

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Energie- und Emissionsbilanz der Paketzustellung mit Elektrofahrzeugen in München

gefördert von der



Landeshauptstadt
München
**Referat für Gesundheit
und Umwelt**

münchen
 mobil

Bearbeiter:

Lukas Hardi, M.Sc.

Sebastian Dirk Lumpp, M.Sc.

Babu Kumaran Nalini, M.Sc.

München, 15.10.2019

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen dieser Studie wird mittels eines am Lehrstuhl entwickelten Modells eine Potenzialanalyse für Endenergie- und Kohlenstoffdioxid-Einsparungen auf der letzten Meile des Münchner Lieferverkehrs durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen durchgeführt. Der Fokus liegt dabei auf B2C- und C2C-Sendungen. Für mehrere Untersuchungsregionen in München wurden je 24 Szenarien simuliert und die Ergebnisse dann auf die Stadt hochgerechnet. Die Methodik der Simulationen beruht auf Monte-Carlo-Experimenten gestützt durch quelloffene Geodaten aus OpenStreetMap. Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass Elektrofahrzeuge ein deutliches Potenzial für Endenergie- und Kohlenstoffdioxideinsparungen auf der letzten Meile bieten. Angetrieben durch die Dekarbonisierung der Stromversorgung wird das Potenzial für Kohlenstoffdioxideinsparungen in diesem Bereich weiterhin ansteigen.

Inhalt

Kurzzusammenfassung	4
Abbildungsverzeichnis	iii
Glossar	v
1. Einleitung.....	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielsetzung der Studie.....	4
2. Methodik	5
3. Auswertung der Simulationsergebnisse und Hochrechnung auf München.....	10
4. Ergebnisse und Diskussion	13
Zusatz: Stickoxid- und Feinstaubemissionen	22
5. Zusammenfassung und Ausblick.....	24
Quellenverzeichnis	25

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Sendungsvolumina von KEP-Dienstleistern in Deutschland [1]	1
Abbildung 2. Wohnungsziffer einzelner Münchner Stadtbezirke am Stichtag 31.12.2016	7
Abbildung 3. Berechnete und interpolierte Zustellwahrscheinlichkeit für Paketsendungen in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2025 [1]	8
Abbildung 4. Entwicklung der spezifischen CO ₂ -Emissionen des deutschen Strommix [1]	9
Abbildung 5. CO ₂ -Emissionsfaktoren der betrachteten Energieträger [1]	9
Abbildung 6. Bestimmung der Kennlinie des Endenergiebedarfs für die Belieferung eines Haushalts (ohne An- und Rückfahrten, Fahrzeug FEV200C, Zustellwahrscheinlichkeit 15%) ..	10
Abbildung 7. Simulierter und extrapolierter Endenergiebedarf (orange) für die Belieferung eines Münchner Haushalts auf alle Bezirksteile (blau) (ohne An- und Rückfahrten, Fahrzeug FEV200C, Zustellwahrscheinlichkeit 15%)	11
Abbildung 8. Spezifischer Endenergiebedarf der Anfahrt Münchener Bezirksteile (Fahrzeug ICEFV200, Zustellwahrscheinlichkeit 15%)	12
Abbildung 9. Endenergiebedarf pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München (Fahrzeug ICEFV)	13
Abbildung 10. Endenergiebedarf pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München (Fahrzeug FEV-C)	14
Abbildung 11. Endenergiebedarf pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München (Fahrzeug FEV-P)	14
Abbildung 12. Endenergiebedarf pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München (Zustellwahrscheinlichkeit 15%)	15
Abbildung 13. Entwicklung des jährlichen Endenergiebedarfs bei der Zustellung von Paketen in München im Zeitraum von 2012 bis 2022	15
Abbildung 14. Entwicklung der absoluten jährlichen Endenergieeinsparungen bei der Zustellung von Paketen in München per Elektrofahrzeug gegenüber Dieselfahrzeugen im Zeitraum von 2012 bis 2022	16
Abbildung 15. Entwicklung der relativen jährlichen Endenergieeinsparungen bei der Zustellung von Paketen in München per Elektrofahrzeug gegenüber Dieselfahrzeugen im Zeitraum von 2012 bis 2022	16
Abbildung 16. CO ₂ -Emissionen pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München (Fahrzeug ICEFV)	17
Abbildung 17. CO ₂ -Emissionen pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München (Fahrzeug FEV-C, Emissionen Strommix Deutschland 2017)	17
Abbildung 18. CO ₂ -Emissionen pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München (Fahrzeug FEV-P, Emissionen Strommix Deutschland 2017)	18
Abbildung 19. CO ₂ -Emissionen pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München mit unterschiedlichen Fahrzeugtypen (Fahrzeuggröße 200, Zustellwahrscheinlichkeit 15%, Emissionen Strommix Deutschland 2017)	18
Abbildung 20. CO ₂ -Emissionsfaktoren des deutschen Strommix für verschiedene Ladezeiten (Emissionen Strommix Deutschland 2016) [1]	19
Abbildung 21. CO ₂ -Emissionen pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München mittels Elektrofahrzeugen welche zu unterschiedlichen Zeitpunkten geladen werden im	

<i>Zeitraum von 2012 bis 2022 (Fahrzeug FEV200C, Zustellwahrscheinlichkeit 15%, Emissionen Strommix Deutschland 201)) [1]</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 22. Entwicklung der jährlichen CO₂-Emissionen bei der Zustellung von Paketen in München im Zeitraum von 2012 bis 2022.....</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 23. Entwicklung der absoluten jährlichen CO₂-Einsparungen bei der Zustellung von Paketen in München per Elektrofahrzeug gegenüber Dieselfahrzeugen im Zeitraum von 2012 bis 2022.....</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 24. Entwicklung der relativen jährlichen CO₂-Einsparungen bei der Zustellung von Paketen in München per Elektrofahrzeug gegenüber Dieselfahrzeugen im Zeitraum von 2012 bis 2022.....</i>	<i>21</i>

Glossar

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
ICEFV{KAP}	Zustellfahrzeug mit Dieselmotor und Kapazität zur Belieferung von {KAP} Haushalten
KEP	Kurier-, Express-, und Paket
NO _x	Stickstoffoxide
PM	Feinstaub (engl. Particulate Matter)
WE	Wohneinheit
WG	Wohngebäude
Wohnungsziffer	durchschnittliche Anzahl an Wohnungen (Wohneinheiten) pro Wohngebäude in einer Region

1. Einleitung

1.1. Motivation

Die Zahl der jährlichen Sendungen im Bereich der Kurier-, Express- und Paketdienstleistungen (KEP) zeigt in den letzten Jahren einen enormen Zuwachs. Im Zeitraum von 2000 bis 2016 ist die Anzahl der jährlichen KEP-Sendungen in Deutschland von 1,7 Mrd. (Jahr 2000) auf knapp 3,2 Mrd. im Jahr 2016 angestiegen (s. **Abbildung 1**). Ein Treiber für den Anstieg um circa den Faktor 1,8 hierbei ist der wachsende Markt für Online-Handel bzw. E-Commerce. Die hohe Anzahl an Aufträgen mit einer starken zeitlichen Fluktuation, verursacht z.B. durch das Weihnachtsgeschäft, stellt Logistik-dienstleister vor viele neue Herausforderungen. Branchenexperten sehen für die Zukunft eine (beschleunigte) Fortschreibung dieser Entwicklung bis hin zu einer weiteren Verdoppelung der aktuellen Paketmenge.

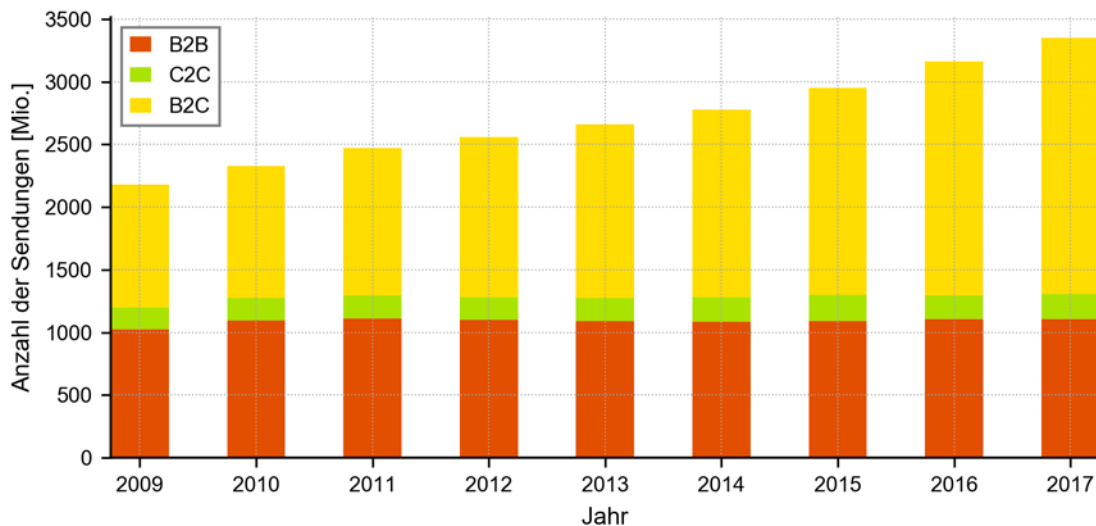


Abbildung 1. Sendungsvolumina von KEP-Dienstleistern in Deutschland [1]

Mit Blick auf Emissionsminderung und Nachhaltigkeit einer Paketzustellung müssen bei steigender Serviceorientierung der Logistikdienstleister und zugleich höheren Ansprüchen der Kunden innovative Ansätze und Konzepte entwickelt und angewandt werden. Auf Grund der konzentrierten Anzahl an Sendungen in urbanen Räumen müssen diese neuen Konzepte vor allem im Bereich des städtischen Güterverkehrs ansetzen, um zukünftige Engpässe zu vermeiden.

Ein Ansatz zur Bewältigung der Herausforderungen im Bereich Emissionsminderung und Nachhaltigkeit ist der Einsatz von Elektrofahrzeugen auf der „letzten Meile“ der Paketzustellung.

Einleitung

Kaufentscheidungen für Elektrofahrzeuge werden bei vielen potentiellen Kunden durch beschränkte elektrische Reichweiten und hohe Anschaffungskosten stark beeinflusst. Wie verschiedene Studien und Praxisbeispiele zeigen, findet die Elektromobilität im Bereich der City-Logistik und insbesondere der „letzten Meile“ einer Paketzustellung jedoch immer mehr Befürworter. Restriktionen des Betriebs auf Grund von zu geringen Reichweiten der Fahrzeuge sind in diesem Bereich nicht zu erwarten, da die Fahrzeuge an einem gewöhnlichen Tag lediglich wenige 10 km zurücklegen müssen. Begründet durch diese Tatsache wurde von der Deutsche Post AG zusammen mit der RWTH Aachen das elektrische Zustellfahrzeug „Street Scooter“ für die Paketzustellung in Städten entwickelt.

