bis 2017 von 764 g CO₂/kWh auf 489 g CO₂/kWh im Jahr 2017 reduziert werden. [145]

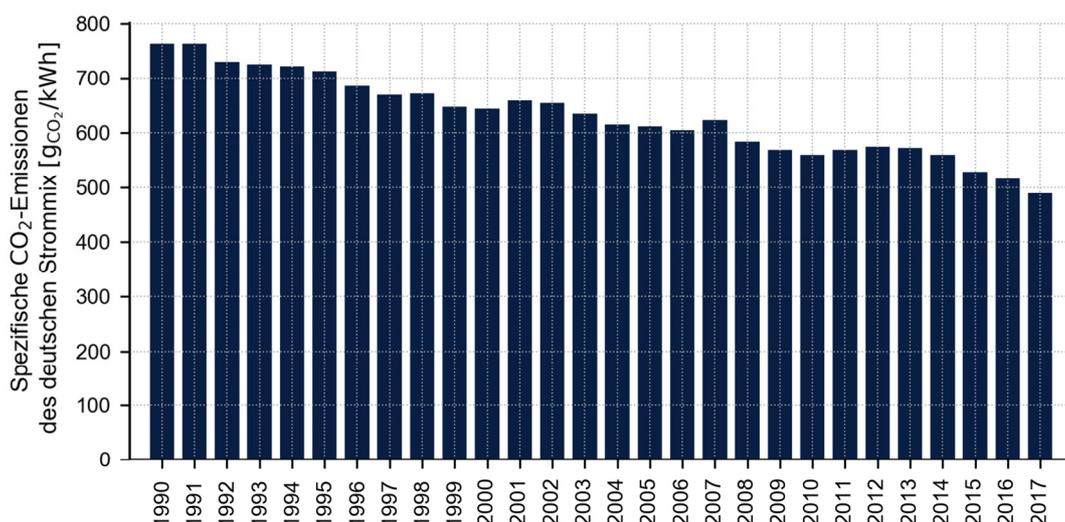


Abbildung 5-3 Entwicklung der spezifischen CO₂-Emissionen des deutschen Strommix im Zeitraum von 1990 bis 2017 [145]

Bestimmung von tageszeitabhängigen Emissionsfaktoren des Strommix

Im Gegensatz zum nahezu stets konstanten Emissionsfaktor von Dieselmotoren bzw. des Kraftstoffmix zeigt der Emissionsfaktor des Strommix neben der fallenden Tendenz der Jahresmittelwerte auch Schwankungen in Abhängigkeit des Kraftwerkseinsatzes. Insbesondere hat der fluktuierende Anteil der Erneuerbaren an der Stromerzeugung einen wesentlichen Einfluss auf die resultierenden CO₂-Emissionen. Um auch den Einfluss von tageszeitlichen Schwankungen auf die Emissionsbilanz von Elektrofahrzeugen auf der letzten Meile zu untersuchen können, müssen daher die Emissionsfaktoren in einer höheren zeitlichen Auflösung in Betracht gezogen werden.

Zur Bestimmung von stündlichen CO₂-Emissionsfaktoren wurden die Daten von [148] zur Stromerzeugung nach Energieträger im Jahr 2016 verwendet, die auf offizielle Statistiken zum Energieverbrauch nach Kraftwerksart in Deutschland kalibriert sind. Da sich diese Daten auf die Nettostromerzeugung in Deutschland beziehen, wurden sie mit Hilfe von [149], [150] und [151] auf die Bilanzgrenzen aus [145] justiert.

Durch Angaben zur absolut ausgestoßenen CO₂-Menge nach Kraftwerksart in [145] konnten hierzu einzelne Emissionsfaktoren für Braunkohle-, Steinkohle- und Gaskraftwerke sowie übrige fossile Kraftwerke (v.a. Müll- und Heizölkraftwerke) errechnet werden, die wiederum die Bestimmung eines stündlichen Emissionsfaktors des Strommix erlauben. Wie in [145] wurden dabei nur fossile Kraftwerke beachtet, Kernkraftwerke sowie Anlagen zur Stromgestehung aus Erneuerbaren wurden nicht bewertet. Die geringen Abweichungen der errechneten Emissionsfaktoren für die einzelnen Kraftwerkstypen zu den vom Umweltbundesamt (UBA) in [145] angegebenen Werten können auf unvermeidliche Rundungsfehler bei der Justierung der Erzeugung auf einheitliche Bilanzgrenzen zurückgeführt werden (**Tabelle 5-2**).

Tabelle 5-2 Vergleich der berechneten Emissionsfaktoren

Kraftwerksart	Angabe UBA [145]	Errechneter Emissionsfaktor	Abweichung Berechnung zu Angabe UBA	
Einheit	[gCO ₂ /kWh]	[gCO ₂ /kWh]	[gCO ₂ /kWh]	[%]
Braunkohle	1.148	1.160	12	+1,05 %
Steinkohle	847	877	30	+3,54 %
Erdgas	382	374	-8	-2,09 %
Sonstige	k.A.	1.725	k.A.	k.A.

Der Jahresmittelwert von 515,5 gCO₂/kWh der so bestimmten stündlichen CO₂-Emissionsfaktoren deckt sich mit dem in [145] genannten Wert von 516 gCO₂/kWh. Die geringe Abweichung ist wiederum auf Rundungsfehler bei der Anpassung der Daten von [148] zurückzuführen, wobei sich die Jahressummen der stündlich ausgestoßenen CO₂-Mengen mit den Angaben aus [145] komplett decken.

Als Ergebnis zeigt **Abbildung 5-4** die Verteilung der stündlichen spezifischen CO₂-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2016, wobei die Werte im Bereich von rund 190 gCO₂/kWh bis hin zu circa 670 gCO₂/kWh schwanken.

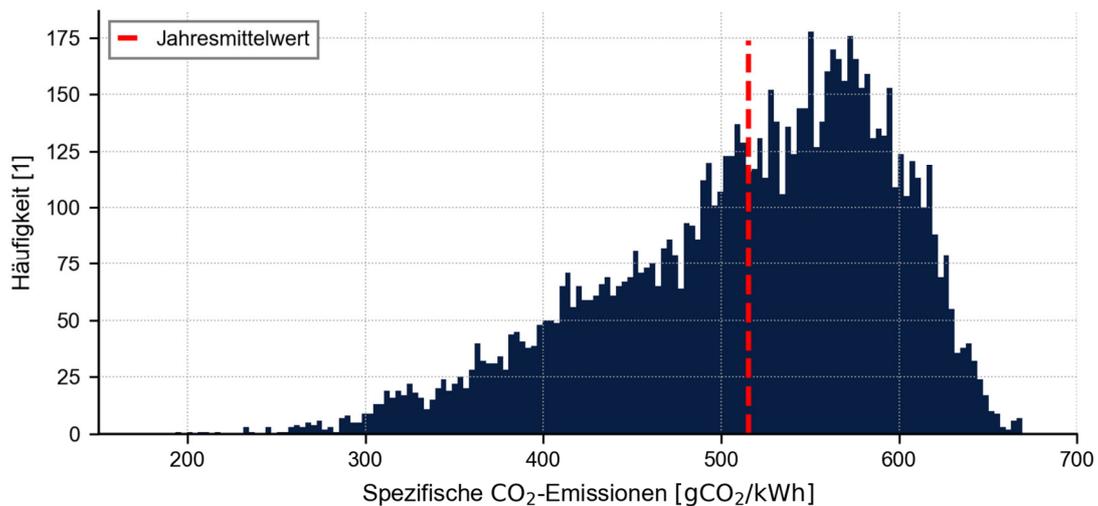


Abbildung 5-4 Histogramm der stündlichen CO₂-Emissionsfaktoren des deutschen Strommix im Jahr 2016

Das Vorliegen der stündlich aufgelösten Emissionsfaktoren ermöglicht die Optimierung des Ladezeitpunktes der Elektrofahrzeuge mit dem Ziel einer Minimierung der CO₂-Emissionen. Voraussetzung hierfür ist, dass die genauen Zeiträume, in dem die Elektrofahrzeuge am Stromnetz zum Laden angeschlossen sind, bekannt sind.

Da der Einsatz von Elektrofahrzeugen auf der letzten Meile sich gerade erst in der Logistikbranche durchsetzt, sind keine Daten zum genauen Ladezeitpunkt der Fahrzeuge verfügbar. Um dennoch die Ladezeitpunkte bei der Bilanzierung der CO₂-Emissionen abbilden zu können, wurden Ladezeitintervalle definiert:

- Ladung in der Nacht im Zeitraum von 18 Uhr bis 6 Uhr des Folgetages
- Ladung Spät von 23 Uhr bis 14 Uhr des Folgetages
- Ladung am Tag im Zeitraum von 6 Uhr bis 14 Uhr

Für diese Intervalle wird jeweils der Jahresmittelwert des Emissionsfaktors berechnet. Eine Unterscheidung nach Jahreszeit wird nicht angewandt, da auch bei der Modellierung des Energieverbrauchs der Zustellfahrzeuge keine jahreszeitbedingte Verbrauchsabhängigkeit betrachtet wurde. Insbesondere werden Heiz- und Kühlbedarf der Fahrzeuge vernachlässigt.

Abbildung 5-5 stellt die Jahresmittelwerte der spezifischen CO₂-Emissionen für die definierten Ladezeitintervalle dar. Dabei wird ersichtlich, dass das Aufladen der Elektrofahrzeuge tagsüber (*Tag*) mit 492 gCO₂/kWh die geringsten CO₂-Emissionen aller definierten Ladezeitintervalle verursacht.

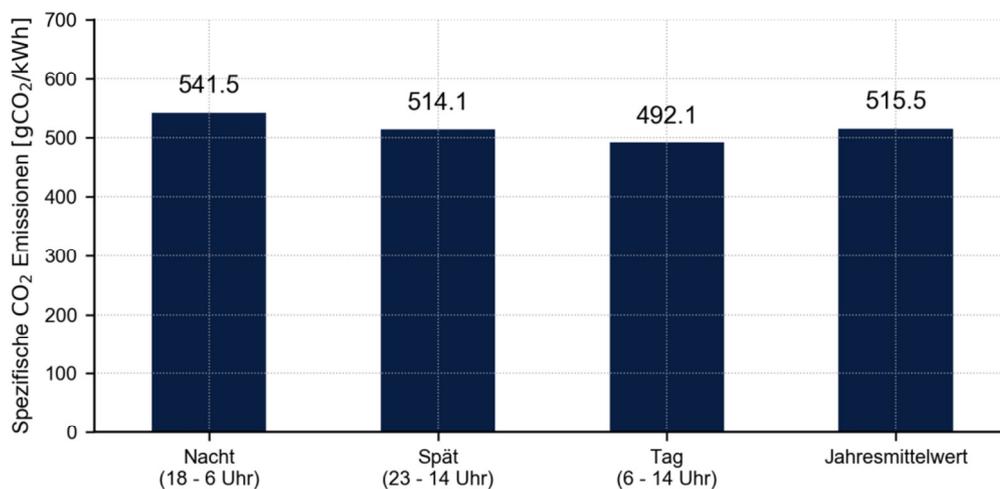


Abbildung 5-5 CO₂-Emissionsfaktoren des deutschen Strommix für verschiedene Ladezeiträume im Jahr 2016

5.2. Untersuchungsregionen

Zur Quantifizierung des Einflusses von unterschiedlichen räumlichen Strukturen auf Energieverbrauch und Emissionen auf der letzten Meile wurden drei Untersuchungsregionen, die in der Stadt bzw. im Landkreis München liegen, ausgewählt. Die drei gewählten Regionen

- Haidhausen Süd,
- Putzbrunn und
- Aying

zeichnen sich durch unterschiedlich große Flächen bzw. Haushalts- und Bevölkerungsdichten aus. Insbesondere die Wahl von Landkreis und Stadt München beruht auf der Tatsache, dass sie mit zu den am stärksten wachsenden Regionen in Deutschland zählen und auch im Ranking der Kaufkraft die oberen Plätze belegen [152] [153]. Trotz der guten Versorgung mit Waren und Lebensmitteln sowie der guten infrastrukturellen Anbindung kann daher angenommen werden, dass viele Kunden unterschiedliche Güter bestellen, die im Nachgang ausgeliefert werden müssen. Insbesondere die Annahme einer homogenen Ver-

teilung der Zustellwahrscheinlichkeit für alle Haushalte ist aus diesen Gründen in guter Näherung für die Untersuchungsregionen gerechtfertigt.

Abbildung 5-6 zeigt eine Übersichtskarte zur Lage der gewählten Untersuchungsregionen. Als Beispiel für eine urbane Siedlungsstruktur wurde dabei der Stadtbezirksteil Haidhausen Süd der Stadt München gewählt. Während die Gemeinde Putzbrunn im Landkreis München suburbane Strukturen repräsentiert, zeichnet sich die Gemeinde Aying, ebenfalls im Landkreis München, durch ländliche Siedlungsstrukturen aus.

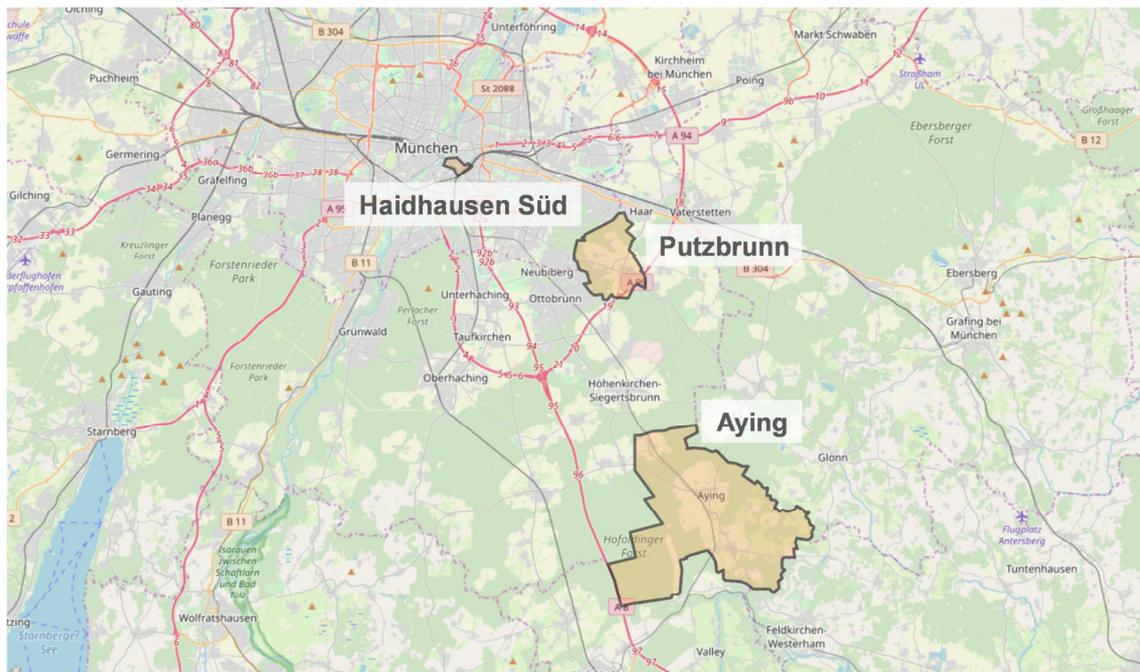


Abbildung 5-6 Übersichtskarte Untersuchungsregionen (Kartenmaterial [101])

Zur Motivation der bereits eingeführten Zuordnung der einzelnen Untersuchungsregionen zu verschiedenen räumlichen Siedlungsstrukturen zeigt **Tabelle 5-3** einen Quervergleich von verschiedenen statistischen Daten. Insbesondere bei der Betrachtung der Einwohnerdichte der einzelnen Regionen zeigen sich erhebliche Unterschiede. Während in Haidhausen Süd rund 18.100 Einwohner pro Quadratkilometer wohnen, sind es in Putzbrunn mit 589 bzw. Aying mit 115 deutlich weniger. Diese Tatsache kann ebenso wie die mittlere Anzahl an Wohnungen pro Wohngebäude zur Plausibilisierung der Zuordnung genutzt werden. Während im Schnitt Wohngebäude in Haidhausen Süd rund 12,5 Wohnungen aufweisen, sind in Putzbrunn, das laut Definition einen suburbanen Charakter hat, nur 2,2 Wohnungen pro Gebäude zu finden, d.h. im Mittel prägen Zweifamilienhäuser das Ortsbild. Im Vergleich dazu deutet der Wert von 1,5 Wohnungen pro Gebäude in Aying auf Ein- bis Zweifamilienhäuser als ortsprägende Bebauung hin. Im Nachfolgenden werden die besonderen Charakteristika der Regionen erläutert.

Tabelle 5-3 Statistische Daten der gewählten Untersuchungsregionen

Kenngroße		Haidhausen Süd	Putzbrunn	Aying
Fläche	[ha]	79,48 ¹	1117 ²	4499 ⁴
Einwohner	[1]	14.378 ¹	6.583 ³	5.165 ⁴
Einwohnerdichte	[EW/km ²]	18.090,1	589,3	114,8
Wohngebäude	[1]	607 ¹	1.252 ³	1.299 ⁴
Wohnungen	[1]	7.597 ¹	2.775 ³	1.995 ⁴
Wohnungen pro Wohngebäude	[1]	12,5	2,2	1,5
Wohnungsdichte	[Whg./km ²]	9558,4	248,4	44,3

¹ [154] Einwohner zum 31.12.2016, Gebäude und Wohnungen zum 09.05.2011

² [155] ³ [156] Stichtag 31.12.2016 ⁴ [157] Stichtag 31.12.2016

5.2.1 Haidhausen Süd

Der Stadtbezirksteil Haidhausen Süd (**Abbildung 5-7**) ist dem 5. Münchner Stadtbezirk Au-Haidhausen zugeordnet. An der nordwestlichen Grenze sind neben einem Einkaufszentrum auch der Münchner Konzertsaal Gasteig sowie einige Hotels und Bürobetriebe angesiedelt. Im Osten begrenzt der Bahnhof München Ost den Stadtbezirksteil, in dessen Nähe auch einige Bürogebäude zu finden sind. Orleansstraße und Rosenheimer Straße können als wichtigste Verkehrswege gesehen werden, durch die der Stadtbezirksteil indirekt vom Mittleren Ring bzw. auch von der Autobahn A8 aus erreicht werden kann.

Haidhausen Süd zeichnet sich durch eine relativ homogene Bebauung mit fast ausschließlich Mehrfamilienhäusern aus. In vielen Fällen ist im Erdgeschoss der Gebäude Kleingewerbe oder Gastronomie angesiedelt, die übrigen Stockwerke werden als Wohnraum genutzt. Die geschlossene bzw. aneinandergereihte Bebauung mit Gebäuden entlang der einzelnen Straßen formt dabei Wohnblöcke, wobei der Innenbereich dieser Blöcke häufig auch mit Wohngebäuden bebaut ist. Diese Gebäude haben meist keinen direkten Straßenzugang, sondern sind über Einfahrten bzw. Durchgänge an die angrenzenden Straßen angebunden.

Von den insgesamt 36.141 Haushalten im Stadtbezirk Au-Haidhausen im Jahr 2017 waren rund ein Viertel bzw. 8.317 Haushalte diesem Stadtbezirksteil zugeordnet. Insgesamt waren dabei 14.121 Einwohner gemeldet. Mit Stand 2011 waren in Haidhausen Süd 607 Gebäude mit Wohnraum vorzufinden, in denen 7.597 Wohnungen angesiedelt waren. [158] [154]

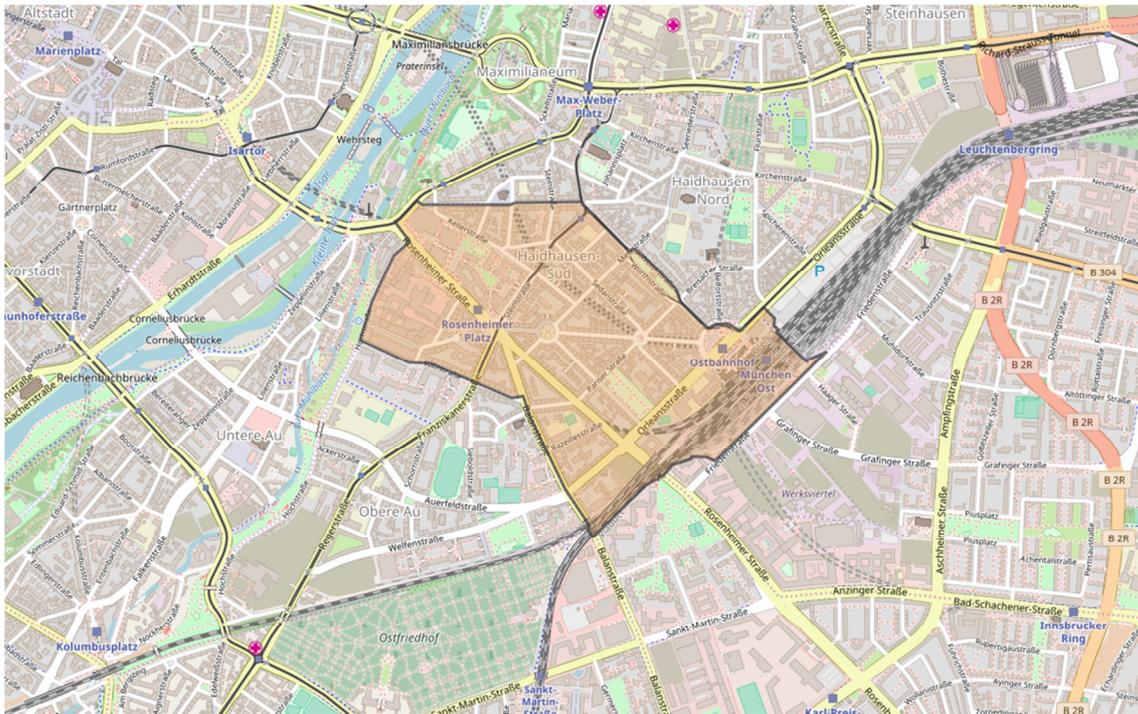


Abbildung 5-7 Stadtbezirksteil Haidhausen Süd (Kartenmaterial [101])

5.2.2 Putzbrunn im Landkreis München

Die Gemeinde Putzbrunn im Landkreis München zeichnet sich sowohl durch ländliche und suburbane Strukturen aus. Sie gliedert sich dabei klar in die vier Ortsteile Putzbrunn, Oedenstockach, Solalinden und Waldkolonie (**Abbildung 5-8**). Im Westen grenzt die Gemeinde an die Nachbarorte Neubiberg und Ottobrunn sowie an den Stadtbezirksteil Waldperlach der Landeshauptstadt München. Neben der Autobahn A99, die entlang der westlichen Gemeindegrenze verläuft, ist Putzbrunn auch über die Bundesstraße B471 erreichbar, die zusätzlich zu den Verbindungsstraßen nach Ottobrunn, Neubiberg und München eine wichtige Anbindung an die Umgebung bzw. die Gemeinden Haar im Norden und Hohenbrunn im Süden darstellt.

Während im Ortskern der Gemeinde neben Wohngebäuden auch Industrie- und Dienstleistungsunternehmen am westlichen Rand angesiedelt sind, zeichnen sich die Ortsteile Solalinden und Oedenstockach hauptsächlich durch eine ländliche Struktur aus. Im Bereich zwischen Oedenstockach und Waldkolonie liegt ein kleines Gewerbegebiet, in dem drei Supermärkte angesiedelt sind. Den Ortsteil Waldkolonie, der direkt an die Nachbarorte Ottobrunn und Neubiberg angrenzt, prägen dem hingegen mehrgeschossige Wohngebäude.

Die Gemeinde Putzbrunn wuchs in den letzten Jahren deutlich. In den Jahren 2006 bis 2016 wurden insgesamt 200 neue Wohngebäude mit 339 Wohnungen errichtet, wobei die Bevölkerungszahl um rund 700 auf circa 6.600 Einwohner im Jahr 2016 angestiegen ist. Im Jahr 2016 waren in Putzbrunn 2.775 Wohnungen in 1.252 Wohngebäuden vorzufinden. [156] Vor allem auf Grund des Flächenmangels für Wohngebäude in der Stadt München und dem starken wirtschaftlichen Wachstum im Großraum München wird ein weiterer Anstieg der Einwohnerzahl auf circa 8.200 Einwohner im Jahr 2034 [156] prognostiziert.

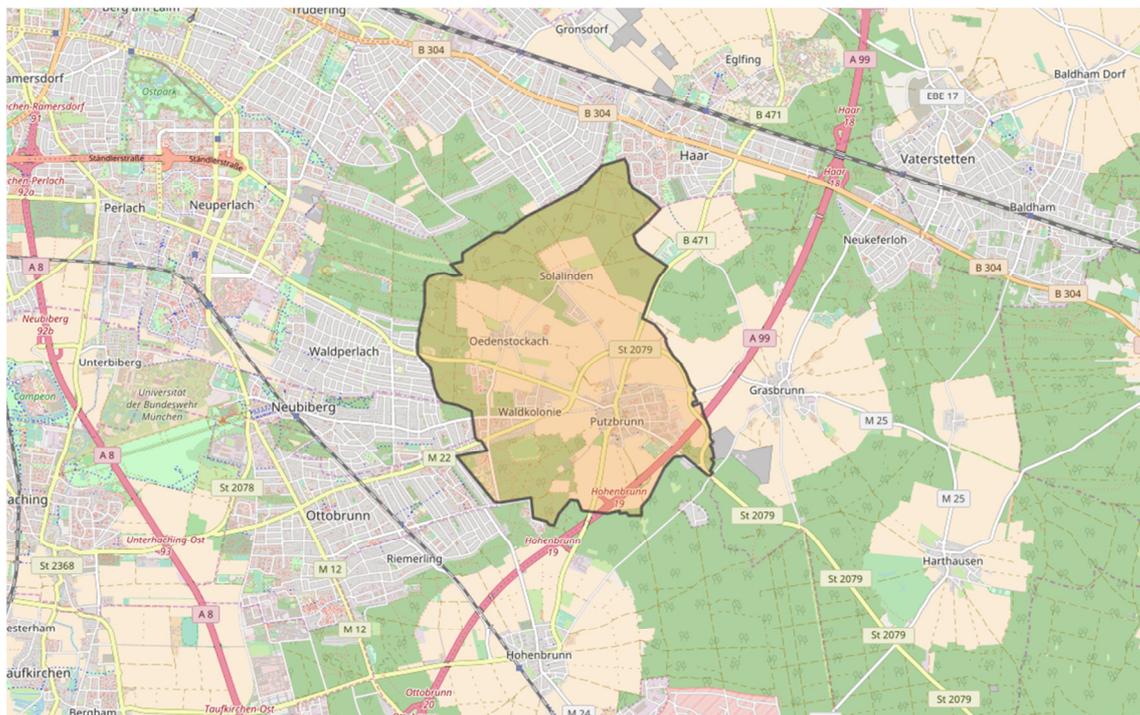


Abbildung 5-8 Gemeinde Putzbrunn (Kartenmaterial [101])

5.2.3 Aying im Landkreis München

Die Gemeinde Aying liegt am südöstlichen Rand des Landkreises München (**Abbildung 5-9**). Sie grenzt im Osten an den Landkreis Ebersberg bzw. im Süden an den Landkreis Rosenheim. Zusätzlich zu den Ortsteilen Dürnhaar, Aying, Peiß, Göggenhofen und Großhelfendorf, die sich entlang der Staatsstraße München-Rosenheim als wichtige Nord-Süd-Achse erstrecken, kann das Gemeindegebiet in insgesamt 19 Weiler und Ortsteile gegliedert werden. Trotz der Lage im Voralpenland zeigen sich in der Gemeinde keine großen Höhendifferenzen, erst an der südlichen Gemeindegrenze beginnt das Gelände hügelig zu werden. Neben zwei kleinen Gewerbegebieten in Großhelfendorf und Aying prägen Wohngebäude das Ortsbild der Gemeinde.

