

Logistikkonzept und IKT-Plattform für
stadtbahnbasierten Gütertransport

LogIKTram



Schlussbericht

zum Verbundvorhaben:

LogIKTram - Logistikkonzept und IKT-Plattform für stadtbahnbasierten Gütertransport

FKZ: 19ME20008

Laufzeit des Vorhabens: von 01.03.2021 bis 30.06.2024

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

IKT FÜR 
ELEKTROMOBILITÄT

Schlussbericht

zum Verbundvorhaben

LogIKTram - Logistikkonzept und IKT-Plattform für stadtbahnbasierten Gütertransport

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH	01ME20008A
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	01ME20008B
FZI Forschungszentrum Informatik	01ME20008C
Hochschule Offenburg - Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien	01ME20008D
INIT Innovative Informatikanwendungen in Transport-, Verkehrs- und Leitsystemen GmbH	01ME20008E
MARLO Consultants GmbH	01ME20008F
SimPlan AG	01ME20008G
DB Engineering & Consulting GmbH	01ME20008H
Hitachi Rail	01ME20008I
Kontakt Konsortialführer:	Tel.: +49 721 6107-5015
Dr.-Ing. Christoph Rentschler	Email: christoph.rentschler @avg.karlsruhe.de
Laufzeit des Vorhabens: von 01.03.2021 bis 30.06.2024	
Datum Bericht:	31.07.2024

Inhalt

1	Kurzdarstellung	1
1.1	Aufgabenstellung	2
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	8
1.4.1	Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden	13
1.4.2	Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste.....	13
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	15
2	Eingehende Darstellung.....	19
2.1	Ergebnisse	19
2.1.1	AP1: Logistik- und Betreiberkonzept	19
2.1.2	AP2: Anforderungsanalyse.....	23
2.1.3	AP3: IKT-Plattform	37
2.1.4	AP4: Konzept Gütertram-System	48
2.1.5	AP5: Wirkungen	67
2.1.6	AP6: Öffentlichkeitsarbeit	86
2.1.7	AP7: Projektmanagement	92
2.2	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	95
2.3	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	112
2.4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	117
2.5	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	117
2.6	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	124
2.7	Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen	124
3	Verzeichnisse	131
3.1	Abbildungsverzeichnis.....	131
3.2	Tabellenverzeichnis.....	134

1 Kurzdarstellung

Das E-Commerce-Geschäft hat in den vergangenen Jahren einen enormen Zuwachs erlebt, welcher sich mit Beginn der Corona-Pandemie weiter beschleunigt hat. Damit einhergehend ist seit einigen Jahren ein deutlicher Anstieg des Paketaufkommens zu beobachten. Um zu vermeiden, dass Kurier-, Express- und Paketdienstleister (KEP) lediglich die Anzahl ihrer Fahrzeuge vergrößern, um auf die steigende Paketnachfrage zu reagieren, müssen neue Lösungen für nachhaltige City-Logistikkonzepte erforscht werden. Ein wichtiges Ziel für eine nachhaltige City-Logistik ist es daher, die Verkehrsleistung von Gütertransporten zu reduzieren oder auf ‚stadtverträgliche‘ Fahrzeuge zu verlagern. Hier setzt die Grundidee hinter dem Projekt LogIKTram an: Statt Pakete mit herkömmlichen Sprinter-Fahrzeugen auszuliefern, sollen ungenutzte Kapazitäten in Straßenbahnen zum Transport von Waren genutzt werden. Dabei sollen diese Güter in bestehenden Fahrplanfahrten der Straßenbahn befördert werden. An den Zielhaltestellen übernimmt dann ein Kurier die als Fahrradanhänger nutzbaren Transporteinheit und führt ihr die Feinverteilung zu den Kundinnen und Kunden durch.

Im Rahmen des Projektes wurde die entsprechende Transporteinheit entwickelt, welche an der Starthaltestelle automatisiert in die Straßenbahn einfährt, sich zur Ladungssicherung während der Fahrt in der Straßenbahn sicher selbst verriegelt und an der Zielhaltestelle wieder automatisiert ausfährt. Für die Umsetzung war auch das punktgenaue Halten der Straßenbahn notwendig. Gekoppelt wurden die Vorgänge über eine hierfür entwickelte IKT-Plattform. Der gesamte Vorgang konnte am Prototyp demonstriert werden: Das Be- und Entladen des Lastenradanhängers an den Haltestellen war innerhalb typischer Fahrgastwechselzeiten möglich, Optimierungsbedarf besteht jedoch noch beim punktgenauen Halten der Straßenbahn.

Begleitend zu den technischen Entwicklungen wurde ein umfassendes Logistik- und Betreiberkonzept vorgestellt, das verschiedene Aspekte wie Fahrzeugtypen, Ladeeinheiten, Umschlagplätze und Transportprozesse berücksichtigt. Ziel war es, ein kosteneffizientes und flexibles System zu entwickeln, das den Bedürfnissen von Paketdiensten, Speditionen und dem Einzelhandel gerecht wird.

Die zuvor erwähnte, integrierte ITK-Plattform für die Erbringung von Logistikdiensten mit Fahrzeugen des ÖPNV wurde prototypisch entwickelt und stellt für die Erprobung der Szenarien für eine Gütertram-Logistik erforderliche Funktionalitäten für eine Transport Management Software (TMS) bereit. Dabei wird ein Informationsaustausch zwischen den beteiligten Akteuren in den Prozessschritten Planung und Buchung, Transportdurchführung sowie Abrechnung und Analyse ermöglicht. Die IKT-Plattform integriert Systemkomponenten zur Buchung und Transportplanung, zum Umschlag und Fahrtplanung, zur Überwachung der Gütertram Prozesse sowie zur Abrechnung der Transportdienstleistung. Daher dient ein Message Queue Telemetry Transport (MQTT)

Broker, der es ermöglicht die verschiedenen domainfremden Systeme zu integrieren, als Basis der IKT Plattform. Zusätzlich interagiert die IKT-Plattform mit dem Tram-System, beispielsweise für das Beladen, die Fahrt und das Entladen der Gütertram. Die Bündelung, sowie die Übergabe an die Transportdienstleister im Zulauf und Ablauf werden nicht in der IKT-Plattform integriert und nur externe Schnittstellen bereitgestellt.

Um abschätzen zu können, inwieweit das Konzept der LogIKTram perspektivisch dazu beitragen wird, den KEP-Verkehr zu verlagern und eine nachhaltigere Entwicklung der City-Logistik zu fördern, wurde die Wirkung des Gütertransports auf das Verkehrssystem ermittelt. Hierzu wurde ein neuer, mikroskopischer und agentenbasierter Modellierungsansatz ausgearbeitet. Dieser erlaubt die gesamtheitliche Abbildung der urbanen Paketnachfrage und die Evaluation eines intermodalen Pakettransports per LogIKTram und Lastenrad. Damit wurden sowohl der Status Quo als auch verschiedene Szenarien der Nutzung des LogIKTram-Konzepts simuliert und deren Wirkung abgeschätzt.

Zentrale Erkenntnisse des Projektes beziehen sich auf die betrieblichen Herausforderungen, den Bedarf nach weiteren Verbesserungen und die potenzielle Nachfrage. Die Kombination des Warenverkehrs mit dem öffentlichen Verkehr geht mit betrieblichen Herausforderungen einher. Beispielsweise überschneiden sich die heute typischen Zeiten für die Warenauslieferungen mit denen der hohen Straßenbahnauslastung, also mit den Zeiten, in welchen wenig freie Kapazitäten für den zusätzlichen Gütertransport zur Verfügung stehen.

Die Erkenntnisse von LogIKTram werden bereits im Folgeprojekt regioKargoTramTrain weiter verwertet; hier werden u. a. die Zulassung des umgebauten Schienenfahrzeugs sowie der Transporteinheit und der Betrieb auf der öffentlichen Schiene angestrebt. Auch wird in weiteren Forschungsprojekten bei den beteiligten Projektpartnern z.B. an günstigen und zuverlässigen Sensoren geforscht, welche perspektivisch zu einer günstigen Transporteinheit beitragen können.

Damit hat LogIKTram einen wesentlichen Beitrag zur Erweiterung der Möglichkeiten für die innerstädtische Logistik geleistet. Mit dem im Verbundvorhaben LogIKTram erarbeiteten Konzept kann durch die Kombination des Personen- und Güterverkehrs im Rahmen der innerstädtischen Logistik ein nennenswerter Beitrag zur Erfüllung der klimapolitischen, verkehrspolitischen und kommunalpolitischen Ziele geleistet werden.

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens LogIKTram war es, notwendige IKT-Grundlagen für die Erschließung der vorhandenen Elektromobilität auf der Schiene im städtischen und regionalen Verkehr für die Logistik auf der letzten Meile mit effizienten Umschlag- und Transportverfahren zu konzeptionieren und kritische Elemente prototypisch umzusetzen. Dieses Ziel wurde in insgesamt fünf Teilziele untergliedert:

1 - Logistik- und Betreiberkonzept: Ein auf den Anforderungen der Logistikkunden aufbauendes Logistik- und Betreiberkonzept soll eine wettbewerbsfähige Gütertram ermöglichen und mittelbar den öffentlichen, städtischen wie regionalen Raum trotz steigender Nachfrage im Wirtschaftsverkehr nachhaltig entlasten. Anforderungen aus Verkehrssteuerung und aus Planungs- und Steuerungssicht der Unternehmen sind zu berücksichtigen.

2 - Anforderungen an IKT und an die technische Infrastruktur: Zur Buchung eines Transportauftrages durch den Logistikkunden, zur Steuerung des Transportes der Sendungen, zur Kommunikation der beteiligten Unternehmen und zur Abrechnung der Dienstleistungen wird eine IKT-Plattform benötigt. Die Anforderungen an diese Plattform wurden basierend auf Anwendungsfällen des Logistik- und Betreiberkonzepts erhoben. Ebenso wurden Anforderungen an die technische Umsetzung (Anforderungen an IT-Schnittstellen, Fahrzeuge, Fahrweg, Lade- und Umschlagtechnik) und verfügbare Technologien für Umschlag und Transport erarbeitet. Dabei wurden Aspekte des diskriminierungsfreien Zugangs zur Eisenbahninfrastruktur beachtet.

3 - IKT-Plattform: Die IKT-Anforderungen aus dem Logistik- und Betreiberkonzept sowie die technischen Anforderungen wurden zusammen in das Design einer IKT-Plattform überführt, welche die Evaluierung des Konzepts inklusive der Planung und Steuerung auf Seiten der beteiligten Unternehmen unterstützt. Die wesentlichen Komponenten der Plattform wurden prototypisch implementiert und demonstriert. Ein digitaler Zwilling der Gütertram, der Verkehrsabläufe sowie der logistischen Abläufe an den Be-, Entlade- und Umladepunkten der Gütertram abbildet, wurde aufgebaut. Der digitale Zwilling diente einerseits der Konzeptüberprüfung in der Konzeptionsphase und andererseits zur Optimierung des Betriebs in einer späteren Einsatzphase.

4 - Ladungsträger-, Umschlag- und Fahrzeugsystem: Vorbereitend für die Überführung des Konzepts in die praktische Anwendung wurde ein Fahrzeugsystem entworfen, das die reibungslose technische Integration des Gütertransports in das bestehende Netz für den schienengebundenen ÖPNV ermöglicht („Gütertram“). Dazu gehören ein Ladungsträgerkonzept und die Fahrzeugplattform mit Be- und Entladetechnik sowie die Kopplungstechnik für die Zusammenführung mit dem Personenverkehr. Kritische Elemente der Konzepte wurden in Prototypen oder simulativ überprüft und demonstriert. Berücksichtigt wurden dabei auch Anforderungen, die sich aus dem automatisierten oder teilautomatisierten Be- und Entladen ergeben.

5 - Wirkungsforschung und Öffentlichkeitsarbeit: Für die langfristige innerstädtische und regionale Verkehrsplanung sowie als verkehrsplanerische Vorbereitung der Umsetzung der Logistikkonzepte wurde die Wirkung des Gütertransports auf das Schienennetz und das Straßennetz ermittelt. Dazu wurden Verkehrsnachfragemodelle eingesetzt, die sowohl den Lieferverkehr als auch den Personenverkehr und deren Wechselwirkungen in der Untersuchungsregion abbilden. In verschiedenen Szenarien wurden damit die Wirkungen verschiedener Lösungen analysiert. Die Öffentlichkeit ist zu einem frühen Zeitpunkt über Vorteile und Konsequenzen der Kon-

zepte informiert worden. Dadurch konnten im konstruktiven Dialog Vorbehalte erfasst und gegebenenfalls ausgeräumt oder in den Konzepten berücksichtigt werden. Während der Projektdauer fanden zahlreiche Informationsaktivitäten statt, um den Technologie- und Wissenstransfer vor Ort und auch in andere Regionen sicherzustellen und die Öffentlichkeit fortwährend einzubinden.

Durch den Aufbau eines Demonstrators und die Beteiligung an Mobilitätsfestivals und Messen wurde eine hohe Sichtbarkeit erreicht. Eine eigene Projekt-Webseite sowie Projektfortschrittsberichte in Newslettern, in Vorträgen auf Veranstaltungen wie Netzwerktreffen, Kongressen, Messen und eigenen Events sowie über Social-Media-Kanäle stellten den Technologie- und Wissenstransfer sicher.

Ergebnis des Vorhabens ist eine prototypische Umsetzung eines Gütertram-Systems mit einer Einbettung in eine funktionsfähige IKT-Plattform sowie die Ermittlung der Wirkungen auf das Gesamtverkehrssystem. Hierzu stellte die AVG ein Stadtbahnfahrzeug mit ZweiSystem-Technologie zur Verfügung, welches im Projektverlauf als Demonstrator umgerüstet wurde.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Verbundprojekt „LogIKTram - Logistikkonzept und IKT-Plattform für stadtbahnbasierten Gütertransport“ wurde unter Leitung der Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH in folgendem Verbund durchgeführt:

- Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- FZI Forschungszentrum Informatik
- Hochschule Offenburg - Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien
- INIT Innovative Informatikanwendungen in Transport-, Verkehrs- und Leitsystemen GmbH
- MARLO Consultants GmbH
- SimPlan AG
- DB Engineering & Consulting GmbH
- Hitachi Rail

Das Projekt wurde im Zeitraum vom 01.03.2021 bis zum 30.06.2024 bearbeitet, wobei ursprünglich ein Projektende am 29.02.2024 eingeplant war. Aufgrund verschiedener Umstände (siehe folgende Abschnitte) wurde dem Projekt allerdings eine kostenneutrale Verlängerung von 4 Monaten gewährt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

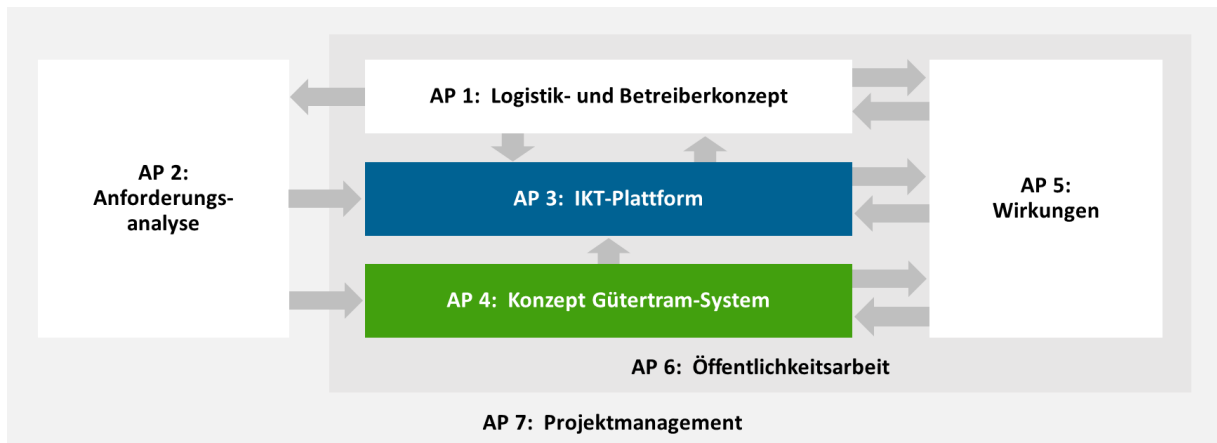


Abbildung 1-1: Struktur des Verbundvorhabens

Um die Aufgabenstellung umfassend und zielgerichtet umzusetzen, wurde das Projekt in sieben Arbeitspakete strukturiert (siehe Abbildung 1-1). Diese wurden mit einer Laufzeit von insgesamt 39 Monaten (inklusive einer kostenneutralen Verlängerung von 4 Monaten) bearbeitet. Nachfolgend werden diese Arbeitspakete näher erläutert.

AP1 – Logistik- und Betreiberkonzept:

Ziel des AP1 war die Ausarbeitung eines auf den Anforderungen der Logistikkunden aufbauendes gewerbliches Logistik- und Lieferkonzeptes, welches eine wettbewerbsfähige Gütertram ermöglicht und mittelbar den öffentlichen, städtischen wie regionalen Raum trotz steigender Nachfrage im Wirtschaftsverkehr nachhaltig entlasten können. Hierbei flossen die Anforderungen (siehe auch AP2) aus der Logistik, Verkehrssteuerung und aus der Planungs- und Steuerungssicht der Unternehmen ein.

Um ein am Markt erfolgreiches Logistikkonzept auf Basis einer Gütertram aufbauen zu können, war insbesondere zunächst erforderlich, die Hauptakteure der innerstädtischen Logistik zu erkennen und ihre Abläufe zu verstehen. Es kam vor allem heraus, dass die Hauptströme der Güter mit den Hauptströmen der Personen zeitlich korrelieren, so dass sich diese auf der Schieneninfrastruktur eher konkurrieren als gegenseitig ergänzen. Weiterhin wurde früh erkannt, dass es sich bei den Güterströmen in Richtung der Innenstädte um durchaus respektable Gütermengen handelt, die entsprechende Transportkapazitäten benötigen. Weiterhin ist für gewerbliche Logistik eine sehr hohe Zuverlässigkeit in Transportkapazität und Lieferzeit zu berücksichtigen, wobei gleichzeitig eine Flexibilität in der Planung zu gewährleisten ist. So hat sich herausgestellt, dass mehrere Koordinaten für die erfolgreiche Umsetzung einer Gütertram richtig eingestellt werden müssen, die in AP1 in Form eines Logistikmodells abgebildet wurde. Dieses Modell hilft, bei künftigen Projekten in Städten schnell in die Umsetzungskonzeption zu kommen, indem die erforderlichen Eigenschaften und deren Optionen bereits in dem Modell beschrieben sind. Ähnlich verhält es sich bei Planungs- und Betreiberkonzept. Aufgrund der noch nicht in LogIKTram inkludierten

Umsetzung einer Gütertram konnten diese Konzepte nur in der grundlegenden Konzeptvorstellung bleiben, eine Konkretisierung muss ebenfalls in einem konkreten Umsetzungsprojekt erfolgen.

AP2 – Anforderungsanalyse:

Ziel von AP2 war die Analyse und technische Detaillierung der Use Cases und Geschäftsmodelle aus AP1 zur Ableitung von technischen Anforderungen und Definition von Gütekriterien aus den Use Cases für Teilbereiche der angestrebten Lösung.

Auf Basis der Arbeiten in AP1 sowie des in AP1 erarbeiteten Transportszenarien wurde in AP2.1 zunächst eine Use Case Analyse durchgeführt. Ziel der Analyse war die Verfeinerung der Use Cases mit den Schwerpunkten IKT-Plattform und Kopplung mit den technischen Konzepten des Gütertram-Systems. Im Zuge der Use Case Analyse wurden zunächst der Kreis der betrachteten Stakeholder eingegrenzt und anschließend die relevanten Use Cases verfeinert. Parallel hierzu wurden der Systemkontext identifiziert sowie auf Basis der Use Cases Funktionsmodule spezifiziert (AP2.2) Mit diesen kann die LogIKTram Plattform die Durchführung der Use Cases unterstützen. In diesem Zusammenhang wurde ebenfalls der zugrundeliegende Informationsaustausch initial spezifiziert. Anschließend wurden diese Informationen als Verfeinerung in die Use Cases zurückgespiegelt. Darüber hinaus wurden im Zuge der Anforderungsdefinition Anforderungen hinsichtlich des technischen Gütertram-System aus dem Logistik- und Betreiberkonzept abgeleitet. Abschließend erfolgte im Rahmen von AP2.3 die Spezifikation messbarer Gütekriterien, mit denen die Performance des LogIKTram-Systems bzw. der umgesetzten Konzepte bewertet werden kann.

AP3 – IKT-Plattform:

Die IKT-Anforderungen aus dem Logistik- und Betreiberkonzept sowie die technischen Anforderungen wurden zusammen in das Design einer IKT-Plattform überführt, welche die Evaluierung des Konzepts inklusive der Planung und Steuerung auf Seiten der beteiligten Unternehmen unterstützt. Die IKT-Plattform wurde auf Basis eines Datenbrokers realisiert die es ermöglicht alle relevanten Komponenten aus AP3 (Logistik, Öffentlicher Verkehr, Tracking Komponenten, Simulation) sowie die Gütertram-Systeme aus AP4 (Schienenfahrzeug inkl. Bremsassistent und Ladungssicherung, Ladungsträger) zu integrieren. Die wesentlichen Komponenten der Plattform wurden prototypisch implementiert und demonstriert. Zusätzlich wurde neben der virtuellen und physischen Demonstration auf dem Betriebshof ein digitaler Zwilling der Gütertram, der Verkehrsabläufe sowie der logistischen Abläufe an den Be-, Entlade- und Umschlagpunkten der Gütertram erarbeitet. Der digitale Zwilling diente einerseits in der Konzeptionsphase der Konzeptüberprüfung und in einer späteren Einsatzphase zur Optimierung des Betriebs sowie der virtuellen Inbetriebnahme der IKT-Plattform.

AP4 – Konzept Gütertram-System:

Vorbereitend für die Überführung des Konzepts in die praktische Anwendung wurde ein Fahrzeugsystem entworfen, das die reibungslose technische Integration des Gütertransports in das bestehende Netz für den ÖPNV ermöglicht („Gütertram“). Dazu gehört ein Ladungsträgerkonzept und die Fahrzeugplattform mit Be- und Entladetechnik sowie Kopplungstechnik bzw. Ladungssicherung für die Zusammenführung mit dem Personenverkehr im Schienenverkehr. Kritische Elemente der Konzepte (automatisierte Be- und Entladung des Ladungsträgers, Transport des Ladungsträgers während der Fahrt im Schienenfahrzeug, punktgenaues Halten des Schienenfahrzeugs) wurden in Prototypen oder simulativ überprüft und demonstriert. Berücksichtigt wurden dabei auch Anforderungen, die sich aus dem automatisierten oder teilautomatisierten Betrieb des Be- und Entladevorgangs ergaben. Aus diesem Grund wurde das Schienenfahrzeug nicht nur um eine Ladungssicherung sondern auch um eine KI-basierte Regelung zum punktgenauen Halten ergänzt. Dieser Halteassistent unterstützt den Triebfahrzeugführenden (TF) dabei die Bahn an der Be- oder Entladehaltestelle punktgenau zum Stehen zu bringen, sodass der Ladungsträger automatisiert Ein- oder Ausfahren kann.

AP5 – Wirkungen:

Für die langfristige innerstädtische und regionale Verkehrsplanung sowie als verkehrsplanerische Vorbereitung der Umsetzung der Logistikkonzepte sollte die Wirkung des Gütertransports auf das Verkehrssystem ermittelt werden. Im Vordergrund stand die Fragestellung, inwiefern das Konzept eines stadtbahnbasierten Gütertransports zu einer Verlagerung der Verkehrsleistung von der Straße auf die Schiene beitragen kann. Dazu wurden Verkehrsnachfragemodelle eingesetzt, die sowohl den Lieferverkehr als auch den Personenverkehr und deren Wechselwirkungen in der Untersuchungsregion abdecken. Ausgehend von der Festlegung, mit der LogIKTram ausschließlich Gütersendungen aus dem KEP-Segment zu transportieren, wurde ein mikroskopisches, agentenbasiertes Güterverkehrsnachfragemodell entwickelt, welches auf Paketebene alle Sendungen zu und von Unternehmen sowie Privatpersonen im Untersuchungsraum im Verlauf einer Woche modelliert und die entsprechenden Zustell- und Abholtouren simuliert. Ausgehend davon wurde das LogIKTram-Konzept in das Modell integriert. Dazu war die Entwicklung eines neuen Verfahrens notwendig, um statt einer deterministischen Verkehrsmittelwahl (Sprinter) im Status Quo eine intermodale Transportkettenwahlentscheidung im Falle der LogIKTram abzubilden. In verschiedenen Szenarien konnten so die Wirkungen unterschiedlicher Lösungsvarianten der LogIKTram analysiert werden.

AP6 – Öffentlichkeitsarbeit:

Die Öffentlichkeitsarbeit informierte zu einem frühen Zeitpunkt über Vorteile und Konsequenzen der Konzepte, so dass im konstruktiven Dialog Vorbehalte erfasst und teilweise ausgeräumt oder in den Konzepten berücksichtigt werden konnten. Während der Projektdauer fanden zahlreiche Informationsaktivitäten statt, um den Technologie- und Wissenstransfer vor Ort und auch in andere Regionen sicherzustellen und die Öffentlichkeit fortwährend einzubinden. Hierzu wurde

neben Newsletter-Infos, Vorträgen auf Netzwerktreffen oder Fachtagungen, Beteiligung an Messen, dem Tag der Schiene und anderen Veranstaltungen auch eine eigene Projektwebseite eingerichtet. Abschließend wurde das Projektergebnis im Rahmen der Abschlussdemonstration von LogIKTram vorgestellt und im Rahmen einer Live-Demonstration veranschaulicht. Insb. die Live-Demonstration wurde öffentlichkeitswirksam verwertet und in der Presse aufgegriffen. Die Öffentlichkeitsarbeit wurde zudem mit zahlreichen Social-Media-Beiträgen aus dem Projektkonsortium begleitet.

AP7 – Projektmanagement:

Im Rahmen des AP7 wurden alle koordinierenden und steuernden Managementaufgaben zur Sicherstellung eines erfolgreichen Projektabschlusses durchgeführt. Eine wesentliche Aufgabe bestand darin, sowohl organisatorische als auch technisch-inhaltliche Schnittstellen zwischen den einzelnen Partnern und den Arbeitspaketen zu schaffen und zu pflegen. Dabei musste während der Projektdurchführung auf unkalkulierbare globale Ereignisse wie die weltweite Corona-Pandemie und den Ukrainekrieg reagiert werden. Diese erschwerten in der ersten Hälfte der Projektlaufzeit insb. die Organisation von Arbeitstreffen unter Einbeziehung aller Projektpartner und themenspezifische Workshops in Präsenz. Diese Maßnahmen des Projektmanagements wurden dabei mit Hilfe von digitalen Medien online durchgeführt.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des AP7 war die Steuerung des Berichtswesens, mit dessen Hilfe der Projektträger regelmäßig über den Fortschritt des Projekts informiert wurde.

Die AVG übernahm als Konsortialführer die Generalprojektsteuerung und entsprechend die Leitung des Projektmanagements. Dabei wurde die AVG insbesondere zur Steuerung der Arbeitspakete mit hohem Forschungsanteil von den Wissenschaftspartnern HSOG und KIT unterstützt. Ein Schwerpunkt der Projektmanagementaufgaben der AVG lag auf den koordinativen Arbeiten zur Bereitstellung bzw. zum Umbau und zum Betrieb des Demonstratorfahrzeugs, den Abstimmungen mit den Aufsichtsbehörden und zum Demonstratoraufbau sowie zur Organisation der Abschlussveranstaltung. Die HSOG fokussierte sich auf die Koordination der Forschungsarbeiten im Themenbereich Logistik- und Betreiberkonzept sowie der betrieblichen Anwendungssysteme. Das KIT übernahm das Management der Forschungsarbeiten zu den Konzepten für das Stadtbahnfahrzeug sowie für Landungshandling und -sicherung. Diese Aufgabenverteilung hatte den Vorteil, dass jeder der Partner seine spezifischen Kompetenzen bei der Koordination bzw. Steuerung der technisch-inhaltlichen Arbeiten einfließen lassen konnte.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Gütertrams gemischt mit Personentransporten sowie im Eisenbahnverkehr die Nahgüterzüge waren historisch schon einmal eine weit verbreitete und erfolgreiche Form des Gütertransports. Charakteristisch war allerdings der hohe personelle und betrieblich bedingt zeitintensive Aufwand. Der

aufkommende Lkw und dessen Kostenvorteile führten später zur Aufgabe des Schienengüterverkehrs und der Gütertrams. Besonders die in den 1990er Jahren durchgeführte Liberalisierung im Lkw-Verkehr führte zu einer deutlichen Preisverschiebung und zu einer Aufgabe des Stückgutversands über den Schienengüterverkehr. Aspekte der Nachhaltigkeit waren noch nicht Teil der Überlegungen. 2014 betrug die durchschnittliche Beförderungsweite im Straßengüterverkehr 132 Kilometer, dabei entfiel rund die Hälfte aller Transporte sogar auf den Nahverkehr unter 50 Kilometer (destatis: Güterverkehr in Deutschland 2014).

Bisherige Projekte im Bereich der Kurzstrecken-Gütertransporte auf der Schiene waren nahezu ausschließlich auf die Citylogistik beschränkt. Dabei kommen Straßenbahnen zum Einsatz, die vom Stadtrand wenige Kilometer in die Innenstadt führen. In Zürich verkehrt eine Gütertram ausschließlich mit Abfallcontainern für die Entsorgungslogistik (Sperrmüll und Elektrogeräte¹). In Dresden versorgte² die Gütertram³ im Werksverkehr die in der Innenstadt gelegene gläserne Manufaktur von Volkswagen mit Zwischenprodukten, war also folglich keine Stadtlogistiklösung. In Genf wird die Stadt per Regionalgüterzug transportierte Wechselbehälter dreimal täglich versorgt. Andere Projekte sind dagegen nie über ein Versuchsstadium hinausgekommen. Prominente Beispiele sind: Amsterdam⁴, Frankfurt am Main⁵, Wien⁶ und Schwerin⁷. Ansätze der letzten Jahrzehnte litten im Ergebnis an einer Konzeptschwäche mit hohen Umschlagskosten im Vergleich zur kurzen Transportentfernung. Gleichzeitig bieten reine Innenstadt-Peripherie-Verbindungen keine ausreichende Größe für die Entwicklung attraktiver flankierender Geschäftsmodelle und Mehrwertdienstleistungen. Eine Erfassung dieser Kriterien in Lehre, Forschung oder Umsetzung ist nicht bekannt. Alle diese Faktoren deuten auf eine unzureichende ökonomische und ökologische Bilanz hin. Multiplikatoreffekte sind aus solchen eng fokussierten Lösungsansätzen nicht zu erwarten. Außerdem wurden peripher gelegene Logistikzentren und Gleisanschlüsse von Verladern/Empfängern mit Aufkommensschwerpunkten in der Stadt, aber auch in der Region, noch nicht mit der Schiene verknüpft. Dabei müssen die Relationen nicht zwangsläufig in eine Stadt hinein oder herausführen, sondern können auch intraregional angelegt sein.

¹ https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/entsorgung_recycling/publikationen_broschueren/fahrplan_cargo_tram_und_e_tram.html

² <https://www.golem.de/news/cargo-tram-vw-beendet-belieferung-per-strassenbahn-2010-151567.html>

³ <https://www.stadt wikidd.de/wiki/CarGoTram>

⁴ <https://nlarchitects.wordpress.com/2009/07/14/city-cargo/>

⁵ <https://innovation.vgf-ffm.de/queter-tram/>

⁶ <https://industriemagazin.at/artikel/die-wiener-queterbim-das-kurze-gastspiel-der-transport-strassenbahn/>

⁷ <https://group.dhl.com/de/presse/pressemitteilungen/2022/deutsche-post-dhl-startet-pakettransport-per-strassenbahn-in-schwerin.html>

⁸ <https://www.svz.de/lokales/schwerin/artikel/paketbahn-in-schwerin-faehrt-nicht-mehr-dhl-beendet-projekt-46620095>

Zur IT-basierten Unterstützung des Fahrbetriebs existieren im öffentlichen Verkehr Intermodal Transport Control Systems (ITCS) – jedoch ohne die Abwicklung von logistikbezogenen Fragestellungen. Im Bereich der Logistik decken Transport Management Software (TMS) -lösungen die zur Verwaltung, Berechnung, Abrechnung, Kontrolle und Durchführung von Transportdienstleistungen erforderlichen Funktionen für den Logistikkunden ab. Zudem sind diese TMS meist proprietär, d.h. nur bei einem Anwender (Verlader oder Logistiker) im Einsatz. Schnittstellen finden sich nur in Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zu jeweils einem Kunden. Ein neueres Konzept basiert auf generischen Logistik-Management-Modellen, die in den europäischen F&E-Projekten freightwise⁹ und i-Cargo¹⁰ entwickelt wurden. Hervorgegangen ist daraus die frei verfügbare Norm ISO/IEC 19845:2015 Information technology – Universal business language version 2.1 (UBL v2.1)¹¹. Erste kommerzielle IT-Produkte wenden diese Modelle und Norm bei der Konsolidierung von Sendungen in einem Lkw oder ISO-Container an. Da das Projekt ein neues Konzept verfolgt und Gütertransportlösungen quasi nicht betrieben werden, existiert hierfür am Markt keine Softwarelösung zur Konsolidierung und zum Transportmanagement unter Anwendung der neuesten Logistik-Management-Modells und der ISO-Norm 19845. Eine Integration von spezifischen Prozessschritten, wie z.B. das automatisierte Be-/Entladen von Bahnen, steht ebenfalls aus.

Ereignisdiskrete Simulation und agentenbasierte Simulation sind geeignete Technologien zur Unterstützung der Planung von Logistik- und Transportabläufen. Dies gilt speziell auch im Bahnverkehr (Fang et al. 2015, Middelkoop et al. 2012, Sajedinejad et al. 2011). Es existieren in diesem Anwendungsbereich beispielsweise detaillierte mikroskopische Verkehrssimulationen, so dass auf einschlägige Erfahrungen zurückgegriffen werden kann (vgl. z. B. Dallmeyer 2014). Für Logistikunternehmen gibt es vereinzelt Ansätze um Zustellkonzepte zu simulieren (vgl. Bektas et al. 2015). Dabei dominiert allerdings die Zustellung durch klassische Transport- und Lieferfahrzeuge. Ansätze zur Evaluation von schienenengebundenem Transportverkehr im kommunalen Bereich befinden derzeit noch im Forschungsstadium. Ebenfalls noch nicht ausreichend erforscht ist die kombinierte Modellierung und agentenbasierte Simulation von Güter- und Personenverkehr, was für die Abschätzung verkehrlicher Wechselwirkungen essentiell ist.

Eine wichtige Neuartigkeit des in diesem Vorhaben zu erstellenden Digitalen Zwillings liegt somit in der Kombination von logistischen Aspekten (Positionierung von Depots, Fahrzeugbe- und -entladung, Planung der Umläufe) mit dem Verkehrsaspekt. Neu ist ebenfalls die durchgängige Verwendung von GIS-Daten innerhalb der Simulation.

⁹ <https://cordis.europa.eu/project/id/20188>, <http://freightwise.tec-hh.net/>

¹⁰ <https://cordis.europa.eu/project/id/288383>

¹¹ https://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/c066370_ISO_IEC_19845_2015.zip

Eigene Vorarbeiten der Verbundpartner:

Im Vorfeld des beantragten Projekts wurden bei verschiedenen Vorhabenpartnern bereits umfangreiche und tiefgreifende Vorarbeiten zu verschiedenen Themenbereichen durchgeführt. An dieser Stelle soll eine kurze Zusammenfassung der relevanten Arbeiten sowie der wichtigen Erkenntnisse gegeben werden.

In Kooperation mit Unternehmen verschiedener Branchen wurden grundsätzliche Vorüberlegungen für mögliche Logistikkonzepte diskutiert. Dabei sind auch verschiedene Transportanforderungen eingeflossen, vor allem Zeitrestriktionen, Mengendifferenzen (Belieferung Handelsfiliale versus Einzelpaket; Volatilität), Restriktionen über Gütereigenschaften (Kühl-/Tiefkühlware, Gefahrgut), Direktbelieferung versus Umschlagserfordernis etc. Es wurden aber auch die Chancen aus einer regionalen/städtischen Versorgung per Gütertram für neue Geschäftsprozesse betrachtet (z.B. hochgetaktete und verbrauchsbezogene Anlieferung unter Umgehung einer Lagerstufe; Erhöhung der Verkaufsfläche durch reduzierte Filiallagerung).

Außerdem wurden in vorangegangenen Projekten bereits Verkehrsnachfragemodelle für die Region erstellt, welche den Rahmen zur Abbildung des hier zu untersuchenden Systems schaffen. Im Projekt *regiomove*¹² wurde ein Nachfragemodell für den Personenverkehr erstellt. Als Modellierungsgrundlage dient das am KIT-IfV entwickelte Verkehrsnachfragemodell *mobiTopp* (Mallig et al., 2013, Mallig & Vortisch, 2017). Im Zuge der Profilregion werden zudem erste Ansätze zu einem Nachfragemodell des städtischen Wirtschaftsverkehrs mit Fokus auf KEP-Dienste (Kurier-, Express- und Paketdienste) erarbeitet, um z.B. Abhängigkeiten zwischen Personenverkehr und entsprechenden Lieferverkehren der KEP-Dienste abbilden und analysieren zu können. Diese Modelle sollen in diesem Projekt verknüpft und erweitert werden.

Bezüglich der Simulation kann auf Vorarbeiten aus entsprechenden kommerziellen Projekten und aus Forschungsaktivitäten zurückgegriffen werden (vgl. z. B. Bury et al. 2018). Die existierenden Simulationen sind allerdings überwiegend auf die Bewertung des Verkehrsflusses ausgelegt und nicht auf die Untersuchung von betrieblichen Aspekten wie der Planung von Umläufen von kommunalen Betrieben oder gar den schienenengebundenen Frachttransport im innerstädtischen Bereich.

In der IKT-Plattform wird auf bereits entwickelte generische Logistik-Management-Modelle verwiesen, die in den europäischen F&E-Projekten *freightwise*¹³ und *i-Cargo*¹⁴ (vom Projektpartner MARLO Consultants mit) entwickelt und anschließend in kommerziellen IT-Produkten in Anwen-

¹² <https://www.regiomove.de/>

¹³ (<https://cordis.europa.eu/project/id/20188>, <http://freightwise.tec-hh.net>

¹⁴ <https://cordis.europa.eu/project/id/288383>

derung gebracht wurden. Die Entwicklung betraf bislang die unternehmensübergreifende Bündelung von Sendungen auf einem oder mehreren Ladungsträgern sowie deren Zuordnung zu einem Lkw oder einer intermodalen Ladeinheit (ISO-Container, CEN-Wechselbehälter). Die Anwendung erfolgte auf Initiative von MARLO Consultants zudem bereits für Verteiltouren in der Stadtlogistik in den Niederlanden. Die Bündelung von auf unterschiedliche Verteiltouren zugeordneten Ladungsträgern ist nun auf die Gütertram spezifische Umstände zu adaptieren.

In der Schweiz erfolgt mit mehrfach täglich verkehrenden kurzen Pendelzügen die Belieferung von Genf bzw. in einem Netzwerk die unternehmensübergreifende Regionallogistik im Schweizer Mittelland, wobei Wechselbehälter horizontal ohne ortsfeste Infrastruktur umgeschlagen werden. MARLO Consultants hat die Wirtschaftlichkeit der Anwendung der verwendeten Technologie nachgewiesen. Vergleichbare Logistikverfahren, auch wenn sie sich technologisch in Detail unterscheiden und alternativ für Ladungsträger ausgelegt sind, können von den Erfahrungen aus der Schweiz profitieren.

In der Logistik entwickeln sich neue Geschäftsmodelle, die trotz der Diversifizierung der Anforderungen und kleinteiligeren Sendungen wirtschaftlich tragfähige Angebote ermöglichen sollen. Hierzu gehören Unternehmensübergreifende Bündelungen und Ad-hoc-Transportdienstleistungen. In dem EU-Projekt NOVIMAR¹⁵, an dem MARLO Consultants konzeptionell beteiligt war, wurde für neuartige Binnenschiffahrtssdienste eine Analyse derartiger Geschäftsmodelle vorgenommen und deren Wirtschaftlichkeit untersucht. Hierauf basierend sollen entsprechende Geschäftsmodelle für die Gütertram konzipiert und auf Ihre Tragfähigkeit hin untersucht werden.