Elektrofahrzeuge fahren lokal emissionsfrei ohne Ausstoß von Kohlenstoffdioxid und Stickoxiden. Darüber hinaus beschränkt sich der Feinstaubausstoß im Wesentlichen auf den Abrieb von Bremsen und Reifen. Aufgrund eines aktuellen richterlichen Beschlusses, können Städte Einfahrverbote bestimmter Fahrzeugtypen zur Einhaltung der Luftreinheit erlassen. Daher rücken elektrisch angetriebene Fahrzeuge immer mehr in den Fokus der Politik. Mit der Einführung einer Kaufprämie und der Befreiung von der Kraftfahrzeugsteuer wurden erste Schritte seitens der Bundesregierung zur Subventionierung des Markthochlaufs von Elektrofahrzeugen in die Wege geleitet. Teilweise gewähren Kommunen spezielle Vergünstigungen sowie Vorzüge hinsichtlich Straßen-benutzung und Parkplätzen. Die genannten Subventionierungsmöglichkeiten beschränken sich allerdings meist nur auf private oder gewerblich genutzte PKWs und nicht auf elektrische Nutzfahrzeuge.

Die lokale Emissionsfreiheit von Elektrofahrzeugen impliziert dabei nicht zwangsläufig Mobilität ohne jeglichen Schadstoffausstoß. Vielmehr werden durch den Einsatz der Elektromobilität grundsätzlich Emissionen vom Verkehrssektor in den Prozess der Stromerzeugung verlagert. Abhängig vom jeweiligen Strommix zum Ladezeitpunkt der Elektrofahrzeuge ergeben sich zu verschiedenen Tageszeiten unterschiedlich hohe Emissionsfaktoren des Ladestroms für das Elektrofahrzeug. Wird beispielsweise zu Schwachlastzeiten (d.h. in den Nachtstunden) geladen, sind die Emissionen auf Grund eines hohen Einspeiseanteils von Braun- und Steinkohlekraftwerken entsprechend höher als bei einem Ladevorgang zu Mittagsstunden, in denen meist ein großer Anteil an erneuerbaren Energien (v.a. Photovoltaik) im Netz ist. Dementsprechend ist der Anteil von erneuerbaren Energien im Ladestrom ein entscheidender Faktor für die Reduzierung des Schadstoffausstoßes von Elektrofahrzeugen.

Im Rahmen von Flottenversuchen zur elektrischen Paketzustellung in verschiedenen deutschen Städten (u.a. durch die Deutsche Post DHL Group in Stuttgart, Bonn, Köln, und Berlin) mit Hilfe von verschiedenen elektrischen Nutzfahrzeugen konnte deren Eignung für die City-Logistik in der Praxis gezeigt werden. Mit dem Flottenversuch in München, der ausschließlich mit verschiedenen Fahrzeugen vom Typ „Street Scooter“ durchgeführt wird, wurde erstmals ein Praxisbeispiel für die elektrische Zustellung auf der „letzten Meile“ in Bayern geschaffen, das als Vorbild für weitere Versuche in bayerischen Städten (z.B. Nürnberg und Augsburg) dient. Die

Einleitung

durch den Einsatz von Elektromobilität zunehmende Verknüpfung von Verkehrs- und Energiesystem muss insbesondere in der Logistikbranche durch zeitlich, örtlich und ggf. energetisch flexible Planung unter Berücksichtigung von Kundenwünschen effizient realisiert werden.

Da besonders in der Phase der Umstellung der Antriebstechnologie eine Mischung aus Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren im Fuhrpark der Logistikdienstleister anzutreffen sein wird, muss der Einsatz der Elektrofahrzeuge sinnvoll unter energetischen und wirtschaftlichen Aspekten geplant werden.

1.2. Zielsetzung der Studie

In der Studie soll ein Simulationsmodell zur energetischen Abbildung der Paketzustellung entwickelt werden, das eine Quantifizierung von spezifischen Kenngrößen sowohl mit konventionell als auch mit elektrisch angetriebenen Zustellfahrzeugen erlaubt. Die Ergebnisse der Simulationen sollen anschließend validiert und gegenübergestellt werden. Damit soll insbesondere ein valider Vergleich der Energie- und Emissionsbilanz auf der letzten Meile der Paketzustellung zwischen einer elektrischen Paketzustellung und der Zustellung mit konventionellen Fahrzeugen ermöglicht werden. Die Studie wird in vier Arbeitspakete gegliedert:

- **AP1:** Entwicklung eines Energie- und Emissionsmodells für die Paketzustellung auf der letzten Meile
- **AP2:** Parametrierung und Validierung des Modells
- **AP3:** Auswertungen von Simulationsergebnissen in verschiedenen Szenarien
- **AP4:** Hochrechnung und Auswertungen für die Stadt München

Im **ersten Arbeitspaket (AP1)** soll ein Simulationsmodell für Endenergiebedarf und CO₂-Emissionen auf der letzten Meile der Paketzustellung für einen Münchner Stadtbezirksteil entwickelt werden. Dabei sollen als Eingangsdaten frei verfügbare Geodaten u.a. aus OpenStreetMap, verwendet werden. In **Arbeitspaket 2 (AP2)** müssen verschiedene Daten, u.a. zu Zustellfahrzeugen, Sendungsmengen, Zusammensetzung des Ladestrommix und damit einhergehenden CO₂-Emissionen recherchiert werden, die zur Parametrierung des Modells dienen. Ebenso müssen die Simulationsergebnisse validiert werden. Im Rahmen von **Arbeitspaket 3 (AP3)** wird das Modell auf Stadtbezirksteile mit unterschiedlichen räumlichen Strukturen angewandt, um zum Beispiel den Einfluss der Einwohner- und Bebauungsdichte auf die Kenngrößen zu quantifizieren. Zusätzlich sollen verschiedene Sendungsmengen in Szenarien untersucht werden. Mit Hilfe der so gewonnenen Ergebnisse soll in **Arbeitspaket 4 (AP4)** auch der absolute Endenergiebedarf und die gesamten CO₂-Emissionen auf der letzten Meile für die Stadt München in verschiedenen Szenarien hochgerechnet werden. Die Ergebnisse sollen darüber hinaus zur pauschalen Abschätzung der NO_x- und Feinstaubemissionen, mit Hilfe von spezifischen Kenngrößen z.B. aus der GEMIS-Datenbank bzw. den Grenzwerten der Euro-Normen, ohne gesonderte Modellierung genutzt werden.

2. Methodik

Die Bestimmung von Endenergiebedarf und Emissionen auf der letzten Meile der Belieferung in dieser Studie erfolgt mit dem Modell FeVER (Freight Electric Vehicle Energy Reproduction), das im Zuge einer Dissertation am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik entwickelt wurde [1]. Die Ergebnisse aus FeVER wurden für diese Studie ergänzt, sodass neben Endenergiebedarf und Kohlenstoffdioxidemissionen auch die Stickoxid- und Feinstaub-Emissionen bei der Auslieferung von Paketen in München auf Basis von spezifischen Kennwerten abgeschätzt werden können. In diesem Kapitel wird die Funktionsweise des FeVER-Modells umrissen; eine vollständige Einsicht wird in [1] geboten.

Die letzte Meile als Bestandteil der Logistik

Der Begriff der „letzten Meile“ bezeichnet den letzten Schritt der Logistikkette. Dieser umfasst den Transport der Lieferung vom letzten Umschlagpunkt (Depot) bis zum Endkunden. Dieser Schritt weist allgemein den höchsten Energiebedarf pro Lieferung auf, da geringe Distanzen bei einer hohen Lieferfrequenz zurückgelegt werden. In dieser Studie wird dieser Schritt weiter unterteilt in die Segmente „Anfahrt“, „Belieferung“ und „Rückfahrt“, die wie folgt definiert wurden:

- **Anfahrt:** das Fahrtsegment von dem Depot bis zu dem ersten Endkunden
- **Belieferung:** das Fahrtsegment von dem ersten Endkunden bis zu dem letzten Endkunden
- **Rückfahrt:** das Fahrtsegment von dem letzten Endkunden zurück zu dem Depot

Faktoren wie z.B. die geographische Ausdehnung der Zustellregion sowie die Struktur der Fahrzeugflott und die eingesetzten Fahrzeugtechnologien zeigen einen deutlichen Einfluss auf die Energie- und Emissionsintensität des Geschäfts. In dieser Studie wurden nur B2C und C2C Lieferungen betrachtet; die Wohnungsziffer, gemessen in Wohneinheiten pro Wohngebäude, wurde dabei als besonders wichtige Kennzahl identifiziert.

Modellierung von Endenergiebedarf und CO₂-Emissionen auf der letzten Meile

Der gewählte energetische Bilanzraum dieser Studie wird als „Tank2Wheel“ bezeichnet. Dies ist der kleinste energetisch sinnvolle Bilanzraum und beinhaltet die Effizienz des kompletten Fahrzeugs inklusive aller Komponenten. Damit erlaubt diese Methode Aussagen zu Effizienz des Fahrzeugs unter Berücksichtigung der Antriebsart. Die Bilanzgrenze wird an der Karosserie gezogen.

Methodik

Dabei wurden in dieser Studie drei unterschiedliche Antriebsarten untersucht. Als Referenz gilt das Zustellfahrzeug mit Verbrennungsmotor (Diesel), welches in diesem Bericht als „Internal Combustion Engine Freight Vehicle“ (ICE-FV) bezeichnet wird. Damit verglichen werden Elektrofahrzeuge zweier Konstruktionsarten, „Conversion-Design“ und „Purpose-Design“. Erstere bezeichnet die Elektrifizierung eines bestehenden Großserienfahrzeugs, während die zweite die komplette Neukonstruktion des Elektrofahrzeugs bezeichnet. Beim „Purpose-Design“ besteht daher die Möglichkeit zur Gewichtsoptimierung, u.a. durch den Einsatz von Leichtbau. Diese Fahrzeuge werden in diesem Bericht als „Freight Electric Vehicles“ (FEV-C, FEV-P) bezeichnet.

Es wurden Fahrzeuge mit typischen Parametern von realen Zustellfahrzeugen definiert, die für die Untersuchungen genutzt wurden. Dazu wurden Datenblätter unterschiedlicher Fahrzeughersteller ausgewertet, sowohl für konventionell angetriebene Zustellfahrzeuge, als auch für elektrisch angetriebene. Es wurden insgesamt 37 Fahrzeuge betrachtet, auf Basis des Lade-raumvolumens wurden diese wiederum in drei Größenklassen eingeteilt: 4 – 5 m³, 5 – 9 m³ und 9 – 15 m³, bzw. 150, 200 und 250 Sendungen. Mit diesen Daten konnten damit die typischen Fahrzeuge definiert werden. Daraus ergaben sich 8 zu untersuchende Zustellfahrzeuge, wobei das Zustellfahrzeug „FEV250P“ nicht definiert wurde, da in dieser Klasse keine Fahrzeuge am Markt verfügbar waren.