Mit 115 Einwohnern pro Quadratkilometer hat die Gemeinde Aying die zweitgeringste Einwohnerdichte aller Kommunen im Landkreis München und zugleich die zweitgrößte Fläche [155]. Ähnlich wie die Gemeinde Putzbrunn zeigt auch Aying einen Zuwachs an Einwohnern, Haushalten und Wohngebäuden. Im Zeitraum von 2006 bis 2016 wuchs die Einwohnerzahl von Aying um rund 900 auf insgesamt 5.165 Einwohner an, wobei für das Jahr 2028 eine Einwohnerzahl von 5.940 prognostiziert wird. In 1.299 Wohngebäuden wurden im Jahr 2016 1.995 Wohnungen bzw. Haushalte verzeichnet, wobei ein Zuwachs von rund 250 Gebäuden bzw. rund 400 Wohnungen festgestellt werden konnte. [157]

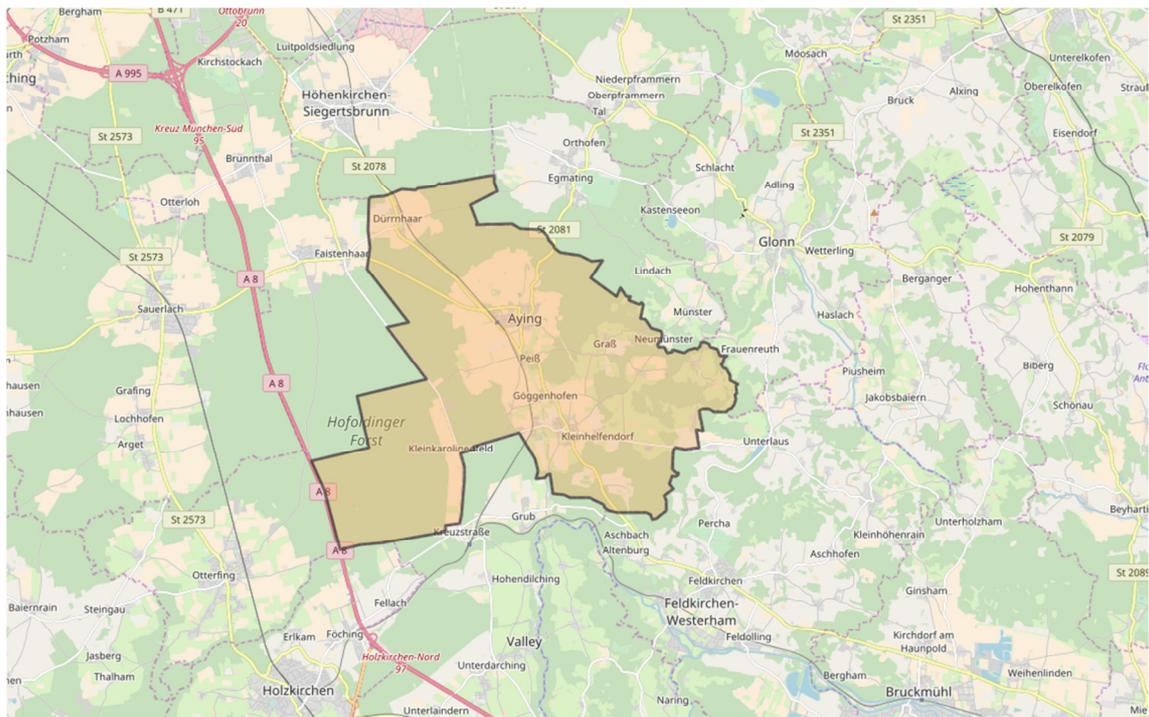


Abbildung 5-9 Gemeinde Aying (Kartenmaterial [101])

5.3. Paketzustellung mit Elektrofahrzeugen

Betrachtet man die Aufteilung der jährlichen Sendungsmengen von KEP-Dienstleistern in die einzelnen Marktsegmente (**Abbildung 5-10**), erkennt man eine deutliche Zunahme im Bereich der B2B-Sendungen, während die Sendungsmengen im Bereich von C2C und B2B annähernd konstant geblieben sind. Der Anstieg in den Jahren 2009 bis 2017 im Bereich B2C ist dabei vor allem auf den gestiegenen Einfluss des Online-Handels [11] zurückzuführen. Daher wird das Potential eines Einsatzes von Elektrofahrzeugen in Kombination mit verschiedenen Zustellkonzepten für Sendungen in diesem Marktsegment im Nachfolgenden analysiert. Zur Betrachtung aller Marktsegmente, die die Auslieferung von Paketen an Privathaushalte beinhalten, werden die Analysen auf die Marktsegmente B2C und C2C ausgeweitet.

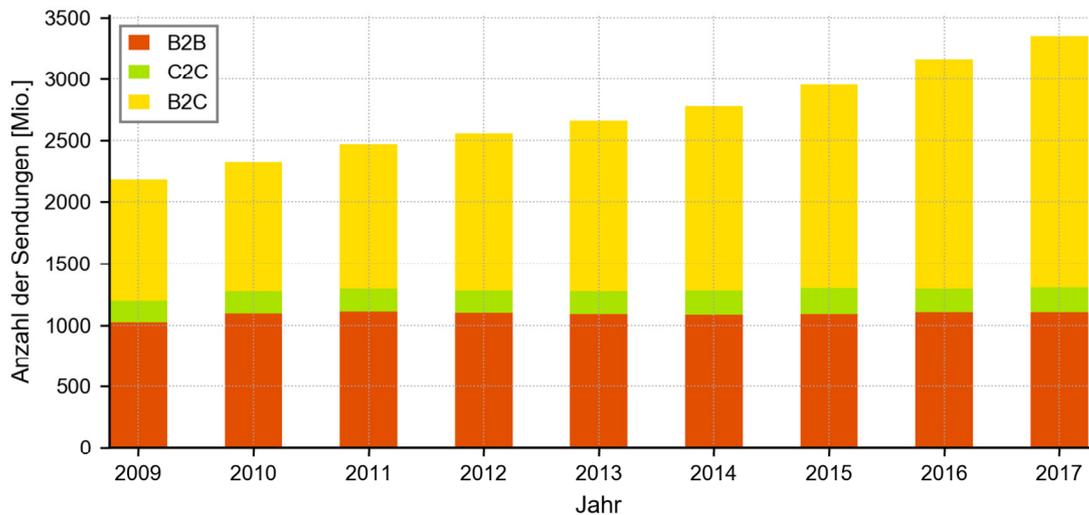


Abbildung 5-10 Entwicklung der jährlichen Sendungsmenge von Kurier-, Express- und Paketdienstleistern von 2009 bis 2017 nach Marktsegmenten (Daten aus [159–163])

Jeder der drei Untersuchungsregionen wurde für die Analysen zur Paketzustellung ein real existierendes Fahrzeugdepot als Ausgangs- und Endpunkt der Zustelltouren zugewiesen. Zur Untersuchung des Einflusses des Depotstandorts wurde der Gemeinde Putzbrunn neben dem Depot in Aschheim im Münchner Osten auch ein alternatives Depot in Ottobrunn zugeteilt (Abbildung 5-11).

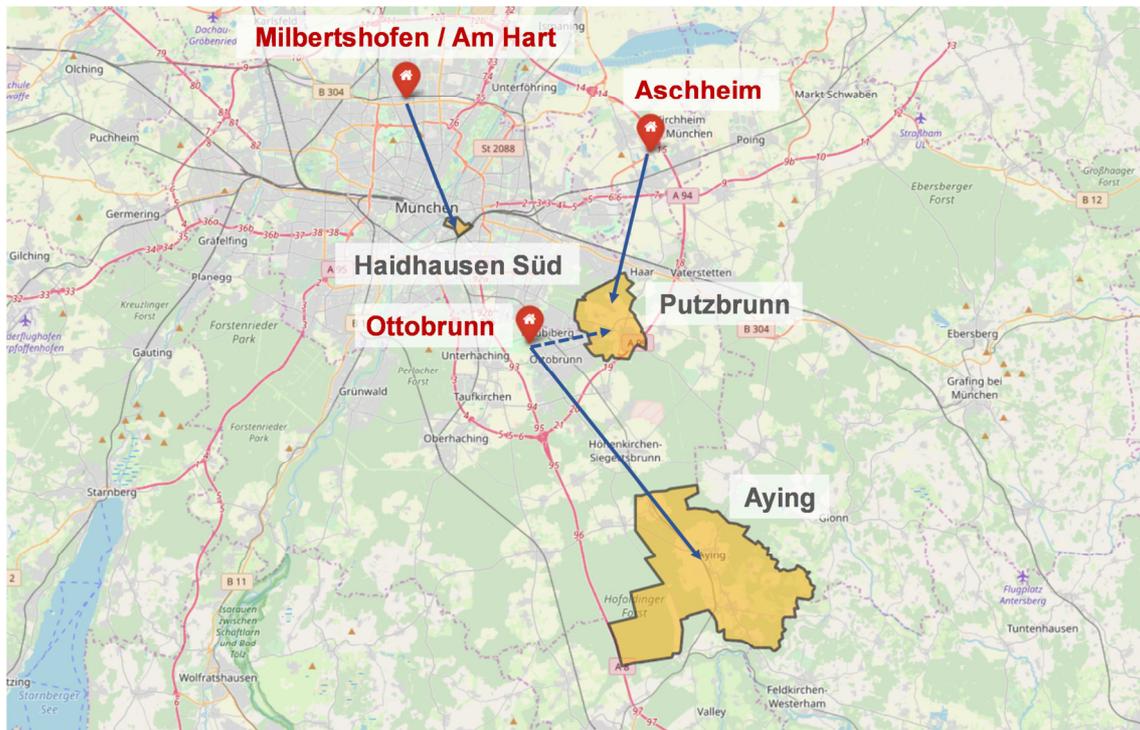


Abbildung 5-11 Standorte der Fahrzeugdepots (Kartenmaterial [101])

5.3.1 Energieverbrauch und Emissionen bei der Adresszustellung

Als derzeit wichtigstes Zustellkonzept auf der letzten Meile wird zuerst eine Adresszustellung von Sendungen analysiert. In diesem Fall kann der Einsatz von elektrisch angetriebenen Lieferfahrzeugen auch als neues Zustellkonzept gesehen werden, dessen Potential zur Energieeinsparung und Emissionsreduktion gegenüber der Zustellung mit konventionellen Fahrzeugen bestimmt werden kann. Da auf Grund der steigenden Sendungsmengen auch mehr Fahrzeugdepots errichtet wurden, wird auch der Einfluss des Depotstandorts auf Energieverbrauch und Emissionen analysiert (**Abbildung 5-12**).

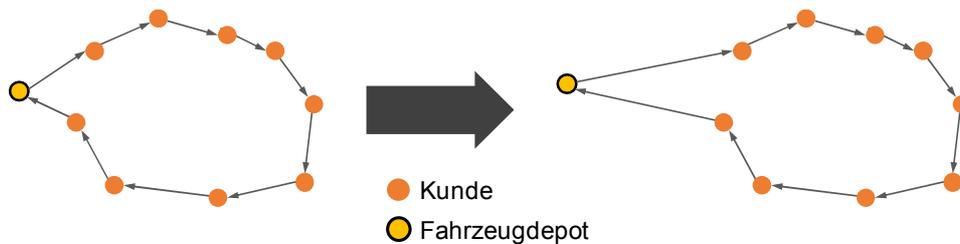


Abbildung 5-12 Adresszustellung von Sendungen

Mit den Daten zu Sendungsmengen im C2C- und B2C-Bereich [159–164] sowie der Entwicklung der Anzahl an Haushalten in Deutschland [165] lässt sich eine mittlere Zustellwahrscheinlichkeit für Paketsendungen in Deutschland bestimmen. Mit der Annahme von im Schnitt 300 Liefertagen pro Jahr ergibt sich die in **Abbildung 5-13** dargestellte Entwicklung der mittleren Zustellwahrscheinlichkeit für Paketsendungen pro Haushalt in Deutschland. Die Tendenz des Verlaufs spiegelt dabei die steigende Sendungsmenge an Paketen wider. Während im Jahr 2009 die Zustellwahrscheinlichkeit bei rund 7,7 % lag, bekam im Schnitt jeder zehnte deutsche Haushalt an einem Liefertag im Jahr 2012 eine Paketsendung. Im Jahr 2017 erreichte die Zustellwahrscheinlichkeit einen Wert von rund 15 %, was einer Erhöhung um fast den Faktor 2 im Vergleich zum Jahr 2009 bedeutet. Die nahezu lineare Zunahme der Zustellwahrscheinlichkeit im Zeitintervall von 2009 bis 2017 erlaubt eine lineare Extrapolation zur Abschätzung von zukünftigen Werten. Dabei wird im Jahr 2022 circa ein Wert von 20 % erreicht, was einer Verdopplung der Sendungsmenge bei gleichbleibender Anzahl an Haushalten im Vergleich zum Jahr 2012 entspricht.

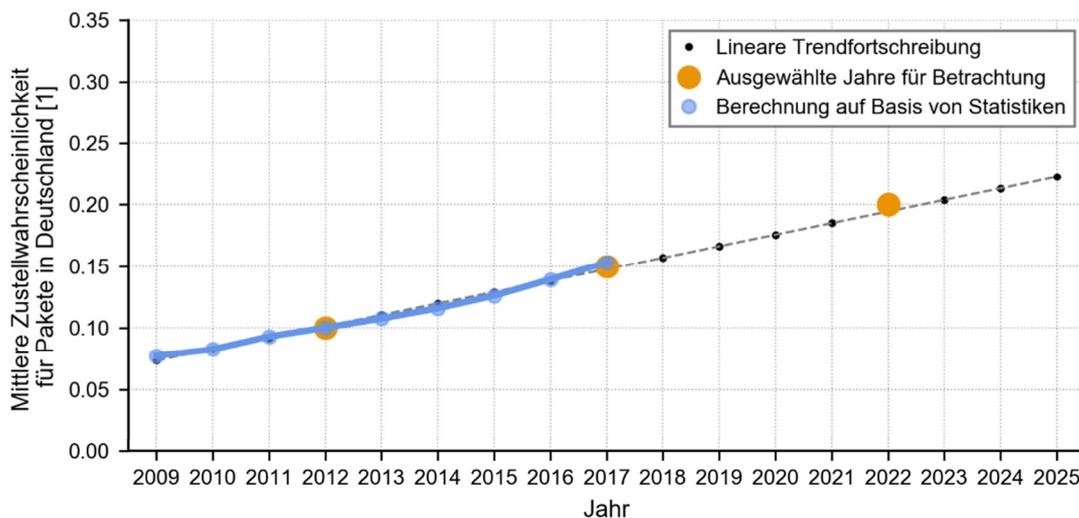


Abbildung 5-13 Berechnete und interpolierte Zustellwahrscheinlichkeit für Paketsendungen in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2025

Festlegung von Untersuchungsjahren

Gleichzeitig können mit Hilfe der jährlichen Entwicklung der Zustellwahrscheinlichkeit für Paketsendungen auch Aussagen zu Energieverbrauch und Emissionen der Zustellfahrzeuge in den für diese Arbeit ausgewählten Untersuchungsregionen in bestimmten Jahren getroffen werden. Dabei wird angenommen, dass sich die Anzahl der Haushalte in einer Untersuchungsregion über die Jahre nicht verändert. Für die Analyse des Potentials von Elektrofahrzeugen auf der letzten Meile der Paketzustellung werden dazu im Nachfolgenden die Jahre 2012, 2017 und 2022 genutzt, bei denen in guter Näherung die mittlere Paketzustellwahrscheinlichkeit Werte von 10 %, 15 % und 20 % erreicht hat bzw. erreichen wird. Auf eine Betrachtung von Jahren in entfernterer Zukunft wird auf Grund der Dynamik im Markt der Kurier-, Express- und Paketdienstleister verzichtet.

Emissionsfaktoren des Strommix in den Untersuchungsjahren

Wie bereits erwähnt wurde, konnte in den letzten Jahren auf Grund des größer werdenden Anteils von erneuerbaren Energien an der der Stromgestehung in Deutschland auch der Emissionsfaktor des Strommix deutlich gesenkt werden. Da für die kommenden Jahre mit einem weiteren Anstieg des Anteils von regenerativ gewonnenen Strom an der gesamten Stromerzeugung in Deutschland zu rechnen ist, wird für die Bestimmung des Emissionsfaktors im Jahr 2022 die Abnahme des Emissionsfaktors linear fortgeschrieben (**Abbildung 5-14**). Zur Berechnung der durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen verursachten CO₂-Emissionen werden daher die in der Abbildung dargestellten Jahresmittelwerte der Emissionsfaktoren des Strommix für die einzelnen Untersuchungsjahre verwendet. Als Emissionsfaktor von Dieselkraftstoff wird der bereits eingeführte, konstante Wert von 266 gCO₂/kWh verwendet.

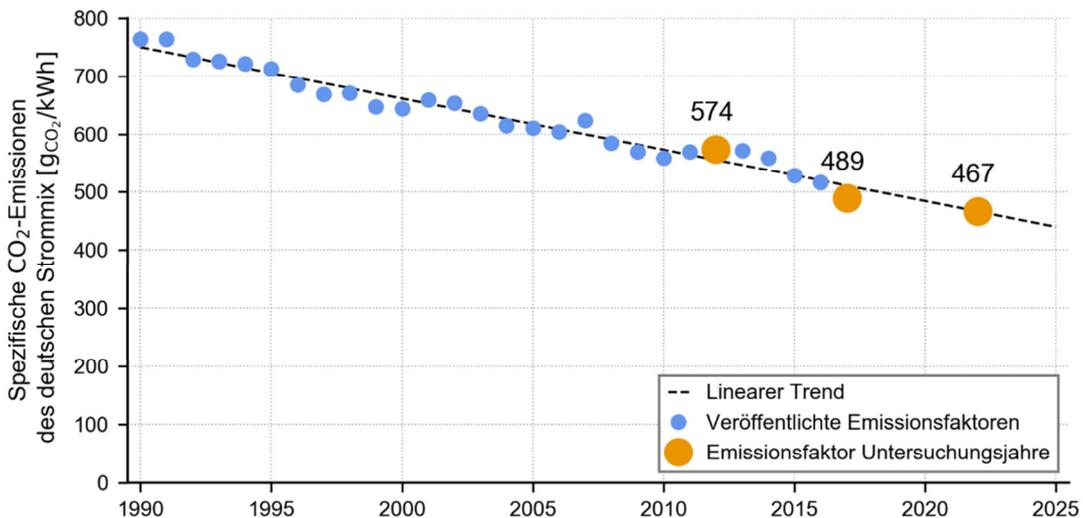


Abbildung 5-14 Trendfortschreibung der spezifischen Kohlenstoffdioxidemissionen des deutschen Strommix

Statistiken und Daten über Marktanteile von verschiedenen Logistikdienstleistern in den einzelnen Zustellgebieten sind nicht verfügbar und daher auch nicht ggf. extrapolierbar. Daher muss angenommen werden, dass die Belieferung der Untersuchungsregion in den einzelnen betrachteten Jahren nur durch einen einzelnen Logistikdienstleister erfolgt. Der Einfluss der Belieferung einer Untersuchungsregion durch mehrere Unternehmen bei

gleichbleibender absoluter Sendungsmenge wird gesondert im Abschnitt 5.3.5 dieses Kapitels betrachtet.

Im Nachfolgenden werden zuerst Energieverbrauch und Emissionen am Beispiel eines FEV200P in den Jahren 2012, 2017 und 2022 analysiert, bevor am Ende dieses Kapitels ein Quervergleich zwischen verschiedenen Elektrofahrzeugen erfolgt.

Endenergiebedarf bei der Adresszustellung von Paketen mit einem FEV200P

Mit den erwähnten Annahmen und Einschränkungen kann die Entwicklung des Endenergiebedarfs pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen mit Elektrofahrzeugen in den definierten Untersuchungsjahren bestimmt werden. **Abbildung 5-15** zeigt exemplarisch die Simulationsergebnisse für den gesamten Endenergiebedarf pro Liefertag im Falle einer Belieferung der Untersuchungsregionen mit Fahrzeugen des Typs FEV200P. Während zur Belieferung von Aying und Haidhausen Süd im Jahr 2012 annähernd die gleiche Menge an Endenergie bzw. elektrischer Energie von rund 24 kWh benötigt wurde, waren es in Putzbrunn nur rund 18 kWh. Die annähernd identischen Verbräuche in Aying und Haidhausen Süd sind dabei auf vergleichsweise große zurückzulegenden Wegstrecken (Aying) bzw. auf den Einsatz von mehr Fahrzeugen zur Belieferung bei geringeren Wegstrecken (Haidhausen Süd) zurückzuführen. Die Abweichung des Energieverbrauchs von rund 25 % in Putzbrunn kann durch den suburbanen Charakter der Gemeinde begründet werden, da hier die Zustellfahrzeuge einerseits geringere Wegstrecken als in Aying fahren und andererseits auch weniger Zustellfahrzeuge als in Haidhausen Süd zur Belieferung eingesetzt werden müssen.

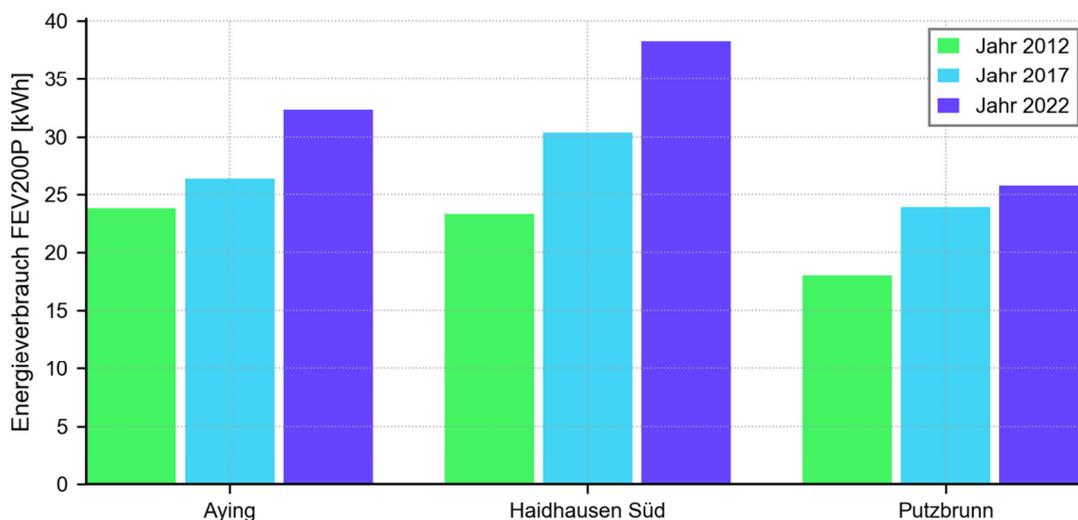


Abbildung 5-15 Täglicher Endenergiebedarf bei der Zustellung von Paketen in den verschiedenen Untersuchungsregionen (FEV200P)

Die Zunahme der Zustellwahrscheinlichkeit bzw. Sendungsmenge in den Jahren 2012 bis 2017 resultiert in allen Untersuchungsregionen in einer Steigerung des Energieverbrauchs, der auf Grund der absoluten Sendungsmenge bzw. der unterschiedlich hohen Anzahl an benötigten Zustellfahrzeugen unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Dabei stieg der Endenergieverbrauch in Aying von 2012 bis 2017 pro Zustelltag um rund 10 % an, während es in Haidhausen Süd bzw. Putzbrunn rund 30 % waren. Gleichwohl resultiert eine Verdoppelung der Zustellwahrscheinlichkeit bzw. eine annähernde Verdoppelung der Sendungsmen-

ge von den Jahren 2012 bis 2022 in allen Untersuchungsregionen in keiner Verdopplung des Endenergiebedarfs. Verglichen mit dem Jahr 2012 nimmt der Energieverbrauch in Aying im Jahr 2022 dabei um rund 36 % zu, Putzbrunn und Haidhausen Süd zeigen einen Anstieg von 44 % bzw. 64 %. Die Gründe für den unterschiedlich stark ausgeprägten Anstieg des Endenergiebedarfs liegen auch hier wieder in der unterschiedlich großen Anzahl an zu beliefernden Haushalten und der daher unterschiedlichen Zahl an eingesetzten Zustellfahrzeugen in den einzelnen Untersuchungsregionen. Beispielsweise werden bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 20 % im Jahr 2022 in Haidhausen Süd neun Zustellfahrzeuge zur Belieferung von im Mittel 1658 Haushalten eingesetzt werden. In Putzbrunn bzw. Aying werden jeweils nur drei Fahrzeuge zur Belieferung von im Mittel 549 bzw. 407 Haushalten benötigt. Der nicht linear mit der Zustellwahrscheinlichkeit zunehmende Endenergiebedarf ist auf unterschiedliche Fahrzeugauslastungen bei identischer Anzahl an Zustellgebieten zurückzuführen (vgl. Abschnitt 4.6.1).

Durch Einbezug der Anzahl von 300 Liefertagen pro Jahr kann auch der mittlere jährliche Endenergiebedarf für Belieferungen einer Untersuchungsregion hochgerechnet werden. Um die energetischen Vorteile des Einsatzes von Elektrofahrzeugen auf der letzten Meile zu verdeutlichen, zeigt **Abbildung 5-16** die absoluten jährlichen Endenergieeinsparungen, die durch den Einsatz von Fahrzeugen des Typs FEV200P anstelle von konventionellen Fahrzeugen des Typs ICEFV200 resultieren. Mit steigender Sendungsmenge bzw. steigender Zustellwahrscheinlichkeit nehmen dabei die Endenergieeinsparungen in allen betrachteten Untersuchungsregionen zu. Die Menge an eingesparter Endenergie reicht dabei von circa 11,5 MWh (Putzbrunn im Jahr 2012) bis hin zu 24,8 MWh (Haidhausen Süd im Jahr 2022).

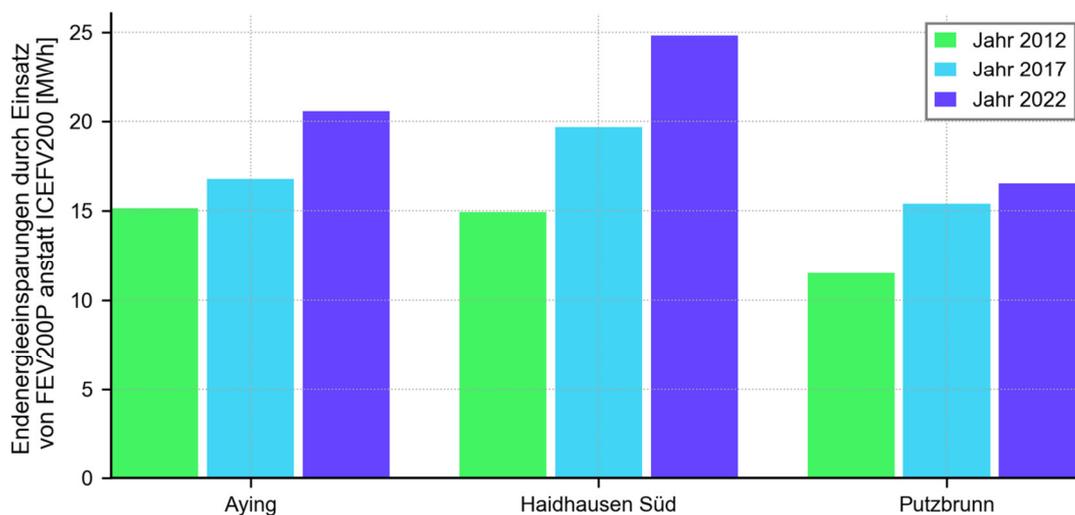


Abbildung 5-16 Absolute jährliche Endenergieeinsparungen durch den Einsatz von Fahrzeugen des Typs FEV200P im Vergleich zum ICEFV200 (Hochrechnung)

Tabelle 5-4 fasst ergänzend zu Abbildung 5-16 den hochgerechneten jährlichen Endenergiebedarf bei der Zustellung von Paketen mit Fahrzeugen des Typs FEV200P und ICEFV200 zusammen. Die relativen Endenergieeinsparungen durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen des Typs FEV200P im Vergleich zum ICEFV200 belaufen sich in allen Untersuchungsregionen und Jahren auf rund 68 %, wobei in Haidhausen Süd ein minimaler Anstieg mit steigender Sendungsmenge festzustellen ist. Die nahezu konstanten relativen

Endenergieeinsparungen sind dabei auf die Verwendung von identischen Fahrprofilen, Streckenführungen und Distanzen von FEV200P und ICEFV200 bei der Bestimmung des Endenergiebedarfs zurückzuführen. Die geringen Schwankungen der relativen Endenergieeinsparungen resultieren aus Veränderungen der Fahrzeugnutzungsgrade der Zustellfahrzeuge, z.B. auf Grund von veränderten Motorauslastungen im Streckensegment Belieferung. Da insbesondere Fahrtstrecken im Streckensegment Belieferung mit steigenden Sendungsmengen sich deutlich reduzieren, verliert die dort verstärkt mögliche Bremsenergieerückgewinnung an Einfluss.

Tabelle 5-4 Endenergiebedarf und Energieeinsparungen für die Zustellung von Sendungen in Aying (Ay), Haidhausen Süd (Ha) und Putzbrunn (Pu) mit Fahrzeugen ICEFV200 und FEV200P in den einzelnen Untersuchungsjahren

Jahr	ICEFV200 [MWh]			FEV200P [MWh]			Relative Endenergie- einsparungen [%]		
	Ay	Ha	Pu	Ay	Ha	Pu	Ay	Ha	Pu
2012	22,30	21,95	16,89	7,15	7,00	5,38	67,9	68,1	68,1
2017	24,66	28,81	22,55	7,91	9,12	7,17	67,9	68,3	68,2
2022	30,26	36,32	24,24	9,70	11,48	7,73	68,0	68,4	68,1

Als Ergebnis der Analyse des Endenergiebedarfs bei der Zustellung von Paketen mit Elektrofahrzeugen des Typs FEV200P lässt sich festhalten:

- Eine ansteigende Sendungsmenge resultiert in einer Zunahme des Endenergieverbrauchs der Zustellfahrzeuge. Insbesondere hat die Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen bedeutenden Einfluss.
- Eine ansteigende Sendungsmenge bewirkt eine Zunahme der absoluten Endenergieeinsparungen beim Einsatz von elektrischen anstelle von konventionellen Zustellfahrzeugen. Dies ist ebenfalls auf die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge zurückzuführen.
- In allen Untersuchungsregionen bieten Elektrofahrzeuge das Potential zur Endenergieeinsparung.
- Die räumliche Struktur der Untersuchungsregion beeinflusst die Höhe der Endenergieeinsparungen. In der ländlichen Region Aying und im urbanen Haidhausen Süd sind diese größer als wie im suburbanen Putzbrunn ausgeprägt.

Insgesamt betrachtet bietet der Einsatz von Elektrofahrzeugen des Typs FEV200P auf der letzten Meile daher das Potential zur Endenergieeinsparung. Neben der Betrachtung des Endenergieverbrauchs muss jedoch auch ein Blick auf die verursachten CO₂-Emissionen geworfen werden.

