

Modellbasierte Ermittlung von verkehrlichen Potentialen eines stadtbahnbasierten Gütertransports im Projekt LogIKTram in Karlsruhe

Lukas Barthelmes*, Emre Görgülü, Jelle Kübler, Martin Kagerbauer, Peter Vortisch

Siehe AutorInnenangaben

Abstract

Als Reaktion auf das steigende Paketaufkommen werden neue, nachhaltige Konzepte der City-Logistik gesucht. Eine Lösung kann die Nutzung der bestehenden städtischen Schieneninfrastruktur über Cargo Trams sein. Um die verkehrlichen Wirkungen eines derartigen Konzepts quantifizieren zu können, wird in dieser Arbeit ein Güterverkehrsmodell für den Pakettransport, mit Fokus auf gewerbliche Paketnachfrage, vorgestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine Cargo Tram grundsätzlich positive Effekte auf den Verkehr zu erwarten sind. Das Potenzial hängt jedoch stark von verschiedenen Faktoren wie der Anzahl und Lage der City Hubs ab.

Schlagwörter / Keywords:

City-Logistik, Pakettransport, intermodal, agenten-basiert, Verkehrsnachfrage, Cargo Tram

1. Einleitung

Aufgrund des Rückgangs des lokalen Handels und des starken Anstiegs des E-Commerce-Geschäfts ist seit einigen Jahren ein massiver Anstieg des Paketaufkommens zu beobachten. Es sind vor allem städtische Gebiete, die bereits jetzt zunehmend unter der Überlastung der Straßeninfrastruktur, Flächenkonflikten sowie steigenden Verkehrsemissionen und damit sinkender Lebensqualität für die BürgerInnen leiden. Um zu vermeiden, dass Kurier-, Express- und Paketdienstleister (KEP) die Anzahl ihrer Fahrzeuge erweitern, um auf die steigende Paketnachfrage zu reagieren, suchen StadtplanerInnen nach neuen Lösungen für nachhaltige City-Logistikkonzepte. Ein wichtiges Ziel für eine nachhaltige City-Logistik ist es, die Tonnenkilometer der transportierten Güter zu reduzieren oder auf "stadtverträgliche" Fahrzeuge umzusteigen.

Eine vielversprechende Lösung ist die Einrichtung von City-Hubs, die als zentrumsnahe Zwischendepots für Pakete zwischen dem Distributionszentrum außerhalb der Stadt und dem Empfänger der Pakete fungieren sollen. Auf der Strecke zwischen dem Distributionszentrum und dem City-Hub sollen Fahrzeuge mit höherer Kapazität eingesetzt werden, um eine effizientere Logistik zu ermöglichen. Ein solches Fahrzeug kann eine sogenannte Cargo Tram

sein. Da die städtische Schieneninfrastruktur bereits vorhanden ist und in vielen Städten weltweit bereits Straßenbahnen mit festen Fahrplänen eingesetzt werden, scheint diese Lösung eine vielversprechende Möglichkeit für eine nachhaltigere City-Logistik zu sein. In diesem Fall würde ein City-Hub als intermodaler Übergabepunkt fungieren. Die Feinverteilung vom City-Hub zum Kunden wird dann mit kleineren, umweltfreundlichen Fahrzeugen wie Lastenrädern durchgeführt.



Abbildung 1: Konzept der LogIKTram in Karlsruhe, Quelle: *modus: medien + kommunikation gmbh*

Für einen derartigen City-Logistik-Ansatz eignet sich das Karlsruher Verkehrssystem durch seine nahtlose Verknüpfung der Straßen- und Eisenbahn besonders gut. So werden im Projekt LogIKTram am Beispiel des Untersuchungsraums Karlsruhe konzeptionelle Grundlagen für den stadtbahnbasierten Paket-transport im Stadt- und

Regionalverkehr mit effizienten Umschlag- und Transportverfahren erarbeitet. Eine Vision des Konzepts ist in Abbildung 1 dargestellt. Schwerpunkt im Projekt bildet zudem die Untersuchung der verkehrlichen Wirkungen eines derartigen Konzepts. Dafür wird ein mikroskopisches Verkehrsnachfragemodell für den Güterverkehr entwickelt, dessen Konzeption, Umsetzung sowie erste Ergebnisse in dieser Arbeit vorgestellt werden.

Bekannte Güterverkehrsmodelle wie *GoodTrip* (Boerkamps & Binsbergen, 1999), *MASS-GT* (de Bok & Tavaszy, 2018) und *SimMobility* (Sakai et al., 2020) sind für das beschriebene Vorhaben nur bedingt geeignet. Zum einen wird der KEP-basierte Pakettransport nicht explizit berücksichtigt, während zum anderen hauptsächlich fahrzeugbasierte, aggregierte Datenquellen verwendet werden, deren Gebrauch durchaus mit hohen Beschaffungskosten verbunden ist. Des Weiteren bieten die genannten Modelle keine umfassende Grundlage für die Integration und Evaluierung neuer Verkehrsmittel wie der Cargo Tram und der dazugehörigen Umschlagsaktivitäten. Außerdem kommt hinzu, dass die gewerbliche Paketnachfrage bis auf wenige Ausnahmen (Llorca & Moeckel, 2021, Stinson et al., 2020) bislang wenig Beachtung in bestehenden Modellierungsansätzen gefunden hat. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit nach einem neuen mikroskopischen, agentenbasierten Modellierungsansatz, der die urbane Paketnachfrage auf Basis von öffentlich zugänglichen Daten gesamtheitlich abbildet und die Evaluation eines intermodalen Pakettransports per Cargo Tram und Lastenrad erlaubt.

