

Potenziale für Lastenradtransporte in der Citylogistik | **RadLast** Leitfaden





Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Das Projekt „**RadLast**“ wird gefördert durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) aus Mitteln zur Umsetzung des Nationalen Radverkehrsplans 2020.

Autoren

Prof. Dr. Pirmin Fontaine

*Ingolstadt School of Management, Juniorprofessur für Operations Management
Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt*

Prof. Dr. Stefan Minner

Konstantin Geier

Maximiliane Rautenstrauß

Dr. Patricia Rogetzer

*TUM School of Management, Lehrstuhl für Logistik und Supply Chain Management
Technische Universität München*

Prof. Dr. Rolf Moeckel

Dr. Carlos Llorca

*Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, Professur für Modellierung räumlicher Mobilität
Technische Universität München*

Januar 2021

Das Projekt „RadLast“ wurde begleitet durch den **Projektbeirat** mit Vertreter*innen von: Bundesverband Paket und Expresslogistik (BIEK), Fördervereinigung Güterverkehrslogistik Regensburg (FGR) e. V., IHK Regensburg, Landeshauptstadt München, Liefery und tiramizoo GmbH.

// 1 Einleitung	7
1.1 Ziel der Broschüre	7
1.2 Zentrale Fragestellungen	7
1.3 Aufbau des Leitfadens	7
// 2 Rahmenbedingungen	8
2.1 Nutzung eines Mikro-Depot-Systems für die letzte Meile	8
2.1.1 Nutzen von Mikro-Depots	8
2.1.2 Anzahl und Positionierung von Mikro-Depots	10
2.2 Lastenräder	10
2.2.1 Evaluation von Lastenrädern	13
// 3 Nachfragemodell	17
// 4 Kostenmodell	19
4.1 Kostenfunktion	19
4.2 Einfluss der Kostenfaktoren	19
4.2.1 Servicekosten	19
4.2.2 Umschlagskosten	20
4.2.3 Fahrgeschwindigkeit Lastenrad (Kosten der allerletzten Meile)	20
4.2.4 Kosten der vorletzten Meile	21
4.2.5 Geographische Einflussfaktoren	21
// 5 Konsolidierung zwischen KEP-Dienstleistern	23
5.1 Einsparungen auf der allerletzten Meile	23
5.2 Ökonomische Bewertung der Konsolidierung	23
5.2.1 Lineare Kostenstruktur bei der Konsolidierung	24
5.2.2 Effizientere nichtlineare Kostenstruktur	24
// 6 Simulation der Güterströme	25
// 7 Analyse- und Visualisierungswerkzeug	27
7.1 Beschreibung Optimierungswerkzeug	28
7.2 Ergebnisse des Simulationsmodells	33

Inhaltsverzeichnis

// 8 Fallstudien	41
8.1 Ermittlung der Paketnachfrage	42
8.2 Fallstudie München	42
8.2.1 Datengrundlage	42
8.2.2 Ergebnisse	42
8.3 Fallstudie Regensburg	52
8.3.1 Datengrundlage	52
8.3.2 Ergebnisse	52
// Glossar	60
Literaturverweise	60
// Anhang 1: Nachfragemodell	62
Verfügbarkeit	62
Beschreibung der Datenbanken	62
Disaggregation der Güterverkehrsströme	63
Zeitliche Disaggregation	63
Umrechnung von Gewicht in Fahrzeuge	64
Räumliche Disaggregation	64
// Anhang 2: Kostenmodell	66
Abbildungen Kapitel 4.2	66
Kapitel 5	66
// Anhang 3: Simulation des Güterverkehrs	67
Verfügbarkeit	67
Multi Agent Transport Simulation (MATSim)	67
Freight-Erweiterung und jsprit-Algorithmus für Paketauslieferungen	67
Emissionen	68

Zentrale Ergebnisse der Studie

Gebiete mit schwieriger Parksituation für Transporter bieten ein **hohes Potenzial für Lastenräder**.

In städtischen Gebieten, in denen Platz knapp ist und Parkmöglichkeiten für Transporter gering sind, bieten für Lastenräder ein hohes Einsatzpotenzial.

Lastenräder erhöhen die gefahrenen Kilometer in der Innenstadt.

Durch die geringere Kapazität von Lastenrädern sind mehr Fahrten notwendig, was zu einer Erhöhung der gefahrenen Kilometer führt. Damit können Lastenräder zwar Emissionen in der Stadt reduzieren, jedoch nicht das Verkehrsaufkommen.

Die Potenziale können durch Reduktion der Servicekosten und der Umschlagskosten gesteigert werden.

Effiziente Lastenräder, die schnell geparkt und abgeschlossen werden können, sowie eine Ausstattung, die einen effizienten Umschlag am Mikro-Depot ermöglicht, heben besonders das Potenzial für Lastenräder.



Konsolidierung reduziert die gefahrenen Kilometer in der Innenstadt

Die Zusammenarbeit mehrerer Dienstleister führt zur einer deutlichen Reduktion der gefahrenen Kilometer auf der allerletzten Meile. Auch wenn die Anzahl an Transportern in einer Stadt nicht (oder kaum) reduziert wird, können Transporter effizienter auf verschiedene Gebiete aufgeteilt werden. Dadurch wird vermieden, dass verschiedene Dienstleister dieselben Straßen zum Liefern von Paketen befahren müssen.

Lastenräder reduzieren nicht die Kosten auf der letzten Meile

Auch wenn Lastenräder Potenziale zur Kostenreduktion liefern, sind diese aktuell noch minimal. Aus diesem Grund sind politische Anreize notwendig, um Dienstleistern den Wechsel zu erleichtern.



1 Einleitung

Im Projekt „RadLast“ wird das Potenzial von Lastenrädern für die letzte Meile mit Hilfe von Algorithmen interaktiv ermittelt, optimiert und visualisiert. Ein entwickeltes Planungswerkzeug erlaubt die Planung von Mikro-Depots. Die Städte München und Regensburg dienen zur exemplarischen Illustration für den klassischen Pakettransport.

1.1 Ziel der Broschüre

Ziel des Projekts ist die Potenzialanalyse der Nutzung von Lastenrädern als Transportmittel für die letzte Meile abhängig von Bedarfs- und Netzwerkstruktur. Das Netzwerk wird dabei durch Startpunkte und Ziele von Transportanforderungen in die Stadt, aus der Stadt sowie innerhalb der Stadt beschrieben. Wir verwenden ein zweistufiges Transportmodell, bei dem die entsprechende Infrastruktur von festen Mikro-Depots zu planen ist: Waren, die von außerhalb der Stadt kommen, werden mittels LKWs zu Mikro-Depots und von dort mittels Lastenrädern zum Endkunden geliefert. Um sowohl Kosten als auch Umweltaspekte zu analysieren, werden basierend auf einem mathematischen Optimierungsmodell Gebiete in der Stadt ermittelt, in denen sich Lastenräder besonders lohnen und in verschiedenen Szenarien verglichen.

Depots können entweder als Lager oder lediglich als Umschlagsort dienen. Die Anzahl der Depots hat einen Einfluss auf die Anzahl der benötigten Lastenräder und die Auslastung des Systems. Darüber hinaus hat die Anzahl von Depots einen Einfluss auf die Flexibilität des Systems, was bei den von Kunden erwarteten und immer kürzeren Lieferzeiten ausschlaggebend für den Erfolg ist. Mit Hilfe des entwickelten Werkzeugs zur Entscheidungsunterstützung und von Visualisierungen können die Ergebnisse anschaulich dargestellt werden. Das Werkzeug wird anhand von Fallstudien demonstriert, um das Potential von Lastenrädern zu ermitteln. Am Beispiel von München und Regensburg soll die Übertragbarkeit des Werkzeugs illustriert werden.

1.2 Zentrale Fragestellungen

Zentrale Fragestellungen, die innerhalb des Projekts „RadLast“ beantwortet wurden, sind:

- Welche Potenziale haben Lastenräder auf der (aller)letzten Meile? Das heißt, welche Anteile an Paketen können per Lastenrad ausgeliefert werden?
- In welchen Gebieten (München, Regensburg) können diese Potenziale genutzt werden?

1.3 Aufbau des Leitfadens

Der Leitfaden ist wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 werden die Rahmenbedingungen des Projekts „RadLast“ näher beschrieben und die nötigen Begrifflichkeiten im Zusammenhang mit Mikro-Depots, Lastenrädern und der letzten Meile geklärt. Kapitel 3 stellt dar, wie die Nachfrage im Projekt modelliert wurde. Kapitel 4 ermittelt im Rahmen des Kostenmodells das wirtschaftliche Potenzial von Lastenrädern. In Kapitel 5 wird die Möglichkeit der Konsolidierung diskutiert. Kapitel 6 simuliert die Güterströme. In Kapitel 7 wird das im Projekt entwickelte Visualisierungswerkzeug näher dargestellt. Kapitel 8 zeigt anhand von zwei Fallstudien die Anwendung und Auswertung des Werkzeugs für die Städte München und Regensburg.



Die mittels Lastenrädern regional durchgeführte Zustellung von Gütern an den Endkunden ist Teil der „Letzten Meile“-Belieferung. Im Zuge dieses Projekts wurde sowohl die Belieferung von Geschäftskunden (Business-to-Business, oder B2B) als auch von Privatkunden (Business-to-Customer, oder B2C) betrachtet. Bei der letzten Meile handelt es sich um „den letzten Abschnitt der physischen Lieferkette“ (Brabänder, 2020, S. 22).

Um Lastenräder hierbei effektiv und wirtschaftlich einsetzen zu können, spielt die Nutzung von „Mikro-Depot“-Systemen für Kurier-, Express und Paketdienstleister (KEP) eine entscheidende Rolle. Mikro-Depots werden am Innenstadtrand oder in der Innenstadt platziert und von KEP-Dienstleistern beliefert. Sie dienen unter anderem dem Umschlag der Güter auf Lastenräder, welche im Anschluss die Endkunden beliefern (Tripp, 2019, S. 268).

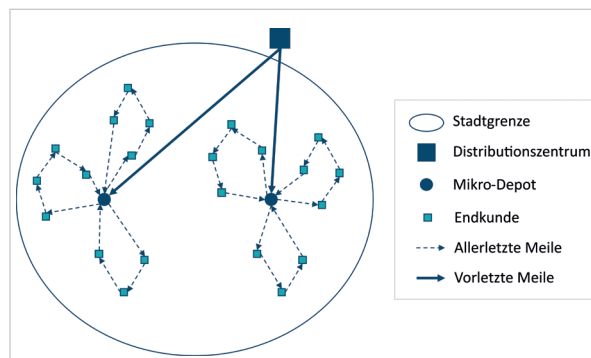
2.1 Nutzung eines Mikro-Depot-Systems für die letzte Meile

Ein Mikro-Depot hat einen Flächenbedarf von ca. 15 bis 25 m² und wird von Logistikdienstleistern genutzt, um die Zustellung von Gütern auf der letzten Meile zu ermöglichen (Bulwiengesa, 2017, S. 18ff.). Charakteristisch ist hierbei die Nähe zum Kunden. Der Zustellradius der Mikro-Depots ist hierbei unter anderem abhängig von der Anzahl und der Positionierung der Mikro-Depots und kann sich somit von Dienstleister zu Dienstleister (und von Mikro-Depot zu Mikro-Depot) unterscheiden. Aus diesem Grund wird in Kapitel 2.1.2 im Detail auf die Anzahl und Positionierung von Mikro-Depots eingegangen. Ein Mikro-Depot kann in Form eines Containers realisiert werden, welcher entweder stationär in der Stadt platziert wird oder mobil ist (Stodick und Deckert, 2019, S. 237). Ebenso kann die Nutzung eines Parkhauses, eines Geschäfts oder einer Logistikeinrichtung als Mikro-Depot in Betracht gezogen werden. Ein geparkter LKW bzw. LKW-Wechselbrücken (austauschbare Ladungsträger) oder Anhänger stellen zudem Alternativen eines Mikro-Depots dar (Bundesverband Paket und Expresslogistik e.V. (BIEK), 2019a).

Mikro-Depots teilen den Transport der letzten Meile in zwei Segmente, welche im Rahmen des Projekts wie folgt unterschieden werden: die „vorletzte“ und die „allerletzte“ Meile. Unter der vorletzten Meile versteht man den Transport der Güter von Distributionszentren eines Logistikdienstleisters, welche überwiegend am Stadtrand platziert sind, zu den einzelnen Mikro-Depots der Stadt. Die allerletzte

Meile beinhaltet die Zustellung der Güter von den Mikro-Depots an die Endkunden (Stodick und Deckert, 2019, S. 237). Die Unterteilung der letzten Meile wird in Abbildung 1 beispielhaft dargestellt. In diesem Beispiel werden zwei Mikro-Depots mittels Direktlieferungen vom Distributionszentrum mit Gütern versorgt (vorletzte Meile). Im Anschluss werden die Güter von den Mikro-Depots an den Endkunden zugestellt (allerletzte Meile). Die Belieferung der Mikro-Depots kann in der Praxis sowohl mittels Direktlieferungen als auch mittels Touren realisiert werden. Im Rahmen dieses Projekts wird angenommen, dass die Mikro-Depots per Direktverkehr beliefert werden oder als Wechselbrücke operieren und somit für die vorletzte Meile keine Tourenplanung durchgeführt wird.

Abbildung 1: Unterteilung der letzten Meile



2.1.1 Nutzen von Mikro-Depots

Mikro-Depots können für Logistikdienstleister vorteilhaft sein, da sich damit Transportvolumina der vorletzten Meile bündeln lassen. Es können Lastfahrzeuge oder auch umweltfreundliche e-LKWs genutzt werden, sodass das Transportvolumen in die Stadt pro Fahrzeug im Vergleich zum klassischen Transporter erhöht wird. Außerdem kann die Belieferung auf Zeiten mit geringerem Verkehrsaufkommen gelegt werden (z.B. durch Nachtbelieferung). Des Weiteren kann die Auslieferung der Güter auf der allerletzten Meile durch umweltfreundliche Transportmittel, wie beispielsweise Lastenräder, realisiert werden. Auf diese Weise ist es möglich, die städtische Infrastruktur, insbesondere den Verkehr, zu entlasten, sowie Emissionen einzusparen und Lärm zu reduzieren (Stodick und Deckert, 2019, S. 238).

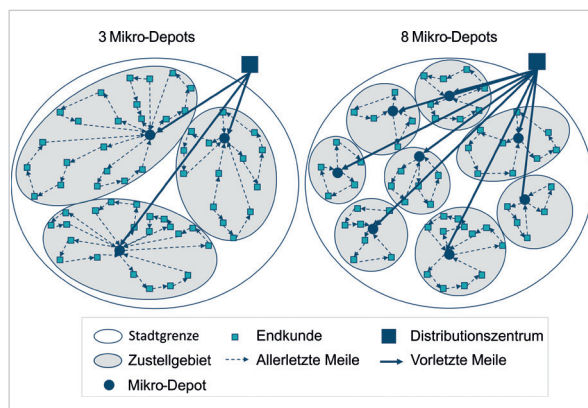
Neben den genannten Vorteilen birgt die Nutzung von Mikro-Depots auch Herausforderungen. Aufgrund des Mangels an nutzbaren Flächen sind die Flächenpreise für Mikro-Depots teilweise sehr

hoch, was die Kosten für den Umschlag und die Abwicklung indirekt erhöht (Tripp, 2019, S. 269). Aus diesem Grund ist auf Basis betriebswirtschaftlicher Kalküle abzuwägen, welche Anzahl an Mikro-Depots für einen KEP-Dienstleister sinnvoll ist und wo diese platziert werden sollen.

2.1.2 Anzahl und Positionierung von Mikro-Depots

Die Eignung eines Gebietes für Mikro-Depots ist abhängig von der Empfängerdichte, dem Sendungsaufkommen und städtebaulichen Bedingungen, wie beispielsweise der Lage innerstädtischer Grünflächen oder dem Zustand der Straßen in diesem Gebiet. Da die Zustellung mittels Lastenrädern für den Zusteller/die Zustellerin eine körperliche Belastung darstellt und die Kapazitäten des Transportmittels stark begrenzt sind, sind kleine Zustellradien vorteilhaft. Kleine Liefergebiete ermöglichen kurze Wege zum Nachladen des Lastenrads am Mikro-Depot. Größere Zustellradien bedeuten aus diesem Grund einen Effizienzverlust (Bundesverband Paket und Expresslogistik e.V. (BIEK), 2019a). Basierend auf diesen Erkenntnissen muss über die Anzahl an Mikro-Depots entschieden werden. Abbildung 2 zeigt, dass eine hohe Dichte an Mikro-Depots die Zustellradien der Depots verringern kann.

Abbildung 2: Zustellradien von Mikro-Depots in Abhängigkeit von der Dichte der Mikro-Depots



Kleine Zustellradien ermöglichen eine effiziente Zustellung der Güter auf der allerletzten Meile, jedoch muss berücksichtigt werden, dass die Errichtung jedes Mikro-Depots mit Kosten verbunden ist. Hinzu kommt, dass jedes Mikro-Depot beliefert werden muss (Vorlauf). Je höher die Anzahl an Mikro-Depots ist, desto höher ist der Planungsaufwand, wenn man alle Depots optimal beliefern möchte.

In Abbildung 2 werden die Transportströme zwischen dem Distributionszentrum und den Mikro-Depots beispielhaft veranschaulicht.

Die im Zuge des Projekts entwickelte Simulation und Optimierung dient als Entscheidungshilfe, weil sich dadurch Szenarien mit verschiedenen Dichten an Mikro-Depots vergleichen lassen.

2.2 Lastenräder

Lastenräder sind Transportmittel, die sich aufgrund integrierter Ladeflächen zum gewerblichen Transport von Gütern eignen. In Abhängigkeit von der Leistung des elektrischen Hilfsantriebs, falls vorhanden, kann zwischen folgenden Typen unterschieden werden: Pedelec-25 und S-Pedelec. Lastenräder des Typs Pedelec-25 werden rechtlich mit Fahrrädern gleichgestellt, vorausgesetzt der elektrische Hilfsantrieb unterschreitet die Nenndauerleistung von 0,25 kW (definiert als die „maximale Leistung über 30 Minuten an der Antriebswelle eines Elektromotors gemäß UN-ECE-Regelung Nr. 85“ (Art. 3 Nr. 35 Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates)). Zudem muss die Unterstützung bei steigender Geschwindigkeit des Lastenrads progressiv reduziert werden und Aussetzen, sobald diese 25 km/h beträgt oder der Fahrer das Lastenrad nicht mehr durch Muskelkraft antreibt (§ 1 Absatz 3 StVG).

Schnelle E-Bikes oder S-Pedelecs, welche Geschwindigkeiten von 45 km/h erreichen können und eine Nenndauerleistung von bis zu 0,5 kW besitzen, werden rechtlich den Kleinkrafträdern zugeordnet, welche zum Führen erlaubnispflichtig sind. Lastenräder können ein- oder mehrspurig sein und sich zudem bezüglich der Räderanzahl (2 bis 4 Räder) und des Zuladungsortes unterscheiden. Eine Zuladung ist sowohl zwischen den Achsen, als auch auf der Vorder- oder der Hinterachse möglich (Gruber und Rudolph, 2016, S. 9). Gruber und Rudolph (2016) unterteilen die Bauformen von Lastenrädern in 5 Kategorien und beschreiben diese wie in Tabelle 1 veranschaulicht. Für jede Bauform sind sowohl Modelle mit als auch Modelle ohne elektrischen Hilfsantrieb erhältlich.

Die vorgestellten Lastenradtypen werden in einer Vielzahl von Varianten von verschiedenen Herstellern und Händlern vertrieben. Hierbei können sich selbst Lastenradmodelle des gleichen Typs stark unterscheiden. Um dies zu veranschaulichen, werden in Tabellen 2, 3 und 4 verschiedene Lastenradmodelle der Unternehmen Tretbox GmbH und tri-cargo eG, sowie ein Modell von XCYC, einer Marke

der GWW (Gemeinnützige Werkstätten und Wohnstätten GmbH) vorgestellt. Das Lastenrad ONO wurde unter anderem im Zuge zweier Pilotprojekte von Hermes und Liefery genutzt (Tretbox GmbH, 2019).

Langträger, Longtail

Langträger bzw. Longtails sind einspurige Lastenräder, bei welchen die Zuladung auf der Hinterachse, meist an den Seiten des Hinterrads, befestigt wird. Auf diese Weise können Zuladungen mit einem Gewicht von bis zu 50 kg transportiert werden, ohne dass sich die Bedienung gegenüber der eines konventionellen Fahrrades stark unterscheidet.



Bäckerfahrrad, Postfahrrad

Bäcker- bzw. Postfahrräder gehören zu den einspurigen Lastenrädern und weisen eine große Ähnlichkeit zu konventionellen Fahrrädern auf. Die Zuladung ist sowohl vor als auch hinter dem Fahrer/der Fahrerin möglich, falls eine zusätzliche Ladungsfläche benötigt wird. Diese Art von Lastenrad kann in der Regel Zuladungen mit Gewichten im Bereich von 50 bis 75 kg transportieren.



Hecklader, Lastendreiräder, Trike

Hecklader, Lastendreiräder bzw. Trikes sind ein- oder zweispurige Lastenräder, bei welchen die Güter auf der Hinterachse des Lastenrads zugeladen werden. Zweispurige Hecklader verfügen somit über einen großen Stauraum, wodurch ein Transportgewicht von 500 kg möglich ist, ohne dass sie an Stabilität verlieren.



Tieflader, Long John, Frontlader, Bakfiets

Tieflader (Long Johns) sind Lastenräder, bei welchen die Zuladung vor dem Fahrer, zwischen der Lenksäule und Vorderrad, platziert wird. Durch den tiefliegenden Schwerpunkt und die Geometrie des Fahrradrahmens ist trotz eines hohen Transportgewichts die Wendigkeit noch immer gegeben.

Im Gegensatz zu Tiefladern, welche meist mit zwei Rädern (einspurig) angeboten werden, liegt der Fokus bei Frontladern (Bakfiets) auf der Stabilität. Aus diesem Grund haben diese meist drei Rädern und sind somit zweispurig.

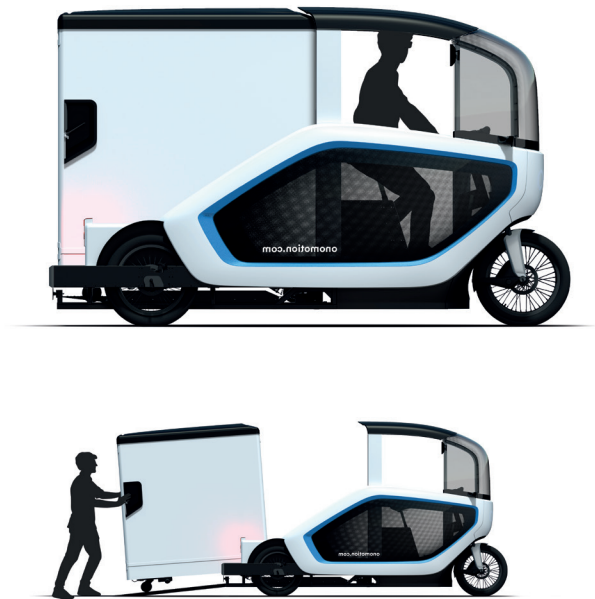


Fahrrad-Anhänger

Neben der Nutzung eines der genannten Lastenräder ist auch eine Kombination aus einem konventionellen Fahrrad bzw. Pedelec mit einem Fahrradanhänger möglich, um vor allem Güter mit großen Volumina (z.B. Möbel) zu transportieren. Da im Zuge des Projekts der Fokus auf Lastenrädern liegt, wird diese Kategorie im Folgenden nicht betrachtet.



ONO



Hersteller:
Tretbox GmbH

Fahrzeuggewicht:
ca. 150 kg

max. Zuladung:
300 kg inkl. Container

Ladevolumen:
über 2 m³

Akku-Kapazität(en):
1.400 Wh

Reichweite:
bis 80 km (2 Akkus)

Preis:
19 €/Tag (Leasing inkl.
verschiedener Serviceleistungen)

Wechsel des Containers durch im
Lastenrad integrierte Rampe möglich
(siehe untere Abbildung).

Tabelle 2: Vorstellung des Lastenrads ONO (Quelle: Tretbox GmbH)

Pickup Work 2.0



Marke: XCYC

Hersteller:
Gemeinnützige Werkstätten und
Wohnstätten GmbH

Fahrzeuggewicht:
100 kg

max. Zuladung:
150 kg (Ladefläche)

Ladevolumen:
ca. 1,56 m³

Akku-Kapazität:
500 Wh

Preis:
5.601,68 € (UVP, netto)

Tabelle 3: Vorstellung des Lastenrads Pickup Work 2.0 (Quelle: Gemeinnützige Werkstätten und Wohnstätten GmbH)

lademeister



Hersteller:
tricargo eG

Fahrzeuggewicht:
80 kg / 130 kg (leer ohne / mit Box)

max. zulässiges Gesamtgewicht:
450 kg

Ladevolumen:
2,17 m³ (in der Box)

Akku-Kapazität:
1.440 Wh

Reichweite:
40-80 km

Preis:
ab 9.990 € (netto)

Tabelle 4: Vorstellung des Lastenrads lademeister (Quelle: tricargo)

2.2.1 Evaluation von Lastenrädern

Ein Vergleich der Angebote von Lastenrädern bei verschiedenen Herstellern zeigt, dass zusätzlich zum Grundmodell des Lastenrads eine große Vielfalt an Ausstattung angeboten wird. Diese Angebotsvielfalt und Individualisierungsmöglichkeit der Lastenräder führt zu großen Preisunterschieden, sowohl zwischen den jeweiligen Lastenradtypen als auch zwischen Angeboten eines Lastenradtyps. Somit ist dem Käufer meist eine individuelle Konfiguration des Lastenrads möglich. Aus diesem Grund sollten bei der Evaluation von Lastenrädern die verschiedenen Lastenradtypen berücksichtigt werden.

Lastenräder profitieren von ihrer Wendigkeit und Größe, wodurch sie kleine Straßen, Fußgängerzonen und Radwege befahren sowie, falls zulässig, Einbahnstraßen in beiden Richtungen nutzen können. Zudem müssen Lastenräder nicht in zweiter Reihe geparkt werden, sodass Staus vermieden und die Fußwege des Zustellers/der Zustellerin reduziert werden können (Bundesverband Paket und Expresslogistik e.V. (BIEK), 2019a).

Kostenfaktoren

Die im Folgenden vorgestellte Angebotsrecherche basiert auf dem Vergleich von über 70 verschiedenen Lastenradmodellen angeboten von über 15, überwiegend deutschen, Herstellern, um einen Einblick in den deutschen Markt für Lastenräder zu geben. Aufgrund der individuellen Konfigurationsmöglichkeit der Lastenräder werden im Folgenden die Nettopreise der Basismodelle ohne zusätzliches Zubehör betrachtet. Des Weiteren wird zwischen Lastenrädern mit und ohne E-Antrieb unterschieden, um die preisliche Differenz zu veranschaulichen. In den meisten Fällen wird gegen einen Aufpreis zusätzliche Ausstattung angeboten, wie beispielsweise eine zusätzliche Ladefläche, Transportboxen, eine Werbefläche oder ein (leistungsstärkerer) E-Antrieb. Die Ergebnisse der Angebotsrecherche werden in Tabelle 5 dargestellt.

Lastenradtyp	Ohne E-Antrieb		Mit E-Antrieb	
	Preisspanne	Durchschnittspreis	Preisspanne	Durchschnittspreis
Langträger/ Longtail	839 € - 1.680 €	1.344 €	1.680 € - 4.201 €	3.249 €
Bäcker/ Postfahrrad	374 € - 1.328 €	684 €	1.550 € - 2.403 €	1.946 €
Hecklader/ Lasten- dreiräder/Trike	587 € - 3.781 €	2.201 €	2.975 € - 9.990 €	4.947 €
Tief-/Frontlader/ Long John/ Bakfiets	1.176 € - 5.209 €	3.044 €	1.957 € - 6.059 €	3.851 €

Tabelle 5: Preisspanne von Lastenrädern

Die Recherche macht deutlich, dass Bäcker- und Postfahrräder, bezogen auf den Nettopreis, die günstigste Alternative darstellen, während die Kategorie der Tief-/Frontlader und Hecklader die teuersten Modelle enthält. Wie zu erwarten muss bei Lastenrädern mit Elektro-Motor mit höheren Anschaffungskosten gerechnet werden als bei Modellen, die über keine elektrische Unterstützungshilfe verfügen.

Neben den Anschaffungskosten fallen für Lastenräder mit E-Antrieb Betriebskosten für das Aufladen der Akkus an. Im April 2019 lag der Strompreis für Gewerbekunden bei ca. 0,22 €/kWh. Dieser Strompreis basiert auf dem arithmetischen Mittelwert von 969 Lieferanten und einem Jahresverbrauch von 50 MWh (Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt, 2019, S. 286f.). Ausgehend von diesem Strompreis und einem Akku mit 500 Wh (0,5 kWh) liegen die Stromkosten eines Ladevorgangs bei ca. 0,11 €.

Die Lebensdauer der Lastenrad-Akkus ist abhängig von verschiedenen Einflussgrößen, wie beispielsweise der Temperatur oder den Lagerungsbedingungen am Aufbewahrungsort des Lastenrades. Zusätzlich spielt das Ladeverhalten des Nutzers eine entscheidende Rolle, welche die maximale Anzahl an Ladezyklen beeinflussen kann. Die Lebensdauer der Lastenrad-Akkus ist zudem abhängig vom spezifischen Akku-Typ, der für den elektrischen Antrieb verwendet wird. Bei manchen dieser Akku-Typen ist die Lebensdauer auf ma-

ximal 1.000 Ladezyklen begrenzt. Es gibt jedoch auch Akku-Typen, bei denen eine längere Lebensdauer möglich ist (Wachotsch et al., 2014). Ausgehend von 1.000 Ladezyklen und Stromkosten von 0,11 € je Ladezyklus fallen somit über die gesamte Lebensdauer des Lastenrad-Akkus Stromkosten von ca. 110 € an.