Abschließend soll auf **wichtige Erkenntnisse** aus den Vorarbeiten **mit Bezug zu LogIKTram** eingegangen werden. Es konnte durch die Vorstudien eine grundsätzliche organisatorische Machbarkeit und ein hohes Interesse der regionalen und überregionalen Wirtschaft nachgewiesen werden. Gleichzeitig wurden aber einige noch zu lösende wirtschaftliche und technische Herausforderungen klar herausgearbeitet, die Auslöser und zentraler Bestandteil des Verbundvorhabens LogIKTram geworden sind:

- a) Eine Gütertram muss spezifische Bedürfnisse der Verloader erfüllen (v. a. Transport straßen- wie schienentauglicher Wechselbehälter oder Ladungsträger).
- b) Trassenkosten haben 30-40% Anteil an den variablen Kosten der Gütertram und sind damit neben Fahrzeug und Instandhaltung größte Kostentreiber; daher ist eine Kopplung der Gütertram an für den Personenverkehr eingesetzte Trams bzw. auch die Kopplung von Gütertrams untereinander oder ein kombinierter Personen- und Warentransport in Erwägung zu ziehen

¹⁵ <https://novimar.eu>

- c) Kritische Anforderungen wie die geringe Transportzeit und frühe garantierte Anlieferzeitfenster erschweren die Transportorganisation per Gütertram (v.a. keine Gleisanschlüsse → zeitintensiver Vor-/Nachlauf und Umschlag)
- d) Notwendiges Transportvolumen: Das System Gütertram kann seine Wirtschaftlichkeit erst bei der Kombination vieler Verloader in einem System darstellen (attraktive Transportfrequenz, Behälterpool, Auslastung) → kritischer Systemstart

1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Die Durchführung des Vorhabens erfolgte auf Basis des bekannten Stands der Technik. Es wurden lediglich etablierte und frei zugängliche Verfahren, also keine durch Schutzrechte versehenen Konstruktionen oder Verfahren genutzt.

1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Für die Durchführung des Vorhabens wurde auf dem bekannten Stand der Technik und des Wissens zurückgegriffen, welcher im Wesentlichen den nachfolgenden genannten Quellen entnommen wurde.

Anand, Nilesh; van Duin, Ron; Tavasszy, Lori (2014): Ontology-based multi-agent system for urban freight transportation. In: International Journal of Urban Sciences 18 (2), S. 133–153. DOI: 10.1080/12265934.2014.920696.

AVG, Hg., „Fahrzeugumgrenzung GT8-100C / 2S“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.avg.info/fileadmin/user_upload/avg/Dateien/Geschaeftskunden/AVG_Lichtraumprofil_BOStrab.pdf. Zugriff am: 4. Februar 2022.

Barthelmes, Lukas; Görgülü, Emre; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (in Kürze erscheinend): Data Collection for Microscopic Modelling of Urban Parcel Transport to and from Establishments – Empirical Insights into City Logistics in the Region of Karlsruhe, Germany. In: Journal of Urban Mobility.

Barthelmes, Lukas; Görgülü, Emre; Kübler, Jelle; Löffler, Aljoscha; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (im Review): Modeling Framework for the Agent-based Simulation of Rail-based Urban Parcel Transport: An Application of a Two-stage Transport Chain Selection Model. In: Research in Transportation Business & Management.

Barthelmes, Lukas; Görgülü, Mehmet Emre; Kübler, Jelle; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2023): Microscopic Agent-Based Parcel Demand Model for the Simulation of CEP-Based Urban Freight Movements to and from Companies. In: Uwe Clausen und Marius Dellbrügge (Hg.): Advances in Resilient and Sustainable Transport. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Logistics), S. 75–92.

Barthelmes, Lukas; Kübler, Jelle; Görgülü, Emre; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2024): Integrated Agent-Based Modeling and Simulation Framework for Urban Parcel Shipments to and from Establishments. In: 103rd Transportation Research Board Annual Meeting.

Beasley, J. E. (1983): Route first—Cluster second methods for vehicle routing. In: Omega 11 (4), S. 403–408. DOI: 10.1016/0305-0483(83)90033-6.

Bektas, T., Crainic, T.G. und van Woensel, T. (2015). From managing urban freight networks to smart city logistics networks. Technical Report CIRRELT-2015-17, CIRRELT.

Bender, P.; Ziegler, J.; Stiller, C.: Lanelets: Efficient Map Representation for Autonomous Driving, eingereicht beim IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2014]

- BIEK (2023): KEP-Studie 2023 – Analyse des Marktes in Deutschland. Hg. v. KE-CONSULT Kurte&Esser GbR. Bundesverband Paket und Expresslogistik e. V. Berlin, Köln.
- Boerkamps, J.; Binsbergen, A. (1999): GoodTrip—A New Approach for Modelling and Evaluation of Urban Goods Distribution.
- Bok, Michiel de; Tavasszy, Lóri (2018): An empirical agent-based simulation system for urban goods transport (MASS-GT). In: *Procedia Computer Science* 130, S. 126–133. DOI: 10.1016/j.procs.2018.04.021.
- BOStrab: Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/strabbo_1987/BJNR026480987.html, zuletzt geprüft am 04.02.2022.
- Bury, H., Spieckermann, S., Wortmann, D. und Hübler, F. (2018). A Case Study on Simulation of Railway Fleet Maintenance. *Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference*, edited by H. Lam et al. 2851–2860, Piscataway, New Jersey: IEEE.
- Dalla Chiara, Giacomo; Alho, André Romano; Cheng, Cheng; Ben-Akiva, Moshe; Cheah, Lynette (2020): Exploring Benefits of Cargo-Cycles versus Trucks for Urban Parcel Delivery under Different Demand Scenarios. In: *Transportation Research Record* 2674 (5), S. 553–562. DOI: 10.1177/0361198120917162.
- Dallmeyer, J. (2014). *Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt*, Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Europäische Union (18.11.2014): Verordnung über die technischen Spezifikationen für die Interoperabilität bezüglich der Zugänglichkeit des Eisenbahnsystems der Union für Menschen mit Behinderungen und Menschen mit eingeschränkter Mobilität. TSI PRM. In: Amtsblatt der Europäischen Union, 110-17/8. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1300&from=DE>, zuletzt geprüft am 04.02.2022.
- Fang, W., S. Yang, and X. Yao. 2015. “A Survey on Problem Models and Solution Approaches to Rescheduling in Railway Networks”. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16(6):2997–3016.
- Fischer, Michael J.; Outwater, Maren L.; Cheng, Lihung Luke; Ahanotu, Dike N.; Calix, Robert (2005): Innovative Framework for Modeling Freight Transportation in Los Angeles County, California. In: *Transportation Research Record* 1906 (1), S. 105–112. DOI: 10.1177/0361198105190600113.
- Fontanel, Éric; Christeller, Reinhard; Lacôte, François (2020): Rolling Stock. In the railway system.
- Handelsverband Deutschland (2024): E-Commerce Umsätze. Handelsverband Deutschland. Online verfügbar unter <https://einzelhandel.de/presse/zahlenfaktengrafiken/861-online-handel/1889-e-commerce-umsaetze#:~:text=F%C3%BCr%20das%20Jahr%202024%20rechnet,um%203%2C4%20Prozent%20nominal.,> zuletzt geprüft am 12.07.2024.
- Kesting, Arne; Treiber, Martin; Helbing, Dirk: „Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity.“ *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 368.1928 (2010): 4585–4605
- Kübler, Jelle; Barthelmes, Lukas; Görgülü, Mehmet Emre; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2023): Modeling Relations Between Companies and CEP Service Providers in an Agent-Based Demand Model using Open-Source Data. In: *Procedia Computer Science* 220, S. 486–494. DOI: 10.1016/j.procs.2023.03.062.
- Kübler, Jelle; Barthelmes, Lukas; Görgülü, Mehmet Emre; Reiffer, Anna (2022): logiTopp. Online verfügbar unter <https://github.com/kit-ivf/logitopp>.
- Livshits, Vladimir; You, Daehyun; Zhu, Haidong; Jeon, Kyunghwi; Vallabheneni, Lavanya (2018): Mega-Regional Multi-Modal Agent-Based Behavioral Freight Model. Final Report. Federal Highway Administration (FHWA).
- Llorca, Carlos; Moeckel, Rolf (2021): Assessment of the potential of cargo bikes and electrification for last-mile parcel delivery by means of simulation of urban freight flows. In: *Eur. Transp. Res. Rev.* 13 (1). DOI: 10.1186/s12544-021-00491-5.
- Mallig, N. & Vortisch, P. (2017), ‘Modeling travel demand over a period of one week: The mobitopp model’, arXiv preprint arXiv:1707.05050.
- Mallig, N., Kagerbauer, M. & Vortisch, P. (2013), ‘mobitopp – a modular agent-based travel demand modelling framework’, *Procedia Computer Science*, pp. 854–859.
- Mallig, Nicolai; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2013): mobiTopp - A Modular Agent-based Travel Demand Modelling Framework. In: *Procedia Computer Science* 19, S. 854–859. DOI: 10.1016/j.procs.2013.06.114.
- Mallig, Nicolai; Vortisch, Peter (2017): Modeling travel demand over a period of one week: The mobiTopp model. In: arXiv preprint arXiv:1707.05050.

- Middelkoop, D., J. Steneker, S. Meijer, E. Sehic and M. Mazzarello. 2012. "Simulation Backbone for Gaming Simulation in Railways: A Case Study" In *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, edited by C. Laroque et al., 3262-3274, Piscataway, New Jersey: IEEE.
- Nuzzolo, Agostino; Comi, Antonio (2014): Urban freight demand forecasting: A mixed quantity/delivery/vehicle-based model. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 65, S. 84–98. DOI: 10.1016/j.tre.2013.12.014.
- Reiffer, Anna; Kübler, Jelle; Briem, Lars; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2021): Integrating Urban Last-Mile Package Deliveries into an Agent-Based Travel Demand Model. In: *Procedia Computer Science* 184, S. 178–185.
- Sajedinejad, A., S. Mardani, E. Hasannayebi, S. A. R. Mir Mohammadi K., and A. Kabirian. 2011. "SIMA-RAIL: Simulation Based Optimization Software for Scheduling Railway Network". In *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, edited by S. Jain et al., 3730-3741, Piscataway, New Jersey: IEEE.
- Sakai, Takanori; Romano Alho, André; Bhavathrathan, B. K.; Chiara, Giacomo Dalla; Gopalakrishnan, Raja; Jing, Peiyu et al. (2020): SimMobility Freight: An agent-based urban freight simulator for evaluating logistics solutions. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 141, S. 102017. DOI: 10.1016/j.tre.2020.102017.
- Stinson, Monique; Mohammadian, Abolfazl (2022): Introducing CRISTAL: A model of collaborative, informed, strategic trade agents with logistics. In: *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 13, S. 100539. DOI: 10.1016/j.trip.2022.100539.
- BOStrab: Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/strabbo_1987/BJNR026480987.html
- Tamagawa, Dai; Taniguchi, Eiichi; Yamada, Tadashi (2010): Evaluating city logistics measures using a multi-agent model. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 2 (3), S. 6002–6012. DOI: 10.1016/j.sbspro.2010.04.014.
- Thaller, Carina; Papendorf, Lara; Dabidian, Peiman; Clausen, Uwe; Liedtke, Gernot (2019): Delivery and Shipping Behaviour of Commercial Clients of the CEP Service Providers. In: *Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic*: Springer, Cham, S. 205–220. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-13535-5_15.
- Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH (Hg.) (2014): Citylink. Die Niederflur-Stadtbahn für Karlsruhe. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.avg.info/fileadmin/user_upload/vbk/Dateien/Service/VBK_Broschuere_Citylink.pdf, zuletzt geprüft am 04.02.2022.
- Verordnung über die technischen Spezifikationen für die Interoperabilität bezüglich der Zugänglichkeit des Eisenbahnsystems der Union für Menschen mit Behinderungen und Menschen mit eingeschränkter Mobilität: TSI PRM, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1300&from=DE>
- Wisetjindawat, Wisinee; Yamamoto, Koshi; Marchal, Fabrice (2012): A Commodity Distribution Model for a Multi-Agent Freight System. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 39, S. 534–542. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.03.128.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Zusammenhang mit dem Stadtbahnwagen-Umbau arbeitete das Projektkonsortium mit mehreren anderen Stellen zusammen. Da es sich bei den Stadtbahnwagen der VBK und AVG um Zweisystemfahrzeuge handelt, die sowohl nach der Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung (BOStrab) als auch nach der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) technisch ausgerüstet und zugelassen sind, mussten hierbei mehrere Personen bzw. Institutionen eingebunden werden. Die Notwendigkeit zur Einbindung dieser Personen ergibt sich hierbei aus den Rechtsgrundlagen BOStrab und EBO sowie übergeordneter dem Allgemeinen Eisenbahngesetz (AEG) und der Eisenbahnbetriebsleiterverordnung (EBV). Insgesamt handelte es sich während der Projektlaufzeit hierbei um folgende Personen und Institutionen:

- gem. § 7 Abs. 3 BOStrab bestellter Betriebsleiter der VBK und AVG
- gem. § 5 BOStrab i.V.m. § 54 Abs. 1 Satz 3 PBefG für die Überwachung und Einhaltung der Vorschriften der BOStrab zuständige Technische Aufsichtsbehörde (TAB)
- gem. § 1 Abs. 2 EBV bestellter und gem. § 2 Abs. 1 durch die zuständige Aufsichtsbehörde bestätigter Eisenbahnbetriebsleiter (EBL) der AVG
- gem. § 5 Abs. 1a Nr. 2 AEG für die Überwachung und Einhaltung der Vorschriften des AEG und der darauf beruhenden Rechtsverordnungen (u.a. EBO) zuständige Landeseisenbahnaufsicht (LEA) bzw. das Eisenbahn-Bundesamt (EBA)
- gem. § 5 Abs. 2 BOStrab durch die TAB bestätigte sachkundige Stelle zur Erstellung von Gutachten
- gem. § 4b AEG vom EBA anerkannter Gutachter für Eisenbahnfahrzeuge zur Erstellung von Gutachten

Bereits während der Definition und Konzeption der Umbaumaßnahmen wurden die Maßnahmen vor der Ausarbeitung von Skizzen und Plänen in regelmäßigen Abständen mit der Betriebsleitung BOStrab und dem EBL abgestimmt. Deren Anforderungen und Vorgaben zur Anpassung wurden jeweils bei der Erstellung der Pläne und Skizzen berücksichtigt. Gleiches galt für die Erstellung des Sicherheitskonzeptes für die Abschlussdemonstration auf dem Betriebshof West der VBK und AVG. Die Umbaumaßnahmen sowie das Sicherheitskonzept wurden zudem mit der TAB und dem EBA abgestimmt.

Nach Einbau der Messtechnik zur Erhebung des Fahrzeugfahr- und Bremsverhaltens als Datengrundlage für die KI-basierte Regelung zum punktgenauen halt, wurde in Abstimmung mit dem Betriebsleiter BOStrab der VBK und AVG sowie der TAB zudem ein Gutachten bei der durch die TAB bestätigte sachkundige Stelle TÜV Rheinland InterTraffic GmbH zur Rückwirkungsfreiheit beauftragt. Der TÜV Rheinland InterTraffic GmbH ist zudem anerkannter Gutachter für Eisenbahnfahrzeug und berechtigt zur Prüfung der Fahrzeuggestechnik mit Schwerpunkt „Erstellung und Änderung von Software“.

Erst nachdem das beauftragte Gutachten die Rückwirkungsfreiheit der eingebauten Messtechnik bestätigte, konnte durch die Betriebsleitung BOStrab die Änderung gem. § 62 Abs. 1 BOStrab gegenüber der TAB angezeigt werden. Diese Anzeige wurde von der TAB bestätigt. In der Folge konnten die Fahrten zur Datenerhebung im BOStrab-Streckennetz der VBK und AVG durchgeführt werden. Das Fahrzeug war dabei im Einsatz der Fahrschule der VBK.

Bei der Untersuchung des kombinierten Personen- und Warentransport handelt es sich nicht nur aus technischer und betrieblicher Sicht um ein Innovationsfeld, sondern auch im Hinblick auf rechtliche Rahmenbedingungen. So gibt es z.B. nach BOStrab keine rechtliche Grundlage um Waren oder Güter in den Zweisystemfahrzeugen der VBK und AVG zu transportieren. Darüber hinaus sind die Schienenfahrzeuge der VBK und AVG ausschließlich für die Personenbeförderung zugelassen. Hier bedarf es demnach für eine Erprobung außerhalb des Betriebshofes (nach

Abschluss des Projektes LogIKTram in weiteren Forschungsprojekten) einer Ausnahmegenehmigung und langfristig einer Novellierung des Rechtsrahmens. Um hierauf aufmerksam zu machen, engagierten sich einige Personen aus dem Projektkonsortium, u.a. der Projektleiter der AVG Dr.-Ing. Christoph Rentschler, an der Unterarbeitsgruppe „Versorgung von Städten mit Schienengüterverkehr“ des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV). Im Rahmen der UAG wurden mehrfach die Sachstände aus dem Projekt präsentiert und auf Herausforderungen im Hinblick auf den Rechtsrahmen aufmerksam gemacht.

Darüber hinaus wurde in der UAG auch die Notwendigkeit zur Begleitung der technischen, betrieblichen und rechtlichen Entwicklung des kombinierten Personen- und Warentransports durch steuerungspolitische Maßnahmen hingewiesen. Die Nutzung freier Kapazitäten in der Personenbeförderung für den Warentransport kann einen gewissen Anteil des Lieferverkehrs von der Straße auf die Schiene verlagern und damit zumindest im Stadtgebiet lokal CO₂-Emissionen reduzieren. Das Angebot wird aber voraussichtlich nur dann von der Logistikbranche in Anspruch genommen, wenn es z.B. mit zeitlich und örtlich begrenzten Zufahrtsbeschränkungen im Straßenverkehr kombiniert wird.

Zur Abstimmung der Anforderungen an potenzielle Umschlagplätze oder Micro-Hubs im Stadtzentrum Karlsruhe befanden sich sowohl Vertreter der VBK und AVG als auch des KIT-IfV in regelmäßigen Abständen im Austausch mit dem Stadtplanungsamt der Stadt Karlsruhe (StPIA). Die Abstimmung ist insbesondere im städtischen Bereich sehr wichtig, um sicherzustellen, dass das in LogIKTram entwickelte und in den Folgeprojekten für den Betrieb an der öffentlichen Schiene fortgeführte Konzept zum kombinierten Personen- und Warentransport auch mit den Plänen und Konzepten der Stadt hinsichtlich Güter- und Lieferverkehr einhergeht. Auch hier spielte die in der UAG der BMDV adressierte Notwendigkeit ergänzender steuerungspolitischer Maßnahmen eine wichtige Rolle.

Darüber hinaus befinden sich die Haltestellen der VBK und AVG im Stadtzentrum Karlsruhe meist in Mittellage, d.h. links- und rechtsseitig befinden sich die Fahrspuren der Straße. Dies erzeugt beengte Platzverhältnisse und erschwert die Einrichtung von Flächen zur Übergabe oder zur Abholung des e-Trailers seitens der KEP-Branche. Um dies dennoch ermöglichen zu können, ist der enge Austausch mit dem StPIA von großer Bedeutung. Nur so können bereits in heutigen Planungen naheliegende Flächen identifiziert und ggf. freigehalten oder freigeräumt werden.

Nicht zuletzt war für die Simulation der Wirkungsanalyse ein Abgleich des Verkehrsmodells des KIT-IfV mit dem städtischen Modell und den städtischen Konzepten zur künftigen Verkehrslenkung ein wichtiger inhaltlicher Punkt im Rahmen dieses regelmäßigen Austauschs.

Zuletzt ist noch zu erwähnen, dass LogIKTram der Gesamtinitiative regioKArgo zugeordnet werden kann. Die Gesamtinitiative regiKArgo ist eine Logistik-Gesamtinitiative in der Stadt und Region Karlsruhe bei welcher zahlreiche Partner aus Karlsruhe und der Region, auch Vertreter

aus dem Projektkonsortium LogIKTram, zusammen arbeiten um alternative Lösungen für eine ganzheitliche Lieferkette von Tür zu Tür zu entwickeln. Der Fokus soll dabei darauf liegen bestehende Schieneninfrastruktur und -fahrzeuge optimal und doppelt für den Personen- und Güterverkehr zu nutzen.

Zusätzlich kam es zum Austausch mit anderen Forschungsinitiativen, die sich mit dem Themenkomplex Güterbeförderung im ÖPNV beschäftigen. Hierfür boten die Vernetzungstreffen im Programm IKT für Elektromobilität, das Koordinatorentreffen im Rahmen der Begleitforschung IKT für Elektromobilität sowie das Statusseminar „IKT für Elektromobilität“ optimale Gelegenheiten. Bei letzterem wurde das Verbundvorhabens LogIKTram im Rahmen einer Session zu Logistik-Projekten vorgestellt, wobei sich im Nachgang ein reger Austausch mit anderen Projekten und dem Projektträger entstand und ein vertiefender Austausch mit anderen Verbundprojekten (eaasy system & hitch hike box) angestoßen wurde. Neben dem fachlichen Austausch wurden die Treffen dazu genutzt, um Kooperations- und Partizipationsmöglichkeiten der Begleitforschung im Kreis der Teilprojektverantwortlichen zu diskutieren. Des Weiteren wurden potentielle Themen für die Fachgruppe Recht der Begleitforschung identifiziert und nach einer expliziten Anfrage durch das BMVI (Ref-G14) als Beitrag für ein Arbeitstreffen zu den rechtlichen Rahmenbedingungen für den Gütertransport im ÖPNV diskutiert.

Ergänzend gab es weitere Austausche mit anderen Forschenden, darunter zum Beispiel dem ReLUT – RESEARCH LAB for URBAN TRANSPORT der Hochschule Frankfurt sowie der LaLoG LandLogistik GmbH. Bei den Gesprächen standen überwiegend die gemeinsamen Herausforderungen und möglichen Kooperationen im Vordergrund. Im Rahmen des Informationstags „Wie geht «Schiene und Citylogistik»?“, organisiert von der Vereinigung der BahnJournalisten Schweiz – Medienschaffende des öffentlichen Verkehrs, konnten nach der Vorstellung des Verbundvorhabens durch Dr.-Ing. Michael Frey (KIT) viele neue Aspekte zum Themenkomplex aufgegriffen und diskutiert werden. Eine ganz andere Sichtweise, nämlich die der Kommunen, ergab sich im Rahmen des NaKoMo*-Workshops „Transport von Gütern in Fahrzeugen des ÖPNV oder auf der Infrastruktur des ÖPNV“. Hierbei hat Dr.-Ing. Michael Frey (KIT) die Leitung der Session „Herausforderungen und Lösungsansätze hinsichtlich der Infrastruktur für den Transport von Gütern in Fahrzeugen des ÖPNV oder auf der Infrastruktur des ÖPNV“ übernommen.

Auf Einladung des damaligen Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur, Andreas Scheuer MdB, nahmen Herr Ascan Egerer (ehem. technischer Geschäftsführer der AVG) und Dr.-Ing. Michael Frey (KIT) als Vertreter des Verbundvorhabens LogIKTram am Runden Tisch „Warentransport via ÖPNV – Verkehr vor Ort entlasten und Klima schützen“ teil. Dabei wurde das Verbundvorhaben vorgestellt und in der gemeinsamen Diskussion erarbeitet, welche Herausforderungen es gibt und welche Randbedingungen gesetzlicher Art für eine optimale Gestaltung des Warentransports mittels des ÖPNV notwendig sind.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Ergebnisse

Im Folgenden werden die erarbeiteten Projektergebnisse im Kontext der entsprechenden Arbeitspakete erläutert.

2.1.1 AP1: Logistik- und Betreiberkonzept

Die Idee der Nutzung von Stadtbahnen für Gütertransporte (im Folgenden bezeichnet als Gütertram) scheint gerade in Zweisystemnetzen wie Karlsruhe durch seine große Ausdehnung in die umliegende Region sinnvoll. So könnten Transporte von in der Region angesiedelten Lager- und Umschlagpunkten in die Innenstadt und retour oder sogar Transportwege von der Region in einen anderen Teil der Region, welcher nicht in der Innenstadt gelegen ist, realisiert werden. Dazu ist es aber wichtig, die Eigenschaften und Anforderungen der potenziellen Transportkunden in der technischen und organisatorisch/ betriebswirtschaftlichen Umsetzung zu berücksichtigen. Darauf fokussiert das erarbeitete Logistikkonzept, flankiert durch das Planungs- und Betreibermodell.

Als relevante Gruppen im innerstädtischen Güterverkehr wurden Paketdienstleister, Stückgutspediteure und der Lebensmitteleinzelhandel, letztere als Vertretung der allgemeinen Einzelhandelsbelieferung, betrachtet. Für die systematische Ermittlung und Bewertung der Nutzbarkeit bzw. Konstruktion eines stadtbahnbasierenden Gütertransports für diese relevanten Gruppen wurde ein modulares Logistikkonzept aufgesetzt.

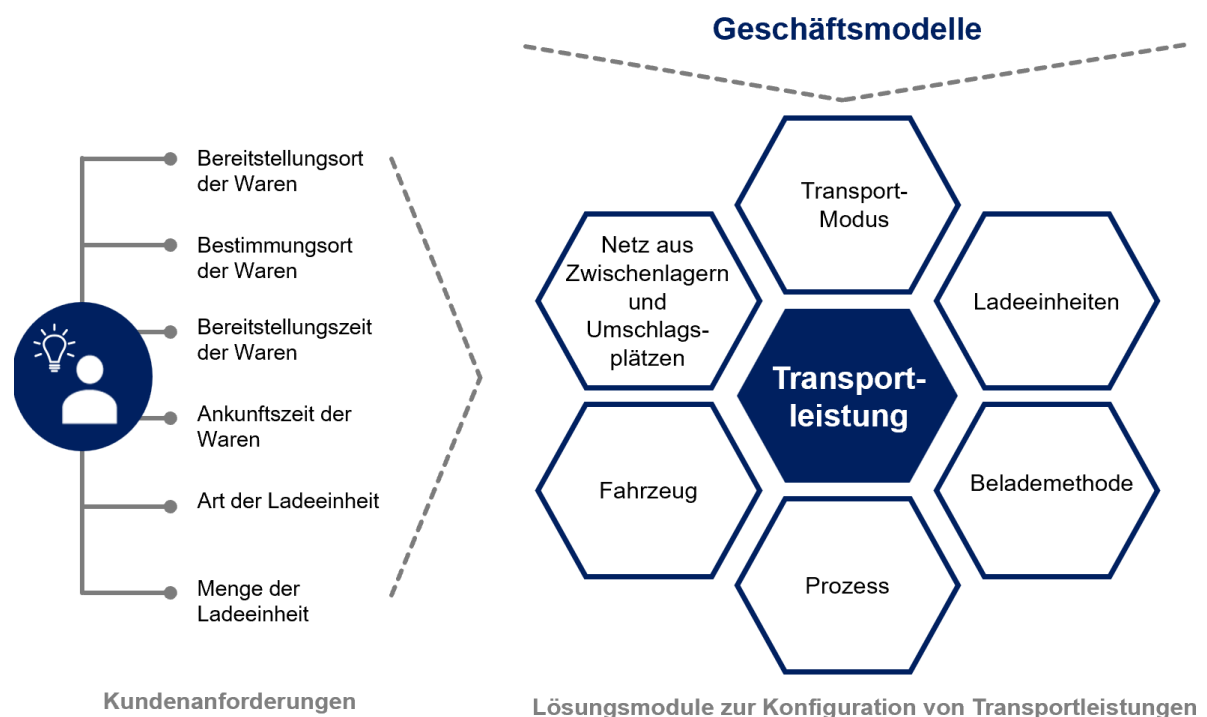


Abbildung 2-1: Lösungsmodul zur Konfiguration von Transportleistungen

In den sechs Modulen Fahrzeug, Ladeeinheiten, Verlademethoden, Umschlagplätze und Zwischenlager, Transport-Modus sowie Prozess wurden zunächst Möglichkeiten zur Umsetzbarkeit eines Transports auf innerstädtischen Schienen unter Berücksichtigung der Anforderungen aufgezeigt und im Weiteren systematisch bewertet. Es wurde ein kosteneffizientes, jedoch möglichst flexibles Transportsystem angestrebt. Ein paar zentrale Aussagen werden hier im Bericht im Folgenden kurz dargestellt, für eine ausführliche Beschreibung wird auf das eigene Dokument des Logistikkonzepts verwiesen.

Eine der zentralen Fragestellungen war die grundsätzliche Einbindung des Güterverkehrs in den originären Personentransport des Systems Stadtbahn. Mögliche Varianten des Transportmodus zur Umsetzung sind dabei eine dedizierte Gütertram, ein gekoppeltes System oder ein gemischter Personen-/Güterverkehr in einem Transportraum. Hierzu gibt es zunächst technische Restriktionen, so dass im Modul Fahrzeug die technischen Rahmenbedingungen von Stadtbahnen erläutert wurden. Dazu gehören Vorgaben der Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung (BOStrab) sowie der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) wie auch die heutige praktische Umsetzung, vor allem erläutert an der Modellregion Karlsruhe.

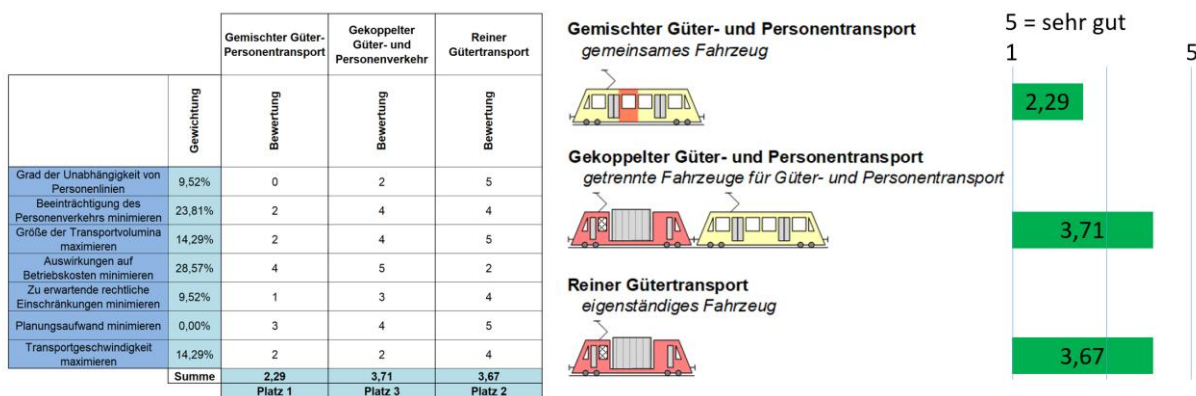


Abbildung 2-2: Typen von Fahrzeugen und deren Bewertung

Im Weiteren mussten die mit einer Gütertram kompatiblen und für die Anforderungen der Transportkunden einsetzbaren Ladeeinheiten und Verlademethoden bestimmt werden. Der Transportmodus zeigte sich auch als ein relevantes Schlüsselkriterium bei der Wahl von Umschlagplätzen und Zwischenlagern. Es wurden verschiedene relevante Typen an Umschlagplätzen entwickelt und in ihrer Verwendbarkeit für verschiedene Transportszenarien beschrieben (siehe Abbildung 2-3, genauere Beschreibung siehe ausführliches eigenes Dokument Logistikkonzept). Das modulare Logistikkonzept wurde durch prozessuale Themen ergänzt, z.B. die Frage der kundenindividuellen oder kundengemischten Beladung oder Optionen der Automatisierung.

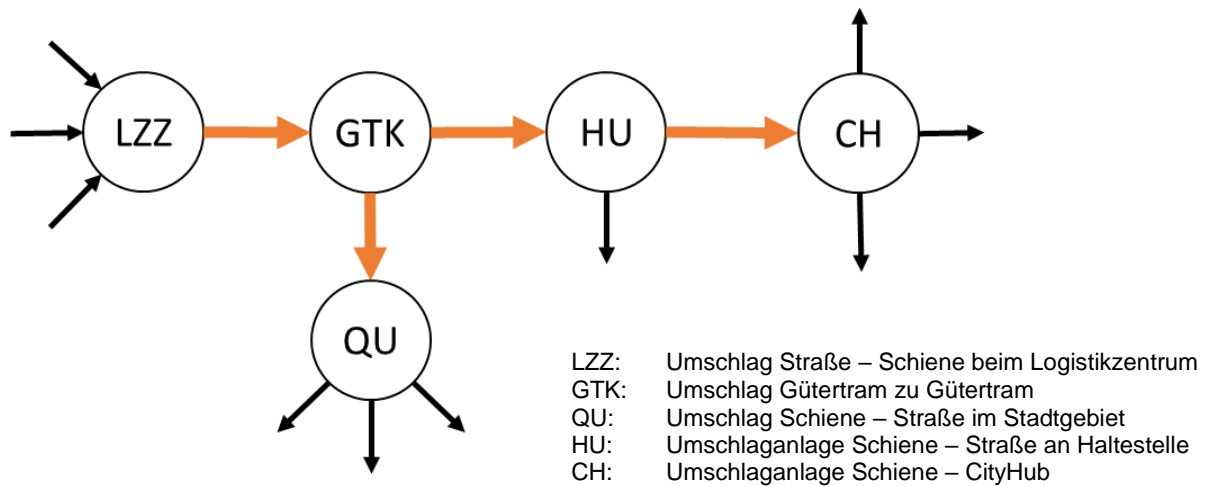


Abbildung 2-3: Typen von Umschlagplätzen

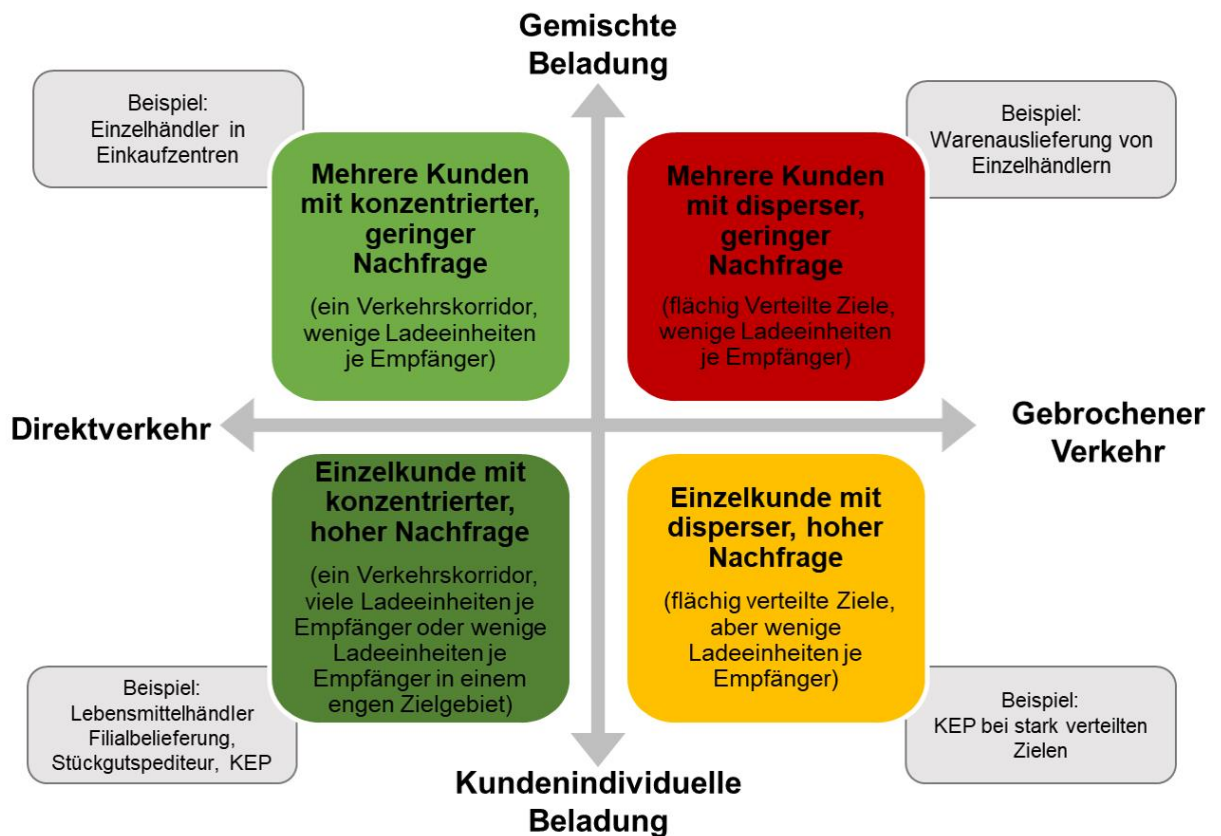


Abbildung 2-4: Einordnung Prozesse zu System Gütertram

Abbildung 2-4 zeigt einen Einblick in den Bereich Prozesse, bei dem es vor allem darauf ankommt, für die unterschiedlichen Transportbedürfnisse die richtige Lösung auf der Schiene zu bekommen.

Die Bewertung der Varianten auf Basis eines systematischen Kriterienkatalogs zeigte über alle Kriterien hinweg, dass eine Fokussierung auf einen getrennten Transport von Gütern, ggf gekoppelt mit einem unabhängigen Personentransport, unter den heutigen rechtlichen, technischen und betrieblichen Rahmenbedingungen einfacher umsetzbar ist. Ein gemischter Betrieb ist nur möglich, sofern sich diese Rahmenbedingungen, auch durch politische Steuerungsmaßnahmen ändern. Wichtige Steuerungsmaßnahmen wären z.B. vereinfachte Zulassungsprozesse, welche einen kombinierten Personen- und Warentransport sowohl nach BOStrab als auch EBO ermöglichen, oder räumlich und zeitlich beschränkte Zufahrtsbeschränkungen für Kleintransporter, welche den bevorzugten Transport von Waren aus der Region in die Innenstadt mit der Gütertram befördern.

Unter den heutigen Rahmenbedingungen ist das für die relevanten Transportgruppen wichtige Transportvolumen deutlich besser umsetzbar und der Güterverkehr kann unabhängig vom Personenverkehr den effizientesten Transportweg wählen. Eine Trennung erleichtert auch deutlich die Berechenbarkeit und Sicherheit des Gütertransports, für Logistiker explizit relevante Kriterien bei der Wahl des Verkehrsträgers. Weiterhin kann das Fahrzeug an die Erfordernisse des speziellen Transportbedarfs optimal angepasst und somit das mögliche Transportvolumen erhöht werden. Im Verlauf der Untersuchungen wurde auch sehr deutlich, dass die Gütertram bestenfalls als Tragwagen auszubilden wäre, um genormte Behälter zum Transport aufzusetzen. Dies würde dem durchweg größeren Transportbedarf der relevanten Transportgruppen eine Effizienzsteigerung bringen. Aus den Arbeiten ergab sich aber auch ein neuer weiterführender Ansatz, bei dem eine reine Gütertram durchaus auch neue Strecken unabhängig vom Güterverkehr erschließen könnte und damit eine erneute Werksanbindung gegenüber der Vollbahn mit deutlich höheren baulichen Anforderungen erleichtern würde. Es wurde aber auch herausgestellt, dass der Markt für dedizierte Gütertrams klein und damit für Fahrzeughersteller uninteressant sein könnte. Dies wiederum könnte dazu führen, dass Sonderanfertigungen zu hohen Kosten bei der Fahrzeugherstellung und damit einem unwirtschaftlichen Betrieb führen könnten.

Die Auswahl des Umschlagplatztyps wurde als stark abhängig von den jeweiligen Bedingungen, von Transportvolumen bis zur räumlichen Verteilung der Zielkoordinaten, bewertet. Grundsätzlicher war die Erkenntnis, dass Haltestellen des Personenverkehrs, insbesondere in der Innenstadt, in Straßenmittellage liegen und in der Regel keine freien Flächen vorhalten, um zusätzlich Güter aufnehmen zu können sowie oft auch ungünstig für An- und Ablieferung im Verkehrsfluss gebaut sind. Weiterhin liegt es nach Analyse der Beteiligten auch nicht im Interesse der gewerblichen Logistiker, ihre Ware weit verteilt über die Stadt abgestellt zu bekommen. Vielmehr haben beispielsweise alle befragten Paketdienstleister klar zentrale Umschlagplätze pro 2-3km-Radius in der Stadt als Wunsch, um von dort aus zentral gesteuert und flexibel Gerät und Personal zur Verteilung einsetzen zu können. Die Fahrtstrecken per Lastenrad zwischen einem zentralen Umschlagpunkt und dem aktuellen Verteilareal ist im Vergleich zur Zustellzeit so weit zu

vernachlässigen, dass sich eine dezentrale Abstimmung mit dem entsprechenden Verwaltungsaufwand dahinter für gewerbliche Logistiker nicht lohnt.

Zur Abrundung des Logistikkonzepts wurde eine Struktur der Prozesse nach Art der Verkehre und der Beladung aufgebaut. Diese Strukturierung der Prozesse ermöglicht eine grobe Abschätzung im Zuge der strategischen Transportplanung, welche Art des Einsatzes einer Gütertram als betriebswirtschaftlich sinnvoll in Frage kommen könnte. Aufbauend darauf wurden auch noch alternative Anwendungskonzepte entwickelt, beispielsweise die so genannte Hofladentram und Alternativen für den schienenbasierten Transport von Wechselbehältern in den urbanen Raum. Die Nutzung einer Gütertram für Kleinkunden war ebenfalls abrundendes Thema.

Das Logistikkonzept wird flankiert von einem Planungskonzept und einem Betreiberkonzept. Durch die Komplexität und Vielfältigkeit der Verantwortungsbereiche innerhalb des Betriebes einer Gütertram ist die Kooperation innerhalb des Betreibermodells ein essenzieller Bestandteil. Sowohl Regularien in den verschiedenen Bereichen als auch das Zusammenspiel der Aufgabengebiete bedingen die Notwendigkeit einer sauberen Kommunikation. Diese spiegelt sich nicht nur in systemischen Schnittstellen wider, sondern bedeutet gegebenenfalls auch den Austausch interner Daten zwischen den Partnern der Betreibergesellschaft. Gleichzeitig müssen Aufgaben und Zuständigkeiten klar abgegrenzt werden, um nicht in zeitlichen Verzug zu kommen, doppelte Arbeit zu machen oder gar auf verschiedenen Grundlagen aufzubauen. Ergebnis einer Vergleichsanalyse ist, dass das kooperative Betreibermodell am zielführendsten zu sein scheint. Dabei wird der Bahnbetreiber, in diesem Fall das Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) und Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) AVG, auch als Konzessionsgeber einordnet. Für genauere Erläuterungen wird auf das eigene Dokument „Betreiberkonzept“ verwiesen. Die endgültige Ausprägung des Betreibermodells und des Planungsmodells muss sich im Laufe des Umsetzungsprojekts klären, welches im Detail die Umgebung eines operativen Gütertram-Betriebs aufbauen wird. Das vorliegende Betreiberkonzept und das strategisch angelegte Planungskonzept haben aber bereits den Lösungshorizont gespannt, in welchem sich die operative Umsetzung schließlich bewegen kann.