2. Konzept

Modellierungsgrundlage für das in dieser Arbeit vorgestellte Vorhaben bildet das agentenbasierte Modellierungsframework *mobiTopp* (Mallig et al., 2013, Mallig & Vortisch, 2017). *mobiTopp* besteht aus zwei Modulen: einem Lang- und einem Kurzzeitmodul. Im Langzeitmodul wird eine synthetische Population für ein Untersuchungsgebiet generiert. Das Kurzzeitmodul simuliert die Fahrten der einzelnen Agenten und die damit verbundenen kurzfristigen Entscheidungen über Zielort und Verkehrsmittel. *mobiTopp* wurde bereits um das Logistikmodul *logiTopp* erweitert, welches als Open-Source-Projekt auf GitHub verfügbar ist (Kübler et al., 2022). Es generiert die private Paketnachfrage im Untersuchungsgebiet für eine Woche (Reiffer et al., 2021, Kübler et al., 2022). Damit wird die Paketzustellung an private EmpfängerInnen auf der letzten Meile in *mobiTopp* integriert. Zunächst wird mit einem diskreten Wahlentscheidungsmodell die Anzahl der Pakete ermittelt, die potentielle EmpfängerInnen (d.h. jede Person in der Bevölkerung) in einer Woche erwartet. Im

Kurzzeitmodul wird die Zustellung dieser generierten Pakete dann auf der letzten Meile simuliert. Doch auch *logiTopp* fokussiert sich auf die private Paketnachfrage und bildet insbesondere die Paketsendungen an Unternehmen nicht ab. Laut der jüngsten Studie des Bundesverbands der Paket und Expresslogistik macht aber genau dieser Bereich knapp ein Drittel aller Paketmengen aus (BIEK, 2022). Um alternative Zustellkonzepte im urbanen Raum zuverlässig modellieren und folglich bewerten zu können, ist eine Abbildung eben dieser notwendig.

Für die Untersuchung einer stadtbahnbasierten Paketbelieferung wurde daher ein Modellkonzept entwickelt und implementiert, welches die Paketsendungen von und zu Unternehmen mikroskopisch abbildet und sich in das bestehende Modellframework *logiTopp* und *mobiTopp* integrieren lässt. Darauf aufbauend konnte eine Logik entwickelt und implementiert werden, die neben den typischerweise eingesetzten Sprintern auch die Straßenbahn und Lastenfahräder als Verkehrsmittelkombination der Paketzustellung und -abholung berücksichtigt. Aufgrund der schlechten Verfügbarkeit relevanter disaggregierter Daten von Paketsendungen von und zu Unternehmen wurde zudem ein Datenerhebungskonzept entwickelt und umgesetzt, dessen Ergebnisse Grundlage der Modellierung bilden. Die Konzeption und Umsetzung aller drei Komponenten wird im Folgenden näher ausgeführt.

2.1 Paketnachfrage

2.1.1. Datenerhebungskonzept

Für eine zuverlässige Modellierung ist die Verfügbarkeit präziser Eingangsdaten eine zwingende Voraussetzung. Doch gerade diese stellt Forschende im Bereich des Güterverkehrs zunehmend vor Herausforderungen, insbesondere wenn es um die mikroskopische Modellierung von Güterströmen, und damit auch der Abbildung von Paketsendungen geht. Während Privatpersonen noch verhältnismäßig einfach z.B. zu ihrem Online-Shoppingverhalten befragt werden können, sind Unternehmen eine deutlich schwerer zu erreichende Zielgruppe. Somit ist es eine Herausforderung deren ein- und ausgehende Paketströme zu erfassen. Frei zugängliche, disaggregierte Datenquellen gibt es ebenso wenig, die eine explizite Modellierung der Paketzustellung zu Unternehmen erlauben würden. Aus diesem Grund haben wir ein Datenerhebungskonzept entwickelt, um hochrelevante Daten für die mikroskopische Modellierung des städtischen KEP-Verkehrs zu generieren, wobei der Schwerpunkt auf dem gewerblichen Segment liegt. Wir haben uns für einen Dual-Frame-Ansatz entschieden, der aus zwei sich ergänzenden Komponenten besteht. Die erste

Komponente ist eine Befragung von Unternehmen zur Ermittlung der ein- und ausgehenden Paketmengen und damit der Spezifikation der Nachfrage nach Transport. Die zweite Komponente bildet Interviews mit örtlichen KEP-Dienstleistern zur Erfassung relevanter Charakteristika des Zustellprozesses und damit der Spezifikation des Transportangebots. Beide Seiten, Transportnachfrage und -angebot, ergänzen sich inhaltlich gegenseitig und ermöglichen in einem kombinierten Ansatz ein vollumfängliches Bild über die Charakteristika des KEP-Verkehrs von und zu Unternehmen.