Die Reichweite einer Akkuladung wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst und unterliegt aus diesem Grund Schwankungen. So wird die Reichweite unter anderem durch den Antrieb und Akku, die Fahrgeschwindigkeit, das Fahrgewicht, die Trittfrequenz des Fahrers, die Straßen- und Witterungsbedingung, sowie die Anfahrhäufigkeit beeinflusst (Robert Bosch GmbH, o. D.). Die angegebene Reichweite der betrachteten Modelle liegt aufgrund der Vielfältigkeit der Lastenräder zwischen 30 km und 250 km. Somit kann sich die gefahrene Kilometerleistung über die Lebensdauer des Lastenrads von Modell zu Modell stark unterscheiden. Für Fahrräder veranschlagt das Bundesministerium der Finanzen laut AfA-Tabelle eine betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer von 7 Jahren. Somit kann in Abhängigkeit von der Reichweite des Akkus und der Anzahl an möglicher Ladezyklen ein Austausch des Akkus während der Lebensdauer des Lastenrads erforderlich sein.

Das Lastenradmodell beeinflusst zudem das erforderliche Umschlagssystem und somit die Kosten der Infrastruktur des Mikro-Depot-Systems. Ermöglichen die eingesetzten Lastenräder den

Transport und Austausch von ganzen Ladeeinheiten, wie beispielsweise beladenen Paletten, Containern oder anderen Transportbehältern, so kann die Ware bereits in den entsprechenden Ladeeinheiten angeliefert und die Ladeeinheit ohne Umladung der Güter auf das Lastenrad umgeschlagen werden. Je nach Größe und Gewicht der Ladeeinheiten ist es erforderlich, die Ladeeinheiten mit Rollen auszustatten oder entsprechende Förderhilfsmittel am Mikro-Depot zur Verfügung zu stellen. Ist kein Umschlag von ganzen Ladeeinheiten möglich, so müssen die angelieferten Güter am Mikro-Depot auf die Lastenräder verteilt werden. Im Idealfall sollten hierbei die Güter nicht gelagert, sondern lediglich umgeschlagen werden. Am Mikro-Depot erfordert dies sowohl Zeit als auch Kosten, da die erforderliche Umschlagsfläche den Platzbedarf des Mikro-Depots erhöht. Im Zuge dieses Projekts wird die Annahme getroffen, dass die Güter im Mikro-Depot umgeladen werden müssen und kein direkter Umschlag ganzer Ladeeinheiten möglich ist.

Emissionen

Neben den Kostenfaktoren sollten auch die durch Lastenräder verursachten Emissionen in die Analysen miteinfließen. Lastenräder ohne elektrischen Antrieb setzen im Laufe ihrer Nutzung praktisch keine Emissionen frei. Bei Lastenrädern mit elektrischer Unterstützungshilfe sollten jedoch die indirekten CO₂-Emissionen, welche im Zusammenhang mit der Bereitstellung des Stroms für das Laden der Fahrrad-Akkus stehen, berücksichtigt werden. Die CO₂-Emissionen eines Lastenrads sind vom Energieverbrauch des Lastenrads sowie von den CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde (kWh) bei der Stromerzeugung abhängig. Die Formel zur Berechnung der CO₂-Emissionen wird in Anhang 2 detailliert erläutert. Der in den Fallstudien angenommene Wert für den Stromverbrauch der Lastenräder sowie eines elektrifizierten bzw. eines Diesel-Transporters und die zugehörigen Emissionsfaktoren für die Stromerzeugung sind in Tabelle 6 aufgelistet und werden im Zuge der Fallstudie (Kapitel 8) verwendet.

Kraftstoffverbrauch Transporter	➤ Kraftstoffverbrauch eines Diesel- Transporters pro Distanz	➤ 20 l/100 km (Tipagornwong & Figliozzi, 2014)
Emissionsfaktor für Kraftstoffverbrauch	➤ CO ₂ -Emissionen pro Liter Kraftstoff	➤ 3,170 g/l (DIN EN 16258:2012, 2013)
Stromverbrauch Lastenrad	➤ Stromverbrauch eines Lastenrads pro Distanz	➤ 3 kWh/100 km (Saenz et al., 2016)
Stromverbrauch Transporter	➤ Stromverbrauch eines elektrifizierten Transporters pro Distanz	➤ 50 kWh/100 km (Giordano et al., 2018)
Emissionsfaktor für Stromerzeugung	➤ CO ₂ -Emissionen pro erzeugter kWh	➤ 518 g/kWh (Icha & Kugs, 2019)

Tabelle 6: Parameter der Fallstudie - Emissionen



Im Rahmen des Projekts RadLast wurde das Open-Source Simulationsmodell FOCA (Freight Orchestrator for Commodity flows Allocation) entwickelt. FOCA ist ein agentenbasiertes Modell, das eine synthetische Nachfrage von zugestellten Paketen in einem bestimmten Untersuchungsgebiet generiert. Das Modell basiert auf der Disaggregation von Güterströmen zwischen verschiedenen geographischen Zonen. In diesem Fall basiert das Modell auf der Disaggregation der Verflechtungsprognose 2030 (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2014), die jährliche transportierte Gütermengen nach Güterart zwischen den verschiedenen Landkreisen Deutschlands und ihrer Umgebung beziffert. Im Projekt RadLast wird die Anwendung des Modells auf Pakete beschränkt, weil für diese Art der Güterströme das größte Potential für Lastenräder zu erwarten ist. Der Disaggregationsprozess rechnet die jährlichen Ströme in einzelne Pakete um, die an einem simulierten Tag zugestellt werden.

te dies mit Daten, die saisonale Schwankungen berücksichtigen (siehe dazu etwa BIEK, 2018c), durchgerechnet werden. Dann werden die Ströme auf Grundlage der Auslastungsfaktoren in LKW umgerechnet und Fahrten der LKWs generiert. Jeder LKW fährt zu einem Verteilzentrum, wo die Ladung verarbeitet wird. Alle Ströme, die in jedem Verteilzentrum eingehen, werden in einzelne Sendungen disaggregiert. Die Verteilung der Größe der Sendungen wurde so angepasst, dass die Gesamtzahl der Parzellen der beobachteten Parzellenzahl (BIEK, 2018) entsprach (bezogen auf den Studienbereich, z.B. Stadt München).

Pakete, die direkt an (oder von) Verbraucher geliefert werden, werden mit den Koordinaten der Verbraucher versehen. Die räumliche Verteilung der Verbraucher basiert auf der Bevölkerungsdichte (bei Paketen Business-to-Customer, oder B2C) oder auf der Beschäftigungsdichte (bei Paketen Business-to-Business, oder B2B). Ein Beispiel der Koordinaten der Kunden befindet sich in Abbildung 4.

Abbildung 3: Nachfragemodell-Flussdiagramm

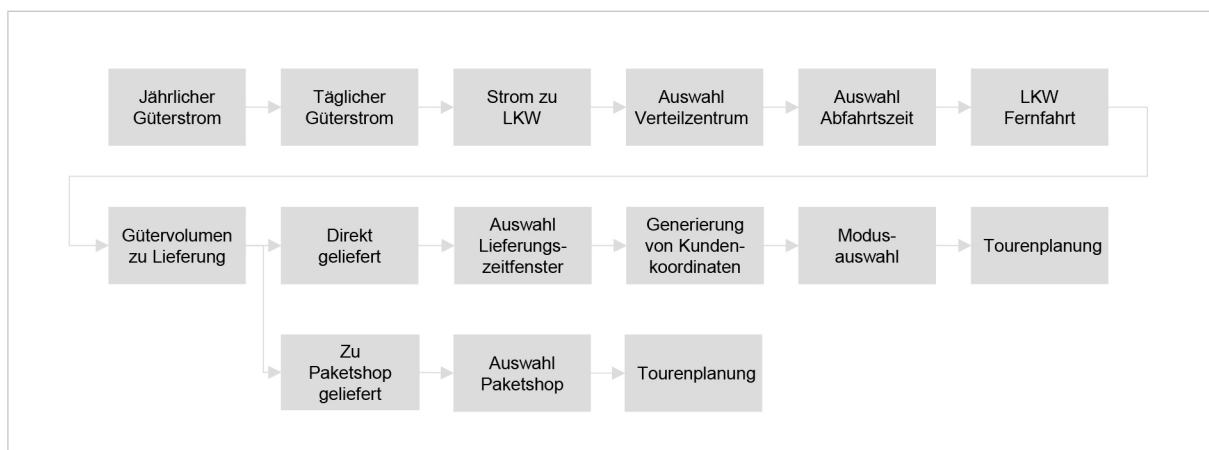


Abbildung 3 zeigt das Flussdiagramm des Modells. Die erste Zeile zeigt die Erzeugung von LKW-Fernverkehrsfahrten. Die zweite und dritte Zeile erklärt die Erzeugung der Paketnachfrage. Das Modell rechnet zuerst die jährlichen Güterströme in tägliche Durchschnittsflüsse um. Dies ist eine übliche Vorgehensweise in der Verkehrsplanung. Zur Erhöhung der Genauigkeit können

Für jedes Paket werden auch Zeitfenster definiert. Sobald die gesamte Nachfrage generiert ist, wird in jedem Zielzone für jede Belastungsklasse ein optimaler Modalanteil berechnet, der die Kosten der Zustellung, wie in Kapitel 4 definiert, minimiert. Danach erfolgt eine agentenbasierte Simulation der Liefertouren, die in Kapitel 6 beschrieben wird.

Abbildung 4: Anzeige der Koordinaten der Lieferungen (Quelle: Hintergrundkarte von OpenStreetMap.org)



Pakete, die direkt an (oder von) Paketshops geliefert werden, sind auch Teil des Generierungsprozesses. Die Lieferungskosten dieses Anteils werden in Kapitel 4 nicht berücksichtigt. Wir nehmen an, dass Pakete an (oder von) Paketshops immer mit dem Transporter geliefert werden.

Das Modell FOCA ist „open source“ und kann unter <https://github.com/msmobility/foca> kostenlos heruntergeladen werden. Für die Anwendung dieses Modells wird jedoch empfohlen, Verkehrsmo-

dellierer zu Rate zu ziehen, damit die Ergebnisse sinnvoll interpretiert werden können. Es wurde ferner ein Visualisierungswerkzeug entwickelt, um eine Reihe von bereits simulierten Szenarien (wie später in Kapitel 8 beschrieben) in München und Regensburg zu visualisieren. Diese Visualisierungen ermöglichen es auch Nichtverkehrsmodellierern, mit den Ergebnissen des Modells zu arbeiten.

Zur Bewertung der wirtschaftlichen Potenziale von Lastenrädern wird eine allgemeine Kostenfunktion genutzt und entsprechend der verschiedenen Transportsysteme angepasst.

4.1 Kostenfunktion

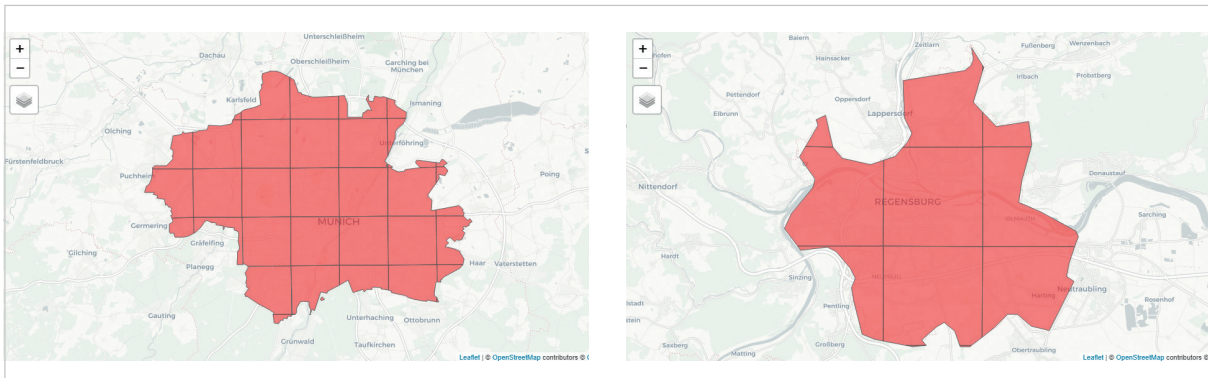
Die Kostenfunktion basiert auf Fontaine et al. (2020) und berücksichtigt neben den im folgenden Abschnitt definierten Kosten- und Zeitparametern die geographisch abhängigen Parameter der Paketdichte und Distanzen in verschiedenen Gebieten. Grundlegend ist dabei die Annahme, dass die zu betrachtende Stadt oder Kommune in Zonen eingeteilt wird (siehe etwa unten in Abbildung 5 für München und Regensburg), um für jedes dieser Gebiete

persönliche Auslieferung berücksichtigen und (2c) die zusätzlichen Umschlagskosten, die entstehen, wenn ein Mikro-Depot genutzt wird. Entscheidend ist hierbei, dass diese Kostenkomponenten neben den Kosten für Personal auch die Kosten für Geräte, Mieten, Abschreibungen, Wartung, etc. enthalten. Eine detaillierte Beschreibung der Kostenfunktion befindet sich in Anhang 3.

4.2 Einfluss der Kostenfaktoren

Basierend auf der Kostenfunktion werden nun die verschiedenen Kostenfaktoren und deren genereller Einfluss auf das Potenzial von Lastenrädern analysiert. Dazu werden neben dem allgemeinen Einfluss, der verallgemeinerbar ist, zusätzlich Beispiele,

Abbildung 5: Zoneneinteilung in München und Regensburg (Quelle: Hintergrundkarte CartoDB)



die Potenziale zu berechnen. Die Gebietseinteilung kann hier anhand von Stadtgebieten erfolgen, aber auch anhand anderer Raster, die beispielsweise auf vorhandenen Daten basieren.

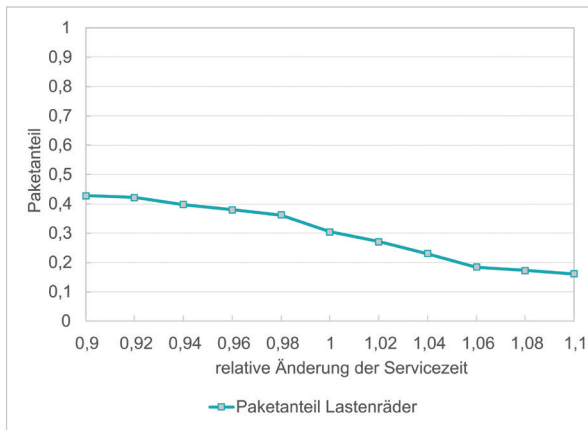
Die resultierenden Kosten bestehen aus den Kosten für die vorletzte Meile (1) und den Kosten der allerletzten Meile (2). Die vorletzte Meile berücksichtigt dabei den Weg vom Distributionszentrum zum Mikro-Depot im Fall von Lastenrädern oder den Weg vom Distributionszentrum in das Gebiet im Fall von herkömmlichen Transportträgern wie Transportern. Die allerletzte Meile umfasst alle Kosten, die in der innerstädtischen Verteilung auftreten und werden in die folgenden drei Teilbereiche eingeteilt: (2a) distanz- und zeitabhängige Fahrkosten innerhalb des Gebiets, (2b) paketabhängige Servicekosten, die sowohl die Suche nach einem Parkplatz als auch die Zeit für die

die auf den Parametern der Fallstudie (Kapitel 7) in München beruhen, grafisch dargestellt. Dazu wurden verschiedene Parameter variiert (Details siehe Anhang 2). Die folgenden Unterkapitel zeigen jeweils die Auswirkungen einer relativen Änderung des Lastenradparameters im Vergleich zu den Parametern der Fallstudie. Details zur Datengrundlage für die Abbildungen 6 bis 8 befinden sich in Anhang 2.

4.2.1 Servicekosten

Die Servicekosten entstehen durch die Zeit, die benötigt wird, um einen Parkplatz zu finden, das Fahrzeug zu parken, das Paket abzuliefern und anschließend zum Fahrzeug zurückzukehren. Abbildung 6 zeigt, dass die Servicezeit einen großen Einfluss auf das Potenzial von Lastenrädern hat.

Abbildung 6: Einfluss der Servicezeit auf das Potenzial für Lastenräder



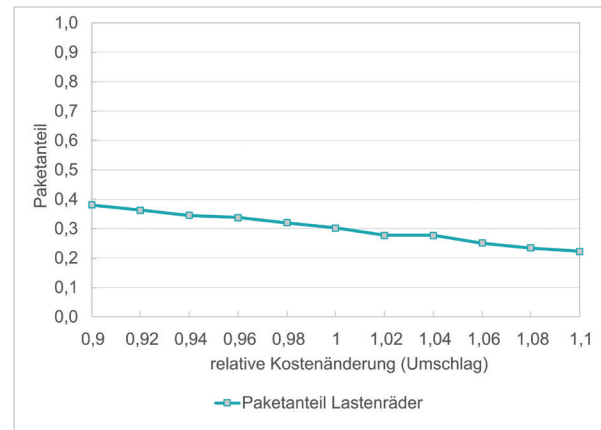
Da die Zeit der Paketlieferung beim Kunden unabhängig vom Transportträger ist, gibt es zwei wesentliche Faktoren: Die Parkplatzsuche und den Parkvorgang. Entscheidend ist, dass die Zeit der Parkplatzsuche exogen durch das jeweilige Gebiet vorgegeben wird. Dabei spielen Faktoren wie Straßensituation, Verkehr und allgemeine Parkmöglichkeiten eine Rolle. Der Parkvorgang selbst wird hingegen bei Lastenrädern durch das Modell bestimmt. Die Meinungen aus der Praxis zeigen, dass es hier große Unterschiede gibt und beispielsweise das Absperren eines Lastenrads noch deutlich vereinfacht werden könnte.

Gebiete mit schwieriger Parksituation für Transporter bieten ein hohes Potenzial für Lastenräder.

4.2.2 Umschlagskosten

Unterschiedliche Umschlagskosten zwischen den Modi treten lediglich bei zweistufigen Systemen auf, wo die Ware auf der vorletzten Meile in ein Mikro-Depot geliefert und anschließend auf der allerletzten Meile mit Hilfe von Lastenrädern ausgeliefert wird. Da diese Mehrkosten immer an anderer Stelle kompensiert werden müssen, steigert ein kostengünstiger Umladeprozess sowie geringe Kosten für ein Mikro-Depot das Potenzial für Lastenräder.

Abbildung 7: Einfluss der Umschlagskosten auf das Potenzial für Lastenräder

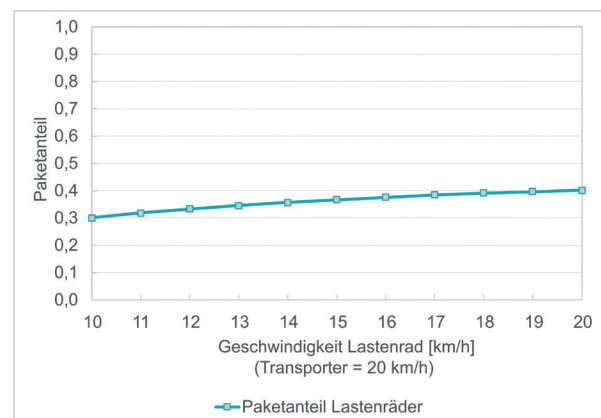


Zur Nutzung des Potenzials von Lastenrädern ist ein effizienter Umschlag am Mikro-Depot nötig.

4.2.3 Fahrgeschwindigkeit Lastenrad (Kosten der allerletzten Meile)

Unsere Analysen zeigen, dass der Anteil der effektiven Fahrtzeit des Lastenrads (ohne die Zeit für die Parkplatzsuche) an der gesamten Arbeitszeit im innerstädtischen Bereich relativ gering ist. Aus diesem Grund hat eine höhere Geschwindigkeit des Lastenrads nur einen geringen positiven Einfluss auf die Kosten der allerletzten Meile und somit auf das Potenzial für Lastenräder.

Abbildung 8: Einfluss der Geschwindigkeit auf das Potenzial für Lastenräder

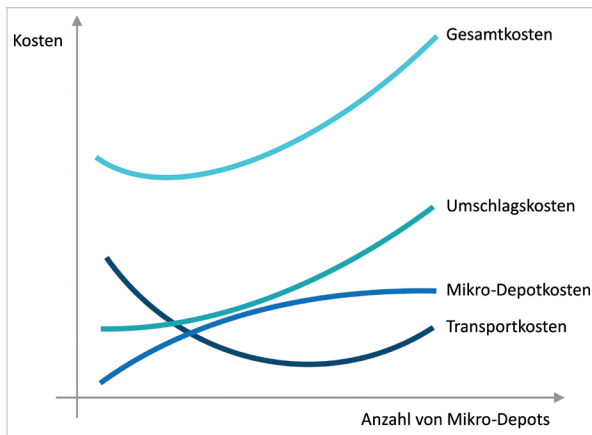


Die Fahrgeschwindigkeit des Lastenrads hat nur einen geringen Einfluss.

4.2.4 Kosten der vorletzten Meile

Im zweistufigen System können die Kosten der vorletzten Meile vor allem durch die Wahl der Mikro-Depot-Kapazität beeinflusst werden. Bei hoher Kapazität, die mit wenigen Fahrzeugen beliefert werden kann, entsteht so ein Konsolidierungseffekt bis zum Mikro-Depot, der dann auch die zusätzlichen Umschlagskosten kompensieren kann. Abbildung 9 zeigt diesen Zusammenhang grafisch.

Abbildung 9: Zusammenhang zwischen Gesamtkosten und Anzahl an Mikro-Depots (In Anlehnung an Pfohl, 2016, S. 107)



Die Fahrten von LKW und Lieferfahrzeugen der letzten Meile werden, wie in Abbildung 1 gezeigt, simuliert. Die Fahrten von Lastwagen und die Fahrten von Kleintransportern werden auf das Straßennetz umgelegt. Die Definition von Liefertouren und die Routenauswahl erfolgt mittels des Transportmodells MATSim (Multi Agent Transport Simulation) (Horni et al., 2016) und der Erweiterung „freight“

(Schroeder et al., 2012). Dementsprechend werden die Routenwahlen der einzelnen Fahrzeuge während des simulierten Tages dargestellt.

Das Straßennetz wurde von OpenStreetMaps heruntergeladen. Der Detaillierungsgrad dieses Netzes ist graduell, von nur Autobahnen außerhalb Deutschlands über Hauptstraßen in Deutschland bis hin zu Wohnstraßen in den Untersuchungsgebieten München und Regensburg. Abbildung 13 zeigt die Straßennetze in München und Regensburg.

4.2.5 Geographische Einflussfaktoren

Jedes Gebiet der Stadt wird im Wesentlichen durch die Paketdichte und die Distanz zum Güterverteilzentrum beschrieben. Vergleicht man das einstufige System, d.h. die klassische Auslieferung ohne Mikro-Depot, mit dem zweistufigen System, d.h. Lastenräder mit Mikro-Depots, so wird dabei ersichtlich, dass sich zweistufige Systeme erst ab einer gewissen Paketdichte lohnen. Dieses Potenzial steigt mit steigender Paketdichte. Andererseits wirkt sich auch eine größere Entfernung zwischen Güterverteilzentrum und Mikro-Depot positiv auf das Potenzial aus. Durch größere Distanz steigt das Potenzial für Lastenräder, da durch die Konsolidierungseffekte auf der vorletzten Meile, die durch das höhere Transportvolumen im Vergleich zum Transporter entstehen, auch bei geringeren Paketmengen Einsparungen möglich sind.

Mikro-Depots lohnen sich erst ab einer gewissen Distanz zum Depot und ab einer gewissen Paketdichte.

Parameter	Auswirkung von steigenden Parameterausprägungen auf die Kosten pro Paket beim Lastenfahrrad...				Potenzial für Lastenfahrrad
	auf der vorletzten Meile	auf der allerletzten Meile	bei den Umschlagskosten	bei den Servicekosten	
Paketdichte	-	↓	-	-	↑↑
Distanz: Güterverteilzentrum - Mikrodepot	↑ (aufgrund der Fahrtkosten)	-	-	-	↑↑↑
Mikrodepotkapazität	↓ (Konsolidierungseffekt)	-	↑ (aufgrund des Flächenpreises)	-	↑↑↑
Geschwindigkeit der Lastenräder	-	↓	-	-	↑
Verkehr (ohne Exklusive Radwege)	↑	↑	-	↑	-
Verkehr (lediglich beim Transporter)	↑	↓	-	↓	↑↑↑
Schwierigkeit der Parkmöglichkeiten	-	-	-	-	↑↑

Tabelle 7: Auswirkungen der Änderung von Parametern auf Kosten (Lastenrad vs. Transporter)



Konsolidierung zwischen KEP-Dienstleistern

Die Konsolidierung zwischen verschiedenen KEP-Dienstleistern wurde bisher in verschiedenen Studien (Bogdanski, 2019; Bundesverband Paket und Expresslogistik e.V. (BIEK), 2019b; Kummer et al., 2019) untersucht. Diese kamen in der Regel zu dem Ergebnis, dass Konsolidierung entweder nur einen geringen oder keinen positiven Effekt auf die urbane Logistik im Sinne beispielsweise der Anzahl von Zustellfahrzeugen oder auf verkehrsrelevante Effekte hat. Im Gegenteil: vermutlich hat sie sogar negative Auswirkungen. Die Idee der Konsolidierung ist dabei, dass die Pakete verschiedener Dienstleister in der Stadt ankommen und dann dienstleisterübergreifend ausgeliefert werden.

Wir zeigen in unseren Untersuchungen, dass eine differenzierte Betrachtung der letzten Meile (Aufteilung in vorletzten und allerletzten Abschnitt) notwendig ist, um Potenziale der Konsolidierung beurteilen zu können. Darüber hinaus kann aufgezeigt werden, dass die Art und somit die Kosten der Umsetzung eines konsolidierten Logistiksystems (oftmals auch als City-Logistik-System bezeichnet) ein entscheidender Faktor ist.

5.1 Einsparungen auf der allerletzten Meile

Bei der Konsolidierung ist entscheidend, dass zwischen der vorletzten und der allerletzten Meile unterschieden wird. Da KEP-Dienstleister üblicherweise mit voller Auslastung operieren, sind auf dem Weg vom Güterverteilzentrum in das Gebiet (ob im klassischen Transporter oder bei einem 2-stufigen System mit Mikro-Depots) keine oder maximal sehr geringe Potenziale vorhanden. Das bestätigen auch bisherige Ergebnisse die zeigen, dass die Anzahl an Fahrzeugen nicht oder nur geringfügig reduziert werden kann (Bogdanski, 2019).

Die Potenziale der Konsolidierung liegen auf der allerletzten Meile, da hier nicht mehrere Dienstleister überlappende Touren fahren, sondern Gebiete durch die resultierende höhere Paketdichte besser auf überlappungsfreie Touren aufgeteilt werden können. Da Mikro-Depots häufig morgens beliefert werden und, wenn als Wechselbrücke operierend, Pakete abends abgeholt werden, wird somit der Verkehr tagsüber entlastet. Gleiches gilt auch für herkömmliche Systeme wie den Transporter.

Da für Städte und Kommunen besonders die Betrachtung des innerstädtischen Verkehrs von Relevanz ist, ist die Betrachtung von Konsolidierung zwischen KEP-Dienstleistern für politische Entscheidungsträger von hoher Relevanz.

Die Einsparpotenziale hängen dabei vor allem von der Anzahl der konsolidierenden KEP-Dienstleister ab. Unter der Annahme, dass zwei KEP-Dienstleister ein gleich effizientes Transportsystem nutzen, liegt dieses Einsparpotenzial bei circa 29% auf der allerletzten Meile, sodass hier das Verkehrsaufkommen um 29% reduziert werden kann. Das Potenzial steigt mit der Anzahl der KEP-Dienstleister. Tabelle 8 zeigt hier das Einsparpotenzial abhängig von der Anzahl der KEP-Dienstleister.

Anzahl KEP-Dienstleister	Einsparung auf der allerletzten Meile
2	29 %
3	42 %
4	50 %
5	55 %

Tabelle 8: Einsparpotenzial auf der allerletzten Meile

Die Einsparpotenziale der Konsolidierung liegen auf der allerletzten Meile, d.h. dem Verkehr während der Auslieferung in der Stadt.

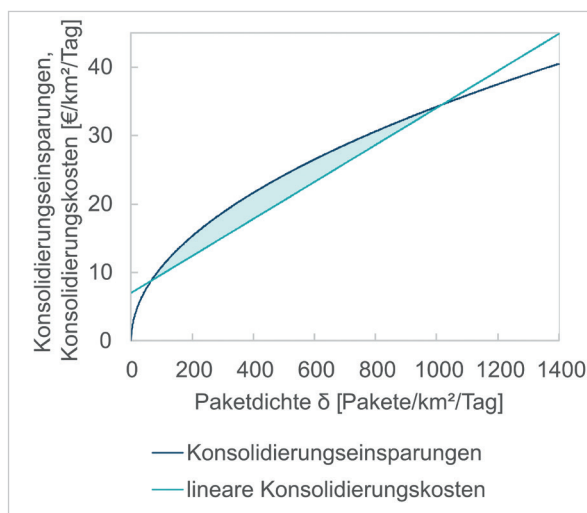
5.2 Ökonomische Bewertung der Konsolidierung

Eines der Hauptargumente gegen die Konsolidierung sind die erhöhten Kosten, die durch den Mehraufwand bei der Konsolidierung entstehen sowie die zusätzlichen Kilometer, die im Vorlauf anfallen. Wir zeigen, dass die Umsetzung eines konsolidierten Systems entscheidende Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit eines solchen Systems hat. Unter der Annahme, dass die KEP-Dienstleister zuerst ihre eigenen Güterverteilzentren der jeweiligen Stadt beliefern und anschließend Pakete untereinander austauschen, entstehen im Vorlauf erhebliche Mehrkosten (und Mehrkilometer). In Projekten, wie etwa dem City Logistik Projekt in Regensburg (1998 bis 2012) oder der Studie von Fraunhofer zu City-Logistik-Projekten (Wolpert, 2013) hingegen wurde die Ware bereits vor der Stadt mittels Transportern in ein konsolidierendes Güterverteilzentrum geliefert, sodass kein Austausch notwendig war.