2.1.2 AP2: Anforderungsanalyse

In AP2 erfolgte die Analyse und technische Detaillierung der Use Cases und Geschäftsmodelle aus AP1 zur Ableitung von Anforderungen und zur Definition von Gütekriterien. Hierzu wurden Use Cases konkretisiert, der Systemkontext identifiziert und Funktionsmodule abgeleitet (Abbildung 2-5).

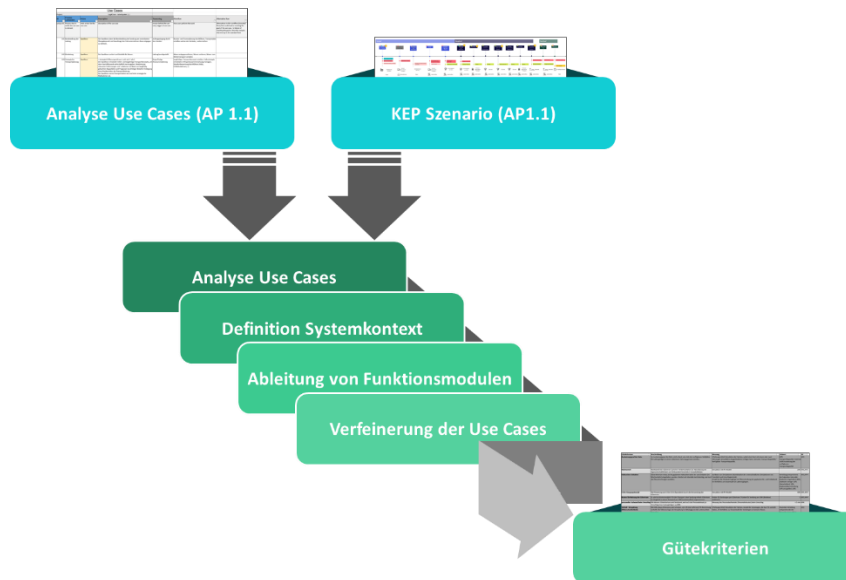


Abbildung 2-5: Vorgehensmodell zur Bearbeitung von Arbeitspaket 2

Analyse und Verfeinerung der Use Cases

Während der Verfeinerung der Use Cases wurden die grundlegenden Genese Use Cases aus AP1.1 (s. Kapitel 2.1.1) berücksichtigt und weiter ausgearbeitet. In der nachfolgenden Beschreibung dieser Ergebnisse wird nicht ins Detail gegangen, sondern es wird vereinfachend ein Fokus auf die in der Breite gepflegten und erfassten Attribute gelegt und das Muster zur Beschreibung der Use Cases erläutert. Die Vorlage zur Verfeinerung der Use Cases sowie eine Beschreibung der Attribute ist in Tabelle 2.1.1 enthalten.

Tabelle 2.1.1: Muster für die Beschreibung von Use Cases

<< Use Case ID >> - <<Use Case Name >>	
Kurzbeschreibung	Beschreibung des Use Cases
Auslöser	Grund für bzw. Auslöser für den Use Cases
Akteur	Hauptakteur / Stakeholder des Use Cases
Vorbedingungen	Bedingungen, die vor Beginn des Use Cases erfüllt sein müssen
Workflow	Beschreibung der Arbeitsschritte, mit denen der Hauptakteur / Stakeholder die Arbeit zur Erfüllung des Use Cases durchführt
Alt. Workflow	Alternativen zum Standardablauf, die zum Erreichen des Ziels des Use Cases oder zum Scheitern des Ziels führen können oder Varianten beschreiben, die in den Standardablauf münden.
Komponente	Welche funktionalen Komponenten der LogIKTram Plattform unterstützen den Use Case?
Datenaustausch	Welche Daten werden über die funktionale Komponente ausgetauscht (sowohl ein- als auch ausgehende Daten)?
Verbindungen	Use Cases, mit Beziehungen zu diesem Use Case

Im Zuge der Use Case Analyse wurden die Use Cases untersucht und geprüft, inwiefern eine Verfeinerung der jeweiligen Use Cases im Hinblick auf die Ausgestaltung des Prozesses erforderlich ist. Aufgrund der engen Abstimmung zwischen AP1 und AP2 mussten jedoch nur wenige Use Cases verfeinert werden. Eine Übersicht der Use Cases samt Verfeinerung für die in relevanten Stakeholder wird in Abbildung 2-6 dargestellt.

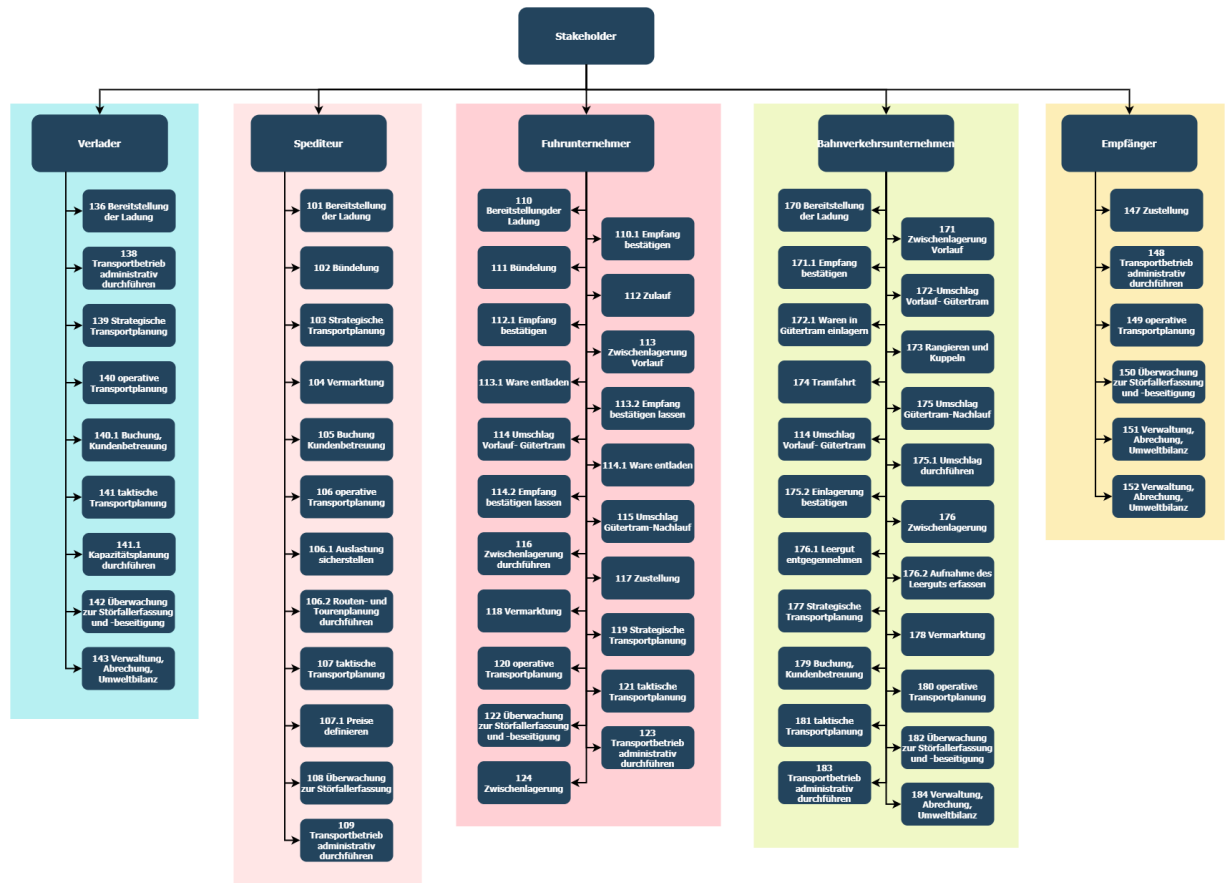


Abbildung 2-6: Use Case Übersicht

Ableitung von Anforderungen – funktionale Komponenten der IKT Plattform in LogIKTram

Während die Use Cases im Wesentlichen die Unternehmensebene adressieren (Geschäftsmodell sowie den zugrundeliegenden Geschäfts-/ Logistikprozess), legte AP2 den Fokus auf die Systemebene, d.h. den Systemkontext, die Komponenten der IKT-Plattform sowie dem Flow in LogIKTram.

Ableitung des Systemkontextes

Der LogIKTram Systemkontext ist in Abbildung 2-7 dargestellt. Kernbestandteil des LogIKTram Systems stellen sowohl die zu entwickelnde IKT-Plattform als auch bestehende für den geplanten Funktionsumfang zu erweiternde Bestandsysteme wie Planungswerkzeuge, das Intermodal Transport Control System (ITCS) und Tram Onboard Units (bspw. CoPilot) dar.

Zum näheren Systemkontext zählen zum einen Transportmanagement Systeme (TMS) der Spediteure als auch Enterprise Ressource Planning (ERP) Systeme und TMS der Verladender. Die

Funktionen in diesen Systemen zählen nicht zum Kernbestandteil der LogIKTram-Plattform, sind jedoch für die Erprobung ausgewählter Szenarien und bedingt durch die Partnerstruktur (keine geförderten Partner mit TMS/ERP) im Rahmen des Projekts umzusetzen oder zu synthetisieren. Dies gilt im Besonderen für Schnittstellen zur LogIKTram-Plattform zur Beauftragung von Transportdienstleistungen sowie Statusupdates.

Der in Abbildung 2-7 dargestellte erweiterte Systemkontext umfasst weitere Komponenten und Systeme, die in Abhängigkeit vom gewählten Szenario weitere Schnittstellen erforderlich machen und Anforderungen an die LogIKTram Plattform induzieren können.

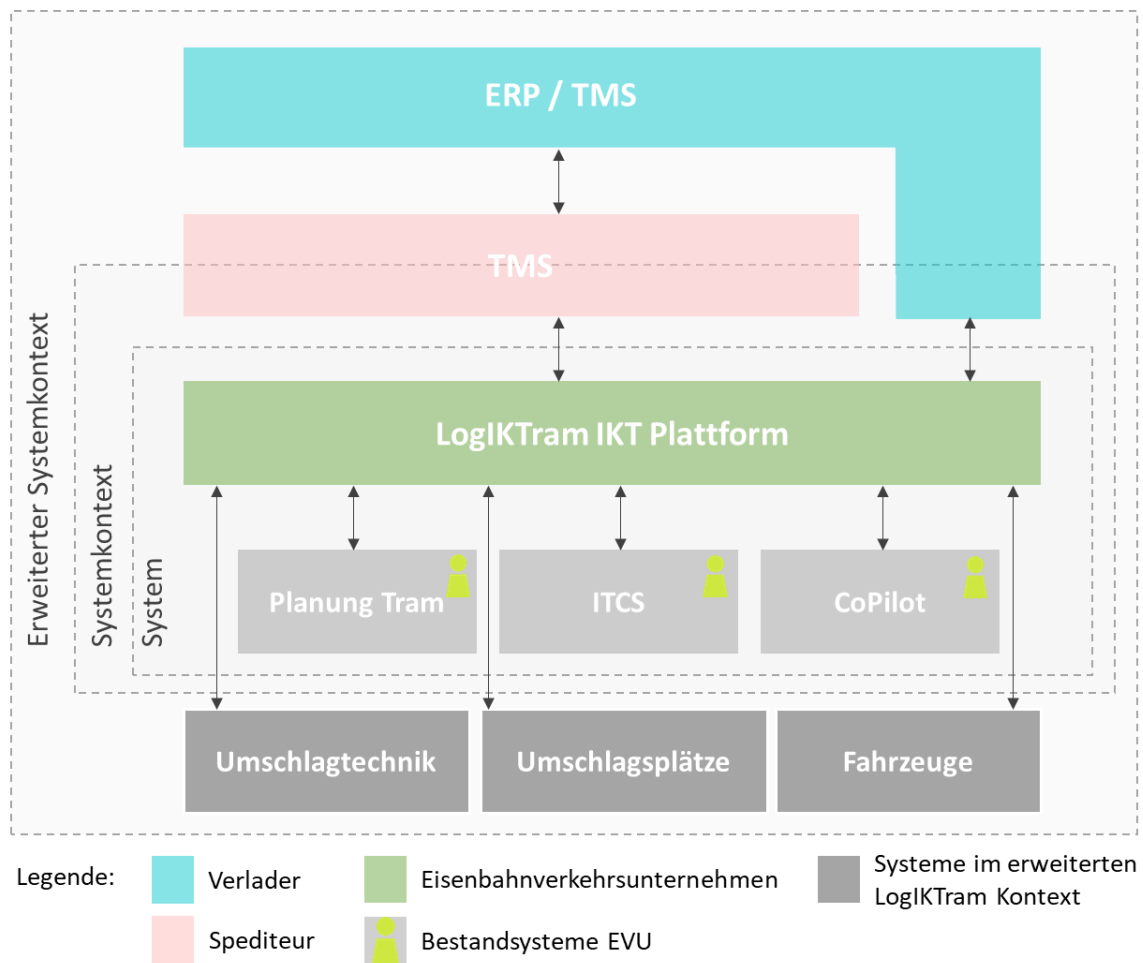


Abbildung 2-7: LogIKTram Systemkontext

LogIKTram IKT Plattform – Funktionale Komponenten

Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden relevante funktionale Komponenten abgeleitet, die für die Umsetzung von LogIKTram erforderlich sind (Abbildung 2-8). Ergänzend wurde der Datenaustausch spezifiziert. Die Austauschformate orientieren sich dabei am Freightwise Framework¹⁶.

¹⁶ <https://cordis.europa.eu/project/id/20188>, <http://freightwise.tec-hh.net/>

Sowohl die funktionalen Komponenten sowie die Austauschformate wurden im Sinne der Nachverfolgbarkeit als Verfeinerung in die Use Case Beschreibungen übernommen. Zur Verfeinerung der Use Cases und Ableitung funktionaler Komponenten wurden die folgenden beiden Attribute „Komponente“ und „Datenaustausch“ neu hinzugenommen. Hiermit soll die Nachvollziehbarkeit und Nachverfolgbarkeit von Use Cases und funktionalen Komponenten Abbildung 2-8 unterstützt werden. Mit Hilfe des Attributs „Komponente“ wird erfasst, welche funktionale Komponente der LogIKTram-Plattform die Umsetzung des entsprechenden Use Cases unterstützen soll. Das Attribut „Datenaustausch“ erfasst, welche Daten mit Hilfe der funktionalen Komponenten ausgetauscht werden (sowohl ein- als auch ausgehende Daten). Ein Beispiel ist in Tabelle 2.1.2 dargestellt.

Tabelle 2.1.2: Beispiel Use Case Zwischenlagerung Vorlauf

171 - Zwischenlagerung Vorlauf	
Kurzbeschreibung	Das Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) lagert die Waren aus dem Zwischenlager aus und stellt sie für den Umschlag in die Gütertram bereit.
Auslöser	Keine synchrone Übergabe an Gütertram möglich
Akteur	Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU)
Vorbedingungen	-
Workflow	Ware auslagern, Lieferpapiere übernehmen, Empfang bestätigen
Alt. Workflow	Ware direkt vom Fuhrunternehmer übernehmen.
Komponente	1-3 Operative Planung
Datenaustausch	Transportauftrag (TSD) - Transportplan
Verbindungen	-

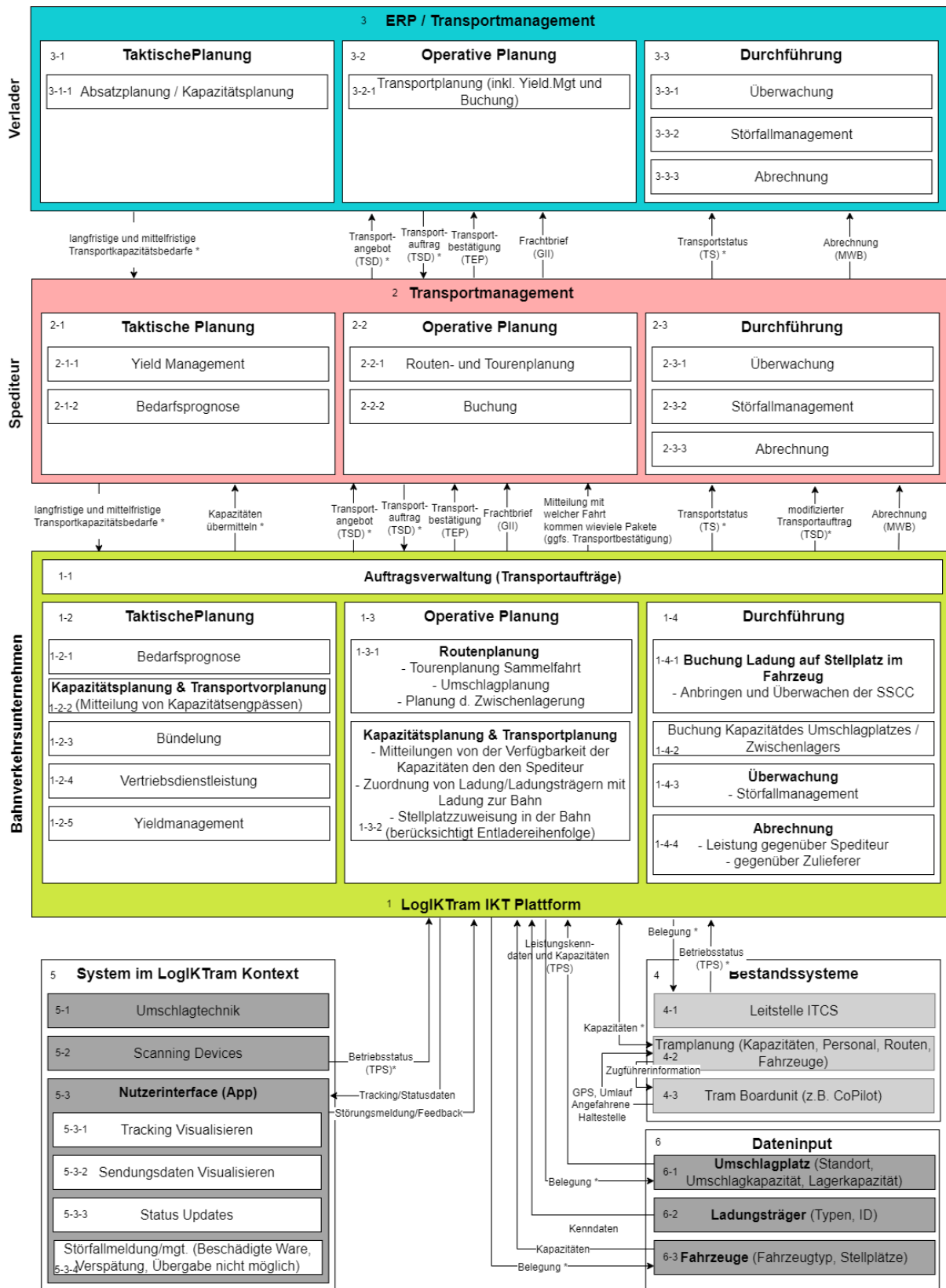


Abbildung 2-8: LogIKTram IKT Plattform – Funktionale Komponenten

LogIKTram Flow – Modellierung der Interaktion zwischen Spediteur und Bahnunternehmen

Der Flow in LogIKTram modelliert die Interaktion zwischen Spediteur und Eisenbahnverkehrsunternehmen. Hierbei werden die in Abbildung 2-8 aufgeführten funktionalen Komponenten in einem Prozessdiagramm dargestellt und dementsprechend eine logische Ablaufreihenfolge definiert. Hierbei kann zwischen drei Phasen unterschieden werden: taktische Planung, operative Planung sowie die Ausführungsphase. Exemplarisch wird im Folgenden das Prozessmodell der Ausführungsphase beschrieben:

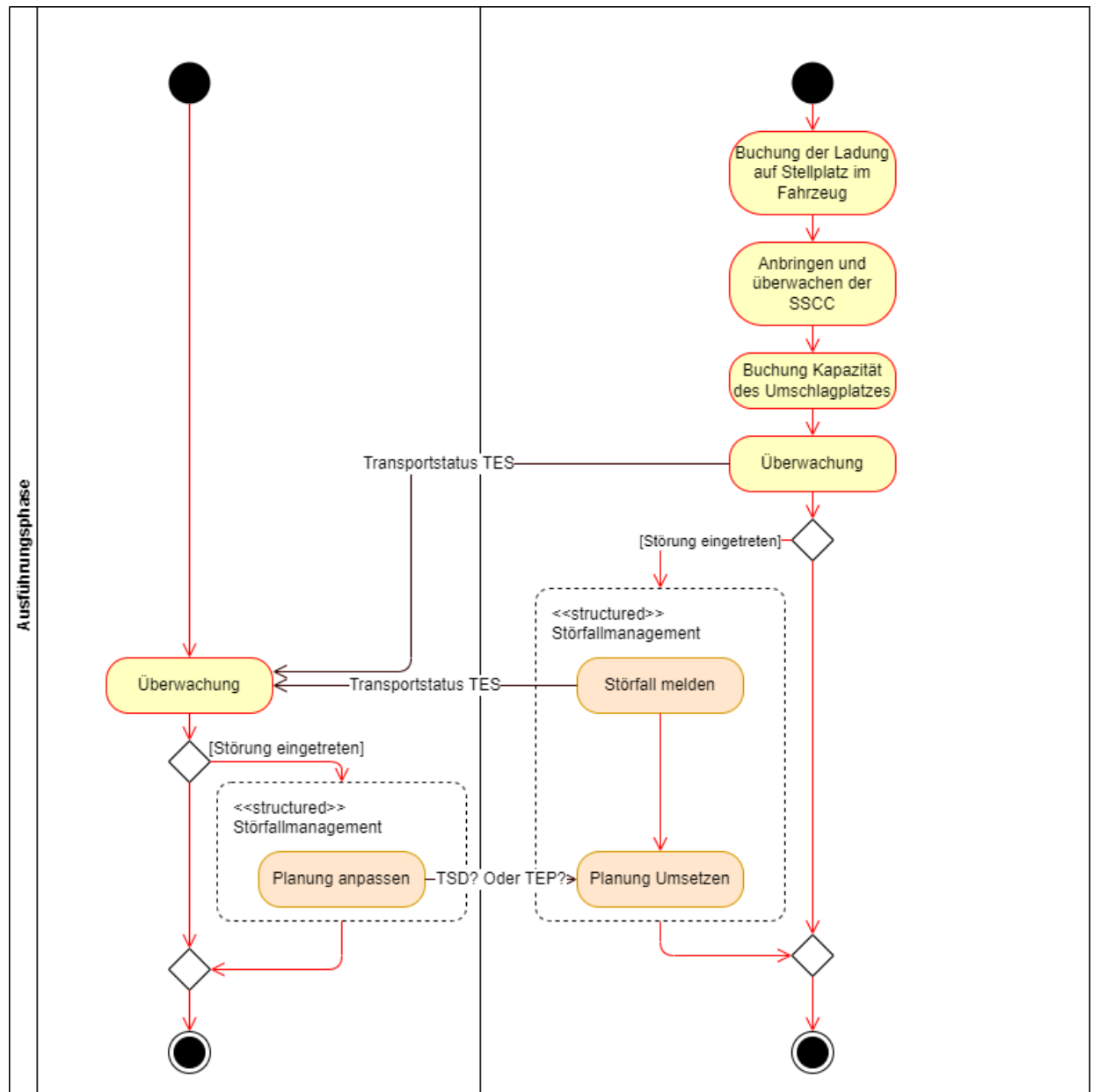


Abbildung 2-9: Durchführung

Nach der erfolgreich abgeschlossenen Planung beginnt die Ausführungsphase (Abbildung 2-9). Das Eisenbahnverkehrsunternehmen führt die Buchung der Ladungen auf die Stellplätze in

Fahrzeugen gemäß dem vorher definierten Plan durch. Um die Überwachung der Versandeinheiten zu ermöglichen, werden diese einzeln mit eindeutigen SSCC (Serial Shipping Container Code) versehen.

Im nächsten Schritt erfolgt die Buchung der Umschlagkapazitäten entsprechend dem operativen Plan des Eisenbahnverkehrsunternehmens sowie eine anschließende Überwachung des Transportvorgangs zwecks Störfallerfassung und -beseitigung. Das Eisenbahnverkehrsunternehmen steuert den Transportbetrieb der Gütertram und informiert den Spediteur über anfallende Störungen. Bei Störungen in seinem Verantwortungsbereich schlägt er dem Spediteur mögliche Lösungen vor. Zu den möglichen Störungen gehören z. B. Verzögerung der Fahrt durch eine ungeplante Umleitung oder Ausfall der Fahrt.

Der Spediteur überwacht seinerseits die Ausführung des Transportplans. Bei anfallenden Störungen entscheidet der Spediteur unter Einbeziehung der am Transport beteiligten Stakeholder (Führunternehmen sowie Eisenbahnverkehrsunternehmen) sowie der Transportkunden (Verlader), wie nach einem Störfall weiter verfahren wird. Im Falle einer notwendigen Planänderung wird das Eisenbahnverkehrsunternehmen entsprechend informiert.

Anforderungen Gütertram-Fahrzeug sowie Transportbehälterkonzept, Umschlagkonzept und Be- und Entladekonzept

Aus den Use Cases werden Anforderungen an das Gütertramfahrzeug, das Transportbehälterkonzept sowie das Umschlag- und Be- und Entladekonzept abgeleitet. Diese ergänzen und unterstreichen die bereits unabhängig davon festgelegten Anforderungen aus AP4.

Anforderungen Gütertramfahrzeug: Diese werden aus der BOStrab, der EBO, den Regelwerken der Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH (VBK) und der Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH (AVG) sowie einschlägigen Normen und anerkannten Regeln der Technik abgeleitet.

Da die Be- und Entladung im Stadtzentrum häufig eine größere Herausforderung darstellt, als das Be- oder Entladen an suburbanen oder ländlichen an das Schienennetz angebundenen Haltestellen, wird in der nachfolgenden Beschreibung der Fokus auf die Grundlagen nach BOStrab gelegt. Zusätzlich sind vergleichbare Anforderungen aus der EBO ebenfalls einzuhalten.

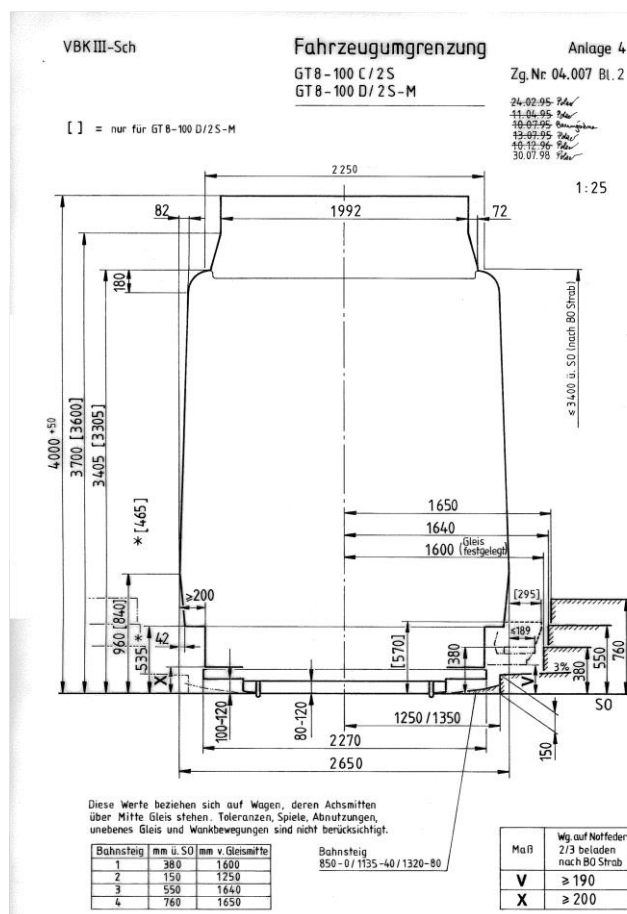
Die Größe und Form des Schienenfahrzeugs und damit direkt auch die Größe und Form der Ladungsfläche hängen von den jeweiligen Straßenbahnnetzen ab. Bei einer Neuentwicklung wird die Fahrzeugbegrenzungslinie aus dem Lichtraumprofil des Straßenbahnnetzes abgeleitet. Darüber hinaus muss noch das Lichtraumprofil der Vollbahnstrecken betrachtet werden. Relevant ist immer das restriktivere Lichtraumprofil. Für den Anwendungsfall Karlsruhe ist das restriktivere Lichtraumprofil das Lichtraumprofil der Straßenbahn.

In der BOStrab werden zusätzlich weitere Vorgaben bezüglich der Größe und der Masse des Fahrzeuges gemacht. Die Fahrzeugbreite darf hiernach maximal 2,65 m bis 3,4 m über Schie-

nenoberkante sein [2]. Beispielhaft ist in Abbildung 2-6 die Fahrzeugumgrenzung eines Fahrzeugs der Karlsruher Verkehrsbetriebe dargestellt. Hier sind die Einschränkungen in der Breite im unteren und oberen Bereich des Fahrzeugs deutlich zu erkennen.

Die lichte Höhe des Fahrgastraums muss laut BOStrab mindestens 1,95 m betragen.

Straßenbahnfahrzeuge sind als Hoch-, Mittel oder Niederflurfahrzeuge ausgeführt. Bei Niederflurfahrzeugen gibt es häufig zur Spaltüberbrückung, um einen ebenen Einstieg zu ermöglichen, ausfahrbare Trittstufen oder Rampen. Die Rampen haben meist eine Steigung von 6 bis 10 % (Fontanel et al., 2020). Zusätzlich kann der Boden direkt oberhalb der Räder noch weiter erhöht sein.



Die Zuladung des Fahrzeugs wird durch die maximale Achslast beschränkt. Diese beträgt bei Straßenbahnfahrzeugen je nach Netz zwischen 10 t und 11 t. Die NET 2012 Fahrzeuge in Karlsruhe haben eine Achslast von 10,5 t (Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH, 2022).

Eine Kommunikation der Fahrgäste mit dem Triebfahrzeugführer (TF) muss möglich sein. Dies kann entweder durch eine direkte Kommunikationsmöglichkeit am Führerstand des TF oder durch eine Sprechstelle gewährleistet werden. Der TF muss im Störfall aus seinem Führerstand innerhalb des Fahrzeugs bis an das andere Ende des Fahrzeuges laufen können. Das heißt, es muss innerhalb der Bahn immer ein Durchgang von mindestens 50 cm freigehalten werden.

Abbildung 2-10: Fahrzeugumgrenzung (AVG 2022)

Laut TSI PRM darf der Spalt zwischen dem Bahnsteig und der Türschwelle horizontal nicht mehr als 75 mm und vertikal nicht mehr als 50 mm betragen.

Zur Befestigung der Güter und deren Sicherung sind die Beschleunigungen während der Fahrt zu berücksichtigen. Aus den Verladerrichtlinien für den Schienenverkehr lassen sich die zu berücksichtigenden Beanspruchungen im Bahnverkehr ableiten. Sie werden in Abhängigkeit der Gewichtskraft F_G angegeben. Diese sind in Abbildung 2-7 dargestellt.

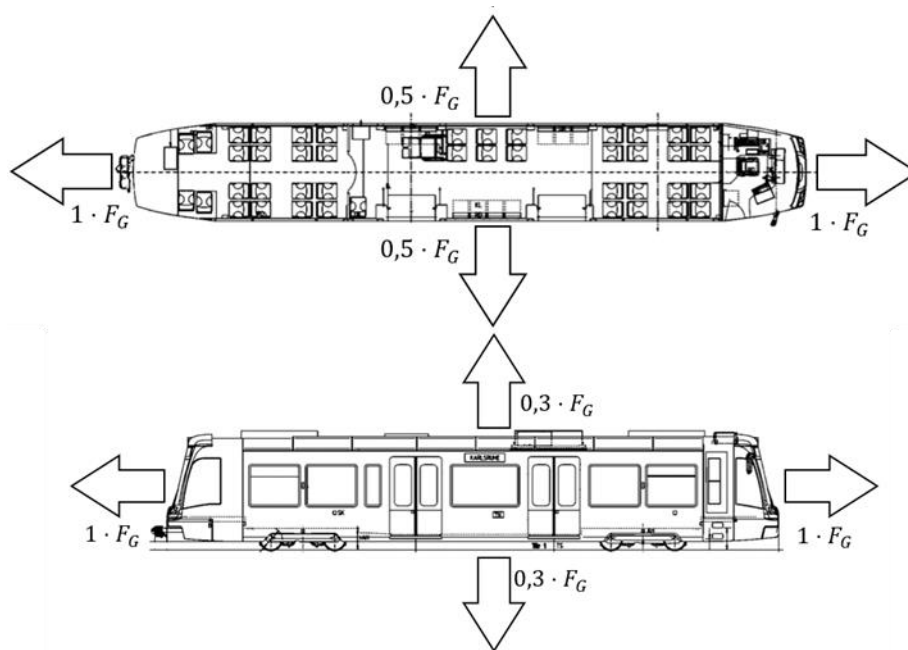


Abbildung 2-11: Beanspruchungen beim Bahntransport (TSI PRM, 2014)

Anforderungen Be- und Entladekonzept, Umschlagkonzept: Die Ladungshandhabung muss es ermöglichen, die Transportbehälter von den Bahnsteigen an einen vorgesehenen Platz innerhalb des Fahrzeugs zu bewegen. Das heißt, dass es auf die Masse der zu transportierenden Güter und das Fahrzeug ausgelegt werden muss.

Dabei müssen die Umschlagszeiten, die durch das Eisenbahnverkehrsunternehmen und somit dem Fahrplan vorgegeben werden, eingehalten werden.

Zusätzlich müssen die Waren unversehrt umgesetzt werden.

Das Konzept muss den in der BOStrab und EBO vorgeschriebenen Anforderungen genügen.

Die Ladungssicherung muss automatisch erfolgen und den in Tabelle 2.1.3 zusammengestellten Kräften standhalten.

Tabelle 2.1.3: Notwendige Kräfte zur Ladungssicherung

	Wert	Mit Sicherheitsfaktor
Erdbeschleunigung in m/s^2	9,81	
Masse NÜWIEL E-Trailer in kg	210	
Gewichtskraft in N	2060,1	
Ladungssicherungskraft Längs in N	2060,1	4120,2
Ladungssicherungskraft Quer in N	1030,05	2060,1
Ladungssicherungskraft Vertikal in N	618,03	1236,06

Anforderungen Transportbehälter: Als Transportbehälter sollen standardisierte Gefäße genutzt werden. Sie müssen mit dem Ladungshandhabungs- und Sicherungssystem kompatibel sein.

Anforderungen an Haltestellen- und Linienauswahl

Für die Integration des Logistikprozesses in den Betriebsablauf des Bahnverkehrs wurden darüber hinaus mehrere Anforderungen und Rahmenbedingungen definiert. Dabei handelt es sich vornehmlich um Kriterien zur Auswahl von Haltestellen und Linien für den kombinierten Personen- und Warentransport. Eingangswert dieser Kriterien waren Workshops mit den Fachexpert*innen der VBK und AVG sowie dem Betriebsleiter BOStrab der VBK und AVG sowie dem EBL der AVG. Darüber hinaus wurden Daten zur Analyse der Fahrgastzahlen und -auslastungen zur Verfügung gestellt. Bei den zur Verfügung gestellten Daten handelt es sich um Daten aus dem automatischen Fahrgastzählsystem (AFZS-Daten) für das gesamte Jahr 2023.

Die in Tabelle 2.1.4 aufgeführten Kriterien für die Auswahl der Haltestellen wurden im Workshop im Juni 2023 definiert. Die Kriterien können dabei zunächst in die drei Kategorien „universelle Kriterien“, „Kriterien für regionale Zugangspunkte“ und „Kriterien für innerstädtische Endladepunkte“ unterschieden werden. Während universelle Kriterien zur Auswahl von allen Umschlagplätzen, unabhängig von Örtlichkeit und Belade- oder Entladevorgang anzuwenden sind, sind die weiteren Kriterien gem. des Namens ihrer Kategorisierung entweder nur für die Auswahl von Belade- oder Entladehaltepunkten anzuwenden. Zusätzlich werden die Kriterien gem. ihrer Dringlichkeit in die drei Kategorien „dauerhaft“, „aktuell“ und „optional“ unterschieden. Während dauerhafte Kriterien langfristig unabhängig von technischen und betrieblichen Entwicklungen anzuwenden sind, haben die aktuellen Kriterien lediglich zum heutigen Zeitpunkt eine Bedeutung. Die aktuellen Kriterien könnten demnach mit einer technologischen Weiterentwicklung und einer Optimierung der rechtlichen und betrieblichen Rahmenbedingungen hinfällig werden. Optionale Kriterien könnten sich auf die Umsetzbarkeit des kombinierten Personen- und Warentransports positiv auswirken, sind jedoch nicht zwingend anzuwenden.

Neben Kriterien für die Auswahl von Haltestellen wurden zudem Kriterien für die Auswahl geeigneter Linien und Fahrplanfahrten für den kombinierten Personen- und Warentransport definiert. Nach Bereitstellung der AFZS-Daten und einer ersten Analyse durch die Projektpartner fand hierzu im Dezember 2023 ein weiterer Abstimmungstermin statt. Bei diesem empfahl die AVG zur Auswahl von Linien und Fahrplanfahrten die in Tabelle 2.1.5 aufgelisteten Schwellenwerte.

Die „konservativen Schwellenwerte“ definieren hiermit im Sinne eines Szenariotrichters die minimal anzunehmende Anzahl an Linien und Fahrten, bei welchen die Umsetzbarkeit des kombinierten Personen- und Warentransports aus betrieblichen Gesichtspunkten anzunehmen ist. Die „optimistischen Schwellenwerte“ definieren hingegen die maximal anzunehmende Anzahl.

Tabelle 2.1.4: Kriterien für die Auswahl der Haltestellen

Universelle Kriterien	dauerhaft	aktuell	optional
Stufenfreiheit ins Fahrzeug und zur Haltestelle (Spaltbreite und Höhendifferenz max. 5 cm)	X		
Abwesenheit von Umlauf- und Drängelgeländern an der Haltestelle	X		
Ausreichende Platzbedarfe für konfliktfreie Interaktion von Personen und Waren auf dem Bahnsteig und während des Ein-/Aussteigevorgangs (Bahnsteiglänge und -breite)	X		
Anschluss zu anderen Verkehrsträgern im Haltestellenumfeld (z.B. Straße, Fahrrad)	X		
Freie räumliche Kapazitäten im Umfeld der Haltestelle zur Sicherung des Ladungsträgers (Depot)	X		
Verlängerte Haltemöglichkeit (z.B. Wendeschleife)			X
Keine Gleisquerung bei der (teil-) automatisierten Belade- und Entladung		X	
Kriterien für regionale Zugangspunkte			
Prozentual verlagerter Wegeanteil von Verteilzentrum zu Stadtzentrum > 50 %	X		
Kriterien für innerstädtische Endladepunkte			
Nähe zu Wohnbebauung mit hoher Einwohnerdichte (< 5 km)		X	
Keine Tunnelhaltestelle		X	
Haltestelle entlang Linie mit Nähe zu regionalem Verteilzentrum		X	

Tabelle 2.1.5: Kriterien für die Auswahl der Linien

Kriterium	konservativer Schwellenwert	Optimistische Schwellenwert
Sitzplatzauslastung an Belade-Haltestellen	30 %	50 %
Sitzplatzauslastung während der Fahrt	50 %	80 %
Sitzplatzauslastung an Entlade-Haltestellen	40 %	60 %
Fahrgastströme an Belade-Haltestellen	8 Ein-/Aussteigende Pers.	15 Ein-/Aussteigende Pers.
Fahrgastströme an Entlade-Haltestellen	8 Ein-/Aussteigende Pers.	15 Ein-/Aussteigende Pers.

Grund für die Definition zweier Schwellenwerte ist, dass die AFZS-Daten keine Rückschlüsse über die Belegung von Multifunktionsbereichen oder über den Aufenthalt von Fahrgästen in Türbereichen zulassen und somit keine einzelne Zahl benannt werden kann. Es gibt hierzu vereinzelte Werte aus der Literatur zum Anteil von Personen mit Gehhilfen, Rollstühlen, Kinderwagen o.ä., diese beziehen sich jedoch auf alle ÖPNV-Fahrgäste und nicht nur auf die Fahrgäste in Stadt- oder Straßenbahnen. Darüber hinaus sind diese Erhebungen teilweise stark veraltet und daher nicht ohne weiteres anwendbar.