CO₂-Emissionen bei der Adresszustellung von Paketen mit einem FEV200P

Abbildung 5-17 zeigt die pro Zustelltag durch die Zustellfahrzeuge des Typs FEV200P verursachten CO₂-Emissionen in den einzelnen Untersuchungsregionen und Jahren. Auf Grund des zurückgehenden Emissionsfaktors des deutschen Strommix wird der Anstieg des Kohlenstoffdioxidausstoßes im Vergleich zur Endenergie mit zunehmender Sendungsmenge bzw. Zustellwahrscheinlichkeit gedämpft. Auch bei der Betrachtung der CO₂-Emissionen wird der Einfluss der Untersuchungsregionen ersichtlich.

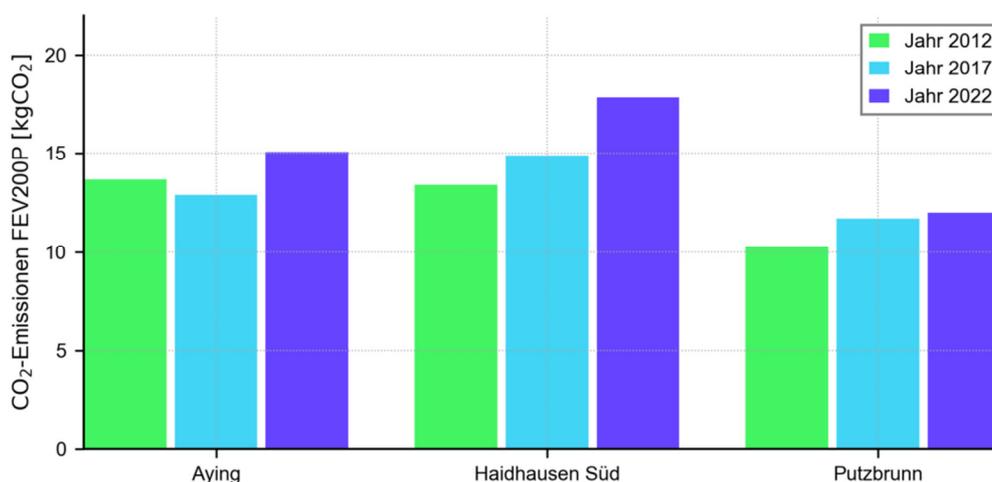


Abbildung 5-17 Tägliche CO₂-Emissionen für die Belieferung der Untersuchungsregionen mit Fahrzeugen des Typs FEV200P

Durch die Betrachtung der mittleren Kohlenstoffdioxidemissionen pro beliefertem Haushalt beim Einsatz von FEV200P wird der Einfluss der Untersuchungsregion noch deutlicher (**Abbildung 5-18**). Die ländliche Region Aying zeigt dabei mit Abstand die höchsten spezifischen Emissionen. Im Jahr 2012 erreichten diese einen Wert von rund 67 gCO₂/Belieferung und war damit verglichen mit Haidhausen Süd und Putzbrunn circa um den Faktor 4,1 bzw. 1,8 höher. Gleichzeitig führt die Betrachtung der steigenden Sendungsmenge für das Jahr 2017 in Aying zu einem deutlichen Rückgang der spezifischen Emissionen bis auf einen Wert von circa 43 gCO₂/Belieferung. Diese Abnahme um rund 37 % ist auf die unterschiedliche Ausprägung der Zustellgebiete bei verschiedenen auszuliefernden Sendungsmengen zurückzuführen. Beispielsweise können bei einer sich ändernden Zustellwahrscheinlichkeit bzw. Sendungsmenge verschieden Ortsteile sinnvoller räumlich in Zustellgebieten gegliedert werden, wodurch die Fahrzeuge tendenziell geringere Strecken zum Ausliefern der Sendungen zurücklegen müssen. Die eingesparte Strecke spiegelt sich wiederum im Energieverbrauch wider, der im Fall von Aying zwischen den Jahren 2012 und 2017 deutlich geringer als in den anderen Untersuchungsregionen angestiegen ist (vgl. Abbildung 5-15). Der relativ geringe Anstieg des Energieverbrauchs in Kombination mit dem reduzierten Emissionsfaktor des Strommix führt dabei in diesem Fall sogar zu einem Rückgang der mittleren täglichen Kohlenstoffdioxidemissionen der Belieferung vom Jahr 2012 zum Jahr 2017. Die zusätzlich zum Rückgang der Emissionen ansteigende Sendungsmenge führt letztendlich zur stark ausgeprägten Reduktion der spezifischen Kohlenstoffdioxidemissionen. Eben aus diesen Gründen kann auch der vergleichsweise geringe Rückgang um rund 6 gCO₂/Belieferung vom Jahr 2017 auf den Wert von 37 gCO₂/Belieferung im Jahr 2022 begründet werden.

Der Einfluss der unterschiedlichen geographischen Ausprägung der Zustellgebiete zeigt sich auch beim Vergleich von Putzbrunn und Haidhausen Süd in Abbildung 5-18. Während die spezifischen Emissionen in Putzbrunn im Jahr 2017 rund 28 gCO₂/Belieferung betragen, verursachte die Belieferung eines Haushalts mit einer Paketsendung in Haidhausen Süd einen CO₂-Ausstoß von nur rund 12 gCO₂. Allgemein betrachtet zeigt die räumliche Struktur der Untersuchungsregion und insbesondere die Haushaltsdichte einen großen Einfluss auf die spezifischen CO₂-Emissionen. Da die von einem Zustellfahrzeug zurückzu-

legende Distanz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Lieferungen bei hoher Haushaltsdichte in urbanen Siedlungsräumen deutlich geringer als in ländlichen oder suburbanen Strukturen ist, wird auch weniger Energie für die Belieferung eines Kunden im Mittel eingesetzt. Dies resultiert wiederum in niedrigeren spezifischen Emissionen pro Belieferung.

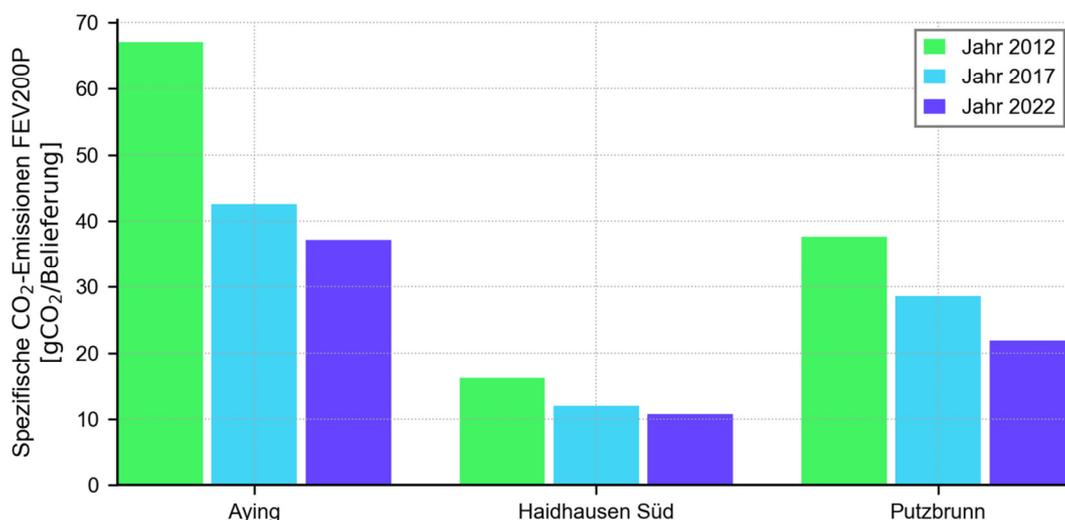


Abbildung 5-18 Spezifische CO₂-Emissionen für die Belieferung eines Haushalts mit Fahrzeugen des Typs FEV200P

Neben einem Blick auf die spezifischen Kohlenstoffdioxidemissionen einer Sendungszustellung ist auch die Betrachtung der gesamten jährlichen sowie auch der eingesparten Emissionen wichtig. Die in **Tabelle 4-8** zusammengefassten absoluten Emissionen verdeutlichen, dass Elektrofahrzeuge des Typs FEV200P das Potential für Einsparungen von 1,41 tCO₂ bis zu 4,32 tCO₂ in Abhängigkeit der Untersuchungsregion und des Betrachtungsjahres gegenüber der Paketzustellung mit Fahrzeugen des Typs ICEF200 haben. Prozentual ausgedrückt resultieren Einsparungen im Bereich von im Mittel rund 31% (2012) über 42% (2017) bis zu 44% (2022) in den Untersuchungsregionen. Da sich die relativen Endenergieeinsparungen beim Einsatz eines FEV200P im Vergleich zum ICEFV200 prozentual in den Untersuchungsregionen und Jahren kaum verändern, ist der Grund für die steigenden relativen CO₂-Einsparungen der Rückgang der spezifischen CO₂-Emissionen des Strommix.

Tabelle 5-5 Jährliche CO₂-Emissionen und Einsparungen bei Belieferung mit FEV200P und ICEFV200 in Aying (Ay), Haidhausen Süd (Ha) und Putzbrunn (Pu)

Jahr	ICEFV200 [t CO ₂]			FEV200P [t CO ₂]			Einsparungen [t CO ₂]		
	Ay	Ha	Pu	Ay	Ha	Pu	Ay	Ha	Pu
2012	5,94	5,85	4,5	4,10	4,02	3,09	1,84	1,83	1,41
2017	6,57	7,68	6,01	3,87	4,46	3,51	2,70	3,22	2,50
2022	8,06	9,68	6,46	4,52	5,35	3,60	3,54	4,32	2,85

Als Ergebnis der Analyse der resultierenden Kohlenstoffdioxidemissionen bei der Zustellung von Paketen mit dem Fahrzeug FEV200P lässt sich festhalten:

- Eine ansteigende Sendungsmenge resultiert in einer Zunahme der durch die Elektrofahrzeuge verursachten CO₂-Emissionen. Durch eine Verringerung des Emissionsfaktors des Strommix kann der Anstieg gedämpft werden.
- Die spezifischen Kohlenstoffdioxidemissionen zeigen eine rückläufige Tendenz bei steigenden Sendungsmengen. Haushaltsdichte und geographische Eigenschaften der Untersuchungsregion haben deutlichen Einfluss auf den Kennwert.
- Mit steigender Sendungsmenge nehmen die prozentualen CO₂-Emissionseinsparungen durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen zu, was auf den rückläufigen Emissionsfaktor des Strommix zurückzuführen ist.

5.3.2 Zusammensetzung des Endenergiebedarfs am Beispiel von Putzbrunn

Bei den bisherigen Potentialanalysen zum Einsatz von Elektrofahrzeugen auf der letzten Meile der Paketzustellung wurde immer die gesamte Liefertour als Einheit betrachtet. Um den Einfluss von An- und Abfahrt auf Energieverbrauch und Emissionen analysieren zu können, muss die Zusammensetzung des Endenergiebedarfs detaillierter untersucht werden. **Abbildung 5-19** zeigt daher die Zusammensetzung des Endenergiebedarfs für die drei Untersuchungsregionen Aying (Ay), Putzbrunn (Pu) und Haidhausen Süd (Ha) für Belieferungen mit dem Fahrzeug FEV200P in den Jahren 2012, 2017 und 2022.

Der Energieverbrauch für die Belieferung aller Untersuchungsregionen wird dabei wesentlich vom Energieverbrauch der Zustellfahrzeuge im Streckensegment An- und Rückfahrt beeinflusst. Auf Grund der Tatsache, dass die Fahrzeuge mit steigender Sendungsmenge im Zustellgebiet geringere Strecken zur Auslieferung aller Sendungen zurücklegen müssen und gleichzeitig mehr Fahrzeuge eingesetzt werden, nimmt der Einfluss von An- und Rückfahrt auf den Gesamtenergiebedarf in allen Untersuchungsregionen deutlich zu. Wegen der hohen Zahl an Haushalten bzw. der hohen Haushaltsdichte sticht Haidhausen Süd besonders hervor. Während im Jahr 2012 in Aying rund 48,1 % der gesamten Endenergie bei An- und Abfahrt der Zustellfahrzeuge eingesetzt wurden, waren es in Haidhausen Süd bereits 70,6 %. Beim Endenergiebedarf in Putzbrunn entfielen rund 55,3 % auf An- und Abfahrt.

Bei der Betrachtung des Energieaufwands für An- und Abfahrt wird der bereits beschriebene Einfluss der räumlichen Siedlungsstruktur nochmals verdeutlicht. Mit Blick auf den Energieverbrauch in Aying ist ersichtlich, dass der Energieverbrauch für die eigentliche Belieferung in allen Untersuchungs Jahren einen wesentlichen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch hat. Dieses im Vergleich zu Haidhausen Süd und Putzbrunn gegensätzliche Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass die Zustellfahrzeuge auf Grund der ländlichen Siedlungsstruktur größere Distanzen zur Belieferung der einzelnen Haushalte zurücklegen müssen. Dennoch entfallen in Aying im Jahr 2022 auch circa 53,7 % des Endenergieeinsatzes auf An- und Rückfahrt der Zustellfahrzeuge.

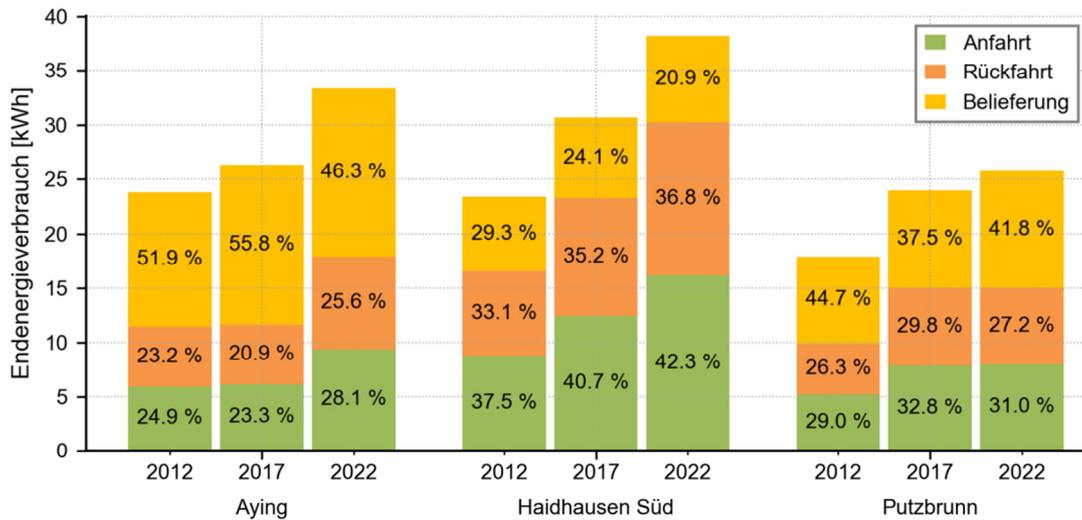


Abbildung 5-19 Zusammensetzung des täglichen Endenergiebedarfs für Aying (Ay), Putzbrunn (Pu) und Haidhausen Süd (Ha), Fahrzeug FEV200P

5.3.3 Energetische Auswirkungen des Depotstandorts am Beispiel von Putzbrunn

Die Ergebnisse zur Zusammensetzung des Endenergieverbrauchs motivieren eine Untersuchung des Einflusses des Depotstandorts auf den Endenergieverbrauch. Dazu wurden für die Gemeinde Putzbrunn Simulationen mit zwei unterschiedlichen Depotstandorten durchgeführt. Während ein Depot nördlich im rund 13 km entfernten Aschheim angesiedelt ist (Depot 1), wurde für eine zweite Untersuchung ein Depot in der Nachbargemeinde Otterbrunn (Entfernung rund 5 km, Depot 2) verwendet.

Durch die Verwendung eines näheren Fahrzeugdepots kann der absolute Endenergieeinsatz für Belieferungen auf der letzten Meile deutlich reduziert werden (**Abbildung 5-20**). Gleichzeitig gewinnt der Energiebedarf für die eigentliche Belieferung deutlich an Einfluss. Im betrachteten Fall ergeben sich mittlere Einsparungen durch die Nutzung des näheren Depots von im Mittel rund 36 %. Dabei muss aber bedacht werden, dass während des Hauptlaufs der Sendungen ggf. längere Strecken zur Lieferung der Pakete an das alternative Fahrzeugdepot zurückgelegt werden müssen.

Auch die Emissionen der Paketzustellung, sowohl absolut als auch pro Sendung, können dementsprechend durch die Verwendung des alternativen Depots deutlich gesenkt werden (**Tabelle 5-6**).

Tabelle 5-6 Jährliche CO₂-Emissionen und Einsparungen in Putzbrunn in Abhängigkeit des Depotstandorts bei der Belieferung mit FEV200P

Jahr	Einheit	2012	2017	2022
Depot 1	[t CO ₂]	3,09	3,51	3,60
Depot 2	[t CO ₂]	1,97	2,10	2,31
Absolute Einsparungen	[t CO ₂]	1,12	1,41	1,29
Relative Einsparungen	[%]	36,2	40,2	35,8

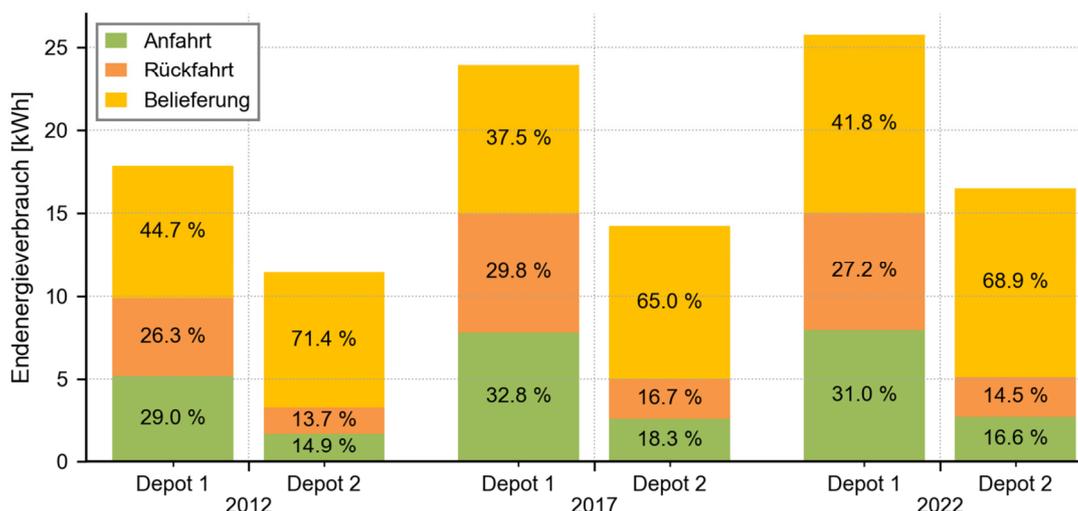


Abbildung 5-20 Zusammensetzung des täglichen Endenergiebedarfs bei unterschiedlichen Depotstandorten (Putzbrunn, Fahrzeug FEV200P)

5.3.4 Einfluss von Fahrzeugkapazität und Fahrzeugtyp

Da sich die bisherigen Analysen nur auf Energieverbrauch und Emissionen von Elektrofahrzeugen des Typs FEV200P beschränkt haben, muss auch der Einfluss des Fahrzeugtyps sowie der Fahrzeugkapazität untersucht werden. Dazu zeigt **Abbildung 5-21** die prozentuale Veränderung des Endenergiebedarfs beim Einsatz von Elektrofahrzeugen verschiedenen Typs und verschiedener Fahrzeugkapazität im Vergleich zum FEV200P. Bei der Betrachtung von Aying und Putzbrunn fällt dabei auf, dass der Einsatz von kleineren Elektrofahrzeugen mit einer Kapazität von 150 Belieferungen das Potential zur Reduktion des Endenergiebedarfs von rund 8 % im Jahr 2012 aufgewiesen hätte. Auch hätte der Einsatz von Elektrofahrzeugen des Typs FEV250C in Aying im Jahr 2012 zusätzliche Endenergieeinsparungen von rund 11 % im Vergleich zum FEV200P ermöglicht. Im Gegensatz dazu hätte der Einsatz von elektrischen Zustellfahrzeugen mit 150 Belieferungen sowie mit 250 Belieferungen in Aying im Jahr 2017 einen zusätzlichen Endenergiebedarf von rund 3 % bzw. knapp 22 % verursacht, während diese Fahrzeuge in Putzbrunn weiter Potential zur Verbrauchsreduktion geboten hätten. In Haidhausen Süd ergibt sich durch den Einsatz von Zustellfahrzeugen anderer Kapazität und Bauform kein Potential zur weiteren Verbrauchsreduktion. Insbesondere Fahrzeuge des Typs FEV250C zeigten nahezu den identischen Endenergiebedarf wie der Einsatz eines FEV200P im Jahr 2017.

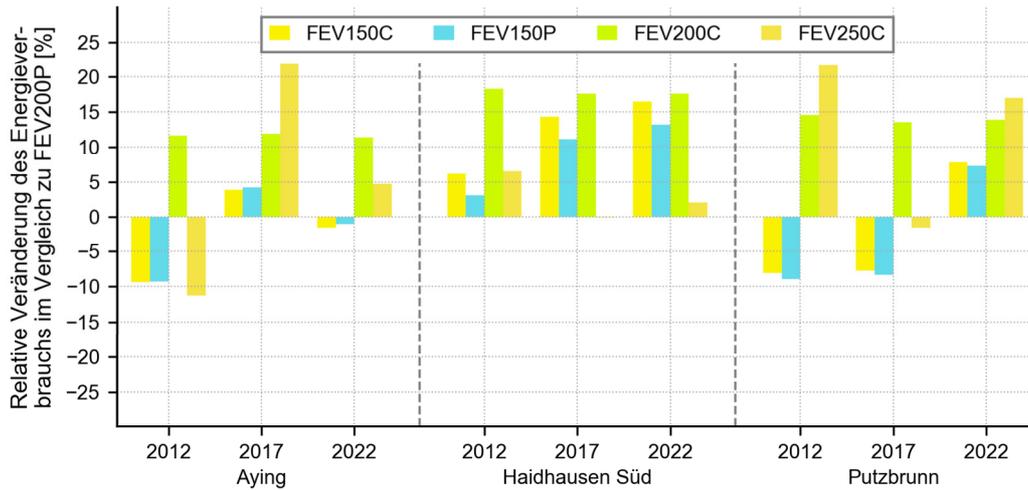


Abbildung 5-21 Prozentuale Veränderung des Endenergiebedarfs beim Einsatz von verschiedenen Elektrofahrzeugen im Vergleich zum FEV200P

Die Veränderungen der jährlichen Kohlenstoffdioxidemissionen (**Abbildung 5-22**) beim Einsatz von anderen Elektrofahrzeugen im Vergleich zum FEV200P folgen den Trends der Endenergie aus **Abbildung 5-21**. Dabei hätte der veränderte Fahrzeugeinsatz in Aying und Putzbrunn die Möglichkeit eröffnet, maximal rund 450 kg CO₂ pro Jahr zusätzlich einzusparen. Andererseits können durch einen veränderten Fuhrpark auch zusätzliche Emissionen in Höhe von bis zu rund 900 kg CO₂ pro Jahr im Vergleich zum FEV200P entstehen.

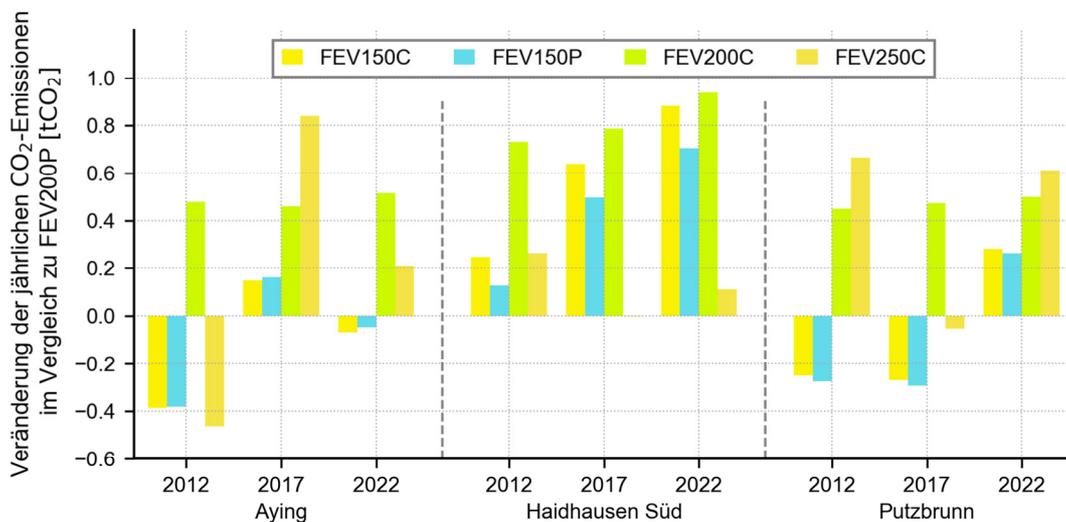


Abbildung 5-22 Absolute Veränderung der jährlichen Kohlenstoffdioxidemissionen beim Einsatz von verschiedenen Elektrofahrzeugen im Vergleich zum FEV200P

Auf Grund der relativ geringen Bandbreite der Änderungen von Endenergiebedarf und Emissionen beim Einsatz der verschiedenen in dieser Arbeit definierten Elektrofahrzeugtypen kann keine Aussage zum besten Fahrzeugeinsatz getroffen werden. Einerseits ermöglicht die Verwendung von kleineren Fahrzeugen zusätzliche Energie- und Emissionseinsparungen, andererseits müssen mehr Fahrzeuge eingesetzt werden. Die ansteigende Anzahl an Fahrzeugen resultiert wiederum in höheren Kosten für Anschaffung und Betrieb der

Fahrzeuge, wobei letztere insbesondere durch höhere Personalkosten beeinflusst werden dürften.

Ein Beispiel für die Höhe der absoluten Endenergieeinsparungen beim Einsatz von elektrischen anstelle von konventionellen Zustellfahrzeugen mit einer Fahrzeugkapazität von 150 Belieferungen zeigt **Abbildung 5-23**. In allen Untersuchungsregionen weist der Elektrofahrzeugeinsatz das Potential zur Einsparung von Endenergie auf. Steigende Sendungsmengen resultieren dabei auch in ansteigenden absoluten Endenergieeinsparungen. Das Potential von Elektrofahrzeugen zur Reduktion von Kohlenstoffdioxidemissionen zeigt die gleichen Eigenschaften. **Abbildung 5-24** verdeutlicht dies am Beispiel der vermiedenen Emissionen durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen anstelle eines ICEFV200 in den einzelnen Untersuchungsregionen.

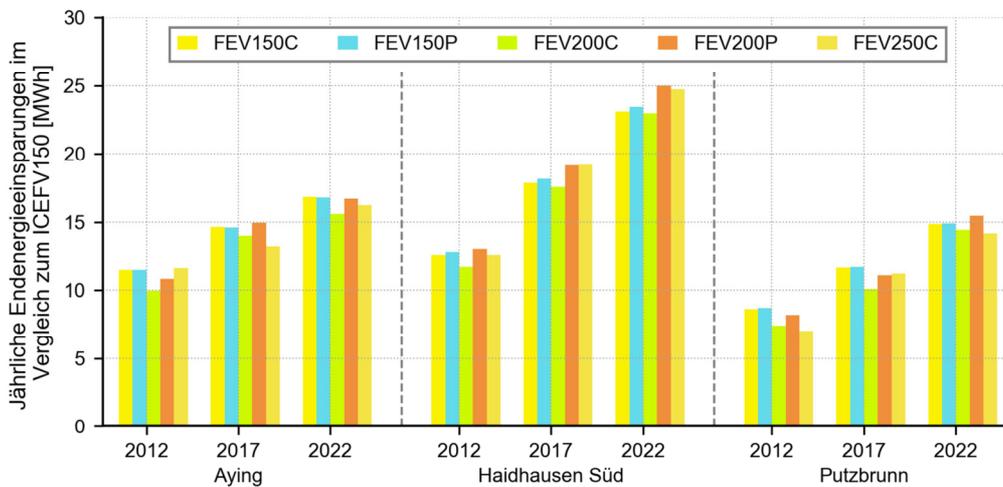


Abbildung 5-23 Jährliche Endenergieeinsparungen durch Einsatz von Elektrofahrzeugen anstelle von ICEFV150

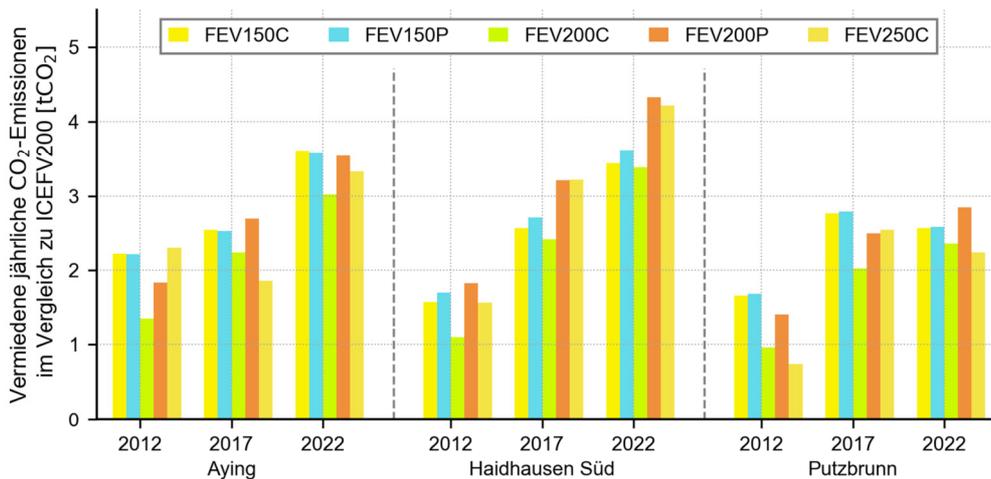


Abbildung 5-24 Jährlich vermiedene Kohlenstoffdioxidemissionen durch Einsatz von Elektrofahrzeugen anstelle von ICEFV200

5.3.5 Konsolidierung von Lieferungen bei der Adresszustellung

Bei den bisherigen Analysen zum Potential von Elektrofahrzeugen auf der letzten Meile der Paketzustellung wurde immer davon ausgegangen, dass eine Untersuchungsregion nur

durch einen einzigen Logistikdienstleister beliefert wird. In der Realität erfolgt die Auslieferung von Paketen aber häufig durch mehrere unabhängige Unternehmen. Teilweise übernehmen Versandhändler den Transport der Sendungen zum Kunden inzwischen sogar selbst, um z.B. eine fristgerechte Lieferung zu ermöglichen. Im Nachfolgenden werden Energieverbrauch und Emissionen in einer Untersuchungsregion bei einer Adresszustellung von Paketen durch mehrere Logistikdienstleister bestimmt. Die so bestimmten Energieverbräuche und Emissionen für die Belieferung einer Untersuchungsregion durch mehrere Logistikdienstleister dienen als Referenz, gegenüber der eine Zustellung durch einen einzigen Logistikdienstleister bzw. der Konsolidierung der Sendungen von Logistikdienstleistern gemessen wird (**Abbildung 5-25**).