2.1.2. Modellierungsansatz

Die Konzeption und Umsetzung des Modells zur mikroskopischen Simulation von Paketsendungen von und zu Unternehmen baut auf dem vorgestellten Datenerhebungskonzept auf. Die Darstellung des Gesamtkonzepts befindet sich in Abbildung 2. Basis des Modells bilden Strukturdaten, die die einzelnen Unternehmen im Untersuchungsraum inkl. relevanter Metadaten wie z.B. Wirtschaftszweig etc. mikroskopisch abbilden. Diese Daten sind typischerweise nicht frei verfügbar, sondern nur über kommerzielle Anbieter zu erwerben, die dann z.T. auch modellierte Datenpunkte enthalten. Daher wurde ein eigenes Verfahren zur mikroskopischen Abbildung von Unternehmen im Modell entwickelt. Dieses erzeugt auf Basis öffentlich zugänglicher Daten aus OpenStreetMap (Unternehmensstandort und -typ) und einem Hochrechnungsverfahren mit offiziellen Statistiken eine mikroskopische, synthetische Wirtschaftsstruktur (vgl. Barthelmes et al., 2023). In Anlehnung an die bestehende Modellstruktur von logiToPP setzt sich das darauf aufbauende Modellkonzept aus drei Teilmodulen, dem Lang-, Mittel- und Kurzfristmodul, zusammen.

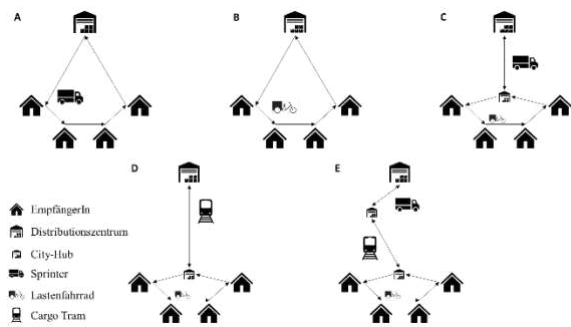
Im Langfristmodul wird zum einen die Nachfrage nach Transport durch Unternehmen, also das Mengengerüst der an- und auszuliefernden Pakete

modelliert. Neben der Menge wird u.a. auch die zeitliche Verteilung der Nachfrage über den Simulationszeitraum modelliert. Hierzu werden die Ergebnisse der Erhebung ebenso wie Studien aus der Literatur, allen voran die Paketmengenverteilung nach Wirtschaftszweigen von Thaller et al. (2019), verwendet. Neben dem Wirtschaftszweig werden weitere Einflussgrößen wie die Unternehmensfläche in die Nachfrageerzeugung integriert. Zum anderen werden im Langfristmodul KEP-Dienstleister modelliert, die das Transportangebot von Paketen übernehmen. Für eine realistische Abbildung werden dabei unterschiedliche Flottengrößen und -zusammensetzungen der jeweiligen Fuhrparks, des Dienstleistungsspektrums sowie der Betriebszeiten modelliert. Die Daten entstammen den Interviews sowie weiterer Recherchen und bilden damit den aktuellen Stand ab.

Im Mittelfristmodul werden im ersten Schritt beobachtbare Vertragsbeziehungen zwischen Unternehmen und KEP-Dienstleistern modelliert, da in der Praxis nicht jedes Unternehmen von jedem KEP-Dienstleister beliefert wird. Dazu wurde ein Greedy-Algorithmus entwickelt, der die Vertragsbeziehungen auf Basis der Marktanteile der KEP-Dienstleister, der Nachfragemengen der Unternehmen sowie der verfügbaren Transportkapazitäten der KEP-Dienstleister für jedes Unternehmen individuell festlegt. Im zweiten Schritt wird unter Berücksichtigung der individuellen Vertragsbeziehungen die tatsächliche Wahl getroffen, welches Paket von welchem Dienstleister ausgeliefert bzw. abgeholt wird. Die Modellierung dieser Entscheidung basiert auf einer gewichteten Zufallsziehung und findet separat für jeden Tag statt. Die entsprechenden Gewichte sind dynamisch und abhängig von der verbleibenden Transportkapazität eines jeden KEP-Dienstleiters pro Tag. Die Umsetzung des Mittelfristmoduls beruht ebenfalls auf Daten aus den Interviews sowie Studien aus der Literatur, insbesondere jene von Thaller et al. (2019).



Abbildung 2: Gesamtkonzept für die Modellierung der gewerblichen Paketnachfrage



Für eine detaillierte Darstellung wird auf Kübler et al. (2023) verwiesen.