Die Unterscheidung nach Belade-, Entladehaltestelle und während der Fahrt, ist aus Sicht der AVG notwendig, da mit steigender Sitzplatzauslastung die Wahrscheinlichkeit zunimmt, dass sich Personen im Multifunktions- oder Türbereich befinden. An Beladehaltestelle ist eine hohe Sitzplatzauslastung kritischer als während der Fahrt zu bewerten, da im Falle eines bereits infolge hoher Auslastung besetzten Multifunktionsbereichs die Beladung verhindert wird. In einer bereits beladenen Bahn gibt es jedoch noch Platz für neu einsteigende Fahrgäste, daher kann der Schwellenwert zur maximalen Sitzplatzauslastung während der Fahrt höher angesetzt werden als bei der Beladung.

Zudem muss an Belade- und Entladehaltestellen die Anzahl der ein- und aussteigenden Fahrgäste berücksichtigt werden. Denn eine hohe Zahl an Personenbewegungen erhöht auch das Konfliktpotenzial mit dem Lastenradanhänger und könnte die Belade- und Entladevorgänge verhindern.

Gütekriterien zur Bewertung von LogIKTram

Im Rahmen von AP2.3 wurden Gütekriterien für die Konzepte und ihre Umsetzung im Projekt definiert. Die verfeinerten Use Cases aus AP2.1 sowie der aktuelle Stand des Logistikkonzepts wurden herangezogen, um mögliche Kriterien zur Bewertung der Umsetzungen in den AP3 und AP4 zu identifizieren und anschließend zu spezifizieren. Die Gütekriterien wurden im Rahmen von Workshops ausgearbeitet und abgestimmt. Hierbei wurde im Besonderen darauf geachtet, dass es sich bei den Gütekriterien, um messbare Kriterien handelt. Soweit dies zum entsprechenden Zeitpunkt (August 2021) bereits möglich war, wurden die Gütekriterien mit realistischen Zielwerten versehen und ausformuliert (siehe Tabelle 2.1.4). Die Gütekriterien wurden darüber hinaus Arbeitspaketen zugeordnet, die entsprechende Beiträge zur Zielerreichung aufweisen. Eine Übersicht der spezifizierten Gütekriterien ist in Abbildung 2-12 dargestellt, Tabelle 2.1.4 hingegen beinhaltet 2 Beispiele für entsprechende Gütekriterien.



Abbildung 2-12: Übersicht der LogIKTram Gütekriterien

Tabelle 2.1.6: Auswahl von Gütekriterien

Gütekriterium	Auslastungsgrad der Bahn	Personeller Aufwand beim Umschlag
Beschreibung	Im Auslastungsgrad der Bahn wird erfasst, wie viele der verfügbaren Stellplätze für Ladungsträger in einem Gütertram-Fahrzeug genutzt werden.	Mit diesem Gütekriterium wird bestimmt, wie hoch der Personaleinsatz je Umschlag eines Ladungsträgers ausfällt.
Messung	Erhebung mittels Simulation der Fahrten, wobei eine Fahrt mit einem oder zwei Fahrzeugen (Einzelfahrt, Doppeltraktion) erfolgen kann. Genutzte Transportkapazität / Verfügbare Transportkapazität.	Messung des Personalaufwandes (Personalminuten) beim Umschlag
Zielwert	60% Transportkapazität: maximal 100% Auslastung der verfügbaren Transportkapazität	< 5 min
AP	AP3	AP4

2.1.3 AP3: IKT-Plattform

Das Arbeitspaket AP3 befasst sich mit der Konzeption und Entwicklung einer integrierten IKT-Plattform für die Erbringung von Logistikdiensten mit Fahrzeugen des ÖPNV. Diese soll im ersten Schritt konzipiert und dann prototypisch entwickelt werden, welche die erforderliche Funktionalität für eine Transport Management Software (TMS) bereitstellt, um die Szenarien für eine Gütertram-Logistik zu erproben (s. AP 1 und AP 4). Das Konzept soll alle erforderlichen Komponenten und Schnittstellen identifizieren und in diesem Sinne als Referenzarchitektur agieren. Der Informationsaustausch zwischen den beteiligten Akteuren erfolgt in den Prozessschritten Planung und Buchung, Transportdurchführung sowie Abrechnung und Analyse. Neben der prototypischen Implementierung der IKT-Plattform ist ein weiteres Ergebnis ein Dokument "Technische Anforderungen an eine integrierte IKT-Plattform für Logistikdienste im ÖPNV", das Anforderungen aus AP 2 in Bezug auf die IKT-Plattform weiter spezifiziert. Dieses Dokument wurde im Rahmen vom Meilenstein M2 bereitgestellt. Das technische Spezifikationsdokument beinhaltet auch ein Architekturdiagramm, dass die projektinternen und –externen Systemkomponenten sowie die Datenflüsse zwischen den einzelnen Systemkomponenten darstellt (Arbeitsschritt AP3.1). Das Endergebnis des Arbeitspakets AP3 ist schlussendlich ein für die Demonstration (AP 6) geeigneter, getesteter Prototyp der IKT-Plattform als Teil des vollintegrierten Gesamtsystems „logIKTram“.

Dabei interagiert die IKT-Plattform eng mit den Systemkomponenten des Tram-Systems sowie dem Ladungsträger (AP4). Abbildung 2-13 zeigt die Integration und Abgrenzung der IKT-Plattform im Gesamtprozess von „logIKTram“.

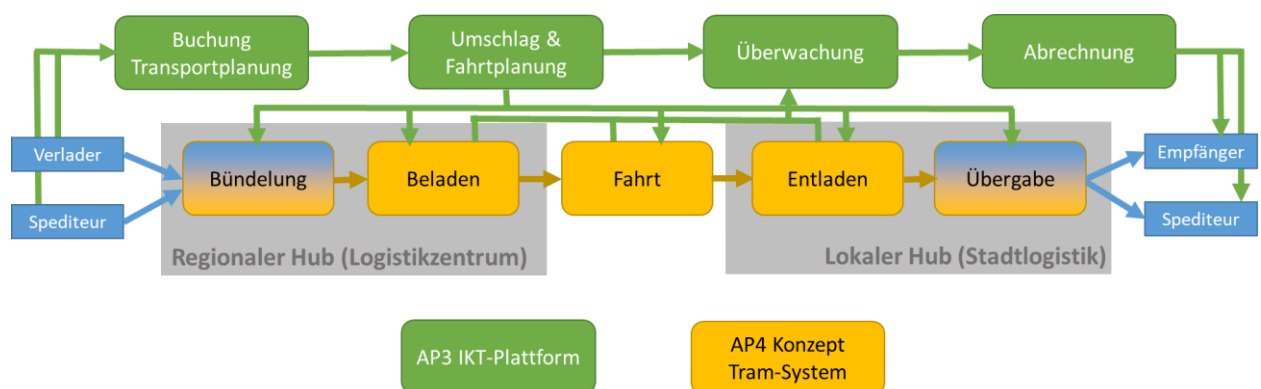


Abbildung 2-13: Integration und Abgrenzung der IKT-Plattform.

Die IKT-Plattform beheimatet und integriert Systemkomponenten zur Buchung und Transportplanung, zum Umschlag und Fahrtplanung, zur Überwachung der Gütertram Prozesse sowie zur Abrechnung der Transportdienstleistung. Gleichzeitig interagiert die Plattform mit dem Tram-System AP4 wie dem Beladen, der Fahrt und dem Entladen der Gütertram. Die Bündelung, sowie die Übergabe an die Transportdienstleister im Zulauf und Ablauf werden nicht in der IKT-Plattform integriert und nur externe Schnittstellen bereitgestellt.

Als Basis der IKT Plattform dient ein Message Queue Telemetry Transport (MQTT) Broker, der es ermöglicht die verschiedenen domainfremden Systeme zu integrieren. Um eine Skalierbarkeit des Systems zu erreichen wurde, wenn möglich folgende Standards benutzt:

- Kommunikationsstandards des VDV (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen) und der General Transit Feed Specification (GTFS¹⁷) für Fahrplan (GTFS, VDV452), Soll- und Echtzeitdaten (VDV452¹⁸, VDV435¹⁹) aus dem ÖV-Betrieb
- IBIS-IP²⁰ Kommunikationsschnittstelle zur Kommunikation der einzelnen Systemkomponenten innerhalb des Fahrzeugs (IKT-Plattform, Bordrechner, Ladungsträger (AP4, Tram-Systemsteuerung (AP4) sowie der Bremsassistent (AP4))
- Electronic Data Interchange for Administration, Commerce and Transport (EDIFACT)²¹, Global Standards (GS1²²) als Austauschformat zwischen den Logistikkomponenten, den Trackingkomponenten, der Simulation und dem ÖV-Betrieb.

Das Herzstück der IKT-Plattform ist der MQTT-Broker, der als zentrale Datenaustauschkomponente fungiert. Alle Komponenten der Plattform können über definierte Topic-Strukturen Daten auf dem Broker veröffentlichen und gleichzeitig Daten abonnieren. Dies ermöglicht Zugriff auf Daten aller Systemkomponenten. Als MQTT-Broker wird im Projekt VerneMQ²³, dass als Open-Source-Software (Apache 2.0-Lizenz) vertrieben wird, verwendet. Dieses Lizenzmodell ermöglicht eine Nutzung über gesamten Lebenszyklus der IKT-Plattformen von der Forschung bis zum späteren kommerziellen Einsatz im Produktivsystem.

Die Anforderungen der Logistik, die eine Planungssicherheit von 24-48 Stunden erfordern, wurden mit Hilfe von Fahrplandaten in den VDV 452 - und GTFS-Standards umgesetzt. Dies ermöglicht eine Planungssicherheit von mehreren Tagen sowie kurzfristige und aktuelle Änderungen anstehender Planungsmaßnahmen, die eine Neuplanung der Logistikleistung erforderlich machen können. Neben den Soll-Fahrplandaten werden aus dem ÖV-Leitsystem Echtzeitdaten im Format VDV 435 bereitgestellt, die neben den Ist-Fahrplandaten auch aktuelle Verzögerungen sowie GNSS-Daten beinhalten. Dies wird im Logistikprozess berücksichtigt, um Speditionen und Last-Mile-Betreibern Echtzeitinformationen bereitzustellen. Die integrierte IKT-Plattform umfasst Elemente aus den Bereichen Logistik (Backend), ÖPNV-Betrieb (ITCS, Bordrechner, Planung

¹⁷ <https://gtfs.org/de/>

¹⁸ <https://www.vdv.de/oepnv-datenmodell.aspx>

¹⁹ <https://www.vdv.de/453v2.3.2-sds.pdf.pdf>

²⁰ <https://www.vdv.de/vdv-301-1-ibis-ip-teil-1-systemarchitektur.pdf>

²¹ <https://www.gs1-germany.de/edifact/#:~:text=EDIFACT%20bedeutet%20Electronic%20Data%20Interchange,als%20ISO%20Norm%209735%20gesch%C3%BCtzt.>

²² <https://ref.gs1.org/ai/00>

²³ <https://vernemq.com/>

und Auswertung), Tracking (Back- und Frontend, Apps), Simulation (Simulation und Digitaler Zwilling) sowie den Ladungsträger und dem System der Güterstraßenbahn. (siehe Abbildung 2-14).

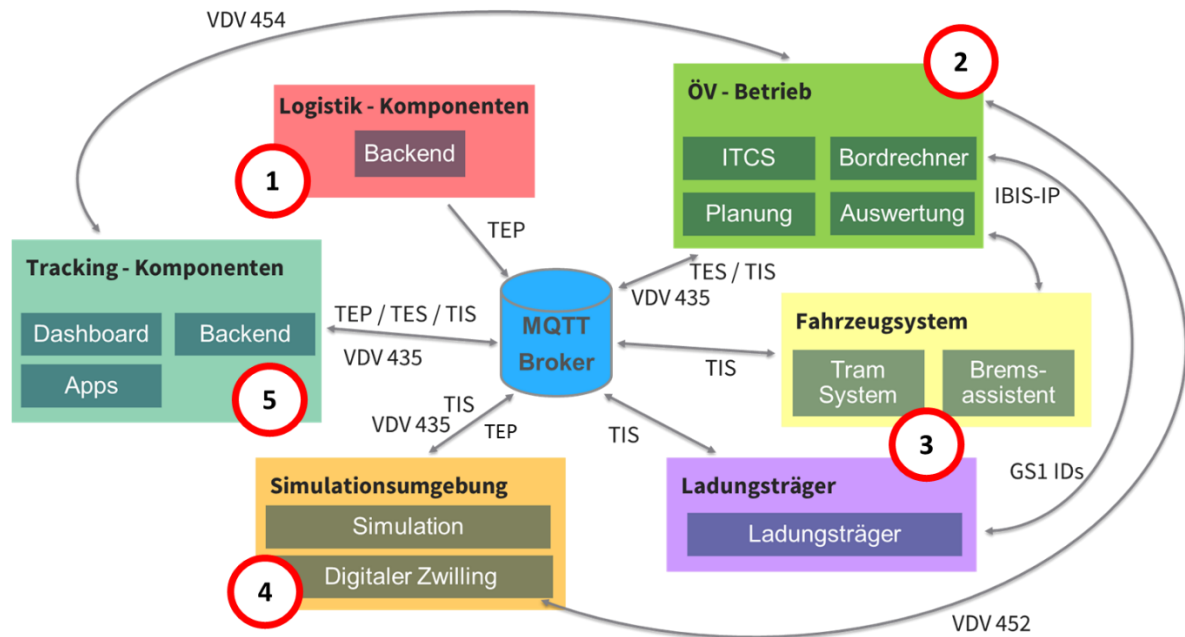


Abbildung 2-14: Die Systemkomponenten der IKT-Plattform bestehend aus Logistik (1), ÖV-Betrieb (2), Fahrzeugsystem und Ladungsträger aus AP4 (3), Simulationsumgebung (3) und den Tracking-Komponenten (5).

Im Folgenden werden die einzelnen Systemkomponenten beschrieben:

Logistik Systemkomponenten:

1) Buchungssystem der IKT-Plattform

Das Buchungssystem der MARLO Consultants GmbH dient dazu, ein Transportangebot für einen bestimmten Transportbedarf auszuhandeln. Dazu kann der Spediteur seine bestehende IT-Umgebung nutzen, um wie bei einer Webanwendung eine Buchung ohne manuelle Eingaben vorzunehmen. Für ein realitätsnahes Integrationsszenario hat die Hochschule Offenburg (HSO) im Projekt die Rolle eines Kunden (Spediteurs) übernommen und prototypisch benötigte Funktionalitäten eines Transportmanagementsystems (TMS) implementiert. Insbesondere wurden hierbei realitätsnahe Transportaufträge erzeugt und die Kommunikation zwischen TMS und Buchungssystem durchgeführt.

Im Rahmen von LogIKTram wurde im Buchungssystem nur der vom Bahntransportdienstleister angebotene Transportabschnitt der Güterstraßenbahn (der sogenannte Hauptlauf) berücksichtigt. In der späteren Praxis ist es jedoch wichtig, dass eine direkte Vergleichbarkeit mit konkurrierenden Transportangeboten, insbesondere mit dem Lkw, gegeben ist und der Transportdisponent dies ebenso einfach handhaben kann. Daher wurden durch die HSO vereinfachte Softwaremodule für die Planung des Vor- und Nachlaufs prototypisch umgesetzt.

Um die Systeme der Spediteure mit dem Buchungssystem der IKT-Plattform zu verbinden, werden über eine API Transportangebote aus dem Buchungssystem der IKT-Plattform für den individuellen Transportbedarf der Spediteure gebucht. Dies ermöglicht eine automatisierte Verhandlung von Transportangeboten für eine große Anzahl von Transportanforderungen, wodurch manuelle Eingriffe auf ein Minimum reduziert werden. Zu diesem Zweck werden zwei verschiedene Datentypen, die Transportanfrage (Transport Request) und das Transportangebot (Transport Offer), als Nachricht zwischen der IKT-Plattform und dem Spediteur ausgetauscht. Die Transportanfrage wird vom Spediteur erstellt, um ein konkretes Transportangebot (Transport Offer) für den Hauptlauf mit der Güterbahn zu erhalten, wenn der Spediteur seinerseits einen Transportauftrag vom Verloader erhält. Dazu nutzt der Spediteur die von der IKT-Plattform bereitgestellte Transport Service Description, welche die angebotenen Transportdienstleistungen beschreibt. Die Transportanfrage enthält alle Informationen über die Güter, die gewünschten Start- und Zielhaltestellen, die entsprechenden Zeitfenster für die Anlieferung und Abholung der Güter sowie die Transportdurchführung (insbes. die gebuchte Tramfahrt). Das Transport Offer wird von der IKT-Plattform an den Spediteur als Antwort auf eine Transportanfrage übermittelt und beinhaltet alle notwendigen Angaben zu Beschreibung der angebotenen Leistungen für die konkrete Transportanfrage. Im Transportdurchführungsplans (TEP - Transport Execution Plan²⁴) wird dann die konkrete Durchführung des Transports zwischen Spediteur und IKT-Plattform vereinbart. Dieser Transport kann über einen Transport Execution Status verfolgt werden.

Das Hauptproblem bei der Konzeption des Buchungssystems war die Diskrepanz in der Granularität der Daten. Die digitale Darstellung der Transportabwicklung muss viel präziser sein als nur der Name der Haltestelle bzw. des Bahnhofs, der vom Spediteur angegeben wird. Um einen bestimmten Haltepunkt an einem Bahnsteig (Halt einer Tram an einer Bahnsteigkante) an einer Haltestelle bzw. einem Bahnhof richtig ansprechen zu können, muss das Buchungssystem die Fahrtrichtung ermitteln und sie mit dem entsprechenden Haltepunkt an einem Bahnsteig abgleichen.

Für die Erstellung von Transportanfragen und des TEP war es notwendig, sich auf die zu berücksichtigenden Daten zu einigen, da nicht der volle Umfang an verfügbaren Datenfeldern benötigt wurde. Bei der weiteren Kommerzialisierung der Lösung muss diese an die Anforderungen des Industriesektors, für den sie eingesetzt werden soll, sowie an verkehrsträgerspezifische Daten, die aus Sicherheits- oder Effizienzgründen erforderlich sein können, angepasst bzw. ausgebaut werden.

²⁴ <https://cordis.europa.eu/project/id/20188>, <http://freightwise.tec-hh.net/>

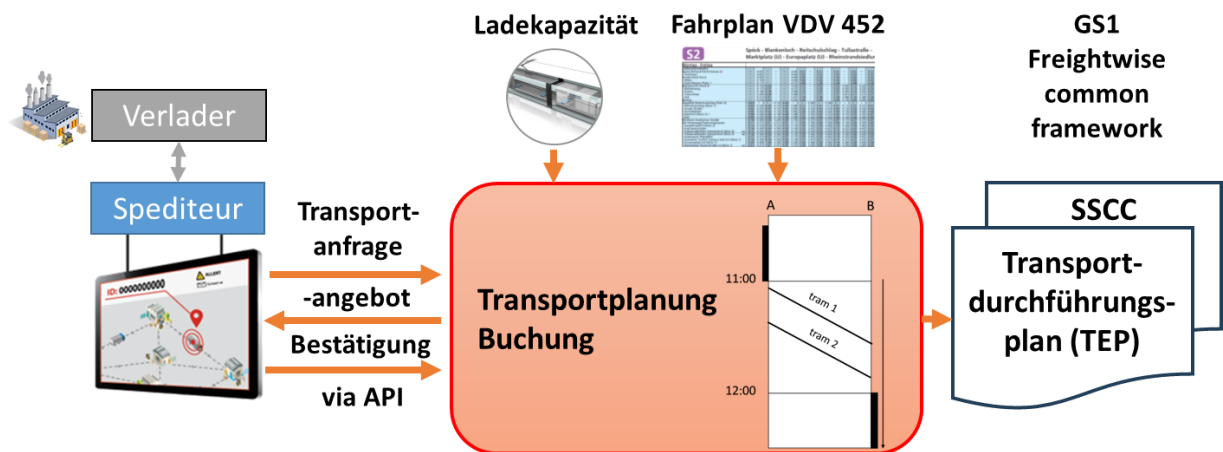


Abbildung 2-15: Vernetzung und Prozesse des Buchungsmoduls (MARLO Consultants GmbH)

Der Austausch von Nachrichten erfordert ein gemeinsames, zwischen den Parteien vereinbartes Format. LogIKTram hat sich auf die Verwendung eines gemeinsamen Rahmens von Daten geeinigt, der bis zu einem gewissen Grad standardisiert ist. Für die Fahrpläne wurde der Standard VDV 452 im Import genutzt. Die Ladekapazität ist je nach Typ des Straßenbahnfahrzeuges festgelegt. Für die Identifizierung der Sendung wurde der weltweit einzigartige und von GS1 verwaltete sog. Application Identifier (Datenbezeichner) SSCC (Serial Shipping Container Code²⁵) verwendet. Um die Kompatibilität von Datenformaten zu gewährleisten, die zwischen vielen Partnern ausgetauscht werden und hierfür das TEP-Datenformat für verschiedene Zwecke im weiteren Verlauf der Transportdurchführung nach der Buchung verwenden, wurde ein spezielles Format vereinbart. Dieses ist nicht vollständig standardisiert, aber muss vollständig spezifiziert werden, sobald es kommerziell genutzt wird und von einer Reihe von Partnern für die API-Entwicklung verwendet werden soll.

Die Buchungsplattform kann eigenständig betrieben werden. Die TMS-Funktionalitäten der HSO können naturgemäß nur in Verbindung mit der Buchungsplattform betrieben werden. Wesentliche Elemente wurden daher in einen von der IKT-Plattform unabhängigen Demonstrator überführt.

2) ÖV-Systemkomponenten: Integration in den ÖV-Betrieb

Die ÖV-Systemkomponenten beschreiben alle Teilsysteme die zwischen dem ÖV-Betrieb und der IKT-Plattform sowie mit den weiteren Systemkomponenten der Plattform agieren. Die ÖV-Komponenten beschreiben sowohl reine Softwarelösungen wie das Intermodal Transport Control System (ITCS) (Leitstellensoftware, MOBILE-ITCS), die ÖV-Planungssoftware sowie die Auswertung der Betriebsdaten mittels der Statistik Softwarelösung (MOBILEstatistics) als auch physische Komponenten in der Gütertram wie dem Bordrechner (COPILOTpc3), das Bedienteil (TOU-

²⁵ <https://ref.gs1.org/ai/00>

CHit3), als auch das Fahrzeugsteuerungssystem (bereitgestellt von HITACHI RAIL) und die Ladungsträgereinheit (bereitgestellt durch KIT-FAST). Dabei ist die Hauptfunktion der ÖV-Komponenten die Kommunikation zwischen den einzelnen IKT-Plattform-Komponenten und dem Fahrzeugsystem der Tram sowie der ÖV-Leitstelle und dem ÖV-Planungssystem durch standardisierten Datenaustausch und der Bereitstellung von Schnittstellen (Abbildung 2-16).

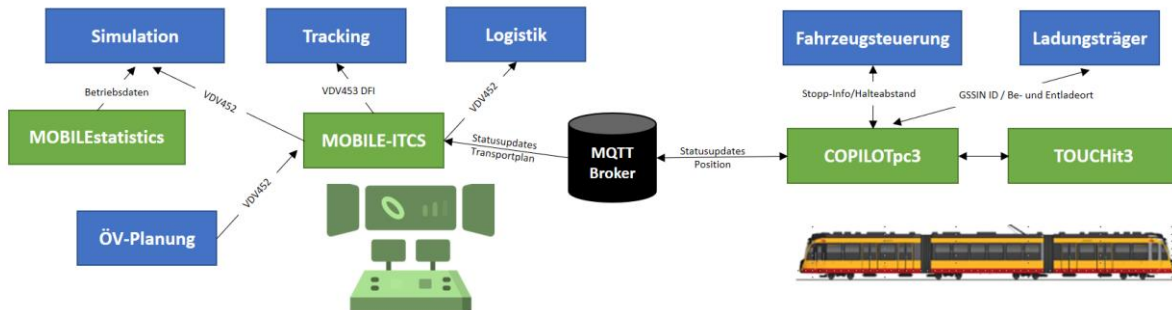


Abbildung 2-16: ÖV-Systemkomponenten Integration in der IKT-Plattform

Die ÖV-Komponenten ermöglichen die Planung, Disposition und Terminierung des ÖPNV sowie die Echtzeit-Positionierung und Statusaktualisierungen für alle Komponenten der IKT-Plattform. Die Datenbereitstellung erfolgt über den MQTT-Broker, mit Ausnahme der Planungsdaten und der Echtzeit-Statusaktualisierungen. Diese werden direkt über APIs in den Formaten VDV 452 und GTFS (Planung) und VDV 453 DFI (Echtzeitdaten) von der Planungssoftware und aus dem ITCS übertragen. Die Informationen der Logistikkomponenten über die Lieferungen und das Routing (Transport Execution Status (TES) und Transport Information Status (TIS)) werden von den ÖPNV-Komponenten direkt über den MQTT-Broker konsumiert. Des Weiteren erfolgt die Datenkommunikation zwischen der IKT-Plattform und dem Fahrzeug ebenso direkt über den MQTT-Broker. Dabei werden die Statusupdates, die von den IKT-Logistik- und Tracking Komponenten bereitgestellt werden (TIS und TES) konsumiert und an den Bordrechner (COPILOTpc3) weitergeleitet. Diese Informationen werden dann fahrzeugseitig aufbereitet und Informationen über die Haltepunkte (Be- und Entladung) an die Fahrzeugsteuerung und den Bremsassistenten (bereitgestellt durch HITACHI RAIL und KIT-FAST) sowie den Ladungsträger (bereitgestellt durch KIT-FAST) weitergeleitet und auf dem Bordrechnerbedienteil (TOUCHit3) dem Fahrzeugführer visuell angezeigt (Abbildung 2-17). Gleichzeitig werden Aktualisierungen zur Lieferung sowie Positionsupdates vom Bordrechner (COPILOTpc3) auf dem MQTT-Broker bereitgestellt und können von allen relevanten Systemen der IKT-Plattform konsumiert und weiterverarbeitet werden. Auf der Seite der Leitstelle werden Informationen zum Be- und Entladestatus, der Halteselle sowie Informationen über den Transportplan bereitgestellt. Die Bereitstellung erfolgt direkt über den MQTT-Broker mittels den TIS- und TES-Statusevents. Abbildung 2-18 zeigt die Integration der Lieferung in den verschiedenen Ansichten im ITCS. Für den Disponenten in der Leitselle ist es möglich die Paketlieferung und den Status auf dem jeweiligen Umlauf als Kartenansicht visuell (als

Farbwert und als Symbol auf dem Fahrzeug hervorgehoben) (1), als auch in der Verspätungsüberwachung (2) anzeigen zu lassen. Desweiteren kann der Disponent die Umlaufplanung und die Fahrzeugdisposition nach Umlauf und Fahrzeug für LogIKTram einsehen (3).

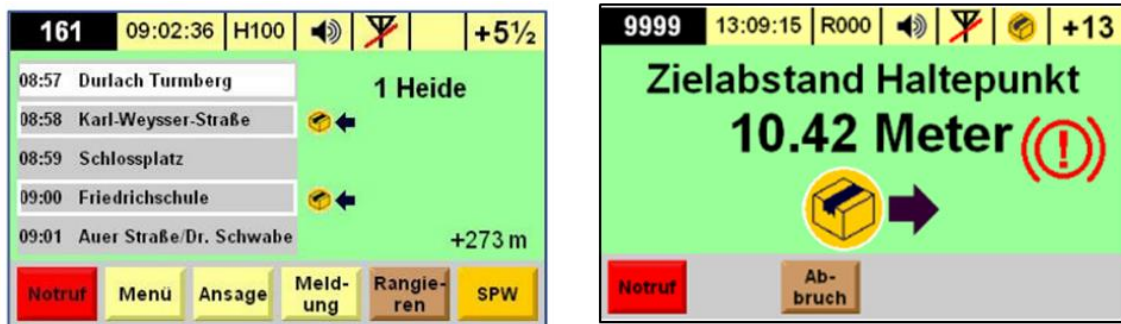


Abbildung 2-17: Visualisierung des Status der Ladung, der Be- und Entladehaltestelle (links) sowie Informationen über den Bremsassistenten (rechts)

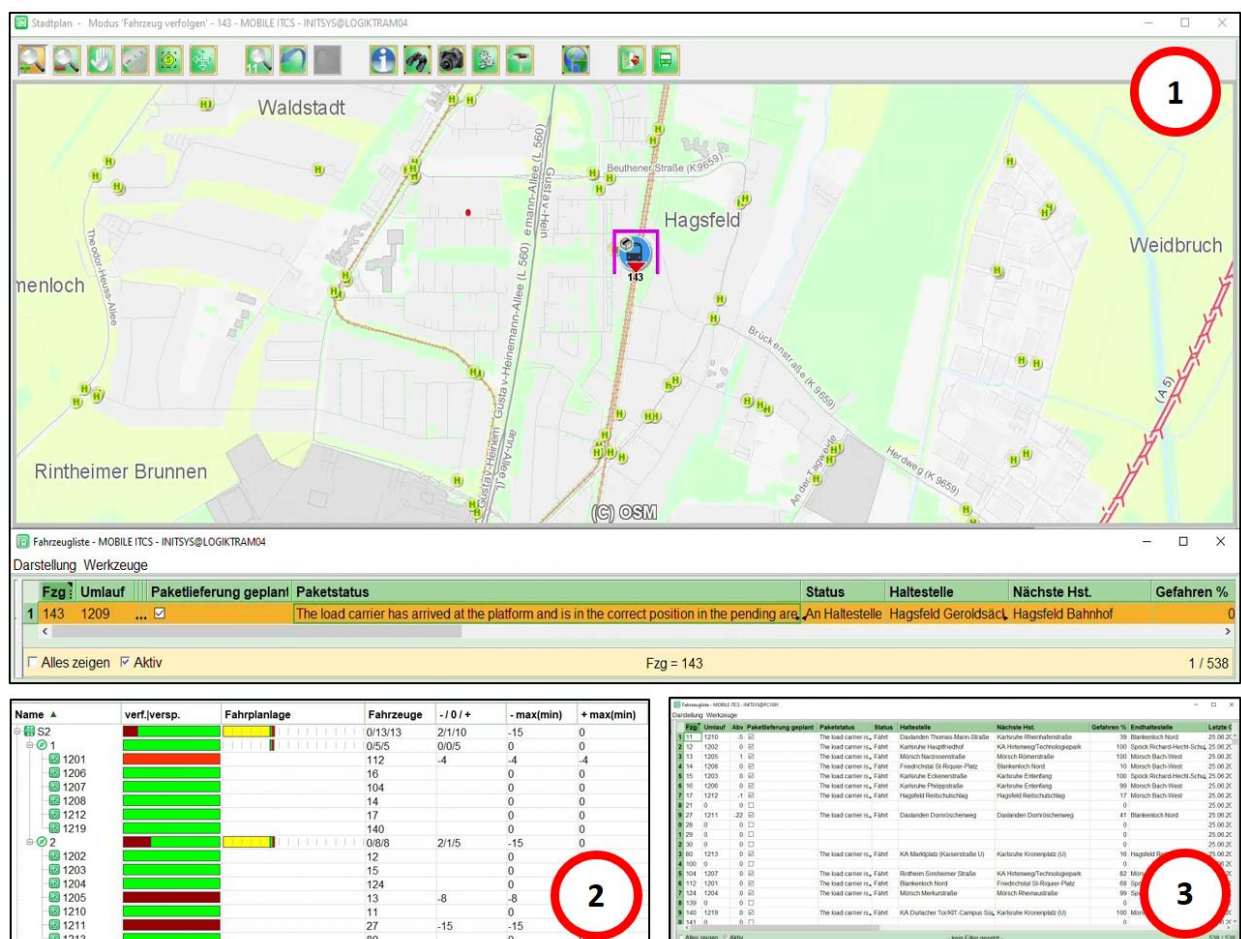


Abbildung 2-18: Integration der Paketlieferung in der Leitstellensoftware MOBILE-ITCS als Kartenansicht (1), als Echtzeitinformation und Verspätungsüberwachung (2) und als Umlaufplan in der Disposition (3).

3) Fahrzeugsystem und Ladungsträger (Integration der externen Komponenten aus AP4)

Die Integration mit den Komponenten des Fahrzeugsystems sowie mit dem Ladungsträger erfolgte in enger Abstimmung mit AP4 und den Projektpartnern HITACHI RAIL, KIT-FAST und AVG. Der Ladungsträger, die Fahrzeugsteuerungssysteme und der Bremsassistent werden

detailliert in AP4 vorgestellt. In AP3 liegt der Fokus auf der Integration und dem Datenaustausch mit der IKT-Plattform. Abbildung 2-19 veranschaulicht die Interaktion der IKT-Plattform mit dem Fahrzeugsystem. Die Datenübertragung zwischen der IKT-Plattform und dem Fahrzeug erfolgt mittels dem Mobilfunkstandard 5G. Alle relevanten Informationen zum Ladestatus der Paketlieferung sowie der Be- und Entladestellen werden über den MQTT-Broker an den Bordrechner übergeben und für den Triebfahrzeugführer (TF) auf dem Bedienteil TOUCHit3 visuell dargestellt. Desweiteren löst die Information über die nächste Be- und Entladestation den Halteassistenten aus der auf dem Bedienteil TOUCHit3 dargestellt wird. So ist es für den TF jederzeit möglich alle Informationen aus LogIKTram einzusehen und zu überwachen.



Abbildung 2-19: Integration der Informationen aus der IKT-Plattform sowie dem Ladungsträger und des Tramsystems auf dem Bordrechner COPILOTpc3 und dem Bedienteil (TOUCHit3)

4) Simulationsumgebung: Virtuelle Inbetriebnahme und Digitaler Zwilling

Basierend auf dem Simulationstool Anylogic wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches den gesamten schienengebundenen Stadtverkehr im Bereich der Stadt Karlsruhe als Digitalen Zwilling eines kombinierten Verkehrs von Personen und Gütern abbildet. Der Abbildungsumfang beinhaltet neben dem Digitalen Zwillingen der Trams und denen der Trailer auch alle Haltestellen des reinen Personenverkehrs sowie die Haltestellen, die zusätzlich zum Personenverkehr als Be-, Entlade- und Umladestationen der Trailer verwendet werden. Das Modell ist so strukturiert, dass durch Einlesen der Fahrpläne alle Linien und Haltestellen automatisch generiert werden, so dass die Flexibilität gegenüber Fahrplanänderungen oder Linienveränderungen jederzeit gegeben ist. Die Trams werden während eines Experimentlaufs auf Basis der Fahrpläne erzeugt und anhand der Fahrplanvorgaben gestartet. Die Fahrzeiten zwischen zwei Stationen sowie die Haltezeiten an Haltestationen wurden durch umfangreiche Analysen historischer Daten ermittelt. So sind im Modell die Zeiten jeweils als Histogramm mit Schwankungen um den Mittelwert hinterlegt. Für jede Zeitstunde wurde ein separates Histogramm ermittelt, um die Stochastik im System, z.B. durch die Rushhour und damit verursachte Verspätungen, abbilden zu können. Jeder Trailer wird, wie auch jede Tram, im Modell einzeln abgebildet, sobald ein Logistikauftrag vorliegt. Die Logistikaufträge werden dem Digitalen Zwilling entweder direkt von der IKT-Plattform oder aber über

eine separate Auftragsliste übermittelt. Die Anzahl der zu transportierenden Trailer und die Vorgaben, durch welche Linie von und zu welchen Haltestellen die Transporte erfolgen sollen, wird ausschließlich durch die übermittelten Logistikaufträge vorgegeben. Im Digitalen Zwilling gibt es keine Einschränkungen. Die Abbildung der Trams und Trailer umfasst neben allen Bewegungen auch die Prozessschritte der Trams und Trailer wie z.B. „Bereit zum Laden oder Entladen des Trailers“ oder aber „Starten des Be- oder Entladevorgangs“ der Tram mit dem Trailer. Zum „echten“ Digitalen Zwilling wird das Simulationsmodell durch Kopplung mit dem MQTT-Broker der IKT-Plattform. Über die entwickelte Schnittstelle können Informationen gesendet und empfangen werden. Implementiert sind TEP-Telegramme zur Übermittlung der Logistikaufträge an den Digitalen Zwilling, TIS-Telegramme zur Übermittlung von Statusmeldungen, z.B. „Loading Process Started“, der Trams und Trailer an die IKT-Plattform sowie Telegramme zur Meldung der Tram-Positionsangaben durch den Digitalen Zwilling an die Plattform (auf Basis VDV 435).

Das Simulationsmodell wurde so entwickelt, dass es über eine GUI entweder als Digitaler Zwilling zur virtuellen Inbetriebnahme oder als Tool zur Konzeptüberprüfung genutzt werden kann. Im Betriebsmodus „Virtuelle Inbetriebnahme“ läuft der Digitale Zwilling in Echtzeit und emuliert für die IKT-Plattform die Trams und Trailer, indem er alle notwendigen Telegramme wie Transportaufträge entgegennimmt, den Trailer-Transport und die Tram im Simulationsmodell startet und an die IKT-Plattform alle Telegramme versendet, die auch der physikalische Trailer bzw. die physikalische Tram versenden würde. Da die IKT-Plattform nicht zwischen physikalischen Trailer bzw. Tram und deren Digitalen Zwilling unterscheiden kann, lassen sich alle Telegramme auf Richtigkeit überprüfen und es kann sichergestellt werden, dass der Prozessablauf in der Plattform funktioniert.

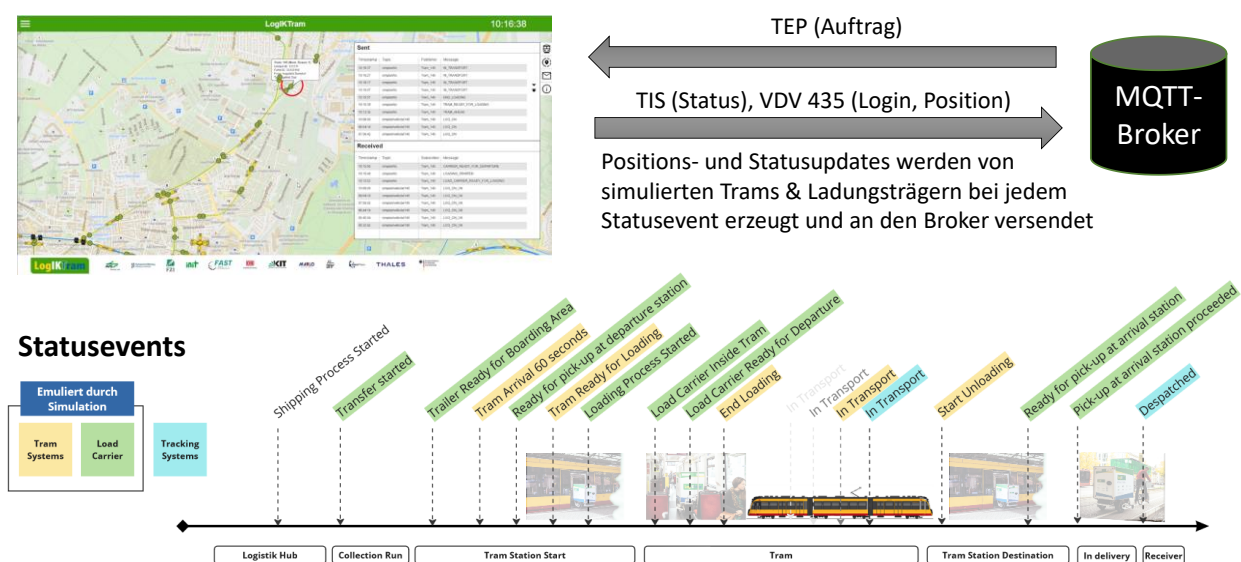


Abbildung 2-20: Betriebsmodus Virtuelle Inbetriebnahme des Digitalen Zwillings

Im Betriebsmodus „Simulation“ können beliebig viele Logistikaufträge verarbeitet werden. Dies umfasst sowohl die Anzahl geplanter Trailer-Transporte sowie die Linien, die Transporte ausführen sollen. Zudem können beliebige Be- und Entladehaltestellen je Linie vorgegeben werden. Daher ermöglicht der Betriebsmodus „Simulation“ Untersuchungen unter Last, um das Konzept grundsätzlich bewerten zu können sowie die mögliche Logistiktransportleistung quantifizieren zu können. Es werden beispielsweise Statistiken über die Anzahl transportierter Trailer je Linie über die Zeit oder der Flächenbedarf für die Trailer je Haltestelle gemessen.

5) Tracking Komponenten

Als Grundlage für die Umsetzung der LogIKTram-Trackingkomponente wurde zunächst ein Feinkonzept entwickelt und die grundlegenden Technologien für die Umsetzung ausgewählt. Eine Übersicht über die einzelnen Komponenten im Trackingbackend zeigt Abbildung 2-21.

Das LogIKTram-Trackingbackend ist eine Spring-basierte Anwendung. Sie bietet REST-Services, um Tracking-Informationen für die Tracking-App und andere Projektpartner bereitzustellen. Es gibt zusätzliche Endpunkte für das Frontend, um sich für Benachrichtigungen zu registrieren und Benutzer zu verwalten.

Um diese Tracking-Informationen zu sammeln, abonniert die Anwendung einen Broker, über den die Projektpartner die benötigten Statusinformationen veröffentlichen. Diese Informationen werden dann vom Backend verarbeitet und in einer Datenbank (DB) gespeichert. Zusätzlich werden vervollständigte Status-Nachrichten an den Broker zurückgeschickt. Das Frontend kann über das Backend auf diese Daten zugreifen und sie anzeigen. Bei Verspätungen wird das Frontend benachrichtigt. Um Informationen über Verspätungen und Routen zu erhalten, kann die VDV 454-Schnittstelle des ITCS abgefragt werden.