Zunächst wird ein Bezirksteil der Stadt München einzeln betrachtet. Geodaten werden von OpenStreetMap [2] bezogen, einer quelloffenen Geodatenbank. Mit dem entwickelten Tool FeVER werden die Wohngebäude und Straßen in dem Bezirksteil identifiziert. Anhand des ausgewählten Fahrzeugtyps und der zu simulierenden Zustellwahrscheinlichkeit (die Wahrscheinlichkeit, dass ein Haushalt an einem Liefertag beliefert werden muss) wird dann berechnet wie viele Fahrzeuge benötigt werden. Mit dem Tool FeVER kann der Bezirksteil dann in Zustellgebiete für die einzelnen Fahrzeuge unterteilt werden, optimale Zustelltouren für jedes Fahrzeug erstellt werden und der Endenergiebedarf für jede Zustelltour anhand von Fahrzeugdynamiksimulationen bestimmt werden. Verkehrssimulationen wurden in dieser Studie nicht betrachtet.

Für jeden Bezirksteil werden dann mittels Monte-Carlo-Simulationen der mittlere Endenergiebedarf für jedes Liefersegment festgestellt. Als Depot wird immer die Posthalle München an der Friedenheimer Brücke angenommen.

Parametrierung des Modells

Da das angewandte Monte-Carlo-Verfahren sehr rechenintensiv ist, war es zeitlich unmöglich Simulationen für ganz München durchzuführen. Stattdessen wurde im ersten Schritt der Zustellprozess in sechs Bezirksteilen simuliert. Auf die Methodik der Hochrechnung auf München wird in **Kapitel 3** eingegangen. Zur Quantifizierung des Einflusses von unterschiedlichen räumlichen Strukturen auf Endenergiebedarf und Emissionen wurden Untersuchungsregionen mit unterschiedlich großen Flächen bzw. Haushalts- und Bevölkerungsdichten ausgewählt. Daten wurden aus [3] bezogen.

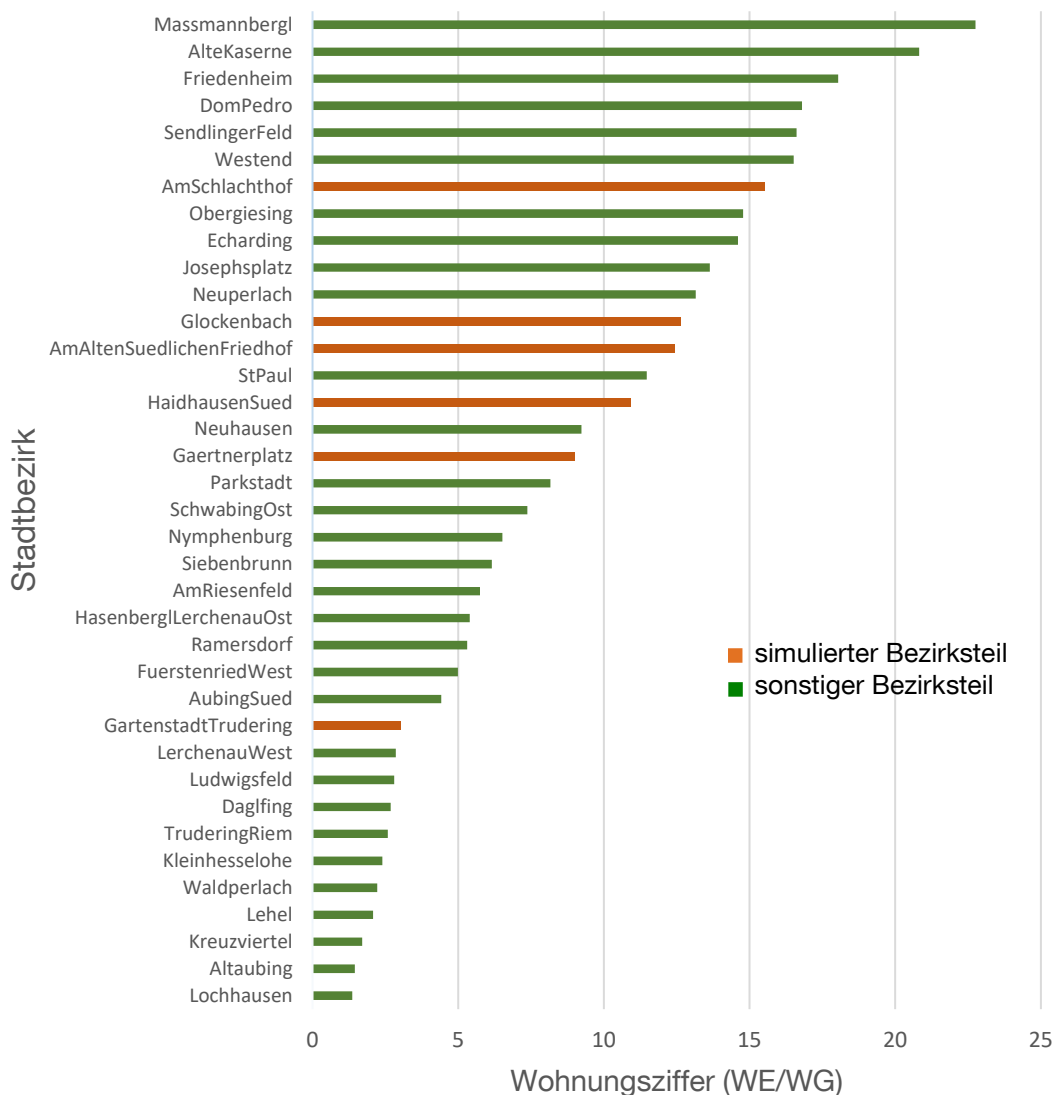


Abbildung 2. Wohnungsziffer einzelner Münchner Stadtbezirke am Stichtag 31.12.2016

Methodik

Die gewählten Bezirksteile:

- Gärtnerplatz
- Glockenbach
- Am Schlachthof
- Am alten südlichen Friedhof
- Haidhausen-Süd
- Gartenstadt-Trudering.

Abbildung 2 zeigt die Wohnungsziffer der gewählten Untersuchungsregionen und vergleicht diese mit einigen anderen Bezirksteilen, inklusive der Viertel mit der höchsten und niedrigsten Wohnungsziffer, Maßmannbergl und Lochhausen.

Simulationen werden für drei Bezugsjahre, 2012, 2017 und 2022, sowie die acht typischen Zustellfahrzeuge, durchgeführt. Mit der Annahme von 300 Liefertagen im Jahr ergibt sich die Zustellwahrscheinlichkeit pro Haushalt und Liefertag. Diese ist in **Abbildung 3** zu sehen ist und beträgt in den Bezugsjahren je 10, 15 und 20%.

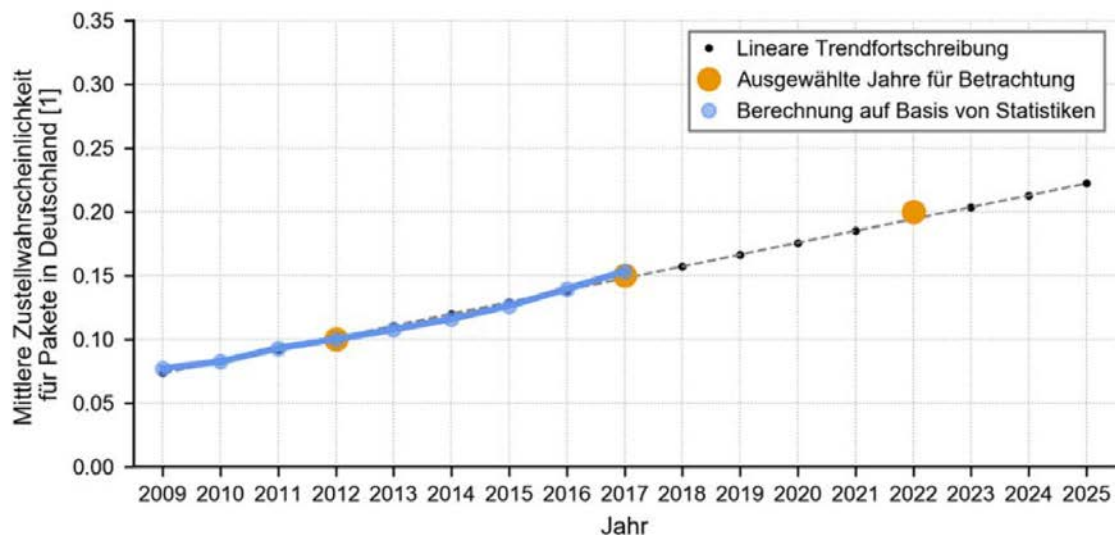


Abbildung 3. Berechnete und interpolierte Zustellwahrscheinlichkeit für Paketsendungen in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2025 [1]

Im ersten Schritt wird der Endenergiebedarf der Fahrzeuge ermittelt. Um die CO₂-Emissionen der unterschiedlichen Fahrzeuge zu berechnen, wurde der Endenergiebedarf mit den Emissionsfaktoren der betrachteten Energieträger multipliziert. In **Abbildung 4** ist die Entwicklung der spezifischen CO₂-Emissionen des deutschen Strommix über die nächsten Jahre zu sehen. In **Abbildung 5** werden die betrachteten Energieträger zusammengefasst.

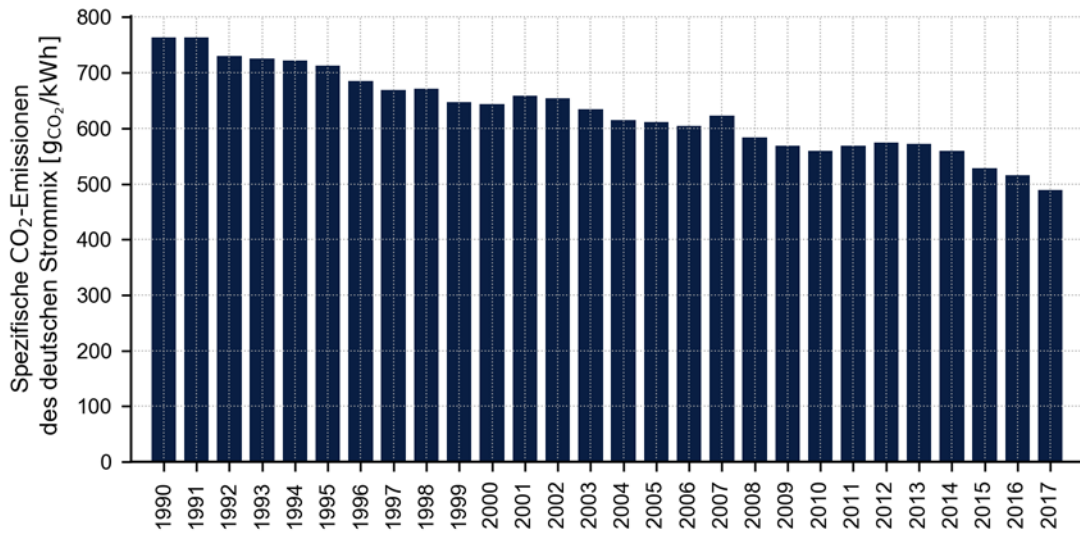


Abbildung 4. Entwicklung der spezifischen CO₂-Emissionen des deutschen Strommix [1]