5.2.1 Lineare Kostenstruktur bei der Konsolidierung

Neben den Fixkosten, die für die generelle Installation eines konsolidierten Systems anfallen, treten für jedes Paket zusätzliche Konsolidierungskosten auf. Aufgrund der Fixkosten muss eine gewisse Paketmenge erreicht werden. Da das Einsparpotenzial jedoch nicht linear ansteigt, gibt es auch eine obere Grenze. Das Einsparpotenzial wird hierbei so gering, dass die zusätzlichen Mehrkosten nicht mehr kompensiert werden können. Abbildung 11 zeigt beispielhaft einen solchen Korridor mit Einsparpotenzial. Die breite dieses Korridors variiert dann abhängig von der individuellen Kostenstruktur im jeweiligen Fall. Im Beispiel aus Abbildung 11 würde das bei einer Paketdichte von 400 Paketen pro Quadratkilometer zu Einsparungen von fünf Cent pro Paket gegenüber Konsolidierungskosten von 4 Cent pro Paket führen. Ab 1000 Paketen pro Tag pro Quadratkilometer ist die Konsolidierung allerdings nicht profitabel, da die Konsolidierungskosten die Einsparungen übersteigen.

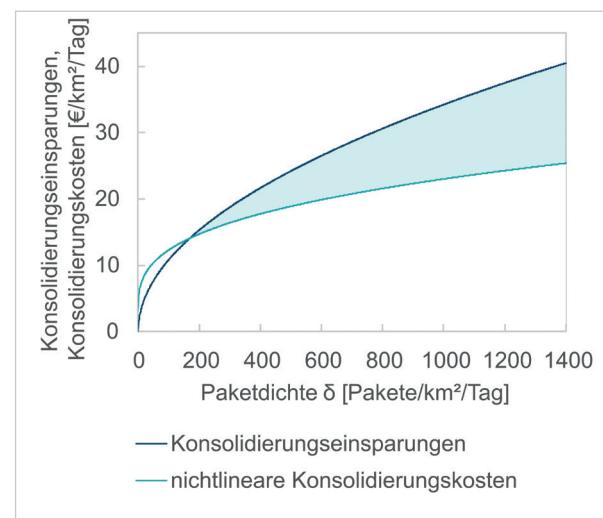
Abbildung 11: Exemplarische lineare Kostenstruktur bei der Konsolidierung



5.2.2 Effizientere nichtlineare Kostenstruktur

Wird ein effizientes Konsolidierungssystem genutzt, bei dem die zusätzlichen Kosten nicht linear ansteigen weil Waren bereits vor der Ankunft in die Stadt in das Güterverteilzentrum für die Auslieferung auf der letzten Meile umgeleitet werden, dann gibt es keine obere Grenze. Die untere Schranke bleibt jedoch weiter bestehen. Abbildung 12 zeigt beispielhaft dieses Einsparpotenzial. Bei einer Paketdichte von 400 Paketen pro Quadratkilometer ist wieder eine Kostenreduktion von circa einem Cent pro Paket möglich, allerdings erhöht sich dieses Einsparpotenzial auf 1,1 Cent bei 1000 Paketen pro Quadratkilometer.

Abbildung 12: Exemplarische nichtlineare Kostenstruktur bei der Konsolidierung



Die kosteneffiziente Implementierung der Konsolidierung ist entscheidend, da sonst Zusatzkosten das Einsparungspotenzial der Konsolidierung überschreiten.

Die Fahrten von LKW und Lieferfahrzeugen der letzten Meile werden, wie in Abbildung 1 gezeigt, simuliert. Die Fahrten von Lastwagen und die Fahrten von Kleintransportern werden auf das Straßennetz umgelegt. Die Definition von Liefertouren und die Routenauswahl erfolgt mittels des Transportmodells MATSim (Multi Agent Transport Simulation) (Horni et al., 2016) und der Erweiterung „freight“ (Schroeder et al., 2012). Dementsprechend werden die Routenwahlen der einzelnen Fahrzeuge während des simulierten Tages dargestellt.

Das Straßennetz wurde von OpenStreetMaps heruntergeladen. Der Detaillierungsgrad dieses Netzes ist graduell, von nur Autobahnen außerhalb Deutschlands über Hauptstraßen in Deutschland bis

hin zu Wohnstraßen in den Untersuchungsgebieten München und Regensburg. Abbildung 13 zeigt die Straßennetze in München und Regensburg.

In diesem Simulationsmodell werden die Touren der Lieferfahrzeuge generiert. Wenn die Pakete mit dem Lastenrad zugestellt werden, wird ein Zwischenschritt hinzugefügt. Zubringer-LKWs (Feeder) bringen die Pakete vom Verteilungszentrum zu den Mikro-Depots bevor sie von Lastenrädern ausgeliefert werden (vgl. hierzu auch Abbildung 3).

Abbildung 14 zeigt ein Beispiel der Simulationsergebnisse. Die Position jedes einzelnen Fahrzeugs wird in 1-Sekunden-Intervallen dargestellt (farbige Dreiecke). Auch die Routen der Fahrzeuge können analysiert werden (farbige Linien).

Abbildung 13: Straßennetze in München und Regensburg (Quelle: basiert auf OpenStreetMap Daten).



Abbildung 14: Ergebnisse der Simulation von Güterströme



Das Modell wurde kalibriert und validiert. Die Ergebnisse wurden mit LKW-Zählungen auf den Hauptverkehrsstraßen Deutschlands verglichen. Die Verkehrszählungen wurden von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt, 2010) heruntergeladen. Jeder Zählstelle wurde der entsprechenden Netzwerkkante zugeordnet. Anschließend wurden simulierte und beobachtete Verkehrszählungen (in LKWs pro Tag) verglichen. Der prozentuale Root Mean Square Error war 40%.

Weitere Details der Simulation von Verkehrsströmen befinden sich in Anhang 3.



7 Analyse- und Visualisierungswerkzeug

Das Visualisierungswerkzeug ermöglicht es, die wichtigsten Ergebnisse des Projekts in interaktiver Form zu analysieren. Das Werkzeug ist unter dem Link <https://radlasttum.shinyapps.io/radLastTools/> verfügbar und besteht aus zwei Anwendungen: Die erste dient zur dynamischen Analyse und Visualisierung der Potenziale für Lastenräder, die zweite zur Visualisierung bereits simulierter Szenarien mit dem Modell FOCA. Dabei unterscheiden sich die beiden Werkzeuge dadurch, dass im Optimierungswerkzeug die Potenziale nach Änderung der Parameter neu berechnet werden und anschließend immer wieder für verschiedene Szenarien generiert und verglichen werden können. Das Simulationswerkzeug liefert zusätzlich für

bereits vorab definierte Szenarien noch konkrete Analysen und Ergebnisse. Detaillierte Anweisungen, der Quellcode und Hinweise für alternative Eingabedateien finden sich unter <https://github.com/msmobility/radLastTools/wiki>.

Die Oberfläche des Visualisierungswerkzeugs (Abbildung 15) bietet dem Anwender die Möglichkeit, beide Anwendungen zu benutzen. Auf der linken Seite können diese beiden Anwendungsmöglichkeiten ausgewählt werden, rechts daneben gibt es am Startbildschirm eine Eingabemaske für die individuellen Parameter und auf der rechten Seite (Hauptfenster, zentrales Panel) unterschiedliche Registerkarten.

Abbildung 15: Übersicht des Visualisierungswerkzeugs

The screenshot displays the 'radLastTools' web application interface. On the left, a sidebar contains three buttons: 'Optimierung der Zustellung' (highlighted in blue), 'Visualisierung des Simulationsmodells', and 'Datei Upload'. The main area is divided into two panels. The left panel contains input fields for various cost and capacity parameters, each with a 'Aktualisieren' button and a 'Hilfe und Source Code' link. The right panel features a tabbed interface with tabs for 'Zustellungsmodi', 'Kosten', 'Kilometer', 'Transportmittel', 'Nachfrage', and 'Verkehr'. The 'Zustellungsmodi' tab is active, showing a list of five distribution modes and a dropdown menu to select a distribution center. Below the list, a note states: 'Die Abbildung zeigt die Anteile der einzelnen Modi in der ermittelten Zuweisung.'

Optimierung der Zustellung

Visualisierung des Simulationsmodells

Datei Upload

Klicken Sie auf Aktualisieren um die Zustellungsmodi basierend auf den unten gewählten Parametern zu ermitteln

Aktualisieren Hilfe und Source Code

Servicekosten Transporter [EUR/Paket]

1,1386

Servicekosten Lastenrad [EUR/Paket]

1,0248

Kosten Vorletzte Meile [EUR/km]

1,9301

Kosten Allerletzte Meile Transporter [EUR/km]

2,8817

Kosten Allerletzte Meile Lastenrad [EUR/km]

3,1097

Umschlagskosten Mikrodepot [EUR/Paktenheiten]

0,76

Kapazität Transporter [Paktenheiten]

120

Kapazität Feeder [Paktenheiten]

240

Zustellungsmodi

Kosten Kilometer Transportmittel Nachfrage Verkehr

Die Karte zeigt die Zustellungsmodi für alle Zonen, in welchen das gewählte Verteilzentrum aktiv ist.

Wählen Sie ein Verteilzentrum

Positionen aller Verteilzentren

Zustellungsmodi:

- 1: Reine Transporter-Zustellung
- 2: Lastenrad für XS
- 3: Lastenrad für XS und S
- 4: Lastenrad für XS, S und M
- 5: Reine Lastenrad-Zustellung

Die Abbildung zeigt die Anteile der einzelnen Modi in der ermittelten Zuweisung.

7.1 Beschreibung Optimierungswerkzeug

Auf der linken Seite des Fensters (graue Box) ist es möglich, die spezifischen Parameter (wie in Kapitel 8 beschrieben) einzutragen. Hier können Servicekosten für LKW und Lastenrad und die zusätzlichen Umschlagskosten in Euro (€) angegeben werden. Des Weiteren wird die Angabe der Kapazität des LKWs sowie des Zubringers (Feeders) in Kubikmetern ermöglicht. Mit dem Klick auf die Schaltfläche „Aktualisieren“ werden die Berechnungen durchgeführt und die Ergebnisse erscheinen - je nach Thema - als Abbildungen im zentralen Bereich der Anwendung.

Registerkarte „Zustellungsmodi“: Zum einen befindet sich im oberen Bereich eine Karte der jeweiligen Stadt mit den möglichen Verteilzentren (Positionen

dargestellt mit roten Punkten, Abbildung 16), die anhand der Dropdown-Liste ausgewählt werden können. Nach Auswahl eines dieser Distributionszentren wird die Analyse für das entsprechende Distributionszentrum durchgeführt. Die einzelnen Elemente des Rasters (Zonen), die über der Karte der Stadt liegen, werden entsprechend der individuellen Eingaben je nach Resultat eingefärbt (Abbildung 17). Das Farbschema entspricht hierbei der Verteilung der Modi, wobei jede Färbung für eine bestimmte Transportstrategie steht. Die Strategien reichen von (1) reine Distribution per LKWs, über (2) bis (4) Lastenrad-Strategien mit immer mehr Paketklassen, bis zu (5) reine Lastenraddistribution für alle Paketklassen.

Abbildung 16: Visualisierungswerkzeug - Registerkarte „Zustellungsmodi“ (1)

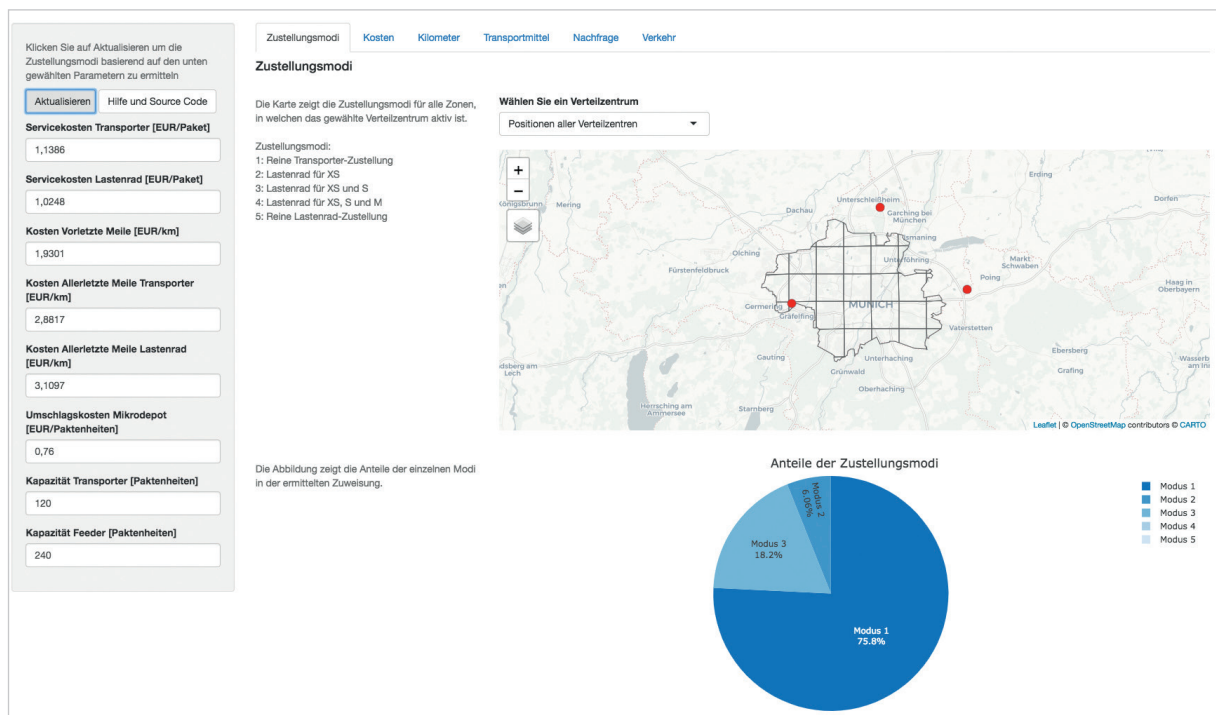
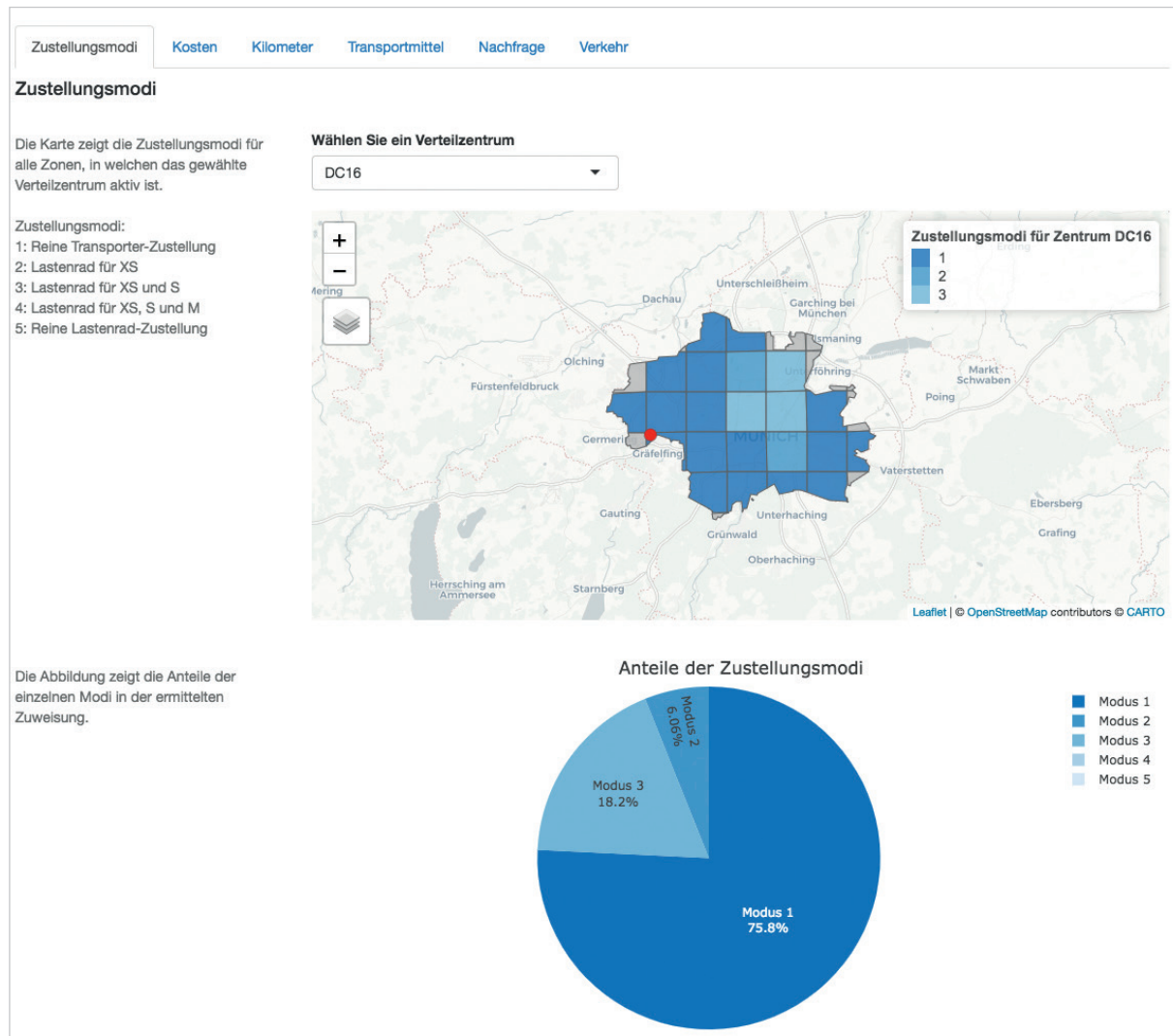


Abbildung 17: Visualisierungswerkzeug - Registerkarte „Zustellungsmodi“ (2)



Im unteren Bereich des Fensters erscheint dann die Illustration der Verteilung der ermittelten Transportmodi prozentual in einem Tortendiagramm.

Registerkarte „Kostenstruktur“: Der zweite Reiter des Werkzeugs zeigt die Analyse der Gesamtkosten pro Tag, die bei den verschiedenen verwendeten

Modi für die Zustellung auf der letzten Meile anfallen (Abbildung 18). Die oberste Grafik zeigt hierbei die geschätzte Gesamtkostenstruktur der vorgeschlagenen Modiverteilung. Zur Vergleichbarkeit wurde auch die Kostenstruktur der reinen LKW-Belieferung (Modus 1) angegeben.

Das Histogramm darunter (Abbildung 18) zeigt die Verteilung der Kosten, welche die Belieferung gemäß optimalem Zustellungsmodus in den jeweiligen Zonen verursacht. Dazu wird der Wertebereich der Kosten durch Intervallgrenzen in verschiedene Kostenklassen unterteilt. Die Zonen werden dann

anhand ihrer Zustellungskosten den Klassen zugeordnet, wobei ein Balken im Histogramm eine Klasse repräsentiert. Die Höhe des Balkens gibt nun an, wie viele Zonen in der vorgeschlagenen Modiverteilung der entsprechenden Kostenklasse angehören.

Abbildung 18: Visualisierungswerkzeug - Registerkarte „Kosten“



Registerkarte „Transportträger“: Die nächste Registerkarte (Abbildung 19) zeigt die detaillierten Ergebnisse hinsichtlich der Transportträger. Die obere Grafik zeigt jeweils den Anteil der Pakete, die beim jeweiligen Vorschlag per LKW und Lastenrad geliefert werden. Die gleiche Statistik wird weiter unten für jede Paketklasse (XS, S, M, L) einzeln dargestellt.

Registerkarte „Nachfrage“: In diesem Bereich wird eine Karte der Stadt gezeigt mit den jeweiligen Paketdichten - je stärker die Färbung, desto höher die Dichte (Abbildung 20). Hierbei kann die jeweilige Nachfrageklasse (XS, S, M, L, oder alle Paketgrößen) mittels Dropdownfeld ausgewählt werden.

Abbildung 19: Visualisierungswerkzeug - Registerkarte „Transportträger“

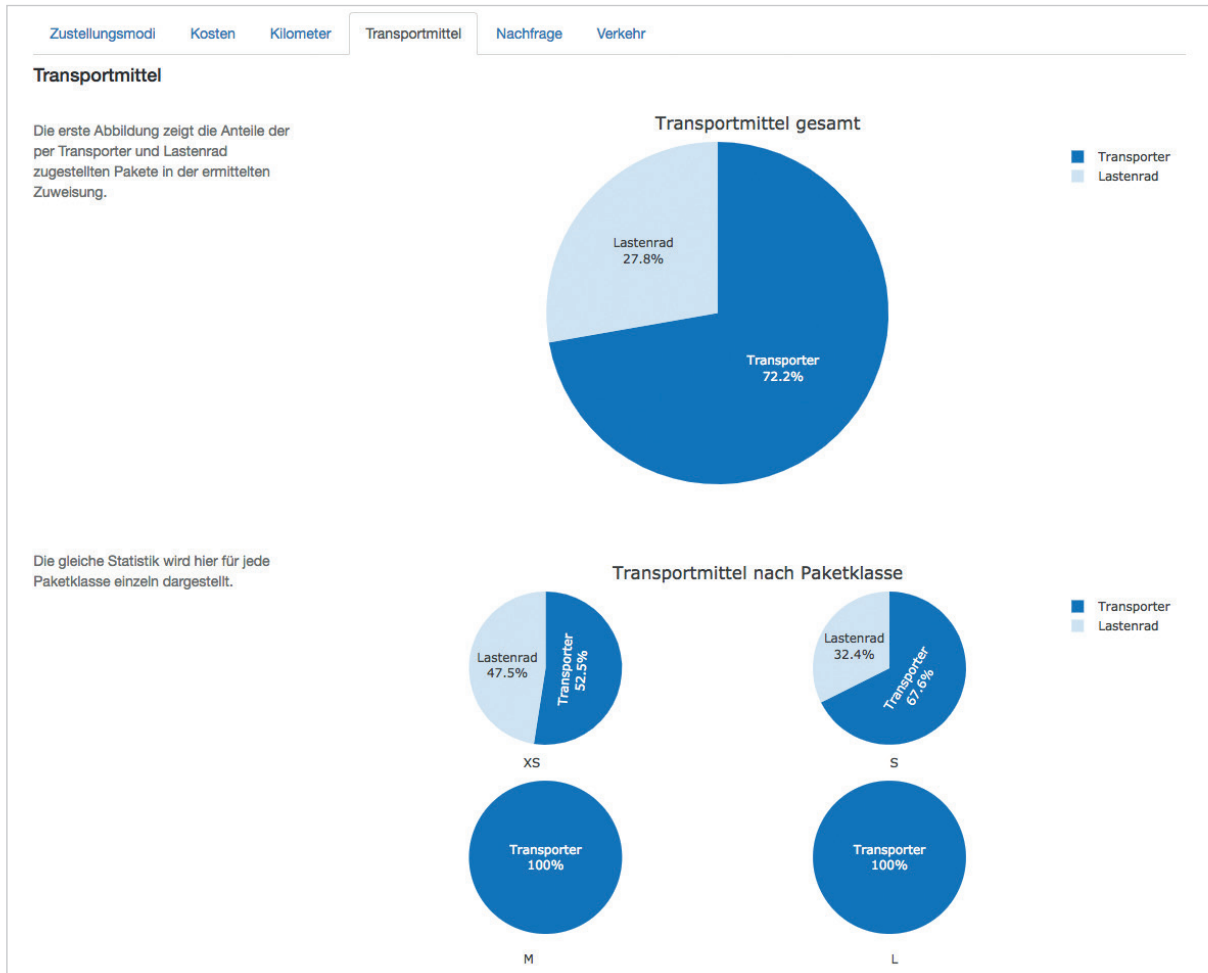
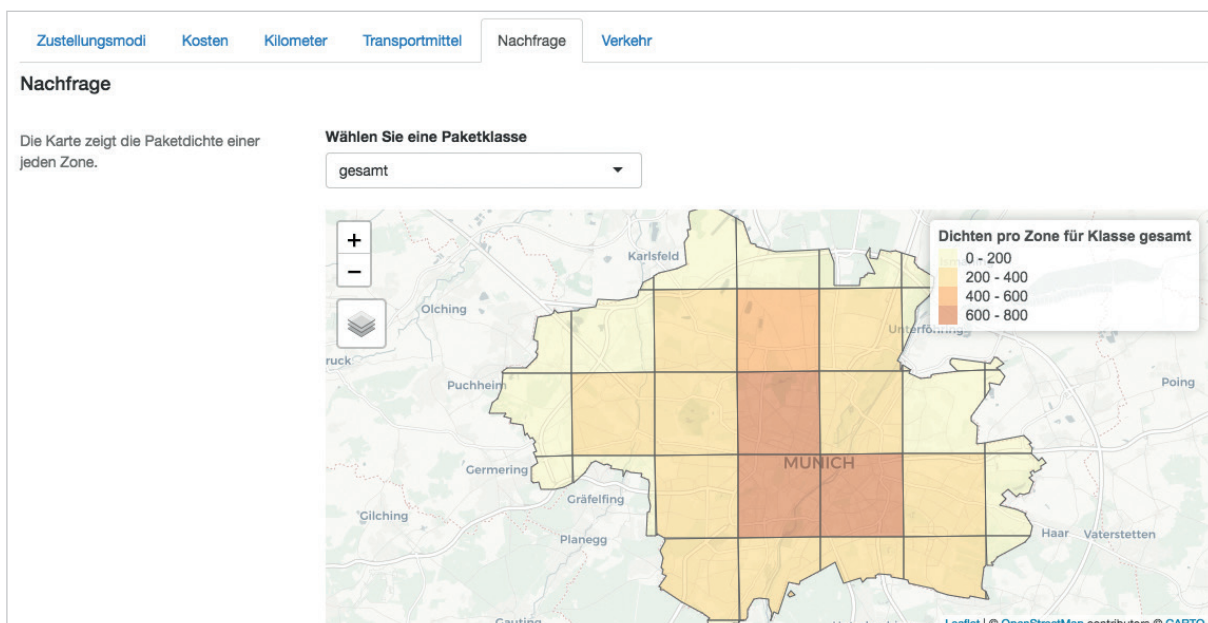


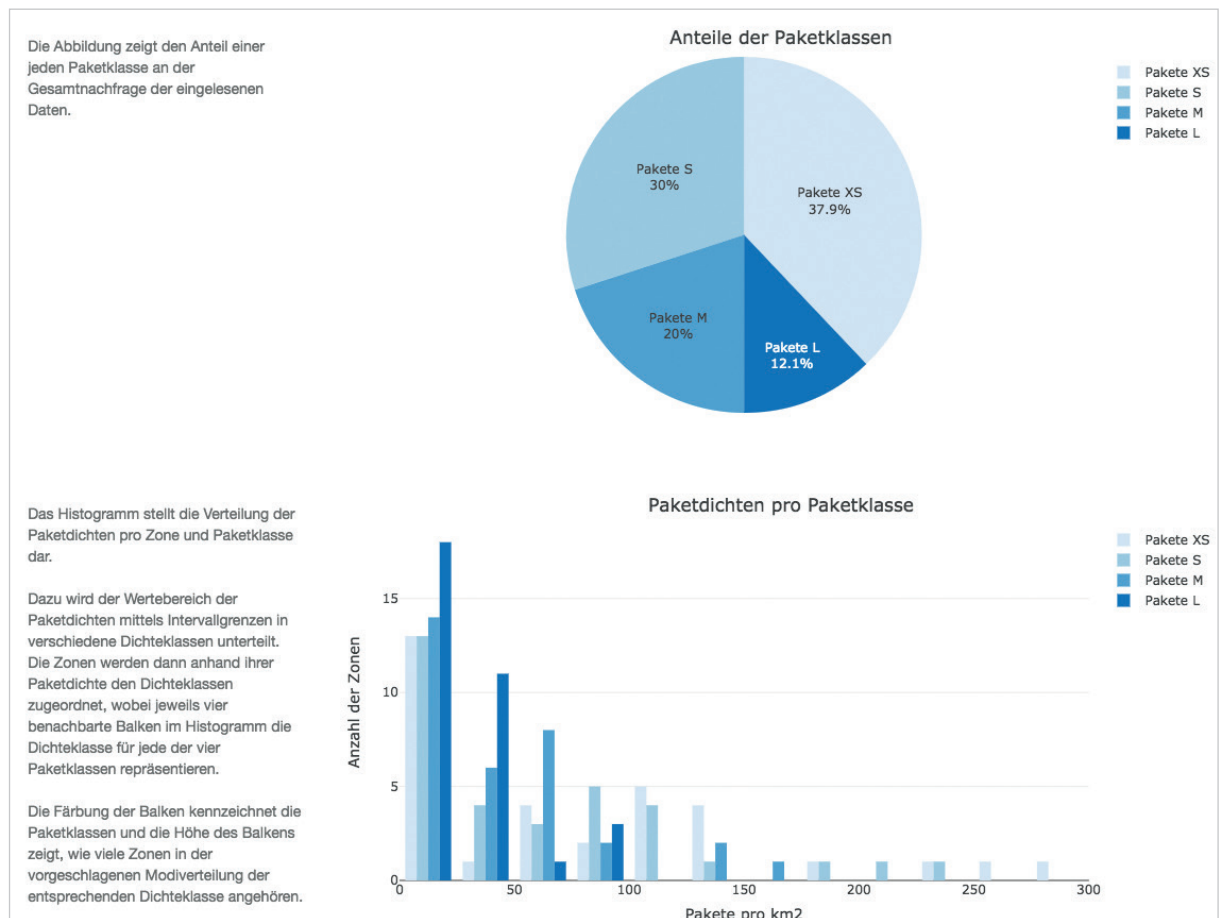
Abbildung 20: Visualisierungswerkzeug - Registerkarte „Nachfrage“ (1)



Das Tortendiagramm (Abbildung 21) zeigt den relativen Anteil der verschiedenen Nachfrageklassen. Das Histogramm in Abbildung 21 zeigt die Paketdichte pro Zone und Nachfrageklasse. Die Dichten

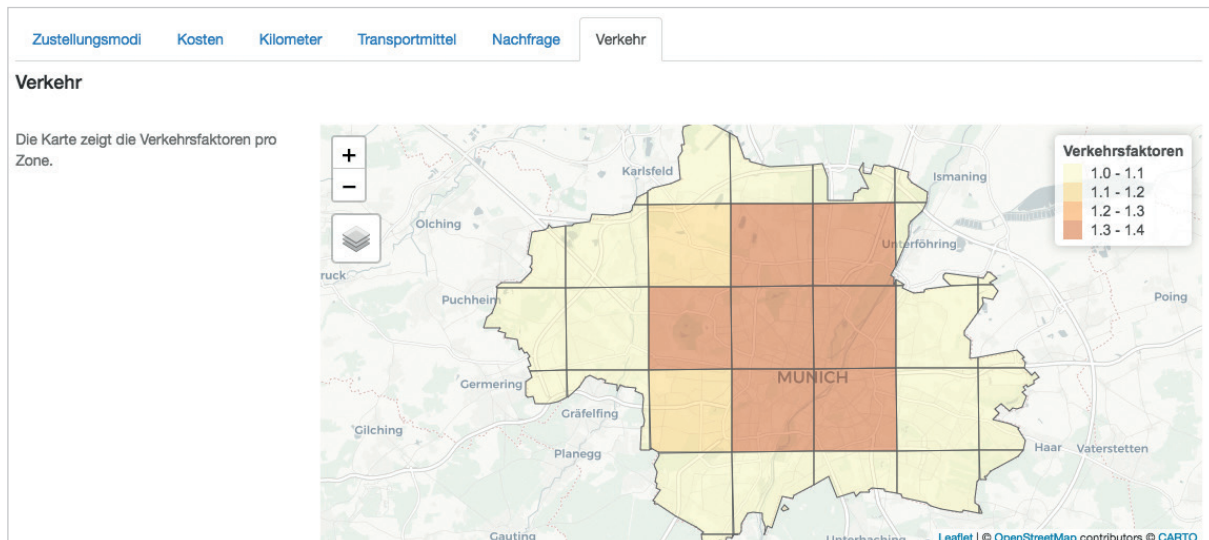
werden in Intervalle gruppiert und sind auf der horizontalen Achse sichtbar. Die vertikale Achse repräsentiert die Anzahl der Zonen, deren Paketdichte innerhalb des jeweiligen Intervalls liegt.