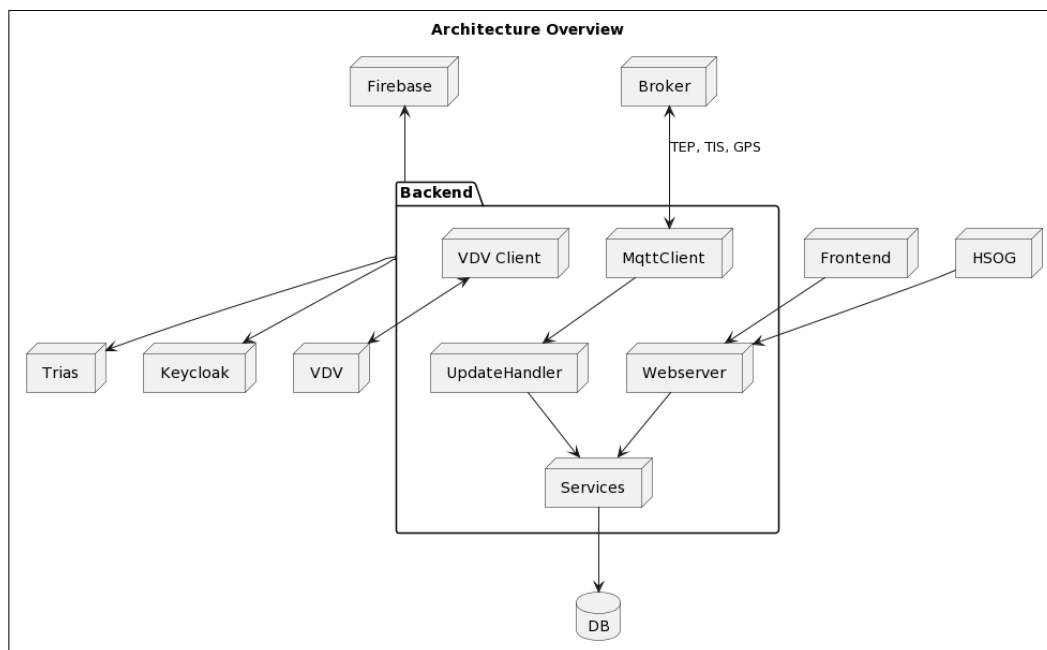


Abbildung 2-21: Architekturdiagramm des LogIKTram-Tracking-Backends

Tabelle 2.1.7: Übersicht und Beschreibung der Komponenten im Tracking-Backend

Komponente	Beschreibung
Update Handlers	<p>Das Backend abonniert einen MQTT-Broker, um TEP-, TIS- und GPS-Informationen zu erhalten und vollständige TIS zurück an den Broker zu senden. Es existiert ein Handler für jeden Informationstyp:</p> <p>TEP Update Handler: Erstellt ein TrackedTransportItem (TTI) für jedes in der TEP definierte Transportelement und füllt es mit den bereitgestellten Informationen. Die Komponente erzeugt die geplanten Zustände jedes Transportabschnitts für jedes Transportelement.</p> <p>TIS Update Handler: Die Komponente erzeugt einen TransportItem-Status aus den bereitgestellten Informationen und speichert ihn in der entsprechenden Transportposition und dem Transportabschnitt. Darüber hinaus erzeugt sie ein TransportItemStatus Event und veröffentlicht es auf dem Broker.</p> <p>GPS Update Handler: Lokalisiert ein Transportfahrzeug mit einer GPS-Position und speichert sie in der DB.</p>
Services	<p>Das Backend nutzt einige Dienstklassen, die verschiedene Funktionen bereitstellen.</p> <p>Firebase Messaging Service: Bietet dem Backend die Möglichkeit, eine Benachrichtigung an einen bestimmten Benutzer zu senden.</p> <p>Mapping Service: Setzt unterschiedliche Datensätze miteinander in Beziehung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Benutzer und Firebase-Token des Benutzers • Benutzer und ein Transportelement • Fahrzeug und Position <p>Tracked Transport Item Service: Verwaltung von Tracked Transport Items (TTIs)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hinzufügen neuer TTIs • Suche nach bestimmten TTIs anhand einer Bedingung
Keycloak	Der Keycloak-Dienst wird zur Authentifizierung der Benutzer verwendet. Die Benutzer des Backends müssen über den Dienst ein Zugangstoken beziehen.
Firebase	Firebase wird verwendet, um Benachrichtigungen an das Frontend zu senden. Alle wesentlichen Einstellungen werden dort verwaltet.
Trias	Die Trias-Schnittstelle wird verwendet, um die Polylinie einer Route zu ermitteln.
VDV	Über die VDV-Schnittstellen werden Informationen zu Fahrzeugen, Fahrplänen und Verspätungen abgerufen.

Neben den Backendkomponenten wurden ebenfalls Demonstratoren für die Benutzerschnittstelle umgesetzt, die als Referenzimplementierung dienen. Die Multiplattform-fähige Anwendung ist in der Lage, mehrere Sendungen zu verwalten, für eine Feinverteilung zuzuweisen und den aktuellen Status einer Sendung im Backend abzurufen und anzuzeigen. Abbildung 2-22 zeigt beispielhafte Screenshots aus der mobilen Anwendung für eine fiktive Sendung. Neben einer Übersicht über aktuell zugewiesene Sendungen ist es möglich die Eventhistorie einzusehen oder die Live Position einer Sendung zu verfolgen.

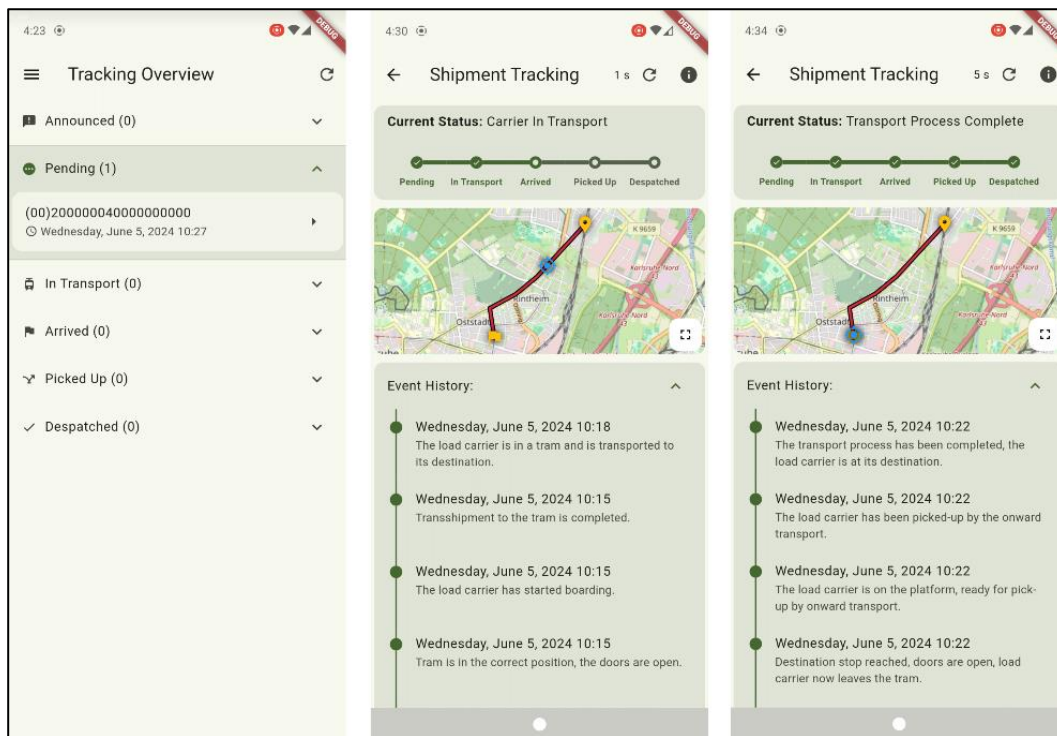


Abbildung 2-22: Übersicht der einzelnen Sendungen gruppiert nach Kategorien (links), Live Tracking - in Transport (mitte) und Status einer abgeschlossenen Sendung (rechts)

2.1.4 AP4: Konzept Gütertram-System

Im Rahmen des AP4 erfolgte zunächst die Ausarbeitung eines Konzepts eines auf einem Zwei-System-Stadtbahnwagen basierenden Verlade- und Fahrzeugsystems zum gemischten Transport von Personen und Gütern. Als Ausgangsfahrzeug diente ein von der AVG zur Verfügung gestelltes, symmetrisch aufgebautes Zweirichtungsfahrzeug der Baureihe GT8-100C/2S.

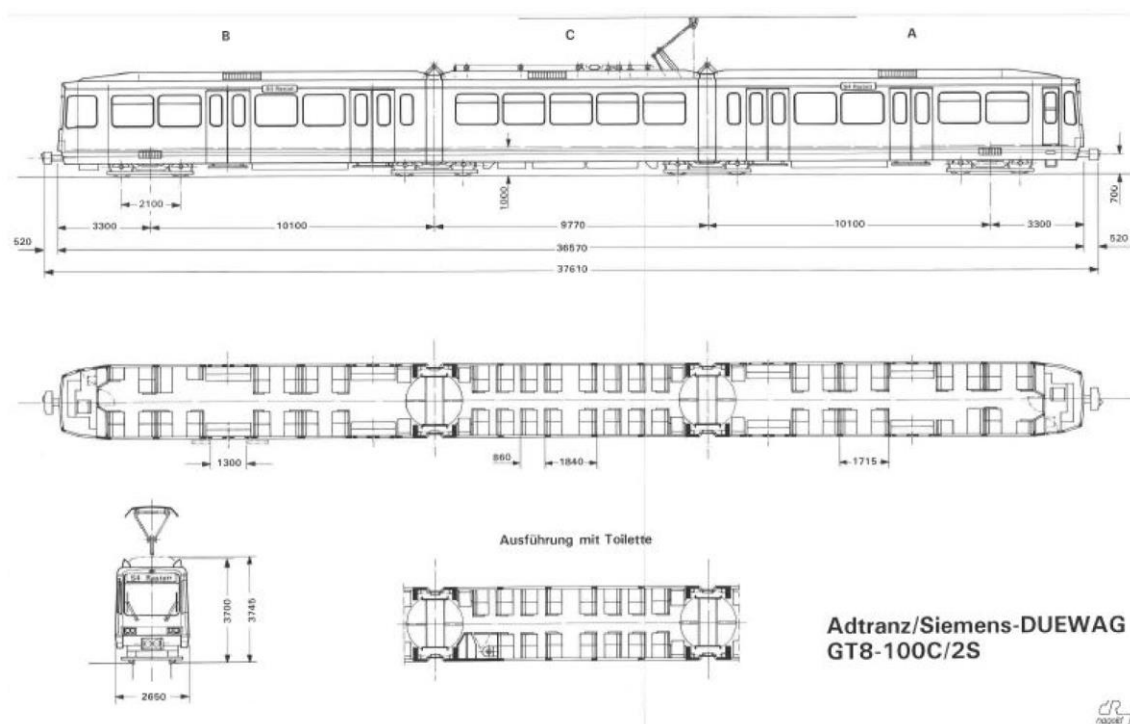


Abbildung 2-23: Abmessungen des für den Aufbau des Demonstrators genutzten Zweirichtungsfahrzeugs.

Fahrzeugkonzept

In einem morphologischen Kasten wurden die Kategorien (Parameter) Transportmodus, Ladungsträger, Beladungstechnik (Handhabung), Beladungsmethode, Position Ein-/Ausladungsöffnung, Befestigungsmethode, Beladungsart, Verkehrsart und Umschlagplatzart identifiziert. Dabei wurden auch die Erkenntnisse aus AP1 zum Logistikkonzept berücksichtigt (siehe Kapitel 2.1.1). Aus dieser zweidimensionalen Entscheidungsmatrix wurden durch Kombination unterschiedlicher Ausprägungen mehrere Lösungsansätze entwickelt.

Zur Realisierung eines Multifunktionsabteils mit Bewegungsfläche für den Ladungsträger wurden zunächst feste und demontierbare Teile der Bahn identifiziert. Für die als Demonstratorfahrzeug geplante Fahrzeugbaureihe GT8-100C/2S wurde analysiert, welche fahrzeugspezifischen Einschränkungen vorliegen, z. B. durch Sitzkästen, die teilweise nicht demontierbar sind (siehe Abbildung 2-24).

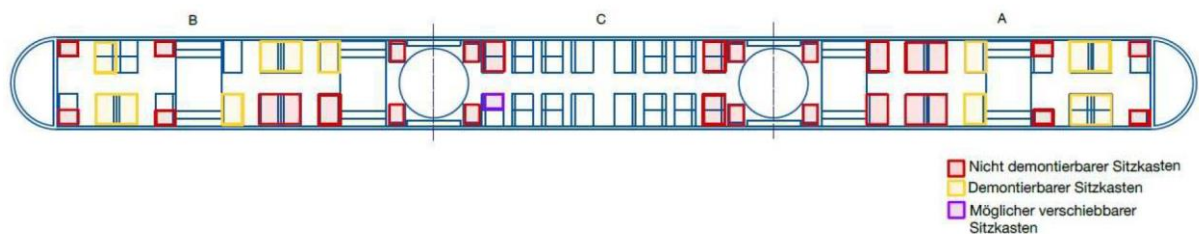


Abbildung 2-24: Randbedingungen für Fahrzeugkonzeption

Damit konnten basierend auf den Vorschlägen für die Ladungsträger aus AP2 drei Grobkonzepte entwickelt werden. Abbildung 2-25 zeigt diese Vorschläge, einmal mit Europaletten (oben), mit Corletten (mitte) und mit dem Nüwel eTrailer (unten). Hierbei ist zu erkennen, dass verschiedene Bereiche des Fahrzeugs für einen Transport zur Verfügung stehen. Es ist aber auch zu erkennen, dass die Breite des Fahrzeugs bei allen drei Ladungsträgern nur eine einreihige Beladung zulässt.

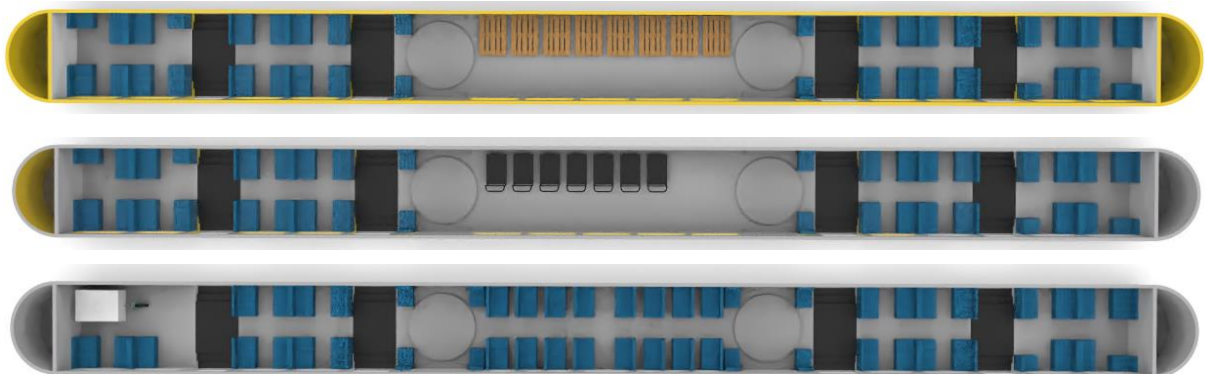


Abbildung 2-25: Fahrzeugkonzepte Demonstratorfahrzeug

Ausgehend von den Gegebenheiten der Bahn wurden vier mögliche Beladungskonzepte erarbeitet. Die Bewertungstabelle ergab, dass das dritte Beladungskonzept mit dem Nüwiel eTrailer als Lösung zu präferieren ist. Dieses wurde dann im Projekt umgesetzt und demonstriert.

Für das Beladungskonzept wurden die möglichen Fahrwege des Ladungsträgers vom Bahnsteig in das Multifunktionsabteil evaluiert und eine Trajektorie definiert. Wegen der Symmetrie der Bahn ergeben sich für den Ladungsträger zwei mögliche Einstiegsvarianten (siehe Abbildung 2-26 und Abbildung 2-27) mit unterschiedlichen Trajektorien zur Erreichung der Endposition des Ladungsträgers. Trajektorie 2 (Abbildung 2-27) ist mit weniger Rangieraufwand zu realisieren und wurde daher bevorzugt sowie im Projekt umgesetzt und demonstriert. Hervorzuheben ist jedoch, dass eine Be- und Entladung über beide Türen möglich ist und somit unterschiedliche Fahrtrichtungen und Bahnsteigkonzepte in der Lösung abgedeckt sind.

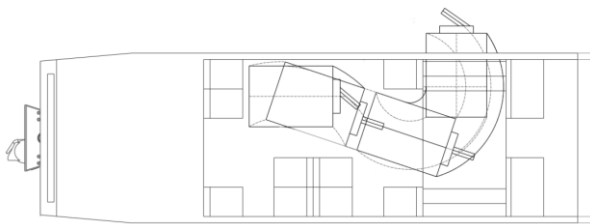


Abbildung 2-26: Trajektorie bei Einstieg auf Seite der geplanten Endposition

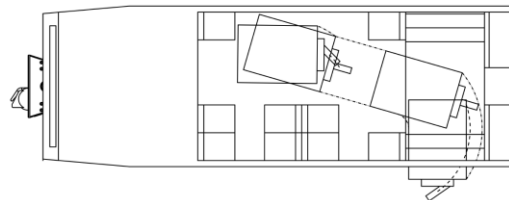


Abbildung 2-27: Trajektorie 2 bei Einstieg auf gegenüberliegender Seite

Zunächst wurden die Randbedingungen für die Fahrzeugkonzeption ausgearbeitet, welche sich aus der BOStrab, der EBO, den Regelwerken der Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH (AVG) und der Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH (VBK) und einschlägigen Normen ableiten lassen. Dabei sind neben den Vorgaben bezüglich der Größe und der Masse des Fahrzeuges auch Vorgaben bzgl. dem Spalt zwischen dem Bahnsteig und der Türschwelle sowie zur Kommunikation der Fahrgäste mit der Triebfahrzeugführenden Person (TF) und Durchgangsmöglichkeiten innerhalb des Fahrzeuges geregelt.

Zur Darstellung des im Demonstratorfahrzeug nicht vorhandenen Multifunktionsabteils wurden im vorderen Wagenkasten Änderungen der Sitzanordnung vorgenommen, wobei die bestehenden Sitzbefestigungspunkte weiter genutzt werden konnten. Teilweise befanden sich die demonstrierbaren Sitze auf fixen Kästen mit Blechverkleidung, eine reine Demontage der Sitzfläche reichte daher nicht aus. Die Sitzkästen mussten, insbesondere im Bereich der Türen auf ein Mindestmaß (d. h. Größe des Sandkastens) verkleinert werden. Zusätzlich wurden die Trennwände im Einstiegsbereich zurückgenommen, um eine maximale Gangbreite als Bewegungsfläche zu erreichen. Haltestangen im Eingangsbereich wurden entsprechend angepasst.



Abbildung 2-28: Multifunktionsbereich vorher (links), nachher (rechts)

System für Ladungshandhabung

Als Ladungsträger wurde ein elektrisch angetriebener Lastenradanhänger der Firma Nüwel angeschafft und im Projektverlauf zur Realisierung von automatisierten Fahrfunktionen durch eine Recheneinheit, eine Telematikeinheit (Router), eine Lenkaktorik zur Quersteuerung sowie einem Modul zur Längssteuerung erweitert. Die damit entstandene Systemarchitektur ist in Abbildung 2-31 dargestellt. Um eine stabile Spannung für die zusätzliche Bordelektronik zu gewährleisten wurde eine zweite, identische Batterie angeschafft und im Trailer verbaut. Steuergeräte und Sensoren können so unabhängig vom Ladezustand der Traktionsbatterie versorgt werden.



Abbildung 2-29: Elektrischer Fahrradanhänger der Firma Nüwel

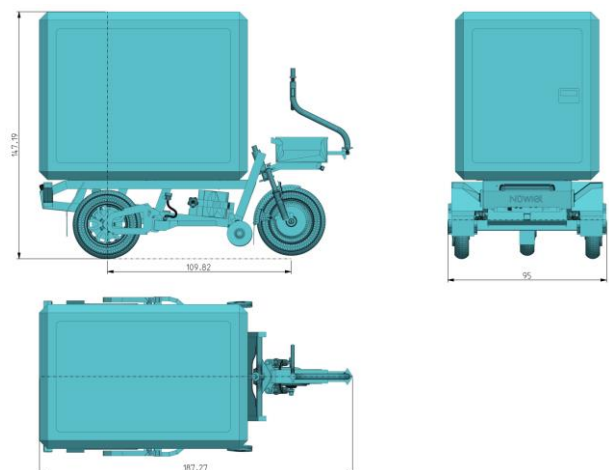


Abbildung 2-30: Bemaßte Vorderansicht, Seitenansicht und Draufsicht des Ladungsträgers

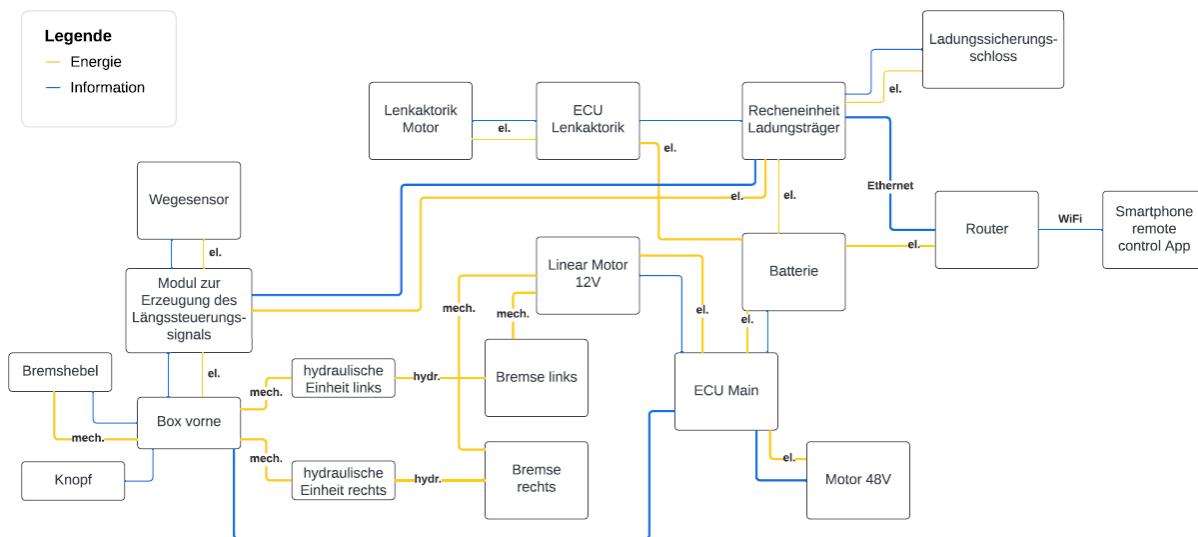


Abbildung 2-31: Erweiterte Systemarchitektur des automatisierten Ladungsträgers

Für die automatisierten Fahrfunktionen benötigt der Trailer eine zusätzliche Quersteuerung zum Erzeugen eines Lenkeinschlages am Vorderrad. Die notwendigen Komponenten sind in Abbildung 2-32 dargestellt. Hierzu wurde ein zusätzlicher Aktor verbaut, welcher mittels Riementrieb einen Lenkeinschlag am Vorderrad von $\pm 45^\circ$ ermöglicht. Die notwendigen Kräfte und Momente zum Lenken und führen des Ladungsträgers wurden rechnerisch bestimmt und im Versuch validiert. Der Aktor wurde auf eine übliche Steigung von Rampen von 6 % ausgelegt, bei gleichzeitiger, ungünstiger (auf Vorderachse) Maximalbelastung mit 120 kg Nutzlast. Für den Aufbau der Quersteuerung wurde ein Winkelgetriebemotor mit 50 Nm Drehmoment ausgewählt. Ein Riementrieb erzeugt den Lenkeinschlag an der vorderen Lenkachse. Die ursprüngliche, hohle Lenkachse wurde hierfür gegen eine massiv ausgeführte Eigenfertigung ausgetauscht.

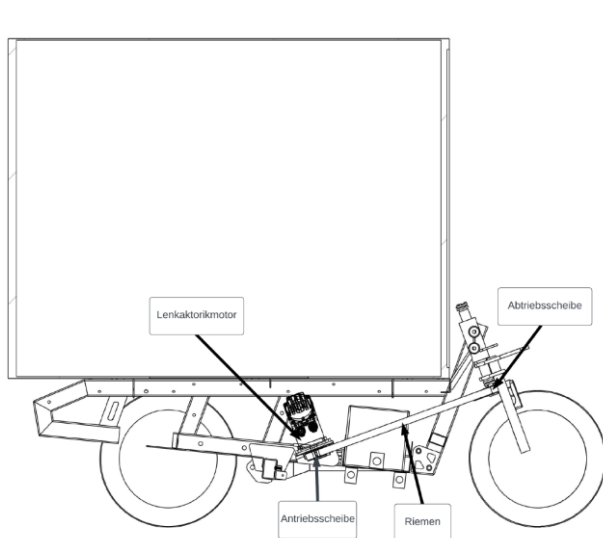


Abbildung 2-32: Komponenten der Lenkaktorik (Quersteuerung)

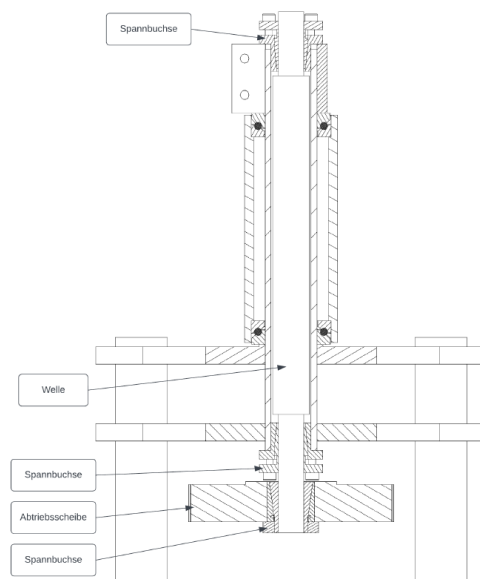


Abbildung 2-33: Neue Lenkachse mit zusätzlicher Abtriebscheibe

Konzept zur Ladungssicherung

Zur Auslegung der mechanischen Ladungssicherung wurden die notwendigen Kräfte auf Basis von Messdaten aus einer Messstraßenbahn abgeschätzt. Zusätzlich gelten für Schienenfahrzeuge diverse Normen (Tabelle 2.1.8) in denen u. a. Crash-Szenarien berücksichtigt werden. Diese wurden als Beschleunigungswerte ebenfalls bei der Auslegung der Ladungssicherung berücksichtigt.

Tabelle 2.1.8: Berücksichtigte Normen

DIN EN 15227	Bahnanwendungen – Anforderungen an die Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugen
DIN EN 12663-1	Bahnanwendungen – Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen – Teil 1: Lokomotiven und Personenzüge (und alternatives Verfahren für Güterwagen);
DIN EN 15085-1	Bahnanwendungen – Schweißen von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen – Teil 1: Allgemeines;

Unter Berücksichtigung der notwendigen Kräfte sowie der relevanten Normen konnte ein mechanisches Konzept für Ladungshandhabung und Ladungssicherung ausgearbeitet werden. Dieses basiert auf zwei handelsüblichen elektromotorischen Schnappriegelverschlüssen. Entgegen dem ursprünglichen Konzept, einer Installation der Ladungssicherung im Schienenfahrzeug, wurde die elektromechanische Ladungssicherung direkt am Ladungsträger realisiert. Der Eingriff in das Schienenfahrzeug konnte dadurch minimiert werden. Die Umbaumaßnahmen der Schienenfahrzeugflotte beschränken sich auf die Installation einer Haltestange unterhalb des Klappsitzes. Eine aufwändige, elektrische Umrüstung der Schienenfahrzeuge entfällt, wodurch ein späteres Ausrollen im Markt begünstigt wird. Konzept und Umsetzung sind in Abbildung 2-34 dargestellt.

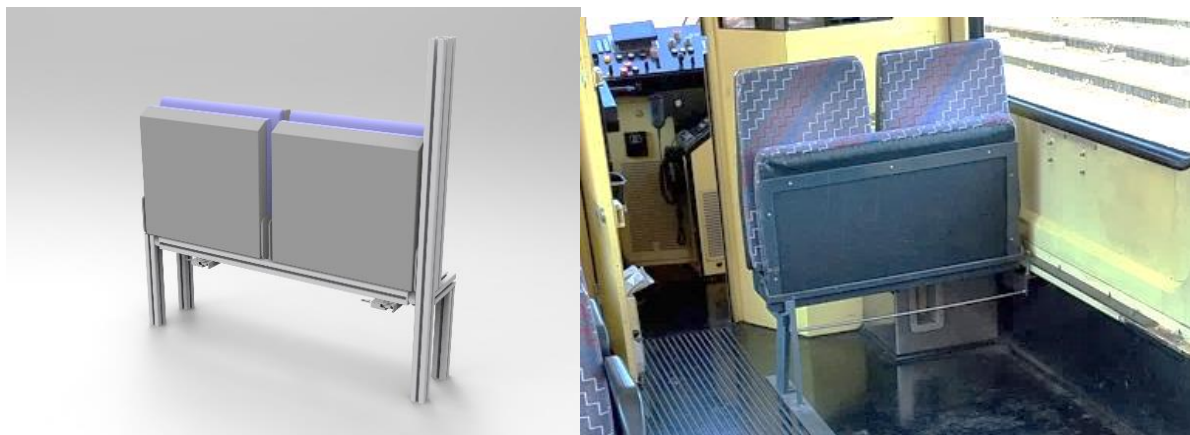


Abbildung 2-34: Konzept (links) und Umsetzung (rechts) der Fahrzeugsystemseitigen Ladungssicherung

Da mit dem Demonstratorfahrzeug eine Hochflurbahn und damit keine barrierefreie Bahn (Mittel- oder Tiefflurbahn) zur Verfügung stand, wurde zur Veranschaulichung der Barrierefreiheit ein Mechanismus zum Höhen- und Spaltausgleich bestehend aus Bahnsteigerhöhung und Klappe aufgebaut.



Abbildung 2-35: Bahnsteigaufbau zum Höhenausgleich und Klappe zur Spaltüberbrückung

Anbindung IKT-Plattform

Zur Einbindung des Be- und Entladeprozesses in die IKT-Plattform wurden die Kommunikationsmöglichkeiten definiert. Der Ladungsträger wurde mit einem eigenen Access-Point ausgestattet, welcher sich sowohl in öffentliche Netze (bspw. KA-WLAN) als auch in eigene Access Points (bspw. am Bahnsteig oder in der Tram) einwählen kann. Zusätzlich wurde die Möglichkeit einer 5G-Verbindung mittels SIM-Karte vorgehalten.

Der Ladungsträger steht in Verbindung mit dem Backend und kann sowohl Daten zum Transferstatus, Fahrplandaten und wichtigen Zuständen der Tram bekommen. Der oder die TF bekommt über das Bedienelement TouchIT3 im Schienenfahrzeug die notwendigen Informationen bspw. zur Haltestelle, an welcher be- oder entladen werden soll oder ob der Be- oder Entladevorgang abgeschlossen ist. Die Zustände des Ladungsträgers werden u. a. durch die in Tabelle 2.1.9 dargestellten Statusupdates ‚getriggert‘.

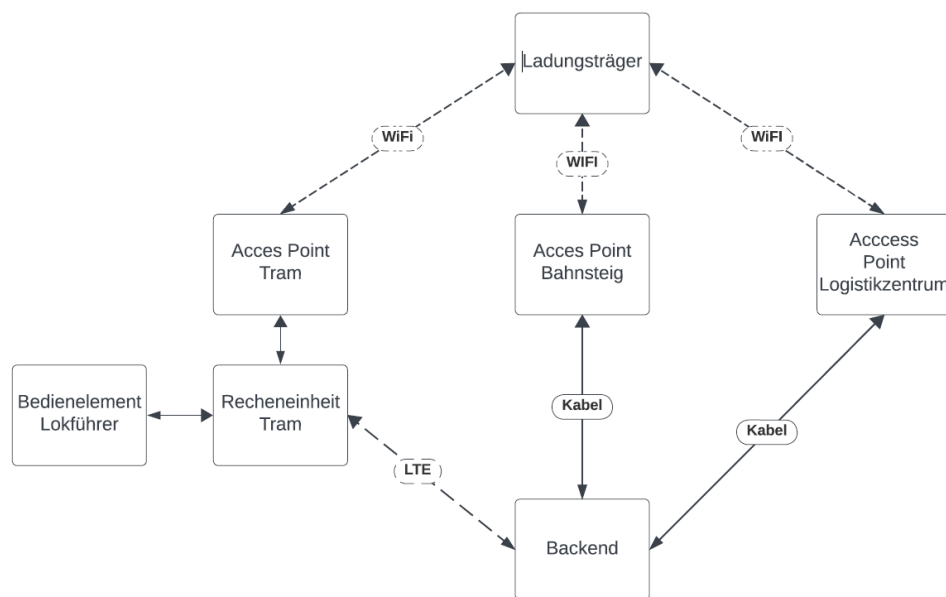


Abbildung 2-36: Systembild der Kommunikationswege bei der Ladungshandhabung [1]

Tabelle 2.1.9: Statusupdates zwischen Ladungsträger, Backend und Recheneinheit

Richtung	Status string	Empfänger	Beschreibung
eingehend	shippingProcess-Started	Ladungsträger	Signal, dass die Lieferung beginnt
ausgehend	transferHasStarted	Backend	Der Ladungsträger ist nun auf dem Weg zum Bahnsteig
ausgehend	readyForBoarding-Area	Backend	Der Ladungsträger ist am Bahnsteig angekommen und steht in korrekter Position in der Pending Area
eingehend	tramETA60	Ladungsträger	Die Straßenbahn ist nur noch 60s entfernt
ausgehend	carrierReadyForBoarding	Backend	Ladungsträger steht an korrekter Position in der korrekten Boarding Area
eingehend	tramReadyForBoarding	Ladungsträger	Bahn steht an korrekter Position, die Türen sind offen und blockiert, so dass sie nicht gleich wieder schließen
ausgehend	boardingStarted	Recheneinheit Tram	Der Ladungsträger hat das boarding begonnen
ausgehend	carrierInsideTram	Recheneinheit Tram	Der Ladungsträger ist vollständig in der Bahn, Türen können schließen
ausgehend	carrierReadyForDeparture	Recheneinheit Tram	Ladungsträger hat seine Parkposition eingenommen und sich gesichert
eingehend	destinationReached	Ladungsträger	Zielhaltestelle erreicht, Türen sind geöffnet, Ladungsträger verlässt nun die Tram
ausgehend	carrierLeftTram	Recheneinheit Tram/Backend	Ladungsträger hat die Zielhaltestelle erreicht

Die einzelnen Zustände sind in einem Programmablaufplan eindeutig geregelt. Neben dem automatischen Programmablauf ist für Erprobungszwecke zusätzlich auch eine manuelle Fernsteuerung mittels App möglich.

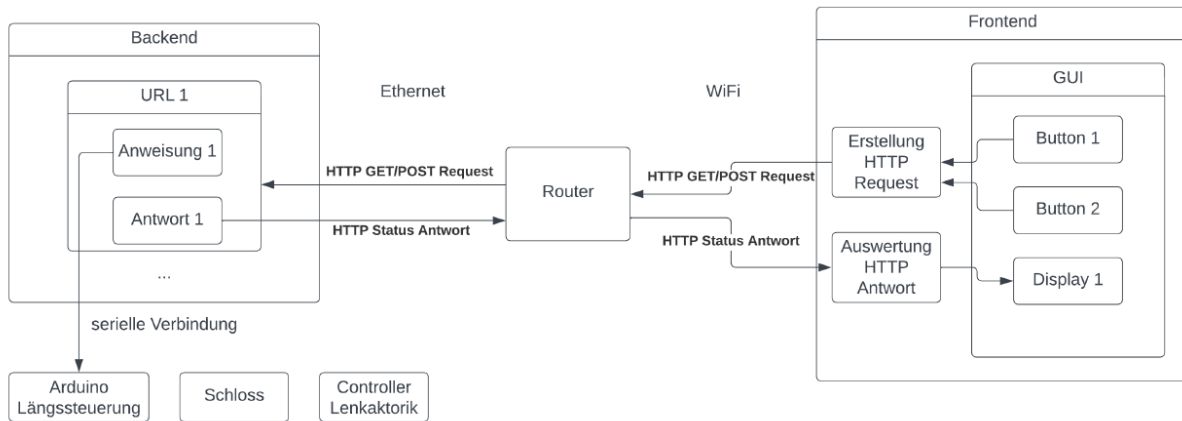


Abbildung 2-37: Architektur der Fernsteuerung



Abbildung 2-38: Grafische Oberfläche der App zur Fernsteuerung des Trailers

Modifikationen elektrisches System Stadtbahnfahrzeug

Um das zur Verfügung stehende Schienenfahrzeug GT8-100C/2S mit einem Assistenzsystem zur Unterstützung des punktgenauen Anhaltevorgangs auszurüsten, waren diverse Umbauten bzw. Ergänzungen am elektrischen System bzw. der Ansteuerung des Stadtbahnfahrzeugs notwendig.

Im ersten Schritt wurde Messtechnik installiert, welche die Bremsbefehle und die entsprechende Fahrzeugreaktion aufzeichnete. Aufgezeichnet wurden dabei Informationen welche

bereits im Fahrzeug vorhanden waren, es wurden keine zusätzlichen Sensoren wie z.B. Beschleunigungs- oder Drucksensoren installiert, sondern vorhandene Informationen rückwirkungsfrei abgegriffen. Unter rückwirkungsfrei wird verstanden, dass die Integration derart erfolgt, dass bei einem zufälligen Fehler der neuen Komponenten keine unmittelbaren oder mittelbaren Gefährdungen von Personen entstehen. Hierzu muss der Datenrekorder die Anforderungen EN 50155 insbesondere EN 45545 und EN 50121-3-2 erfüllen – „Maßnahmen zur Vermeidung negativer Systembeeinflussung durch Umwelteinflüsse.“ Beim Datenrekorder handelt es sich daher nicht um ein Gerät aus dem Bereich der Messtechnik, sondern um eine Fahrzeugsteuerung, nachfolgende abgekürzt als LTG – Leittechnik Gateway. Nur letztere erfüllt die geforderten Normen bzgl. elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) und Brandsicherheit. Einige Prozessdaten stehen nur am jeweiligen Wagenteil zur Verfügung. Dadurch sind Messaufzeichnungen an den vorderen und hinteren Wagenteilen erforderlich. Das LTG besteht aus zwei Teilsystemen (siehe auch Abbildung 2-39), welche mittels Ethernet-Verbindung miteinander kommunizieren. Die mit dem Datenrekorder erfassten Messsignale dienen als Eingangsinformationen für den später beschriebenen KI-basierten Halteassistenten.

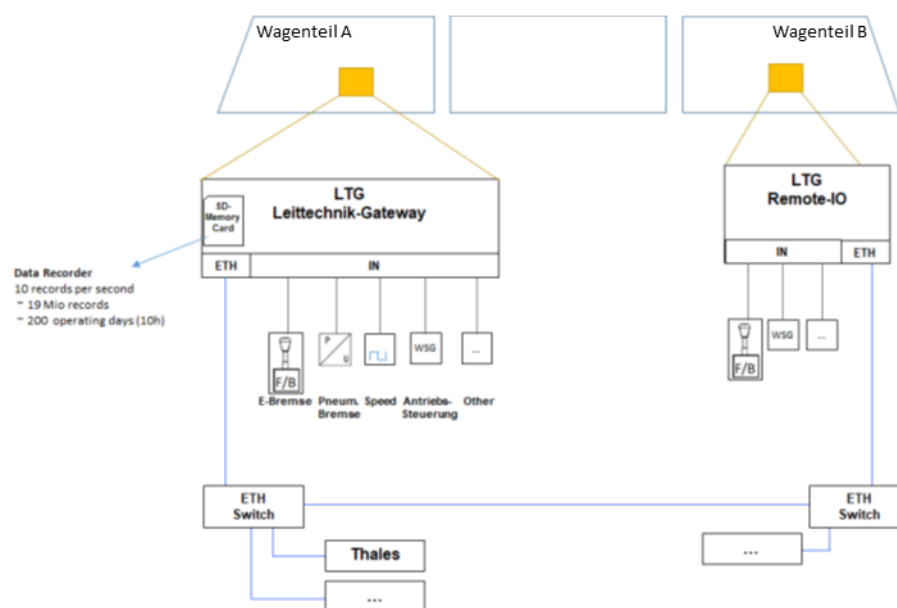


Abbildung 2-39: Architektur Datenrekorder, umgesetzt als LTG – Leittechnik Gateway

In einem zweiten Schritt wurde mit dem Leittechnik Gateway eine Schnittstelle zur Zugsleitebene bzw. Wagensteuerung eingebaut, welche die Ansteuerung der Fahrzeugbremsanlage durch den KI-basierten Halteassistenten erlaubt.