Im Kurzfristmodul werden die tatsächlichen An- und Auslieferungstouren inkl. Sendungsgenerierung je KEP-Dienstleister modelliert. Dies umfasst die Zusammenfassung von einzelnen Paketen zu empfängerspezifischen Sendungen, die Zuteilung, mit welchem Fahrzeug die Zustellung erfolgt, die Tourenplanung sowie die Berücksichtigung verschiedener Zustellalternativen. Da sich dieser Prozess zwischen privaten und gewerblichen Empfängern nicht unterscheidet, wird hierbei auf die in logiTopp bereits implementierte Modelllogik zurückgegriffen. Die Darstellung des Modellkonzepts beschränkt sich in Error! Reference source not found. auf den Ware Zustellprozess. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass das Konzept auch den umgekehrten Paketstrom, d.h. die Abholung, umfasst.

2.2 Integration der Cargo Tram in das bestehende Verkehrsmodell

Die Untersuchung der verkehrlichen Wirkungen eines ergänzenden, schienengebundenen innerstädtischen Pakettransports erfordert einen zusätzlichen Modellierungsaufwand, der über die bestehende Funktionalität etablierter Güterverkehrsnachfragemodelle im urbanen Raum hinausgeht. Im Gegensatz zur derzeit implementierten logistischen Verkehrsmittelwahl, z.B. in logiTopp, bei der ein Paket vom Distributionszentrum eines KEP-Dienstleisters zum Empfänger ausschließlich mit einem Transportmittel (i.d.R. Sprinter) befördert wird, lässt sich eine Paketzustellung mit einer Cargo Tram aufgrund der Abhängigkeit von der Schieneninfrastruktur nur als intermodale Transportkette realisieren. Im Projekt LogiKTram ist aktuell vorgesehen, Pakete in Lastenradboxen, die am Distributionszentrum des KEP-Dienstleisters beladen werden, zu transportieren. Diese werden in die Cargo Tram umgeschlagen, in die Stadt transportiert und dort von Lastenrädern übernommen und die entsprechenden Pakete ausgeliefert. Da ein KEP-Dienstleister nicht unmittelbar über einen direkten Gleisanschluss verfügt, muss auch ein Vorlauf, d.h. Abbildung 3: Relevante Transportkettenoptionen auf der ersten/letzten Meile

Transport der Lastenradbox vom Distributionszentrum zum Übergabepunkt der Cargo Tram, berücksichtigt werden. Zusammen mit den bestehenden Transportalternativen einer direkten Zustellung mit einem Verkehrsmittel ergeben sich die in Abbildung 3 dargestellten Transportketten.

Um die Transportketten im Modell abzubilden, wurde ein zweistufiges Transportkettenwahlmodell entwickelt, welches die Entscheidung über die gesamte Transportkette bereits im Distributionszentrum trifft, da auch hier die Lastenradboxen schon beladen werden müssen. Das entwickelte Transportkettenwahlmodell setzt sich aus einer regelbasierten sowie einer nachgelagerten, nutzenbasierten Entscheidung zusammen. Mit einem regelbasierten Ansatz wird zunächst ermittelt, welches Paket sich grundsätzlich für eine Belieferung mit der Cargo Tram eignet. Entscheidungsgrundlage bildet zum einen die Paketgröße, welche als zusätzliches Attribut auf Basis empirischer Daten modelliert wurde. Zum anderen wird auch die mit dem Lastenrad zurückzulegende Entfernung berücksichtigt, da diese üblicherweise auf einen Radius von 3-5km begrenzt ist. Auf Basis der Ergebnisse des regelbasierten Ansatzes wird nutzenbasiert, unter Anwendung eines Multinomialen Logit Modells, entschieden, welches Paket über eine Transportkette zugestellt wird, die die Cargo Tram enthält. Aufgrund der Neuartigkeit des Konzepts und damit fehlender Empirie werden nur die grundlegendsten logistischen Entscheidungsvariablen in der Nutzenfunktion für jede Transportkette berücksichtigt. Dazu zählen die Transportkosten, -entfernung und -zeit. Das entwickelte Modell wurde in das bestehende logiTopp-Framework integriert und damit eine Abbildung des LogiKTram-Konzepts erreicht.

3. Ergebnisse

3.1 Erkenntnisse aus Interviews und Erhebung

Die Experteninterviews wurden im ersten Quartal 2022 mit lokalen Niederlassungsleitern namhafter KEP-Dienstleister in der Untersuchungsregion Karlsruhe durchgeführt, darunter DHL, UPS, Hermes, Dachser und FedEx. In den jeweils 90- bis 180-minütigen Gesprächen konnten relevante Erkenntnisse und Gemeinsamkeiten in den Prozessen der Dienstleister identifiziert werden. Branchenüblich werden zurzeit fast ausschließlich Diesel-betriebene Transporter bis 3,5t eingesetzt, sodass noch großes Potential zur Verlagerung auf umweltfreundlichere Verkehrsträger besteht. Die Fachleute haben sich negativ über partielle Einfahrtbeschränkungen in Städten geäußert, die die Lieferzeitfenster stark beschränken und am Ende auf operativer Ebene zu mehr Liefertouren führen