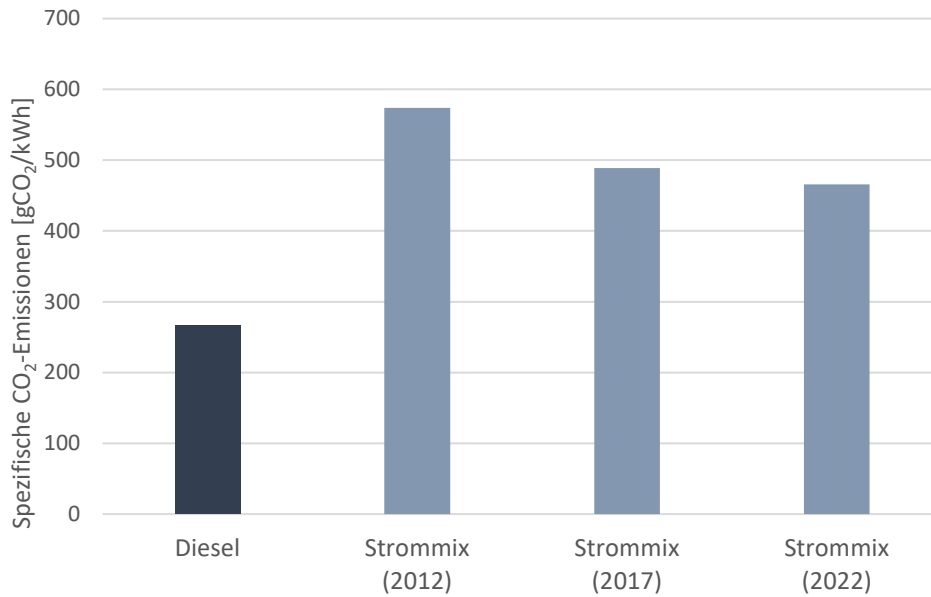


Abbildung 5. CO₂-Emissionsfaktoren der betrachteten Energieträger [1]

3. Auswertung der Simulationsergebnisse und Hochrechnung auf München

Im ersten Schritt wurden für jede der sechs Untersuchungsregionen 24 Szenarien simuliert. Diese 24 Szenarien bilden die acht Zustellfahrzeuge und drei Lieferwahrscheinlichkeiten ab. Die Ergebnisse wurden wieder in Liefersegmente unterteilt. Es kann eine starke Korrelation zwischen dem Endenergiebedarf pro Haushalt **im Liefersegment** und der Wohnungsziffer des Bezirksteils nachgewiesen werden. In **Abbildung 6** wird dies exemplarisch für das Fahrzeug ICEFV150 bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 15% gezeigt. Da die Wohnungsziffern für alle Bezirksteile in München problemlos berechnet werden können, kann der Endenergiebedarf anhand der aus den Simulationsergebnissen gebildeten Kennlinie auf die restlichen Bezirksteile extrapoliert werden.

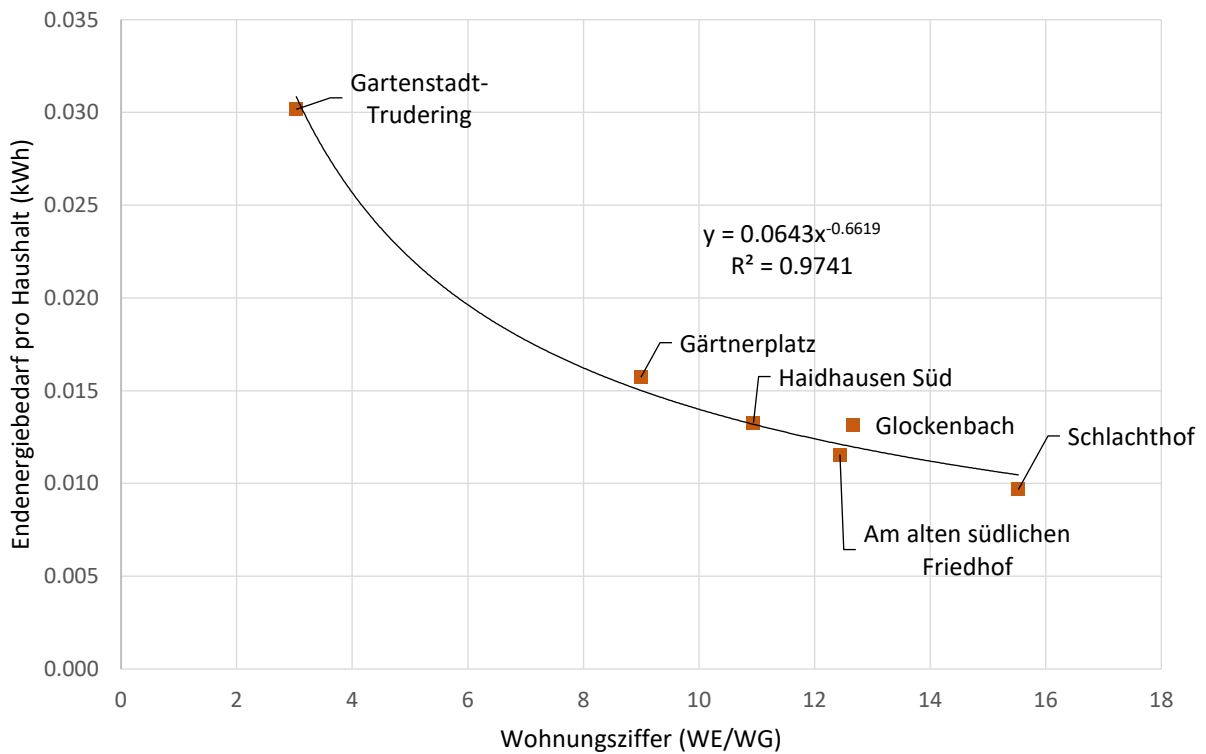


Abbildung 6. Bestimmung der Kennlinie des Endenergiebedarfs für die Belieferung eines Haushalts (ohne An- und Rückfahrten, Fahrzeug ICEFV150, Zustellwahrscheinlichkeit 15%)

In **Abbildung 7** wird die berechnete Kennlinie angewandt und der Endenergiebedarf pro Haushalt **im Liefersegment** auf alle Bezirksteile extrapoliert. Der Endenergiebedarf pro Haushalt fällt mit der Wohnungsziffer ab. Dies ist zu erwarten, da das Zustellfahrzeug mehr Haushalte pro Fahrzeugstopp beliefern kann und daher seltener abbremsen muss. Bei der Hochrechnung

Auswertung der Simulationsergebnisse und Hochrechnung auf München

muss der Endenergieaufwand pro Haushalt nur noch mit der Anzahl an Haushalten im Bezirksteil multipliziert werden.

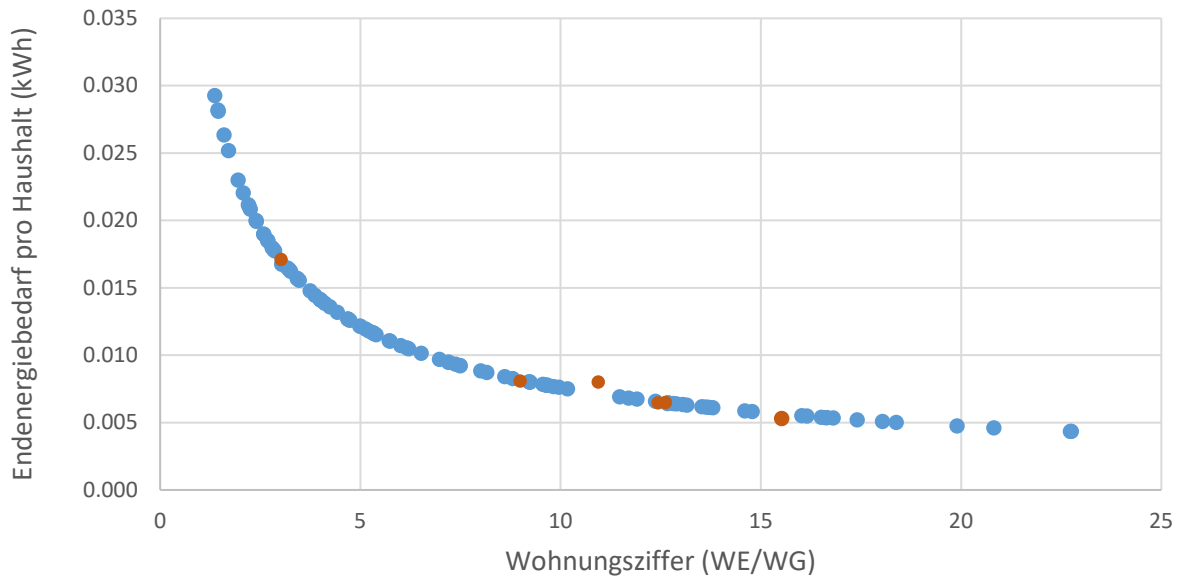


Abbildung 7. Simulierter und extrapoliertes Endenergiebedarf (orange) für die Belieferung eines Münchner Haushalts auf alle Bezirksteile (blau) (ohne An- und Rückfahrten, Fahrzeug FEV200C, Zustellwahrscheinlichkeit 15%)

In **Abbildung 8** wird der Zusammenhang zwischen dem spezifischen Endenergiebedarf der Anfahrt eines Bezirksteils und der Wohnungsziffer des Bezirksteils dargestellt. Hieraus ist erkenntlich, dass kein Zusammenhang zwischen diesen Parametern besteht. Vielmehr ist zu sehen, dass der spezifische Endenergiebedarf ungefähr konstant bleibt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich die Anfahrts- und Rückfahrtstrecken nur in ihrer Länge unterscheiden. Für die Hochrechnung wurde daher für jedes Szenario der mittlere Energiebedarf für jedes Szenario im Anfahrtssegment sowie im Rückfahrtsegment bestimmt und mit der Anfahrts- bzw. Rückfahrtstrecke sowie der Anzahl an benötigten Fahrzeugen multipliziert.