Ebenso kann durch dieses Vorgehen auch der Einfluss von mehreren Wellen zur Belieferung einer Untersuchungsregion abgebildet werden. Bei der Belieferung einer Untersuchungsregion beispielsweise in zwei Wellen

- starten die Fahrzeuge am Vormittag beladen am Depot,
- verteilen anschließend die Sendungen,
- kehren am Nachmittag in das Fahrzeugdepot zurück, werden erneut beladen und
- verteilen die Sendungen,

bevor sie am Abend in das Depot zurückkehren. Die Wellenlieferung kann daher wie der Einsatz von mehreren unabhängigen Logistikdienstleistern für die Belieferung einer Untersuchungsregion gesehen werden.

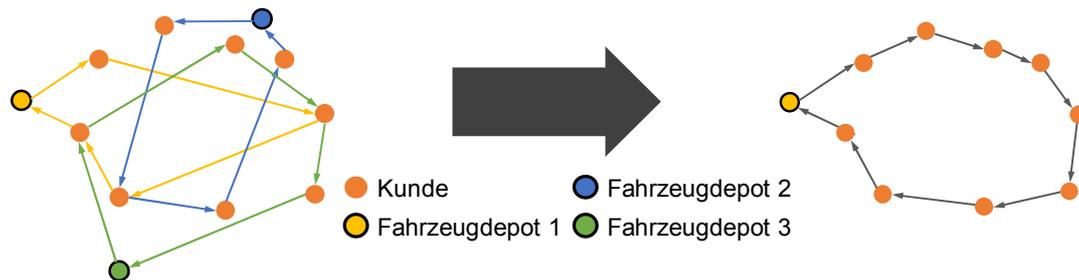


Abbildung 5-25 Konsolidierung von Logistikdienstleistern

Für die Bestimmung des energetischen Potentials einer Konsolidierung von Logistikdienstleistern werden Energieverbrauch und Emissionen bei variierenden Anzahlen von Logistikdienstleistern bzw. Lieferwellen einer Belieferung durch nur einen Logistikdienstleister bzw. einer Lieferwelle gegenübergestellt. Zunächst werden dazu Energieverbrauch und Emissionen für eine vorgegebene Sendungsmenge bzw. Zustellwahrscheinlichkeit (Gesamtzustellwahrscheinlichkeit) bestimmt, die der Belieferung durch nur einen Logistikdienstleister entsprechen. Danach wird die vorgegebene Sendungsmenge bzw. Gesamtzustellwahrscheinlichkeit auf einzelne Logistikdienstleister bzw. Lieferwellen aufgeteilt, wobei verschiedene Konfigurationen betrachtet werden. Durch Aufsummierung von Energieverbrauch und Emissionen für die Zustellung in den einzelnen Konfigurationen können entsprechend die Werte für die Belieferung durch mehrere Unternehmen bzw. in mehreren Lieferwellen bestimmt werden. Die Summe der Zustellwahrscheinlichkeiten bzw. Sendungsmengen der einzelnen Logistikdienstleister bzw. Lieferwellen ergibt dabei immer die Gesamtzustellwahrscheinlichkeit bzw. Sendungsmenge der gesamten Untersuchungsregion. Zur Vereinfachung wird davon ausgegangen, dass die Zustellfahrzeuge aller Unternehmen bzw. Lieferwellen immer am identischen Depot die Liefertour beginnen und enden.

Da keine Daten über die Anzahl der eingesetzten Logistikdienstleister bzw. Sendungsmengen in einzelnen Jahren verfügbar sind, wird das Potential der Konsolidierung an Hand einer Gesamtzustellwahrscheinlichkeit von 15 % für die verschiedenen Untersuchungsregionen dieser Arbeit analysiert.

Ein Beispiel für die Zusammensetzung des täglichen Endenergiebedarfs bei der Belieferung von Putzbrunn mit Fahrzeugen des Typs FEV200P in verschiedenen Zustellkonfigurationen bei einer Gesamtzustellwahrscheinlichkeit von 15 % zeigt **Abbildung 5-26**. Die Konsolidierung der Logistikdienstleister resultiert dabei in einer deutlichen Verbrauchsreduktion. Bei einer Belieferung durch zwei Logistikdienstleister mit einer Zustellwahrscheinlichkeit von 5 % und 10% ergibt sich ein täglicher Mehrverbrauch von rund 4,9 kWh bzw. eine Verbrauchssteigerung von rund 20,5 %. Mit dem Einbezug von 300 Liefertagen, an denen die Sendungen der beiden Logistikdienstleister ebenso nur durch einen Einzelnen ausgeliefert werden könnten, ergeben sich daher jährliche Endenergieeinsparungen in Höhe von 1,47 MWh. Durch Zusammenfassung der Sendungen von drei Logistikdienstleistern, jeweils mit einer Zustellwahrscheinlichkeit von 5 %, ergibt sich für Putzbrunn das Potential zur Verbrauchsreduktion um rund 2,64 MWh pro Jahr bzw. circa 27 %.

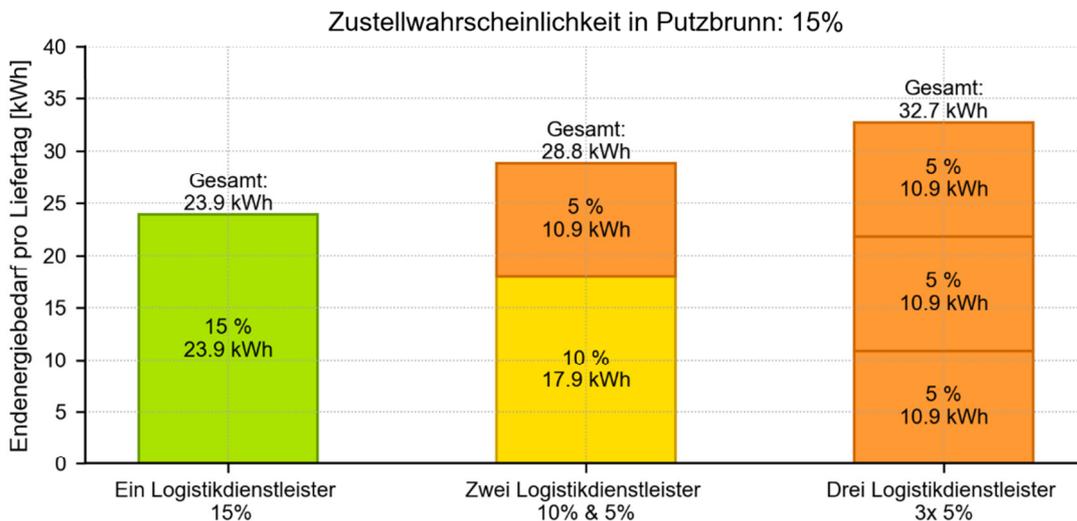


Abbildung 5-26 Endenergiebedarf pro Liefertag für die Adresszustellung von Paketen in Putzbrunn bei unterschiedlichen Zustellkonfigurationen (Fahrzeug: FEV200P)

Abbildung 5-27 zeigt die jährlichen Kohlenstoffdioxidemissionen, die durch den Endenergieeinsatz für den Betrieb der Elektrofahrzeuge (FEV200P) aus **Abbildung 5-26** bei 300 Liefertagen resultieren. Als Emissionsfaktor des Strommix wurde dabei der Wert für das Jahr 2017 von 489 gCO₂/kWh verwendet. Durch die Zusammenfassung der Paketsendungen von zwei Logistikdienstleistern eröffnet sich das Potential zur Vermeidung von rund 0,7 tCO₂. Bei der Konsolidierung von drei Logistikdienstleistern können bereits 1,3 tCO₂ vermieden werden.

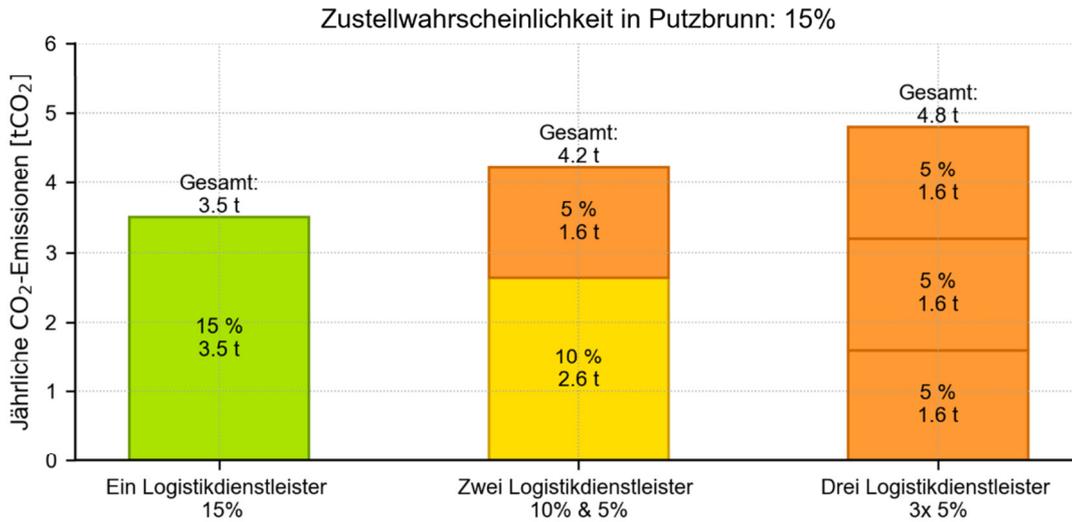


Abbildung 5-27 Jährliche CO₂-Emissionen für die Adresszustellung von Paketen in Putzbrunn bei unterschiedlichen Zustellkonfigurationen (Fahrzeug: FEV200P)

Einen Quervergleich des Potentials zur Endenergieeinsparung bei einer Konsolidierung von Logistikdienstleistern bzw. Lieferwellen in den unterschiedlichen Untersuchungsregionen beim Einsatz von Fahrzeugen des Typs FEV250C zeigt **Abbildung 5-27**. Auch bei der Konsolidierung von Logistikdienstleistern bzw. Lieferwellen wird der Einfluss der geographischen und räumlichen Struktur ersichtlich. Bei einer Zusammenfassung von drei Logistikdienstleistern (Fall C) zu einem einzelnen (Fall A) ergeben sich die höchsten Einsparungen in Putzbrunn mit rund 41 %. Eine derartige Konsolidierung in Aying und Haidhausen Süd resultiert in Einsparungen von 38 % bzw. 34 %. Bei der Reduktion der Anzahl der Logistikdienstleister bzw. Lieferwellen von drei (Fall C) auf zwei (Fall B) ergeben sich die höchsten Einsparungen in Aying von rund 26 % bzw. circa 4 MWh.

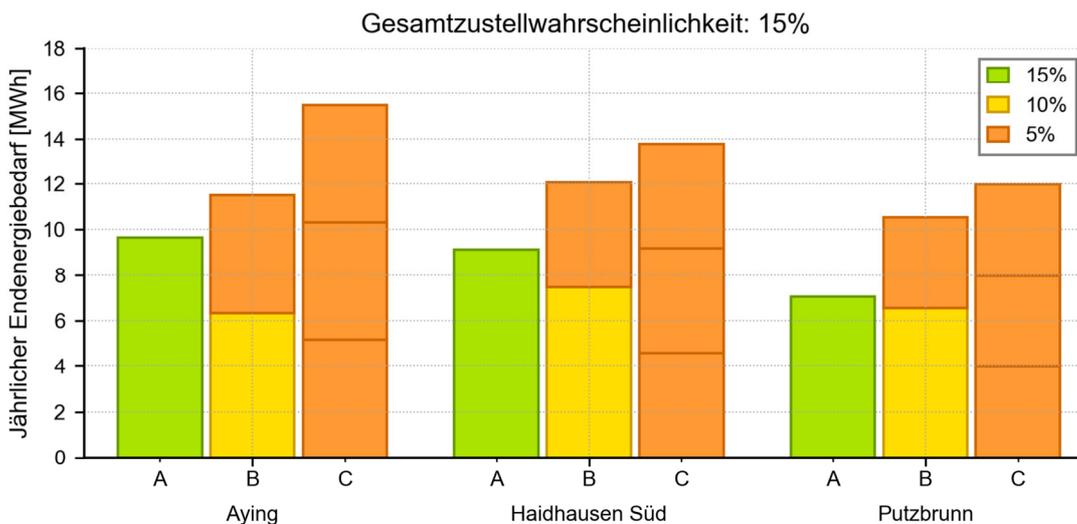


Abbildung 5-28 Jährlicher Endenergiebedarf für die Adresszustellung von Paketen durch mehrere Logistikdienstleister (Fahrzeug: FEV250C)

Für eine Analyse des Potentials einer Konsolidierung von Logistikdienstleistern bzw. Lieferwellen zur Vermeidung von Kohlenstoffdioxidemissionen in Aying, Haidhausen Süd und

Putzbrunn stellt **Abbildung 5-29** beispielhaft die jährlichen CO₂-Emissionen bei unterschiedlichen Zustellkonfigurationen dar. Als Emissionsfaktor des Strommix wurde wieder der Wert aus dem Jahr 2017 verwendet. Auch bei der Betrachtung der Zustellung mit kleinen Elektrofahrzeugen des Typs FEV150C ergibt sich durch die Konsolidierung ein Potential zur Vermeidung von Kohlenstoffdioxidemissionen in allen Untersuchungsregionen. Die Belieferung in Aying nur durch einen Logistikdienstleister bzw. nur in einer Welle (Fall A) ermöglicht dabei Einsparungen von rund einer Tonne CO₂ bzw. rund 1,5 t CO₂ gegenüber der Belieferung durch mehrere Unternehmen bzw. in mehreren Wellen (Fall B und Fall C). Putzbrunn und Haidhausen Süd zeigen ebenfalls das Potential zur Vermeidung von Emissionen, das allerdings auf Grund der Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen sowie der geographischen Struktur der Untersuchungsregionen geringer als in Aying ausfällt.

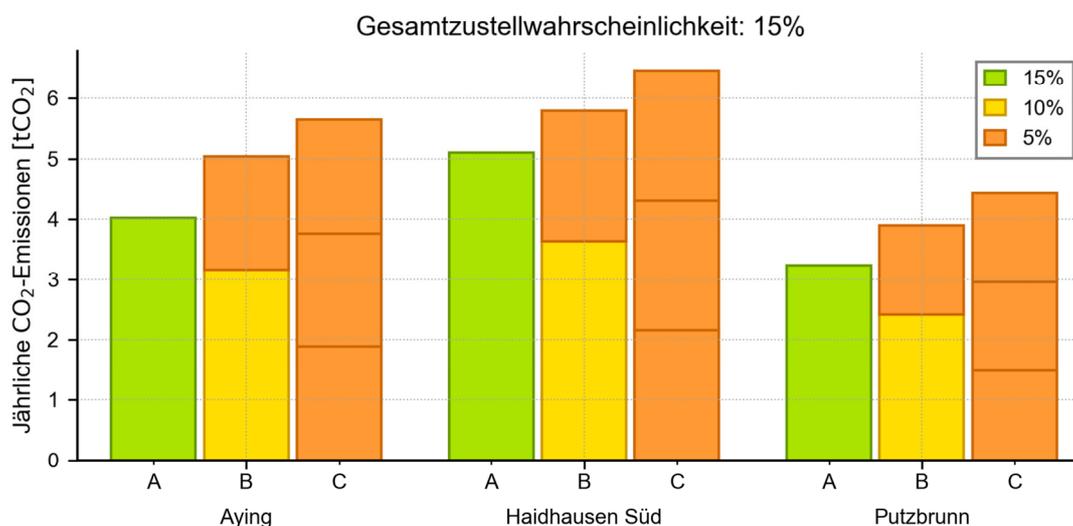


Abbildung 5-29 Jährliche Kohlenstoffdioxidemissionen für die Adresszustellung von Paketen durch mehrere Logistikdienstleister (Fahrzeug: FEV150C)

Aus den in **Abbildung 5-26** bis **Abbildung 5-29** dargestellten Auswertungen lässt sich schließen, dass die Zusammenfassung von Lieferwellen bzw. Konsolidierung von Logistikdienstleistern das Potential zur Reduzierung des Endenergieeinsatzes und Vermeidung von Emissionen auf der letzten Meile hat. Um den Anforderungen der Kunden gerecht zu werden, können Logistikdienstleister auf Grund der vermutlich weiter ansteigenden Sendungsmengen in Zukunft auf eine Lieferung in Wellen vermutlich nicht verzichten. Dennoch sollte die Anzahl an Lieferwellen möglichst geringgehalten werden, sodass Energie eingespart und Emissionen vermieden werden können. Auch gestaltet sich die Konsolidierung der Lieferungen mehrerer Logistikunternehmen tendenziell als schwierig, da unter anderem die Sendungen in einem Depot zusammengefasst werden müssen. Dennoch sollte auch dieser Ansatz weiterverfolgt werden.

Auch ohne den Einsatz von Elektrofahrzeugen eröffnet die Konsolidierung von Lieferungen das Potential zur Einsparung von Energie und Vermeidung von Emissionen, da auch beim Einsatz von konventionellen Zustellfahrzeugen Wege vermieden werden können.

5.3.6 Beeinflussung der CO₂-Emissionen durch Abendlieferungen

Auf Grund von gestiegenen Anforderungen der Kunden hinsichtlich Lieferzeitpunkt und Lieferdauer bieten viele Logistikunternehmen eine Abendlieferung für Paketsendungen an, die Potential zur Flexibilisierung des Ladezeitpunkts der Elektrofahrzeuge eröffnen. Im Gegensatz zu den konstanten spezifischen Emissionen von Dieselmotoren zeigt der Emissionsfaktor des Strommix tageszeitliche bzw. jahreszeitliche Schwankungen, die auf den unterschiedlichen Kraftwerkseinsatz bzw. auf das Vorhandensein von erneuerbaren Energien zurückzuführen ist. Mit den stündlich aufgelösten Emissionsfaktoren lässt sich neben der Zusammensetzung des Ladestrommixes in den definierten Ladezeitintervallen auch der Einfluss des Ladezeitpunkts von Elektrofahrzeugen auf die resultierende Menge an Kohlenstoffdioxidemissionen analysieren.

Dabei muss davon ausgegangen werden, dass die Ladung der Elektrofahrzeuge über die gesamte Zeitdauer des Ladezeitintervalls mit konstanter Ladeleistung erfolgt, sodass die Emissionsfaktoren des Strommix in den einzelnen Zeitbereichen für die Bestimmung der resultierenden Emissionen benutzt werden können. Diese Annahme kann unter anderem mit der begrenzten Leistungsfähigkeit des Stromanschlusses von Logistikzentren begründet werden (vgl. Kapitel 2.5.2). Da keine Aussagen über die Ladezeitpunkte vor dem Aufladen des Fahrzeugs im definierten Ladeintervall möglich sind, sei hier nochmals auf die Annahme verwiesen, dass nur die für die Belieferungen notwendige Energie in die Batterie geladen wird (vgl. Kapitel 4.5). Bereits bei der Betrachtung der Zusammensetzung des Ladestrommix in den einzelnen definierten Ladezeitintervallen können deutliche Unterschiede festgestellt werden (**Abbildung 5-30**). Während im Ladezeitintervall *Nacht* der Einsatz von fossilen Kraftwerken den Ladestrom deutlich beeinflusst, ermöglicht eine Ladung am *Tag* sowie das Ladezeitintervall *Spät* eine erhöhte Integration von erneuerbaren Energien, insbesondere der Photovoltaik. Der vermehrte Anteil an regenerativen Energien in *Spät* und *Tag* hat eine Reduktion der Stromgestehung in fossilen Kraftwerken zur Folge, der sich in der bereits beschriebenen Reduktion der spezifischen Emissionen des Strommix widerspiegelt.

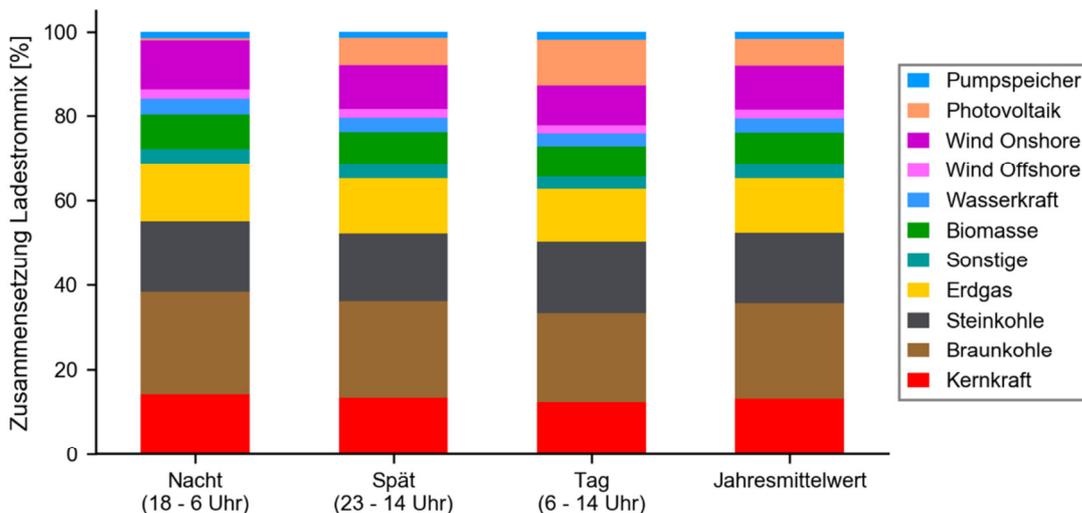


Abbildung 5-30 Zusammensetzung des Ladestroms aus verschiedenen Energieträgern (Strommix Deutschland Jahr 2016, Mittelwerte über alle Tage)

Abbildung 5-31 zeigt die mit der Veränderung des Ladezeitpunktes verbundenen Auswirkungen auf die resultierenden jährlichen Kohlenstoffdioxidemissionen am Beispiel eines FEV200P bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 10%. Der im Ladezeitintervall *Spät* und *Tag* im Vergleich zur Aufladung in der *Nacht* gestiegene Anteil an Erneuerbaren spiegelt sich in reduzierten CO₂-Emissionen wider. Auf Grund der Tatsache, dass immer identische Endenergieverbräuche in den Untersuchungsregionen zur Bestimmung der resultierenden Emissionen bei den veränderten Ladezeitpunkten verwendet wurden, ergeben sich auch immer die identischen relativen Emissionseinsparungen. Bei der Verschiebung des Ladezeitpunktes von der *Nacht* in den Zeitbereich von 6 Uhr bis 14 Uhr (*Tag*), wie es beispielsweise bei der Abendlieferung von Paketsendungen denkbar wäre, ergibt sich beispielsweise das Potential zur Reduktion der CO₂-Emissionen um rund 9,1 %. Werden die Fahrzeuge bereits am Abend nach Rückkehr ins Depot im Zeitraum von 23 Uhr bis 14 Uhr des Folgetags geladen, verringert sich das Potential zur Emissionsreduzierung auf 5,1 %.

Auch zeigt sich, dass im Ladezeitintervall *Nacht* höhere Emissionen als bei der Betrachtung des Jahresmittelwerts des Strommix resultieren. Durch Betrachtung der für die Kohlenstoffdioxidemissionen verantwortlichen Kraftwerksarten kann auch die Herkunft der Emissionen analysiert werden. Dabei zeigt sich, dass der Anteil der Emissionen aus Steinkohle-, Erdgas- und sonstigen Kraftwerke in allen Ladezeitpunkten nahezu identisch ist. Lediglich der Anteil der Braunkohlekraftwerke an den CO₂-Emissionen ändert sich in den einzelnen Ladezeitintervallen. Besonders in den Intervallen *Spät* und *Tag*, in denen der Anteil an erneuerbaren Energien im Vergleich mit den anderen Ladezeitpunkten erhöht ist, nimmt der Anteil der Kohlenstoffdioxidemissionen aus Braunkohlekraftwerken ab. Dieses Verhalten ist auf die Merit-Order der Stromgestehung zurückzuführen, wobei der konstante Anteil der Erdgaskraftwerke durch den Einsatz derselben zur Regelung und Spitzenlastdeckung erklärt werden kann.

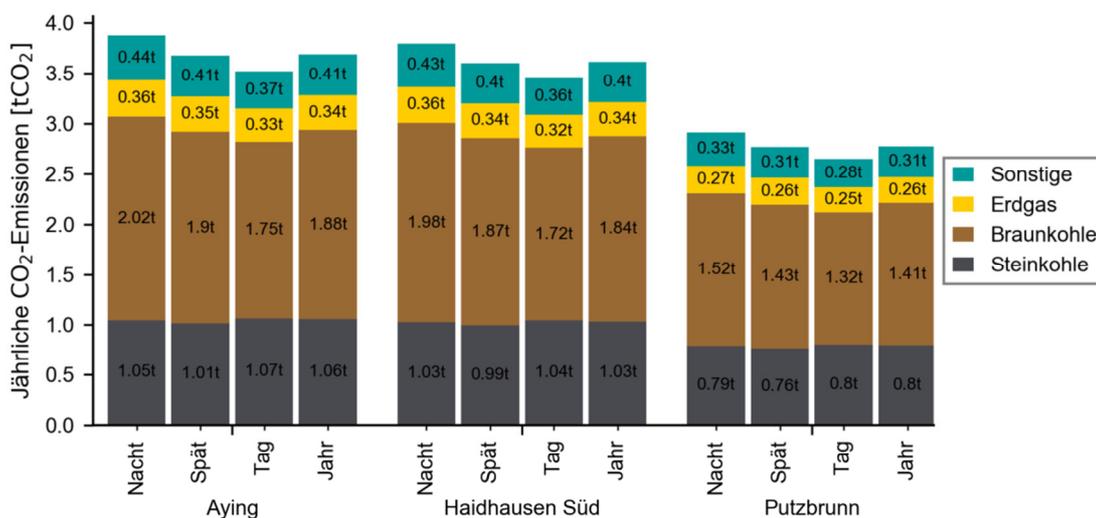


Abbildung 5-31 Zusammensetzung und Ausprägung der jährlichen CO₂-Emissionen bei unterschiedlichen Ladezeitpunkten (Fahrzeug FEV200P, Zustellwahrscheinlichkeit 10%, Emissionen Strommix Deutschland Jahr 2016)

Entsprechend der CO₂-Intensität des Strommix ergeben sich durch unterschiedliche Ladezeitpunkte auch verschiedene absolute Emissionseinsparungen beim Vergleich mit der Zustellung mit konventionell angetriebenen Zustellfahrzeugen.

Durch den fortschreitenden Ausbau von Erneuerbaren wird die Verschiebung des Ladezeitpunktes in die Tagesstunden vor allem in der Zukunft ein großes Potential zur Reduktion der CO₂-Emissionen der elektrischen Zustellfahrzeuge bieten. Die damit verbundene Abendlieferung von Paketen eröffnet überdies für Logistikunternehmen Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz der Zustellung, da damit zu rechnen ist, dass in den Abendstunden potentiell mehr Kunden zu Hause anzutreffen sind. Um die Emissionen der elektrischen Zustellfahrzeuge unabhängig vom Ausbau der Energieerzeugungsanlagen im Stromsystem beeinflussen zu können, erscheint auch die Investition eines Logistikunternehmens in dezentrale Anlagen zur Nutzung von regenerativen Energiequellen sinnvoll. Beispielsweise würde Ausstattung der Dachflächen eines Logistikzentrums mit Photovoltaik in Kombination mit Stationärspeichern eine Flexibilisierung des Ladezeitpunkts bei reduzierten Kohlenstoffdioxidemissionen ermöglichen.