würden als notwendig. Hieraus lässt sich Potential für alternative Zustellkonzepte ableiten. Weiterhin wurde klar, dass die Zustellmenge im Wochenverlauf starken Schwankungen unterliegt und auch innerhalb eines Tages vermehrt vormittags stattfindet, während Abholtouren am Nachmittag stattfinden. Dies betont die Notwendigkeit des im Modell gewählten Simulationszeitraums von einer Woche. Eine weitere Erkenntnis der Gespräche ist, dass gerade im B2B-Bereich die Zustellung und Abholung über Verträge zwischen Unternehmen und Logistkdienstleistern geregelt wird, welchem über eine dedizierte Modellierung Rechnung getragen wird.

Die Erhebung bei Unternehmen fand im ersten und zweiten Quartal 2022 statt und wurde als Online-Erhebung durchgeführt. Die Schwierigkeit bestand vor allem in der Rekrutierung von teilnehmenden Unternehmen. Nur mit erheblichem Aufwand konnte eine hinreichend große Anzahl an Unternehmen, vorrangig aus der Industrie und dem Handel, zum Ausfüllen des Fragebogens bewegt werden. Von knapp 100 Unternehmen, die mit der Beantwortung des Fragebogens begonnen hatten, haben knapp die Hälfte den Fragebogen vollständig ausgefüllt. Auch wenn in einer erneuten Befragung von einem Online-Format auf persönliche Gespräche umgestellt werden würde, konnten interessante und plausible Erkenntnisse zu Warenan- und -auslieferprozessen von Unternehmen gewonnen werden. Beispielsweise wurde klar, dass Unternehmen mehrheitlich täglich Paketan- und -ablieferungen erhalten, was die Notwendigkeit der Berücksichtigung dieses Segments bei der Modellierung von KEP-Verkehren unterstreicht. Für eine detaillierte Ergebnisdarstellung verweisen wir auf Barthelmes et al. (in Kürze erscheinend).

3.2. Paketbelieferung von und zu Unternehmen

Das in Kapitel 2 beschriebene Modellkonzept wurde auf die Untersuchungsregion Karlsruhe angewendet. Zunächst wurden insgesamt 15.366 Unternehmen inkl. der erwähnten Metadaten mikroskopisch synthetisiert und damit die Anzahl und Wirtschaftsstruktur der im Untersuchungsraum

ansässigen Unternehmen vollständig abgebildet. Für alle Unternehmen konnten dann mithilfe des beschriebenen Ansatzes die ein- und ausgehenden Paketmengen im Laufe einer Woche simuliert werden. Insgesamt erzeugt das Modell ca. 148.000 Pakete, die an Unternehmen geliefert werden, und knapp 231.000 Pakete, die von den Unternehmen für den Weitertransport abgeholt werden müssen. Die modellierten Paketmengen wurden mithilfe der auf den Untersuchungsraum skalierten BIEK-Studie (2022) plausibilisiert.

Die mikroskopische Abbildung der Unternehmen ermöglicht zudem auch die Analyse der flächenmäßigen Verteilung des Paketaufkommens bei Unternehmen. Abbildung 4 (links) zeigt dazu die räumliche Verteilung aller an Unternehmen zugestellte Pakete. Je dunkler eine Zone eingefärbt ist, umso höher ist das zugestellte Paketaufkommen. Es zeigen sich insgesamt plausible Ergebnisse. Die Industriegebiete mit einer hohen Unternehmensdichte im Westen und Osten der Stadt lassen sich klar erkennen, ebenso wie die dunkel schattierten Zonen im Stadtzentrum, in denen sich zahlreiche Einkaufsgelegenheiten befinden.

In Abbildung 4 (rechts) wird die Verteilung der Paketmengen zwischen den verschiedenen Sektoren der Unternehmen differenziert nach den ein- und ausgehenden Mengen dargestellt und jeweils mit den Ergebnissen der empirischen Studie von Thaller et al. (2019) verglichen. Es ist eine gute Übereinstimmung der sektorspezifischen Verteilung der modellierten und erwarteten Paketmengen für Zustellung und Abholung zu erkennen. Das betont, dass das entwickelte Verfahren zumindest auf der Ebene der verfügbaren Boxplot-Information eine geeignete Annäherung an die tatsächlichen Paketmengen darstellt. Unklar bleibt, wie gut die Verteilung zwischen den Kennzahlen getroffen wird. Dazu wären detailliertere Daten erforderlich.