Auswertung der Simulationsergebnisse und Hochrechnung auf München

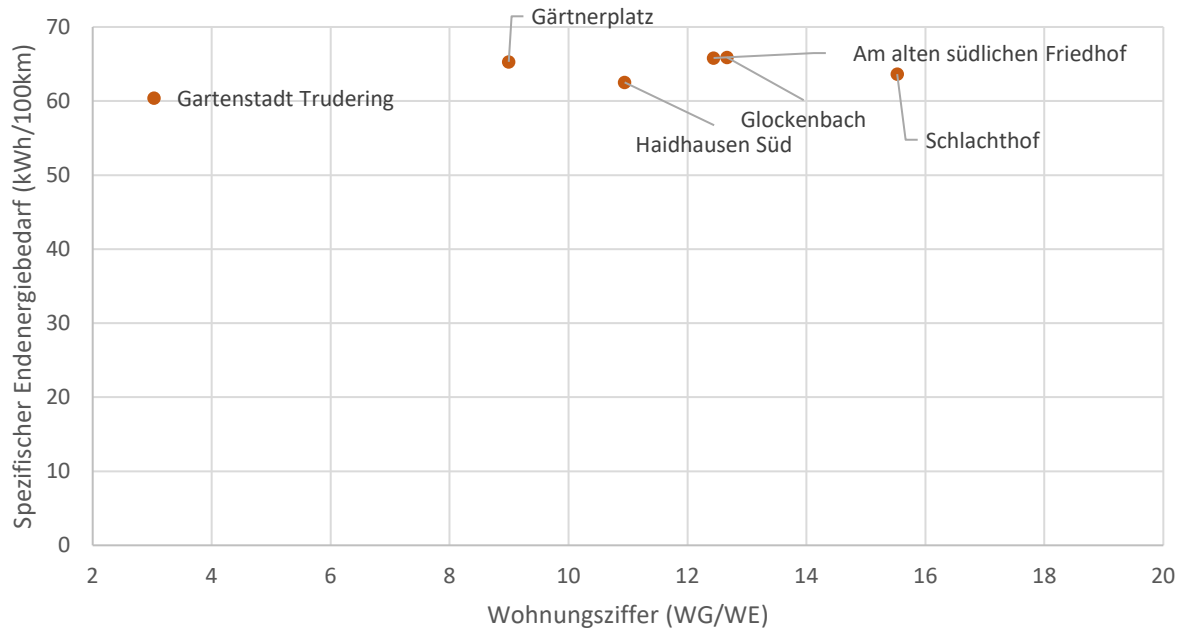


Abbildung 8. Spezifischer Endenergiebedarf der Anfahrt Münchener Bezirksteile (Fahrzeug ICEFV200, Zustellwahrscheinlichkeit 15%)

4. Ergebnisse und Diskussion

Endenergiebedarf

Im zweiten Schritt wurden die Simulationsergebnisse für die sechs gewählten Untersuchungsregionen auf München hochgerechnet. Die Ergebnisse werden hier vorgestellt.

Der Endenergiebedarf pro Liefertag für die Zustellung von Paketen in ganz München mit allen 8 Fahrzeugen und 3 Zustellwahrscheinlichkeiten wird von **Abbildung 9** bis **Abbildung 12** dargestellt.

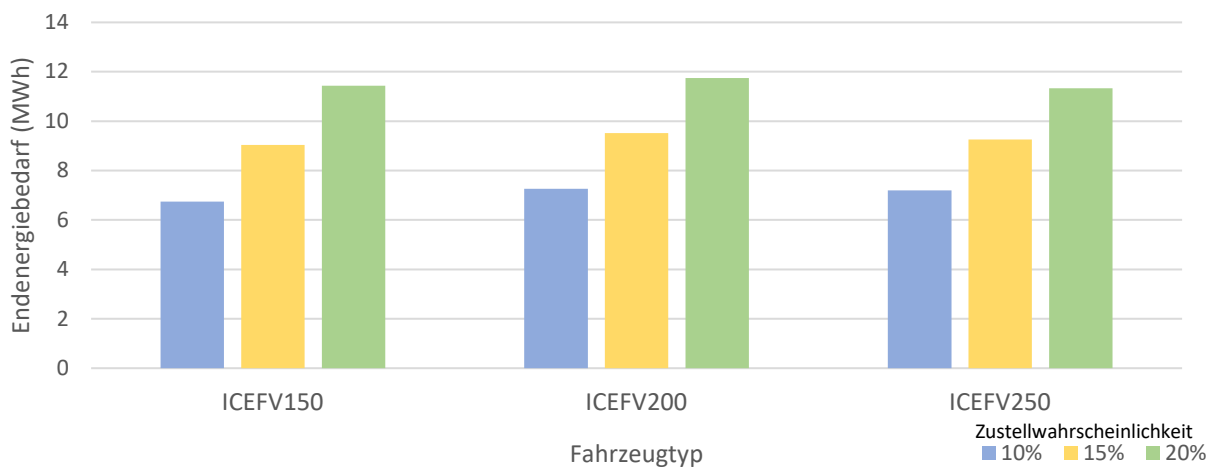


Abbildung 9. Endenergiebedarf pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München (Fahrzeug ICEFV)

Der Endenergiebedarf steigt bei allen Fahrzeugen ungefähr linear mit der Lieferwahrscheinlichkeit an. Dies ist zu erwarten da die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge mit der Zustellwahrscheinlichkeit linear ansteigen muss. Jedoch verursacht eine Verdoppelung der Zustellwahrscheinlichkeiten keine Verdoppelung des Endenergiebedarfs, da die erhöhte Zustellwahrscheinlichkeit eine erhöhte Effizienz auf dem Lieferssegment durch eine reduzierte Anzahl an Stopps pro Zustellfahrzeug erlaubt.

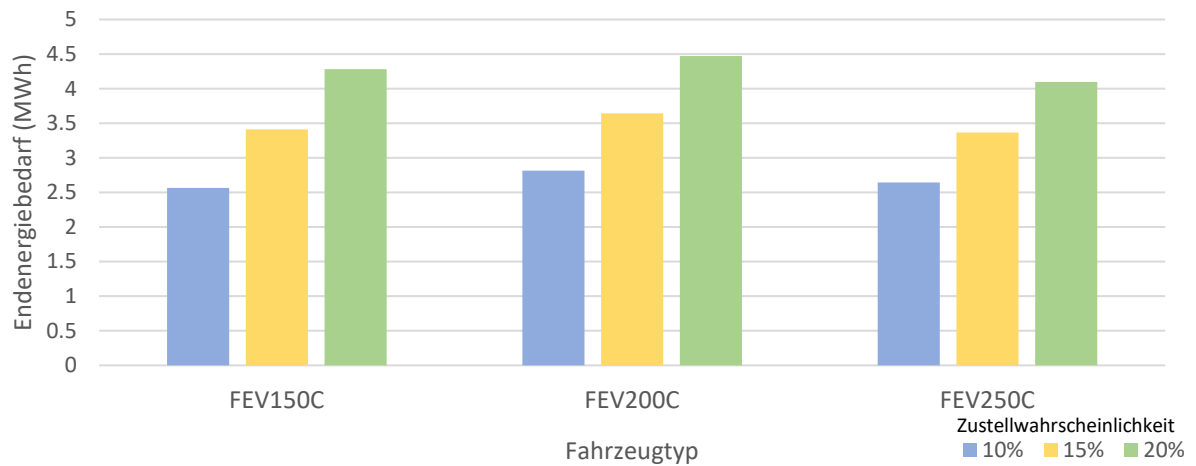


Abbildung 10. Endenergiebedarf pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München (Fahrzeug FEV-C)

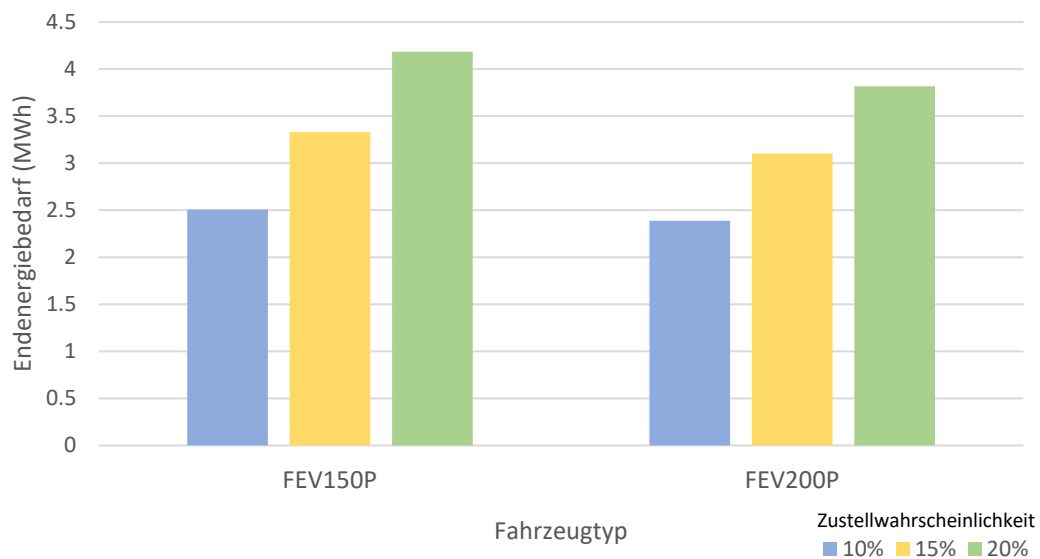


Abbildung 11. Endenergiebedarf pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München (Fahrzeug FEV-P)

Auffällig ist, dass kein klarer Zusammenhang zwischen der eingesetzten Fahrzeuggröße und dem Endenergiebedarf zu sehen ist. Zwar ist der Endenergiebedarf im Liefersegment der kleineren Fahrzeuge geringer, jedoch wird diese Einsparung durch die erhöhte Anzahl an Fahrzeugen und der daraus resultierenden erhöhten Anzahl an Anfahrten wieder zunichtegemacht.

Ergebnisse und Diskussion

In **Abbildung 12** wird der Endenergiebedarf der Antriebstechnologien verglichen. **Elektrofahrzeuge ermöglichen Einsparungen von bis zu 2/3 des Endenergiebedarfs.** Dabei sind Elektrofahrzeuge im „Purpose-Design“ nur marginal effizienter als „Conversion-Design“ Fahrzeuge.

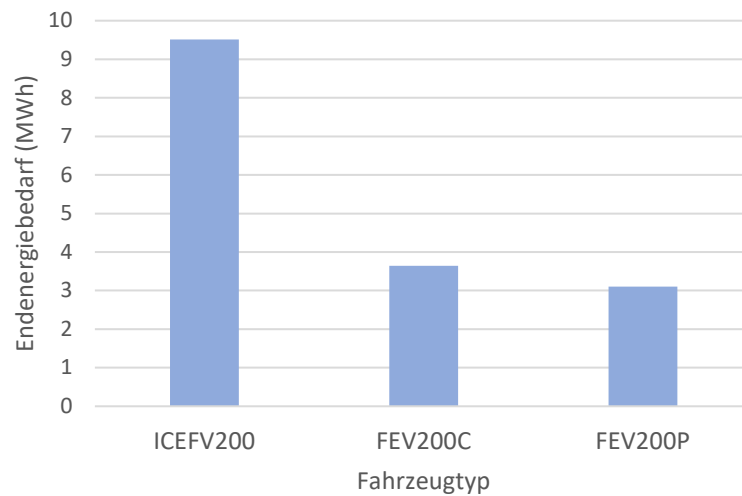


Abbildung 12. Endenergiebedarf pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München (Zustellwahrscheinlichkeit 15%)

Die drei Bezugsjahre unterscheiden sich in ihrer Zustellwahrscheinlichkeit. Im folgenden Schritt wird dies berücksichtigt. **Abbildung 13** stellt die Entwicklung des absoluten Endenergiebedarfs für ein Kalenderjahr bei der Zustellung von Paketen im München in den Jahren 2012, 2017 und 2022 mit Diesel- und Elektrofahrzeugen dar.