5.3.7 Paketzustellung an Schließfächer

Als Konzept alternativ zur Adresszustellung von Paketen werden Energieverbrauch und Emissionen bei der Integration von Schließfächern in die Prozessstruktur der letzten Meile betrachtet. Anstatt die Sendung an der Haustüre zu empfangen, müssen dabei einige Kunden selbst eine Fahrt zur Abholung der Sendungen unternehmen (**Abbildung 5-32**). Vereinfacht wird davon ausgegangen, dass die Kunden zur Abholung der Sendung immer von zu Hause starten, zum Schließfach fahren und wieder nach Hause zurückkehren. Eine Integration der Abholung in einen anderen Weg (z.B. Einkaufsfahrt, Begleitung etc.) wird nicht beachtet. Überdies wird angenommen, dass in jedem Zustellgebiet Schließfächer verfügbar sind, wie es z.B. bei einer weiteren Durchsetzung dieses Zustellkonzepts denkbar wäre. Der Standort der Schließfächer wird an dem zum geographischen Zentrum des Zustellgebiets nächsten Gebäude festgesetzt. Die Schließfächer werden dabei durch das Zustellfahrzeug während einer Liefertour im Zustellgebiet beschickt. Auf Grund der Tatsache, dass Schließfächer für Pakete vornehmlich in urbanen Regionen vorzufinden sind [37], erfolgt die Potentialanalyse für Haidhausen Süd. Da auch suburbane Siedlungsstrukturen immer mehr mit Paketschließfächern ausgestattet werden, wird auch Putzbrunn in den Analysen berücksichtigt. Zur Abbildung einer unterschiedlichen Durchdringungsrate des Zustellkonzepts, werden 10 %, 15 % und 20 % aller Kunden einer Liefertour für die Ablage der Sendung in ein Schließfach zufällig ausgewählt. Bei einer konstanten Sendungsmenge bzw. Zustellwahrscheinlichkeit erhöht sich daher der Anteil der Kunden, die über ein Schließfach beliefert werden.

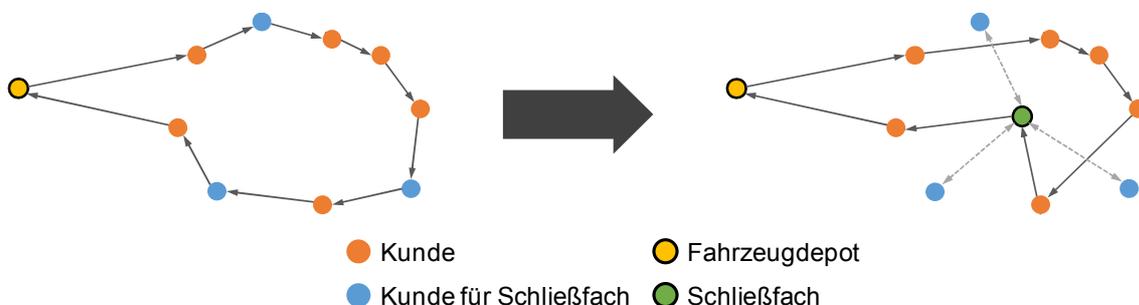


Abbildung 5-32 Zustellung in Schließfächer

Wie bei der Adresszustellung ermöglicht der Einsatz von elektrischen Zustellfahrzeugen bei der Zustellung an Schließfächer Möglichkeiten zur Einsparung von Endenergie. Gleichzei-

tig reduziert sich auch der Endenergiebedarf der Zustellfahrzeuge unabhängig vom Antriebstyp im Vergleich zur Adresszustellung mit ansteigender Durchdringungsrate einer Schließfachzustellung, da die Fahrzeuge zur Auslieferung der Sendungen geringere Distanzen zurücklegen müssen. Für Haidhausen Süd resultieren beispielsweise Endenergieeinsparung beim Einsatz eines FEV200P bezogen auf die Adresszustellung von 0,6 % bis 2,3 % in Abhängigkeit der Durchdringungsrate. Auf Grund der größeren eingesparten Wegstrecke des Zustellfahrzeugs resultieren im suburbanen Putzbrunn etwas höhere Einsparungen von 0,9 % bis 2,7 %. Die im allgemeinen gering ausfallenden Endenergieeinsparungen der Zustellfahrzeuge im Vergleich zur Adresszustellung sind dabei auf die Annahme des Vorhandenseins von Schließfächern in jedem Zustellgebiet sowie der Beschickung während der Zustelltour zurückzuführen. Da die Zustellfahrzeuge während der Liefertour mit hoher Wahrscheinlichkeit an Adressen von Kunden vorbeifahren, die ihre Sendung an einem Schließfach entgegennehmen, ergeben sich nur geringe Strecken- und damit Endenergieeinsparungen im Vergleich zur Adresszustellung. Ebenso passiert das Zustellfahrzeug den Standort des Schließfachs mit hoher Wahrscheinlichkeit während der Liefertour, weshalb meist keine zusätzliche Strecke für die Beschickung zurückgelegt werden muss.

Bei der Aufnahme des Endenergiebedarfs für die Abholfahrten der Kunden in die Bilanz könnten sich jedoch beim Einsatz von elektrischen Zustellfahrzeugen höhere Verbräuche als bei der Adresszustellung mit verbrennungsmotorischen Zustellfahrzeugen ergeben. Die Höhe der Verbrauchszunahme ist dabei abhängig vom Anteil der Sendungsempfänger, die Sendungen mit dem Privat-PKW am Schließfach abholen. Ein wichtiger Bestandteil der Potentialanalyse ist daher die Betrachtung des maximalen Anteils der Abholfahrten, die mit einem konventionellen Privatfahrzeug erfolgen können, sodass die Zustellung an Schließfächer mit Elektrofahrzeugen Endenergieeinsparungen im Vergleich zur Adresszustellung mit konventionellen Zustellfahrzeugen ermöglicht. **Abbildung 5-33** zeigt exemplarisch die relativen Endenergieeinsparungen für die Lieferung an Schließfächer im Vergleich zur Adresszustellung mit konventionellen Zustellfahrzeugen für Putzbrunn und Haidhausen Süd in Abhängigkeit des Anteils der PKW-Nutzung für Abholfahrten. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Flotte der Kunden nur aus Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor besteht. Die Auswertung erfolgt dabei für eine Fahrzeugkapazität von 200 Belieferungen bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 15 %. Als Referenzfahrzeug bei der Adresszustellung dient das ICEFV200, die Zustellung an Schließfächer erfolgt mit Fahrzeugen des Typs FEV200P.

Sowohl in Haidhausen Süd als auch in Putzbrunn dürften bei einer Durchdringungsrate von 10 % in diesem Beispiel prinzipiell alle Kunden mit dem Privatfahrzeug die Sendung abholen, sodass die Zustellung an Schließfächer mit Elektrofahrzeugen noch Endenergieeinsparungen von rund 19,5 % bzw. 11,5 % gegenüber der Adresszustellung mit Fahrzeugen des Typs ICEFV200 ermöglicht. Mit steigender Durchdringungsrate der Nutzung von Schließfächern nimmt dieser Anteil ab, da insgesamt mehr Abholfahrten unternommen werden müssen. In diesem Beispiel dürften bei einer Durchdringungsrate von 20 % in Haidhausen Süd noch rund 70 % der Kunden mit dem PKW fahren, während es in Putzbrunn auf Grund der längeren Strecken zum Schließfach nur rund 60 % sind.

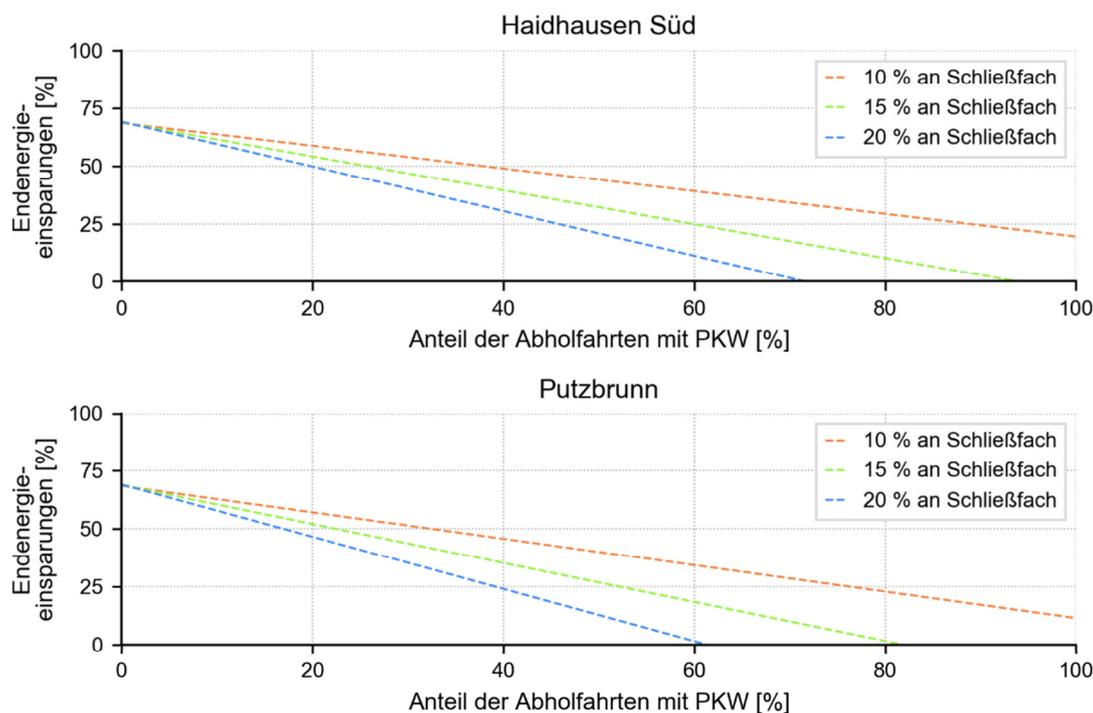


Abbildung 5-33 Relative Endenergieeinsparungen in Abhängigkeit der PKW-Nutzung für Abholfahrten (Referenz: Adresszustellung mit ICEFV200, Zustellwahrscheinlichkeit 15 %, Elektrofahrzeug FEV200P)

Tabelle 5-7 fasst die maximalen Anteile der Abholfahrten der Kunden mit dem Privat-PKW zur Erreichung von Endenergieeinsparungen der Schließfachzustellung mit Elektrofahrzeugen im Vergleich zur Adresszustellung mit konventionellen Fahrzeugen für verschiedene Fahrzeugkapazitäten zusammen. Die variierende mittlere Entfernung zum Schließfach ist auf die unterschiedliche Ausprägung der Zustellgebiete bei den verschiedenen Fahrzeugkapazitäten zurückzuführen.

Wie bei der Betrachtung des Endenergiebedarfs haben die Abholfahrten der Kunden auch bei der CO₂-Bilanz Einfluss auf das Ergebnis. Als Beispiel hierzu zeigt **Abbildung 5-34** die Ausprägung der mittleren Kohlenstoffdioxidemissionen pro Sendung für die Schließfachzustellung in Abhängigkeit des Anteils der Abholfahrten mit dem PKW. Bei einer Beschickung der Schließfächer mit einem FEV200P in Haidhausen Süd dürften etwa 90 % der Kunden die Sendung mit dem PKW abholen, sodass die spezifischen Emissionen bei einer Durchdringungsrate von 10 % bilanziell unter dem Niveau der Adresszustellung mit einem ICEFV200 liegen. Mit steigender Durchdringungsrate der Schließfachzustellung reduziert sich dieser Wert auf rund 50 %. Für Putzbrunn ergeben sich neben den im allgemeinen höheren spezifischen Kohlenstoffdioxidemissionen einer Sendungszustellung auch andere Anteile der Kundenfahrten. Bei einer Durchdringungsrate von 10 % könnten beispielsweise circa 75 % der Kunden die Sendung mit dem Privatfahrzeug abholen, ohne dass erhöhte Emissionen im Vergleich zur Adresszustellung mit konventionellen Fahrzeugen entstünden. Mit steigender Durchdringung der Schließfachzustellung auf 20 % reduziert sich dieser Anteil auf rund 40 %.

Tabelle 5-7 Maximale Anteile der PKW-Nutzung von Kunden zur Sendungsabholung für Erreichung von Endenergieeinsparung beim Einsatz von Elektrofahrzeugen (Zustellwahrscheinlichkeit 10 %)

Durchdringungsrate Schließfach	Haidhausen Süd			Putzbrunn		
	10 %	15 %	20 %	10 %	15 %	20 %
Fahrzeugkapazität 150 Belieferungen						
Mittlere Entfernung zum Schließfach	0,47 km			1,66 km		
Energieverbrauch ICEFV150 Adresszustellung	94,3 kWh			60,8 kWh		
Energieverbrauch FEV150C Schließfach	34,5 kWh	34,3 kWh	34,2 kWh	21,6 kWh	21,3 kWh	21,1 kWh
max. Anteil Kundenfahrten mit PKW	>100 %	>100 %	77,3 %	84,5 %	57,8 %	43,3 %
Energieverbrauch FEV150P Schließfach	33,5 kWh	33,4 kWh	33,2 kWh	21,4 kWh	21,2 kWh	21,0 kWh
max. Anteil Kundenfahrten mit PKW	>100 %	>100 %	78,5 %	84,4 %	58,0 %	43,4 %
Fahrzeugkapazität 200 Belieferungen						
Mittlere Entfernung zum Schließfach	0,56 km			1,53 km		
Energieverbrauch ICEFV200 Adresszustellung	96,0 kWh			75,2 kWh		
Energieverbrauch FEV200C Schließfach	35,7 kWh	35,4 kWh	35,2 kWh	26,9 kWh	26,5 kWh	26,4 kWh
max. Anteil Kundenfahrten mit PKW	>100 %	86,3 %	65,8 %	>100 %	76,9 %	57,6 %
Energieverbrauch FEV200P Schließfach	30,2 kWh	30,0 kWh	29,7 kWh	23,7 kWh	23,4 kWh	23,3 kWh
max. Anteil Kundenfahrten mit PKW	>100 %	94,0 %	71,7 %	>100 %	81,9 %	61,4 %
Fahrzeugkapazität 250 Belieferungen						
Mittlere Entfernung zum Schließfach	0,58 km			2,32 km		
Energieverbrauch ICEFV250 Adresszustellung	85,8 kWh			68,1 kWh		
Energieverbrauch FEV250C Schließfach	30,0 kWh	29,8 kWh	29,5 kWh	23,1 kWh	22,8 kWh	22,5 kWh
max. Anteil Kundenfahrten mit PKW	>100 %	77,7 %	58,8 %	69,4 %	47,4 %	35,7 %

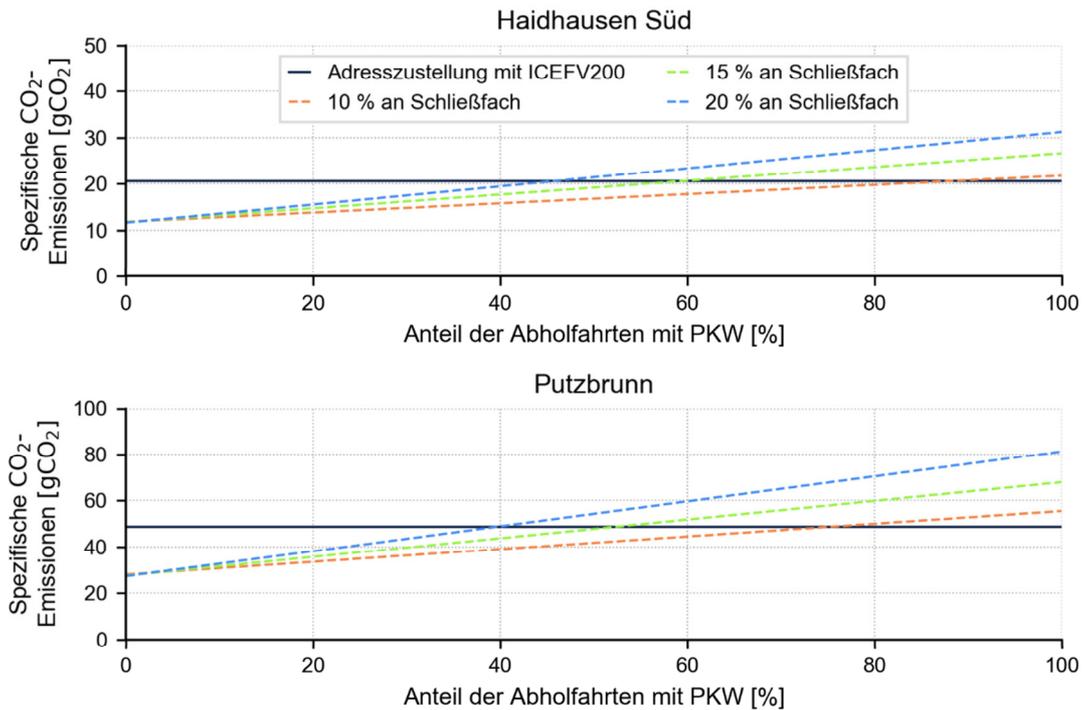


Abbildung 5-34 Spezifische Kohlenstoffdioxidemissionen der Schließfachzustellung in Abhängigkeit des Anteils der PKW-Nutzung der Kunden für Abholfahrten (Zustellwahrscheinlichkeit 15 %, Elektrofahrzeug FEV200P)

Neben der Möglichkeit zur Abholung bzw. Entgegennahme von Sendungen durch Kunden rund um die Uhr bietet die Integration von Schließfächern im Kombination mit einer Zustellung durch Elektrofahrzeuge das Potential zur Energie- und Emissionsreduktion im Vergleich zur Adresszustellung mit konventionellen Fahrzeugen. Da die Abholfahrten deutlichen Einfluss auf Endenergieeinsparungen und Emissionsreduktion haben, muss die Wahl des Standorts der Schließfächer so erfolgen, dass keine zusätzlichen Wege mit dem Privatfahrzeug zur Abholung der Sendung unternommen werden müssen. Ein Standort entlang von Arbeits- oder Einkaufswegen, z.B. an Bahnhöfen oder Supermärkten ist daher sinnvoll [41]. Zusätzlich muss festgehalten werden, dass der Einsatz von konventionellen Zustellfahrzeugen in Kombination mit diesem Konzept auf jeden Fall zu einer Erhöhung des Endenergieeinsatzes sowie einem zusätzlichen Ausstoß von Kohlenstoffdioxid im Vergleich zur Adresszustellung führt, da mit hoher Wahrscheinlichkeit einige Kunden Wege mit dem Privat-PKW exklusiv zur Abholung der Sendung unternehmen.

5.4. Auslieferung von Lebensmitteln

Viele Städte sind heute mit Verkehrsproblemen konfrontiert, die neben vermehrten Staus auch in einer steigenden Umweltbelastung durch Stop-and-Go-Verkehr resultieren. Ein Teil der steigenden Verkehrsbelastung in Städten ist dabei auf Einkaufsfahrten zurückzuführen. Von der gesamten Verkehrsleistung des Motorisierten Individualverkehrs (MIV) in Deutschland im Jahr 2015 von 945,7 Milliarden Personenkilometern (Pkm) entfielen 165,3 Mrd. Pkm oder rund 17,5 % auf Einkaufsfahrten. Neben Freizeitfahrten (35,4 %) und beruflichen Fahrten (20,0 %) steht dieser Fahrtzweck an dritter Stelle der Statistik zur Verkehrsleistung. [58] [166] Eine Auslieferung von Lebensmitteln durch einen Logistikdienstleister bietet daher eine Möglichkeit zur Reduktion des Verkehrsaufkommens, da dadurch die Möglichkeit eröffnet wird, Einkaufsfahrten durch den Einsatz eines Zustellfahrzeugs zu substituieren [167]. Lebensmittellieferungen durch Logistikdienstleister können damit als spezielle Form der Lieferung auf der letzten Meile der City-Logistik gesehen werden. Die Rolle des Logistikdienstleisters übernehmen dabei nicht zwingend Unternehmen aus der KEP-Branche. Teilweise bieten inzwischen auch Supermarktketten die Lieferung von Lebensmitteln mit eigenen Zustellfahrzeugflotten an. Das vorherrschende Zustellkonzept dabei ist die Adresszustellung, da beispielsweise eine Kühlung von Schließfächern zur Verhinderung des Verderbens von Lebensmitteln notwendig wäre.

Im Nachfolgenden wird das Potential einer Auslieferung von Lebensmitteln aus energetischer Sichtweise am Beispiel von Putzbrunn und Haidhausen Süd für Zustellfahrzeuge mit einer Kapazität von 200 Belieferungen analysiert. Energieverbrauch und Emissionen für die Einkaufsfahrten der Sendungsempfänger bzw. Kunden werden dabei der Zustellung der Lebensmittel durch Zustellfahrzeuge gegenübergestellt (**Abbildung 5-35**). Basierend auf der Annahme, dass im Mittel 10 % bzw. 20 % aller Haushalte der Untersuchungsregionen an einem Tag mit Lebensmitteln durch einen Logistikdienstleister beliefert werden (Zustellwahrscheinlichkeit für Lebensmittelsendungen), wird dabei auch der Einfluss von unterschiedlichen Anzahlen an belieferten Haushalten analysiert.

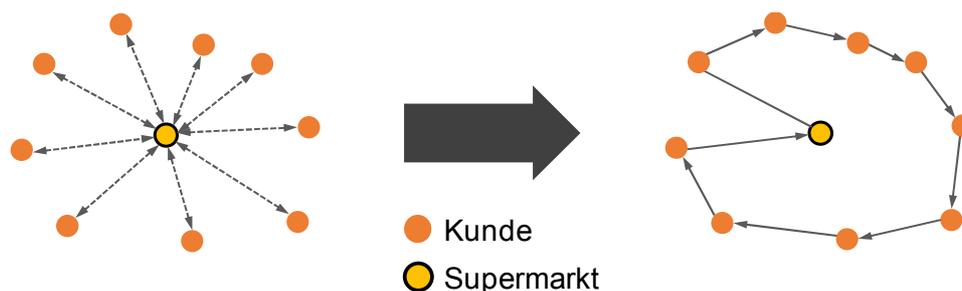


Abbildung 5-35 Lebensmittellieferungen von Supermärkten

Durch die bilanzielle Betrachtung müssen die Einkaufsfahrten der Sendungsempfänger, die durch den Einsatz von Zustellfahrzeugen substituiert werden können und als Referenz dienen, nicht zwingend am selben Tag wie die Lieferung der Lebensmittel erfolgen. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Kunden nur einen definierten Supermarkt pro Untersuchungsregion für den Einkauf nutzen. Das Fahrzeugdepot des Logistikdienstleisters muss dabei nicht mit dem Supermarkt übereinstimmen. Verkettete Wege für den Einkauf in mehreren Läden bzw. mehrere Fahrtzwecke werden ebenso nicht betrachtet. Zusätzlich wird angenommen, dass die Belieferung auch bei Lebensmitteln in Zustellgebieten erfolgt.

In [168] wurden bereits Teile dieser Potentialanalyse im Rahmen einer Fallstudie für Haidhausen Süd mit vereinfachter Methodik zur Bestimmung des spezifischen Endenergiebedarfs der Zustellfahrzeuge veröffentlicht.

5.4.1 Energieverbrauch und CO₂-Emissionen von Einkaufsfahrten für Lebensmittel

Da nicht alle Einkaufsfahrten mit einem PKW zurückgelegt werden, muss die Aufteilung der Einkaufsfahrten der Kunden auf verschiedene Verkehrsträger beachtet werden. Der in **Abbildung 5-36** dargestellte Modal Split gibt Aufschluss über die Anteile verschiedener Verkehrsträger an Einkaufsfahrten in Abhängigkeit der Gemeindegröße. Die Werte beziehen sich auf Personen, die ständig Zugriff auf einen PKW haben. Für die abgebildeten Anteile wurden nur Wege mit dem Zweck des Einkaufs betrachtet. [166]

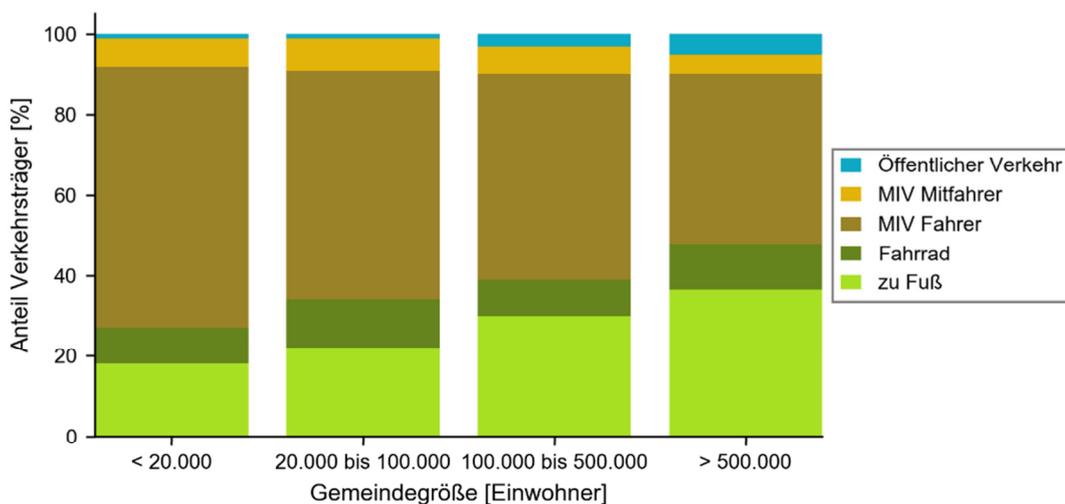


Abbildung 5-36 Modal Split für Einkaufsfahrten in Abhängigkeit der Gemeindegröße (Daten aus [166])

Auffällig bei der Betrachtung des Modal Splits ist, dass mit steigender Gemeindegröße der Anteil an Personen deutlich ansteigt, die Einkäufe zu Fuß oder mit dem Fahrrad erledigen. In großen Gemeinden mit mehr als 500.000 Einwohnern werden beispielsweise rund 48 % der Einkaufsfahrten zu Fuß oder mit dem Fahrrad zurückgelegt, während es in kleinen Gemeinden mit weniger als 20.000 Einwohnern nur rund 27 % sind. Die Nutzung eines Personenkraftwagens für Einkaufsfahrten, der vereinfacht als repräsentativer Verkehrsträger für den Motorisierten Individualverkehr (MIV) gesehen werden kann, zeigt dabei eine gegenläufige Tendenz. Werden in kleinen Gemeinden insgesamt rund 72 % der Einkäufe mit dem PKW als Verkehrsmittel getätigt, sind es in den großen Gemeinden nur noch rund 47 %. Diese Trends sind auf ein dichteres Netz an Einkaufsmöglichkeiten und damit geringeren Distanzen zum Erreichen des nächst gelegenen Ladens mit steigender Einwohnerzahl zurückzuführen. Gleichzeitig spielen die Verfügbarkeit von Parkplätzen und das Verkehrsaufkommen in den Gemeinden sicher auch eine Rolle bei der PKW-Nutzung [166]. Ebenso gewinnt der öffentliche Verkehr (z.B. Bus, U-Bahn, S-Bahn und Tram) als Verkehrsmittel für Einkaufsfahrten mit steigender Gemeindegröße deutlich an Einfluss, was hauptsächlich auf eine höhere Taktfrequenz bzw. das Vorhandensein der entsprechenden Verkehrsmittel zurückzuführen ist.

Zur Bestimmung des Endenergiebedarfs der Einkaufsfahrten der Kunden wird zunächst die zurückzulegende Gesamtstrecke zur Erreichung des Supermarkts auf die einzelnen Verkehrsträger mit dem Modal Split aufgeteilt. Dabei wurden für Putzbrunn die Werte für Gemeinden mit weniger als 20.000 Einwohnern genutzt. Für Haidhausen Süd als Stadtbezirksteil von München wurde dem hingegen der Modal Split für Gemeinden mit mehr als 500.000 Einwohnern verwendet. **Tabelle 5-8** fasst die Aufteilung der Gesamtstrecke für Einkaufsfahrten nach Verkehrsträger für die beiden ausgewählten Zustellwahrscheinlichkeiten zusammen.

Tabelle 5-8 Gesamtwegstrecken der Kunden für Einkaufsfahrten nach Verkehrsträgern

		Haidhausen Süd		Putzbrunn	
Durchschnittliche Verkehrsweite einer Einkaufsfahrt der Kunden	[km]	1,00		3,61	
Zustellwahrscheinlichkeit	[1]	10 %	20 %	10 %	20 %
Einkaufsfahrten	[1]	832	1662	274	549
Gesamtstrecke für Einkäufe	[km]	834,4	1665,4	991	1985,1
davon zu Fuß	[km]	304,6	607,2	178,4	357,3
davon mit dem Fahrrad	[km]	100,1	199,8	89,2	178,1
davon mit dem PKW (Fahrer)	[km]	346,3	691,5	644,2	1290,3
davon mit dem PKW (Mitfahrer)	[km]	41,7	83,3	69,4	139
davon mit öffentlichen Verkehrsmitteln	[km]	41,7	83,3	9,9	19,9

Auf Grund des geringen Anteils der öffentlichen Verkehrsmittel an der Gesamtstrecke werden diese nicht bei Bestimmung des Endenergieverbrauchs der Kunden beachtet. Mit dem spezifischen Endenergiebedarf sowie dem Emissionsfaktor der deutschen Personenkraftwagenflotte, die repräsentativ für den Motorisierten Individualverkehr genutzt werden, ergeben sich die in **Abbildung 5-37** dargestellten absoluten Endenergieverbräuche und Emissionen für die Einkaufsfahrten der Kunden. Wegstrecken des MIV, die als Mitfahrer zurückgelegt werden, wurden dabei als normale Fahrt mit dem PKW gewertet.