Mithilfe des Greedy-Algorithmus und der Modellierung der Vertragsbeziehungen wird eine Verteilung der Pakete auf die KEP-Dienstleister entsprechend ihrer Marktanteile erreicht. Zudem findet eine Aufteilung der Paketmengen auf die einzelnen Wochentage statt. Die Ergebnisse für die

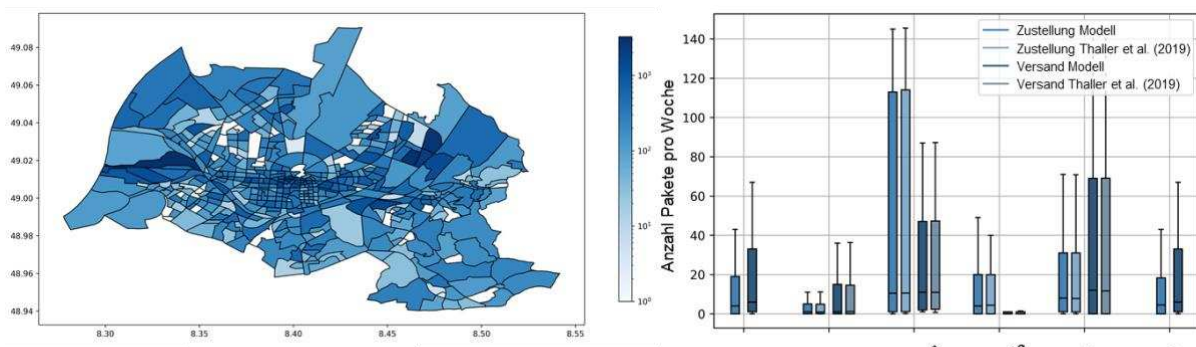


Abbildung 4: Flächenmäßige Verteilung der zugestellten Pakete (links); Vergleich Paketmengenverteilung nach Sektor zwischen Modell und Literatur (rechts)

abzuholenden Pakete sind exemplarisch in Abbildung 5 dargestellt. Die Paketabholungen haben einen Spitzenwert am Montag, der bis Freitag abfällt. Die Verteilung wurde auf Basis der Erkenntnisse aus den Interviews kalibriert und repräsentiert die Spitze der privaten E-Commerce Bestellungen am Wochenende, die die Unternehmen ab Montag versenden müssen.

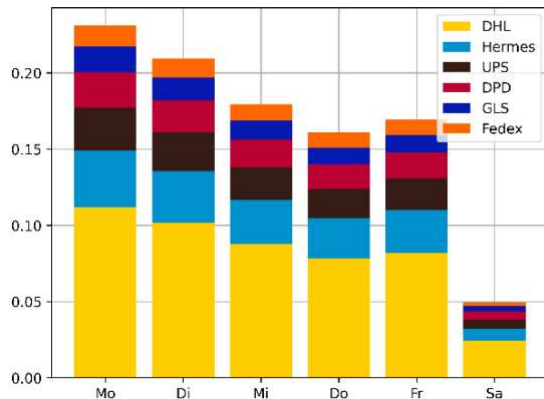


Abbildung 5: Wochenverteilung der ausgehenden Pakete von Unternehmen nach KEP-Dienstleister

3.3 Simulation des LogIKTram-Konzepts

Zur Simulation des LogIKTram-Konzepts wurde neben der beschriebenen gewerblichen Paketnachfrage auch die bestehende Nachfrage nach Paketlieferungen von Privatpersonen im Untersuchungsraum berücksichtigt. Insgesamt werden in der Simulation daher knapp 305.000 Pakete in der Zustellung an private und gewerbliche EmpfängerInnen innerhalb einer Woche betrachtet. Vor der Simulation mussten weitere Annahmen getroffen werden, die aufgrund der Neuartigkeit des Projektvorhabens noch nicht final geklärt sind. Da von einem kombinierten Personen- und Pakettransport ausgegangen wird, wurde für die Cargo Tram der Fahrplan der bestehenden Straßenbahn hinterlegt. Zudem wurden zwei Standorte für City-Hubs festgelegt, welche sich v.a. aufgrund ihrer Linienvielfalt und Lage als geeignet darstellen. Um verschiedene konzeptionelle Freiheitsgrade untersuchen zu können, wurde auf Basis der Eingangsgrößen im Transportkettenwahlmodell eine Szenarioanalyse durchgeführt. Während Parameter für Transportzeit und -kosten für alle Transportketten auf -1 festgesetzt wurde, wurde der Grundnutzen zwischen Transportketten mit und ohne Cargo Tram in den Szenarien variiert. Dies beeinflusst die nutzenbasierte Entscheidung. Weitere Variationsgröße bildet die Reichweite der Lastenräder, welche mit 3km und 5km in die Szenarien einging, und insbesondere die regelbasierte Entscheidung betrifft.

In allen Szenarien mit einer maximalen Lastenraddistanz von 3km ist für knapp ein Drittel aller Pakete die Belieferung über eine Cargo Tram möglich. Im Fall von 5km steigt dieser Anteil auf ca. 50%. Dieses Ergebnis hängt eng mit der gewählten Anzahl und Lage der City-Hubs zusammen, da diese maßgeblich das Potential der Abdeckung durch Lastenräder beeinflusst. Darüber hinaus spielt auch die Lage der Distributionszentren eine Rolle, denn bei einer max. Lastenraddistanz von 5km kann bereits knapp jedes fünfte Paket ausschließlich mit einem Lastenrad direkt vom Distributionszentrum des KEP-Dienstleisters ausgeliefert werden.