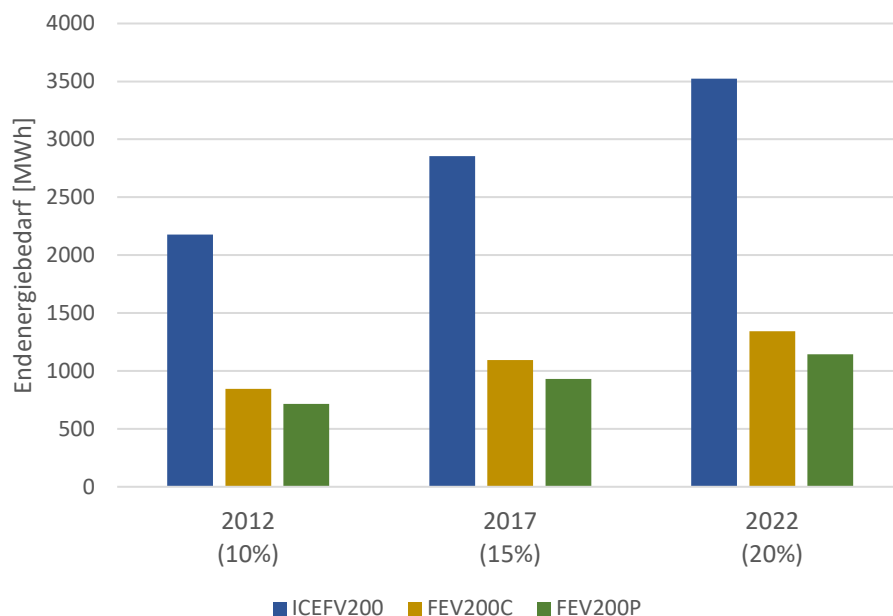


Abbildung 13. Entwicklung des jährlichen Endenergiebedarfs bei der Zustellung von Paketen in München im Zeitraum von 2012 bis 2022

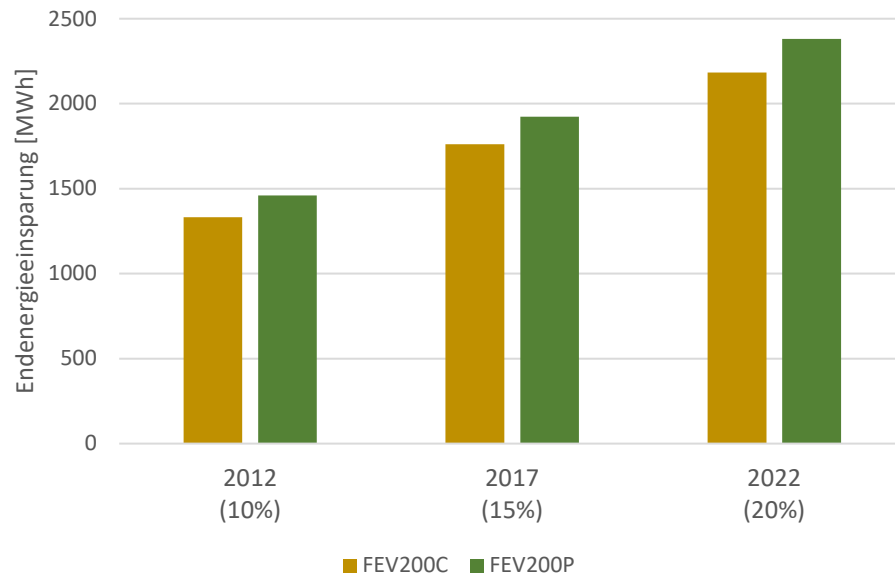


Abbildung 14. Entwicklung der absoluten jährlichen Endenergieeinsparungen bei der Zustellung von Paketen in München per Elektrofahrzeug gegenüber Dieselfahrzeugen im Zeitraum von 2012 bis 2022

In **Abbildung 14** und **Abbildung 15** sind die Endenergieeinsparungen des gleichen Szenarios zu sehen. Hieraus ist erkenntlich, dass die relativen Einsparungen über die Jahre konstant bleiben. Da die gleichen Fahrzeuge in allen Szenarien eingesetzt wurden, ist auch dies zu erwarten.

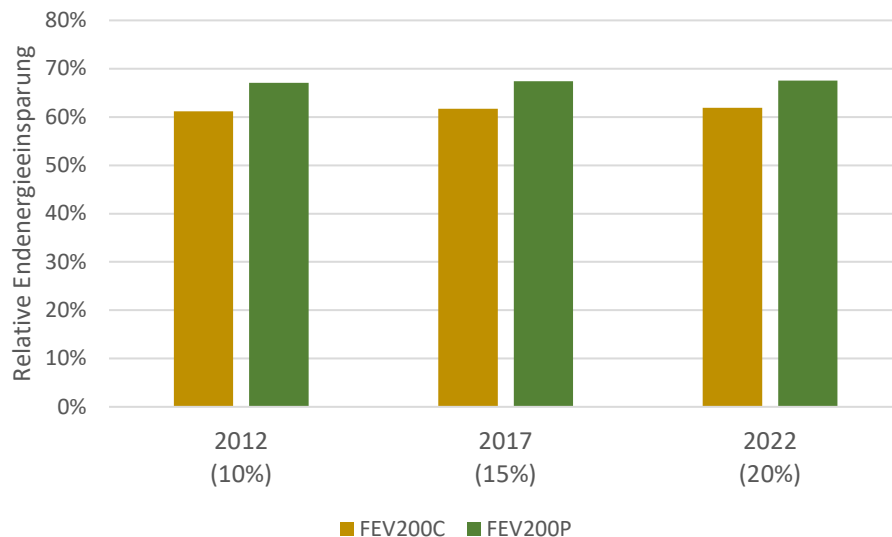


Abbildung 15. Entwicklung der relativen jährlichen Endenergieeinsparungen bei der Zustellung von Paketen in München per Elektrofahrzeug gegenüber Dieselfahrzeugen im Zeitraum von 2012 bis 2022

Kohlenstoffdioxidemissionen

In diesem Schritt wurden die CO₂-Emissionsfaktoren der unterschiedlichen Energieträger mit dem Endenergiebedarf multipliziert um die Emissionsintensität des Lieferverkehrs in München zu bestimmen.

Der Endenergiebedarf pro Liefertag für die Zustellung von Paketen in ganz München mit allen acht Fahrzeugen und drei Zustellwahrscheinlichkeiten wird von **Abbildung 16** bis **Abbildung 18** dargestellt. Hier wurde der Emissionsfaktor 2017 verwendet.

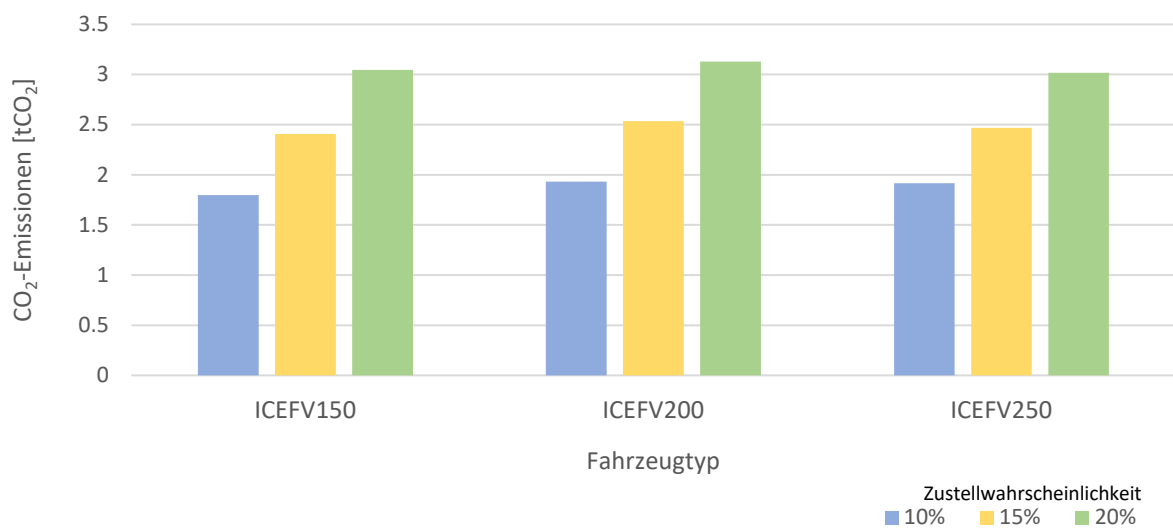


Abbildung 16. CO₂-Emissionen pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München (Fahrzeug ICEFV)

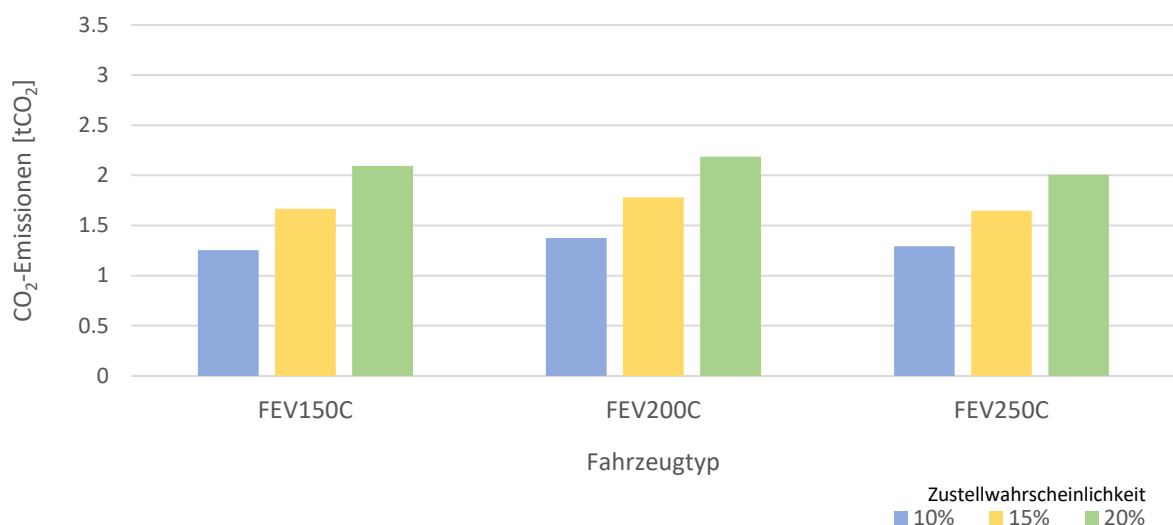


Abbildung 17. CO₂-Emissionen pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München (Fahrzeug FEV-C, Emissionen Strommix Deutschland 2017)

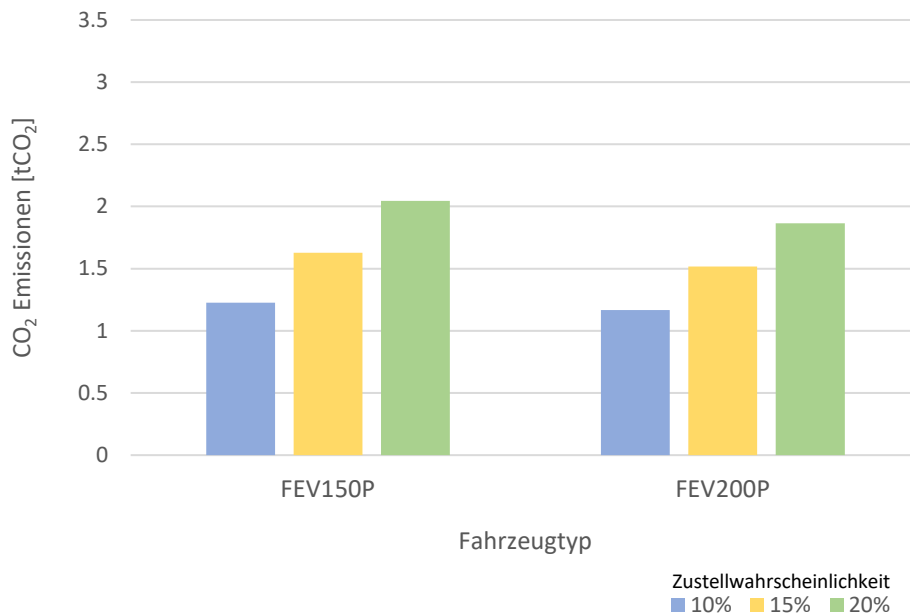


Abbildung 18. CO₂-Emissionen pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München (Fahrzeug FEV-P, Emissionen Strommix Deutschland 2017)

Wie auch schon beim Endenergiebedarf ist aus diesen Daten kein klarer Zusammenhang zwischen der eingesetzten Fahrzeuggröße und den CO₂-Emissionen zu sehen. Die eingesetzte Antriebstechnologie, hingegen, weist einen deutlichen Einfluss auf die Kohlenstoffdioxidemissionen auf. Einsparungen von c.a. 30 - 40% können 2017 erzielt werden. Die deutlich geringeren Einsparungen verglichen mit denen beim Endenergiebedarf können auf die hohe Emissionsintensität des deutschen Strommix zurückgeführt werden.