Abbildung 21: Visualisierungswerkzeug - Registerkarte „Nachfrage“ (2)



Die letzte Registerkarte zeigt eine Karte, die pro Zone den jeweiligen Verkehrsfaktor angibt und farblich kennzeichnet, wie hoch/intensiv dieser für die jeweilige Zone ist.

Abbildung 22: Visualisierungswerkzeug - Registerkarte „Stau/Verkehr“



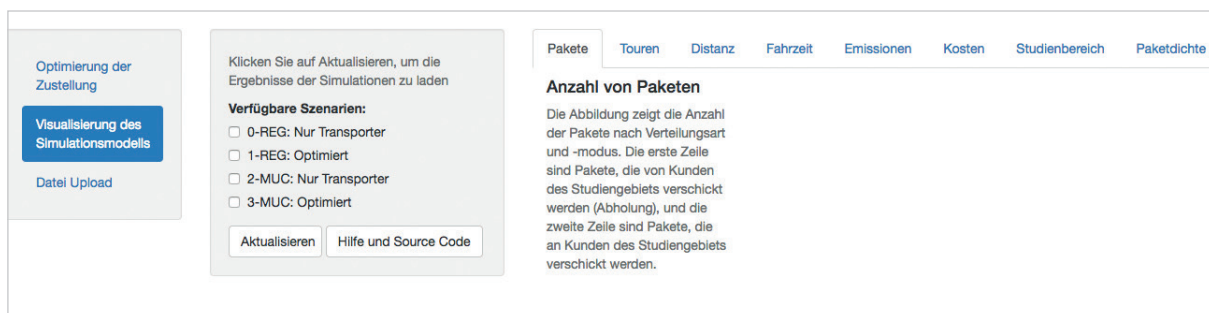
7.2 Ergebnisse des Simulationsmodells

Das Hauptziel dieser Anwendung ist die Analyse von bereits simulierten Szenarien. Die Szenarien werden mit dem Modell FOCA simuliert (wie in Kapitel 3, 4 und 6 beschrieben wurde). Die im Werkzeug aufgeführten Anwendungen zeigen einige Indikatoren zur Bewertung der Ergebnisse aus einer Reihe von Szenarien.

Nachdem man in der linken Spalte auf die Schaltfläche „Ergebnisse des Simulationsmodells“ geklickt hat, gelangt man zur Anwendung (Abbildung 23).

Die Spalte „Verfügbare Szenarien“ enthält eine Liste der bereits simulierten Szenarien. Einzelheiten zum Setting dieser Szenarien sind im Abschnitt „Fallstudien“ definiert. Der Benutzer kann nun beliebig viele Szenarien auswählen, um die Ergebnisse bezüglich verschiedener Indikatoren zu vergleichen. Ein Klick auf die Schaltfläche „Aktualisieren“ zeigt die Ergebnisse im zentralen Panel an.

Abbildung 23: Visualisierungswerkzeug - Simulationsmodell



Das zentrale Panel enthält verschiedene Registerkarten, die die Indikatoren der ausgewählten Szenarien vergleichen. Die Ergebnisse zeigen verschiedene Indikatoren für einen durchschnittlichen Arbeitstag. Die folgenden Indikatoren werden angegeben:

- Anzahl der Pakete. Das Balkendiagramm zeigt die Anzahl der Pakete an. Die Matrix stellt die

vom Endkonsumenten (Kunden) gesendeten Pakete (erste Zeile) und die an den Endkunden gesendeten Pakete (zweite Zeile), die direkt zum/vom Kunden zugestellten Pakete (erste Spalte) und die über Paketshops verteilten Pakete (zweite Spalte) dar. Die Farben stellen den für die Zustellung der Pakete verwendeten Modus dar.

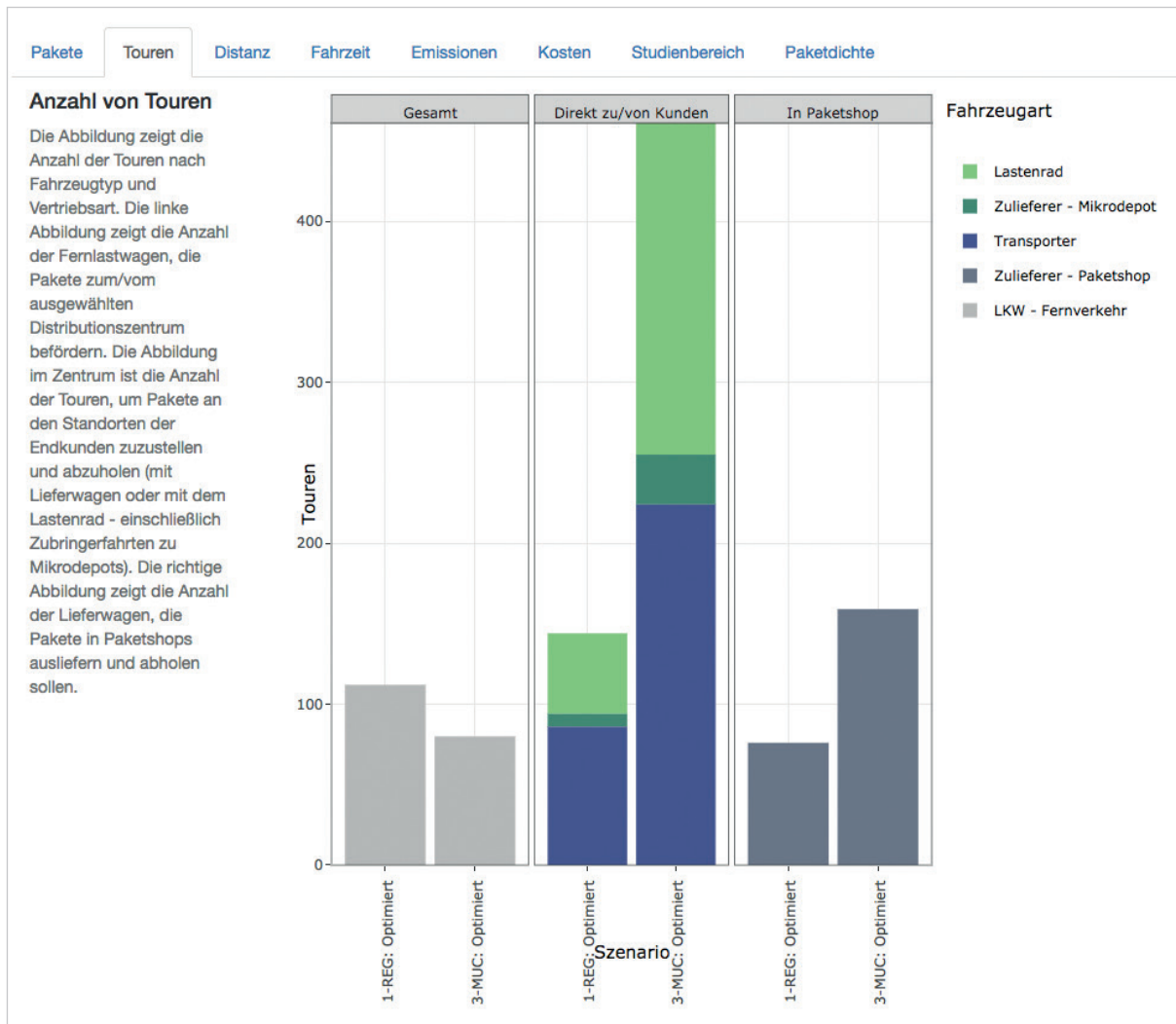
Abbildung 24: Visualisierungswerkzeug - Simulationsmodell - Pakete



- Anzahl der Touren. Die drei Diagramme stellen die Anzahl der Zustelltouren nach Marktsegmenten dar. Das linke Diagramm zeigt LKW (Fernverkehr), die die Pakete im Hauptlauf transportieren. Die Grafik in der Mitte zeigt die Anzahl der Touren an, die für die Zustellung von Paketen zum/vom Endkunden notwendig sind

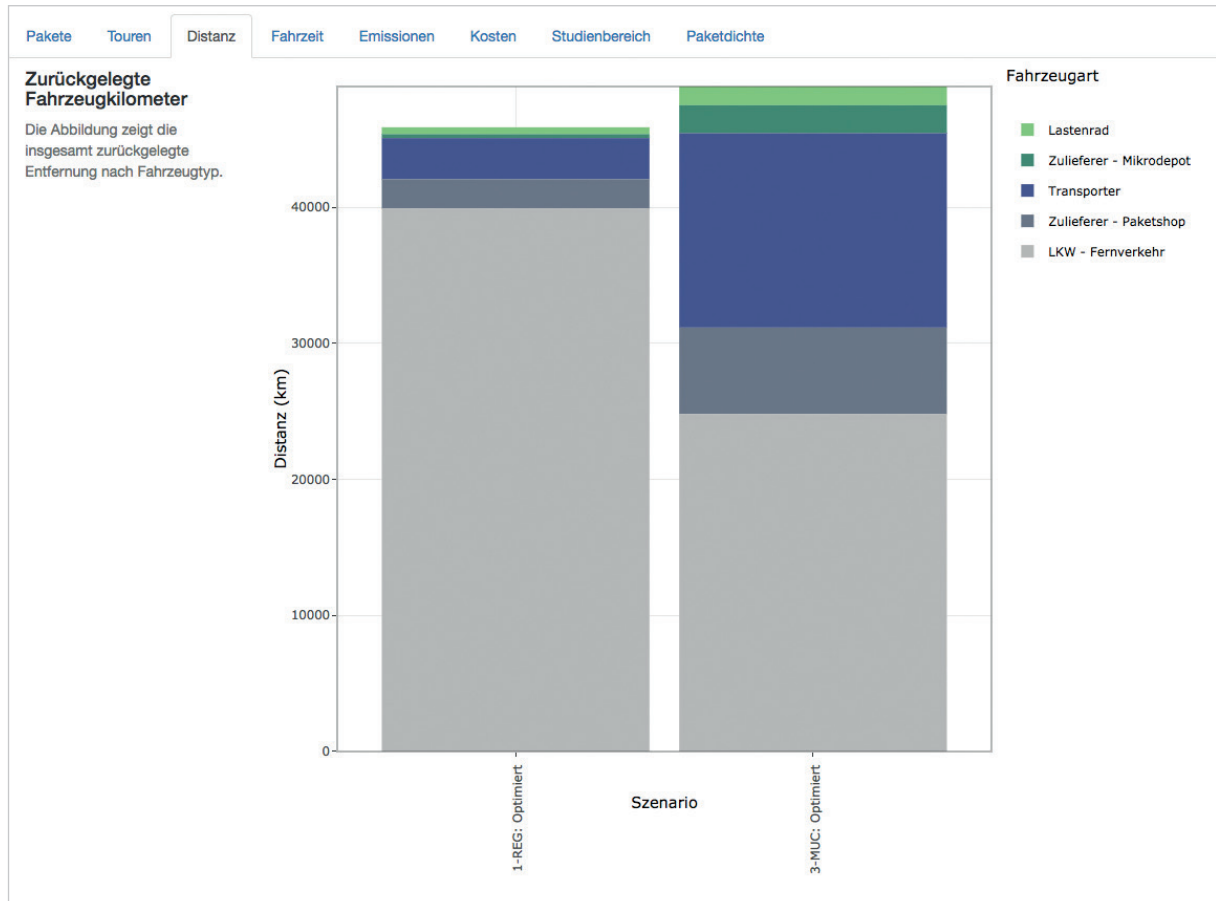
(letzte Meile). Die Grafik rechts zeigt die Anzahl der Touren an, die für die Zustellung von Paketen über Paketshops erforderlich sind (letzte Meile). Bei der Verwendung von Lastenrädern werden die Transportertouren vom Depot zum Mikro-Depot und die Lastenräder mit unterschiedlichen Farben dargestellt.

Abbildung 25: Visualisierungswerkzeug - Simulationsmodell - Touren



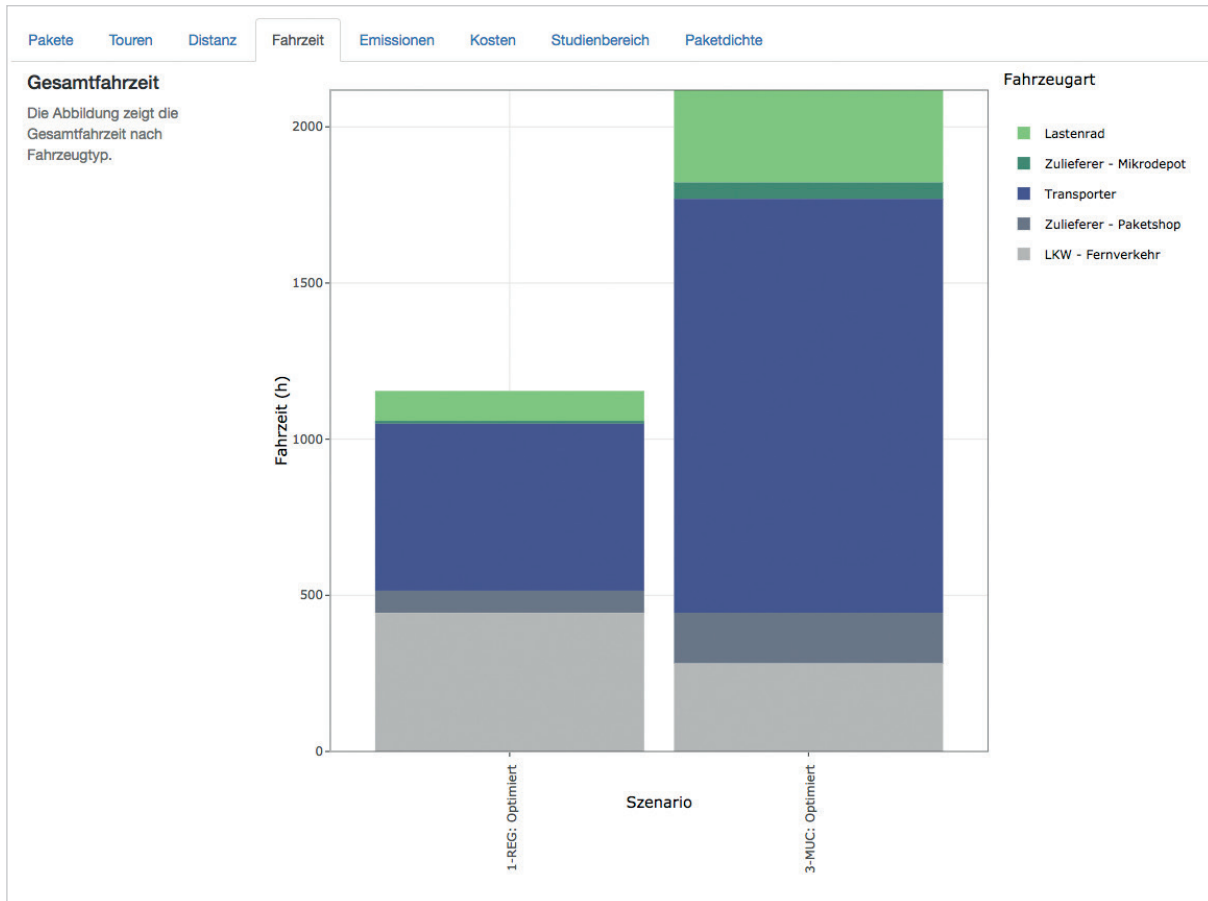
- Zurückgelegte Fahrzeugkilometer. Die Darstellung stellt die Gesamtdistanz in km nach Fahrzeugtyp (Lastenräder, Transporter, Zulieferer und LKW des Fernverkehrs) dar (in Farben).

Abbildung 26: Visualisierungswerkzeug - Simulationsmodell - Distanz



- Gesamtfahrzeit. Das Diagramm stellt die Gesamtfahrzeit in Stunden nach Fahrzeugtyp dar (in Farben).

Abbildung 27: Visualisierungswerkzeug - Simulationsmodell - Fahrzeit

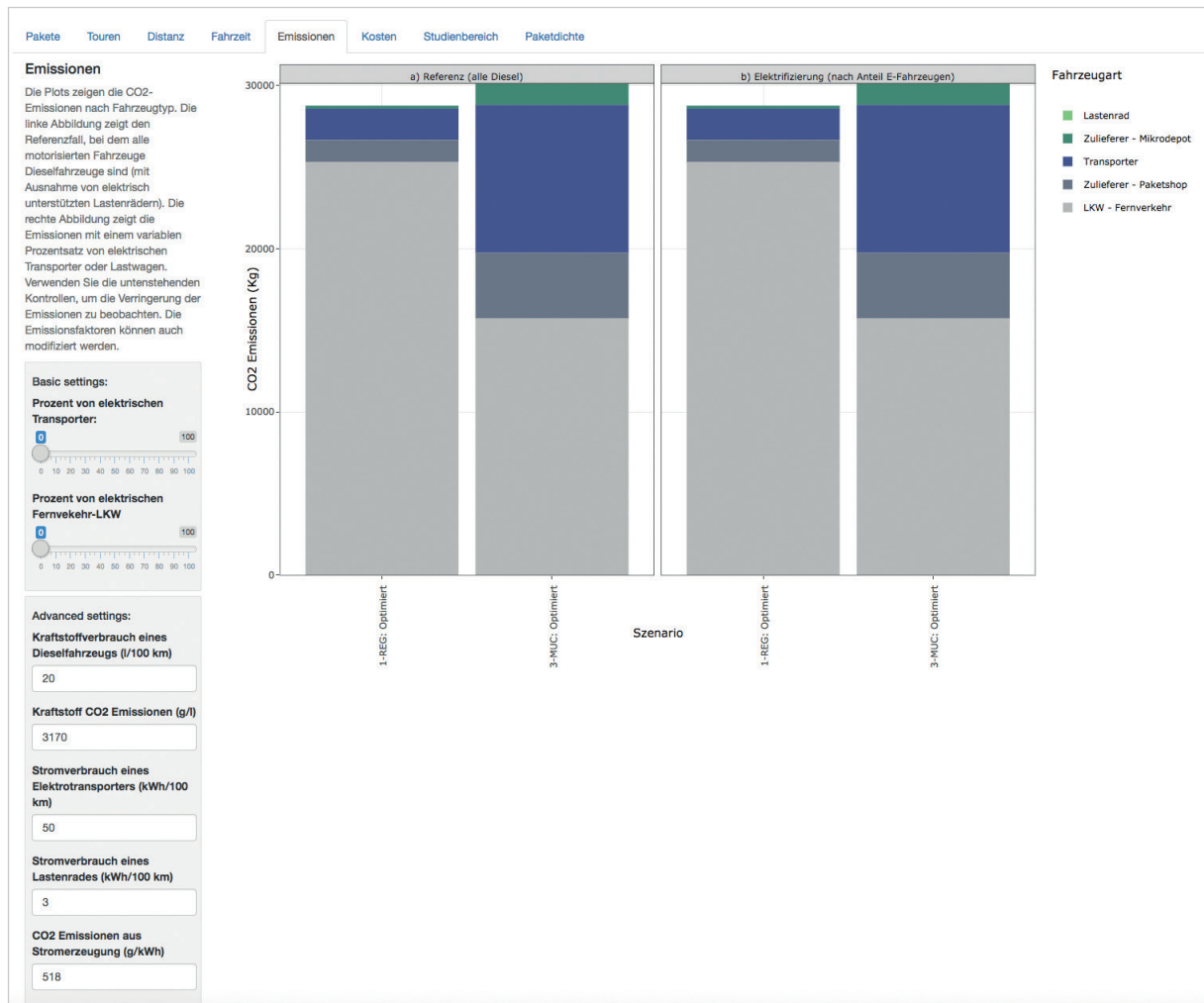


- Emissionen. Die CO₂-Emissionen sind auf der vertikalen Achse aufgetragen. Der Beitrag jedes Fahrzeugtyps wird durch Farben dargestellt. Die Abbildung auf der linken Seite stellt einen Referenzfall dar, bei dem alle Transporter Dieselfahrzeuge sind und Lastenräder (falls verwendet) elektrisch sind. Die Grafik rechts erlaubt es dem Benutzer, einen bestimmten Anteil der Dieselfahrzeuge durch Elektro-Transporter zu ersetzen, um die Potenziale der Emissionsreduktion zu verstehen. Man kann die Bedienelemente

(Schieberegler) auf der linken Seite nutzen, um den Elektrofahrzeug-Anteil zu verändern. Bei Bedarf können auch die zur Berechnung der Emissionsfaktoren verwendeten Parameter modifiziert werden.

Die Berechnung von Emissionen erfolgt wie in Anhang 3 beschrieben. Die Emissionen werden neu berechnet unter der Annahme, dass sich die Routen der Fahrzeuge nicht ändern.

Abbildung 28: Visualisierungswerkzeug - Simulationsmodell - Emissionen



- **Kosten:** Das Diagramm zeigt die Kosten für die Zustellung auf der letzten Meile. Jede Teilgrafik zeigt den Beitrag eines Fahrzeugtyps und eines Segments. Das linke Diagramm zeigt die Gesamtzahl. Man kann die Fahrzeuge und Segmente auswählen, die in der Gesamtsumme enthalten sind. Die Kosten werden farblich nach Typ klassifiziert: entfernungsabhängigen Kosten, zeitabhängigen Kosten, Servicekosten (pake-

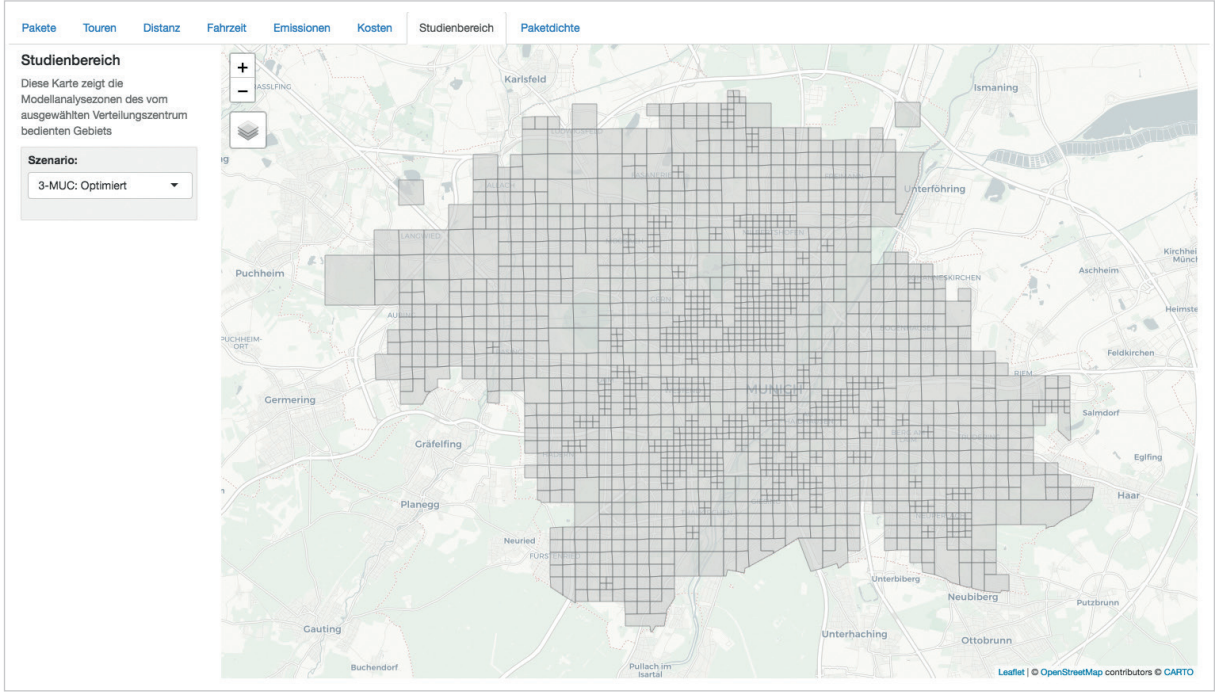
abhängig) und Extra-Handhabungskosten an Mikro-Depots. Alle Parameter können mit den Bedienelementen auf der linken Seite der Diagramme bearbeitet werden. Die Kosten werden automatisch neu berechnet unter der Annahme, dass sich die Routen der Fahrzeuge nicht ändern. Die Kosten werden wie in Kapitel 3 beschrieben berechnet.

Abbildung 29: Visualisierungswerkzeug - Simulationsmodell - Kosten



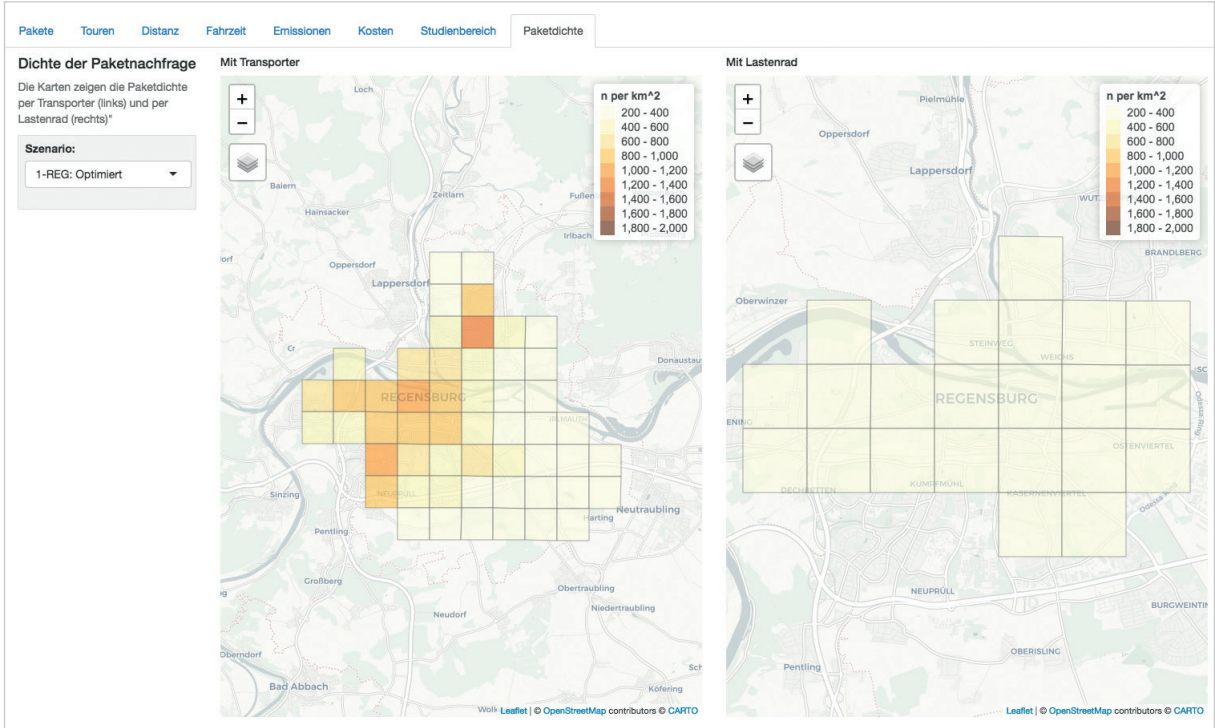
- Karte. Die Karte zeigt das Einzugsgebiet des Verteilungszentrums für das ausgewählte Szenario. Teilbereiche, die von Mikro-Depots bedient werden, sind ebenfalls in verschiedenen Farben dargestellt.