Die verglichen mit Putzbrunn geringe mittlere Verkehrsweite einer Einkaufsfahrt in Haidhausen Süd spiegelt sich auch im Endenergieverbrauch und den daraus resultierenden Kohlenstoffdioxidemissionen wider. Bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 10 % beträgt der Endenergiebedarf der Kunden in Putzbrunn rund 470 kWh, während es in Haidhausen Süd nur circa 255 kWh sind. Auf Grund der linear mit der Zustellwahrscheinlichkeit ansteigenden Menge an belieferten Kunden nimmt auch der Endenergiebedarf der Kunden linear zu. Eine Verdopplung der Zustellwahrscheinlichkeit resultiert insbesondere auch in einer Verdopplung des Endenergiebedarfs. Gleiches gilt für die CO₂-Emissionen, die sich bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 20 % in Haidhausen Süd auf rund 67 kgCO₂ bzw. in Putzbrunn auf rund 248 kgCO₂ belaufen.

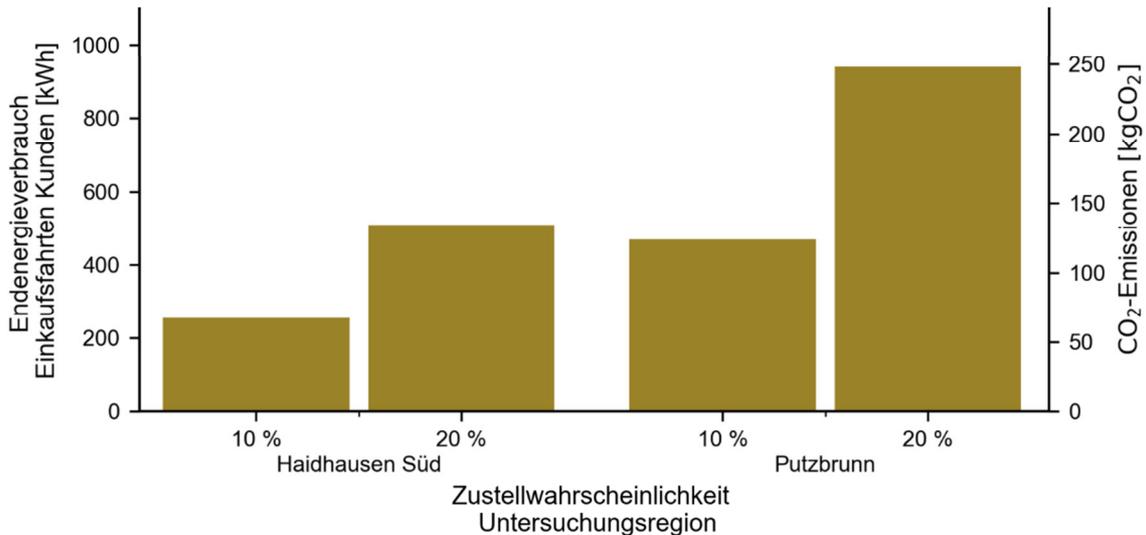


Abbildung 5-37 Endenergieverbrauch der Einkaufsfahrten von Kunden bei unterschiedlichen Zustellwahrscheinlichkeiten

5.4.2 Endenergieeinsparungen durch Lebensmittellieferungen

Endenergiebedarf der Zustellfahrzeuge

Der Endenergiebedarf der Zustellfahrzeuge bei der Auslieferung von Lebensmitteln (Abbildung 5-38) zeigt die identischen Eigenschaften wie bei der Auslieferung von Paketsendungen. Insbesondere beeinflussen dabei auch wieder die geographischen Eigenschaften der Untersuchungsregion den Energiebedarf im Streckensegment Belieferung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich nur der Typ der Sendung verändert, die Charakteristika der Auslieferung bzw. Untersuchungsregion aber unverändert bleiben. Auch bei der Lieferung von Lebensmitteln haben An- und Abfahrt deutlichen Einfluss auf den Energieverbrauch der Zustellfahrzeuge.

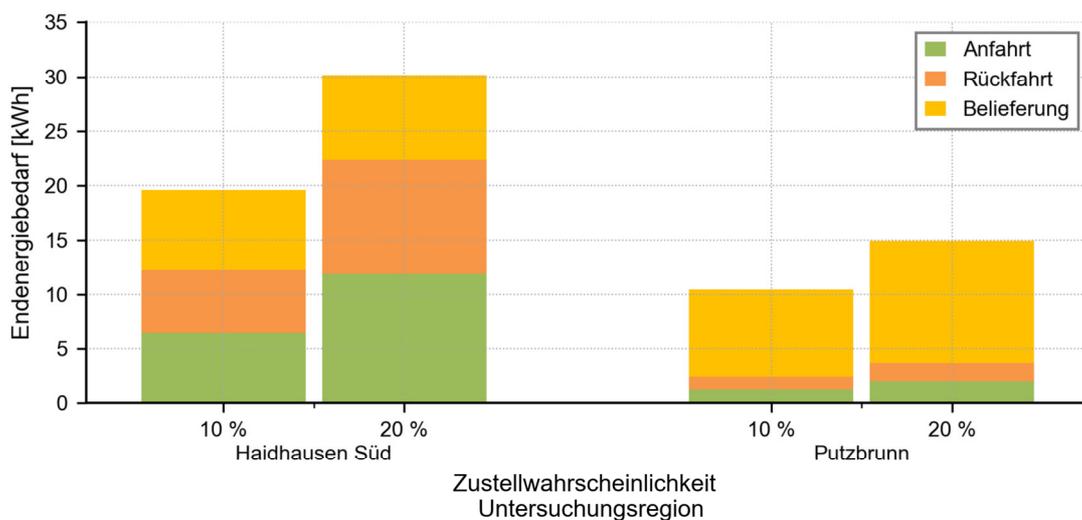


Abbildung 5-38 Endenergiebedarf für die Belieferung von Haidhausen Süd und Putzbrunn mit Lebensmitteln (Fahrzeuge FEV200P)

Für die Bestimmung der dargestellten Zusammensetzungen des Endenergiebedarfs wurde ein real existierender Supermarkt in Neubiberg am südöstlichen Stadtrand von München als Fahrzeugdepot für beide Untersuchungsregionen verwendet. Auf Grund der geringen Entfernung von Putzbrunn zu diesem Depot (im Mittel rund 3,5 km) bestimmt das Segment Belieferung wesentlich den Endenergiebedarf. Die ungefähr doppelt so hohe Entfernung vom Depot nach Haidhausen Süd (Entfernung circa 6,9 km) resultiert in Kombination mit der deutlich höheren Anzahl an Haushalten und damit eingesetzten Zustellfahrzeugen in einem höheren Einfluss von An- und Abfahrt auf den Energieverbrauch.

Vergleich von Zustellung und Einkaufsfahrten der Kunden

Abbildung 5-39 ermöglicht den direkten Vergleich des Endenergiebedarfs von Zustellfahrzeugen und Kunden. Zusätzlich sind die resultierenden Endenergieeinsparungen aufgetragen. Die Auswertung basiert dabei auf einer Kapazität der Zustellfahrzeuge von 200 Belieferungen sowie dem Fahrzeugdepot in Neubiberg. Selbst beim Einsatz von konventionellen Zustellfahrzeugen zur Belieferung der Kunden ergibt sich das Potential erhebliche Mengen an Endenergie einzusparen. Für Haidhausen Süd resultiert beispielsweise die Belieferung der Kunden in der Möglichkeit zur Einsparung einer Energiemenge von rund 200 kWh bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 10 %, was einer Einsparung von rund 76,5 % entspricht. Auf Grund des energetischen Vorteils von Elektrofahrzeugen wird dieser Effekt nochmals verstärkt, woraus in relativen Energieeinsparungen von 91,1 % bzw. 92,3 % beim Einsatz von FEV200C bzw. FEV200P resultieren. Auf Grund der größeren Distanzen, die Kunden für die Einkaufsfahrten zurücklegen müssen, ergeben sich für Putzbrunn auch größere Mengen an eingesparter Endenergie. Bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 20 % bietet beispielsweise der Einsatz von FEV200P-Elektrofahrzeugen das Potential zur Einsparung von rund 98,7 % gegenüber individuellen Einkaufsfahrten der belieferten Kunden.

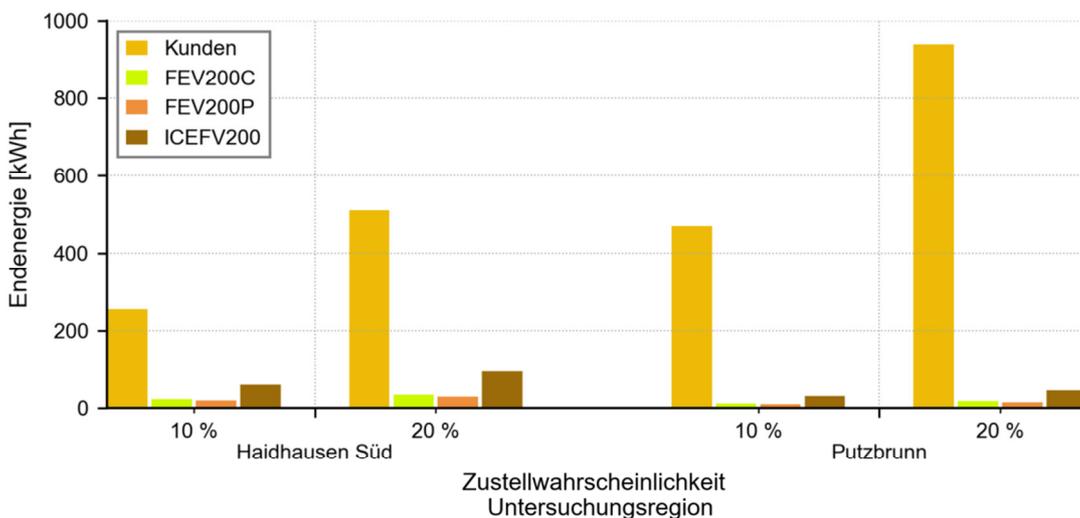


Abbildung 5-39 Potential zur Endenergieeinsparung durch Lebensmittellieferung (verbrennungsmotorische Kundenfahrzeuge, Anteile Privatfahrzeugnutzung gemäß Modal Split)

5.4.3 Sensitivität der Endenergieeinsparungen

Die Ergebnisse aus dem vorherigen Abschnitt motivieren eine Betrachtung der Sensitivität der Einsparungen in Bezug auf einen veränderten spezifischen Endenergiebedarf der Kundenfahrzeuge und eine variierende mittlere Wegstrecke der Kunden für Einkaufsfahrten.

Einfluss des spezifischen Endenergiebedarfs der Fahrzeuge der Kunden

Abbildung 5-40 zeigt die Endenergieeinsparungen bei der Lebensmittelauslieferung gegenüber individuellen Einkaufsfahrten bei variierenden Anteilen der PKW-Nutzung für eine Zustellwahrscheinlichkeit von 10 %. Neben einer Betrachtung des Verlaufs der Endenergieeinsparungen bei unterschiedlichen Anteilen an Einkaufsfahrten der Kunden können ähnlich wie bei der Analyse von Paketschließfächern auch die maximalen Anteile bestimmt werden, sodass die Auslieferung von Lebensmitteln Energieeinsparungen ermöglicht. Bei der Verwendung des spezifischen Endenergieverbrauchs der deutschen PKW-Flotte von 65,8 kWh/100km führen bereits mehr als 1,6 % bzw. 3,6 % aller Einkaufsfahrten mit Privatfahrzeugen in Putzbrunn bzw. Haidhausen Süd zu Endenergieeinsparungen durch die Lieferung von Lebensmitteln. Durch Reduktion des spezifischen Endenergiebedarfs der Kundenfahrzeugflotte auf einen Wert von 15 kWh/100km, wie es beispielsweise durch vollständige Elektrifizierung möglich wäre, steigt der Anteil des maximalen Anteils der Kundenfahrten auf einen Wert von 7,0 % bzw. 15,6 % für Putzbrunn bzw. Haidhausen Süd an.

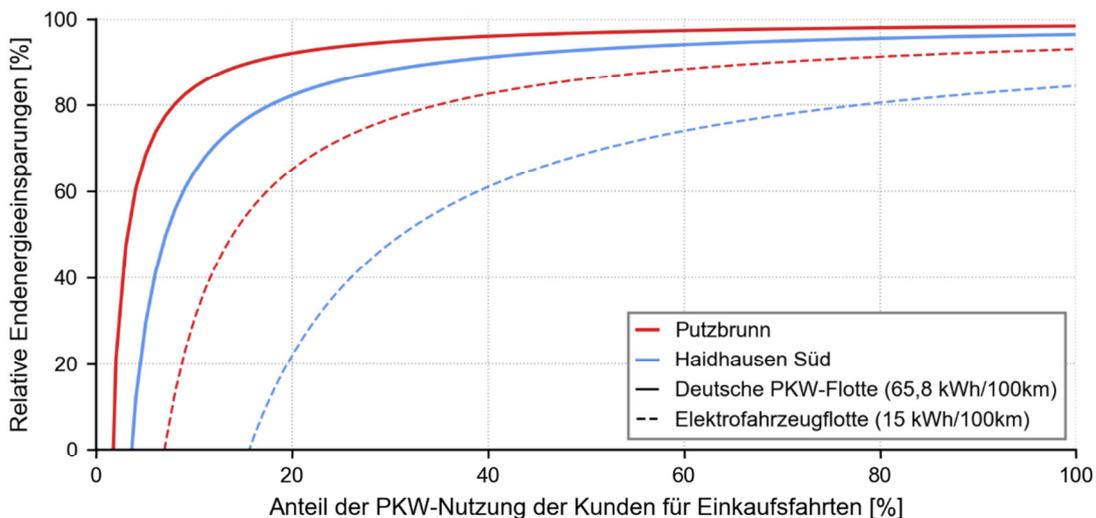


Abbildung 5-40 Sensitivität der Endenergieeinsparungen auf spezifischen Endenergiebedarf der Kundenfahrzeuge (Zustellung mit FEV200P, Zustellwahrscheinlichkeit 10 %)

Eine Verdopplung der Sendungsmenge (Zustellwahrscheinlichkeit 20 %) führt zu einem Rückgang der maximalen Anteile auf 1,1 % bzw. 2,8 % für die konventionelle deutsche PKW-Flotte sowie 5,0 % bzw. 12,1 % für die elektrifizierte Kundenfahrzeugflotte in Putzbrunn bzw. Haidhausen Süd. Der Grund für die Reduzierung der Anteile liegt im nicht proportional mit der Anzahl der belieferten Kunden ansteigenden Energieverbrauch der Zustellfahrzeuge.

Der höhere Endenergiebedarf bei der Belieferung mit Fahrzeugen des Typs ICEFV200 resultiert in beiden Untersuchungsregionen in einem Anstieg der maximal möglichen Anteil-

le der Kundenfahrten mit dem Privat-PKW. In Haidhausen Süd liegen die maximalen Anteile dabei beispielsweise bei 10,9 % bzw. 47,8 % (Zustellwahrscheinlichkeit 10 %) und 8,6 % bzw. 37,5 % (Zustellwahrscheinlichkeit 20 %) für die konventionelle bzw. elektrifizierte PKW-Flotte der Kunden. Unter Einbezug der aktuellen Anteile der PKW-Nutzung für Einkaufsfahrten von 46,5 % inkl. Fahrten als Beifahrer (vgl. Abbildung 5-36) ergeben sich daher für Haidhausen Süd bei elektrifizierter PKW-Flotte und einer Zustellwahrscheinlichkeit von 10 % keine Endenergieeinsparungen mehr. Die Verdopplung der Sendungsmenge würde jedoch wieder zu Endenergieeinsparungen in Höhe von 19,27 % bei diesem Modal-Split führen.

Mit Ausnahme des genannten Falls ergeben sich in allen diskutierten Fällen auch bei einer deutlichen Reduktion des spezifischen Endenergiebedarfs der Kundenfahrzeugflotte Möglichkeiten zur Endenergieeinsparung. Die Reduktion des spezifischen Endenergiebedarfs führt dabei zu einer Abflachung des Verlaufs der relativen Endenergieeinsparungen über dem Anteil der Kundenfahrten mit dem PKW, d.h. es ergeben sich geringere Einsparungen. Dennoch resultiert die Auslieferung mit elektrischen Zustellfahrzeugen immer zu höheren Endenergieeinsparungen im Vergleich zur Verwendung von konventionellen Zustellfahrzeugen, selbst bei elektrifizierter Kundenfahrzeugflotte.

Einfluss der mittleren Länge der Einkaufsfahrten der Kunden

Ähnlich wie der Anteil der Kunden, die mit dem PKW eine Einkaufsfahrt tätigen, hat auch die mittlere Verkehrsweite einer Einkaufsfahrt Einfluss auf die Endenergieeinsparungen. Bei den in **Abbildung 5-41** dargestellten Werten für Haidhausen Süd bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 10 % ergibt sich beispielsweise ab einer mittleren Verkehrsweite der Einkaufsfahrten (Hin- und Rückweg) von circa 77 m bei einem Anteil der PKW-Nutzung von 46,5 % für alle Einkaufsfahrten die Möglichkeit zur Einsparung von Endenergie, wenn die Auslieferung der Lebensmittel mit Fahrzeugen des Typs FEV200P erfolgt.

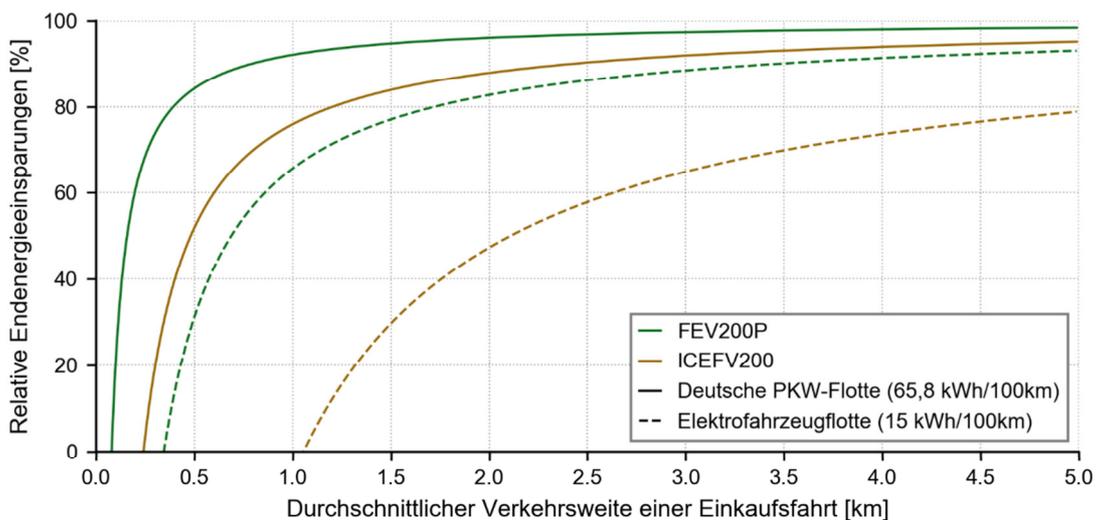


Abbildung 5-41 Sensitivität der Endenergieeinsparungen auf mittlere Verkehrsweite von Einkaufsfahrten (Haidhausen Süd, Zustellwahrscheinlichkeit 10 %, Anteil der PKW-Nutzung für Einkaufsfahrten 46,5 %)

Auf Grund des höheren Endenergiebedarfs der verbrennungsmotorischen Zustellfahrzeuge ICEFV200 erhöht sich die mittlere Verkehrsweite einer Kundenfahrt dabei auf rund 235 m. Bei einer Elektrifizierung der deutschen PKW-Flotte müsste die mittlere Verkehrsweite mindestens etwa 350 m bzw. 1032 m bei Verwendung von FEV200P bzw. ICEFV200 betragen, sodass die Auslieferung von Lebensmitteln in Einsparungen resultiert.

Die minimalen Verkehrsweiten zur Erreichung von Endenergieeinsparungen in Putzbrunn sind dabei nahezu deckungsgleich mit Haidhausen Süd. Dies resultiert aus der geringeren Anzahl an belieferten Kunden und dem gleichzeitig geringeren Endenergiebedarf der Zustellfahrzeuge. Beispielsweise ergibt sich bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 10 % und der Belieferung durch FEV200P eine minimale Verkehrsweite von rund 80 m. Die Verdopplung der Sendungsmenge führt in beiden Untersuchungsregionen zu einem deutlichen Rückgang der minimalen Verkehrsweite. Für die Belieferung von Haidhausen Süd bzw. Putzbrunn mit FEV200P ergeben sich z.B. bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 20 % mittlere Verkehrsweiten von circa 59 m bzw. 56 m bei der konventionellen PKW-Flotte. Dieses Verhalten ist auf die steigende Zahl an Kunden zurückzuführen, die Sendungen mit dem Privatfahrzeug abholen. Auch bei der Analyse der Sensitivität der mittleren Verkehrsweite auf die Endenergieeinsparungen führt die Elektrifizierung der Kundenfahrzeugflotte zu einer Abflachung der Verläufe der Kurven, was mit geringen Endenergieeinsparungen gleichzusetzen ist.

5.4.4 CO₂-Einsparungen

Auch in Bezug auf die resultierenden Kohlenstoffdioxidemissionen zeigt die Auslieferung von Lebensmitteln das Potential zur Reduktion im Vergleich zu individuellen Einkaufsfahrten der Kunden (**Abbildung 5-42**).

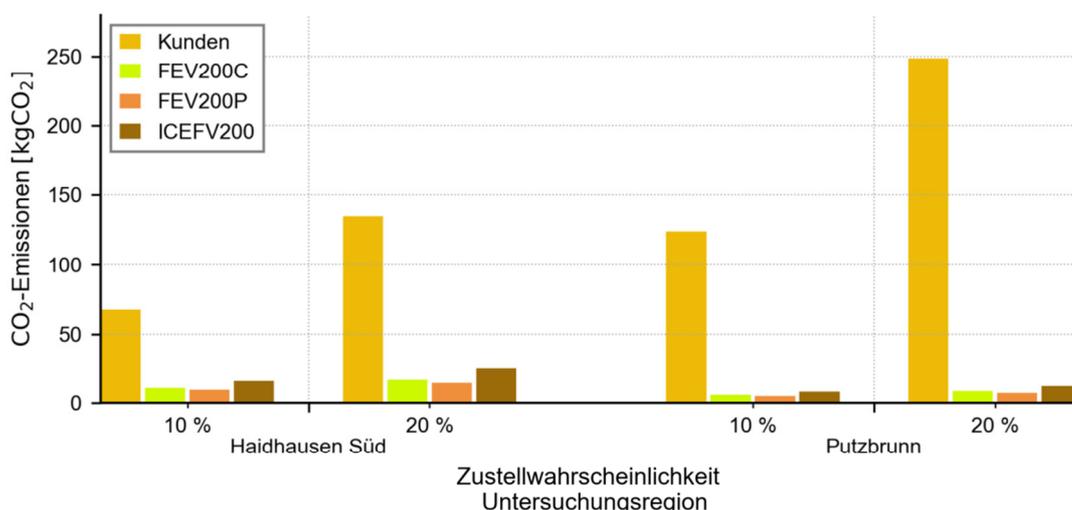


Abbildung 5-42 Potential zur CO₂-Einsparung durch Lebensmittellieferung (verbrennungsmotorische Kundenfahrzeuge, Anteile Privatfahrzeugnutzung gemäß Modal Split, Emissionsfaktor Ladestrommix Jahresmittelwert 2017)

Beispielsweise resultieren für Haidhausen Süd bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 10 % Einsparungen von rund 58 kgCO₂ bei Belieferung mit Fahrzeugen des Typs FEV200P. Eine Verdopplung der Sendungsmenge führt zu Einsparungen von circa 120 kgCO₂. Die nicht linear zunehmenden CO₂-Einsparungen sind dabei wiederum auf den

nicht proportional mit der Sendungsmenge zunehmenden Anstieg von Endenergiebedarf bzw. Emissionen der Zustellfahrzeuge zurückzuführen. Für Putzbrunn resultieren beim Einsatz von FEV200P-Zustellfahrzeugen Einsparungen von 119 kgCO₂ bzw. 241 kgCO₂ für die Zustellwahrscheinlichkeit von 10 % bzw. 20 %. Überdies muss festgehalten werden, dass auch eine Auslieferung von Lebensmitteln mit konventionellen Fahrzeugen das Potential zur Reduktion der Kohlenstoffdioxidemissionen in beiden Untersuchungsregionen ermöglicht. Insgesamt decken sich die dargestellten Ergebnisse tendenziell mit Auswertungen, die in [169] für andere Untersuchungsregionen durchgeführt wurden.

Die Ergebnisse zum Potential der CO₂-Reduktion durch Auslieferung von Lebensmitteln motivieren eine Analyse der Sensitivität der Einsparungen hinsichtlich des Emissionsfaktors des Ladestrommix (**Abbildung 5-43**). Da der Emissionsfaktor von Dieselmotoren als konstant vorausgesetzt ist, ergibt sich beim Vergleich einer Zustellung mit Elektrofahrzeugen und Einkaufsfahrten mit konventionellen Fahrzeugen eine fallende Tendenz der CO₂-Einsparungen mit steigendem Emissionsfaktor des Ladestroms. Wird jedoch der umgekehrte Fall betrachtet, d.h. eine Zustellung mit konventionellen Fahrzeugen im Vergleich zu Einkaufsfahrten mit Elektrofahrzeugen, nehmen die Kohlenstoffdioxideinsparungen mit steigendem Emissionsfaktor zu. Im dargestellten Beispiel ergeben sich dabei erst ab einem Emissionsfaktor des Ladestroms von rund 280 gCO₂/kWh Emissionseinsparungen durch die Auslieferung von Lebensmitteln. Sollte in Zukunft die komplette Privatfahrzeugflotte elektrifiziert sein, muss demnach auch die Zustellung von Lebensmitteln mit Elektrofahrzeugen erfolgen, sodass Kohlenstoffdioxid eingespart werden kann. Diese Tatsache wird vor allem durch den prognostizierten Rückgang der spezifischen CO₂-Emissionen des Strommix weiter an Einfluss gewinnen. Durch die Auslieferung mit elektrischen Zustellfahrzeugen sowie einer Elektrifizierung der Privatfahrzeugflotte würden sich dabei konstante Emissionseinsparungen im Bereich von rund 65,7 % ergeben.

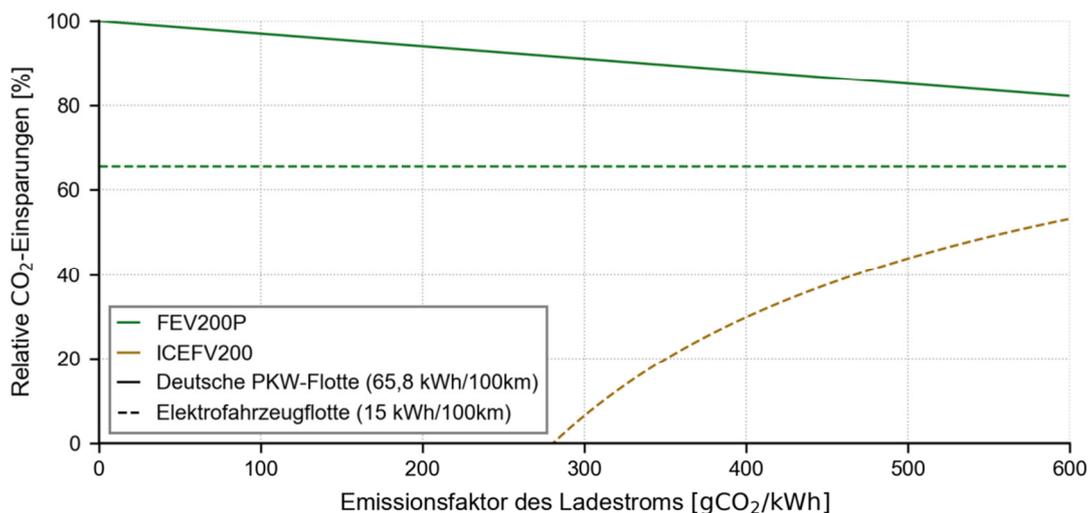


Abbildung 5-43 Sensitivität der relativen CO₂-Einsparungen auf Veränderung des Emissionsfaktors des Ladestrommix (Haidhausen Süd, Zustellwahrscheinlichkeit 10 %, Anteil der PKW-Nutzung für Einkaufsfahrten 46,5 %)

Der Grenzemissionsfaktor des Ladestroms, ab dem sich bei einer Auslieferung von Lebensmitteln mit konventionellen Fahrzeugen im Vergleich zu individuellen Einkaufsfahrten mit Elektrofahrzeugen CO₂-Einsparungen ergeben, wird wesentlich von der Untersuchungsregion bzw. der Sendungsmenge beeinflusst. Im Vergleich zum genannten Wert von 280 gCO₂/kWh für eine Zustellwahrscheinlichkeit von 10 % liegt dieser Wert in Putzbrunn bei rund 125 gCO₂/kWh. Eine Verdopplung der Sendungsmenge führt zu einer Reduktion auf 220 gCO₂/kWh bzw. 90 gCO₂/kWh für Haidhausen Süd und Putzbrunn.

Tabelle 5-9 fasst die Einsparungen in Putzbrunn und Haidhausen Süd für elektrische und konventionelle Zustellfahrzeuge bei verschiedenen Zustellwahrscheinlichkeiten und Konfigurationen der Privatfahrzeugflotten zusammen.