Als Vorarbeit für die beiden zuvor genannten Schritte mussten zunächst eine Ethernet Infrastruktur bzw. diverse zusätzliche Kabel zur Verbindung der Teilsysteme eingebaut werden, siehe auch Abbildung 2-40. Aus praktischen Gründen wurden die Hauptverbindungskabel zwischen den Wagenteilen bzw. den beiden Steuerständen über das Fahrzeugdach verlegt, der Rest der Verkabelung wurde in entsprechenden Schächten eingebracht.

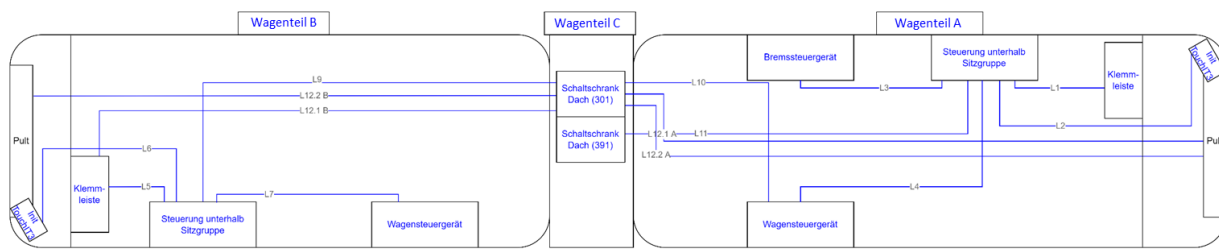


Abbildung 2-40: Ergänzung Verkabelung im Fahrzeug über alle drei Wagenteile hinweg

Zur Ansteuerung des Stadtbahnfahrzeugs durch den KI-basierten Halteassistenten sowie zur Information des Triebwagenführenden und zur Kommunikation zwischen dem Stadtbahnfahrzeug und dem Ladungsträger wurden diverse Teilsysteme in das Stadtbahnfahrzeug eingebaut. Die Abbildung 2-41 zeigt die in den beiden Wagenteilen eingebauten Teilsysteme im Überblick. Dabei bildet das Leittechnik Gateway die Schnittstelle zur Fahrzeugleittechnik und erlaubt so die Umsetzung des Bremsbefehls durch den Halteassistenten.

Der im Steuerstand von Wagenteil A installierte Bordrechner (COPILOTpc3) kommuniziert mit dem MQTT-Broker und stellt die Informationen über die in beiden Steuerständen installierten Bordrechnerbedienteile (TOUCHit3) dem TF visuell zur Verfügung. Für weitere Details wird auf die Darstellung im Abschnitt 2.1.3 verwiesen. Das Modul Umfelderkennung nutzte zwei im Steuerstand installierte Kameras zur Erkennung der Haltetafel und zur Bestimmung des Abstands zwischen Stadtbahnfahrzeug und dieser Haltetafel und leitet diese Informationen an das LTG – Leittechnik Gateway weiter, so dass diese beispielsweise auch für den Halteassistenten verfügbar sind. Das Modul KI bezeichnet den KI-basierten Halteassistenten welcher später beschrieben wird.

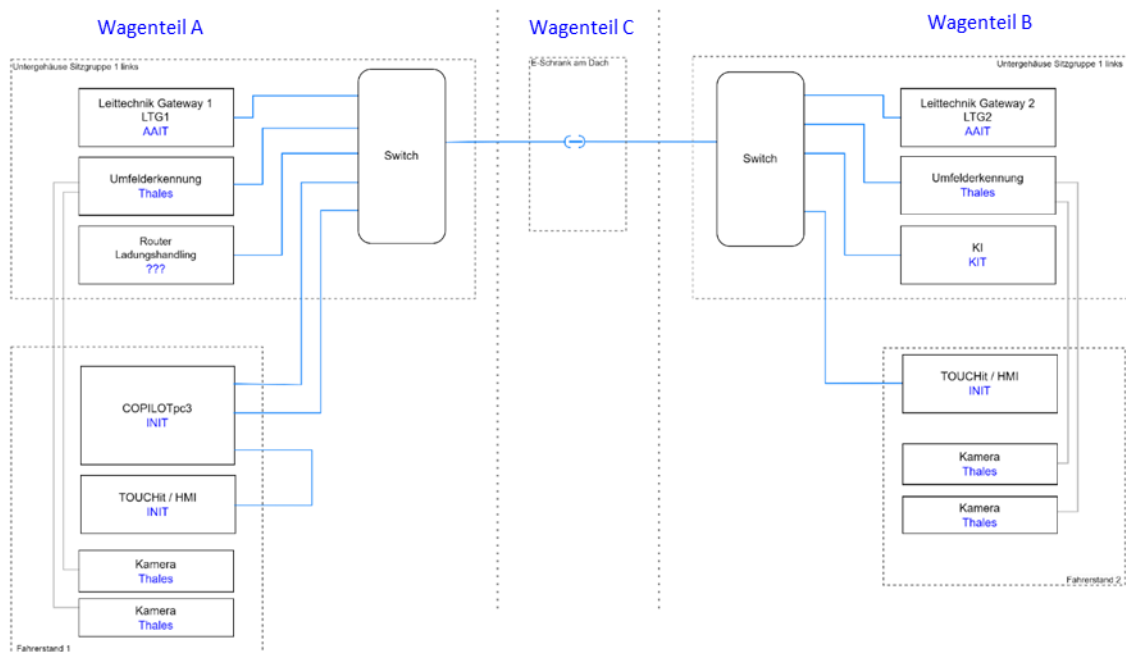


Abbildung 2-41: Teilsysteme Halteassistent, HMI für TF- und Kommunikation mit dem Backend bzw. Ladungsträger

Damit der KI-basierte Halteassistent das Fahrzeug ansteuern kann und der TF jederzeit die Kontrolle übernehmen kann, wurde die in Abbildung 2-42 dargestellte Funktionsweise des Leittechnik Gateway umgesetzt.

Das LTG – Leittechnik Gateway wertet die Fahrzeuginformationen aus, um festzustellen ob eine Betriebsbremse seitens Halteassistenten zulässig ist. Gleichzeitig werden vom LTG die Befehle des TF ausgewertet, um u.a. festzustellen, ob sich der Fahr-Bremssteller in der korrekten Position vor Aktivierung der Betriebsbremse durch den Halteassistenten befindet. Ist dem der Fall, wird das vom Halteassistenten angeforderte Bremsmoment gestellt. Der Eingriff erfolgt dabei derart, dass die Bremsleistung durch den Halteassistenten nur erhöht, aber nicht reduziert werden kann, falls der TF während einer Betriebsbremse nicht am angestrebten Punkt zum Stehen kommen würde.

Zusätzlich ist eine Sicherheitsschleife implementiert, welche den Eingriff durch das LTG aus Sicherheitsgründen elektrotechnisch unterbindet, falls bestimmte Randbedingungen (z.B. Freigabe Halteassistent, Notaus, Gefahrenbremse, Zwangsbremse) auftreten.

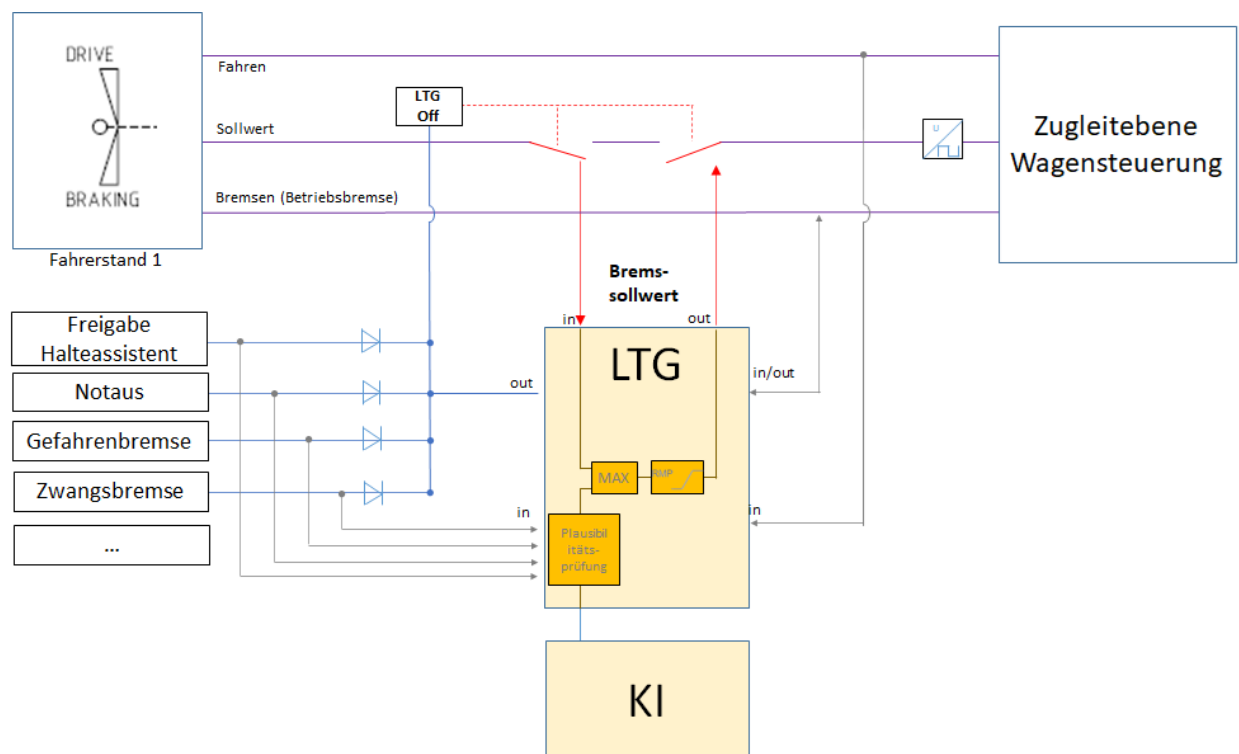


Abbildung 2-42: Blockschaltbild zur Funktionsweise des Leittechnik Gateway

KI-basierter Halteassistent

Damit der am Bahnsteig wartende Ladungsträger schnell und reibungslos durch die vorgesehene Tür in das Fahrzeug verladen werden kann, ist ein möglichst punktgenaues Halten des Fahrzeugs an der Haltestelle notwendig. Der optimale Haltepunkt wird durch die Schätzung der Distanz zur Haltetafel mit Hilfe eines Kamerasystems ermittelt. Bei der Haltetafel handelt es sich

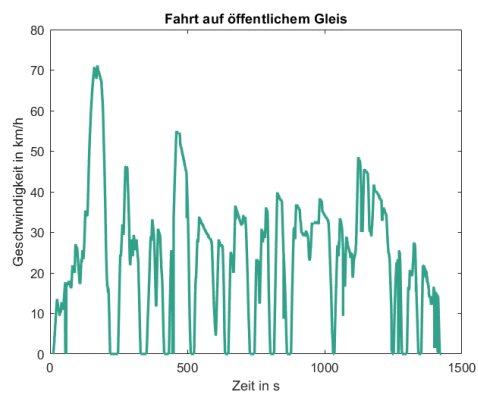
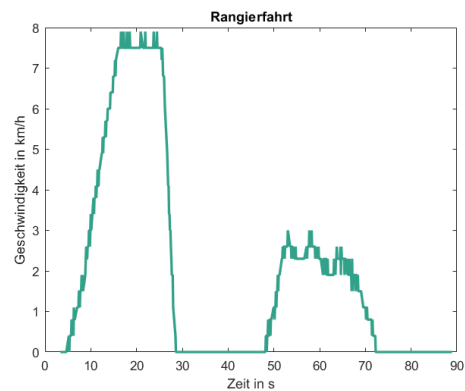
um das Schutzsignal Sh 7 gem. Anlage 4 der BOStrab, welches die Stelle kennzeichnet, an welcher die Spitze des Zuges halten soll. Ziel des Halteassistenten war das Einstellen einer optimalen Bremskraft, sodass das Fahrzeug punktgenau an der gewünschten Stelle zum Stehen kam.

Datengrundlage

Als Datengrundlage für die Entwicklung des Halteassistenten wurden Messdaten während Rangierfahrten auf dem Betriebshof und Fahrschulfahrten auf öffentlichem Gleis aufgezeichnet. Tabelle 2.1.10 zeigt eine Übersicht über alle aufgezeichneten Fahrzeuggrößen und Geschwindigkeitsprofile zweier repräsentativer Aufzeichnungsfahrten.

Tabelle 2.1.10: Aufgezeichnete Messgrößen und Geschwindigkeitsprofil zweier repräsentativer Fahrten

Messgröße	Einheit
Zeitstempel	s
Fahr-Bremssteller auf Fahren	-
Fahr-Bremssteller auf Bremsen	-
Gefahrenbremse aktiv	-
Notbremse betätigt	-
Zwangsbremse aktiv	-
Geschwindigkeit	km/h
Beschleunigung	m/s ²
Zug-/Bremskraft	%
Ankerstrom Antrieb 1	A
Feldstrom Antrieb 1	A
Motorspannung Antrieb 1	V
Ankerstrom Antrieb 2	A
Feldstrom Antrieb 2	A
Motorspannung Antrieb 2	V
Lastdruck	%
Bremsrückhaltedruck	%



Nach dem Aussortieren von nicht sinnvoll nutzbaren Datensätzen ergab sich ein Gesamtdatensatz mit einer Aufnahmedauer von ca. 20 Stunden und einer zurückgelegten Strecke von ungefähr 280 km, wobei es ca. 700 Bremsvorgänge bis zum Stillstand gab.

Datenanalyse und Datenaufbereitung

Die aufgezeichneten Daten wurden zunächst genauer analysiert und anschließend aufbereitet. Nicht alle für die Entwicklung des Halteassistenten notwendigen Größen wurden explizit aufgezeichnet. Durch die Integration der aufgezeichneten Geschwindigkeit wurde der Bremsweg bzw. die aktuelle Distanz zum Haltepunkt ergänzt. Mittels linearer Interpolation wurde ein Problem mit

systematisch auftretenden Zeitsprüngen behoben, während derer keine Daten gespeichert wurden. Der aufbereitete Datensatz konnte damit weiterverarbeitet werden, war durch Interpolation und Schätzungen des Bremswegs aber auch mit Ungenauigkeiten behaftet.

Regelkonzepte

Zunächst wurde ein rekurrentes neuronales Netz mit Long Short-Term Memory (LSTM) Schichten auf Basis der aufbereiteten Daten trainiert, welches mit den aktuellen Fahrzeugzustandsgrößen als Input die optimale Bremskraft als Output prädizierte. Aufgrund der nicht optimalen Datenumlage und Problemen bei der Implementierung des neuronalen Netzes bei den Tests im Fahrzeug, wurde dieses Konzept im Rahmen dieses Projektes aber nicht weiter betrachtet.

Alternativ dazu wurden zwei Konzepte auf Basis von PID-Reglern entwickelt. Das erste Konzept nutzte als Minimallösung lediglich die Regelabweichung zwischen der geschätzten Ist-Distanz und der Soll-Distanz zur Haltetafel, um eine Bremskraft einzustellen. Das zweite Konzept ergänzte den einfachen Distanz-Regler um zwei weitere unterlagerte Regelkreise, welche zusätzlich die Geschwindigkeit und die Beschleunigung des Fahrzeugs berücksichtigten. Sowohl diese Kaskadenregelung als auch die Minimallösung mit nur einem PID-Regler konnten im Fahrzeug implementiert und getestet werden.

Implementierung im Fahrzeug

Die Kommunikation zwischen den im Fahrzeug implementierten Teilsystemen fand über Ethernet und das User Datagram Protocol (UDP) statt. Der Halteassistent erhielt Informationen vom LTG über den aktuellen Fahrzeugzustand sowie Informationen vom Kamerasystem über den geschätzten Abstand zur Haltetafel. Basierend auf diesen Informationen ermittelte der Halteassistent, je nach Regelkonzept, eine optimale Bremskraft, welche wiederum an das LTG übermittelt wurde. Waren alle notwendigen Bedingungen erfüllt, wurde der Bremsbefehl des Halteassistenten vom Fahrzeug umgesetzt. Ziel hierbei war die Bremskraft so einzustellen, dass am Ende des Bremsvorgangs die Ist-Distanz zur Haltetafel der zuvor definierten Soll-Distanz entsprach. Für die Entwicklung und Tests des Halteassistenten wurde ein Simulink-Modell auf einem Entwicklungslaptop erstellt, welches in Echtzeit Daten über UDP empfängt, verarbeitet und anschließend eine Bremskraft sowie Statusinformationen über UDP versendet (siehe Abbildung 2-43).

Bei Testfahrten mit dem Fahrzeug konnte die Kommunikation und grundlegende Funktionalität des Halteassistenten auf Basis von PID-Reglern nachgewiesen werden. Sobald die Haltetafel vom Kamerasystem erkannt und eine Distanz geschätzt wurde, setzte der Halteassistent ohne nennenswerte Zeitverzögerung ein und bremste das Fahrzeug selbstständig ab. Die Anforderung des punktgenauen Haltens konnte aber nur bei wenigen Tests annähernd erfüllt werden mit Abweichungen von bestenfalls ca. 10cm. In den meisten Fällen kam das Fahrzeug entweder deutlich zu früh oder deutlich zu spät zum Stehen. Trotz identischer Regelparameter und gleichbleibender Geschwindigkeit unterschieden sich die Ergebnisse zwischen den Testläufen deutlich und

waren nicht zuverlässig reproduzierbar. Diese fehlende Reproduzierbarkeit war auf wechselnde Lichtverhältnisse und starke Sonneneinstrahlung während der Tests zurückzuführen. Die Halte-
tafel wurde je nach Testlauf unterschiedlich gut und spät erkannt, sodass die Bremsung durch
den Halteassistent zu unterschiedlichen und teilweise sehr späten Zeitpunkten einsetzte. Dieser
Umstand in Kombination mit der maximalen Frequenz von 5Hz, mit der die Distanzinformation
verarbeitet werden konnte, stellte keine ausreichende Datengrundlage für reproduzierbares
punktgenaues Halten durch die Regelung dar.

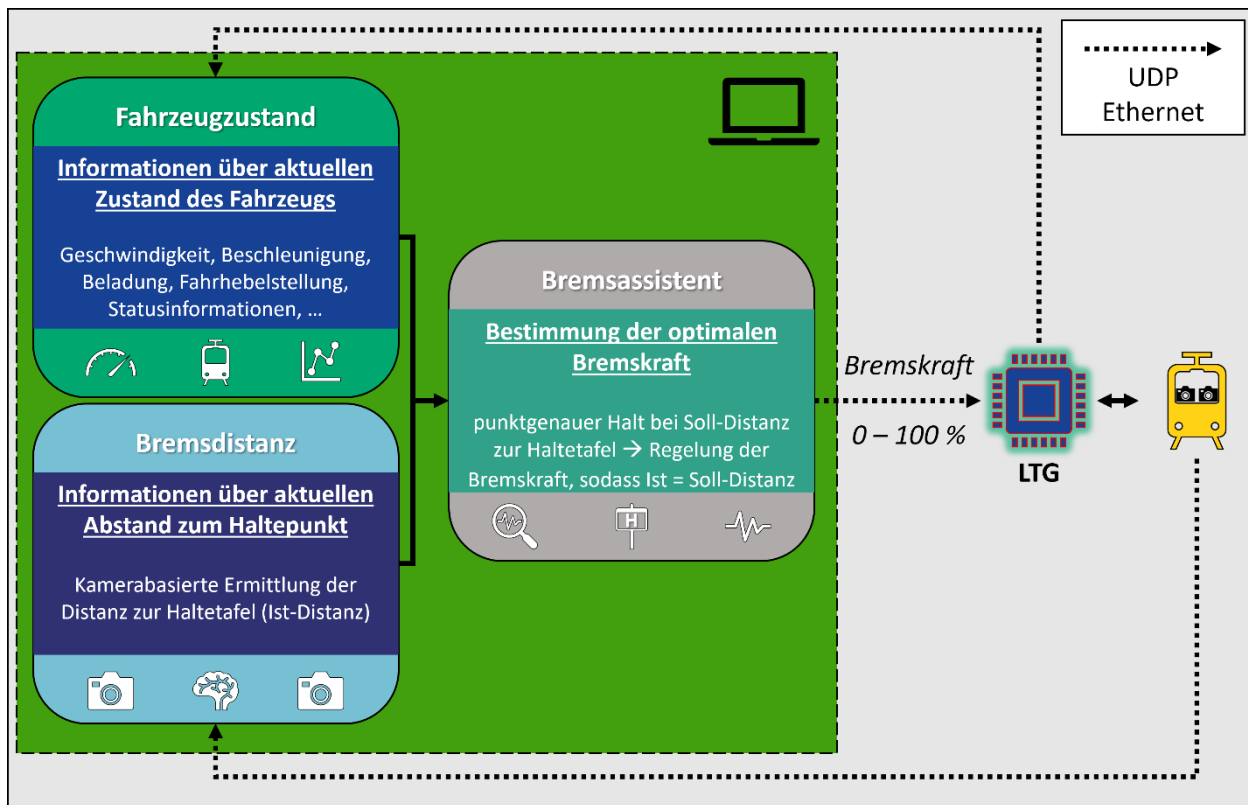


Abbildung 2-43: Kommunikation und grundlegender Aufbau des implementierten Halteassistenten

Simulationsumgebung

In dieser Arbeit haben wir einen Simulationsrahmen für automatisierte Straßenbahnen und in-
telligente Straßenbahnhaltestellen entwickelt. Der Carla-Simulator wird als Simulationsplattform
verwendet. Ein geometrisches Modell der Straßenbahn, das sich auf das Äußere konzentriert,
wird in Blender definiert. Dem Modell wird eine Skelettarmatur hinzugefügt, um die Bewegung
der Straßenbahnkarosserie und ihrer Räder zu verbinden und eine angemessene Simulation der
der Physik zugrundeliegenden Straßenbahnbewegung zu ermöglichen. Außerdem werden Ray-
Cast-Meshes für die Straßenbahn erstellt, um die Kollisionserkennung in der Simulationsum-
gebung zu unterstützen. Abbildung 2-44 zeigt das entwickelte Straßenbahnmodell in Carla.



Abbildung 2-44: Importiertes Straßenbahnmodell in der Unreal Engine

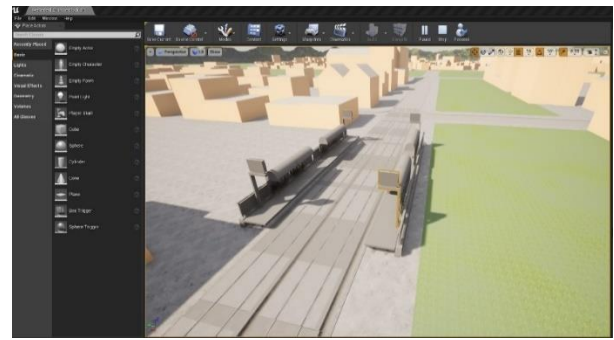


Abbildung 2-45: Validierungskarten für die Straßenbahnsimulation

1) Validierungskarte mit Straßenbahnschienen und Straßenbahnhaltestelle:

Zur Simulation der automatischen Straßenbahn in Carla wird eine Karte im OpenDrive-Format benötigt. Die Karte wird in der Unreal Engine erstellt, um den Betrieb der Straßenbahn und ihre Fähigkeit, von einem beliebigen Startpunkt zu einer bestimmten Haltestelle zu fahren, zu validieren. Die Straßenbahnschienen und eine Straßenbahnhaltestelle werden der Karte hinzugefügt, um realistische Fahrscenarien zu simulieren (Abbildung 2-45).

In AP 4.1 wurden Wahrnehmungssensoren wie RGB-Kamera, Instanzsegmentierungskamera, LiDAR und semantisches LiDAR eingesetzt, um die äußere Umgebung der Straßenbahn wahrzunehmen. Darüber hinaus werden GNSS- und IMU-Sensoren zur Lokalisierung verwendet. Die Carla ROS-Brücke (Robot Operating System – ROS) wurde modifiziert, um verschiedene Sensoren und Akteure in Carla über ROS-Nachrichten und -Dienste zu verbinden und zu synchronisieren. Die Brücke liefert Informationen über die Umweltparameter und das Wetter sowie eine Liste der in der Umgebung aktiven Akteure und Sensoren.

Die Implementierung wurde für die Instanzsegmentierungskamera und semantische LiDAR-Daten erweitert. Für die Instanzsegmentierungskamera wird eine 2D achsenausgerichtete Bounding Box extrahiert, indem die einzigartigen Akteure im Bild gefunden werden. Für jeden Akteur wird ein an den Sensorachsen ausgerichtetes Begrenzungsrechteck erstellt. Auf ähnliche Weise können die 2D-Konturen jedes Akteurs mit dem OpenCV-Framework extrahiert werden, wobei die Konturen ein geschlossenes Polygon aus Punkten darstellen, die zu den Extremitäten des Akteurs gehören. Der semantische LiDAR-Sensor von Carla wird erweitert, um eine Objektliste mit 3D-Bounding Boxes zu veröffentlichen.

Zwei standardisierte V2X-Nachrichten wurden implementiert. Die CAM-Nachricht dient bei autonomen Fahrzeugen, Straßenbahnen und Roadside Units (RSUs) als Identifikationsbake, mit der eine Station anderen Fahrzeugen oder RSUs Informationen über sich selbst mitteilt. Da das Simulationsmodell für RSUs in Carla fehlt, wurde ein zusätzliches Simulationsmodell für die RSU implementiert. Dieses Modell simuliert die Veröffentlichung von CAM-Nachrichten mit dem entsprechenden Geostandort der RSU mit einer vordefinierten Häufigkeit. Darüber hinaus können

alle Meldungen aufgezeichnet werden, was eine Wiederholung des Simulationsszenarios und eine Visualisierung der Sensordaten ermöglicht.

2) Steuergerät

Zusätzlich wurde der autonome Betrieb der Straßenbahn durch eine Steuerung erreicht, die auf dem Intelligent Driver Model (IDM). Der Regler wird mit der Startposition, der Anfangsgeschwindigkeit und der Beschleunigung der Straßenbahn sowie der Position der Straßenbahnhaltestelle initialisiert. Nach der Initialisierung des Controllers findet der Dijkstra-Algorithmus eine gültige Route zwischen der Start- und der Zielposition. Um den Realismus zu erhöhen, verwendet der Routing-Algorithmus das Lanelet-Format der Straßenkarte, um ihre Topologie und Konnektivität darzustellen.

Bei jedem Schritt erhält die Steuerung eine Objektliste mit den relativen Positionen der Hindernisse in Bezug auf die Straßenbahn, was für die Kollisionsvermeidung unerlässlich ist. Die Hindernisliste kann von unterschiedlichen Quellen abgeleitet werden. Das Steuergerät beobachtet den Zustand der Ampeln auf seiner Route, um das Überfahren von Ampeln zu vermeiden. Diese Informationen werden über die C2X-Technologie (Signal Phase and Timing (SPaT) message) bereitgestellt.

Es wird eine geschlossene Regelungsformel verwendet, bei der die Längsposition der Straßenbahn im Kartenbild auf der Grundlage der Schätzung des kinematischen Zustands der Straßenbahn durch die Carla-Sensoren aktualisiert wird. Die Steuerung führt drei Prüfungen durch, um die Interaktion zwischen der Straßenbahn und den Hindernissen, den Ampeln und der Zielposition zu bestimmen. Zunächst projiziert die Steuerung die Hindernisse auf die Straßenbahnstrecke und ermittelt den Abstand zwischen dem nächstgelegenen Hindernis und der Straßenbahn. Ist der Abstand zum nächstgelegenen Hindernis kleiner als eine Abstandsschwelle, werden seine Position und Geschwindigkeit an die nächsten Schritte des Controllers weitergegeben. Eine Ampelprüfung wird eingesetzt, um zu verhindern, dass Ampeln illegal überfahren werden und kritische Verkehrssituationen entstehen. Wenn der Abstand zwischen der Straßenbahn und einer relevanten Ampel kleiner als ein Schwellenwert ist und die Ampel einen Stoppzustand anzeigt, löst die Straßenbahn ein Verzögerungsprofil aus, um an der Ampel anzuhalten. Schließlich wird der Abstand zur Zielposition untersucht, um sicherzustellen, dass die Straßenbahn nicht über ihre Zielposition hinausschießt. Die Ergebnisse aller Überprüfungen werden an die Steuerung weitergeleitet, und die Steuerung nutzt diese Informationen zur Berechnung der folgenden Steuerungsausgabe. Auf der Grundlage der oben genannten Prüfungen und des aktuellen Zustands der Straßenbahn kann die Steuerung einen gewünschten Ackermann-Befehl (Lenkwinkel, Geschwindigkeit und Beschleunigung) berechnen. Schließlich wird der ausgegebene Ackermann-Befehl auf das Straßenbahnmodell Carla angewendet.

3) Visualisierungswerkzeug

Zusätzlich wurde ein RVIZ-Visualisierungswerkzeug implementiert. Dieses Werkzeug dient zur Visualisierung der aus der Lanelet-Datei extrahierten Straßeninformationen und Topologie. Es visualisiert die aktuelle Position der Straßenbahn auf der Karte (weiß) und ihren Fortschritt entlang der Referenzstrecke. Schließlich können mit diesem Tool auch Hindernisse (gelb) visualisiert werden.

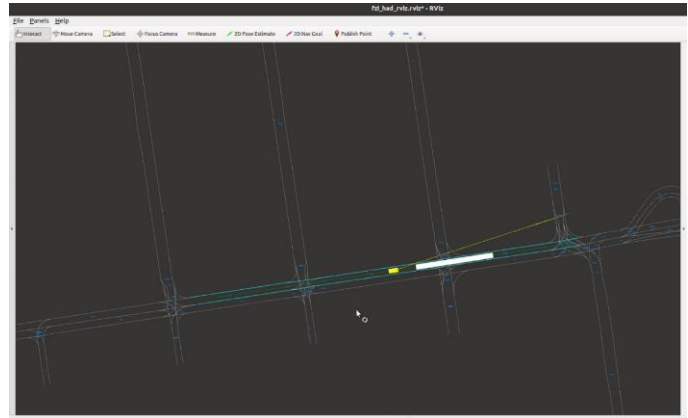


Abbildung 2-46: RVIZ-Visualisierungstool implementiert. Dieses Tool dient zur Visualisierung der Straßeninformationen und der Topologie

In Arbeitspaket 4.2 wurde das Konzept des sicheren Handhabens und Transportierens von Paketen in einem Bahnabteil ausgearbeitet. Dabei wurden unter anderem die Anforderungen, wie Sicherheit der Fahrgäste, des Fahrpersonals sowie der Pakete übernommen, welche durch partnerübergreifende Projektmeetings zusammengestellt wurden. Das Konzept zielt im Allgemeinen darauf ab, Pakete wie sie aktuell transportiert werden ohne Umpackmaßnahmen oder weitere Transportsysteme durch eine Bahn in die Stadt transportieren zu können. Dafür werden aktuell übliche Paketgrößen angenommen, wie bspw. von DHL kategorisiert.

In einem der simulationsbasiert untersuchten Ansätze werden z.B. in der Innenstadt keine weiteren Transportfahrten/-wege durchgeführt, da die Pakete aus der Bahn durch ein Förderband direkt in eine Packstation gelagert werden. Dort können die Kunden*innen/ Besteller*innen die Pakete abholen.

Um die Sicherheit der Fahrgäste sicherzustellen, sieht ein simulationsbasiertes Konzept z.B. vor, die Pakete in einem abgegrenzten Abteil des Zuges zu transportieren, z.B. im Bereich zwischen Führerstand der ersten Tür. Durch diese Abtrennung vom Personenabteil wird die Sicherheit der Fahrgäste gewährleistet. Ebenfalls kann hierdurch sichergestellt werden, dass keine Pakete entwendet werden. Die Abtrennung kann z.B. durch eine Plexiglas-Wand inkl. einer Tür zum Durchgang für das Fahrpersonal ausgeführt werden. Das Öffnen der Türen zum Führerstand und der Abteilabtrennung wird durch einen Sicherheits-Sensor überwacht. Sobald die Öffnung einer Tür registriert wird, stoppt der in der Simulation für die Be- und Entladung eingesetzte Leichtbau-Roboter seine Arbeit bzw. fährt langsam in eine sichere Position, um den Durchgang für das Fahrpersonal zu gewähren und sicher zu gestalten.

Die Untersuchungen zeigen, dass durch ein Förderband die Pakete schnell in und aus der Bahn verladen werden können (siehe Abbildung 2-47). Das Förderband transportiert die Pakete über eine Ladeluke zwischen dem abgegrenzten Abteil der Bahn und einer Paket-Box an einer

Haltestelle oder dem Hub. Durch dieses Konzept kommen Pakete und Fahrgäste nicht in Kontakt. Im Vergleich hierzu würde das Verladen der Pakete durch einen Roboterarm längere Zeit in Anspruch nehmen, wodurch die aus den aktuellen Fahrgastwechselzeiten geforderten 30 Sekunden für einen Halt keinesfalls gewährleistet werden könnten.

Für das Verstauen und Lagern der Pakete in der Bahn ist im betrachteten Szenario ein Roboterarm vorgesehen(s. Abbildung 2-47). Mit einer Traglast von maximal 20 kg können die Pakete innerhalb der Bahn von einem Förderband in Regale verstaut oder schwere Pakete auf dem Boden gelagert werden. Der Roboterarm soll in der Lage sein die Vorbereitung auf das Entladen an der nächsten Haltestelle während der Fahrt durchzuführen.



Abbildung 2-47: Roboterarm beim Greifen und Sortieren eines Paketes



Abbildung 2-48: Packstation mit Übergabebereich und Bedienfeld auf Kundenseite

Die Packstationen, wie in Abbildung 2-48 visualisiert, müssten an den entsprechenden Stationen aufgebaut werden, an welchen die Kunden dann die Pakete direkt abholen können. Ein in der Erde versenktes Paternoster, benötigt wenig Fläche und kann die Pakete schnell aufnehmen, lagern und an Kunden ausgeben.

In Arbeitspaket 4.3 wurde ein Umgebungs- und Simulationsmodell erstellt, um den Be- und Entladevorgang sowie den Transportprozess zu visualisieren.

Nach Festlegung des konkreten LogIKTram Szenarios mit Lade- und Entladehaltestellen für den Ladungsträger wurden die relevanten Assets für diese Umgebungen erstellt. Dazu gehören unter anderem die Erweiterung des Tram Modells zu einer realistischeren Nachbildung des Vorbilds und das Erstellen des virtuellen Ladungsträgers (siehe Abbildung 2-49). Es wurden zuvor erstellte Assets genutzt, um auf die Unreal Engine 5 zu wechseln. Diese bietet neben vielen kleinen Verbesserungen vor allem eine neue und realistischere Beleuchtungsberechnung für eine weitaus detailliertere und realistischere Darstellung (siehe Abbildung 2-50). Insgesamt wurde viel Wert auf Wiederverwendbarkeit gelegt, wodurch sich bei Bedarf schnell neue Streckenabschnitte erstellen lassen.

Abbildung 2-51 zeigt die Haltestelle Hagsfeld Bahnhof, den festgelegten Startpunkt für LogIKTram. Der Beladevorgang des Ladungsträgers wurde in einem Video der Öffentlichkeit präsentiert, was die Erklärungen zum Szenario visuell unterstützte und positiv aufgenommen wurde.



Abbildung 2-49: Modell des Ladungsträgers und der Bahn aus der Nähe



Abbildung 2-50: Albtalbahnhof in der Unreal Engine 5 mit „Lumen“ und „Nanite“

Analog zum Beladeszenario wurde das Entladeszenario mit einem Video visualisiert. Nach der Weiterfahrt der Bahn in die Stadtregion erfolgt das Entladen des Ladungsträgers an der Haltestelle „Essenweinstraße“ (Abbildung 2-52). Kombiniert mit dem Video zum Beladeszenario entstand eine zusammenhängende Sequenz, die den Be- und Entladevorgang sowie die Fahrt der Bahn umfasst. Hierdurch kann das gesamte LogIKTram Szenario mithilfe eines Videos erklärt werden.



Abbildung 2-51: Beladepunkt „Hagsfeld Bahnhof“ für den Ladungsträger



Abbildung 2-52: Endladepunkt „Essenweinstraße“ für den Ladungsträger

2.1.5 AP5: Wirkungen

Das E-Commerce-Geschäft hat in den vergangenen Jahren einen enormen Zuwachs erlebt, welcher sich mit Beginn der Corona-Pandemie weiter beschleunigt hat. Allein zwischen den Jahren 2012 und 2022 hat sich das Umsatzvolumen im E-Commerce-Geschäft verdreifacht (Handelsverband Deutschland 2024). Damit einhergehend ist seit einigen Jahren ein deutlicher Anstieg des Paketaufkommens zu beobachten. Um zu vermeiden, dass Kurier-, Express- und Paketdienstleister (KEP) lediglich die Anzahl ihrer Fahrzeuge vergrößern, um auf die steigende Paketnachfrage zu reagieren, müssen neue Lösungen für nachhaltige City-Logistikkonzepte erforscht werden. Nur

so kann vor allem in urbanen Gebieten dazu beigetragen werden, die bereits jetzt schon hohe Belastung der Straßeninfrastruktur zu reduzieren, Flächenkonflikte zu entschärfen sowie steigenden Verkehrsemissionen entgegenzuwirken und damit die Lebens- und Aufenthaltsqualität von Anwohnenden und Besuchenden zu steigern. Ein wichtiges verkehrliches Ziel für eine nachhaltige City-Logistik ist es daher, die Verkehrsleistung von Gütertransporten zu reduzieren oder auf ‚stadtverträgliche‘ Fahrzeuge zu verlagern. Hier setzt die Grundidee der LogIKTram an: Statt Pakete mit herkömmlichen Sprinter-Fahrzeugen von den Distributionszentren der KEP-Dienstleister direkt zu den Kundinnen und Kunden auszuliefern, sollen Pakete in Lastenradboxen vorgepackt, an die nächstgelegene Straßenbahnhaltestelle transportiert und in bestehenden Fahrplanfahrten der Straßenbahn gebündelt ins urbane Zentrum befördert werden. An ausgewählten City-Hubs, die als zentrumsnahe Zwischendepots für die Lastenradboxen dienen, soll der Umschlag stattfinden und die Feinverteilung zu den Kundinnen und Kunden mithilfe von Lastenrädern durchgeführt werden, die sowohl einen geringeren Flächenbedarf als auch vernachlässigbare Emission im Vergleich zu herkömmlichen Sprintern haben.

Inwiefern das Konzept der LogIKTram perspektivisch dazu beitragen wird, den KEP-Verkehr zu verlagern und damit eine nachhaltigere Entwicklung der City-Logistik fördert, war Gegenstand des AP 5. Eine Übersicht der bearbeiteten Inhalte ist Abbildung 2-53 zu entnehmen.

Empirische Datengrundlage im Güterverkehr schaffen



Erhebung von für den Güterverkehr relevanten Charakteristika bei Handel, Gewerbe und Industrie sowie Logistkdienstleistern



Modellierung des urbanen Güterverkehrs & Simulation des LogIKTram-Konzepts



Modellierung des Status Quo des Güterverkehrs und Kopplung mit Personenverkehrsnachfrage



Szenarioanalyse und verkehrliche Bewertung



Simulation der Belieferung mittels Straßenbahn, inkl. Umschlagsprozesse und Kleinverteilung



Abbildung 2-53: Inhalte des AP 5

Dazu wurde zunächst eine empirische Datengrundlage für den Güter- bzw. Paketverkehr geschaffen. Dazu zählen umfassende Datenrecherchen sowie eigene empirische Erhebungen und Interviews, um die für den Güter- bzw. Paketverkehr relevanten Charakteristika seitens der Transportnachfrage sowie des -angebots zu erfassen. Darauf aufbauend wurde ein mikroskopisches, agentenbasiertes Verkehrsnachfragemodell entwickelt, welches zunächst den Status Quo des Güter- bzw. Paketverkehrs, gekoppelt mit dem Personenverkehr, in der Untersuchungsregion Karlsruhe abbildet. Anschließend wurde das Logistikkonzept der LogIKTram in das Verkehrsmodell integriert und im Rahmen einer simulativen, modellgestützten Szenarioanalyse verkehrlich bewertet.

Die Ergebnisse der entsprechenden Arbeiten werden im Folgenden detailliert vorgestellt, beginnend mit dem Stand der Forschung, der den Ausgangspunkt für alle folgenden Arbeiten bildet.

Stand der Forschung

Ergänzend zu dem in Kapitel 1.4 beschriebenen grundlegenden Stand der Forschung wird hier auf spezifische, die Modellierung betreffende, Grundlagen eingegangen.

Detaillierte Untersuchungen komplexer Güterverkehrssysteme werden hauptsächlich durch mikroskopische, agentenbasierte Modellierungen durchgeführt. Diese sind insbesondere für alternative, kleinteilige Zustellkonzepte wie jenes der LogIKTram unerlässlich und sollen daher auch für die verkehrliche Wirkungsanalyse des LogIKTram-Konzepts Anwendung finden. Je nach Datenverfügbarkeit und gewünschter Modellgenauigkeit sind diese Modelle güter- oder fahrtenbasiert. Güterbasierte Ansätze erfordern detaillierte Güternachfragedaten und ermöglichen umfassende Bewertungen logistischer Akteure und Prozesse. Fahrtenbasierte Ansätze stützen sich auf Bewegungsdaten aus Wegetagebüchern oder GPS-Daten und können zusätzlich zu güterbezogenen Bewegungen auch Servicefahrten und Tankvorgänge erfassen.