Abbildung 30: Visualisierungstool - Simulationsmodell - Karte



- Dichte: Die Karten zeigen die Nachfragedichte des ausgewählten Szenarios. Die linke Karte zeigt die Paketdichte der Lieferungen mit Transporter, die rechte die der Lieferungen mit Lastenrad. Auslieferungen an Paketshops werden nicht betrachtet.

Abbildung 31: Visualisierungswerkzeug - Simulationsmodell - Paketdichte



Mithilfe von Fallstudien ermitteln wir das Potenzial von Lastenrädern in zwei Testregionen, den Städten München und Regensburg, unter Verwendung der Werkzeuge, die im Projekt RadLast entwickelt wurden. Die folgenden Schritte werden durchgeführt: 1) Generierung der Verkehrsnachfrage, 2) Berechnung der Lastenradpotenziale und Analyse der Gesamtkosten mit Hilfe des analytischen Modells, wenn verschiedene Modi für die Zustellung auf der letzten Meile verwendet werden und 3) Analyse der Auswirkungen der Nutzung von Lastenrädern auf Emissionen und Verkehr mit Hilfe des Simulationsmodells.

Für die Fallstudien stehen das Lastenrad sowie ein dieselbetriebener Transporter als Transportmodus zu Verfügung. Dabei werden die in den Tabellen 6 (vgl. Kapitel 2.2.1 Emissionen), 9, 10 und 11 vorgestellten Parameter genutzt, die einerseits im Rahmen des Projektes mit Hilfe des Projektbeirats abgestimmt wurden, und andererseits auf einschlägiger Literatur (vgl. Sheth et al., 2019) basieren.

Parameter	Beschreibung	Standardwert
Marktanteil (Lieferung zu Kunden)	Anteil der Pakete, die an Privatkunden (Haushalte), an Geschäftskunden (Unternehmen) oder in Paketshops zugestellt werden, bezogen auf die Gesamtanzahl der Pakete	40% Privatkunden (B2C) 40% Geschäftskunden (B2B) 20% Paketshops
Marktanteil (Lieferung von Kunden)	Anteil der Pakete, die von Privatkunden (Haushalte), von Geschäftskunden (Unternehmen) oder via Paketshops zugestellt werden, bezogen auf die Gesamtanzahl der Pakete	0% Privatkunden (B2C) 20% Geschäftskunden (B2B) 80% Paketshops

Tabelle 9: Parameter der Fallstudie - Nachfrage

Höchstgeschwindigkeit von Lastenrädern		20 km/h
innerstädtische Durchschnittsgeschwindigkeit von Lastenrädern	Durchschnittsgeschwindigkeit von Lastenrädern in der Stadt	10 km/h
Kapazität für Lastenräder	Maximale Anzahl von Paketen, die ein Lastenrad transportieren kann	40
Höchstgeschwindigkeit von Transportern	Höchstgeschwindigkeit von Transportern	90 km/h oder Tempolimit auf der Straße
innerstädtische Durchschnittsgeschwindigkeit von Transportern	Durchschnittsgeschwindigkeit von Transportern in der Stadt	20 km/h
Kapazität für Transporter	Maximale Anzahl von Paketen, die ein Transporter transportieren kann	120 Paketeinheiten

Tabelle 10: Parameter der Fallstudie - Zustellfahrzeuge

Gehalt	22,72 €/h
operative Kosten Hauptlauf (allgemein)	34,78 €/h
Durchschnittsgeschwindigkeit Hauptlauf (allgemein)	30 km/h
Servicezeit Transporter	3 min/Paket
Kapazität Zulieferer	240 Paketeinheiten
Kapazität Lastenrad	40 Paketeinheiten
operative Kosten Lastenrad	8,3 €/h
Servicezeit Lastenrad	2,42 min/Paket
Extra Handlingaufwand Lastenrad	0,76 €/Paketeinheit

Tabelle 11: Parameter der Fallstudie - Kosten

8.1 Ermittlung der Paketnachfrage

Die Nachfrage wurde mit dem Simulationsmodell FOCA generiert. Dazu wurden einzelne Parzellen mit Kundenkoordinaten dargestellt. Weitere Details zum Verfahren wurden in Kapitel 4 erläutert.

Dieses Verfahren wurde auf die Stadt München und auf die Stadt Regensburg angewandt.

Nun wird den gelieferten Paketen ein Modus (Lastenrad oder Transporter) zugeordnet.

8.2 Fallstudie München

8.2.1 Datengrundlage

München wurde in insgesamt 33 Gebiete eingeteilt, indem ein quadratisches Raster mit 4 km Länge über die Stadt München gelegt wurde (siehe Abbildung 32). Mehrere Randgebiete haben eine sehr geringe Fläche oder eine sehr geringe Nachfrage, sodass lediglich 22 dieser Gebiete final in der Analyse berücksichtigt wurden. Abbildung 32 zeigt die geografische Nachfrageverteilung. Insgesamt wurden ca. 98.000 Pakete pro Tag auf 3 Dienstleister verteilt, sodass jeder Dienstleister fast 33.000 Pakete am Tag liefern muss. Somit bedient jeder Dienstleister 11,5 Prozent des durchschnittlichen Tagesvolumens der Stadt München (BIEK, 2018b).

Darüber hinaus wurde ein leicht erhöhtes Verkehrsaufkommen in den zentrumsnahen Zonen berücksichtigt (Abbildung 33).

8.2.2 Ergebnisse

Transportmodus

Die Ergebnisse in Abbildung 34 zeigen, dass, basierend auf den Annahmen aus Tabellen 6 und 9 bis 11, 27,8% der Pakete mit dem Lastenrad ausgeliefert werden können.

Die Detailbetrachtung (Abbildung 35) zeigt, dass besonders bei den kleinen Paketklassen Potenzial vorhanden ist. Die Paketklassen M und L werden weiterhin in allen Gebieten nur mit dem Transporter ausgeliefert.

An der geographischen Verteilung in Abbildung 36 ist zu erkennen, dass für die Befriedigung der Nachfrage der Zustellbasis im Münchner Osten besonders die Regionen in der Innenstadt für Lastenräder geeignet sind. Hier werden alle Pakete der Klasse S und XS mit dem Lastenrad ausgeliefert. In den Randgebieten wird weiterhin der Transporter bevorzugt.

Abbildung 32: Nachfrageverteilung München

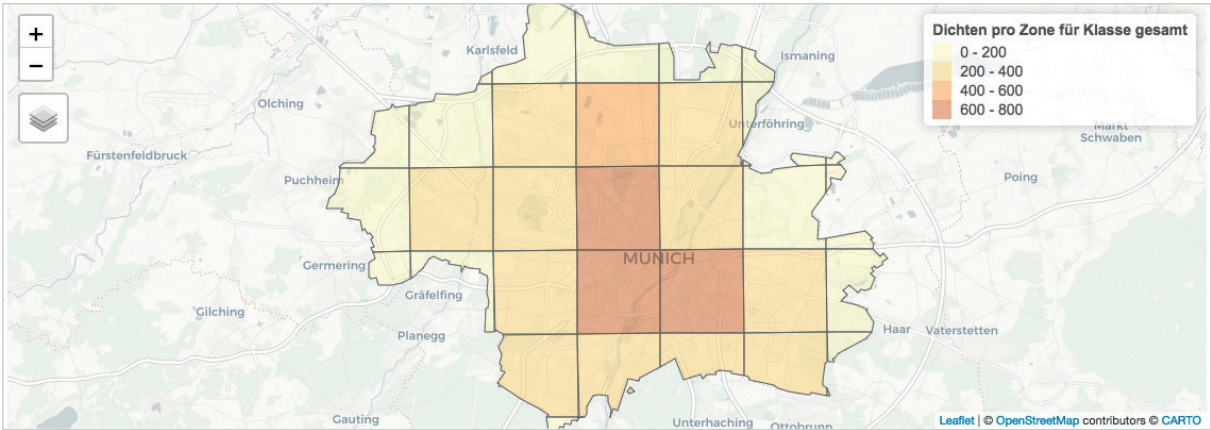


Abbildung 33: Verkehrsaufkommen München

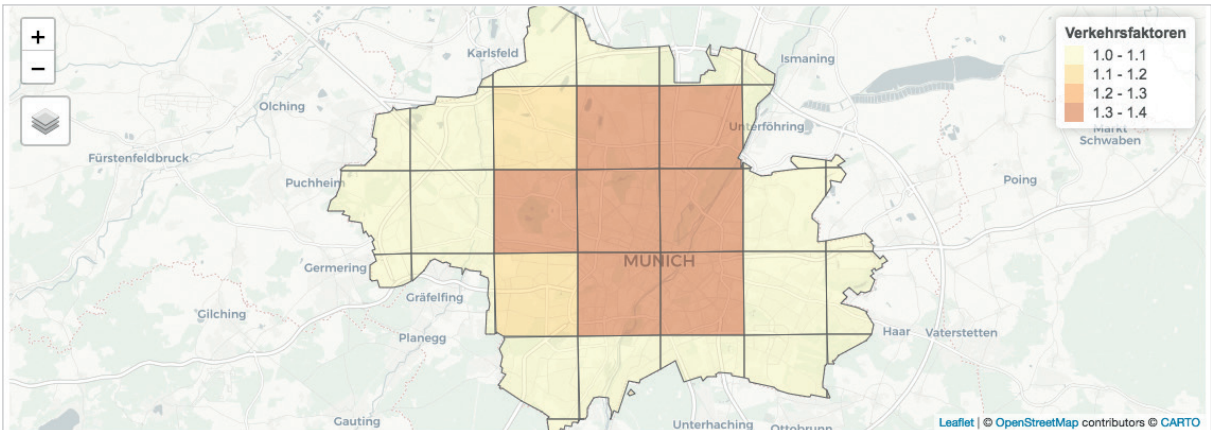


Abbildung 34: Transportträgerwahl München

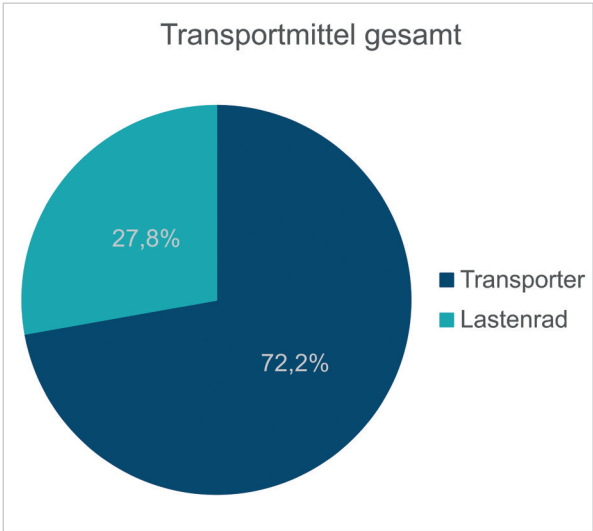


Abbildung 35: Transportmittelwahl nach Paketklasse München

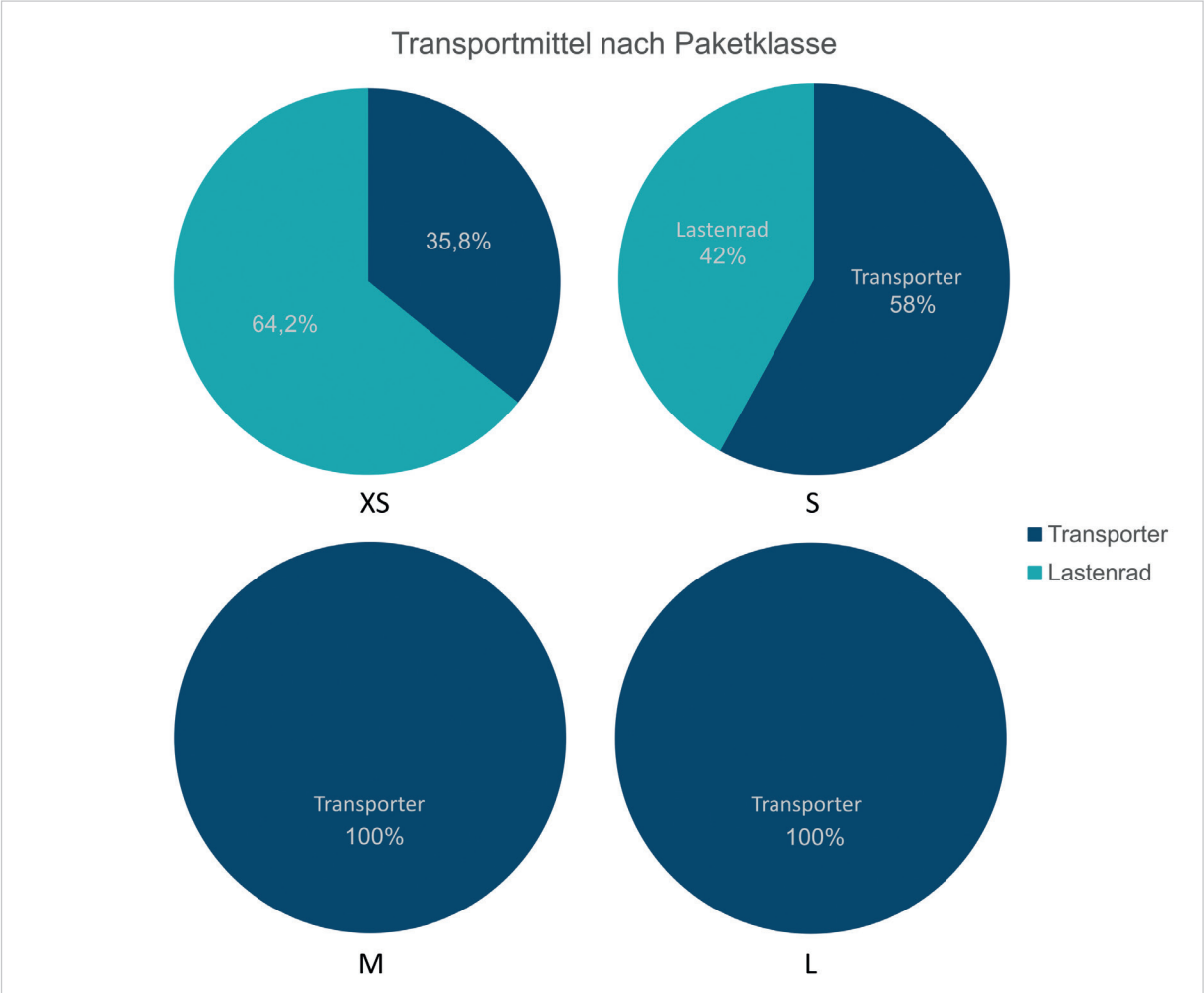
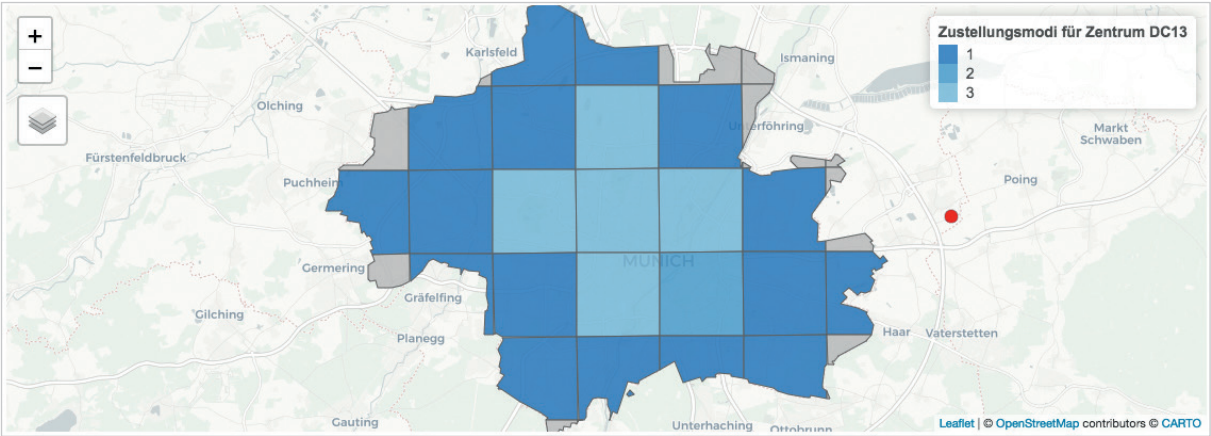


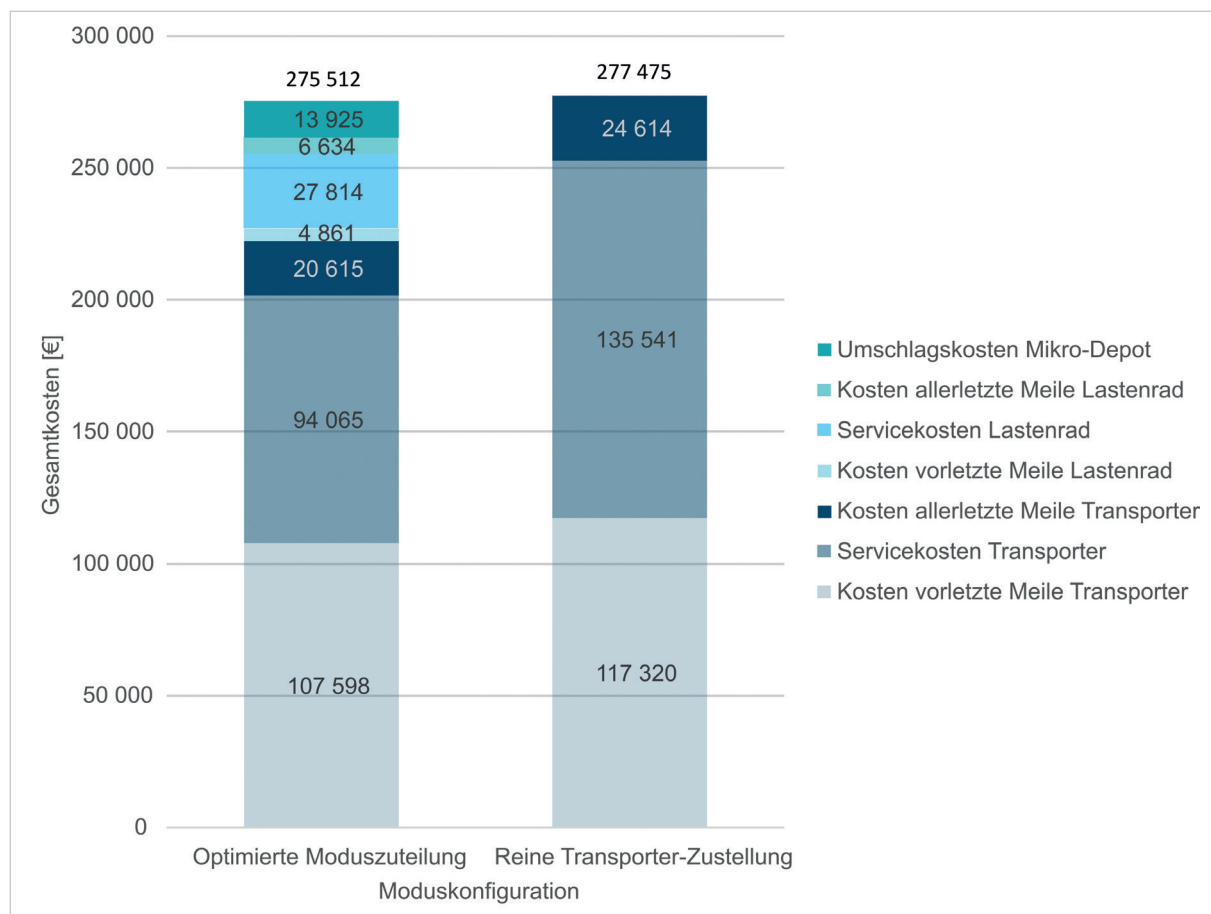
Abbildung 36: Zustellungsstrategie München



Kostenvergleich

Das dargestellte Szenario stellt die kostenoptimale Entscheidung für die jeweiligen Dienstleister dar. Abbildung 37 zeigt eine detaillierte Kostenaufstellung und stellt diese Kosten zusätzlich den Kosten einer reinen Transporterflotte gegenüber.

Abbildung 37: Detaillierte Kostenaufschlüsselung München



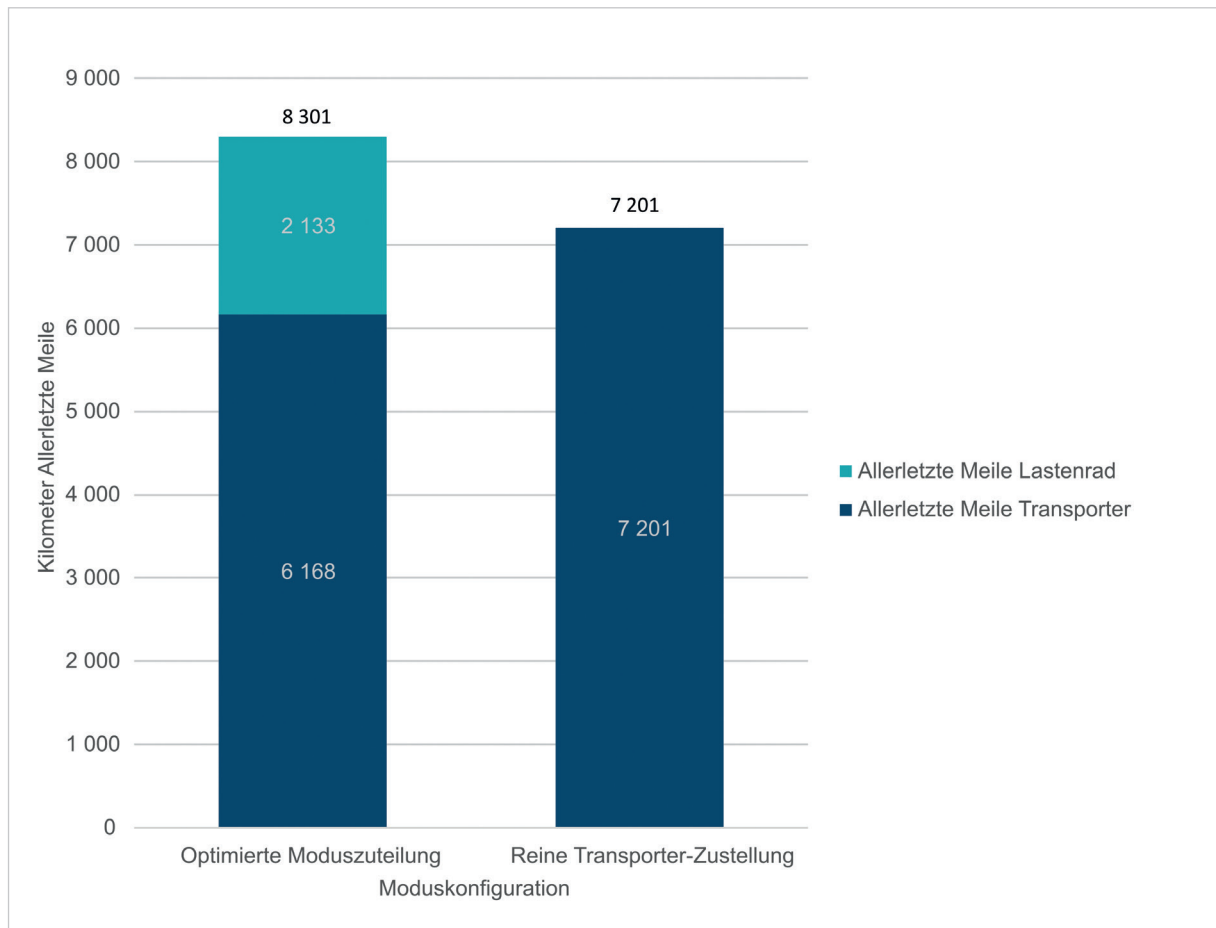
Es wird deutlich, dass die Gesamtkosten leicht (von 277.475 Euro auf 275.512 Euro) reduziert werden können. Die Kosteneinsparungen sind somit weniger als 1 Prozent im Vergleich zur klassischen Transporterzustellung. Zusätzlich sollte hier erwähnt werden, dass mit einer reinen Lastenradlieferung die Kosten auf 432.782 Euro steigen würden und aus wirtschaftlicher Sicht daher nicht umgesetzt werden sollte.

Innerstädtische Auswirkungen

Neben den Kostenanalysen wurden auch die Auswirkung auf die Innenstadt analysiert. Dazu wurde die Zahl der gefahrenen Kilometer auf der allerletzten Meile sowie die dadurch entstehenden

Emissionen verglichen (vgl. Abbildung 38). Im obigen Szenario wird ein Teil der Pakete nicht mehr mit Transportern transportiert. Dadurch reduzieren sich die gefahrenen Transporterkilometer um ca. 16 Prozent. Allerdings kommen zusätzlich weitere Kilometer durch die Lastenräder hinzu. Insgesamt steigen die Kilometer auf der allerletzten Meile um ca. 15 Prozent. Da sich im Gegenzug allerdings die Kilometer mit dem Transporter reduzieren, bedeutet dies auch eine Reduzierung der Emissionen in der Innenstadt um ca. 14 Prozent. Hier sollte auch beachtet werden, dass Lastenräder unterschiedliche Einflüsse auf das Verkehrsgeschehen haben und sich je nach Stadt der Verkehrsfluss somit verbessert oder verschlechtert.

Abbildung 38: Kilometer der allerletzten Meile München

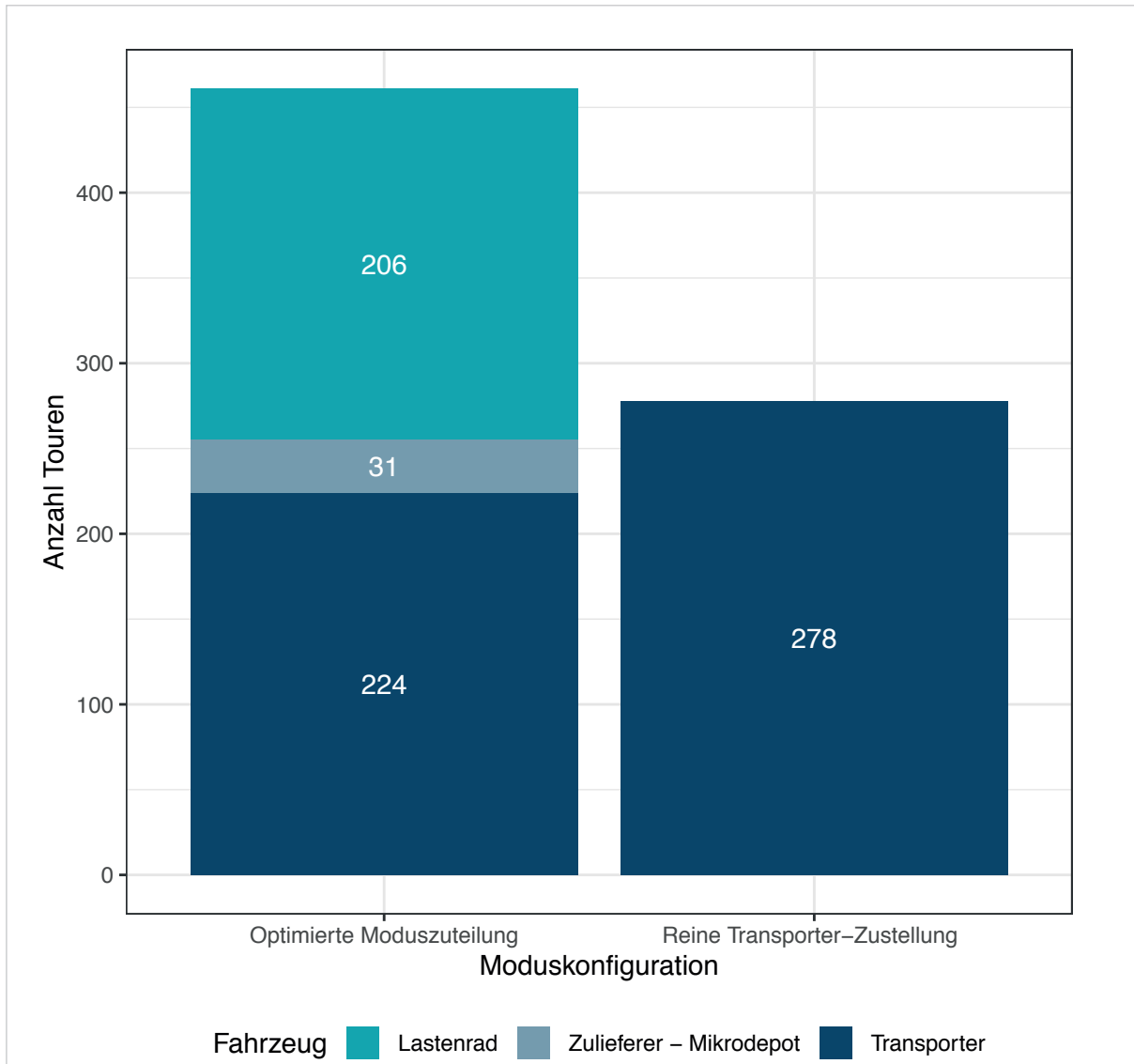


Ergebnisse der Simulation des Güterverkehrs

Die vorherigen Ergebnisse werden nach der Optimierung der Moduswahl in jeder Zone erzielt. Die Kosten werden, wie in Abschnitt 4 erläutert, approximiert, bevor die Auslieferungstouren gestaltet sind. Die Ergebnisse dieses Unterabschnitts erhalten wir nach der Simulation des Verkehrsflusses jedes Fahrzeugs unter Verwendung der in Abschnitt 6 beschriebenen Modelle.