Tabelle 5-9 Relative CO₂-Einsparung bei verschiedenen Zustellfahrzeugen und Kundenfahrzeugflotten (Anteil der PKW-Nutzung für Einkaufsfahrten 46,5 %)

Zustellfahrzeug Kundenfahrzeugflotte	FEV200P		ICEFV200	
	Konventionell ¹	Elektrifiziert	Konventionell	Elektrifiziert ¹
Haidhausen Süd				
Zustellwahrscheinlichkeit 10%	85,5 %	65,7 %	75,8 %	42,6 %
Zustellwahrscheinlichkeit 20%	88,8 %	73,4 %	81,0 %	55,0 %
Putzbrunn				
Zustellwahrscheinlichkeit 10%	93,5 %	84,6 %	89,2 %	74,4 %
Zustellwahrscheinlichkeit 20%	95,3 %	88,9 %	92,3 %	81,7 %

¹ Bei einem Emissionsfaktor des Ladestroms von 489 gCO₂/kWh im Jahr 2017

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik zur Bestimmung von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen der letzten Meile der City-Logistik ermöglicht eine Vielzahl an energetischen Untersuchungen in diesem Themengebiet. Mit dem Modell *FeVER* wurde ein Werkzeug für flexible Untersuchungen in unterschiedlichen Regionen verschiedener Ausdehnung, räumlicher Struktur und Lage entwickelt. Das Konzept der Zustellwahrscheinlichkeit für Haushalte in Kombination mit einer Monte-Carlo-Simulation zur Abbildung unterschiedlicher Sendungsmengen ermöglicht Analysen des Potentials von verschiedenen Zustellkonzepten in Kombination mit verschiedenen Zustellfahrzeugen.

Für die Potentialanalysen wurden drei Untersuchungsregionen, die alle im Großraum München liegen, ausgewählt. Während die Gemeinde Aying eine ländliche Region darstellt, repräsentieren Putzbrunn bzw. der Stadtbezirksteil Haidhausen Süd suburbane bzw. städtische Siedlungsstrukturen.

Die energetische Analyse des Einsatzes von Elektrofahrzeugen bei der Adresszustellung von Paketen ergab, dass in allen Untersuchungsregionen unabhängig von der Fahrzeugkapazität und des Zustellkonzepts das Potential für Endenergieeinsparungen und Vermeidung von Kohlenstoffdioxidemissionen eröffnet wird. Neben der Sendungsmenge haben die geographischen Eigenschaften der Untersuchungsregionen hohen Einfluss auf den Energieeinsatz und die daraus resultierenden Emissionen. Demnach richtet sich auch die Ausprägung der absoluten Einsparungen nach den genannten Parametern. Die starke Abhängigkeit des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen von den geographischen und städtebaulichen Eigenschaften führt zur Aussage, dass eine Überprüfung und Anpassung des Fahrzeugeinsatzes bei veränderter Sendungsmenge auf jeden Fall aus energetischer Sicht sinnvoll ist. Durch die geeignete Wahl des Standorts des Fahrzeugdepots können Energieverbrauch und Emissionen auf der letzten Meile der Paketzustellung deutlich beeinflusst werden. Ein näher gelegenes Depot bietet das Potential, die Strecken für An- und Abfahrt der Zustellfahrzeuge und gleichzeitig Energieverbrauch und Emissionen zu reduzieren.

Eine Konsolidierung der Sendungen von Logistikdienstleistern als Zustellkonzept bietet die Chance zur Erhöhung der Energie- und Emissionseinsparungen, wobei die Organisation der Zustellung für dieses Konzept zu einigen Herausforderungen der Logistikdienstleister führt. Die Auslieferung von Paketsendungen am Abend eröffnet neben einer höheren Serviceorientierung der Logistikdienstleister hinsichtlich Erstzustellquoten gleichzeitig das Potential zur zusätzlichen Emissionsreduktion beim Einsatz von elektrischen Zustellfahrzeugen. Durch die Abendlieferung können dabei Zeiten mit hohem Anteil an erneuerbaren Energien im Stromnetz und damit geringerer CO₂-Intensität flexibel zum Aufladen der Elektrofahrzeuge genutzt werden. Auch bietet die Lieferung von Paketen an Schließfächer das Potential zur Einsparung von Endenergie und Reduktion von Emissionen in Kombination mit dem Einsatz von Elektrofahrzeugen. Dabei muss jedoch auch der Energieverbrauch der Abholfahrten von Kunden beachtet werden. Die Untersuchungen ergaben, dass ab bestimmten Anteilen der Kundenfahrten auch die Zustellung mit Elektrofahrzeugen in Kombination mit Schließfachzustellungen zu höheren Endenergieverbräuchen und Emissionen als die Adresszustellung mit verbrennungsmotorischen Fahrzeugen führen kann.

Als Sonderform für Lieferungen auf der letzten Meile der City-Logistik wurde die Zustellung von Lebensmitteln betrachtet. Dabei wurden Energieverbrauch und Emissionen der Zustellung von Lebensmitteln individuellen Einkaufsfahrten der Kunden gegenübergestellt. Für die derzeit vorherrschenden Anteile der PKW-Nutzung am Modal-Split für Einkaufsfahrten resultiert selbst die Zustellung mit konventionellen Zustellfahrzeugen in einer Vermeidung von Energieverbrauch und Emissionen. Durch verschiedene Auswertungen wurde die Sensitivität der relativen Einsparungen auf verschiedene Parameter untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass

- bereits sehr geringe Anteile von Kundenfahrten mit dem PKW zu Energieeinsparungen führen,
- der spezifische Endenergiebedarf der Kundenfahrzeugflotte deutlich die Einsparungen bestimmt,
- die mittlere Verkehrsweite für Einkaufsfahrten bei aktuellem Anteil der PKW-Nutzung am Modal-Split zur Erreichung von Endenergieeinsparungen sehr gering ist und dass
- die Zustellung von Lebensmitteln mit konventionellen Zustellfahrzeugen bei einer vollständigen Elektrifizierung der Kundenfahrzeugflotte und gleichzeitig deutlich zurückgehender CO₂-Intensität des Ladestrommix zu höheren Emissionen führen kann.

Zusammengefasst betrachtet eröffnet der Einsatz von elektrischen Zustellfahrzeugen auf der letzten Meile in Kombination mit verschiedenen Zustellkonzepten das Potential zur Reduktion von Endenergieeinsatz und Kohlenstoffdioxidemissionen. Die Ausprägung der Einsparungen wird dabei von vielen verschiedenen Parametern beeinflusst.

Da der Bereich der City-Logistik sich auf Grund der steigenden Sendungsmengen auch in den kommenden Jahren weiter verändern wird, können die Potentiale von neuen Entwicklungen mit dem Modell *FeVER* in zukünftigen Untersuchungen energetisch analysiert werden. Durch die Integration von höher aufgelösten georeferenzierten Daten, z.B. Gebäudehöhen, könnte das Modell noch weiter präzisiert werden. Ebenso würde der Zugang zu einer besseren Datengrundlage bzw. realen Daten die Möglichkeit zur Validierung der Ergebnisse bzw. Kalibrierung des Modells eröffnen. Insgesamt betrachtet leisten die Ergebnisse dieser Arbeit, insbesondere die Potentialanalysen und *FeVER*, einen Beitrag zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Lieferungen auf der letzten Meile der City-Logistik.

Anhang

A Glossar

Ay	Aying
B2B	Marktsegment der Logistik; Business to Business
B2C	Marktsegment der Logistik; Business to Consumer
C2C	Marktsegment der Logistik; Consumer to Consumer
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
FEV{KAP}C	Elektrisches Zustellfahrzeug mit Kapazität zur Belieferung von {KAP} Haushalten, Conversion Design
FEV{KAP}P	Elektrisches Zustellfahrzeug mit Kapazität zur Belieferung von {KAP} Haushalten, Purpose Design
FeVER	Freight electric Vehicle Energy Reproduction; Simulationsmodell
Ha	Haidhausen Süd
ICEFV{KAP}	Zustellfahrzeug mit Dieselmotor und Kapazität zur Belieferung von {KAP} Haushalten
KEP	Kurier-, Express- und Paket
MC-Simulation	Monte Carlo-Simulation
OSM	OpenStreetMap
Pu	Putzbrunn

B Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Aufbau und Struktur der Arbeit.....	4
Abbildung 2-1	Zieldreiecke von Energiewirtschaft und Logistik	6
Abbildung 2-2	Prozessstruktur einer Paketzustellung	9
Abbildung 2-3	Überblick und Kategorisierung von verschiedenen Zustellkonzepten (in Anlehnung an [35])	11
Abbildung 2-4	Schematischer Aufbau eines Batterieelektrofahrzeugs	18
Abbildung 2-5	Schematischer Aufbau eines hybridelektrischen Fahrzeugs.....	21
Abbildung 2-6	Schematischer Aufbau eines Brennstoffzellelektrofahrzeugs	23
Abbildung 3-1	Methodik zur Bestimmung von Energieverbrauch und Emissionen auf der letzten Meile.....	25
Abbildung 3-2	Entscheidung über die Belieferung eines Haushalts mit einer gleichverteilten Zufallszahl	28
Abbildung 3-3	Detaillierungsgrad der Zustellwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Bezugsgröße	28
Abbildung 3-4	Wahrscheinlichkeit für Belieferung eines Gebäudes für verschieden Anzahlen an Haushalten und Zustellwahrscheinlichkeiten.....	30
Abbildung 3-5	Fahrzeugleermasse über Zuladung der untersuchten Fahrzeuge	31
Abbildung 3-6	Gesamtmasse der definierten Fahrzeuge	34
Abbildung 3-7	Bestimmung von π durch randomisierte Quadratur	41
Abbildung 3-8	Hit or Miss Methode zur Bestimmung von π	42
Abbildung 3-9	Bestimmung von π durch Hit Or Miss (1.000 Simulationen mit je 1.000 Zufallsexperimenten)	43
Abbildung 3-10	Berechnung von π mit Hit Or Miss mit 10, 100 und 1.000 Zufallsexperimenten pro Simulation.....	43
Abbildung 4-1	Modellstruktur	47
Abbildung 4-2	Erzeuger-Verbraucher-System zur Parallelisierung von Berechnungen	48
Abbildung 4-3	Darstellung von Gebäuden in OSM.....	49
Abbildung 4-4	Darstellung von Straßen in OSM.....	50
Abbildung 4-5	Schema zur Extraktion der Daten von OSM.....	52
Abbildung 4-6	Beispiel für isolierte Knoten und Kanten und Straßennetzwerkgraph	53
Abbildung 4-7	Einfluss Gebäudehöhe bei Zuordnungsmethodik	54
Abbildung 4-8	Haltepunkte für Gebäude im Straßennetzwerkgraph.....	54
Abbildung 4-9	Zuordnung von Haltepunkten auf dem Straßengraph zu Gebäuden.....	55
Abbildung 4-10	Routing	58
Abbildung 4-11	Kürzester Pfad unter Einbezug von Einbahnstraßen (Karte: [101])	62
Abbildung 4-12	Berechnung der charakteristischen Streckenlängen einer Zustelltour	63
Abbildung 4-13	Bestimmung des Kurvenradius aus Geodaten (in Anlehnung an [135]).....	65
Abbildung 4-14	Geschwindigkeitsprofil des NREL Baltimore Parcel Delivery Cycle (Daten aus [137]).....	67
Abbildung 4-15	Route für Fahrprofil (Karte: [101])	68
Abbildung 4-16	Beispiel für ein synthetisiertes Fahrprofil.....	69
Abbildung 4-17	Reduktion der Geschwindigkeit in Kurven (Karte: [101])	70
Abbildung 4-18	Komponentenmodell für energetisch relevante Baugruppen	71
Abbildung 4-19	Zeitliche Abhängigkeit der Fahrzeugmasse.....	74
Abbildung 4-20	Wirkungsgradverlauf für Verbrennungs- und Elektromotor	76
Abbildung 4-21	Energiespeichermodell	78
Abbildung 4-22	Vergleich der Simulationsergebnisse des Fahrzeugmodell für NEFZ und Baltimore Parcel Delivery Cycle	83
Abbildung 4-23	Datenbankstruktur FeVER-Data Explorer.....	85
Abbildung 4-24	Anzahl der Zustellgebiete für verschiedene Zustellwahrscheinlichkeiten und Fahrzeugkapazitäten (Gemeinde Putzbrunn).....	86
Abbildung 4-25	Mittlere Fahrzeugauslastung bei unterschiedlichen Zustellwahrscheinlichkeiten und Fahrzeugkapazitäten (Gemeinde Putzbrunn).....	87
Abbildung 4-26	Beispiel für Zustellgebiete in der Gemeinde Putzbrunn (Fahrzeugkapazität 200 Belieferungen)	88
Abbildung 4-27	Entwicklung der mittleren Anzahl an Fahrzeugstopps, belieferten Gebäuden und belieferten Haushalte über der Zustellwahrscheinlichkeit (Werte pro Fahrzeug, Fahrzeugkapazität 150 Belieferungen, Putzbrunn).....	89
Abbildung 4-28	Entwicklung der mittleren Anzahl an Belieferungen pro Fahrzeugstopp, Belieferungen pro beliefertem Gebäude und belieferte Gebäude pro Fahrzeugstopp (Putzbrunn).....	90
Abbildung 4-29	Mittlere Gesamtanzahlen an Belieferungen, belieferten Gebäuden und Fahrzeugstopps.....	91
Abbildung 4-30	Konvergenz von Mittelwert und Standardabweichung für eine Zustellwahrscheinlichkeit von 20% (Konfidenzniveau 95 %, Streckensegment Belieferung)	92

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-31	Mittlere Streckenlängen einer Zustelltour bei unterschiedlichen Zustellwahrscheinlichkeiten und Fahrzeugkapazitäten	94
Abbildung 4-32	Konvergenz der Monte Carlo Simulation zur Bestimmung des spezifischen Endenergiebedarfs (Zustellwahrscheinlichkeit 20 %, Fahrzeug FEV150C, gesamte Liefertour)	95
Abbildung 4-33	Entwicklung des spezifischen Endenergiebedarfs über der Zustellwahrscheinlichkeit (Fahrzeug: FEV150C).....	97
Abbildung 4-34	Endenergiebedarf der Zustellfahrzeuge in Putzbrunn bei einer Fahrzeugkapazität von 200 Belieferungen (gesamte Liefertour)	98
Abbildung 4-35	Mittlere CO ₂ -Emissionen der Zustellfahrzeuge bei einer Fahrzeugkapazität von 200 Belieferungen (gesamte Liefertour)	99
Abbildung 5-1	Methodik der Potentialanalysen	101
Abbildung 5-2	Endenergiebedarf im Streckensegment Belieferung für ein Fahrzeug und die gesamte Untersuchungsregion (Putzbrunn, Fahrzeugkapazität 200 Belieferungen)	104
Abbildung 5-3	Entwicklung der spezifischen CO ₂ -Emissionen des deutschen Strommix im Zeitraum von 1990 bis 2017 [145].....	106
Abbildung 5-4	Histogramm der stündlichen CO ₂ -Emissionsfaktoren des deutschen Strommix im Jahr 2016	107
Abbildung 5-5	CO ₂ -Emissionsfaktoren des deutschen Strommix für verschiedene Ladezeiträume im Jahr 2016	108
Abbildung 5-6	Übersichtskarte Untersuchungsregionen (Kartenmaterial [101]).....	109
Abbildung 5-7	Stadtbezirksteil Haidhausen Süd (Kartenmaterial [101])	111
Abbildung 5-8	Gemeinde Putzbrunn (Kartenmaterial [101])	112
Abbildung 5-9	Gemeinde Aying (Kartenmaterial [101])	113
Abbildung 5-10	Entwicklung der jährlichen Sendungsmenge von Kurier-, Express- und Paketdienstleistern von 2009 bis 2017 nach Marktsegmenten (Daten aus [159–163])	114
Abbildung 5-11	Standorte der Fahrzeugdepots (Kartenmaterial [101]).....	114
Abbildung 5-12	Adresszustellung von Sendungen	115
Abbildung 5-13	Berechnete und interpolierte Zustellwahrscheinlichkeit für Paketsendungen in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2025	115
Abbildung 5-14	Trendfortschreibung der spezifischen Kohlenstoffdioxidemissionen des deutschen Strommix	116
Abbildung 5-15	Täglicher Endenergiebedarf bei der Zustellung von Paketen in den verschiedenen Untersuchungsregionen (FEV200P)	117
Abbildung 5-16	Absolute jährliche Endenergieeinsparungen durch den Einsatz von Fahrzeugen des Typs FEV200P im Vergleich zum ICEFV200 (Hochrechnung)	118
Abbildung 5-17	Tägliche CO ₂ -Emissionen für die Belieferung der Untersuchungsregionen mit Fahrzeugen des Typs FEV200P	120
Abbildung 5-18	Spezifische CO ₂ -Emissionen für die Belieferung eines Haushalts mit Fahrzeugen des Typs FEV200P.....	121
Abbildung 5-19	Zusammensetzung des täglichen Endenergiebedarfs für Aying (Ay), Putzbrunn (Pu) und Haidhausen Süd (Ha), Fahrzeug FEV200P.....	123
Abbildung 5-20	Zusammensetzung des täglichen Endenergiebedarfs bei unterschiedlichen Depotstandorten (Putzbrunn, Fahrzeug FEV200P)	124
Abbildung 5-21	Prozentuale Veränderung des Endenergiebedarfs beim Einsatz von verschiedenen Elektrofahrzeugen im Vergleich zum FEV200P	125
Abbildung 5-22	Absolute Veränderung der jährlichen Kohlenstoffdioxidemissionen beim Einsatz von verschiedenen Elektrofahrzeugen im Vergleich zum FEV200P	125
Abbildung 5-23	Jährliche Endenergieeinsparungen durch Einsatz von Elektrofahrzeugen anstelle von ICEFV150	126
Abbildung 5-24	Jährlich vermiedene Kohlenstoffdioxidemissionen durch Einsatz von Elektrofahrzeugen anstelle von ICEFV200	126
Abbildung 5-25	Konsolidierung von Logistikdienstleistern.....	127
Abbildung 5-26	Endenergiebedarf pro Liefertag für die Adresszustellung von Paketen in Putzbrunn bei unterschiedlichen Zustellkonfigurationen (Fahrzeug: FEV200P)	128
Abbildung 5-27	Jährliche CO ₂ -Emissionen für die Adresszustellung von Paketen in Putzbrunn bei unterschiedlichen Zustellkonfigurationen (Fahrzeug: FEV200P)	129
Abbildung 5-28	Jährlicher Endenergiebedarf für die Adresszustellung von Paketen durch mehrere Logistikdienstleister (Fahrzeug: FEV250C)	129
Abbildung 5-29	Jährliche Kohlenstoffdioxidemissionen für die Adresszustellung von Paketen durch mehrere Logistikdienstleister (Fahrzeug: FEV150C)	130
Abbildung 5-30	Zusammensetzung des Ladestroms aus verschiedenen Energieträgern (Strommix Deutschland Jahr 2016, Mittelwerte über alle Tage).....	131
Abbildung 5-31	Zusammensetzung und Ausprägung der jährlichen CO ₂ -Emissionen bei unterschiedlichen Ladezeitpunkten (Fahrzeug FEV200P, Zustellwahrscheinlichkeit 10%, Emissionen Strommix Deutschland Jahr 2016).....	132

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-32	Zustellung in Schließfächer.....	133
Abbildung 5-33	Relative Endenergieeinsparungen in Abhängigkeit der PKW-Nutzung für Abholfahrten (Referenz: Adresszustellung mit ICEFV200, Zustellwahrscheinlichkeit 15 %, Elektrofahrzeug FEV200P)	135
Abbildung 5-34	Spezifische Kohlenstoffdioxidemissionen der Schließfachzustellung in Abhängigkeit des Anteils der PKW-Nutzung der Kunden für Abholfahrten (Zustellwahrscheinlichkeit 15 %, Elektrofahrzeug FEV200P)	137
Abbildung 5-35	Lebensmittellieferungen von Supermärkten	138
Abbildung 5-36	Modal Split für Einkaufsfahrten in Abhängigkeit der Gemeindegröße (Daten aus [166]).....	139
Abbildung 5-37	Endenergieverbrauch der Einkaufsfahrten von Kunden bei unterschiedlichen Zustellwahrscheinlichkeiten	141
Abbildung 5-38	Endenergiebedarf für die Belieferung von Haidhausen Süd und Putzbrunn mit Lebensmitteln (Fahrzeuge FEV200P)	141
Abbildung 5-39	Potential zur Endenergieeinsparung durch Lebensmittellieferung (verbrennungsmotorische Kundenfahrzeuge, Anteile Privatfahrzeugnutzung gemäß Modal Split).....	142
Abbildung 5-40	Sensitivität der Endenergieeinsparungen auf spezifischen Endenergiebedarf der Kundenfahrzeuge (Zustellung mit FEV200P, Zustellwahrscheinlichkeit 10 %).....	143
Abbildung 5-41	Sensitivität der Endenergieeinsparungen auf mittlere Verkehrsweite von Einkaufsfahrten (Haidhausen Süd, Zustellwahrscheinlichkeit 10 %, Anteil der PKW-Nutzung für Einkaufsfahrten 46,5 %).....	144
Abbildung 5-42	Potential zur CO ₂ -Einsparung durch Lebensmittellieferung (verbrennungsmotorische Kundenfahrzeuge, Anteile Privatfahrzeugnutzung gemäß Modal Split, Emissionsfaktor Ladestrommix Jahresmittelwert 2017).....	145
Abbildung 5-43	Sensitivität der relativen CO ₂ -Einsparungen auf Veränderung des Emissionsfaktors des Ladestrommix (Haidhausen Süd, Zustellwahrscheinlichkeit 10 %, Anteil der PKW-Nutzung für Einkaufsfahrten 46,5 %).....	146

C Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Marktsegmente der Distributionslogistik.....	7
Tabelle 2-2	Beispiele für verschiedene Disziplinen in der City-Logistik	7
Tabelle 3-1	Zuordnung von Laderaumvolumen zu Fahrzeugkapazität.....	31
Tabelle 3-2	Nomenklatur für die definierten Zustellfahrzeuge	32
Tabelle 3-3	Parameter für Zustellfahrzeuge mit Kapazität von 150 Belieferungen	33
Tabelle 3-4	Parameter für Zustellfahrzeuge mit Kapazität von 200 Belieferungen	33
Tabelle 3-5	Parameter für Zustellfahrzeuge mit Kapazität von 250 Belieferungen	33
Tabelle 3-6	z-Werte der Standardnormalverteilung für unterschiedliche Konfidenzniveaus.....	39
Tabelle 3-7	Beispielsergebnisse für die Berechnung von π mit Hit and Miss	44
Tabelle 4-1	Beispiele für Ausprägungen des Vehicle Routing Problems [127]	59
Tabelle 4-2	Lösungsverfahren für TSP [126] [127].....	60
Tabelle 4-3	Parameter für die Fahrprofilsynthese	67
Tabelle 4-4	Geschwindigkeitsbegrenzungen für verschieden Straßentypen	68
Tabelle 4-5	Stützstellen für die Berechnung des Wirkungsgrads von Verbrennungs- und Elektromotoren [139].....	75
Tabelle 4-6	Verwendete Wirkungsgrade.....	80
Tabelle 4-7	Simulationsergebnisse des Fahrzeugmodells	81
Tabelle 4-8	Vergleich der mittleren Sendungsmengen für eine Fahrzeugkapazität von 150 Belieferungen.....	90
Tabelle 4-9	Ergebnisse der Monte Carlo Simulation für eine Fahrzeugkapazität von 200 Belieferungen bei einem Konfidenzniveau von 95 %.....	93
Tabelle 5-1	Szenarienüberblick	102
Tabelle 5-2	Vergleich der berechneten Emissionsfaktoren	107
Tabelle 5-3	Statistische Daten der gewählten Untersuchungsregionen.....	110
Tabelle 5-4	Endenergiebedarf und Energieeinsparungen für die Zustellung von Sendungen in Aying (Ay), Haidhausen Süd (Ha) und Putzbrunn (Pu) mit Fahrzeugen ICEFV200 und FEV200P in den einzelnen Untersuchungsjahren	119
Tabelle 5-5	Jährliche CO ₂ -Emissionen und Einsparungen bei Belieferung mit FEV200P und ICEFV200 in Aying (Ay), Haidhausen Süd (Ha) und Putzbrunn (Pu).....	121
Tabelle 5-6	Jährliche CO ₂ -Emissionen und Einsparungen in Putzbrunn in Abhängigkeit des Depotstandorts bei der Belieferung mit FEV200P	123
Tabelle 5-7	Maximale Anteile der PKW-Nutzung von Kunden zur Sendungsabholung für Erreichung von Endenergieeinsparung beim Einsatz von Elektrofahrzeugen (Zustellwahrscheinlichkeit 10 %).....	136
Tabelle 5-8	Gesamtwegstrecken der Kunden für Einkaufsfahrten nach Verkehrsträgern	140
Tabelle 5-9	Relative CO ₂ -Einsparung bei verschiedenen Zustellfahrzeugen und Kundenfahrzeugflotten (Anteil der PKW-Nutzung für Einkaufsfahrten 46,5 %).....	147

D Literaturverzeichnis

- [1] World Meteorological Organization (WMO): *The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2017*, WMO Greenhouse Gas Bulletin, 2018, Jg. 14.
- [2] World Meteorological Organization (WMO): *Greenhouse gas levels in atmosphere reach new record*. Pressemitteilung, verfügbar unter: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/greenhouse-gas-levels-atmosphere-reach-new-record>, abgerufen am 23.11.2018.
- [3] United Nations Framework Convention on Climate Change (FCCC): *Adoption of the Paris Agreement: Conference of the Parties*, 2015.
- [4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hg.): *Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*.
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.): *Energieeffizienz in Zahlen*, Berlin, 2017.
- [6] A. Kemmler, S. Straßburg, F. Seefeldt, N. Anders, C. Rohde, T. Fleiter, A. Aydemir, H. Kleeberger, L. Hardi und B. Geiger: *Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 – 2014: Endbericht*, Climate Change 01/2017, Dessau, Berlin, 2017.
- [7] B. Schlomann, K. Wolfarth, H. Kleeberger, L. Hardi, B. Geiger, A. Pich, E. Gruber, A. Gerspacher, E. Holländer und A. Roser: *Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013: Schlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)*, Karlsruhe, München, Nürnberg, 2015.
- [8] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.): *Energiedaten: Gesamtausgabe, Stand: August 2018*, 2018.
- [9] F. Hülsmann, M. Mottschall, F. Hacker und P. Kasten: *Working Paper: Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen - Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050*, Öko-Institut Working Paper 3/2014, 2014.
- [10] L. Ranieri, S. Digiesi, B. Silvestri und M. Roccotelli: *A Review of Last Mile Logistics Innovations in an Externalities Cost Reduction Vision, Sustainability*, 2018, Jg. 10, Nr. 3, S. 782, DOI: 10.3390/su10030782.
- [11] Statistisches Bundesamt (Hg.): *Wirtschaftsrechnungen: Private Haushalte in der Informationsgesellschaft - Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien*, Wiesbaden, 2017.
- [12] K. Esser und J. Kurte: *KEP-Studie 2018: Analyse des Marktes in Deutschland*, Bundesverband Internationaler Express- und Kurierdienste e.V. (BIEK), 2018.
- [13] H. Deecke, C. Kille, H. Manner-Romberg, J. Miller, U. Müller-Steinfahrt und W. Symanczyk: *Marktuntersuchung und Entwicklungstrends von Kurier-, Express- und Paketdienstleistungen 2015: Gutachten*, Institut für angewandte Logistik (IAL), MRU GmbH, August 2015.
- [14] R. Gevaers, E. van de Voorde und T. Vanelslander: *Cost Modelling and Simulation of Last-mile Characteristics in an Innovative B2C Supply Chain Environment with Implications on Urban Areas and Cities*, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2014, Jg. 125, S. 398–411, DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.01.1483.
- [15] A. Kampker: *CO2-freie Zustellung: Perspektive Elektromobilität bei der Deutschen Post AG*. Vortrag, Berlin, 04.05.15.
- [16] Bundesvereinigung Logistik: *Logistik*. [Online], verfügbar unter: <https://www.bvl.de/service/zahlen-daten-fakten/logistikbereiche/logistik>, abgerufen am 12.02.2019.
- [17] M. ten Hompel und V. Heidenblut (Hg.): *Taschenlexikon Logistik: Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [18] Bundesvereinigung Logistik: *Das ist Logistik*. [Online], verfügbar unter: <https://www.bvl.de/service/zahlen-daten-fakten/logistikdefinitionen>, abgerufen am 12.02.2019.
- [19] H. Baumgarten (Hg.): *Das Beste der Logistik: Innovationen, Strategien, Umsetzungen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [20] H.-C. Pfohl: *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*, 9. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018.
- [21] W.-R. Bretzke: *Logistische Netzwerke*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015.
- [22] A. C. McKinnon, M. Browne, M. Piecyk und A. E. Whiteing (Hg.): *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics*, 3. Aufl. London: Kogan Page, 2015.
- [23] O. Seroka-Stolka: *The Development of Green Logistics for Implementation Sustainable Development Strategy in Companies*, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2014, Jg. 151, S. 302–309, DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.10.028.