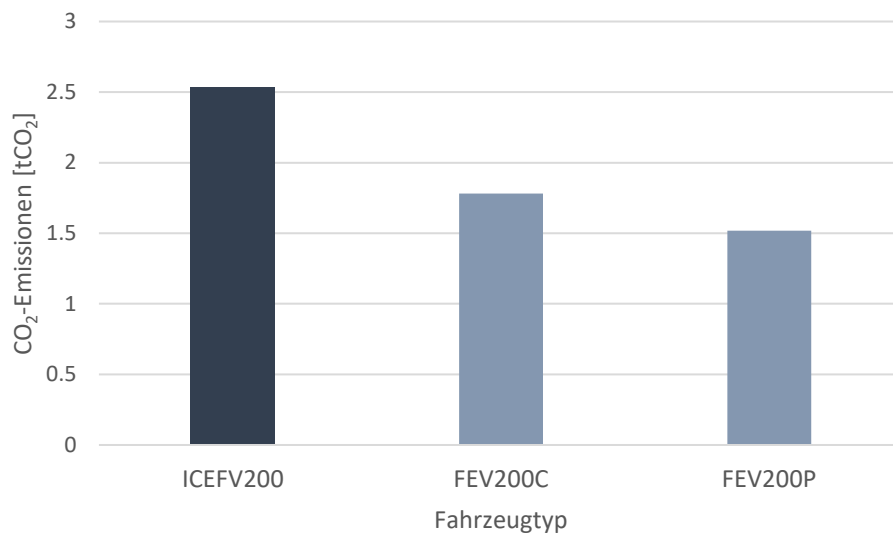


Abbildung 19. CO₂-Emissionen pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München mit unterschiedlichen Fahrzeugtypen (Fahrzeuggröße 200, Zustellwahrscheinlichkeit 15%, Emissionen Strommix Deutschland 2017)

Ergebnisse und Diskussion

Die CO₂-Intensität des Strommix kann innerhalb eines Tages schwanken und ist von der EE-Einspeisung abhängig. Mittlere Emissionsfaktoren des deutschen Strommix zu unterschiedlichen Tageszeiten wurden in [1] für 2016 berechnet und werden in **Abbildung 20** dargestellt.

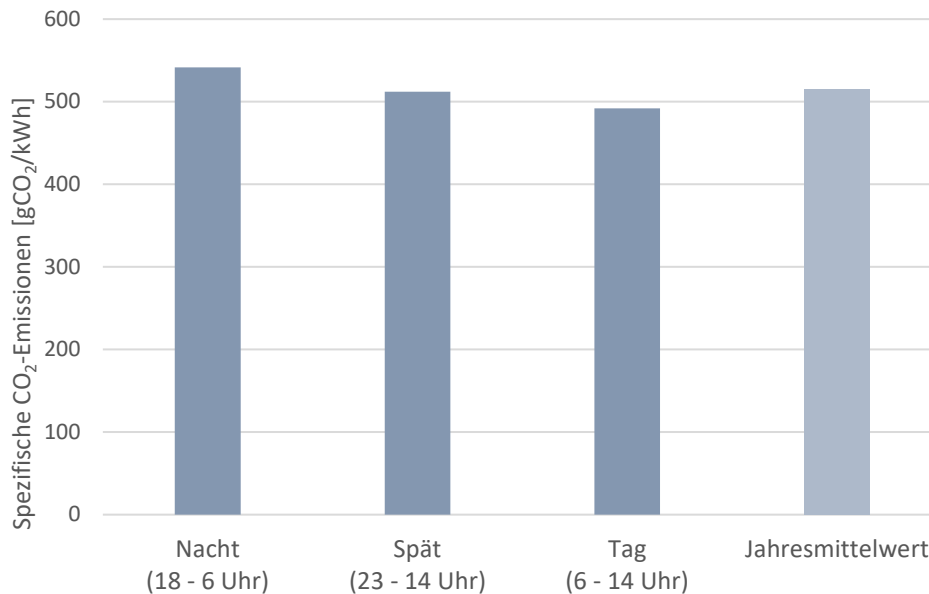


Abbildung 20. CO₂-Emissionsfaktoren des deutschen Strommix für verschiedene Ladezeiten (Emissionen Strommix Deutschland 2016) [1]

Die CO₂-Emissionen die durch den Betrieb von Elektrofahrzeugen verursacht werden hängen somit von der Tageszeit des Ladeprozesses ab. Die potenziellen Einsparungen wurden hier berechnet und exemplarisch für das Fahrzeug FEV200C und einer Zustellwahrscheinlichkeit von 15% für einen Liefertag dargestellt. Gegenüber dem Jahresmittelwert sind Abweichungen von ca. +-5% möglich.

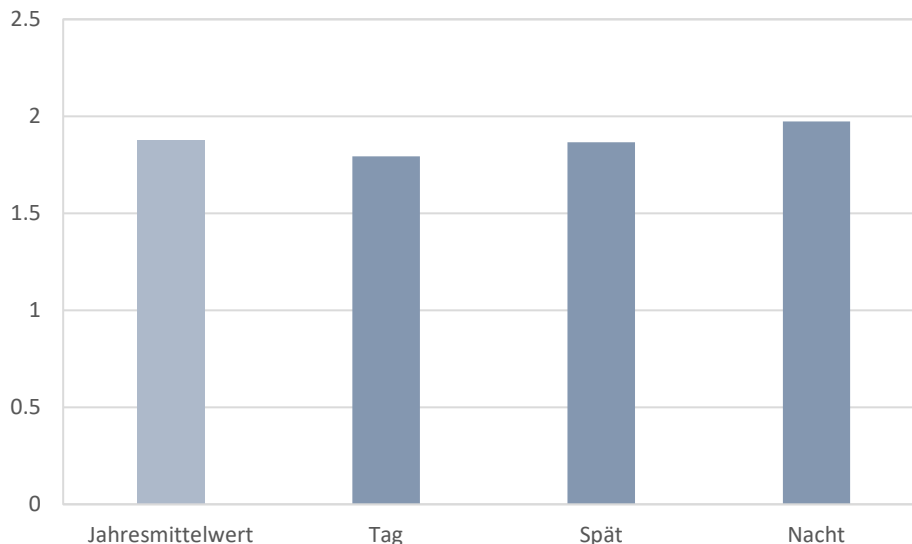


Abbildung 21. CO₂-Emissionen pro Liefertag bei der Zustellung von Paketen in München mittels Elektrofahrzeugen welche zu unterschiedlichen Zeitpunkten geladen werden im Zeitraum von 2012 bis 2022 (Fahrzeug FEV200C, Zustellwahrscheinlichkeit 15%, Emissionen Strommix Deutschland 201) [1]

Ergebnisse und Diskussion

Wie auch schon bei der Berechnung des Endenergiebedarfs ist in **Abbildung 22** die Entwicklung der absoluten CO₂-Emissionen zwischen 2012 und 2022 zu sehen. Zusätzlich zur ansteigenden Zustellwahrscheinlichkeit unterscheiden sich die Jahre im CO₂-Emissionsfaktor des Strommix. Die Entwicklung wird exemplarisch für Zustellfahrzeuge mit einer Zustellkapazität von 200 Paketen dargestellt.

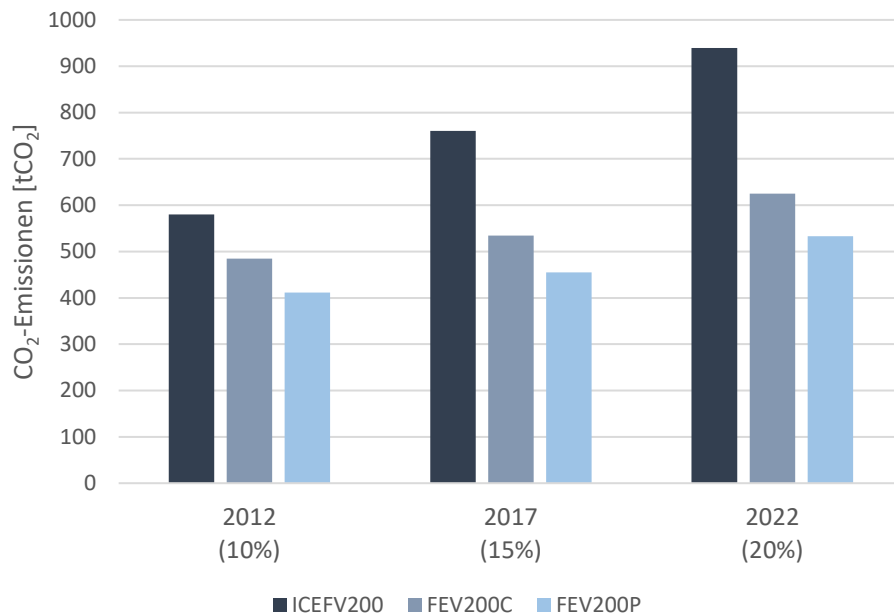


Abbildung 22. Entwicklung der jährlichen CO₂-Emissionen bei der Zustellung von Paketen in München im Zeitraum von 2012 bis 2022