Infolge der Einführung von Lastenrädern (für 27% der in der Stadt München zugestellten Pakete) verringert sich die Anzahl der Lieferwagentouren, obwohl eine beträchtliche Anzahl von Lastenradtouren hinzukommt (und damit auch die Zubringerfahrten zur Versorgung der Mikro-Depots). Die Gesamtzahl der Touren wird also durch den Einsatz von Lastenrädern erhöht (Abbildung 39). Die Ergebnisse zeigen nur eines der drei Verteilungszentren, in denen die Optimierung vorgenommen wurde.

Abbildung 39: Anzahl Touren der letzten Meile (München)



Da die Touren mit Lastenrädern jedoch sehr viel kürzer sind, lässt sich dieser Anstieg nicht an der Gesamtstrecke und auch nicht an der Gesamtfahrzeit ablesen. Diese Variablen nehmen mit der optimierten Verteilung leicht ab (Abbildung 40).

Dabei ist zu beachten, dass die hier aufgetragene Entfernung die Gesamtdistanz pro Fahrzeugtyp für jede Komponente der letzten Meile angibt. Im Gegensatz dazu bildet die vorherige Abbildung 39 nur die allerletzte Meile ab.

Abbildung 40: Gesamtdistanz und Fahrzeit der letzten Meile (München) // Grafik 1 von 2

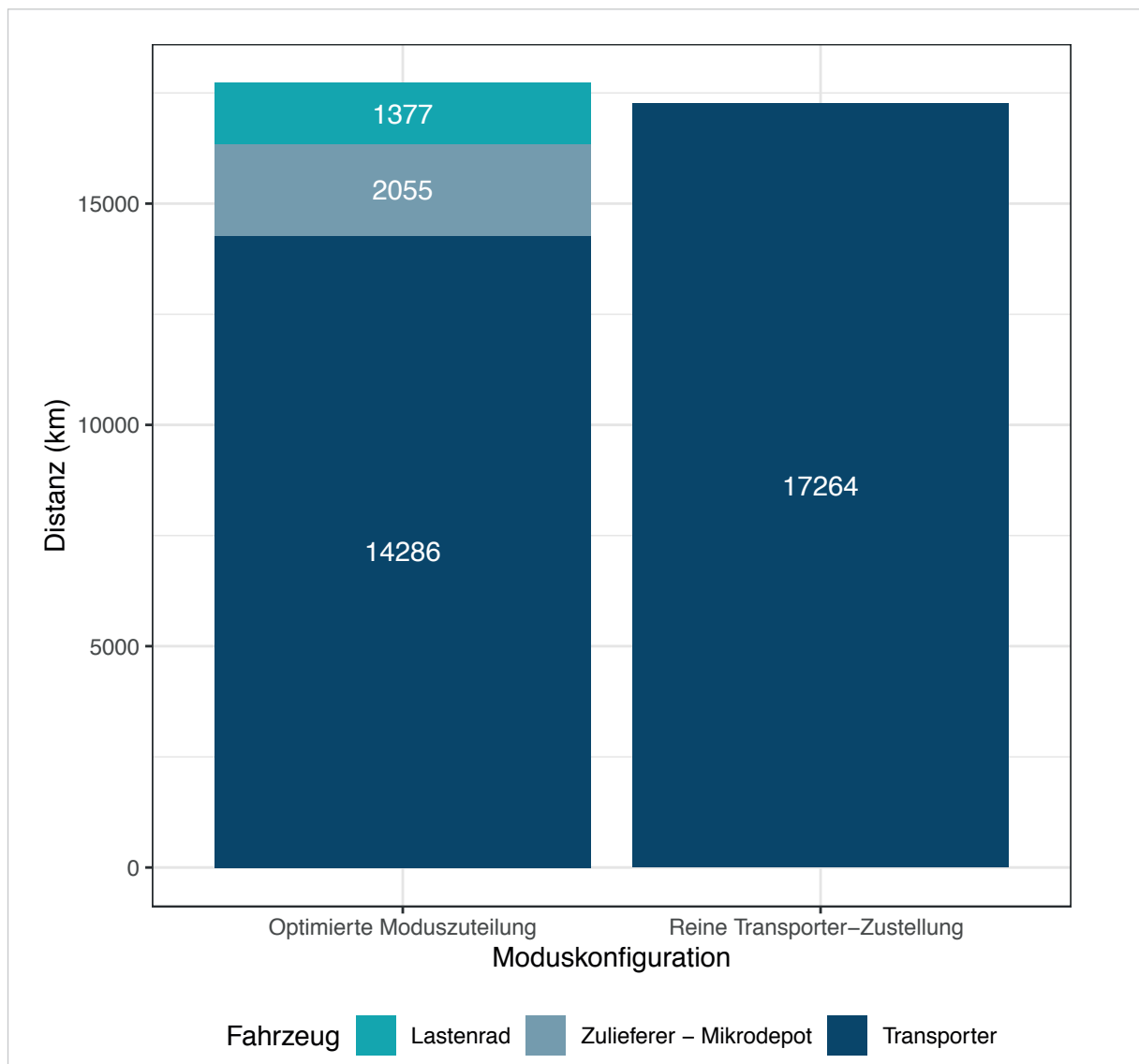
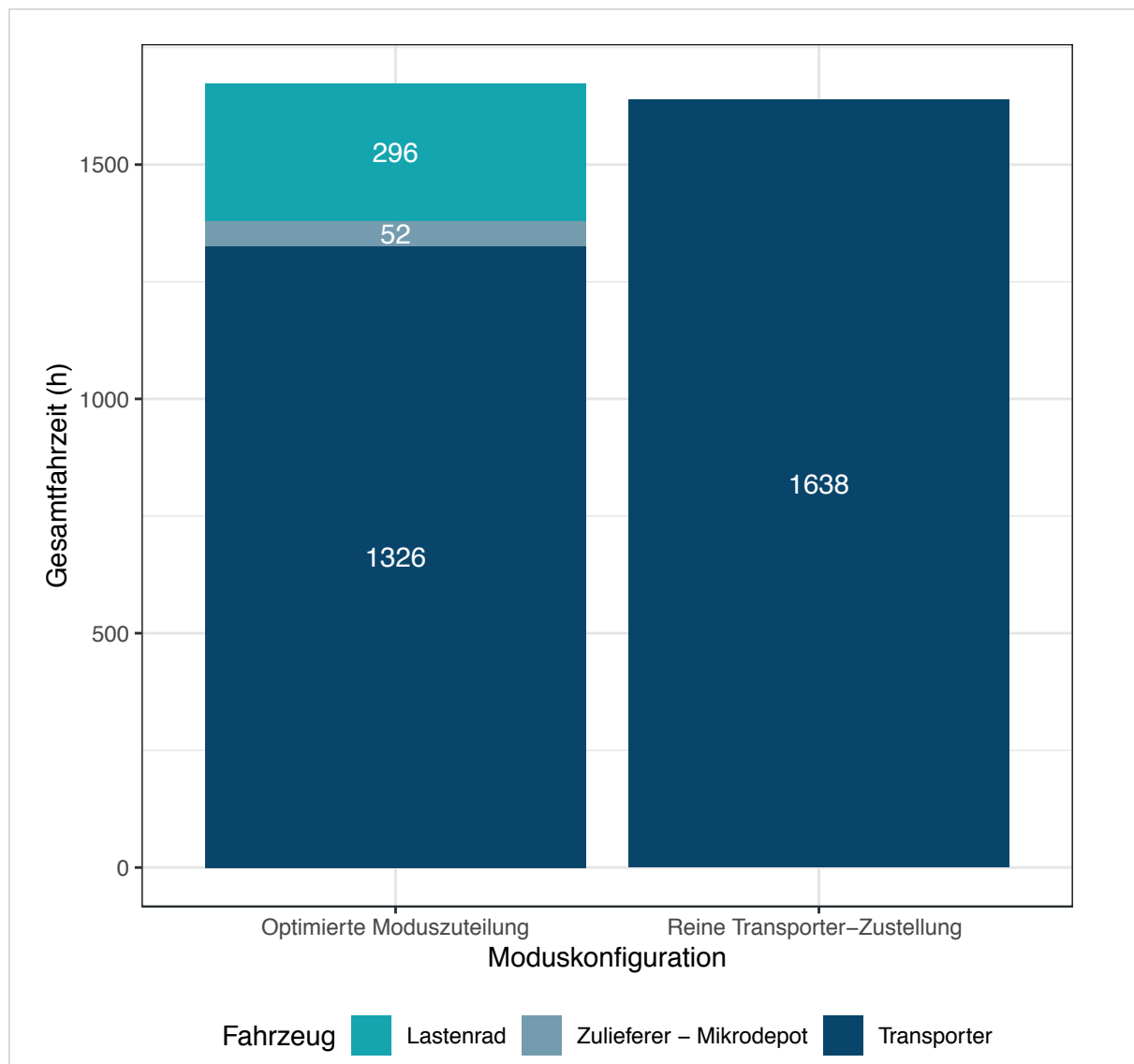


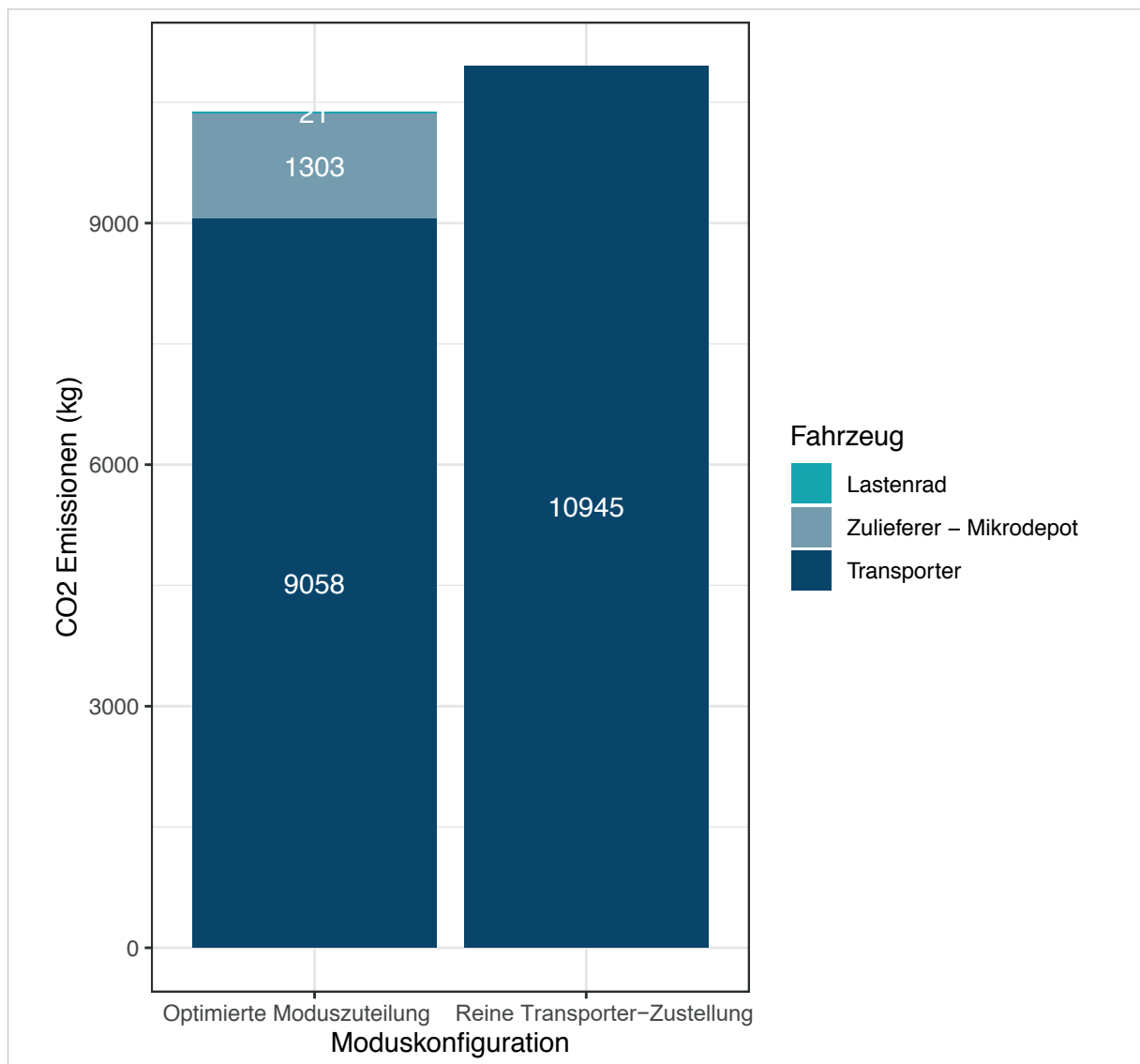
Abbildung 40: Gesamtdistanz und Fahrzeit der letzten Meile (München) // Grafik 2 von 2



Eine Verringerung der Entfernung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor hat als Ergebnis eine Verringerung der CO₂-Emissionen zur Folge, wie in

Abbildung 41 zu sehen ist. Die Emissionen durch die Stromerzeugung von Lastenrädern sind relativ gesehen sehr gering.

Abbildung 41: CO₂-Emissionen der letzten Meile (München)



Konsolidierung

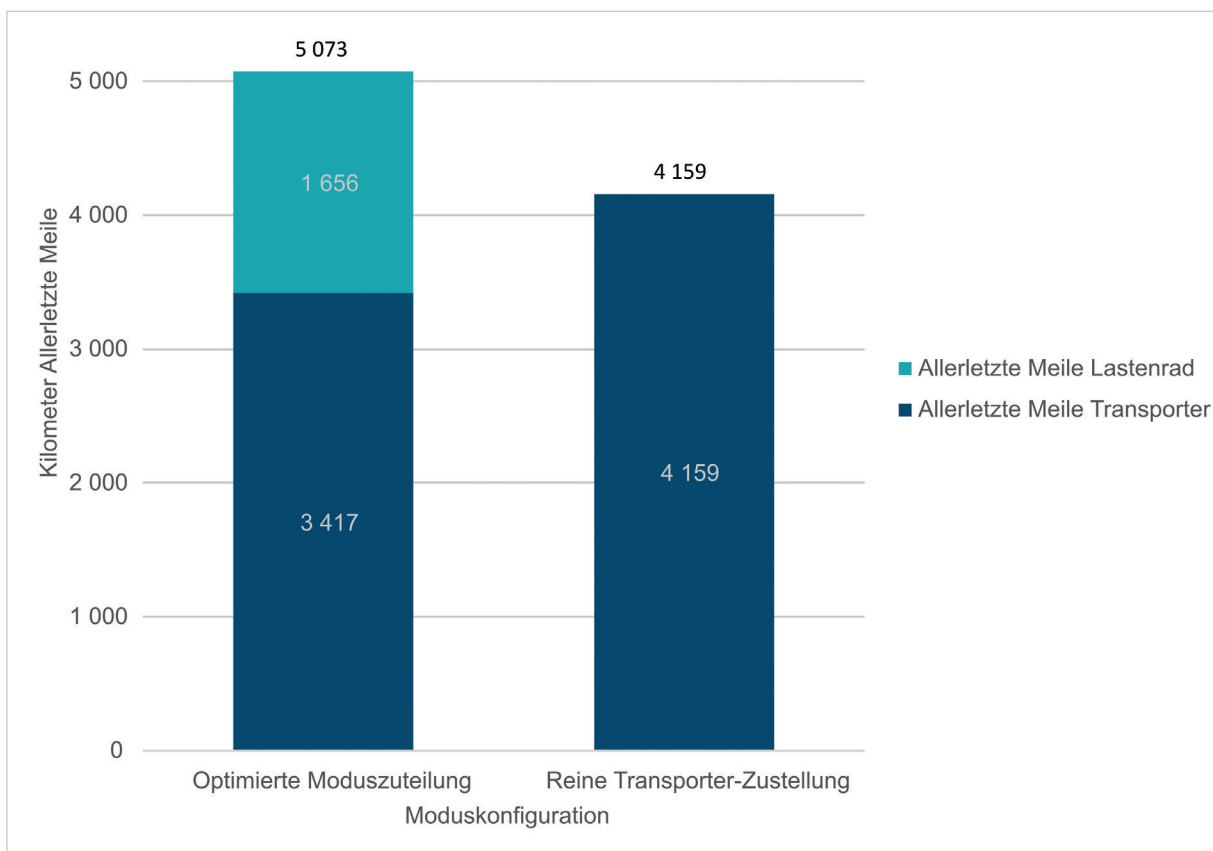
Im folgenden Abschnitt werden die Potenziale der Konsolidierung untersucht. Dazu wird das vorherige Szenario mit dem konsolidierten Szenario verglichen, bei dem die Pakete der drei obigen Dienstleister von einem gemeinsamen Dienstleister ausgeliefert werden. Die Analysen bestätigen die

bereits in Kapitel 4 erwarteten Ergebnisse. Auf der vorletzten Meile können keine Einsparungen erzielt werden, da die Auslastung bei der Paketauslieferung bereits bei nahezu 100 Prozent liegt. Durch die Konsolidierung erhöhen sich allerdings die Potenziale für Lastenräder, sodass sich der Anteil von Lastenrädern von 27,8 Prozent auf 34,2

Prozent erhöht. Die höchsten Vorteile erzielt man allerdings auf der allerletzten Meile. Sowohl im reinen Transporterszenario als auch im Szenario mit Lastenrädern kann der innerstädtische Verkehr reduziert werden. Abbildung 42 zeigt (im Vergleich zu Abbildung 38), dass beim reinen Transporter die

erwarteten 42 Prozent eingespart werden. Im optimierten Szenario liegt das Potenzial der Konsolidierung etwas niedriger (bei 39 Prozent), da durch die zusätzliche Steigerung des Lastenradanteils etwas Potenzial verloren geht.

Abbildung 42: Kilometer der allerletzten Meile in München (konsolidiert)

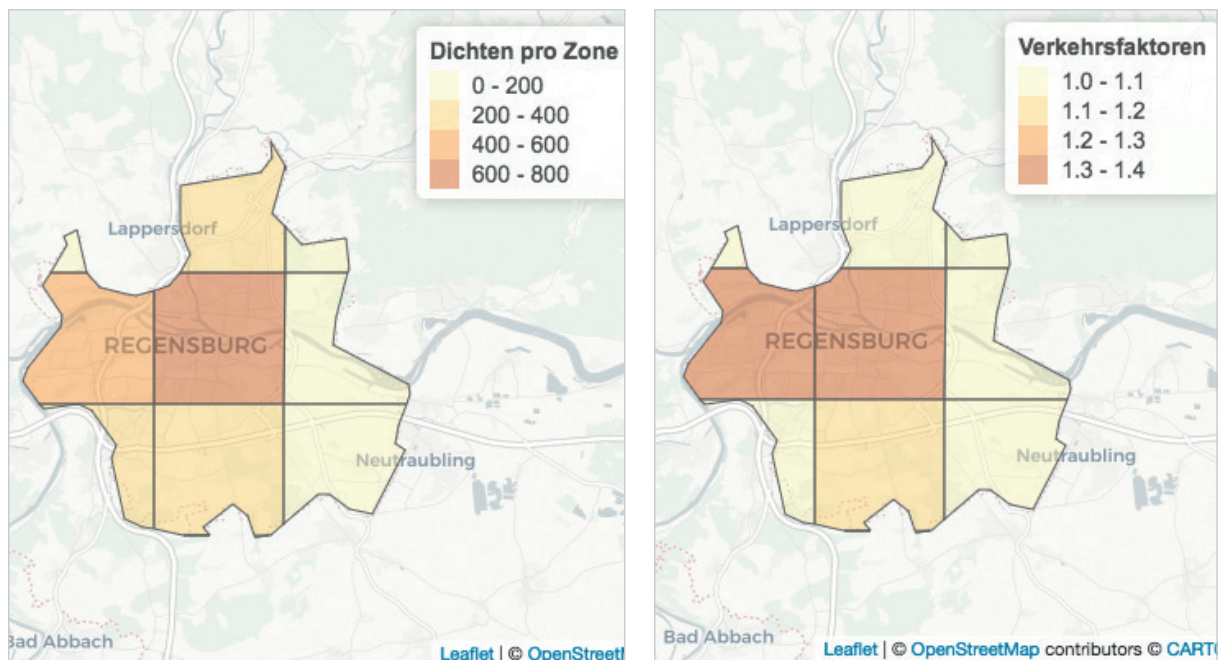


8.3 Fallstudie Regensburg

8.3.1 Datengrundlage

Als zweites Fallbeispiel wurde mit Regensburg eine kleinere Stadt mit Altstadt gewählt. Dazu wurde Regensburg in 9 Zonen eingeteilt, von denen wieder zwei wegen geringer Größe und niedrigem Paket-aufkommen nicht berücksichtigt wurden. Das gesamte Paketaufkommen von ca. 12.000 Paketen wird aus einem Depot in Straubing (im Südosten der Stadt) bedient. Abbildung 43 zeigt die Verteilung des Paketaufkommens. Darüber hinaus wurde ein erhöhtes Verkehrsaufkommen in den zentralen Zonen der Stadt Regensburg angenommen (Abbildung 43).

Abbildung 43: Nachfrageverteilung und Verkehrsaufkommen Regensburg



8.3.2 Ergebnisse Transportmodus

Auch für die Stadt Regensburg zeigt sich ein hohes Potenzial für Lastenräder in der Innenstadt, was auch auf das zugrunde gelegte Verkehrsaufkommen zurückzuführen ist.

Abbildung 44 zeigt, dass in der zentral gelegenen Region die Paketklassen XS und S per Lastenrad ausgeliefert werden, in der angrenzenden Region links die Paketklasse S. Da diese beiden Regionen auch das höchste Paketvolumen aufweisen, führt

das zu einem Anteil von 37,2 Prozent für Lastenräder. Auch hier zeigt sich eine ähnliche Verteilung wie in München. Die großen Pakete werden weiterhin, wie auch in der Fallstudie für München (siehe Kapitel 8.2), per Transporter ausgeliefert (Abbildungen 45 und 46). Das etwas höhere Potenzial für Lastenräder ist auf den hohen Paketanteil in den beiden zentralen Regionen zurückzuführen.

Abbildung 44: Zustellungsstrategie Regensburg

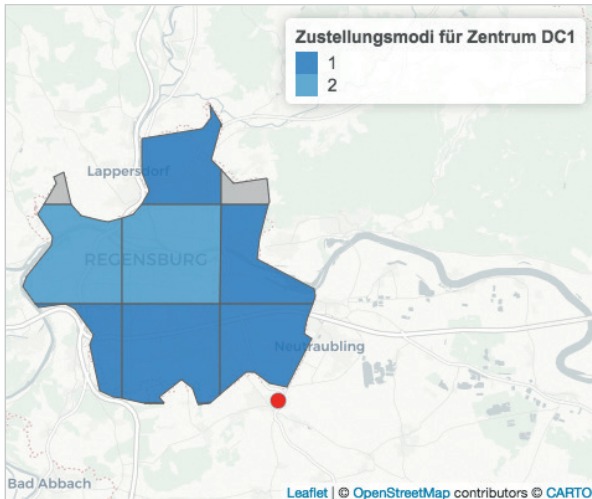


Abbildung 45: Transportmittelwahl Regensburg

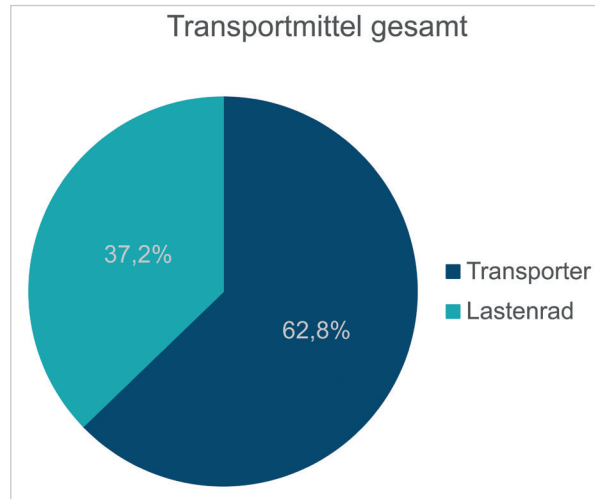
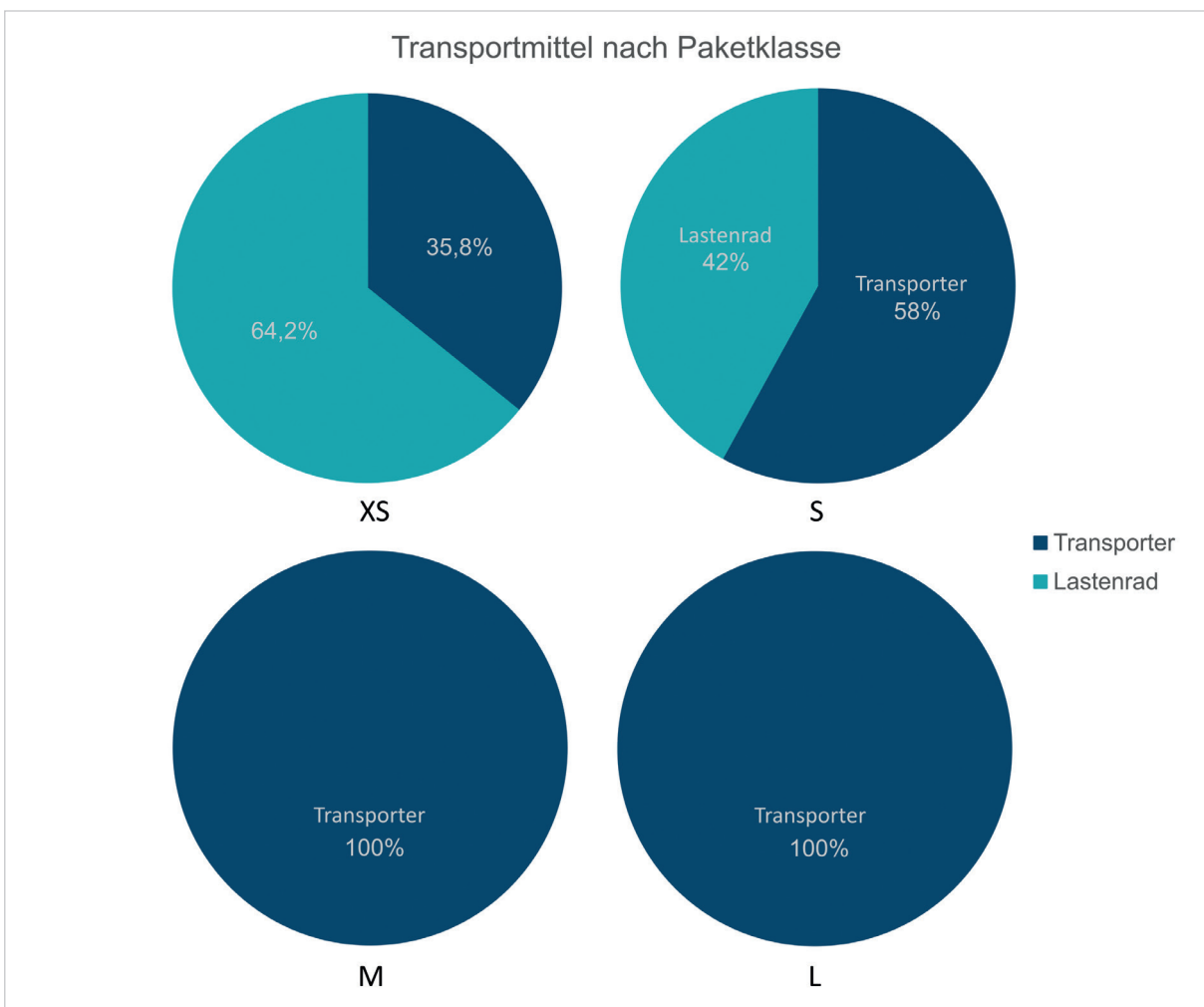


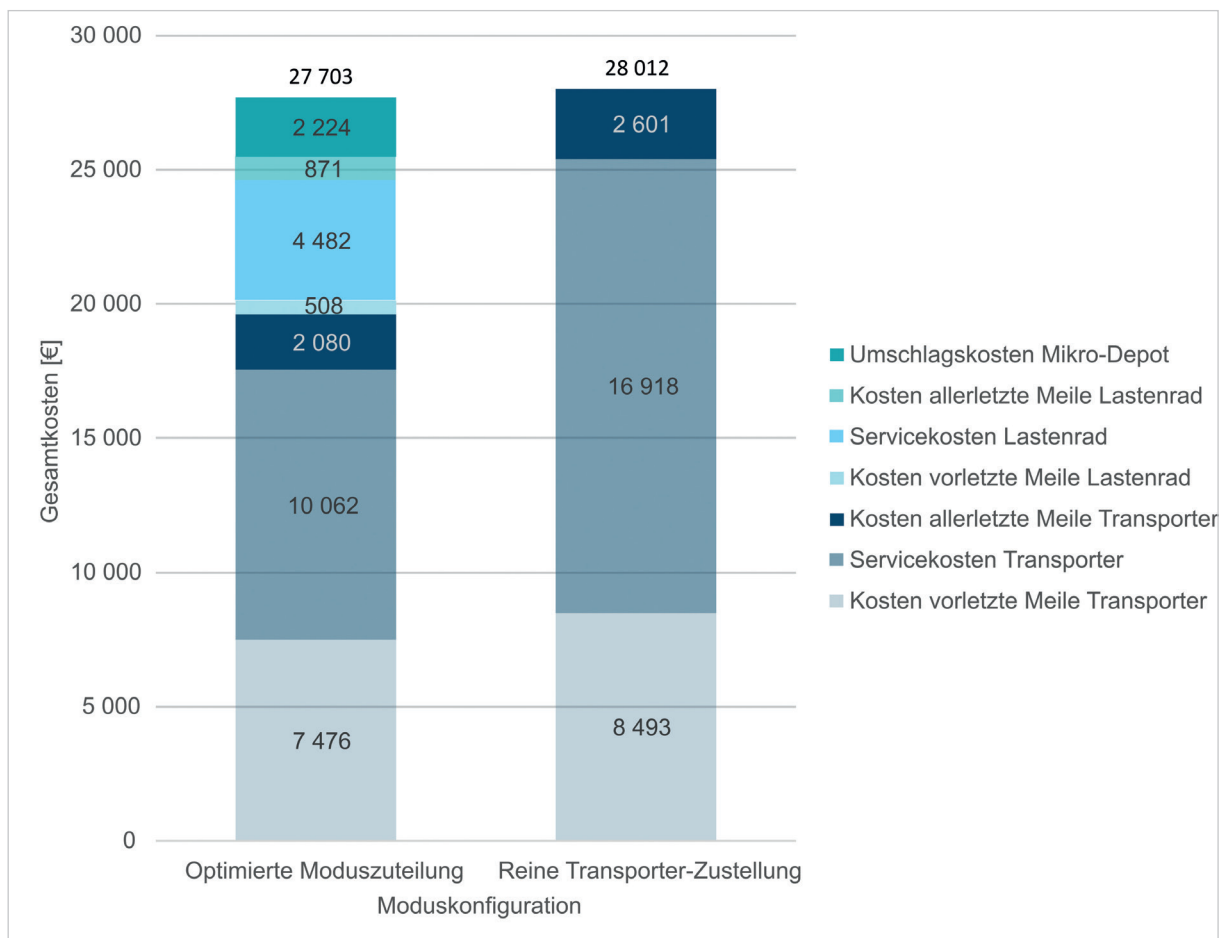
Abbildung 46: Transportmittelwahl nach Paketklasse Regensburg



Kostenvergleich

Die Nutzung des Lastenrads führt, wie auch in der Fallstudie für München, auch in Regensburg zu kaum einer Kostenreduktion. Allerdings zeigt Abbildung 47 klar, dass der Anteil der Kosten für das zweistufige Lastenradssystem deutlich ansteigt, da auch der Anteil der Lastenräder im Vergleich zu München höher ist.