- [24] J.-P. Rodrigue, B. Slack und C. Comtois: *The Paradoxes of Green Logistics in Handbooks in transport*, Bd. 2, *Handbook of logistics and supply-chain management*, A. Brewer, K. Button und D. A. Hensher, Hg., 1st ed., Amsterdam, New York: Pergamon, 2001.
- [25] A. Sbihi und R. W. Eglese: *Combinatorial optimization and Green Logistics*, *4OR*, 2007, Jg. 5, Nr. 2, S. 99–116, DOI: 10.1007/s10288-007-0047-3.
- [26] E. E. Blanco und Y. Sheffi: *Green Logistics in Springer Series in Supply Chain Management*, Bd. 4, *Sustainable Supply Chains: A Research-Based Textbook on Operations and Strategy*, Y. Bouchery, C. J. Corbett, J. C. Fransoo und T. Tan, Hg., Cham, s.l.: Springer International Publishing, 2017.
- [27] M. Savelsbergh und T. van Woensel: *City Logistics: Challenges and Opportunities*, *Transportation Science*, 2016, Jg. 50, Nr. 2, S. 579–590, DOI: 10.1287/trsc.2016.0675.
- [28] C. C. Berg (Hg.): *City-Logistik: Das Münchner Modell*, Institut für Logistik und Verkehrsmanagement, Ottobrunn, Verkehr und Logistik, 2000.
- [29] Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD): *Delivering the Goods: 21st Century Challenges to Urban Goods Transport*.
- [30] W. Lehmacher: *Logistik im Zeichen der Urbanisierung: Versorgung von Stadt und Land im digitalen und mobilen Zeitalter*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2015.
- [31] M. Slabinac: *Innovative Solutions for a "Last Mile" Delivery - a European Experience*, *15th International Scientific Conference Business Logistics in Modern Management*, 2015.
- [32] R. Bogdanski: *Nachhaltigkeitsstudie 2017: Innovationen auf der letzten Meile - Bewertung der Chancen für die Stadtlogistik von morgen*, Bundesverband Internationaler Express- und Kurierdienste e.V. (BIEK), Berlin, März 2017.
- [33] K. Incekara: *Analyse der Eignung von Elektromobilität in Logistikketten des Online-Handels*. Bachelorarbeit (unveröffentlicht), Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, München, 2015.
- [34] H. Wildemann: *E-Mobility bei Logistikdienstleistern: Potenziale, Erfolgsfaktoren und Entscheidungshilfen für den Einsatz von E-Mobility bei mittelständischen Logistikdienstleistern*, 1. Aufl. München: TCW Transfer-Centrum, 2015.
- [35] R. Bogdanski: *Nachhaltige Stadtlogistik durch Kurier-, Express- und Paketdienste*, Bundesverband Internationaler Express- und Kurierdienste e.V. (BIEK), 2017.
- [36] R. A. López und J. V. C. Ferrándiz: *Analysis of the Logistics of Home Delivery of Food and Household Goods. Implementation in Consum in the Valencia Area. Proposals for Improvement.*, *Transportation Research Procedia*, 2016, Jg. 18, S. 189–196, DOI: 10.1016/j.trpro.2016.12.026.
- [37] E. Morganti, S. Seidel, C. Blanquart, L. Dablanç und B. Lenz: *The Impact of E-commerce on Final Deliveries: Alternative Parcel Delivery Services in France and Germany*, *Transportation Research Procedia*, 2014, Jg. 4, S. 178–190, DOI: 10.1016/j.trpro.2014.11.014.
- [38] Deutsche Post DHL Group: *Hilfe zur Kofferraumzustellung*. [Online], verfügbar unter: <https://www.dhl.de/de/privatkunden/hilfe-kundenservice/empfangen-abholort/kofferraumzustellung.html>, abgerufen am 12.02.2019.
- [39] J. Lin, W. Zhou und L. Du: *Is on-demand same day package delivery green?*, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, DOI: 10.1016/j.trd.2017.06.016.
- [40] F. Salehi, F. Klötzke und L. Ryssel: *Von B2C zu B2B durch alternative Zustelloptionen: Aktuelle Herausforderungen für Paketdienstleister im B2C-Segment*, ATKearney, 2012.
- [41] S. Iwan, K. Kijewska und J. Lemke: *Analysis of Parcel Lockers' Efficiency as the Last Mile Delivery Solution – The Results of the Research in Poland*, *Transportation Research Procedia*, 2016, Jg. 12, S. 644–655, DOI: 10.1016/j.trpro.2016.02.018.
- [42] H. Manner-Romberg, W. Symanczyk und J. Miller: *Die Individualisierung der Lieferung: Wie neue Konzepte den E-Commerce verändern*, MRU GmbH, August 2016.
- [43] Deutsche Post DHL Group: *Einbindung des DHL-Paketkopters in die Logistikkette erfolgreich getestet*. Pressemitteilung, verfügbar unter: <https://www.dpdhl.com/de/presse/pressemitteilungen/2016/einbindung-dhl-paketkopter-logistikkette-erfolgreich-getestet.html>, abgerufen am 12.02.2019.
- [44] Amazon.com Inc.: *First Prime Air Delivery: December 7, 2016 Fully Autonomous - No Human Pilot 13 Minutes - Click to Delivery*. [Online], verfügbar unter: <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>, abgerufen am 12.02.2019.
- [45] Hermes Germany GmbH: *Hermes testet Lieferroboter von Starship*. [Online], verfügbar unter: <https://newsroom.hermesworld.com/starship/>, abgerufen am 12.02.2019.
- [46] Hermes Germany GmbH: *Starship-Roboter liefern Pakete für Hermes in Hamburg aus*. Pressemitteilung, verfügbar unter: <https://newsroom.hermesworld.com/pilottest-an-drei-paketshops-starship-roboter-liefere-pakete-fuer-hermes-in-hamburg-aus-10724/>, abgerufen am 12.02.2019.

- [47] Starship: *Internetauftritt*. [Online], verfügbar unter: <https://www.starship.xyz/>, abgerufen am 12.02.2019.
- [48] T. Hoffmann und G. Prause: *On the Regulatory Framework for Last-Mile Delivery Robots*, *Machines*, 2018, Jg. 6, Nr. 3, S. 33, DOI: 10.3390/machines6030033.
- [49] Packadoo: *Internetauftritt*. [Online], verfügbar unter: <https://www.pakadoo.de/>, abgerufen am 12.02.2019.
- [50] M. Moroz und Z. Polkowski: *The Last Mile Issue and Urban Logistics: Choosing Parcel Machines in the Context of the Ecological Attitudes of the Y Generation Consumers Purchasing Online*, *Transportation Research Procedia*, 2016, Jg. 16, S. 378–393, DOI: 10.1016/j.trpro.2016.11.036.
- [51] Z. Xiao, J. J. Wang, J. Lenzer und Y. Sun: *Understanding the diversity of final delivery solutions for online retailing: A case of Shenzhen, China*, *Transportation Research Procedia*, 2017, Jg. 25, S. 985–998, DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.473.
- [52] A. Devari, A. G. Nikolaev und Q. He: *Crowdsourcing the last mile delivery of online orders by exploiting the social networks of retail store customers*, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, Jg. 105, S. 105–122, DOI: 10.1016/j.tre.2017.06.011.
- [53] K. K. Boyer, A. M. Prud'homme und W. Chung: *The Last Mile Challenge: Evaluating the Effects of Customer Density and Delivery Window Patterns*, *Journal of Business Logistics*, 2009, Jg. 30, Nr. 1, S. 185–201, DOI: 10.1002/j.2158-1592.2009.tb00104.x.
- [54] N. Birger, Welt.de: *Warum UPS-Fahrer fast nur noch rechts abbiegen*. Pressemitteilung, verfügbar unter: <https://www.welt.de/wirtschaft/article161916731/Warum-UPS-Fahrer-fast-nur-noch-rechts-abbiegen.html>, abgerufen am 12.02.2019.
- [55] B. Schwan, Technology Review: *Wo Fahrer immer nur rechts abbiegen*. Pressemitteilung, verfügbar unter: <https://www.heise.de/tr/artikel/Wo-Fahrer-immer-nur-rechts-abbiegen-982543.html>.
- [56] H. Pålsson, F. Pettersson und L. Winslott Hiselius: *Energy consumption in e-commerce versus conventional trade channels - Insights into packaging, the last mile, unsold products and product returns*, *Journal of Cleaner Production*, 2017, Jg. 164, S. 765–778, DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.242.
- [57] P. Erdmann: *Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258*, Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. (DSLTV), 2013.
- [58] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.): *Verkehr in Zahlen 2017/2018: 46. Jahrgang*, Berlin, 2017.
- [59] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU): *Klimaschutz in Zahlen (2018) – Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik*, 2018.
- [60] C. Pronello, C. Camusso und R. Valentina: *Last mile freight distribution and transport operators' needs: Which targets and challenges?*, *Transportation Research Procedia*, 2017, Jg. 25, S. 888–899, DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.464.
- [61] A. D. Jovanović, D. S. Pamučar und S. Pejić-Tarle: *Green vehicle routing in urban zones – A neuro-fuzzy approach*, *Expert Systems with Applications*, 2014, Jg. 41, Nr. 7, S. 3189–3203, DOI: 10.1016/j.eswa.2013.11.015.
- [62] T. Bektaş und G. Laporte: *The Pollution-Routing Problem*, *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, Jg. 45, Nr. 8, S. 1232–1250, DOI: 10.1016/j.trb.2011.02.004.
- [63] J. R. Brown und A. L. Guifrida: *Carbon emissions comparison of last mile delivery versus customer pickup*, *International Journal of Logistics Research and Applications*, 2014, Jg. 17, Nr. 6, S. 503–521, DOI: 10.1080/13675567.2014.907397.
- [64] A. Juan, C. Mendez, J. Faulin, J. de Armas und S. Grasman: *Electric Vehicles in Logistics and Transportation: A Survey on Emerging Environmental, Strategic, and Operational Challenges*, *Energies*, 2016, Jg. 9, Nr. 2, S. 86, DOI: 10.3390/en9020086.
- [65] S. Pelletier, O. Jabali und G. Laporte: *Goods Distribution with Electric Vehicles: Review and Research Perspectives*, *Transportation Science*, 2016, Jg. 50, Nr. 1, S. 3–22, DOI: 10.1287/trsc.2015.0646.
- [66] S. Melo, P. Baptista und Á. Costa: *Comparing the Use of Small Sized Electric Vehicles with Diesel Vans on City Logistics*, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2014, Jg. 111, S. 1265–1274, DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.01.728.
- [67] G. Perboli, M. Rosano und L. Gobbato: *Parcel Delivery in Urban Areas: Opportunities and Threats for the Mix of Traditional and Green Business Models*, CIRRELT, CIRRELT-2017-02, 2017.
- [68] B. Kin, T. Ambra, S. Verlinde und C. Macharis: *Tackling Fragmented Last Mile Deliveries to Nanostores by Utilizing Spare Transportation Capacity—A Simulation Study*, *Sustainability*, 2018, Jg. 10, Nr. 3, S. 653, DOI: 10.3390/su10030653.
- [69] R. Chatterjee, C. Greulich und S. Edelkamp: *Optimizing Last Mile Delivery Using Public Transport with Multi-Agent Based Control* in *Proceedings of the 2016 IEEE 41st Conference on Local Computer Workshop*, S. 205–212.

- [70] E. Wygonik und A. V. Goodchild: *Urban form and last-mile goods movement: Factors affecting vehicle miles travelled and emissions*, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, Jg. 61, S. 217–229, DOI: 10.1016/j.trd.2016.09.015.
- [71] C. Tipagornwong und M. Figliozzi: *Analysis of Competitiveness of Freight Tricycle Delivery Services in Urban Areas*, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2014, Jg. 2410, S. 76–84, DOI: 10.3141/2410-09.
- [72] J. R. Brown und A. L. Guifrida: *Stochastic Modeling of the Last Mile Problem for Delivery Fleet Planning in Journal of the Transportation Research Forum*, S. 93–108.
- [73] H. Tschöke (Hg.): *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Basiswissen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015.
- [74] W. Mauch: *Kumulierter Energieaufwand für Güter und Dienstleistungen - Basis für Ökobilanzen*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 1993, 1. Aufl. Herrsching: E & M Energie-und-Management-Verl.-Ges, 1993.
- [75] Allgemeiner Deutscher Automobilclub: *Entwicklung der Tankstellenanzahl seit 1965 in Deutschland*. [Online], verfügbar unter: <https://www.adac.de/infotestrat/tanken-kraftstoffe-und-antrieb/probleme-tankstelle/anzahl-tankstellen-markenverteilung/default.aspx>, abgerufen am 12.02.2019.
- [76] R. van Basshuysen und F. Schäfer (Hg.): *Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*, 8. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [77] U. Wagner, W. Mauch, M. Dronia, T. Estermann, S. Fischhaber, S. Fattler und F. Böing: *Faktencheck zur Elektromobilität und Marktprämie*, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 2016, Jg. 66, Nr. 9, S. 77–80.
- [78] H. Wallentowitz und A. Freialdenhoven: *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen*, 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011.
- [79] Braess, Hans-Hermann, Seiffert, Ulrich (Hg.): *Viewig Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, 7. Aufl.
- [80] G. Berckmans, M. Messagie, J. Smekens, N. Omar, L. Vanhaverbeke und J. Van Mierlo: *Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030*, *Energies*, 2017, Jg. 10, Nr. 9, S. 1314, DOI: 10.3390/en10091314.
- [81] Logistik Heute: *KEP: DHL startet kohlendioxidfreie Zustellung in München*. Pressemitteilung, verfügbar unter: <https://www.logistik-heute.de/Logistik-News-Logistik-Nachrichten/Markt-News/16966/StreetScooter-nun-auch-in-der-bayerischen-Landeshauptstadt-KEP-DHL-startet-k>, abgerufen am 12.02.2019.
- [82] J. Wechselberger: *Technischer und wirtschaftlicher Vergleich verschiedener Ladekonzepte für Elektrofahrzeuge*. Bachelorarbeit (unveröffentlicht), Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, München, 2016.
- [83] S. Faber: *Energy Economic Analysis of Different Delivery Concepts on the Last Mile in Combination with Electric Vehicles*. Masterarbeit (unveröffentlicht), Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, München, 2018.
- [84] P. Riffner: *Technische und energetische Analyse von Hybridelektrofahrzeugen*. Bachelorarbeit (unveröffentlicht), Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, München, 2016.
- [85] United Parcel Service: *The Road to 1 Billion Miles in UPS's Alternative Fuel and Advanced Technology Vehicles*, 2014.
- [86] J. Sutter: *Technische und wirtschaftliche Eignung von PEM-Brennstoffzellen in elektrischen Straßenfahrzeugen*. Bachelorarbeit (unveröffentlicht), Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, München, 2016.
- [87] F. Nieß, eurotransport: *Eurotransport - Bis 2020 dreistellige Stückzahl: Streetscooter baut Work L mit Brennstoffzelle*. Pressemitteilung, verfügbar unter: <https://www.eurotransport.de/artikel/streetscooter-baut-work-l-mit-brennstoffzelle-bis-2020-dreistellige-stueckzahl-10187401.html>, abgerufen am 18.11.2018.
- [88] City2Share: *Modellquartiere für nachhaltige urbane Elektromobilität in München & Hamburg: Arbeitsschwerpunkt "e-Logistik"*. [Online], verfügbar unter: <http://www.city2share.de/>.
- [89] A. Steland: *Basiswissen Statistik: Kompaktkurs für Anwender aus Wirtschaft, Informatik und Technik*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- [90] C. Graham und D. Talay: *Stochastic Simulation and Monte Carlo Methods: Mathematical Foundations of Stochastic Simulation*. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [91] A. B. Owen: *Monte Carlo theory, methods and examples*, Stanford University, Stanford, CA, USA, 2013. [Online], verfügbar unter: <http://statweb.stanford.edu/~owen/mc/>.
- [92] O. Forst: *Grundlagen der Monte-Carlo-Methode: Probieren geht über studieren*, Institut für experimentelle Kernphysik, Karlsruher Institut für Technologie, 2009.
- [93] P. Glasserman: *Monte Carlo methods in financial engineering*. New York, NY: Springer, 2008.

- [94] Technische Universität Clausthal - Fakultät für Mathematik: *Monte Carlo Integration*. [Online], verfügbar unter: <https://www.mathematik.tu-clausthal.de/interaktiv/integration/montecarlo/>.
- [95] C. Hofstadler und M. Kummer: *Chancen- und Risikomanagement in der Bauwirtschaft: Für Auftraggeber und Auftragnehmer in Projektmanagement, Baubetrieb und Bauwirtschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017.
- [96] T. Werth: *Netzberechnung mit Erzeugungsprofilen: Grundlagen, Berechnung, Anwendung*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [97] M. Blesl, S. Wissel und U. Fahl: *Stromerzeugung 2030 - mit welchen Kosten ist zu rechnen, Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 2012, Jg. 62, Nr. 10, S. 21–27.
- [98] M. Tschurtschenthaler und D. Koch: *Anwendung der Monte-Carlo-Simulation als Entscheidungsmodell für kommunale Energiekonzepte*. Vortrag, Graz / Österreich, 14.02.14.
- [99] M. Masnitza: *Analyse der Verfügbarkeit einer Elektrofahrzeugflotte mit bidirektionaler Lademöglichkeit zur Präqualifikation am Regelenergiemarkt*. Masterarbeit (unveröffentlicht), Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, München, 2017.
- [100] A. Grama: *Introduction to parallel computing*, 2. Aufl. Harlow: Pearson, 2011.
- [101] OpenStreetMap: *OpenStreetMap Daten © OpenStreetMap-Mitwirkende: Open Database License ODbL / Kartografie lizenziert gemäß CC BY-SA*. [Online], verfügbar unter: www.openstreetmap.org/copyright, abgerufen am 13.02.2019.
- [102] J. Jokar Arsanjani: *OpenStreetMap in GIScience: Experiences, research and applications*. Cham: Springer, 2015.
- [103] OpenStreetMap Contributors: *OpenStreetMap*. [Online], verfügbar unter: <https://www.openstreetmap.org/>.
- [104] OpenStreetMap Wiki: *Overpass API*. [Online], verfügbar unter: http://wiki.openstreetmap.org/w/index.php?title=Overpass_API&oldid=1550975, abgerufen am 13.02.2019.
- [105] OpenStreetMap Wiki: *Nominatim*. [Online], verfügbar unter: <http://wiki.openstreetmap.org/w/index.php?title=Nominatim&oldid=1564747>, abgerufen am 13.02.2019.
- [106] Forschungsstelle für Energiewirtschaft: *FREM - Regionalisiertes Energiesystemmodell*. [Online], verfügbar unter: <https://www.ffe.de/themen-und-methoden/modelle-und-tools/716-frem-regionalisiertes-energiesystemmodell>, abgerufen am 13.02.2019.
- [107] Chair of Business Information Systems, Department of Informatics, Technical University of Munich: *OpenGrid-Map*. [Online], verfügbar unter: <http://opengridmap.com/>, abgerufen am 13.02.2019.
- [108] OpenStreetMap Wiki: *Node*. [Online], verfügbar unter: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Node>, abgerufen am 13.02.2019.
- [109] OpenStreetMap Wiki: *Way*. [Online], verfügbar unter: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Way>, abgerufen am 13.02.2019.
- [110] OpenStreetMap Wiki: *Relation*. [Online], verfügbar unter: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Relation>, abgerufen am 13.02.2019.
- [111] OpenStreetMap Wiki: *DE:Key:building*. [Online], verfügbar unter: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Key:building>, abgerufen am 13.02.2019.
- [112] OpenStreetMap Wiki: *DE:Key:highway*. [Online], verfügbar unter: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Key:highway>, abgerufen am 13.02.2019.
- [113] Professur für Geodäsie und Geoinformatik, Universität Rostock: *Geoinformatik Service: Geodätisches Datum*. [Online], verfügbar unter: <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/einzel.asp?ID=1677810537>, abgerufen am 13.02.2019.
- [114] A. Wolf: *Map-Based Driving Cycle Generation*. Diplomarbeit, Hybrid Electric Vehicles, Elektrotechnisches Institut (ETI) Hybridelektrische Fahrzeuge, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2015.
- [115] National Imagery and Mapping Agency (Hg.): *World Geodetic System 1984: Its Definition and Relationships to with Local Geodetic Systems*, 2000.
- [116] Geofabrik: *OpenStreetMap Data Extracts*. [Online], verfügbar unter: <https://download.geofabrik.de/>, abgerufen am 13.02.2019.
- [117] H. Vonhoegen: *Einstieg in XML*, 8. Aufl. Bonn: Rheinwerk, 2015.
- [118] OpenStreetMap Wiki: *OSM XML*. [Online], verfügbar unter: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/OSM_XML, abgerufen am 13.02.2019.
- [119] OpenStreetMap Wiki: *osmconvert*. [Online], verfügbar unter: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Osmconvert>, abgerufen am 13.02.2019.
- [120] A. A. Hagberg, D. A. Schult und P. J. Sawrt: *Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX in Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy2008)*, S. 11–15.

- [121] OpenStreetMap Wiki: *DE:Grenze*. [Online], verfügbar unter: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Grenze>, abgerufen am 13.02.2019.
- [122] S. Gillies: *Shapely: Manipulation and Analysis of Geometric Objects*. [Online], verfügbar unter: <https://github.com/Toblerity/Shapely>, abgerufen am 13.02.2019.
- [123] D. Arthur und S. Vassilvitskii: *k-means++: The Advantages of Careful Seeding*, 2006.
- [124] C. Piech: *K Means*. [Online], verfügbar unter: <http://stanford.edu/~cpiech/cs221/handouts/kmeans.html>, abgerufen am 13.02.2019.
- [125] ELKI Data Mining: *Same-size k-Means Variation*. [Online], verfügbar unter: https://elki-project.github.io/tutorial/same-size_k_means, abgerufen am 28.11.2018.
- [126] W. Domschke und A. Scholl: *Logistik: Rundreisen und Touren*, 5. Aufl., 2010.
- [127] C. Ohrt: *Tourenplanung im Straßengüterverkehr*. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008.
- [128] J. Rieck: *Tourenplanung mittelständischer Speditionsunternehmen: Modelle und Methoden*. Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2008, 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2009.
- [129] Google: *Optimization Tools*. [Online], verfügbar unter: <https://developers.google.com/optimization/>, abgerufen am 13.02.2019.
- [130] F.-A. Fortin, F.-M. De Rainville, M.-A. Gardner, M. Parizeau und C. Gagne: *DEAP: Evolutionary Algorithms Made Easy*, *Journal of Machine Learning Research*, 2012, Jg. 2012, 2171–2175.
- [131] M. Perry: *A python module for simulated annealing optimization*. [Online], verfügbar unter: <https://github.com/perrygeo/simanneal>, abgerufen am 13.02.2019.
- [132] P. Hart, N. Nilsson und B. Raphael: *A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths*, *IEEE Trans. Syst. Sci. Cyber.*, 1968, Jg. 4, Nr. 2, S. 100–107, DOI: 10.1109/TSSC.1968.300136.
- [133] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: *SUMO: Simulation of Urban MOBility*. [Online], verfügbar unter: <http://sumo.dlr.de>, abgerufen am 13.02.2019.
- [134] MATSim Community: *MATSim - Multi-Agent Transport Simulation*. [Online], verfügbar unter: <https://www.matsim.org/>, abgerufen am 13.02.2019.
- [135] C. Adam und G. Wanielik: *Map-based Driving Profile Simulation for Energy Consumption Estimation of Electric Vehicles* (eng), *2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2012)*, 2012.
- [136] H. Warpe: *An Analysis of EcoRouting Using a Variable Acceleration Rate Synthesis Model*. Masterarbeit, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2017.
- [137] K. Kelly, R. Prohaska, A. Ragatz und A. Konan: *NREL DriveCAT: Chassis Dynamometer Test Cycles*. [Online], verfügbar unter: <https://www.nrel.gov/transportation/drive-cycle-tool/>, abgerufen am 13.02.2019.
- [138] B. Heißing, M. Ersoy und S. Gies (Hg.): *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*, 4. Aufl., 2013.
- [139] A. Brooker, J. Gonder, L. Wang, E. Wood, S. Lopp und L. Ramroth: *FASTSim: A Model to Estimate Vehicle Efficiency, Cost and Performance*, *SAE International*, 2015, <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63623.pdf>; <https://www.nrel.gov/transportation/fastsim.html>, DOI: 10.4271/2015-01-0973.
- [140] Schaufenster Elektromobilität (Hg.): *Fragen rund um das Elektrofahrzeug: Wie kommen die Angaben über den Stromverbrauch und die Reichweite von Elektrofahrzeugen zustande?*
- [141] S. W. Ambler: *Agile database techniques: Effective strategies for the agile software developer*. Indianapolis: Wiley Pub, 2003.
- [142] SQLAlchemy: *SQLAlchemy: The Python SQL Toolkit and Object Relational Mapper*. [Online], verfügbar unter: <https://www.sqlalchemy.org/>, abgerufen am 13.02.2019.
- [143] Bundesrepublik Deutschland (Hg.): *Grundgesetz (GG) der Bundesrepublik Deutschland*, Mai 1949. [Online], verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/gg/art_10.html.
- [144] Deutsche Post AG: *E-Mobilität für alle: Jetzt auch für Ihr Geschäft*. Broschüre Streetscooter, Bonn, 2018.
- [145] Umweltbundesamt (Hg.): *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2017*, *Climate Change 11/2018*, Dessau, 2018.
- [146] Umweltbundesamt (Hg.): *CO2-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe*, *Climate Change 27/2016*, Dessau, 2016.
- [147] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.: *Basisdaten zur Bereitstellung elektrischer Energie*, München, 2011.
- [148] Agora Energiewende (Hg.): *Agorameter: Stromerzeugung und Stromverbrauch*. Datenexport für das Jahr 2016 zur wissenschaftlichen Verwendung, Berlin, 2017.

- [149] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (Hg.): *Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2016*, Berlin, 2017.
- [150] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (Hg.): *Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern*, Berlin, 2018.
- [151] Agora Energiewende (Hg.): *Agorameter: Dokumentation*, Berlin, 2017.
- [152] Landratsamt München (Hg.): *Auf einen Blick: Der Landkreis München in Grafiken & Zahlen*, München, 2016.
- [153] Gesellschaft für Konsumforschung (GfK) GeoMarketing GmbH: *Kaufkraft in Deutschland steigt 2017 um 1,7 Prozent*. Pressemitteilung, verfügbar unter: https://www.gfk.com/fileadmin/user_upload/dyna_content/DE/documents/Press_Releases/2016/20161206_PM_GfK-Kaufkraft-Deutschland-2017_dfin.pdf, abgerufen am 13.02.2019.
- [154] Landeshauptstadt München (Hg.): *Fläche, Gebäudebestand und Einwohner Stadtbezirksteil Haidhausen Süd*. Sonderauswertung zur wissenschaftlichen Verwendung, Statistisches Amt der Landeshauptstadt München, München, 2018.
- [155] Landratsamt München: *Daten und Fakten*. [Online], verfügbar unter: <https://www.landkreis-muenchen.de/landkreis/daten-und-fakten/>, abgerufen am 13.02.2019.
- [156] Planungsverband Äußerer Wirtschaftsraum München (Hg.): *Gemeinde Putzbrunn - Landkreis München: Gemeindedaten - Ausführliche Datengrundlagen 2016*, München, 2017.
- [157] Planungsverband Äußerer Wirtschaftsraum München (Hg.): *Gemeinde Aying - Landkreis München: Gemeindedaten - Ausführliche Datengrundlagen 2016*, München, 2017.
- [158] Landeshauptstadt München (Hg.): *Anzahl der Privathaushalte nach Stadtbezirksteilen für das Jahr 2016 und 2017*. Sonderauswertung zur wissenschaftlichen Verwendung, Statistisches Amt der Landeshauptstadt München, 2018.
- [159] K. Esser und J. Kurte: *KEP-Studie 2013: Motor für Wirtschaftswachstum und Beschäftigung*, Bundesverband Internationaler Express- und Kurierdienste e.V. (BIEK), Köln, 2013.
- [160] K. Esser und J. Kurte: *KEP-Studie 2014: Wirtschaftliche Bedeutung der KEP-Branche*, Bundesverband Internationaler Express- und Kurierdienste e.V. (BIEK), Köln, 2014.
- [161] K. Esser und J. Kurte: *KEP-Studie 2015: Innovativer Partner für Wirtschaft und Gesellschaft*, Bundesverband Internationaler Express- und Kurierdienste e.V. (BIEK), Köln, 2015.
- [162] K. Esser und J. Kurte: *KEP-Studie 2016: Wachstumsmarkt & Beschäftigungsmonitor*, Bundesverband Internationaler Express- und Kurierdienste e.V. (BIEK), Köln, 2016.
- [163] K. Esser und J. Kurte: *KEP-Studie 2017: Wachstum über Grenzen hinweg*, Bundesverband Internationaler Express- und Kurierdienste e.V. (BIEK), Köln, 2017.
- [164] K. Esser und J. Kurte: *KEP-Studie 2012: Wirtschaftliche Bedeutung der KEP-Branche*, Bundesverband Internationaler Express- und Kurierdienste e.V. (BIEK), Köln, Mai 2012.
- [165] Statistisches Bundesamt (Hg.): *Entwicklung der Privathaushalte bis 2035: Ergebnisse der Haushaltsvorausberechnung - 2017*, Wiesbaden, 2017.
- [166] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hg.): *Ohne Auto einkaufen: Nahversorgung und Nahmobilität in der Praxis*, Werkstatt: Praxis Heft 76, Berlin, 2011.
- [167] B. Durand und J. Gonzalez-Feliu: *Urban Logistics and E-Grocery: Have Proximity Delivery Services a Positive Impact on Shopping Trips?*, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2012, Jg. 39, S. 510–520, DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.03.126.
- [168] L. Hardi und U. Wagner: *Grocery Delivery or Customer Pickup—Influences on Energy Consumption and CO2 Emissions in Munich*, *Sustainability*, 2019, Jg. 11, Nr. 3, S. 641, DOI: 10.3390/su11030641.
- [169] H. Siikavirta, M. Punakivi, M. Kärkkäinen und L. Linnanen: *Effects of E-Commerce on Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Grocery Home Delivery in Finland*, *Journal of Industrial Ecology*, 2002, Jg. 6, Nr. 2, S. 83–97, DOI: 10.1162/108819802763471807.