Eines der ersten urbanen mikroskopischen Güterverkehrsmodelle, GoodTrip, wurde von Boerkamps und Binsbergen (1999) entwickelt. Dieses Modell ermöglichte erstmals die Bewertung der Interaktionen zwischen Verladern, Empfängern, Spediteuren und politischen Entscheidungsträgern hinsichtlich der Umweltbelastung durch den Güterverkehr. Es basiert auf einem güterbasierten Ansatz, der sich auf die gewerbliche Belieferung von Unternehmen konzentriert, jedoch Haushalte als Empfänger und KEP-Dienstleister als Transporteure nicht berücksichtigt. Ähnliche güterbasierte Modellansätze finden sich bei Tamagawa et al. (2010), Nuzzolo und Comi (2014) sowie Anand et al. (2014). Fischer et al. (2005) hingegen schlagen einen fahrtenbasierten Modellierungsansatz vor, differenzieren jedoch ebenfalls nicht explizit zwischen KEP-Dienstleistern und anderen Transporteuren, wodurch z. B. vertragliche Beziehungen zwischen diesen und den Empfängern unbeachtet bleiben.

Wisetjindawat et al. (2012) präsentieren einen güterbasierten Ansatz, der auf einer Unternehmensbefragung sowie verknüpften Erhebungsdaten aus der Verkehrszählung im Ballungsraum Tokio (Japan) basiert. Die Simulationsperiode ist auf einen Tag begrenzt und berücksichtigt weder Paketsendungen noch KEP-Dienstleister explizit. Ein weiterer prominenter Ansatz stammt von Bok und Tavasszy (2018), die das güterbasierte Modell MASS-GT in Rotterdam (Niederlande) vorstellen. Auch dieser Ansatz berücksichtigt weder KEP-Dienstleister noch Paketbewegungen sowie vertragliche Beziehungen zwischen Empfänger und Transportdienstleister explizit.

In neuen Modellansätzen werden KEP-Dienstleister explizit berücksichtigt. Livshits et al. (2018) präsentieren das fahrtenbasierte Güterverkehrsmodell MAG für die Arizona Sun Corridor Megaregion (USA), das urbane und regionale Güterverkehrsaktivitäten verbindet. Obwohl Paketbewegungen sowie entsprechende Abholtouren einbezogen werden, ist die Simulation auf einen durchschnittlichen Wochentag begrenzt und erfordert gleichzeitig einen sehr hohen Erhebungsaufwand. Dalla Chiara et al. (2020) legen ein urbanes güterbasiertes Güterverkehrsmodell für Singapur dar, gestützt auf umfangreiche Paketnachfragedaten des KEP-Dienstleisters „UPS“. Paketabholtouren

und Transportverträge werden jedoch außer Acht gelassen, und zwischen Haushalten und Betrieben als Empfänger wird nicht differenziert. Ebenfalls für Singapur präsentieren Sakai et al. (2020) das Modellierungsframework SimMobility Freight, basierend auf mehreren Datenquellen und unter Einbeziehung verschiedener Transportdienstleister und Güterarten. Die Simulation ist auf einen einzelnen Tag sowie B2B-Beziehungen beschränkt.

Llorca und Moeckel (2021) entwickeln ein Framework, das Paketbewegungen in München abbildet und sowohl Haushalte als auch Betriebe in urbanen Gebieten als Empfangs- und Versandagenten umfasst. Dieser Ansatz berücksichtigt zwar Transportverträge und Abholtouren, ist aber auf einen einzelnen Tag begrenzt. Stinson und Mohammadian (2022) setzen ihren güterbasierten Modellansatz für Chicago (USA) um, basierend auf mehreren kommerziellen und öffentlichen Datenquellen. Obwohl der Ansatz wichtige Merkmale urbaner Paketbewegungen adressiert, werden Veränderungen im E-Commerce-Verhalten und Paketbewegungen über eine Woche hinweg außer Acht gelassen. Dahingegen stellen Reiffer et al. (2021) den logiTopp-Rahmen vor, der Paketbewegungen im urbanen Raum von Karlsruhe über eine Simulationsperiode von einer Woche modelliert. Das Modell ist jedoch auf Haushalte als Empfänger beschränkt.

Zusammenfassend zeigt sich, dass mikroskopische, agentenbasierte Güternachfragemodelle erst seit kurzer Zeit KEP-Sendungen explizit berücksichtigen. Das sind die Sendungen, die aufgrund ihrer Beschaffenheit das größte Potential für eine Verlagerung auf die LogIKTram haben und daher im Folgenden im Fokus stehen werden. Weiterhin beschränken sich bestehende Modelle des KEP-Verkehrs auf private Haushalte, während Sendungen zu und von Betrieben weitgehend unberücksichtigt bleiben. In Deutschland macht dies aber etwa ein Drittel aller Sendungen aus (BIEK 2023). Spezifische Merkmale dieses Segments, wie Lieferverträge zwischen KEP-Dienstleistern und Empfängerunternehmen sowie Paketabholtouren, werden demnach ebenso selten abgebildet, sind aber für eine realitätsgetreue Modellierung unerlässlich. Zudem verfolgen die meisten Modelle einen fahrtenbasierten Ansatz, wodurch die Modellierung einzelner Paketbewegungen erschwert wird. Die Detaillierung auf Paketebene ist aber insbesondere für die Evaluation alternativer, kleinteiliger Zustellkonzepte – wie die LogIKTram – unerlässlich, da nur so Unterschiede in den Transportvolumina verschiedener Fahrzeuge verlässlich berücksichtigt werden können. Darüber hinaus ist die Simulationsperiode in bestehenden Modellen typischerweise auf einen einzelnen Tag begrenzt. Eine Woche ist jedoch notwendig, um Unterschiede zwischen Wochentagen und Wochenenden, einschließlich Samstagen, und die Berücksichtigung wiederholter erfolgloser Zustellversuche zu reflektieren.

Daher ergibt sich die Notwendigkeit nach einem neuen mikroskopischen, agentenbasierten Modellierungsansatz, der die urbane Paketnachfrage gesamtheitlich abbildet und die Evaluation eines intermodalen Pakettransports per LogIKTram und Lastenrad erlaubt. Dafür sind neue Ansätze in der Güterverkehrsmodellierung zu schaffen, mit denen sich bestehende Forschungslücken

schließen lassen. Die Umsetzung war Gegenstand des AP5 und wird im Folgenden näher erläutert.

Empirische Datengrundlage

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 deutlich schwerer zu erreichen. Somit ist es eine Herausforderung deren ein- und ausgehende Paketströme zu erfassen. Frei zugängliche, disaggregierte Datenquellen, die eine explizite Modellierung der Paketzustellung zu Unternehmen erlauben würden, gibt es ebenso wenig. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Projekts ein Datenerhebungskonzept entwickelt, um relevante Daten für die mikroskopische Modellierung des städtischen KEP-Verkehrs zu generieren, wobei der Schwerpunkt auf dem gewerblichen Segment liegt. Um die verschiedenen Akteure im Güterverkehr adäquat anzusprechen und die für die Modellierung relevanten Informationen zu erhalten, wurde ein Mixed-Method Ansatz entwickelt und angewendet. Dieser besteht aus zwei, sich ergänzenden, empirischen Komponenten. 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. Darüber hinaus können beide Komponenten zur gegenseitigen Validierung der erhobenen Informationen verwendet werden. Abbildung 2-54 fasst das Vorgehen zusammen:

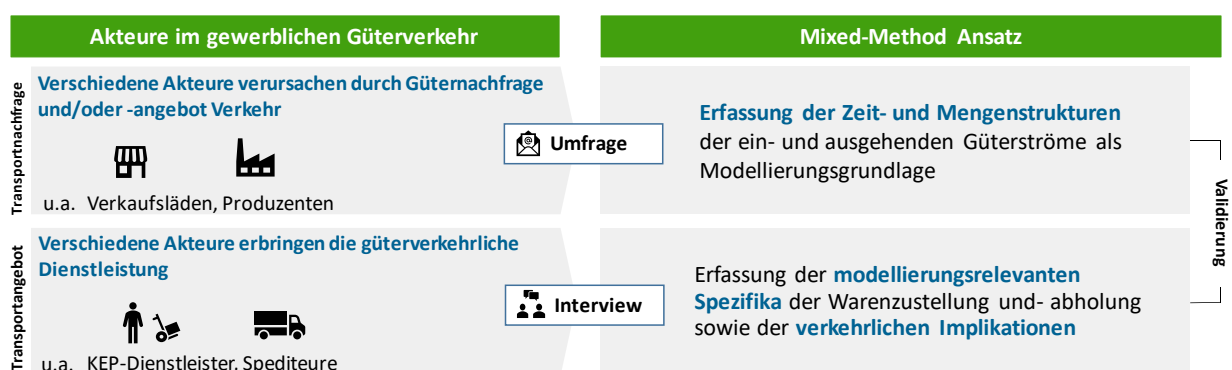


Abbildung 2-54: Erhebungskonzept als Mixed-Method Ansatz

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. Über Newsletter wurden insgesamt knapp 4.000 Unternehmen erreicht. Von lediglich knapp 100 Unternehmen, die mit der Beantwortung des Fragebogens begonnen hatten, haben knapp die Hälfte (N = 52) den Fragebogen vollständig ausgefüllt. Etwa 40% der befragten Unternehmen ist der Industrie (z. B. Produktionsgewerbe) zuzuordnen. Ein ebenso großer Anteil entfällt auf Handelsbetriebe, während sich die übrigen Unternehmen auf die verbleibenden Wirtschaftszweige verteilen. Etwa die Hälfte der befragten Unternehmen hat 10 oder weniger Mitarbeitende, ein Viertel hat zwischen 11 und 50 Mitarbeitenden und die übrigen Unternehmen mehr als 50 Mitarbeitende.

Bei künftigen vergleichbaren Erhebungen wäre es daher zielführend von einer Online-Befragung auf persönliche Gespräche umzustellen, um der vergleichsweise geringen Rücklaufquote entgegenzuwirken. Dennoch konnten auch so interessante und plausible Erkenntnisse zu Warenan- und -auslieferprozessen von Unternehmen gewonnen werden. Nahezu alle Unternehmen berichteten innerhalb einer Woche mind. einmal Waren zu versenden und zu empfangen.

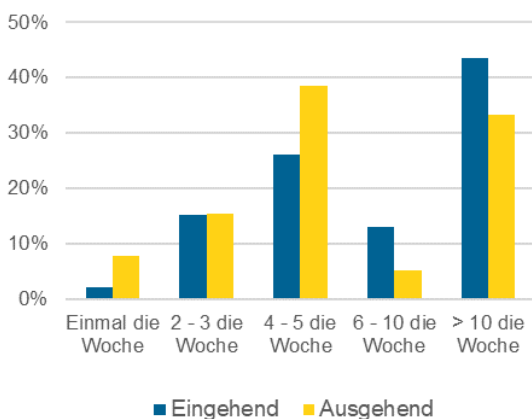


Abbildung 2-55: Häufigkeitsverteilung ein- und ausgehender Sendungen bei Unternehmen innerhalb einer Woche; N = 52

Abbildung 2-55 verdeutlicht, dass über 50% der befragten Unternehmen mind. 6-Mal und damit werktäglich oder häufiger Waren empfangt. Auf ähnlich hohem Niveau, aber etwas geringer, findet der Warenausgang statt. Der Warenempfang erfolgt zumeist bis zur Mittagszeit. Der Versand bzw. die Abholung von Warensendungen findet mehrheitlich nachmittags statt. Zudem wurde klar, dass etwa ein Drittel der befragten Unternehmen täglich Paketan- und -ablieferungen durchführt.

Diese Tatsache unterstreicht die Notwendigkeit von Unternehmen bei der Modellierung von KEP-Verkehren. 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 zGM eingesetzt, sodass noch großes Potential zur Verlagerung auf umweltfreundlichere Verkehrsträger besteht. Die logistischen Prozesse der KEP-Dienstleister ähneln sich sehr stark und werden daher aggregiert zusammengetragen. 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 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 bei gewerblichen Kunden die Zustellung und Abholung über Verträge zwischen Unternehmen und Logistikdienstleistern geregelt wird, welchem über eine dedizierte Modellierung Rechnung getragen wird. In diesen werden Haftungsfragen, Abhol- und Zustellzeiten, Transportkapazitäten sowie Transportkosten geregelt. Mit einer Zustellrate von 100% bei gewerblichen Kunden spielen erfolglose Zustellversuche bei dieser Kundengruppe keine Rolle. Bei privaten Kunden liegt die Rate bei etwa 90%, weshalb dort mehrere Zustellversuche berücksichtigt werden müssen. Eine detaillierte Ergebnisdarstellung beider empirischer Analysen findet sich in Barthelmes et al. (in Kürze erscheinend). In dieser Veröffentlichung werden zudem methodische Implikationen adressiert, die es in zukünftigen Unternehmenserhebungen zu berücksichtigen gilt.

Modellaufbau für den Status Quo

Modellierungsgrundlage für das in diesem Projekt entwickelte Modell bildet das agentenbasierte Modellierungsframework mobiTopp (Mallig et al. 2013; Mallig und Vortisch 2017). mobiTopp besteht aus zwei Modulen: einem Lang- und einem Kurzzeitmodul. Im Langzeitmodul wird eine synthetische Population von Agenten für ein Untersuchungsgebiet mit ihren soziodemographischen sowie weiteren mobilitätsrelevanten Merkmalen generiert. Darauf aufbauend werden im Kurzzeitmodul alle Wege jedes einzelnen Agenten und die damit verbundenen kurzfristigen Entscheidungen über Zielort und Verkehrsmittel im Verlauf einer Woche simuliert. mobiTopp wurde unter anderem im Projekt LogIKTram um das Logistikmodul logiTopp ergänzt und damit zu einem kombinierten Verkehrsnachfragemodell für den Personen- und Güterverkehr erweitert. Der in Java verfasste Programmcode von logiTopp ist als Open-Source-Projekt auf GitHub verfügbar und lässt sich modular dem mobiTopp-Framework zuschalten, aber auch losgelöst von mobiTopp autark anwenden (Kübler et al. 2022). In seiner ursprünglichen Funktion bildet logiTopp die Paketsendungen zu privaten Personen über den Verlauf einer Woche ab. Aufbauend auf diskreten Wahlentscheidungsmodellen werden privaten Agenten die Anzahl an bestellten Paketen innerhalb einer Woche zugewiesen. Im Kurzzeitmodul wird die Sprinter-Zustellung dieser generierten Pakete dann auf der letzten Meile simuliert (Reiffer et al. 2021). Kern des Modellaufbaus im Projekt LogIKTram bildete daher die Integration aller ein- und ausgehenden Paketströme von und zu Unternehmen im Untersuchungsraum Karlsruhe, die eine wesentliche Rolle bei der realitätsgetreuen Abbildung der Paketnachfrage in einem Untersuchungsgebiet spielen. Der Paketversand zwischen Unternehmen (B2B) trägt wie zuvor erwähnt mit mehr als einem Drittel zum deutschlandweiten Paketvolumen bei. Darüber hinaus führt eine Vernachlässigung von Unternehmenspaketen dazu, dass auch der Versand zu privaten Empfängerinnen und Empfängern nur auf der letzten

Meile berücksichtigt werden kann, nicht aber auf der ersten Meile, d.h. dem Pakettransport von einem Unternehmen zum entsprechenden Distributionszentrum, in dem es sortiert, auf den Hauptlauf gebracht und anschließend im Zielgebiet zugestellt wird.

Für die Untersuchungen im Projekt LogIKTram 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 integriert. Dabei wurde auf den bestehenden Ansätzen zur privaten Paketzustellung in logiTopp aufgebaut, diese erweitert, an relevanten Stellen angepasst sowie mit der Abbildung von Paketsendungen zu und von Unternehmen verknüpft. Ein Überblick des finalen Modellaufbaus ist in Abbildung 2-56 dargestellt.

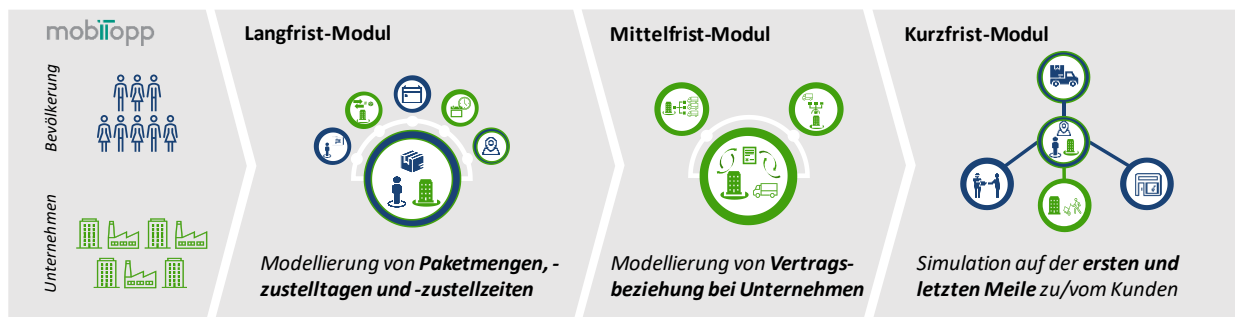


Abbildung 2-56: Überblick Modellierungsframework logiTopp

Aufbauend auf der synthetischen Bevölkerungs- und Unternehmensstruktur des Untersuchungsraums gliedert sich das Modellierungsframework analog zu mobiTopp in ein Lang- und Kurzfristmodul. Im Langfristmodul werden alle Eigenschaften modelliert, die über die Simulationsdauer einer Woche fix bleiben. Dazu zählt z. B. die Anzahl ein- und/oder ausgehender Paketmengen. Im Kurzfristmodul erfolgt die Simulation auf der ersten und letzten Meile, d.h. die Tourenbildung unter Berücksichtigung der entsprechenden Empfangsart (Unternehmen: nur direkte Zustellung/Abholung; Privatperson: direkte Zustellung, Zustellung an Packstation oder Paketshop). Ergänzend wurde das Modellframework um ein Mittelfristmodul erweitert, welches nur für Unternehmen angewendet wird. Dieses umfasst die Abbildung der Vertragsbeziehungen zwischen Unternehmen und Logistikdienstleistern. Um ein tiefergehendes Modellverständnis inkl. der verwendeten Datenpunkte zu erzeugen, werden im Folgenden die einzelnen Bausteine am Beispiel der Modellierung von Paketsendungen zu und von Unternehmen detaillierter vorgestellt.

Modellintegration von Paketsendungen zu und von Unternehmen

Die Konzeption und Umsetzung des Modells zur mikroskopischen Simulation von Paketsendungen zu und von Unternehmen baut auf dem zuvor eingeführten Datenerhebungskonzept auf. Die Darstellung des Gesamtkonzepts befindet sich in Abbildung 2-56. 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 ver-

fürbar, 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 mobiTopp setzt sich das darauf aufbauende Modellkonzept aus drei Teilmodulen, dem Lang-, Mittel- und Kurzfristmodul, zusammen.

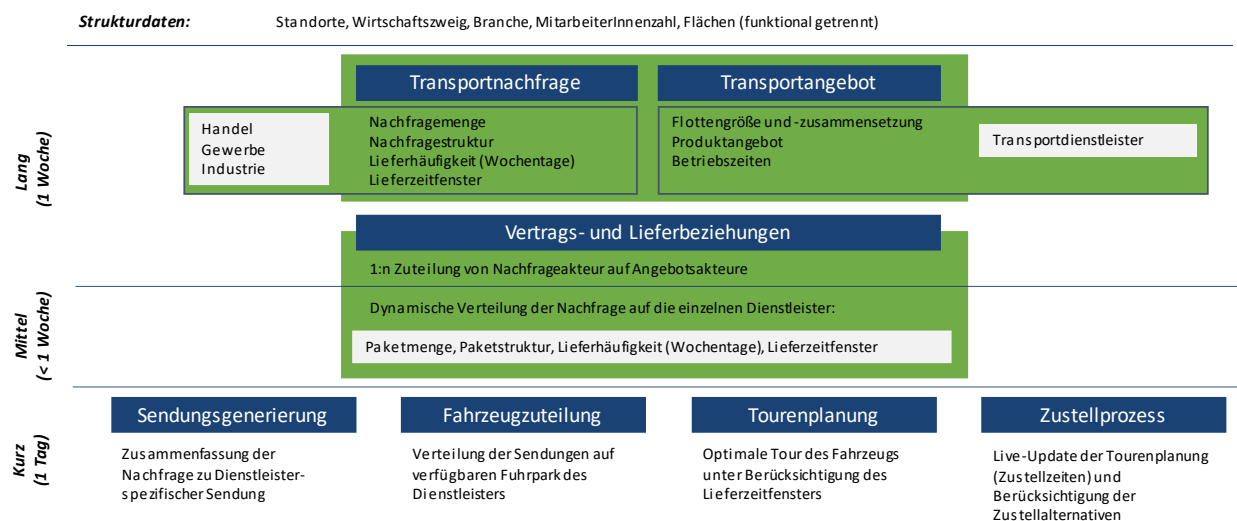


Abbildung 2-57: Detaillierung der Modellierung von Paketsendungen zu und von Unternehmen

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 weiteren 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 Ver-

tragsbeziehungen 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-Dienstleisters 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). Für eine detaillierte Darstellung des Mittelfristmoduls 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 Abbildung 2-57 auf den Warenezustellprozess. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass das Konzept auch den umgekehrten Paketstrom, d.h. die Abholung, umfasst.

Anwendung auf den Untersuchungsraum Karlsruhe

Das zuvor 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. 112.000 Pakete, die an Unternehmen geliefert werden, und knapp 238.000 Pakete, die von den Unternehmen für den Weitertransport abgeholt werden müssen. Die modellierten Paketmengen wurden mithilfe der auf den Untersuchungsraum skalierten BIEK-Studie (BIEK 2023) plausibilisiert.

Die mikroskopische Abbildung der Unternehmen ermöglicht zudem auch die Analyse der flächenmäßigen Verteilung des Paketaufkommens bei Unternehmen. Abbildung 2-58 (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 2-58 (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.

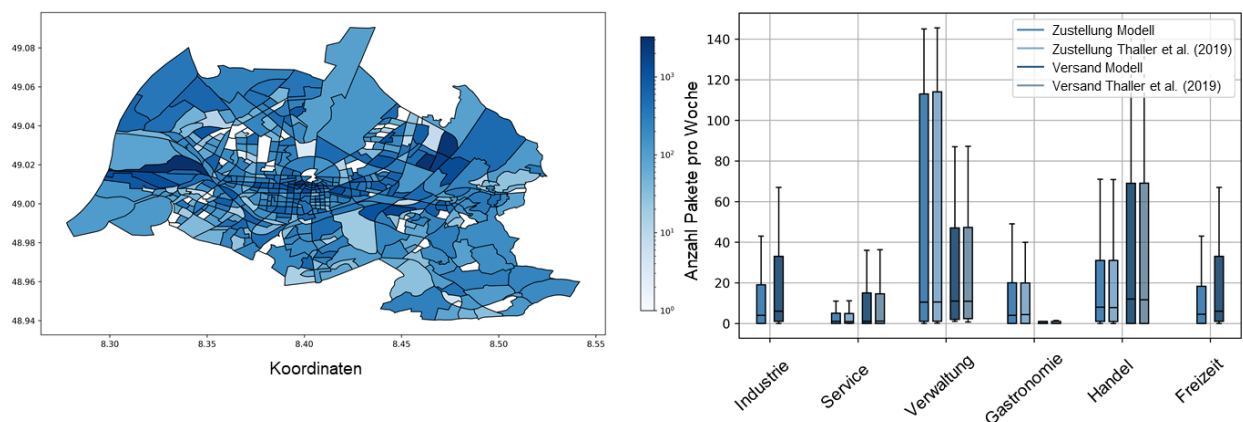


Abbildung 2-58: Flächenmäßige Verteilung der zugestellten Pakete (links); Vergleich Paketmengenverteilung nach Sektor zwischen Modell und Literatur (rechts)

Mithilfe des Greedy-Algorithmus und der Modellierung der Vertragsbeziehungen wird eine Verteilung der Pakete auf die KEP-Dienstleister entsprechend den Marktanteilen erreicht. Abbildung 2-59 (links) unterstreicht noch einmal die Relevanz der Berücksichtigung von Vertragsbeziehungen. Durch Verträge kommt es zu einer stärkeren Bündelung der Paketnachfrage auf KEP-Dienstleister, sodass insgesamt die Stoppanzahl reduziert werden kann. Damit gleichbedeutend führt eine Nicht-Berücksichtigung von Vertragsbeziehungen zu einer Überschätzung der Stoppanzahl im Vergleich zur Realität und damit zu einer Ineffizienz der Tourenbildung. Zudem findet im Rahmen der Vertragsmodellierung eine Verteilung der Paketmengen auf die einzelnen Wochentage statt. Die Ergebnisse für die abzuholenden Pakete sind exemplarisch in Abbildung 2-59 (rechts) 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.

Da gewerbliche Pakete gemeinsam mit privaten Paketen ausgeliefert werden, erfolgt die Tourenplanung im Kurzfristmodul und damit die Simulation der ersten und letzten Meile für gewerbliche und private Pakete zusammen. Da zum heutigen Stand in Karlsruhe ausschließlich Sprinter mit Verbrennungsmotoren bei der Zustellung und Abholung von Paketsendungen eingesetzt werden, berücksichtigt die Tourenplanung im Modell ebenfalls nur diese als Transportmittel. Auf eine Darstellung verschiedener Eckwerte der Tourenplanung wird an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf Barthelmes et al. (2024) verwiesen. In dieser Veröffentlichung wird genauer auf das Kurzfristmodul eingegangen und die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Tourenplanung mit und ohne Berücksichtigung der Paketsendungen zu und von Unternehmen werden herausgearbeitet.

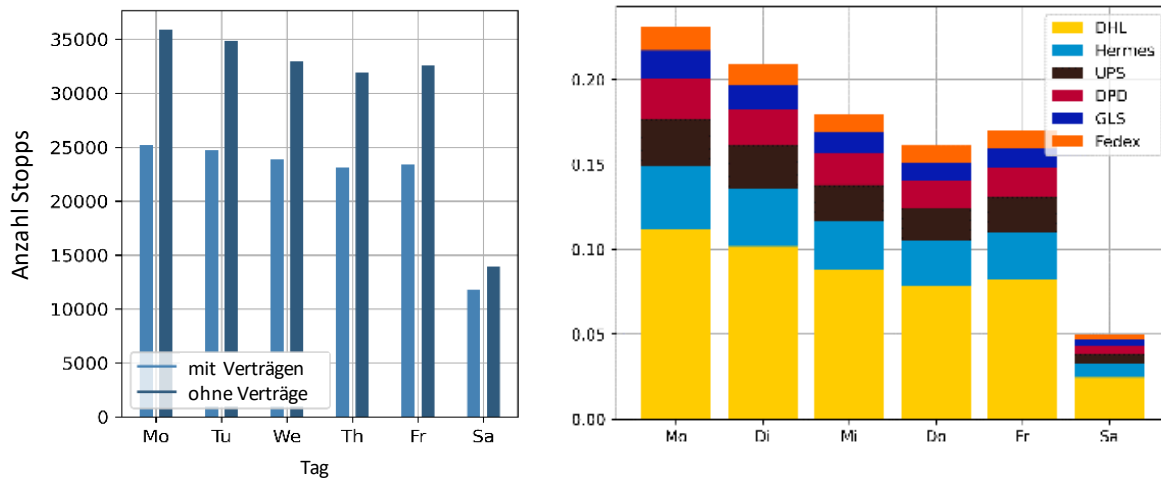


Abbildung 2-59: Vergleich Stoppanzahl mit und ohne Verträge (links); Wochenverteilung ausgehender Pakete von Unternehmen nach KEP-Dienstleister

Aufbauend auf der vollständigen und umfassenden Abbildung des Status Quo des Paketverkehrs im Untersuchungsraum Karlsruhe ist es das Ziel des Projekts, die verkehrlichen Wirkungen einer stadtbahnbasierten Paketbeförderung zu untersuchen. Daher wurde im folgenden Schritt eine Logik entwickelt und in das Modellframework implementiert, welche neben den typischerweise eingesetzten Sprintern auch die Straßenbahn und Lastenfahräder als Verkehrsmittelkombination der Paketzustellung und -abholung berücksichtigen kann. Die dazu notwendigen Überlegungen und Hintergründe werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

Integration der LogIKTram 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 der LogIKTram aufgrund der Abhängigkeit von der Schieneninfrastruktur nur als intermodale Transportkette realisieren. Im Logistikkonzept der LogIKTram ist u.a. vorgesehen, Pakete in Lastenradboxen, die am Distributionszentrum des KEP-Dienstleisters beladen werden, zu transportieren. Diese werden in die LogIKTram umgeschlagen, in die Stadt transportiert, von Lastenrädern übernommen und die entsprechenden Pakete schließlich ausgeliefert. Da ein KEP-Dienstleister nicht unmittelbar über einen direkten Gleisanschluss verfügt, muss auch ein Vorlauf, d.h. Transport der Lastenradbox vom Distributionszentrum zum Übergabepunkt der LogIKTram, berücksichtigt werden. Zusammen mit der bestehenden Transportalternative einer direkten Zustellung mit einem Sprinter ergeben sich durch die Einführung einer mit der LogIKTram verbundenen City-Hub Struktur die in Abbildung 2-60 dargestellten Transportketten B-D.

Bisherige Zustellart

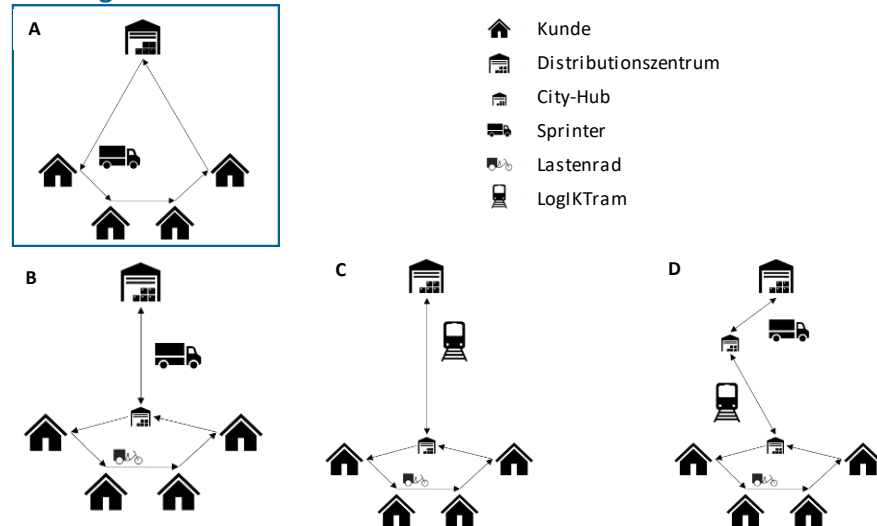


Abbildung 2-60: Mögliche Transportketten durch Einführung einer mit der LogIKTram verbundenen City-Hub Struktur

Einerseits können durch die Installation von City-Hubs die Lastenradboxen mit dem Sprinter direkt vom Distributionszentrum der Dienstleister zum City-Hub transportiert werden und von dort die Pakete mit dem Lastenrad feinverteilt werden (B). Die vom LogIKTram-Konzept vorgesehenen Transportketten sind C und D. Bei einem direkten Gleisanschluss eines Dienstleisters könnten die Lastenradboxen direkt in die LogIKTram verladen, am City-Hub entladen werden und von dort in die Feinverteilung mit dem Lastenrad gehen (C). Sofern kein direkter Gleisanschluss besteht – wie aktuell oft der Fall – müssen die Lastenradboxen zunächst an die nächstgelegene Haltestelle der LogIKTram transportiert und dort übergeben werden (D). Für die Modellsimulationen wird davon ausgegangen, dass dieser Transport mit herkömmlichen Sprintern absolviert wird. Variante D ist zum aktuellen Zeitpunkt daher eine Modellvereinfachung, um die Anzahl an möglichen Transportketten zu reduzieren. Je nach räumlicher Distanz zwischen Verteilzentrum und Beladehaltestelle kann der Transport der Lastenradanhänger zur Haltestelle auch mit anderen Verkehrsmitteln, z.B. dem Lastenfahrzeug, oder perspektivisch automatisiert bzw. autonom fahren.

Neben der Umstellung auf eine Transportkettenwahl statt einer deterministischen Verkehrsmittelwahl sind durch die Abbildung der LogIKTram weitere Anpassungen an der bestehenden Modelllogik notwendig. Dazu zählt zum einen die Einführung des Attributs ‚Paketgröße‘ sowie die Einführung des Verkehrsmittels ‚LogIKTram‘. Im bisherigen Modell wurden Standardpakete mit identischen Abmessungen abgebildet, da unterschiedliche Volumina der Pakete für einen Transport in Sprintern vernachlässigbar sind. Die Lastenradanhänger sind in ihren räumlichen Dimensionen und damit verfügbaren Volumen deutlich begrenzter als herkömmliche Sprinter. Die Paketgröße spielt damit eine entscheidende Rolle, wie viele Lastenradboxen notwendig sind, um die Paketnachfrage bedienen zu können und muss daher für die Abbildung des LogIKTram-Konzepts im Modell berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurde auf Basis einer empirischen Erhebung für jedes Paket im Modell eine Paketgröße entsprechend den Klassen S, M, L und XL modelliert.

Basis bildete die Verteilung von Fächergrößen in Paketstationen, welche basierend auf Erkenntnissen der Experteninterviews ungefähr die allgemeine Paketgrößenverteilung widerspiegeln. Für die Abbildung der LogIKTram als Verkehrsmittel mussten zudem mögliche Stadtbahnlinien im Modell definiert werden, in denen ein Transport von Lastenradboxen möglich ist. Dazu zählen auch die mögliche Kapazität von Lastenradboxen pro Straßenbahn sowie mögliche Abfahrtszeiten. Damit einhergehend mussten auch Standorte möglicher City-Hubs für den Übergabeprozess definiert werden.

Die zuvor genannten Attribute spielen für die Auswahl einer möglichen Transportkette, über die ein Paket zugestellt oder abgeholt wird, eine wichtige Rolle und gehen in die Transportkettenwahlentscheidung ein. Um diese 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 und ist in Abbildung 2-61 dargestellt. Es wird für jedes Paket einzeln, nachdem es im Langfristmodul erzeugt wurde, angewendet und nimmt Einfluss auf die Tourenplanung im Kurzfristmodul.

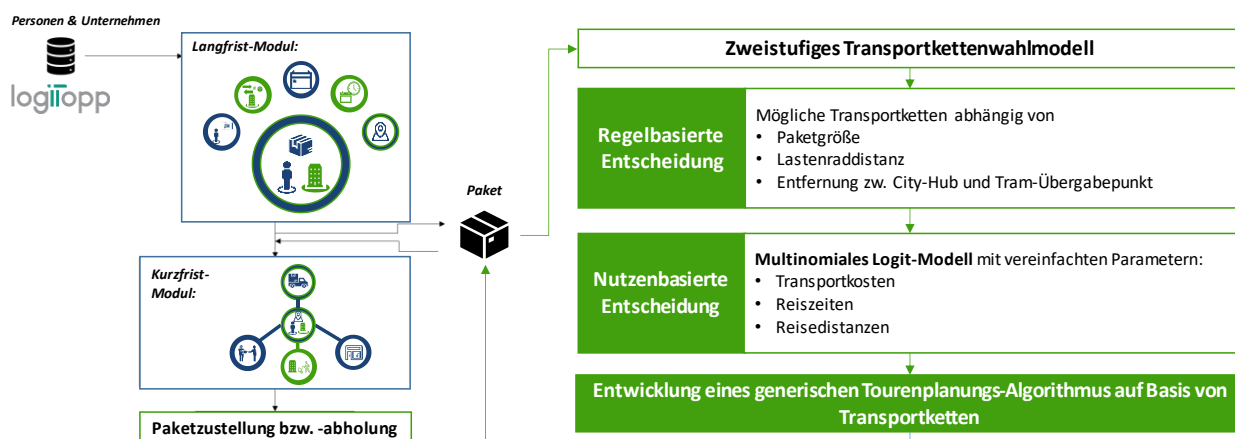


Abbildung 2-61: Transportkettenwahlmodell

Mit einem regelbasierten Ansatz wird zunächst ermittelt, welches Paket sich grundsätzlich für eine Belieferung mit der LogIKTram eignet. Entscheidungsgrundlage bildet unter anderem die Paketgröße. Neben weiteren Kriterien wird u.a. auch die mit dem Lastenrad zurückzulegende Entfernung zwischen City-Hub und Kunde berücksichtigt, da diese üblicherweise auf einen Radius von 3-5 km begrenzt ist. Auf Basis der Ergebnisse des regelbasierten Ansatzes wird nutzenbasiert, unter Anwendung eines multinomialen Logit Modells, entschieden, welche Transportkette aus den verbleibenden Möglichkeiten gewählt wird. 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. Der Nutzen V einer Transportkette M mit m verschiedenen Verkehrsmitteln (z.B. LogIKTram und Lastenrad) berechnet sich demnach nach der Formel

$$V_M = \beta_0 + \sum_{m \in M} \beta_{m,Kosten} * x_{m,Kosten} + \sum_{m \in M} \beta_{m,Distanz} * x_{m,Distanz} + \sum_{m \in M} \beta_{m,Zeit} * x_{m,Zeit}$$

wobei β_0 den Grundnutzen darstellt, β_m verkehrsmittelspezifische Parameter sind und x_m die entsprechenden Werte für Transportkosten, -entfernung und -zeit repräsentieren. Eine detailliertere Darstellung des Transportkettenwahlmodells findet sich in Barthelmes et al. (im Review).

Bedingt durch die neuartigen, intermodalen Transportoptionen konnten keine bestehenden Optimierungsverfahren der Tourenplanung angewendet werden. Stattdessen wurde im Rahmen des Projekts ein eigener generischer Tourenplanungsalgorithmus entwickelt, der es erlaubt, Touren für Transportketten zu planen, welche verschiedene Verkehrsmittel (Sprinter, LogIKTram und Lastenrad) nutzen. Zunächst wird entsprechender obiger Logik für jedes Paket eine präferierte Transportkette festgelegt. Für Transportketten, welche die LogIKTram enthalten, erfolgt zunächst die Platzvergabe der beschränkten Stellplätze der LogIKTram. Dies geschieht proportional zur Nachfrage, um die gemeinsame Nutzung der Kapazität der LogIKTram durch mehrere Dienstleister zu berücksichtigen. Die genaue Uhrzeit der Verbindung der LogIKTram wird – entsprechend den zuvor festgelegten möglichen Abfahrtszeiten der LogIKTram – den Dienstleistern gewichtet nach Nachfrage zufällig zugewiesen, bis alle Sendungen abgedeckt sind oder alle Plätze vergeben sind. Abschließend werden die Letzte-Meile-Touren für Pakete, die LogIKTram und Lastenrad bevorzugen, optimiert, wobei ein Route-First-Cluster-Second-Ansatz (Beasley 1983) mit einem TSP (Traveling Salesman Problem) -Rundtour-Algorithmus angewendet wird. Die TSP-Rundtour wird in kleinere Abschnitte unterteilt, die jeweils die Kapazitäts- und Arbeitszeitbeschränkungen erfüllen. Alle Pakete mit Lastenrad-Präferenz, die dabei nicht untergebracht werden können, werden anschließend als Fallback bei der Planung der Sprinter-Touren berücksichtigt. Die Sprintertouren werden analog mit dem Route-First-Cluster-Second-Ansatz geplant wie im bestehenden Modellansatz.

Diese Modellerweiterungen wurden in das bestehende logiTopp-Framework integriert und damit eine Abbildung des LogIKTram-Konzepts erreicht. Darauf aufbauend kann die Simulation der verkehrlichen Wirkungen eines stadtbahnbasierten Pakettransports erfolgen, welche im Folgenden vorgestellt wird.

Simulation des LogIKTram-Konzepts und Szenarioanalyse

Die Simulation des LogIKTram-Konzepts erfolgt auf Basis des gesamten Modellframeworks und umfasst daher neben der gewerblichen Paketnachfrage auch die Pakete an private Kundinnen und Kunden. Insgesamt werden knapp 500.000 Pakete modelliert, die innerhalb einer Woche entweder zugestellt oder abgeholt werden müssen. Vor der Simulation mussten für den Aufbau des Basisszenarios weitere Annahmen getroffen werden, die in Anlehnung an Erkenntnisse aus AP1 gewählt wurden. Da von einem kombinierten Personen- und Pakettransport ausgegangen wird,

wurde für die LogIKTram der Fahrplan der bestehenden Straßenbahn hinterlegt. So ist gewährleistet, dass keine zusätzlichen Straßenbahnfahrten berücksichtigt, sondern ausschließlich – wie in der Grundidee des Konzepts vorgesehen – vorhandene Straßenbahnkapazitäten genutzt werden. Da eine Beförderung von Lastenradboxen nur in Schwachlastzeiten möglich sein soll, wurden die möglichen Beförderungszeiten von Lastenradboxen auf 18 Uhr bis 6 Uhr eingeschränkt. Die Zeiten stammen aus Analysen der Fahrgastzahlen der AVG. Zudem wird im Basisszenario der Transport von Lastenradboxen nur auf einer Straßenbahnlinie (S2) betrachtet, da diese im Projektkonsortium aufgrund ihrer Linienführung als aussichtsreichster Startpunkt des Konzepts gesehen wurde.