Abbildung 47: Detaillierte Kostenaufschlüsselung Regensburg

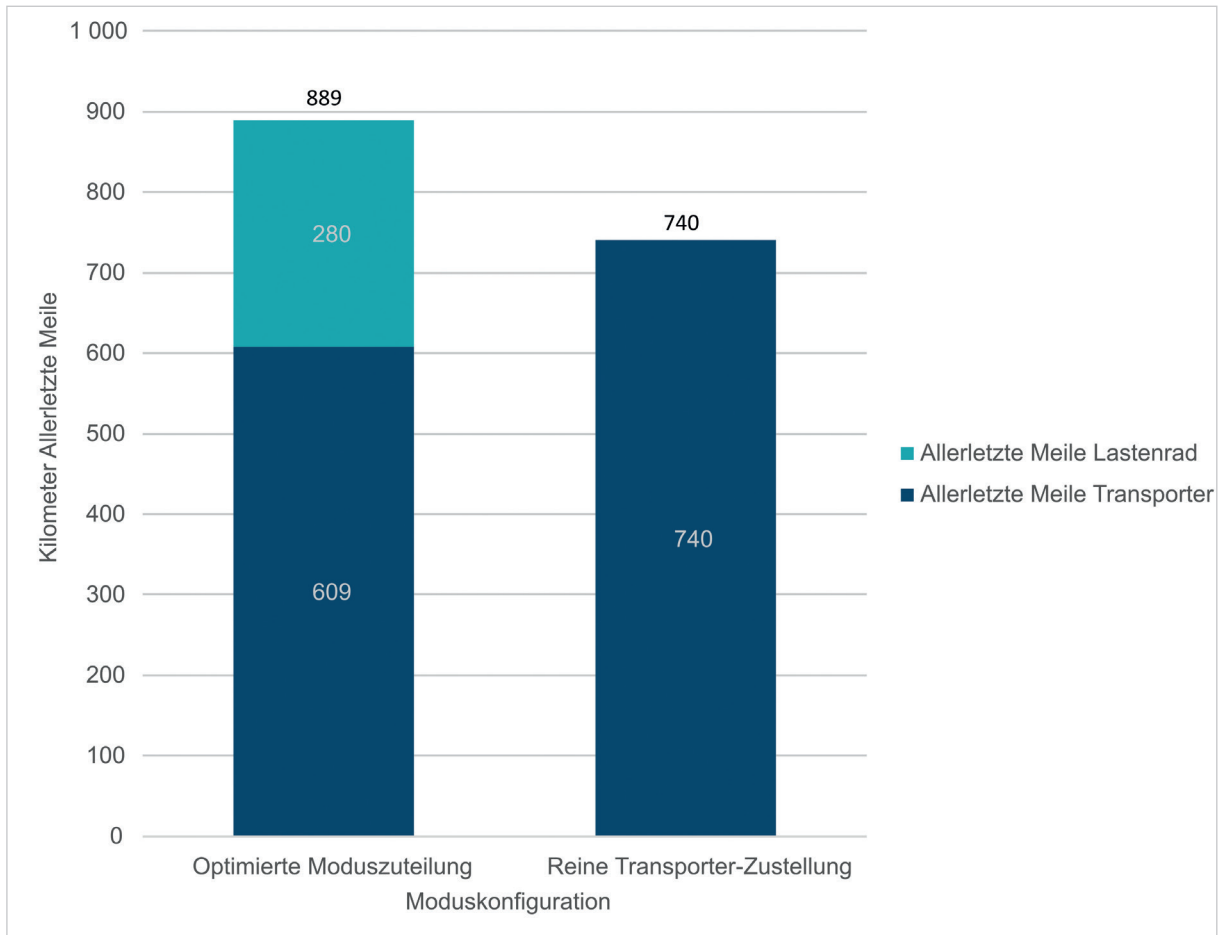


Innerstädtische Auswertung

Die Analyse der Kilometer der allerletzten Meile (Abbildung 48) zeigt, dass sich die Anzahl der gefahrenen Kilometer auch in Regensburg deutlich erhöht. Durch den noch höheren Anteil an Lastenrädern erhöhen sich die gefahrenen Kilometer auf

der allerletzten Meile um 20 Prozent. Der Anteil der Kilometer durch Transporter reduziert sich jedoch auch um fast 18 Prozent, sodass auch hier lokale Emissionen eingespart werden können (ca. 17 Prozent).

Abbildung 48: Kilometer der allerletzten Meile in Regensburg

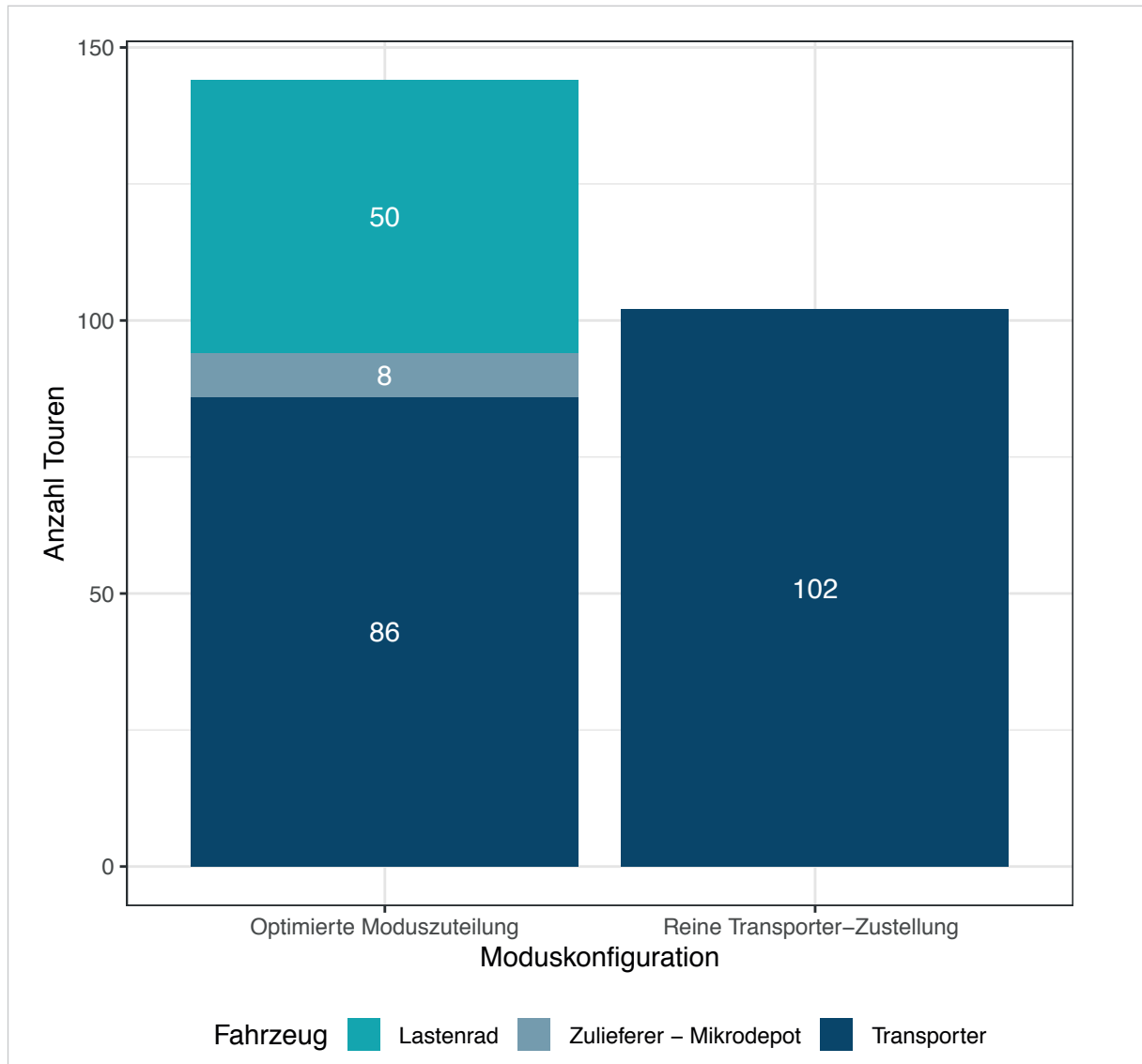


Ergebnisse der Simulation des Güterverkehrs

Infolge der Einführung von Lastenrädern (für 37% der in der Stadt Regensburg zugestellten Pakete) verringert sich auch die Anzahl der Touren mit Lieferwagen, und es muss wieder eine beträchtliche Anzahl von Touren mit Lastenrädern hinzugefügt

werden (und damit auch die Zubringerfahrten zur Versorgung der Mikro-Depots). Die Gesamtzahl der Touren wird also durch den Einsatz von Lastenrädern erhöht (Abbildung 49).

Abbildung 49: Anzahl Touren der letzten Meile (Regensburg)



Da die Touren mit Lastenrädern jedoch sehr viel kürzer sind, lässt sich dieser Anstieg nicht an der Gesamtstrecke und auch nicht an der Gesamtfahrzeit ablesen. Im Gegenteil, die Gesamtreise-

distanz ist im optimierten Szenario etwas höher, obwohl die Gesamtreisezeit etwas geringer ist (Abbildung 50).

Abbildung 50: Gesamtdistanz und Fahrzeit der letzten Meile (Regensburg) // Grafik 1 von 2

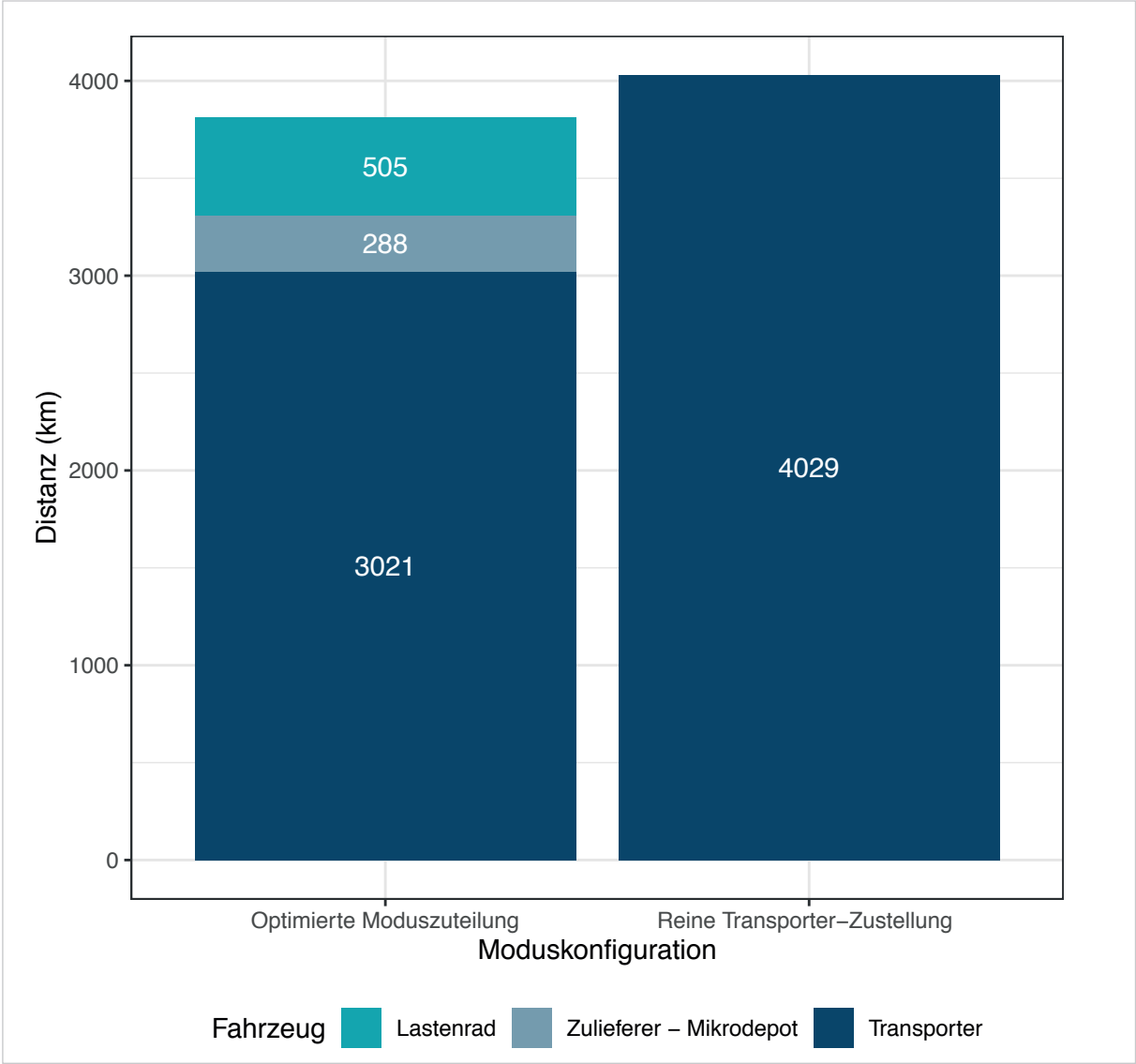
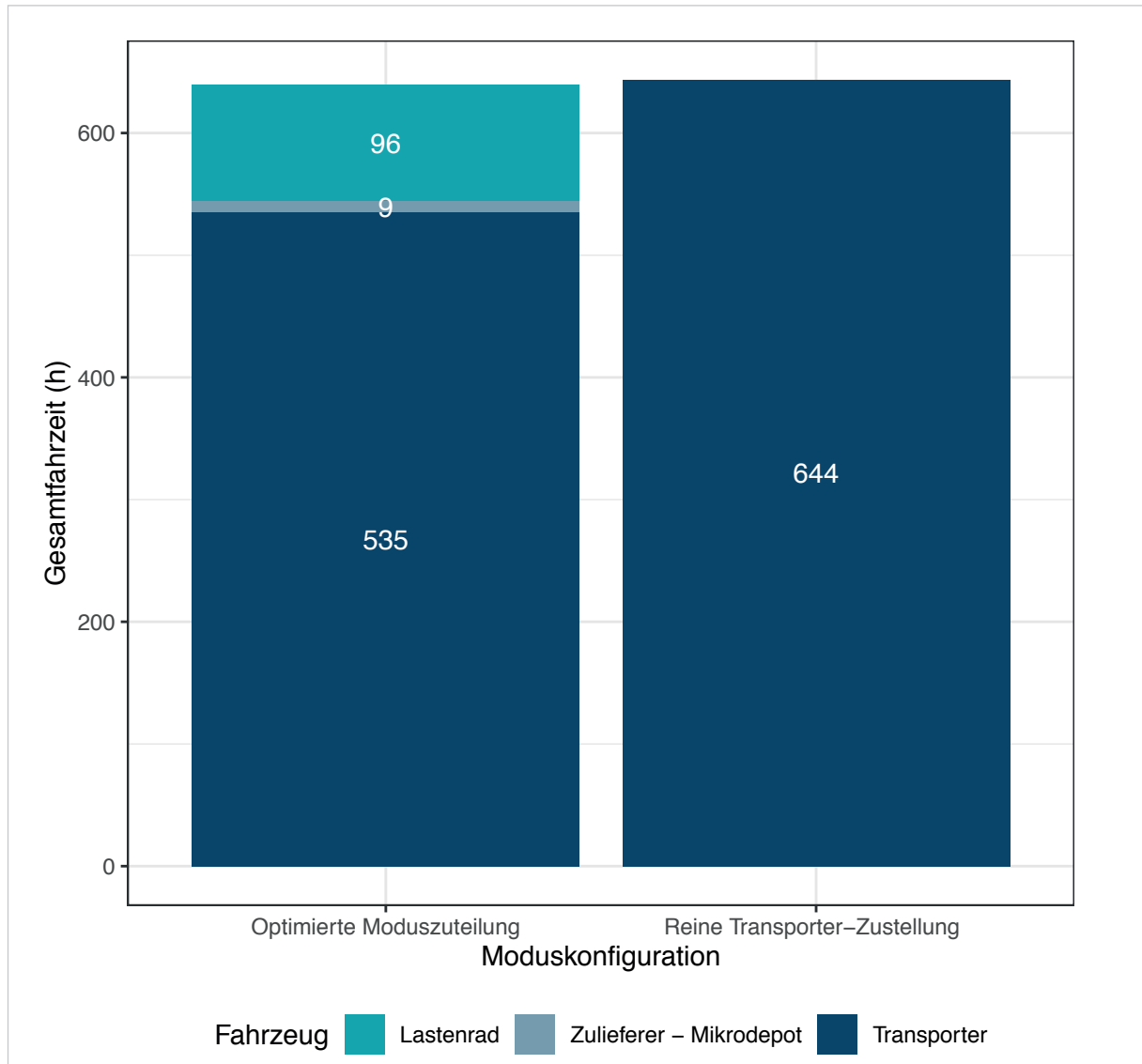


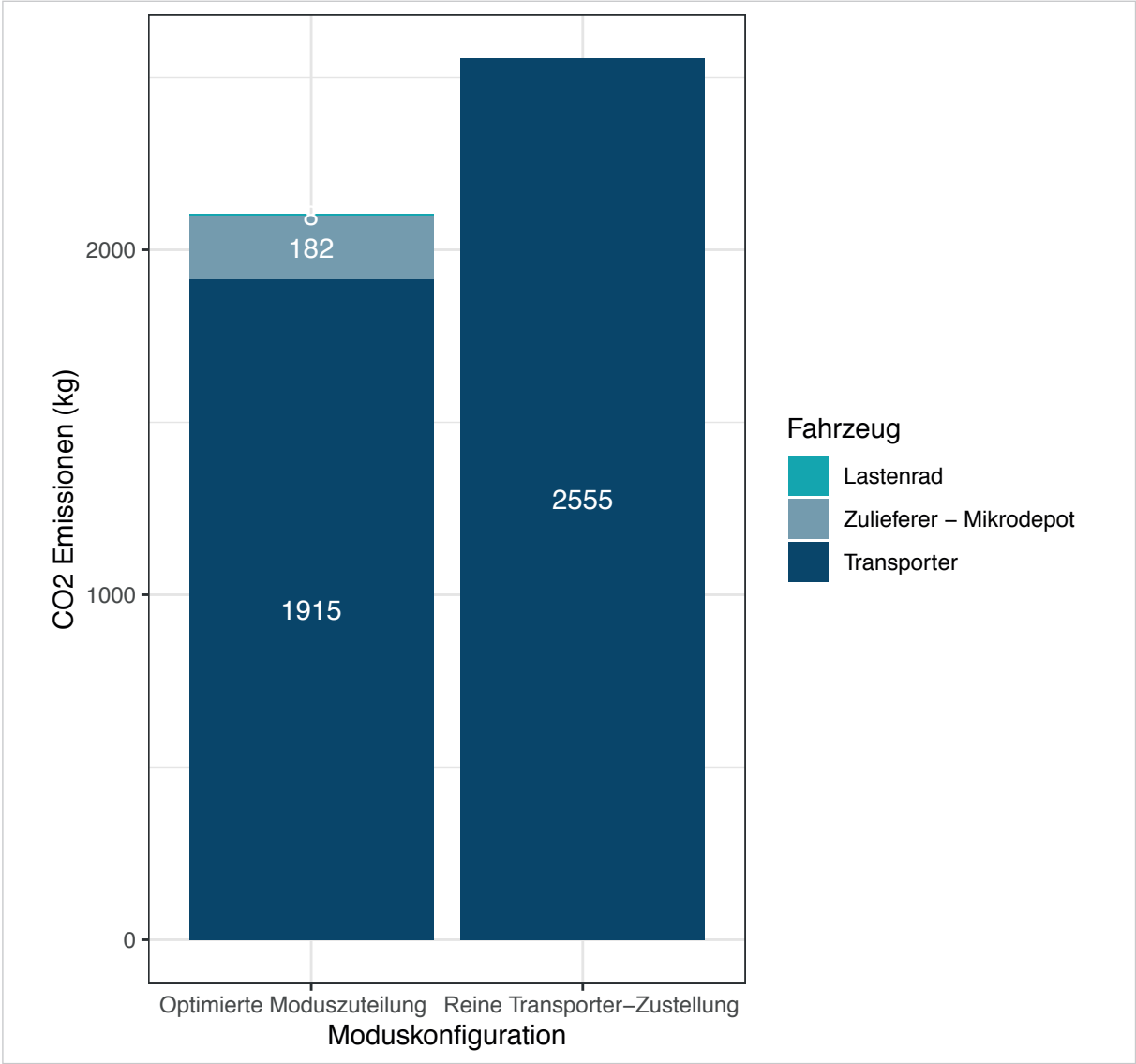
Abbildung 50: Gesamtdistanz und Fahrzeit der letzten Meile (Regensburg) // Grafik 2 von 2



Eine Verringerung der Fahrstrecke von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor hat als Ergebnis eine Verringerung der CO₂-Emissionen zur Folge, wie

in Abbildung 51 zu sehen ist. Die Emissionen aufgrund der Stromerzeugung von Lastenrädern sind relativ gesehen sehr gering.

Abbildung 51: CO₂-Emissionen der letzten Meile (Regensburg)



Lastenrad	Fahrrad, das durch spezielle Zuladungsflächen den Transport von Gütern ermöglicht.
Letzte Meile	Die letzte Teilstrecke der physischen Lieferkette.
Vorletzte Meile	Die Teilstrecke der letzten Meile vom Güterverteilzentrum in die Stadt / zum Mikro-Depot
Allerletzte Meile	Die Teilstrecke der letzten Meile von der Ankunft im Gebiet / vom Mikro-Depot zu den Kunden
Mikro-Depot	Dient dem innerstädtischen Umschlag der Güter auf Lastenräder (z.B. ein Container).
FOCA	Simulationsmodell, Freight Orchestrator for Commodity flows Allocation
MATSim	Multi Agent Transport Simulation
B2C	Business to Customer (Privatkunden)
B2B	Business to Business (Geschäftskunden)
KEP	Kurier-, Express-, Paketdienstleister
Wechselbrücke	austauschbare Ladungsträger für LKW

Literaturverweise

Bogdanksi, R. (2019). *Quantitative Untersuchung der konsolidierten Zustellung auf der letzten Meile am Beispiel zweier KEP-Unternehmen in den Städten Nürnberg und München. Studie im Auftrag des Bundesverbandes Paket und Expresslogistik e.V. (BIEK)*. Abgerufen 11.07.2020 von <https://www.biek.de/download.html?getfile=2326>.

Brabänder, C. (2020). Die Letzte Meile. Definition, Prozess, Kostenrechnung und Gestaltungsfelder. Essentials. Springer Gabler, Wiesbaden. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-29927-9>.

Bulwiengesa AG (2017). *Logistik und Immobilien 2017. Citylogistik. Mit neuen Ideen in die Stadt*. Abgerufen 07.07.2020 von https://logistik-und-immobilien.de/wp-content/uploads/2016/09/Bulwiengesa_Logistikstudie_2017_DE_Studie_Screen_Einzelseiten.pdf.

Bundesanstalt für Straßenwesen (2010). Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen. https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Verkehrszaehlung.html

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2014). Verkehrsverflechtungsprognose 2030. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030.html>

Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt (2019). Monitoring Bericht 2019. Abgerufen 17.08.2020 von https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2019/Monitoringbericht_Energie2019.pdf?__blob=publicationFile&v=5.

Bundesverband Paket und Expresslogistik e.V. (BIEK) (2019). *Mikro-Depots. Ein Plus für die Städte*. Abgerufen 07.07.2020 von <https://www.biek.de/download.html?getfile=2303>.

Bundesverband Paket und Expresslogistik e.V. (BIEK) (2019b). *Quantitative Untersuchung der konsolidierten Zustellung auf der letzten Meile*. Abgerufen 01.08.2020 von <https://www.biek.de/publikationen/studien.html>.

Bundesverband Paket & Express Logistik (BIEK) (2018). *Zahlen - Daten - Fakten der KEP Branche*. Abgerufen 25.08.2020 von <https://www.biek.de/publikationen/studien.html>.

Bundesverband Paket & Express Logistik (BIEK) (2018b). *Faktenpapiere - Kompendium Teil 5: Regionale Verteilung des KEP-Sendungsvolumens*. Abgerufen 25.08.2020 von <https://www.biek.de/publikationen/faktenpapiere.html?page=2>

Bundesverband Paket & Express Logistik (BIEK) (2018c). *Faktenpapiere - Kompendium Teil 5: Zeitliche Verteilung des KEP-Sendungsvolumens*. Abgerufen 08.09.2020 von <https://www.biek.de/publikationen/faktenpapiere.html>

DIN EN 16258:2012. (2013). Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)

European Commision (2019). Nomenclature of territorial units for statistics. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/administrative-units-statistical-units/nuts#nuts16>

European Commission (2019). Eurostat <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>

Fontaine, P., S. Minner, M. Schiffer. (2020). Sharing the Last Mile: Business Models and Coordination Mechanisms for Flexible and Green Last Mile Deliveries, Working Paper

Francis, P. M., Smilowitz, K. R., & Tzur, M. (2008). The period vehicle routing problem and its extensions. In *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges* (pp. 73-102). Springer, Boston, MA.

Giordano, A., Fischbeck, P., Matthews, H.S. (2018). Environmental and economic comparison of diesel and battery electric delivery vans to inform city logistics fleet replacement strategies. *Transportation Research Part D Transport and Environment*, 64, 216-229. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.003>

Gruber, J., C. Rudolph. (2016). *Untersuchung des Einsatzes von Fahrrädern im Wirtschaftsverkehr (WIV-RAD). Schlussbericht an das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)*. Abgerufen 07.07.2020 von <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/wiv-rad-schlussbericht.html>.

Horni, A., Nagel, K., Axhausen, K.W. (2016). *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. London: Ubiquity Press. DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/baw>.

Icha, P., & Kugs, G. (2019). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2018. Umweltbundesamt - Climate Change, 10, 29. Retrieved from https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-10_cc_10-2019_strommix_2019.pdf (Zugriff: 04.01.20)

jsprit (2020) <https://github.com/graphhopper/jsprit>

Kummer, S., Dobrovnik, M., Herold, D. M., Hribernik, M., Mikl, J. (2019). *Citylogistik Wien: Der Einfluss von Paketdienstleistern auf den Gesamtverkehr*. Endbericht der Studie. Abgerufen am 01.08.2020 von https://epub.wu.ac.at/7432/1/Endbericht_Post_City_Logistik.pdf

Moreno, A., & Moeckel, R. (2018). Population Synthesis Handling Three Geographical Resolutions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(5), 174. <https://doi.org/10.3390/ijgi7050174>

OpenStreetMaps (o.J.). <http://www.openstreetmaps.org>

Pfohl, H. C. (2016). *Strategische Logistikplanung*. In *Logistikmanagement*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.

Robert Bosch GmbH (o. D.). eBike Reichweiten-Assistent. Abgerufen 07.07.2020 von <https://www.bosch-ebike.com/de/service/reichweiten-assistent/>.