Da der Fokus unserer Studie auf der Analyse eines zusätzlichen schienengebundenen Pakettransports zum derzeitigen ausschließlichen Sprinter-Transport lag, konzentrieren sich die folgenden Ausführungen der nutzenbasierten Entscheidung auf den direkten Vergleich zwischen Sprinter und den Transportketten mit der Güterstraßenbahn.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Annahme identischer Grundnutzen für Cargo Tram und Sprinter bereits ein nicht zu vernachlässigender Anteil von bis zu 20% (bei einer maximalen Lastenraddistanz von 5km) eine Transportkette gewählt wird, die die Cargo-Tram enthält und damit auf einen nachhaltigeren Transportmodus umgestellt werden kann. Der Anteil steigt in unseren Simulationen auf knapp das Doppelte, wenn der Grundnutzen für die Cargo Tram dreimal höher ist als für den Sprinter. Im umgekehrten Fall (Grundnutzen Sprinter dreimal höher als Cargo Tram) fällt die Wahl auf eine Transportkette mit Cargo Tram nur noch bei 3-4% der Pakete, je nach max. Lastenraddistanz.

Die bisherigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass grundsätzlich eine positive Wirkung durch eine Güterbelieferung via Straßenbahn zu erwarten ist, da Sprinter-Fahrten auf nachhaltigere Verkehrsmittel verlagert werden können. Neben der Anzahl und Standorte der City-Hubs wird klar, dass auch die Attraktivität der Cargo-Tram, welche sich u.a. im Grundnutzen widerspiegelt, eine wichtige Rolle für das Verlagerungspotential spielt. Genaue Aussagen z.B. zum zu erwartenden Verkehrsaufkommen je Verkehrsmittel erfolgen nach weiteren Detaillierungen und Validierungen der vorgestellten Modelle und bleiben im weiteren Projektlauf abzuwarten.

4. Zusammenfassung

Um die verkehrlichen Wirkungen einer intermodalen, schienenbasierten Paketbeförderung in Karlsruhe quantifizieren zu können, wurde in der vorliegenden Arbeit ein Modell zur mikroskopischen Simulation von Paketsendungen basierend auf öffentlich zugänglichen Daten vorgestellt. Fokus lag auf der Modellierung von Paketströmen zu und von Unternehmen, die in bisherigen Forschungsarbeiten

kaum berücksichtigt wurden, aber für eine vollständige Abbildung des Status Quo unerlässlich sind. Ergänzend wurde ein Erhebungskonzept entwickelt und in der Untersuchungsregion der Stadt Karlsruhe angewendet. Dadurch konnten vertiefte Einblicke über kritische Merkmale des Paketverkehrs im urbanen Raum gewonnen werden. In Kombination mit weiteren, öffentlich zugänglichen Datenquellen ist es gelungen, disaggregierte Nachfragedaten zu erzeugen und damit die Modellierung des Status Quo der Paketbelieferung zu ermöglichen. Darüber hinaus wurde ein zweistufiges Transportkettenwahlmodell entwickelt, welches das bisher noch nicht berücksichtigte Verkehrsmittel einer Cargo Tram in die Verkehrsmittelwahl des logistischen Verkehrsnachfragemodells logiTopp integriert.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass mit einer ergänzenden stadtbahnbasierten Paketbelieferung im urbanen Raum – wie es im Projekt LogiKTram für die Region Karlsruhe untersucht wird – grundsätzlich positive Effekte auf den Verkehr zu erreichen sind. Pakete können zu einem nicht unerheblichen Anteil auf nachhaltigere Verkehrsmittel verlagert werden, was Sprinterfahrten einsparen kann. Allerdings zeigen die Ergebnisse auch große Schwankungen, die abhängig von verschiedenen Konzeptentscheidungen sind. Zum einen spielt die Standortwahl und Anzahl der City-Hubs eine zentrale Rolle. Je mehr City Hubs vorliegen, desto geringer kann die Reichweite von Lastenrädern ausfallen und umso größer ist das Potenzial für das LogiKTram-Konzept. Allerdings verursacht jedes City-Hub zusätzlichen Kosten und muss komplexe infrastrukturelle Voraussetzungen erfüllen, weshalb jedes City-Hub seitens der Stadt- und VerkehrsplanerInnen sowie KEP-Dienstleister gegen dessen induziertes Verlagerungspotenzial für das Verkehrssystem abgewogen werden muss. Zum anderen wurde die Bedeutung der Attraktivität der Cargo Tram anhand der Variation des Grundnutzens in der Verkehrsmittelwahl deutlich. Da Entscheidungen zur Transportkettenwahl von KEP-Dienstleistern getroffen werden, die in erster Linie an Kundenzufriedenheit und Kosteneffizienz interessiert sind, sollten VerkehrsplanerInnen und PolitikerInnen auch über ein geeignetes Anreizsystem oder gesetzliche Regelungen zur Förderung des schienengebundenen Transports nachdenken.