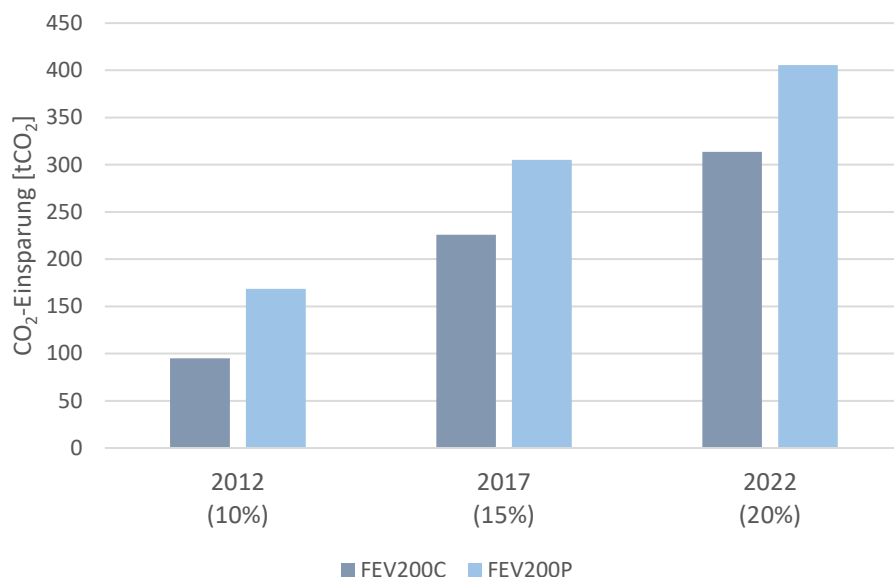


Abbildung 23. Entwicklung der absoluten jährlichen CO₂-Einsparungen bei der Zustellung von Paketen in München per Elektrofahrzeug gegenüber Dieselfahrzeugen im Zeitraum von 2012 bis 2022

Ergebnisse und Diskussion

In **Abbildung 23** und **Abbildung 24** sind die Emissionseinsparungspotenziale des gleichen Szenarios zu sehen. **Eine komplette Elektrifizierung der Lieferflotte erlaubt CO₂-Einsparungen von bis zu 400 tCO₂ (43%) im Jahr 2022.**

Anders als beim Endenergiebedarf steigt das Einsparpotenzial bei Kohlenstoffdioxid mit der Zeit an. Dies ist auf die stetig fallenden CO₂-Emissionsfaktoren des deutschen Strommix zurückzuführen.

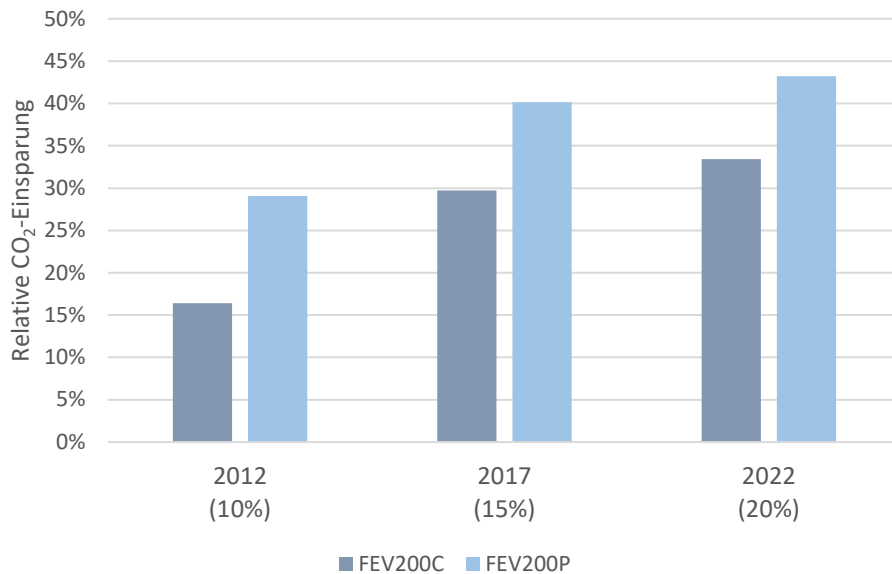


Abbildung 24. Entwicklung der relativen jährlichen CO₂-Einsparungen bei der Zustellung von Paketen in München per Elektrofahrzeug gegenüber Dieselfahrzeugen im Zeitraum von 2012 bis 2022

Zusatz: Stickoxid- und Feinstaubemissionen

Um die Stickstoff(di)oxid- sowie Feinstaubemissionen **des Abgases** des mit Diesel angetriebenen Lieferverkehrs sowie der Stromerzeugung des elektrisch angetriebenen Lieferverkehrs zu bestimmen wurden zuerst die jährlichen Fahrzeugkilometer der Belieferung von München mit jeder Fahrzeuggröße bei einer Zustellwahrscheinlichkeit von 15% berechnet. Diese wurden mittels des gleichen Verfahrens wie die Hochrechnung des Endenergiebedarfs hochgerechnet.

Im Anschluss musste davon ausgegangen werden, dass:

- mit Diesel angetriebene Zustellfahrzeuge pro Kilometer genau so viele **Stickoxide** ausstoßen wie laut EU-Verordnung erlaubt ist.
- dass mit Diesel angetriebene Zustellfahrzeuge pro Kilometer genau so viel **Feinstaub** ausstoßen wie laut EU-Verordnung erlaubt ist.

Dabei ist zu beachten, dass die Emissionen vieler Fahrzeughersteller in den letzten Jahren genau diese Grenzwerte um ein Vielfaches überschritten haben.

Zusätzlich muss beachtet werden, dass:

- die Entwicklung der Emissionsgrenzwerte sehr volatil und daher nicht prognostizierbar ist. Die Berechnungen wurden daher nur für das Referenzjahr 2017 durchgeführt.
- Emissionsdaten für den deutschen Strommix nur für 2017 vorliegen.
- für den deutschen Strommix nur Emissionsdaten für **Stickstoffdioxid** und **Staub** (nicht Feinstaub) vorliegen, während für Fahrzeuge nur Grenzwerte für **Stickoxide** und Feinstaub (**PM**) definiert wurden.
- die Emissionen des Dieselverkehrs lokal ausgestoßen werden, während die Emissionen der Stromerzeugung in ganz Deutschland verteilt ausgestoßen werden. Es werden in dieser Studie keine Aussage zu den ökologischen oder toxikologischen Auswirkungen dieser Emissionen getroffen.
- ein erheblicher Teil des Feinstaubes der durch den Straßenverkehr verursacht wird, durch Bremsen- und Reifenabrieb sowie Aufwirbelung verursacht wird. Die hier präsentierten Zahlen beziehen sich **ausschließlich** auf die Feinstaubemissionen am Auspuff.

Zusatz: Stickoxid- und Feinstaubemissionen

Tabelle 1. Schätzung (s. Seite 22) der absoluten jährlichen Stickstoff(di)oxid- und Feinstaubemissionen bei der Zustellung von Paketen in München in 2017

Diesel Emissionen		Szenario		
		(150, 15%)	(200, 15%)	(250, 15%)
Stickoxide (2017)	kg/a	544	527	445
Feinstaub	kg/a	23	19	16

FEV-C Emissionen		Szenario		
		(150, 15%)	(200, 15%)	(250, 15%)
Stickstoffdioxid (2017)	kg/a	434	463	428
Staub	kg/a	11	12	11

FEV-P Emissionen			
		(150, 15%)	(200, 15%)
Stickstoffdioxid (2017)	kg/a	424	395
Staub	kg/a	11	10

Tabelle 2. Emissionsfaktoren des deutschen Strommix 2017 und Emissionsgrenzwerte für leichte Nutzfahrzeuge nach Euro 6c

Emissionsfaktoren (Strommix 2017) [5]		
Stickstoffdioxid	g/kWh	0,424
Staub	g/kWh	0,011

Emissionsgrenzwerte (EURO 6c 2017) [6]		Fahrzeuggröße	
		150	200/250
Stickoxide	g/km	0,105	0,125
Feinstaub	g/km	0,0045	0,0045

5. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Studie wurde mittels des am Lehrstuhl entwickelten Modells *FeVER* eine energetische Analyse des Einsatzes von Elektrofahrzeugen bei der Adresszustellung von Paketen in München durchgeführt. Es wurden Simulationen für mehrere Szenarien in acht Untersuchungsregionen (Bezirksteilen) unterschiedlicher räumlicher Struktur gewählt und dann anhand von diesen auf München hochgerechnet.

Die Analyse ergab, dass in allen Untersuchungsregionen und Szenarien das Potential für Endenergieeinsparungen und Vermeidung von Kohlenstoffdioxidemissionen eröffnet wird. Neben der Zustellwahrscheinlichkeit pro Haushalt haben die geographischen Eigenschaften der Untersuchungsregion hohen Einfluss auf den Energieeinsatz und den daraus resultierenden Emissionen. Insbesondere sind die Anzahl an Lieferungen pro Fahrzeugstopp, sowie die Entfernung des Bezirksteils von dem Depot gute Indikatoren des Endenergiebedarfs pro Lieferung. Ebenfalls beeinflusst der Standort des Fahrzeugdepots den Endenergiebedarf und die Kohlenstoffdioxid-Emissionen deutlich, da die An- und Abfahrt, da die An- und Abfahrt der Zustellfahrzeuge einen signifikanten Teil des Endenergiebedarfs bzw. der Emissionen darstellt.

Eine Konsolidierung der Sendungen von Logistikdienstleistern bietet die Chance zur Erhöhung der Einsparungen, wobei dies voraussichtlich zu organisatorischen Herausforderungen führen würde. Die Auslieferung zu gewissen Tageszeiten bzw. das Aufladen der Elektrofahrzeuge zu Tageszeiten mit höherer EE-Einspeisung bietet nur wenig Potenzial für weitere Emissionseinsparungen. Die Fahrzeuggröße hat keinen signifikanten Einfluss auf den Endenergiebedarf oder die Kohlenstoffemissionen.

Zusammengefasst betrachtet eröffnet der Einsatz von elektrischen Zustellfahrzeugen auf der letzten Meile der Paketzustellung das Potential zur erheblichen Reduktion von Endenergieeinsatz und Kohlenstoffdioxidemissionen. Angetrieben durch die Dekarbonisierung der Stromversorgung wird das Potenzial für Kohlenstoffdioxideinsparungen in diesem Bereich weiterhin ansteigen.

Quellenverzeichnis

- [1] L. Hardi, „Modellgestützte Energie- und CO₂-Bilanz der Letzten Meile des Lieferverkehrs mit quelloffenen Geodaten“. Dissertation, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, München, 2019.
- [2] *OpenStreetMap Wiki: DE: Grenze*. [Online] Verfügbar unter: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Grenze>. Zugriff am: 13. Februar 2019.
- [3] *Landeshauptstadt München: Anzahl der Privathaushalte nach Stadtbezirksteilen für das Jahr 2016 und 2017*. Sonderauswertung zur wissenschaftlichen Verwendung. Statistisches Amt München, 2018.
- [4] L. Hardi und U. Wagner, „Grocery Delivery or Customer Pickup—Influences on Energy Consumption and CO₂ Emissions in Munich“, *Sustainability*, Jg. 11, Nr. 3, S. 641, 2019.
- [5] K. Juhlich und Umweltbundesamt, *Spezifische Emissionsfaktoren für den Deutschen Strommix*. [Online] Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/bilder/dateien/2019-04-15_uba_tabelle_spezifische_ef_strommix_luftschadstoffe_update_2017.pdf. Zugriff am: 14. Oktober 2019.
- [6] Europäisches Parlament, *VERORDNUNG (EG) Nr. 715/2007: über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge*. [Online] Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007R0715&from=en>. Zugriff am: 14. Oktober 2019.