Saenz, J., Figliozzi, M., Faulin, J. (2016). Assessment of the Carbon Footprint Reductions of Tricycle Logistics Services. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2570(1), 48-56. <https://doi.org/10.3141/2570-06>

Schroeder, S., Zilske, M., Liedtke, G., Nagel K. (2012). A computational framework for a multi-agent simulation of freight transport activities. In: *91st Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington DC (US)

Sheth, M., Butrina, P., Goodchild, A., McCormack, E. (2019). Measuring delivery route cost trade-offs between electric-assist cargo bicycles and delivery trucks in dense urban areas. *European Transport Research Review* 11(1):11

Stadt Regensburg, Amt für Stadtentwicklung (2018). <http://www.statistik.regensburg.de/>

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2011). Zensus 2011. https://www.zensus2011.de/DE/Home/home_node.html

Stodick, K., Deckert, C. (2019). Sustainable parcel delivery in urban areas with micro depots. E. Sucky, N. Kolke, N. Biethahn, J. Werner, & M. Vogelsang (Hrsg.) *Mobility in a globalised world 2018*, University of Bamberg Press, Bamberg, 233-244. DOI: <https://doi.org/10.20378/irbo-54827>.

Tipagornwong, C., & Figliozzi, M. (2014). Analysis of Competitiveness of Freight Tricycle Delivery Services in Urban Areas. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2410(1), 76-84. <https://doi.org/10.3141/2410-09>

Tretbox GmbH (2019). Projekte. Abgerufen 19.08.2020 von <https://onotion.com/de/projekte/>.

Tripp, C. (2019). *Distributions- und Handelslogistik. Netzwerke und Strategien der Omnichannel-Distribution im Handel*. Springer Gabler, Wiesbaden. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-24118-6>.

Wachotsch, U., A. Kolodziej, B. Specht, R. Kohlmeier, F. Petrikowski (2014). *E-Rad macht mobil. Potenziale von Pedelecs und deren Umweltwirkung*. Abgerufen 07.07.2020 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/hgp_e-rad_macht_mobil_-_peleecs_4.pdf.

Wolpert, S. (2013). *City-Logistik. Bestandsaufnahme relevanter Projekte des nachhaltigen Wirtschaftsverkehrs in Zentraleuropa*. Fraunhofer Verlag.

Anhang 1

Nachfragemodell

Verfügbarkeit

Das Modell FOCA ist Open-Source und kann unter <https://github.com/msmobility/foca> heruntergeladen werden. FOCA ist in JAVA geschrieben. Zusätzliche technische Details können unter <https://wiki.tum.de/display/msmmodels/FOCA> gefunden werden. Im nächsten Abschnitt werden die Eingabedaten des Modells beschrieben.

Beschreibung der Datenbanken

In diesem Projekt werden Güterverkehrsströme als wichtigste Datengrundlage verwendet. Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) hat die sogenannten Verflechtungsprognosen publiziert, die sowohl Personenfahrten als auch Güterströme abbilden (BMVI, 2014). Güterströme werden als Jahresvolumen für die Jahre 2010 und 2030 bereitgestellt. Alle Güterströme, die in Deutschland beginnen oder enden sowie externe Güterströme, die durch Deutschland durchgehen,

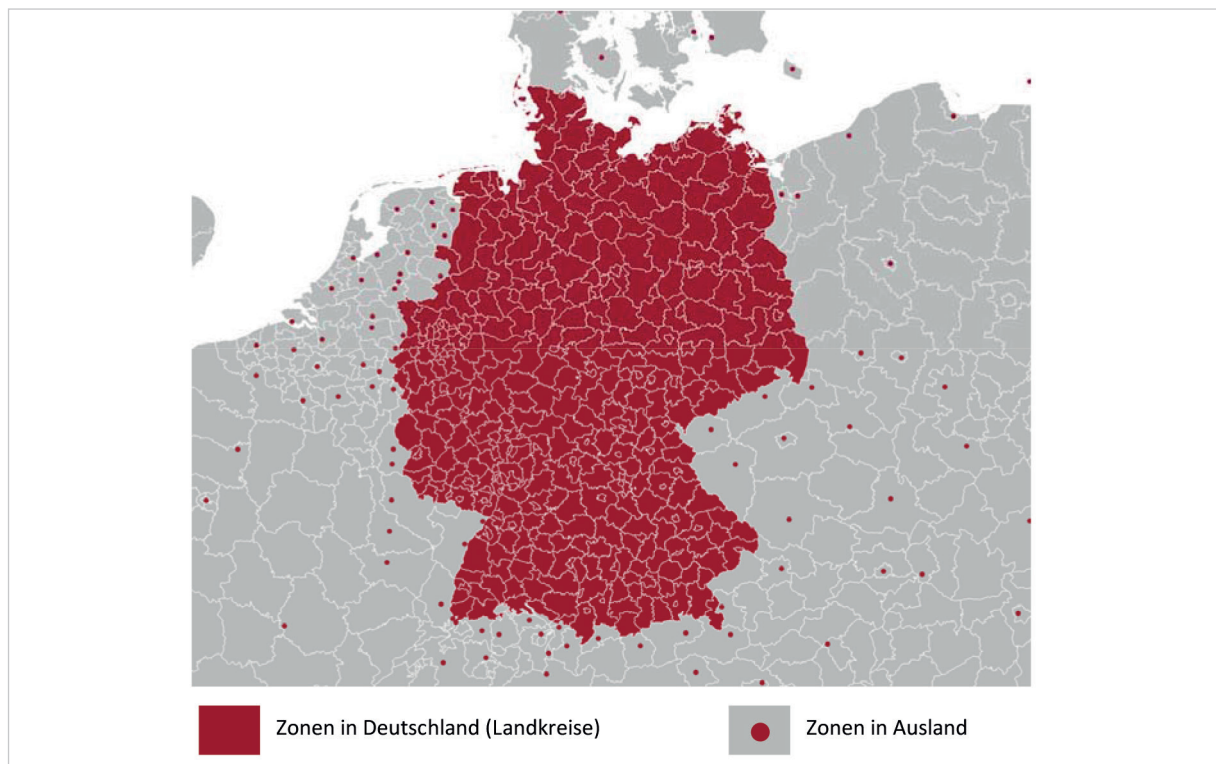
sind miteinbezogen. Die räumliche und sachliche Auflösung dieser Daten wird hier näher beschrieben.

Jeder Eintrag in diesem Datensatz beschreibt das jährliche Güterverkehrsaufkommen in Tonnen für eine bestimmte Gütergruppe für ein Quelle-Ziel-Paar für einen Verkehrsmodus. Gütergruppen sind nach dem NST2007 Konzept in 25 Gruppen aufgeteilt. Die räumliche Auflösung von Quelle und Ziel wird in Abbildung 1-1 dargestellt.

- Innerhalb von Deutschland: 412 Landkreise und kreisfreie Städte
- Außerhalb von Deutschland: 153 Zonen, die sukzessive größer werden, je weiter sie von Deutschland entfernt sind

Intermodale Güterverkehrsströme stellen ferner den Vorlauf und Nachlauf dar, sodass alle beteiligten Verkehrsmodi sowie die Transferstandorte abgebildet werden.

Abbildung 1-1: Zonen in der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 (Quelle: eigene Abbildung, European Commission (2019))



Unter <https://wiki.tum.de/display/msmmodels/FOCA> befinden sich genaue Spezifikationen zu den Eingabedateien.

Disaggregation der Güterverkehrsströme

Die Daten der Verflechtungsprognose sind in der räumlichen und zeitlichen Auflösung zu grob, um das Potential von Lastenrädern abschätzen zu können. Daher werden die Daten disaggregiert. Dazu werden zunächst Güterverkehrsströme auf ein feinteiliges Zonensystem räumlich disaggregiert. Anschließend werden Güterströme in Tonnen auf Fahrzeuge umgerechnet. Schließlich werden jährliche Güterströme in tägliche disaggregiert.

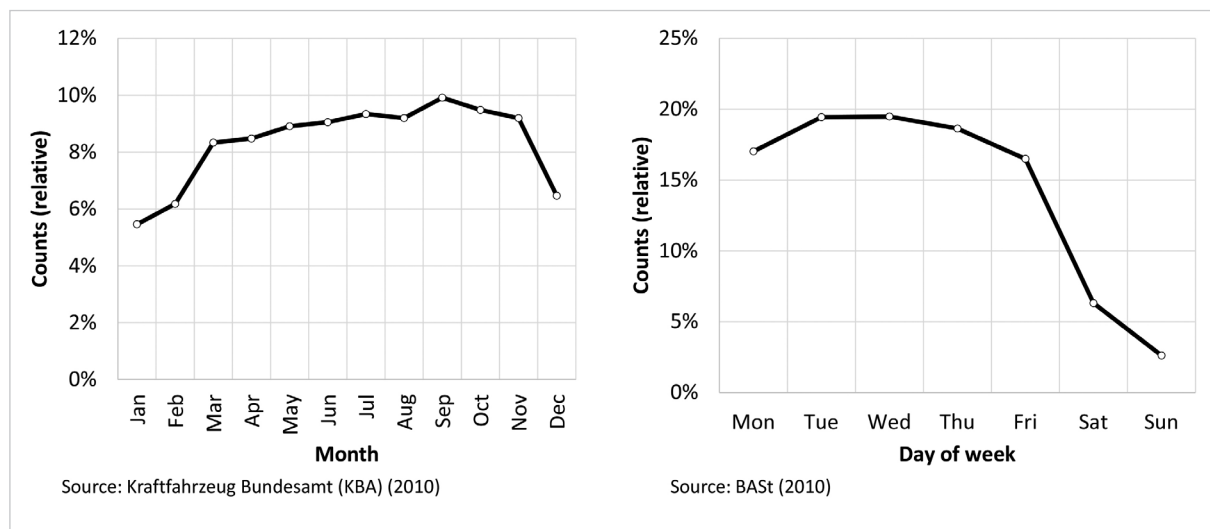
Zeitliche Disaggregation

Jährlichen Güterverkehrsströme werden durch einen „Jahr-zu-Tag-Faktor“ dividiert, um tägliche Güterverkehrsströme zu erzeugen. Dazu wurden zunächst Schwankungen in Güterströmen pro Monat und pro Wochentag analysiert (siehe Abbildung 1-2). Verschiedene „annualization factors“ werden im Modell verwendet:

- Der „Jahr-zu-Tag-Faktor“ 365 wird genutzt, um einen durchschnittlichen Tag abzubilden.
- Der „Jahr-zu-Tag-Faktor“ 286,3 wird genutzt, um einen durchschnittlichen Wochentag (Montag bis Freitag) abzubilden.
- Der „Jahr-zu-Tag-Faktor“ 1167 wird genutzt, um einen durchschnittlichen Tag am Wochenende abzubilden (Samstag und Sonntag)

Ferner können verschiedene „Jahr-zu-Tag-Faktoren“ angewandt werden, um saisonale Schwankungen abzubilden. Derzeit werden „Jahr-zu-Tag-Faktoren“ nicht nach Gütergruppe unterschieden. Weil die „Jahr-zu-Tag-Faktoren“ durch Verkehrszählungen berechnet wurden (die das transportierte Gut nicht kennen), kann derzeit kein gütergruppenspezifischer „Jahr-zu-Tag-Faktor“ ermittelt werden.

Abbildung 1-2: Anzahl der LKW nach Monat und Wochentag (Quelle: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2010)



Umrechnung von Gewicht in Fahrzeuge

Als nächstes werden Güterverkehrsströme in Tonnen für jedes Quelle-Ziel-Paar auf Fahrzeuge umgerechnet. Derzeit werden ausschließlich Güterverkehrsströme auf der Straße (LKW) berücksichtigt. Für Ströme auf anderen Verkehrsträgern werden außerdem Vor- und Nachlauf berücksichtigt, sofern diese per LKW abgewickelt werden. Abhängig von der Art des Güterverkehrsstroms werden Tonnen auf Fahrzeuge unterschiedlich umgerechnet. Für Paketauslieferungen werden die folgenden Schritte berücksichtigt:

- Fernverkehr: Güter werden in LKWs von der Quelle zu einem Verteilzentrum am Ziel transportiert. Güterverkehrsströme werden mit Hilfe eines durchschnittlichen Ladungsfaktors auf Fahrzeuge umgerechnet. Der Ladungsfaktor wird unterschieden nach Entfernung des Güterverkehrsstroms. Außerdem wird ein gewisser Prozentanteil von Leerfahrten hinzugerechnet.
- Verteilzentrum: Güter werden in räumlicher Nähe zum Ziel des Güterverkehrsstroms in einem Güterverteilzentrum umgeladen. Falls der Zielort mehrere Verteilzentren hat, wird eines aufgrund der Anzahl bedienter Einwohner und Arbeiter ausgewählt.
- Letzte Meile: Post und Pakete werden in Einzelsendungen (Pakete) aufgeteilt. Jede Einzelsendung wird einer Zielzone zugeteilt. Kleine Fahrzeuge (LKW oder Lastenrad) transportieren Pakete in Touren zum jeweiligen Endziel.

Räumliche Disaggregation

Für Post und Pakete werden agentenbasiert für jede Sendung eine Zielzone ausgewählt.

Die räumliche Disaggregation wird ausschließlich innerhalb dieses Projekts in der Untersuchungsräume München und Regensburg durchgeführt. Aus diesem Grunde wurden für diese zwei Städte detaillierte Zonensysteme entwickelt.

Für die Stadt München wurde ein Zonensystem mit dem Quadtree Algorithmus an der TUM entwickelt. In diesem graduellen Zonensystem gibt es kleinere Zonen in Gebieten mit höherer Bevölkerungsdichte und größere Zonen in Regionen mit geringerer Bevölkerungsdichte. Die kleinsten Zonen haben eine Größe von 200 x 200 Meter. Insgesamt wurden so 1.904 Zonen für das Stadtgebiet München generiert. Für Regensburg gibt es ein temporäres Zonensystem mit Rasterzellen von 1.000 x 1.000 Meter. Insgesamt gibt es 255 Zonen in Regensburg. Abbildung 1-3 zeigt die Zonensysteme für München und Regensburg.

Abbildung 1-3: Mikrozonon in München (links) und Regensburg (rechts)



Für die Disaggregation von Sendungen, die von Privatpersonen gesendet oder empfangen werden, wird jeder Mikrozone proportional zu deren Bevölkerung ein Gewicht für die Disaggregation zugewiesen. Der Zensus aus 2011 wurde für die Daten der Bevölkerungsdichte herangezogen (Statistische Ämter des Bundes und der Länder).

Für die Disaggregation von Sendungen, die von Unternehmen gesendet oder empfangen werden, wird jeder Mikrozone ein Gewicht mit Hilfe von Gleichung (1) am Quellort und Gleichung (2) am Zielort zugewiesen.

In beiden Fällen wird eine Mikrozone aufgrund dieser Gewichte ausgewählt.

(1)

$$w_{z,c} = \sum_{i \in \text{industries}} N_{\text{employment}, i, z} \cdot uc_{i, c}$$

- $w_{z,c}$ ist das Gewicht der Mikrozone z für die Gütergruppe c
- $N_{\text{employment}, i, z}$ ist die Anzahl der Beschäftigten in der Branche i in der Mikrozone z
- $uc_{i,c}$ ist der Konsumkoeffizient, der beschreibt, wie viele Güter der Gütergruppe c je Beschäftigten in Branche i empfangen werden.

(2)

$$w_{z,c} = \sum_{i \in \text{industries}} N_{\text{employment}, i, z} \cdot mc_{i, c}$$

- $mc_{i,c}$ ist der Produktionskoeffizient, der beschreibt, wie viele Güter der Gütergruppe c je Beschäftigten in Branche i produziert werden.

Konsum- und Produktionskoeffizienten wurden von Eurostat (European Commission, 2019) für Deutschland für das Jahr 2010 erhoben. Die Anzahl der Arbeiter pro Mikrozone werden von einer synthetischen Population (Moreno und Moeckel, 2018) und von Stadt Regensburg (2018) ermittelt.

Anhang 2

Kostenmodell

Für das Kostenmodell wurde ein Continuous Approximation Modell (vgl. Francis and Smilowitz 2006) entwickelt. Das Stadtgebiet wird in Teilregionen eingeteilt. Innerhalb dieser Regionen werden die Kosten der einzelnen Transportmöglichkeiten m bestimmt. m ist hierbei entweder das Lastenrad oder ein herkömmlicher Transporter. Darüber hinaus werden verschiedene Paketklassen l mit volume κ^l berücksichtigt. Innerhalb dieser Teilregionen definiert δ^l die Kundendichte der jeweiligen Paketklasse. Darüber hinaus definieren wir

r	Distanz der vorletzten Meile
c^m	Kosten pro km der vorletzten Meile mit Transportträger m
n^m	Anzahl Stopps mit Transportträger m
v^m	Volumen pro Stopp mit Transportträger m
$\bar{c}^m$	Kosten pro km der allerletzten Meile mit Transportträger m
k	Approximationskonstante
τ^m	Servicekosten pro Stopp
$\hat{\tau}^m$	Extra-Handling Kosten am Mikro-Depot pro Volumen

Dadurch lässt sich die allgemeine Kostenfunktion, die sowohl die Kosten der vorletzten Meile als auch die Kosten der allerletzten Meile definiert, aufstellen (siehe Abbildung 2-1).

Dabei sind die Kosten der vorletzten Meile (1) die Kosten für den Transport vom Depot ins Gebiet. Folglich wird die Distanz der vorletzten Meile r zweimal zurückgelegt. Für die traditionelle Belieferung durch den Transporter entspricht das dem Weg des Transporters ins Gebiet und wieder zurück. Für die Lastenrad-Belieferung sind es die Kosten für den Transport der Pakete zum Mikro-Depot. Die Kosten der allerletzten Meile (2) repräsentieren die Kosten innerhalb des Gebiets des jeweiligen Fahrzeugs. Diese sind aufgeteilt in die Fahrtkosten innerhalb des Gebietes (2a), die Servicekosten (2b), die bei der Parkplatz-Suche, beim Abstellen des Fahrzeugs, beim Liefern des Pakets sowie bei der Rückkehr zum Fahrzeug entstehenden Kosten, und die Extra-Handling-Kosten

(2c), die lediglich beim Lastenradkonzept für den Transfer auftreten und die Kosten des Mikrodepots.

Mit Hilfe dieser Kostenfunktion wird das Entscheidungsmodell definiert und im folgenden genutzt, um sowohl allgemeine Aussagen herzuleiten, als auch um die Einsparungen der Konsolidierung zu beweisen. Das Entscheidungsmodell nutzt dabei die gebietsspezifischen Dichteverteilungen und kann somit für jedes Gebiet die kostenoptimale Entscheidung treffen.

Abbildungen Kapitel 4.2

Die dargestellten Abbildungen 6 - 8 zeigen beispielhaft den Einfluss der untersuchten Faktoren und nutzen die Daten der Stadt München (Kapitel 8.2). Dazu wurden die Daten mittels eines vollständigen Versuchsplans (Full factorial design) erzeugt. Basierend auf den Parametern in Kapitel 8.2 wurden die Servicekosten für das Lastenrad zwischen 90% und 110% variiert, die Extra-Handlingkosten am Mikro-Depot zwischen 90% und 110% und die durchschnittliche Geschwindigkeit der Lastenrads zwischen 10 und 20 km/h. Die Geschwindigkeit des Transporters blieb dabei unberührt.

In den Abbildungen wird somit der Mittelwert über zwei der drei Parameter berechnet und auf Basis des dritten Parameters gruppiert.

Kapitel 5

Die berechneten Kosteneinsparungen basieren auf der Annahme, dass mehrere Dienstleister ein identisches Transportsystem (z.B. bei Transporter) nutzen und innerhalb der gleichen Teilregion identische Volumina ausliefern. Weitere Analysen zeigen, dass die Ergebnisse auch für nicht idealisierte Fälle verallgemeinern lassen und ähnliche Einsparpotenziale existieren.

Abbildungen 11 und 12 zeigen exemplarisch, ob sich ein konsolidiertes System aus ökonomischer Sicht lohnt. Dazu wird das Einsparpotenzial (abhängig vom Volumen) den zusätzlichen Kosten der Konsolidierung gegenübergestellt. Dabei wird in Abbildung 11 eine lineare Kostenfunktion angenommen und in Abbildung 12 eine nichtlineare. Je nach Kostenparameter verändert sich das Potenzial der Kosteneinsparung.

Abbildung 2-1: Allgemeine Kostenfunktion der vorletzten und allerletzten Meile

$$z^m(x) = \underbrace{\frac{2r(x)\bar{c}^m}{n^m(x)v^m(x)}}_{\text{vorletzte Meile (1)}} + \underbrace{\frac{\overbrace{c^m k (\Delta^m(x))^{-1/2}}^{\text{Fahrtkosten (2a)}} + \overbrace{\tau^m}^{\text{Service (2b)}} + \overbrace{\hat{\tau}^m v^m(x)}^{\text{Extra-Handling (2c)}}}{v^m(x)}}_{\text{allerletzte Meile (2)}}$$

Anhang 3

Simulation des Güterverkehrs

Verfügbarkeit

Die Simulation des Güterverkehrsstromes erfolgt auch innerhalb des Modells FOCA. Der Code kann von <https://github.com/msmobility/foca> heruntergeladen werden. FOCA ist in JAVA geschrieben. Zusätzliche technische Details können in <https://wiki.tum.de/display/msmmodels/FOCA> gefunden werden. Das Modell benutzt, unter anderem, die externen JAVA Bibliotheken MATSim und MATSim-Erweiterung „freight“, die ebenfalls als Open-Source verfügbar sind.

Multi Agent Transport Simulation (MATSim)

Ziel der Verkehrsumlegung ist die Routenwahl der LKW und Lastenräder, um den Einfluss auf das Verkehrssystem und die natürliche Umwelt zu untersuchen. Das Straßennetzwerk wurde von OpenStreetMap (o.J.) heruntergeladen. Das Straßennetzwerk deckt die gesamte Fläche von Europa ab, wobei die räumliche Auflösung variabel ist. Die untersuchten Gebiete von München und Regensburg werden im Detail mit dem kompletten Straßennetzwerk abgedeckt. Regionen, die weiter von Deutschland entfernt sind, werden nur über das Autobahnnetz angebunden.

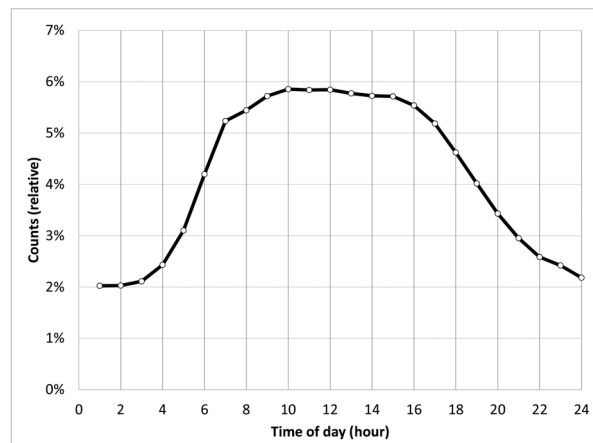
Getrennte Radwege (unabhängig von Straßen für den motorisierten Verkehr) in die Städte München und Regensburg werden auch von OpenStreet-Maps heruntergeladen und zu dem Netzwerk hinzugefügt.

Um die Straßengüterverkehrsflüsse zu validieren, wurden LKW-Verkehrszählungen auf den Hauptstraßen herangezogen und georeferenziert. Die Verkehrszählungen kommen von der Bundesanstalt für Straßenwesen (2010).

Die Umlegung wird mit Hilfe des Multi-Agent Transport Simulator (MATSim) (Horni et al., 2016) durchgeführt. MATSim Pläne werden mit Koordinaten des Quellortes, Koordinaten des Zielortes und mit der Abfahrtszeit beschrieben. Die Abfahrtszeiten werden von der Verteilung in Abbildung 3-1 zufällig ausgewählt. Die Verteilung wurde so kalibriert, dass die stündlichen Verkehrszählungen so genau wie möglich repliziert wurden.

Die Fahrten der letzten Meile werden auch auf das Netzwerk umgelegt. Die Touren sind aber noch nicht bekannt. Die Touren werden mithilfe der MATSim „freight contribution“ generiert, wie im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

Abbildung 3-1: Verteilung der LKW-Abfahrtszeiten



Freight-Erweiterung und jsprit-Algorithmus für Paketauslieferungen

Die MATSim Erweiterung „Freight“ (Schroeder et al., 2012) wurde genutzt, um Touren der Paketauslieferung zu erzeugen und diese Fahrten auf Lieferfahrzeuge zu verteilen. Es wird angenommen, dass jedes Güterverteilzentrum nur eine Lieferfirma bedient, und Lieferungen von diesem Verteilzentrum werden auf möglichst wenige Fahrzeuge optimiert. Die Flottengröße wird entsprechend des Bedarfs ermittelt, um alle Pakete in einem vorgegebenen Zeitfenster ausliefern zu können.

Wenn die Pakete per Lieferwagen geliefert werden, werden die Touren direkt durch den jsprit-Algorithmus (jsprit, 2020) des Programms entworfen und optimiert. Wenn die Pakete mit Lastenrädern geliefert werden, werden Zulieferertouren zwischen dem Verteilzentrum und den Mikro-Depots, und, in einem zweiten Schritt, Touren mit Lastenrädern generiert.

Lieferwagen und Lastenräder sind verschiedene MATSim-Transportmodi, sodass eine Beschränkung auf bestimmte Kanten des Netzwerks (z.B. Radwege nur für Lastenräder) möglich ist.

Zusätzlich wird für jede Lieferung eine Servicezeit berechnet, die auf der Entfernung zwischen dem Fahrzeugabstellort und den Koordinaten des Kunden basiert.

Zusammen mit PKW-Fahrten, die in einem anderen Projekt an der TUM entwickelt wurden, und mit LKW-Fernfahrten und Auslieferungsfahrten können somit Daten zum Verkehrsaufkommen erzeugt und so Reise- (und Stau-)zeiten aufgezeigt werden.

Emissionen

Nach der Durchführung der Verkehrsaufnahme werden die Emissionen der Lieferfahrzeuge berechnet. Es wurden vereinfachte Emissionsfaktoren verwendet, sodass die Emissionen von der von den Fahrzeugtypen zurückgelegten Strecke abhängen. Die Berechnung erfolgt anhand der Gleichungen 1 (Dieselfahrzeuge) und 2 (Elektrofahrzeuge).

$$E = \frac{d}{100} \cdot k \cdot e \quad (1)$$

- E: CO₂-Emissionen
- d: Zurückgelegten Fahrzeugkilometer (km)
- k: Kraftstoffverbrauch in l pro Distanz (l/100km) (20 l/100 km, Tipagornwong & Figliozzi, 2014)
- e: Emissionen in g pro l Kraftstoffverbrauch (g/l) (3.170 g/l, DIN EN 16258:2012, 2013)

$$E = \frac{d}{100} \cdot k \cdot e \quad (2)$$

- E: CO₂-Emissionen
- d: Zurückgelegten Fahrzeugkilometer (km)
- k: Stromverbrauch in kWh pro Distanz (kWh/100km) (50 kWh/100 km für Transporter, Giordano et al, 2019 und 3 kWh/100 km für Lastenräder, Saenz et al., 2016)
- e: Emissionen in g pro kWh Stromerzeugung (g/kWh) (518 g/kWh, Icha & Kugs, 2019).





// Autoren

Prof. Dr. Pirmin Fontaine
Juniorprofessur für Operations Management
an der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt

Prof. Dr. Stefan Minner,
Dr. Patricia Rogetzer,
Konstantin Geier,
Maximiliane Rautenstraß
Lehrstuhl für Logistik und Supply Chain Management
an der Technischen Universität München

Prof. Dr. Rolf Moeckel,
Dr. Carlos Llorca
Professur für Modellierung räumlicher Mobilität
an der Technischen Universität München

Die Autoren übernehmen keine rechtliche Gewähr für Richtigkeit und Vollständigkeit des Inhalts. Für Satz- und Druckfehler, für unrichtige Angaben der Unternehmen sowie für Marken- und Urheberrechte wird jeglicher Schadensersatz ausgeschlossen. Namen von Produkten und Dienstleistungen sind Marken der jeweiligen Firmen. Die Angaben im Text sind unverbindlich. Aus den in dieser Publikation enthaltenen Informationen ergibt sich keine weiterführende Haftung.

// Herausgeber

Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt
Ingolstadt School of Management
Juniorprofessur für Operations Management
Auf der Schanz 49, 85049 München
E-Mail: pirmin.fontaine@ku.de

Technische Universität München
TUM School of Management

Lehrstuhl für Logistik und Supply Chain Management
Arcisstr. 21, 80333 München
E-Mail: logistics.wi@tum.de
Technische Universität München
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt
Professur für Modellierung räumlicher Mobilität
Arcisstr. 21, 80333 München
E-Mail: rolf.moeckel@tum.de

// Copyright

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung, auch auszugsweise, außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne schriftliche Zustimmung der Autoren unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen. © 2021

// Bildrechte

Die Gestaltung, Grafiken und Illustrationen sind urheberrechtlich geschützt und dürfen ohne Zustimmung der Designerin nicht vervielfältigt werden. Folgende Bilder wurden von dem Bildarchiv www.shutterstock.de erworben bzw. wurden von den genannten Unternehmen zur Verfügung gestellt und sind ebenfalls urheberrechtlich geschützt:

S. 6: Giacomo Pratellesi / Shutterstock.com
S. 8: fongbeerredhot / Shutterstock.com
S.12: ONO Lastenräder / Tretbox GmbH
S.12: Pickup Work 2.0 / Gemeinnützige Werkstätten und Wohnstätten GmbH
S.13: lademeister / tricago
S.16: Gorodenkoff / Shutterstock.com
S. 22: Connect world / Shutterstock.com

// Konzeption & Gestaltung

Stephanie Schmidt, Kommunikationsdesignerin