Danksagung: Den Unternehmen und den ExpertInnen, die an unserer Erhebung teilgenommen haben, sei gedankt. Die Forschung fand im Rahmen des Projekts „LogiKTram – Logistikkonzept und IKT-Plattform für stadtbahnbasierten Gütertransport“ statt und wurde ermöglicht durch eine Förderung des

Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland.

Literatur

- Barthelmes, L., Görgülü, E., Kübler, J., Kagerbauer, M., Vortisch, P. (2023), 'Microscopic agent-based parcel demand model for the simulation of CEP-based urban freight movements to and from companies'. Akzeptiert für Veröffentlichung in 'Advances in Resilient and Sustainable Transport', Springer
- Barthelmes, L., Görgülü, M.E., Kagerbauer, M., Vortisch, P. (in Kürze erscheinend), Data collection for microscopic modeling of urban freight transport - empirical insights into city-logistics in the region of Karlsruhe, Germany. Beitrag akzeptiert und vorgestellt auf European Transport Conference (ETC) 2022
- BIEK (2022), KEP-Studie 2022 – Analyse des Marktes in Deutschland.
- Boerkamps, J. & Binsbergen, A. V. (1999), GoodTrip – A new approach for modelling and evaluation of urban goods distribution. City Logistics E. Taniguchi and R. G. Thompson.
- de Bok, M. & Tavasszy, L. (2018), 'An empirical agent-based simulation system for urban goods transport (mass-gt)', *Procedia Computer Science* 130, pp. 126–133
- Kübler, J., Barthelmes, L., Görgülü, M. E. & Reiffer, A. (2022), 'logitopp', <https://github.com/kit-ivf/logitopp>
- Kübler, J., Barthelmes, L., Görgülü, M.E., Kagerbauer, M. Vortisch, P. (2023), 'Modeling Relations Between Companies and CEP Service Providers in an Agent-Based Demand Model using Open-Source Data', Akzeptiert für Veröffentlichung in 'Procedia Computer Science', Elsevier
- Llorca, C. & Moeckel, R. (2021), 'Assesment of the potential of cargo bikes and electrification for last-mile parcel delivery by means of simulation of urban freight flows', *European Transport Research Review* 13(1), pp. 1–14.
- Mallig, N., Kagerbauer, M. & Vortisch, P. (2013), 'mobitopp – a modular agent-based travel demand modelling framework', *Procedia Computer Science* 19, pp. 854–859.
- Mallig, N. & Vortisch, P. (2017), 'Modeling travel demand over a period of one week: The mobitopp model', arXiv preprint arXiv:1707.05050.
- Reiffer, A., Kübler, J., Briem, L., Kagerbauer, M., Vortisch, P. (2021), An integrated agent-based model of travel demand and package

deliveries. *International Journal of Traffic and Transportation Management* 3, 17.

Sakai, T., Romano Alho, A., Bhavathrathan, B. K., Chiara, G. D., Gopalakrishnan, R., Jing, P., Hyodo, T., Cheah, L. & Ben-Akiva, M. (2020), 'Simmobility freight: An agent-based urban freight simulator for evaluating logistics solutions', *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 141, 102017

Stinson, M., Auld, J. & Mohammadian, A. (2020), 'A large-scale, agent-based simulation of metropolitan freight movements with passenger and freight market interactions', *Procedia Computer Science* 170, pp. 771–778.

Thaller, C., Papendorf, L., Dabidian, P., Clausen, U. & Liedtke, G. (2019), *Delivery and shipping behaviour of commercial clients of the cep service providers*, Springer, Cham, pp. 205–220.

Institut für Verkehrswesen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstraße 12, Gebäude 10.30, 76131 Karlsruhe, Deutschland

E-Mail: peter.vortisch@kit.edu

AutorInnenangaben

M.Sc. Lukas Barthelmes

Akademischer Mitarbeiter
Institut für Verkehrswesen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstraße 12, Gebäude 10.30, 76131 Karlsruhe, Deutschland

E-Mail: lukas.barthelmes@kit.edu

M.Sc. Emre Görgülü

Akademischer Mitarbeiter
Institut für Verkehrswesen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstraße 12, Gebäude 10.30, 76131 Karlsruhe, Deutschland

E-Mail: emre.goerguelue@kit.edu

M.Sc. Jelle Kübler

Akademischer Mitarbeiter
Institut für Verkehrswesen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstraße 12, Gebäude 10.30, 76131 Karlsruhe, Deutschland

E-Mail: jelle.kuebler@kit.edu

PD Dr.-Ing. Martin Kagerbauer

Senior Researcher
Institut für Verkehrswesen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstraße 12, Gebäude 10.30, 76131 Karlsruhe, Deutschland

E-Mail: martin.kagerbauer@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch

Leiter des Instituts für Verkehrswesen