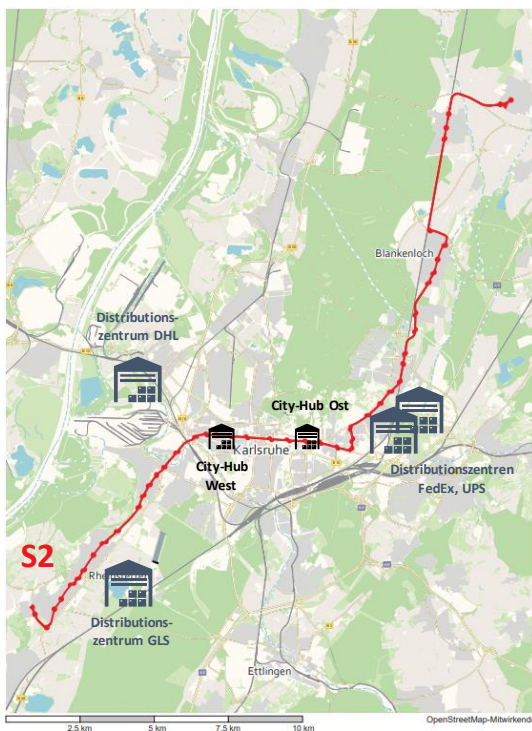


Abbildung 2-62: Linienverlauf und räumliche Situation im Basisszenario; Kartenquelle: KVV

Da Lastenradboxen nur in den Multifunktionsbereichen der Straßenbahn befördert werden können, wird die maximale Kapazität gleichzeitig zu befördernder Lastenradboxen in einer Straßenbahn auf zwei festgesetzt. Darüber hinaus wird von zwei City-Hubs ausgegangen, die jeweils an einer Straßenbahnhaltestelle in der westlichen und der östlichen Innenstadt platziert werden. Die Distributionszentren der KEP-Dienstleister werden entsprechend der realen Lokalisation im Untersuchungsraum Karlsruhe vorgenommen. Da kein Distributionszentrum einen direkten Straßenbahnanschluss hat, wird als Übergabepunkt der Lastenradboxen in die LogIKTram die dem Distributionszentrum nächstgelegene Haltestelle gewählt. Eine graphische Darstellung der Situation befindet sich in Abbildung 2-62.

Weitere Distributionszentren der DHL sowie von Hermes und DPD sind aufgrund des gewählten Kartenausschnitts nicht in der Abbildung sichtbar, im Modell aber berücksichtigt. Weitere Annahmen für die Definition des Basisszenarios beziehen sich auf Parameter, die das Transportkettenwahlmodell betreffen. Erstens wird davon ausgegangen, dass die Lastenräder ausgehend vom jeweiligen City-Hub nur Ziele innerhalb eines Radius von 3km erreichen können und für darüber hinausgehende Ziele daher keine intermodale Transportkette infrage kommt. Zweitens werden für die nutzenbasierte Transportkettenentscheidung für alle Verkehrsmittel eine gleiche Bewertung von Transportkosten, -entfernung und -zeit angenommen, d.h. $\beta_{m,Kosten} = \beta_{m,Distanz} = \beta_{m,Zeit}$, $\forall m \in M$. Die Ergebnisse der Modellsimulationen unter den zuvor beschriebenen Annahmen werden im Folgenden im Vergleich zum Status Quo, d.h. einer ausschließlichen Sprinterzustellung

und -abholung dargestellt. Das mit der LogIKTram verbundene Ziel ist eine Reduktion der Fahrleistung motorisierter Zustellfahrzeuge. Daher werden die Auswertungen auf die Verkehrsleistung in Fahrzeugkilometern bezogen. Für eine einfachere Darstellung erfolgt die Darstellung prozentual gemessen an der Verkehrsleistung im Status Quo. Abbildung 2-63 stellt den Vergleich der Verkehrsleistung zwischen dem Status Quo und dem Basisszenario dar.

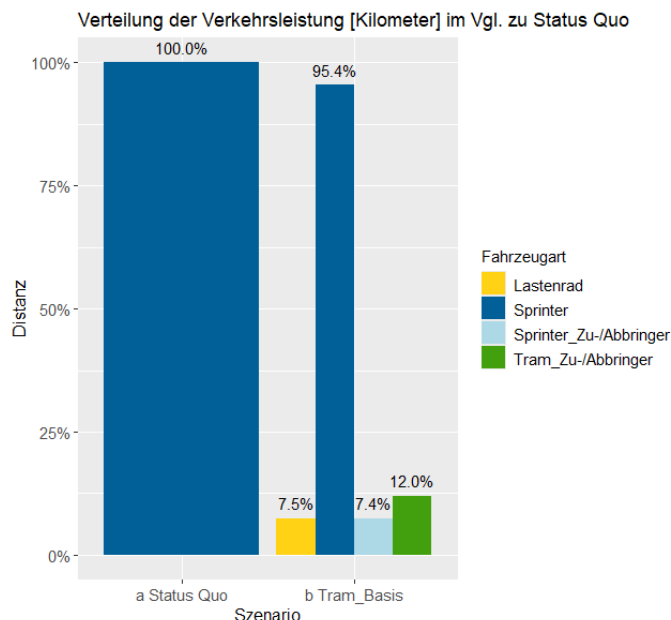


Abbildung 2-63: Verkehrsleistung im LogIKTram Basisszenario

Basierend auf den Modellrechnungen ist unter den zuvor beschriebenen Annahmen und Rahmenbedingungen eine Reduktion um 4,6% der Verkehrsleistung von reinen Sprinterzustell- und -abhol-touren zu erwarten. Gleichzeitig entsteht durch die Verlagerung auf intermodale Transportketten Verkehrsleistung durch Lastenradfahrten (7,5%), Straßenbahn-fahrten sowie Hol- und Bringtransporte von Lastenradboxen zwischen den Dis-tributionszentren der KEP-Dienstleister und der nächstgelegenen Haltestelle (7,4%).

Dass die Verkehrsleistung der Lastenfahrräder größer als die Einsparung bei den Sprintern ist, liegt an den kleineren Gefährten, die statt etwa 150 Paketen und 87 Stopps pro Tour bei Sprintern durchschnittlich 53 Pakete bei 38 Stopps pro Tour umfassen und damit insgesamt mehr Touren mit Lastenfahrrädern durchgeführt werden müssen als es bei Sprintern der Fall wäre. Aufgrund des geringeren Flächenverbrauchs von Lastenfahrrädern sowie des emissionsneutralen Transports ist dies dennoch nicht als nachteilig einzustufen. Problematisch sind hingegen in der aktuellen Konzeption die Hol- und Bringtransporte von Lastenradboxen zwischen den Distributionszentren der KEP-Dienstleister und der nächstgelegenen Haltestelle. Unter der Annahme, dass immer zwei Lastenradboxen in einem Sprinterfahrzeug zur Übergabehaltestelle transportiert werden, entsteht auf Basis der Modellrechnungen eine Verkehrsleistung von 7,4%. Bei dieser Konzeption würde daher die Gesamtfahrleistung von Sprintern über jener im Status Quo Fall liegen. In weiteren Arbeiten ist es daher erforderlich, Potentiale zu identifizieren, die die Verkehrsleistung der Hol- und Bringwege reduziert. Bereits durch eine Kapazitätserhöhung der Fahrzeuge von zwei auf vier Lastenradboxen könnte die entstehende Verkehrsleistung bereits halbiert werden. Durch direkte Gleisanschlüsse der Distributionszentren der Dienstleister könnte dieser Aspekt sogar vollständig vernachlässigt werden. Die Verkehrsleistung der Straßenbahn Zu-/Abbringer (grün) bezieht sich auf eine Lastenradbox und Straßenbahnfahrt. Da ohnehin nur bereits bestehende Fahrten der Straßenbahn in der Modellierung berücksichtigt werden, kann dieser Anteil bei der Bewertung des

Gesamtkonzepts allerdings vernachlässigt werden und ist in der Abbildung lediglich der Vollständigkeit halber enthalten. Bei der Analyse der zu erwartenden Transportdauern fällt auf, dass sich insbesondere durch die Lastenradtouren die Transportdauer mit personellem Einsatz (alle Fahrten außer LogIKTram, da hier kein zusätzliches Personal erforderlich ist) erhöhen wird. Die Simulationsergebnisse lassen einen Anstieg von 7,6% ggü. dem Status Quo erwarten. Die resultierenden höheren Personalkosten müssen z.B. durch geringere Fahrzeugkosten der Lastenräder ausgeglichen und bei der Gestaltung des Geschäftsmodells des Betreibers der LogIKTram berücksichtigt werden.

Neben der Analyse des Basisszenarios wurden im Projekt weitere Szenarien definiert und mithilfe des kombinierten Personen- und Güterverkehrsmodell mobiTopp und logiTopp untersucht. Die Ergebnisse von zwei ausgewählten Szenarien sind neben dem bereits analysierten Basisszenario in Abbildung 2-64 dargestellt.

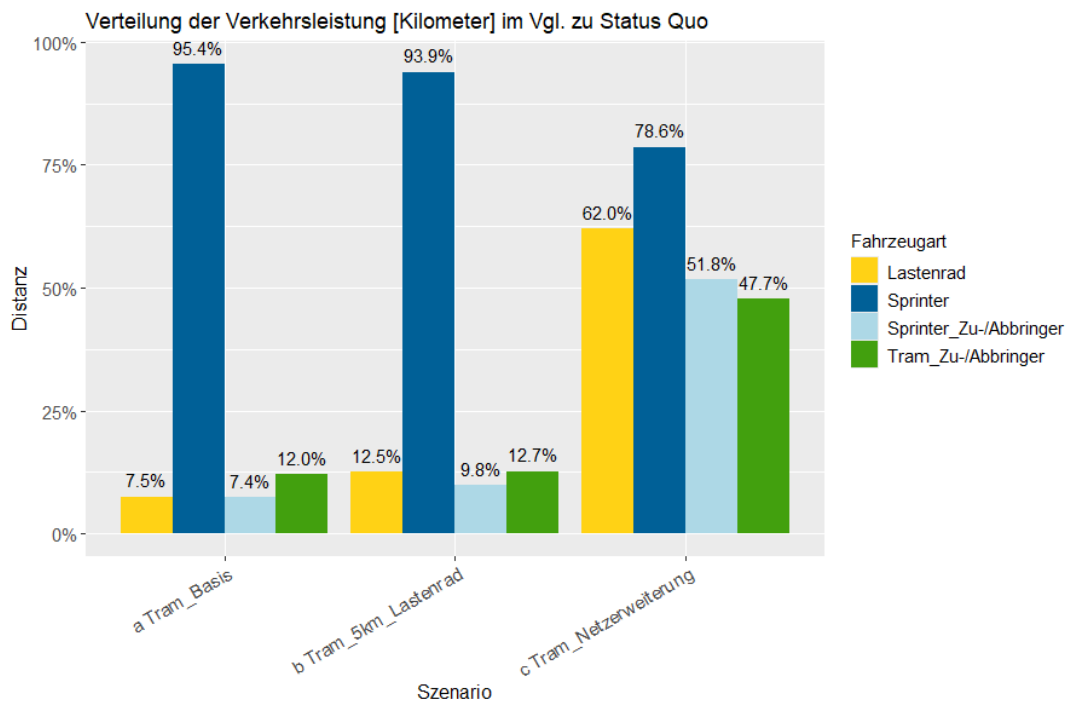


Abbildung 2-64: Analyse der Verkehrsleistung ausgewählter Szenarien der LogIKTram

In einem Szenario (b) wurden die Auswirkungen betrachtet, die eine Erhöhung der Lastenradradien von 3km auf 5km auf die Verkehrsleistung hat. Durch die Erhöhung der Lastenradradien können ausgehend von den City-Hubs mehr Kundinnen und Kunden per Lastenrad erreicht und damit über eine Transportkette, die die LogIKTram enthält, beliefert werden. In den Modellergebnissen zeigt sich dies in einer weiteren Reduktion der Sprinterverkehrsleistung und damit einhergehend einem parallelen Anstieg der Verkehrsleistung der Lastenräder sowie der Sprinterzu-/abbringer im Vergleich zum Basisszenario. Allerdings erfolgt der Rückgang nicht proportional zum

Anstieg des Lastenradradius. Dies liegt u.a. in der Erreichung des Maximums der Transportkapazität mit der LogIKTram, die durch die maximal möglichen Fahrplanfahrten in den für den Warentransport zugelassenen Zeitfenstern determiniert wird.

Welche verkehrlichen Wirkungen eine Ausweitung des LogIKTram-Konzepts auf weitere Straßenbahnlinien und damit eine deutliche Erhöhung der maximalen Transportkapazität hat, wurde in einem weiteren Szenario untersucht (c). Neben weiteren Linien, in denen ein Transport von Lastenradboxen möglich ist, wurden entsprechend auch weitere City-Hubs im Stadtgebiet definiert und in der Modellierung berücksichtigt. Die Simulationen zeigen, dass eine massive Angebotserweiterung mit einem deutlicheren Rückgang der Sprinter-Verkehrsleistung und damit einem deutlichen Anstieg der Lastenrad-Verkehrsleistung einhergehen. Allerdings zeigen die Ergebnisse auch, dass sich das zuvor erörterte Problem der Zu- und Abbringer-Touren mit Sprintern zwischen Distributionszentrum und Übergabehaltestelle weiter verschärft. Erst wenn dieses nachhaltig gelöst ist, kann das Konzept der LogIKTram zu einer Reduktion des motorisierten Zustellverkehrs beitragen.

In einem weiteren Zukunftsszenario wurden die Effekte des LogIKTram-Konzepts bei einem erwartbaren Anstieg der Paketnachfrage um etwa 30% im Vergleich zu heute analysiert. Die Wachstumsprognose basiert auf Schätzungen der BIEK-Studie (BIEK 2023). Die Modellanalysen zeigen, dass – ceteris paribus – trotz deutlich mehr zu transportierender Pakete kein weiterer Anstieg in der LogIKTram-Nutzung zu erwarten sind, wenn die Rahmenbedingungen aus dem Basisszenario übernommen werden. Lediglich leichte Rückgänge in der Lastenrad-Verkehrsleistung sind zu beobachten, die auf Effizienzverbesserungen durch eine stärkere Bündelung der Paketnachfrage in den Lastenradtouren erreicht wird. Die Analyse verdeutlicht, dass der Handlungsdruck in der Zukunft weiter steigen wird, um einem stetigen Anstieg der Verkehrsleistung motorisierter Zustellfahrzeuge der KEP-Dienstleister entgegenzuwirken.

Kurzzusammenfassung

Insgesamt deuten die bisherigen Modellergebnisse allerdings darauf hin, dass durch die Einführung der LogIKTram zunächst eine positive Wirkung auf das Verkehrssystem zu erwarten ist, da Sprinter-Fahrten auf nachhaltigere Verkehrsmittel verlagert werden können. Überschattet wird dieser positive Trend aktuell noch von den notwendigen Transporten der Lastenradboxen von den Distributionszentren zu den Übergabehaltestellen der LogIKTram. Werden diese ebenfalls mit Sprintern durchgeführt, entsteht, aktuell und unter den geographischen Bedingungen in Karlsruhe, mehr Verkehr als durch die LogIKTram eingespart werden kann. Allerdings zeigen die Ergebnisse große Schwankungen, die abhängig von verschiedenen Konzeptentscheidungen sind. Die Stärke des Effekts wird dabei maßgeblich von der maximal möglichen Transportkapazität der Straßenbahnwagen abhängen, die sich aus der Anzahl der Linien ergibt, in denen ein Transport von Lastenradboxen möglich ist, ebenso wie den Zeitfenstern, in denen ein Transport erlaubt ist. Des Weiteren spielen die Standortwahl und Anzahl der City-Hubs eine zentrale Rolle sowie die

Anzahl der von dort erreichbaren Kundinnen und Kunden. 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 jeder City-Hub zusätzliche Kosten und muss komplexe infrastrukturelle Voraussetzungen erfüllen, weshalb jeder City-Hub seitens der Stadt- und Verkehrsplanerinnen und -planer sowie KEP-Dienstleister mit dem möglichen Potential, Verkehr verlagern zu können, abgewogen werden muss. Weiterhin ist die Attraktivität der LogIKTram bei den KEP-Dienstleistern eine wichtige Größe. Diese spiegelt sich in der aktuellen Modellierung in der Nutzenfunktion der Transportketten wider. Da Entscheidungen zur Transportkettenwahl von KEP-Dienstleistern getroffen werden, die in erster Linie an Kundenzufriedenheit und Kosteneffizienz interessiert sind, sollten Verkehrsplanerinnen und -planer sowie Politikerinnen und Politiker auch über ein geeignetes Anreizsystem und/oder gesetzliche Regelungen zur Förderung des schienengebundenen Transports nachdenken, ebenso wie geeignete Push- und Pull-Maßnahmen. Allem voran ist in zukünftigen Arbeiten zu klären, wie der Effizienzverlust des neuartigen Konzepts, den die aktuell noch notwendigen Transporte von Lastenradboxen zwischen den Distributionszentren der KEP-Dienstleister und der Übergabehaltestelle der LogIKTram verursachen, umgangen oder reduziert werden kann. Nur wenn diese effizient möglich sind oder z. B. durch direkte Gleisanschlüsse vollständig wegfallen, kann das Konzept der LogIKTram sein verkehrliches Potential entfalten.

2.1.6 AP6: Öffentlichkeitsarbeit

Das Arbeitspaket Öffentlichkeitsarbeit spielte eine zentrale Rolle bei der Kommunikation mit der Logistik-Fachwelt (z.B. Verkehrsbetriebe, Fahrzeughersteller, Logistik-Unternehmen, Kommunale Verwaltungen), Technik-Anbietern sowie Bürgern und Politik. Projektfortschritte und -ergebnisse sowie die Demonstration und Verbreitung der erarbeiteten Lösungen wurden während der Projektlaufzeit kommuniziert.

Professionelles Fotoshooting

Um die visuellen Materialien des Projekts aufzuwerten, wurde ein professionelles Fotoshooting durchgeführt. Die entstandenen Bilder wurden auf der Website, in Broschüren, Flyern und bei Präsentationen verwendet und trugen dazu bei, das Projekt ansprechend und greifbar zu präsentieren.



Abbildung 2-65: Auswahl von Fotos aus professionellem Fotoshooting

Projektwebsite

Zu Beginn des Projekts wurde eine umfassende und benutzerfreundliche Projektwebsite in deutscher Sprache erstellt. Diese Website diente als zentrale Informationsplattform für alle Interessierten. Aufgrund der hohen internationalen Nachfrage wurde die Website ab Januar 2023 auch auf Englisch verfügbar gemacht. Sie beinhaltet detaillierte Informationen über die Projektziele, Fortschritte, Partner und Veranstaltungen.



Abbildung 2-66: Startseite der LogIKTram-Projektwebsite

Projektflyer und Exponatkarten

Um das Projekt in kompakter Form vorzustellen, wurden informative und ansprechend gestaltete Projektflyer und Exponatkarten entwickelt. Diese Materialien wurden bei verschiedenen Veranstaltungen, Konferenzen und Messen verteilt, um eine breite Zielgruppe zu erreichen und das Interesse an den Projektergebnissen zu wecken.



Abbildung 2-67: Exemplarische Übersicht Printmaterialien

Newsletter

Ein wichtiger Bestandteil der Öffentlichkeitsarbeit war der quartalsweise erscheinende Newsletter. Dieser Newsletter stellte sowohl Highlights der letzten drei Monate als auch bevorstehende Veranstaltungen vor. Er wurde an eine Mailingliste versendet, die sowohl Fachleute als auch interessierte Bürger umfasste.

Informationsforen für Bürger und Fachwelt

Zahlreiche Informationsforen wurden organisiert, um sowohl Bürger als auch Fachleute über das Projekt zu informieren und in den Dialog zu treten. Diese Foren, beispielsweise der Tag der Schiene oder BVMW macht mobil, boten eine Plattform für den Austausch von Ideen und die Diskussion über die Herausforderungen und Lösungen im urbanen Güterverkehr.

Besuche von Delegationen

Im Laufe des Projekts wurden zahlreiche Delegationen empfangen. Diese Besuche boten eine ausgezeichnete Gelegenheit, das Projekt vorzustellen, Fragen zu beantworten und wertvolles Feedback zu erhalten.

Tabelle 2.1.5: Übersicht von Delegationsbesuchen

Datum	Delegation
21.02.2022	Oliver Luksic, Parlamentarischer Staatssekretärs des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr
22.02.2022	Studierende der Masterstudiengänge Betriebswirtschaft und Wirtschaftsingenieurwesen der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien Offenburg
09.05.2022	Herr Dr. Patrick Rapp, Staatssekretär im Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus des Landes Baden-Württemberg
16.02.2023	Delegation der SNCF – Société Nationale des Chemins de Fer Français
20.02.2023	Delegation des japanischen Ministeriums für Land, Infrastruktur, Transport und Tourismus
26.06.2023	Präsidium des KIT

Social Media

Die Social Media-Kanäle X (ehemals Twitter) und LinkedIn sowie die KarlsruheApp wurden intensiv genutzt, um aktuelle Informationen und Neuigkeiten über das Projekt zu verbreiten. So wurde beispielsweise die Teilnahme an Veranstaltungen und Forschungsergebnisse aus dem Projekt kommuniziert. Diese Kanäle ermöglichten eine schnelle und effektive Kommunikation mit einer breiten Zielgruppe und erzielten auf LinkedIn mit Höchstwerten von beispielsweise 2.174 (anlässlich der Vorstellung des Projektes auf der IT-TRANS 2024) und 3.327 Impressions (anlässlich der Abschlussdemonstration).

Demonstrationen und Vorträge zum Technologietransfer auf Fachtagungen und Messen

LogIKTram wurde auf verschiedenen Fachtagungen, Konferenzen und Messen durch Demonstrationen, Vorträge und Posterpräsentationen vorgestellt. Diese Aktivitäten trugen dazu bei, die erzielten technologischen Fortschritte und Innovationen einem Fachpublikum nahezubringen und den Technologietransfer zu fördern.

Tabelle 2.1.6: Übersicht von Fachveranstaltungen

Datum	Ort	Veranstaltung
16.03.2022	Baden-Airpark, Deutschland	Fachtagung „Klimafreundlicher Güterverkehr und Herausforderungen der Logistikbranche“ von Bundesverband Mittelständische Wirtschaft (BVMW)
10.-12.05.2022	Karlsruhe, Deutschland	IT Trans, Stand zur Gesamtinitiative regio-KArgo
17.-18.05.2022	Mannheim, Deutschland / online	5. Regionalkonferenz Mobilitätswende „Regionale und urbane Güterbelieferung auf der Schiene“
07.-09.09.2022	Mailand, Italien	European Transport Conference (ETC)
15.09.2022	Duisburg, Deutschland	innocam.THEMENFORUM „Logistik im Kontext der automatisierten und vernetzten Mobilität“
16.-17.09.2022	Karlsruhe, Deutschland	Tag der Schiene zur Gesamtinitiative regio-KArgo inkl. Besuch von Ralf Rohrbach vom Projektträger DLR
25.-27.09.2022	Weimar, Deutschland	Universitätstagung „Verkehrswesen“
01.12.2022	Karlsruhe, Deutschland	Fachtagung „Nachhaltige Projekte aus verschiedenen Kommunen“ von Bundesverband Mittelständische Wirtschaft (BVMW)
08.-12.01.2023	Washington DC, USA	102 nd Transportation Research Board Annual Meeting
21.-22.03.2023	Dortmund, Deutschland	6 th Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic
19.04.2023	Karlsruhe, Deutschland	BMDV UAG „Versorgung von Städten mit Schienengüterverkehr“
04.-07.06.2023	Barcelona, Spanien	UITP Global Public Transport Summit

Datum	Ort	Veranstaltung
17.-21.07.2023	Montréal, Kanada	World Conference on Transport Research (WCTR)
09.09.2023	Berlin, Deutschland	2 nd International Symposium on Multi-Agent Freight Transport Simulation
16.09.2023	Karlsruhe, Deutschland	Tag der Schiene
18.-20.09.2023	Madrid, Spanien	International Conference on Intelligent Traffic and Transportation (ICITT)
10.-15.10.2023	Karlsruhe, Deutschland	KIT Science Week
18.-20.10.2023	Berlin, Deutschland	Deutscher Logistik-Kongress der BVL (Bundesvereinigung Logistik)
21.11.2023	Karlsruhe, Deutschland	Cross-Clustering-Event - Smart City meets Geoinformatik
07.-11.01.2024	Washington DC, USA	103 rd Transportation Research Board Annual Meeting
14.-16.05.2024	Karlsruhe, Deutschland	IT Trans, Stand zur Gesamtinitiative regio-KArgo

Presse- und Medienarbeit

Die Pressearbeit war ein weiterer wichtiger Bestandteil der Öffentlichkeitsarbeit. Regelmäßige Pressemitteilungen informierten die Medien über wichtige Meilensteine und Ergebnisse des Projekts. So wurden im Laufe der Projektlaufzeit 84 Beiträge mit 54 Berichterstattungen in (Online-)Medien veröffentlicht. Außerdem wurde zusätzlich in 10 wissenschaftlichen Fachzeitschriften über das Projekt berichtet.

- Fachpublikationen:

- 2022: Fäßler, Lisa; Dittrich, Ingo; Lutz, Theo; Ziegler, Jonas; Frindik, Roland; Koch, Günter: Logistikkonzept für Gütertransporte per Straßenbahn. Analyse logistischer Anforderungen an ein Güterstraßenbahnkonzept, in: *Internationales Verkehrswesen* 74 (2022) 3, S. 46–51.
- 2022: Ziegler, Jonas; Dittrich, Ingo; Lutz, Theo; Fäßler, Lisa: Planerische Herausforderungen im intermodalen Transport. Datenmodelle für den Austausch von Planungsdaten für regionale Gütertransporte. In: *Industrie 4.0 Management* 38 (2022) 6, S. 59–62
- 2022: Fäßler, L.; Dittrich, I.; Lutz, T.; & Ziegler, J.: LogIKTram: Nachhaltiger straßenbahnbasierter Gütertransport. In: *Forschung im Fokus* (2022) 25, S. 66–68
- 2022: Frindik, R., Lucke, H.-J., Dittrich, I., Fäßler, L., Spranger-Schneider, S.: „Güterstraßenbahn“ In: Trojahn, S., Dittrich, I., Frindik R.: „Grundlagen Logistik“, Huss-Verlag, 2022/2023: Dittrich, I.; Ziegler, J.; Lutz, T.; Menzer, M.: LogIKTram: Konzepte für den regionalen Gütertransport per Stadtbahn. In: *Forschung im Fokus* (2023) 26, S. 46–49

- 2023: Ziegler, J.; Menzer, M.; Lutz, T.; Ditrich, I.: Data formats for communication between freight tram operator and forwarder. In: *M. Shafik (Hg.): Emerging Cutting-Edge Developments in Intelligent Traffic and Transportation Systems: Proceedings of the 7th International Conference (ICITT 2023), Incorporating the 7th International Conference on Communication and Network Technology (ICCNT) (2024)* 50, S. 295-306
- 2023: Barthelmes, L.; Görgülü, M. E.; Kübler, J.; Kagerbauer, M.; Vortisch, P.: Microscopic Agent-Based Parcel Demand Model for the Simulation of CEP-Based Urban Freight Movements to and from Companies. *Advances in Resilient and Sustainable Transport – Proceedings of the 6th Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic 2023*. Ed.: U. Clausen, 75–92, Springer International Publishing. [doi:10.1007/978-3-031-28236-2_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-28236-2_6)
- 2023: Kübler, J.; Barthelmes, L.; Görgülü, M. E.; Kagerbauer, M.; Vortisch, P. Modeling Relations Between Companies and CEP Service Providers in an Agent-Based Demand Model using Open-Source Data. *Procedia Computer Science*, 220, 486-494. [doi:10.1016/j.procs.2023.03.062](https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.03.062)
- 2023: Barthelmes, L.; Görgülü, M. E.; Kübler, J.; Kagerbauer, M.; Vortisch, P. Modellbasierte Ermittlung von verkehrlichen Potentialen eines stadtbahnbasierten Gütertransports im Projekt LogIKTram in Karlsruhe. *Journal für Mobilität und Verkehr*, 16, 50-58. [doi:10.34647/jmv.nr16.id103](https://doi.org/10.34647/jmv.nr16.id103)
- 2024: Wendel, J.; Bekcer, C.; Demetrio, A.; Elgner, F.; Hameister, H.; Warzok, D.: Integrating parcel delivery services into public transport operations through a common ICT platform. *Springer Lecture Notes in Mobility* (im Druck)
- 2024: Paper (peer-reviewed) und Vortrag auf der ICE IEEE/ITCM Konferenz: „Bibliometric analysis as a means of efficiently evaluating trends in artificial intelligence“, Veröffentlichung bei IEEE Xplore vorgesehen

Publikumswirksame Abschlussdemonstration

Die Abschlussdemonstration des Projekts war ein Ereignis, das rund 70 Gäste und Projektpartner anzog, darunter prominente Teilnehmende, wie beispielsweise Herr Christian Liebich vom Fördermittelgeber BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) und Herr Ralf Rohrbach vom Projektträger DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.). Im Anschluss an eine Präsentation der einzelnen Arbeitspakete am Vormittag wurde eine Testfahrt mit Be- und Entladung einer Bahn vorgeführt, an der auch Medienvertretende teilnahmen, wie beispielsweise Badische Neueste Nachrichten, Radio Regenbogen, KA-News und SWR. Ein weiteres Interview der Konsortial- und Projektleiter mit der MIT Technology Review fand am 19. Juli 2024 statt. Im Nachgang an die Abschlussveranstaltung wurde in 21 Medien, darunter neben den bereits genannten Redaktionen auch in der Eurotransport, EuRail Press, Informationsdienst Wissenschaft, Verkehrsrundschau und anderen Publikationen berichtet, sodass rund 71.000 Lesende im Anschluss an die Veranstaltung erreicht wurden.



Abbildung 2-68: Impressionen von der Abschlussdemonstration

2.1.7 AP7: Projektmanagement

Das AP7 beinhaltete die koordinierenden und steuernden Managementaufgaben zur Sicherstellung eines erfolgreichen Projektabschlusses. Eine wesentliche Aufgabe bestand darin, sowohl organisatorische als auch technisch-inhaltliche Schnittstellen zwischen den einzelnen Partnern und den Arbeitspaketen zu schaffen und zu pflegen. Des Weiteren wurden Arbeitstreffen unter Einbeziehung aller Projektpartner und themenspezifische Workshops organisiert. Zusätzlich wurde das Berichtswesen, mit dessen Hilfe der Projektträger regelmäßig über den Fortschritt des Projekts informiert wurde, durch das AP7 koordiniert.

Trotz eines schwierigen Starts während der Corona-Pandemie in 2021 und den damit verbundenen Einschränkungen bzgl. der Möglichkeit von Vororttreffen konnte das Projekt durch die Organisation von digitalen Treffen bis einschließlich Meilenstein 3 (M3; s. Tabelle 2.1.5) mit geringen Verzögerungen innerhalb der genehmigten Projektlaufzeit bearbeitet werden. Dabei wurde im Wesentlichen an „nicht physischen“ Themen, wie Konzepten und Software-Lösungen gearbeitet. Die Arbeiten in AP4 (Gütertramsystem) fanden zunächst fokussiert auf den e-Trailer statt, wobei diese Arbeiten im Wesentlichen durch das KIT-FAST ohne Einbindung anderer Projektpartner durchgeführt werden konnten. Physischen Treffen für Labor- und Werkstattarbeiten mit anderen Partnern waren daher nicht notwendig. Die konzeptionellen Schritte bzgl. des Stadtbahnfahrzeug-Umbaus konnten in digitalen Abstimmungsterminen erfolgen. Durch diese Projektmanagement-Maßnahmen ergaben sich in der ersten Phase keine nennenswerten Verzögerungen.

Die ab M4 benötigten physischen Abstimmungstreffen am Stadtbahnfahrzeug führten aufgrund der allgemein gültigen Corona-Bestimmungen sowie der Betriebshofspezifischen Abstandsregelungen zu ersten Verzögerungen. Die zugleich aus der Corona-Zeit noch massiv gestörten Lieferketten wurden seit Februar 2022 durch den Ukraine-Krieg noch deutlich unzuverlässiger bzw. nicht planbar. Dadurch sind einige zentrale Hardwarekomponenten erst deutlich später als ursprünglich geplant verfügbar gewesen. Herausfordernd war dabei, dass die ins Stadtbahnfahrzeug eingebaute Messtechnik aufgrund von entsprechenden Regularien im Schienenverkehrsbereich bestimmte Zertifizierungen aufweisen muss, so dass ein Wechsel auf andere Produkte nicht möglich war und die Lieferzeit nicht verkürzt werden konnte.

Die Arbeiten am Stadtbahnfahrzeug waren darüber hinaus nur in der Werkstatt der Verkehrsbetriebe Karlsruhe (VBK) möglich, wobei ebenfalls Abstandsregelungen aus der Corona-Pandemie eingehalten werden mussten. Als Folge konnte der Einbau der Verkabelung sowie der Messtechnik erst mit deutlicher Verspätung im September 2023 abgeschlossen werden.

Technischen Modifikationen am Fahrzeug mussten aufgrund des künftig notwendigen Genehmigungsprozesses für Fahrten auf der öffentlichen Schiene aufwändig dokumentiert werden. Diese Dokumentation konnte erst im November 2023 zufriedenstellend abgeschlossen werden. Dementsprechend hatte sich die Abstimmung mit der für die Zulassung nach BOStrab zuständige Technische Aufsichtsbehörde (TAB) bzgl. der rückwirkungsfrei eingebauten Messtechnik deutlich verzögert. Der Nachweis der Rückwirkungsfreiheit und die Freigabe durch die TAB war neben der Zustimmung des Betriebsleiters BOStrab eine Voraussetzung für den Betrieb des Schienenfahrzeugs auf der öffentlichen Schiene. Grundlage hierfür war der Abschluss eines Gutachtens des TÜV Rheinland im März 2024.

Die Testfahrten zur Erhebung des Fahrzeugverhaltens auf der öffentlichen Schiene konnten demnach erst im März und April 2024 stattfinden. Ein solcher Fahrbetrieb war allerdings zwingende Voraussetzung für die Aufzeichnung realistischer Fahrzeugdaten, welche die Basis für das Training der KI für den KI-basierten Haltestellenassistent zur genauen Positionierung der Stadtbahn an Bahnsteig darstellte.

Erst nach Abschluss dieser Testfahrten auf der öffentlichen Schiene, konnte mit dem mechanischen Umbau des Stadtbahnfahrzeugs begonnen werden. Hierzu zählten einerseits die Montage der Einrichtungen für die automatisierte Ladungssicherung, die Anzeigeelemente für die Triebwagenführenden sowie die Fahrzeugleittechnik zum Ansteuern der Fahrmotoren bzw. Bremse durch den KI-basierten Haltestellenassistenten. Grund hierfür ist, dass die notwendigen Modifikationen zum Erlöschen der Betriebserlaubnis für das Fahren im öffentlichen Bereich führten und danach nur noch Fahrten auf dem Gelände des Betriebshofs möglich waren.

Die oben genannten Modifikationen waren aber notwendig, um das Gesamtsystem aus IKT-Plattform, Stadtbahnfahrzeug und e-Trailer zu demonstrieren bzw. zu testen. Dies betrifft vor allem die Anbindung des Stadtbahnfahrzeugs an die IKT-Plattform, die Vorgänge innerhalb der IKT-Plattform, die Kommunikation zwischen dem Stadtbahnfahrzeug und dem e-Trailer sowie die Abläufe der automatisierten Ladungssicherung des e-Trailer im Stadtbahnfahrzeug. Zusätzlich wurden die Funktionstests nach Umbau des Schienenfahrzeugs auf dem Betriebshof benötigt, um entsprechende Daten, z.B. zum Zeitbedarf für das automatisierte Be- bzw. Entladen des Ladungsträgers bzw. dessen Sicherung in der Stadtbahn, zu erfassen. Die Demonstration des Gesamtsystems im Rahmen eines publikumswirksamen Abschlussevents war ebenfalls nur nach Umsetzung der entsprechenden Umbauten am Stadtbahnfahrzeug möglich und verzögerte sich damit auf Juni 2024.

Unter Berücksichtigung der eingetretenen Verzögerungen (s. Tabelle 2.1.11) und der Erfahrungen bei der Umsetzung in anderen Projekten, wurde eine Verlängerung der Gesamtprojektlaufzeit von 36 auf 40 Monate bis Ende Juni 2024 beantragt und bewilligt.

Tabelle 2.1.11: Meilensteine

Meilenstein Nr.	Projektmonat (Antrag)	Projektmonat (real)	Ziel
M1	6	23	<ul style="list-style-type: none"> • Stakeholder ermittelt und Use Cases beschrieben • Anforderungs- und Bewertungskatalog liegt vor • Wagenkasten für den funktionalen Einbau vorbereitet • Projektwebsite und Projektflyer verfügbar
M2	12	17	<ul style="list-style-type: none"> • Logistikkonzept Version 1 ist entwickelt • Spezifikation der IKT-Plattform liegt vor • Fertiges Fahrzeugkonzept • Mechanisches Konzept für Landungshandling und -sicherung erstellt • Verkehrsnachfragemodell für Güterverkehr in der Region Karlsruhe
M3	18	22	<ul style="list-style-type: none"> • Lastenheft und Umbaukonzept definiert. • Planungsmodell Version 1 ist entwickelt • Anbindung an IKT-Plattform definiert • Simulationsmodell Fahrzeugumgebung aufgebaut • Simulationsmodell Ladungshandling validiert
M4	24	39	<ul style="list-style-type: none"> • Betreibermodell Version 1 ist entwickelt • Betriebliche Randbedingungen für das Fahrzeugkonzept festgelegt • Automatisierungskonzept für Landungshandling verfügbar • Fahrzeug für Umbau vorbereitet • Kombiniertes Verkehrsnachfragemodell für Güter- und Personenverkehr in der Region Karlsruhe • Verifikation Simulationsmodell Fahrzeug abgeschlossen • Evaluierung Fahrzeugkonzept erfolgt • Konzept für Ladungshandhabung und Ladungssicherung evaluiert • Fahrzeug ist umgebaut, Ladungsträger integriert
M5	30	40	<ul style="list-style-type: none"> • Use Cases, Logistikkonzept, Planungsmodell und Betreiberkonzept final abgeschlossen • IKT-Plattform prototypisch umgesetzt • Infrastruktur Testbetrieb ist realisiert • Modellhafte Darstellung der Zusammenhänge des LogIKTram-Konzepts
M6	36	40	<ul style="list-style-type: none"> • Validierung des Gesamtkonzepts auf Basis von Tests abgeschlossen • Konzept für die Linienführung und optimale verkehrliche Ausgestaltung einer Umsetzung des LogIKTram-Konzepts • Analyse der Wirkungen des LogIKTram-Konzepts • Vorstellung auf Messen und publikumswirksame Abschlussdemonstration erfolgt

2.2 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Tabelle 2.2.1: Verwendung Teilvorhaben Konsortialführer

Geplantes Ergebnis	Verwendung der Zuwendung	Erzieltes Ergebnis
Feststellung der Platzverhältnisse und Definition der Einbaugrößen im Schienenfahrzeug der AVG.	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Auftrag VBK 	Für das Projekt LogIKTram wurde der Zweisystem-Hochflurstadtbahnwagen 810 vom Typ GT8-11C-2S zur Verfügung gestellt. Für dieses Fahrzeug wurde durch die AVG und die unterbeauftragte VBK gemeinsam mit den Projektpartnern auf Grundlage von technischen Zeichnungen und Dokumentationen analysiert, welche Sitzkästen und/oder Komponenten im Schienenfahrzeug nicht, teilweise und vollständig entfernt sowie welche Sitzkästen und/oder Bauteile verschoben werden können.
Vorbereitung des Wagenkastens im Schienenfahrzeug auf den funktionalen Einbau beendet.	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Auftrag VBK - sonst. unmittelbare Vorhabenkosten (anteilige Versicherungskosten) 	<p>Die AVG steuerte in diesem Rahmen die Arbeitsschritte zum Umbau des Schienenfahrzeugs 810 vom Typ GT8-100C-2S um den Einbau der Teilkomponenten für die KI-basierte Regelung zum positionsgenauen Halt und für die Ladungssicherung der Projektpartner HITACHI RAIL (ehem. THALES), INIT und KIT-FAST aufeinander abzustimmen. Die Umsetzung des Fahrzeugumbaus wurde zudem in Abstimmungsterminen mit der Betriebsleitung BOStrab, dem EBL, der TAB und dem EBA abgestimmt.</p> <p>Damit die Einbauten der Projektpartner erfolgen konnten, wurden von der Unterbeauftragten Werkstatt der VBK alle Verkabelungen zum Anschluss der einzelnen Teilkomponenten im Schienenfahrzeug vorbereitet und einzelnen Sitzkästen und/oder Komponenten aus dem Schienenfahrzeug ausgebaut, modifiziert oder versetzt.</p>
Schaffung geeigneter Testumgebungen.	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Auftrag VBK 	Im Rahmen mehrerer Ortsbesichtigungen und Abstimmungen mit der Betriebsleitung BOStrab, dem EBL und den Projektpartnern wurde der Übungshaltepunkt der Feuerwache am Betriebshof West der VBK und AVG so-

		<p>wie das anliegende Gleis 71 als Testumgebung bzw. als Ort der Abschlussdemonstration festgelegt. In diesem Zusammenhang wurden auch Anforderungen an ein Sicherheitskonzept sowie an die notwendige Maßnahme zur Höhen- und Spaltüberbrückung zwischen dem Eingang in das Schienenfahrzeug und dem Haltepunkt definiert.</p>
<p>Einbau der projektspezifischen Zusatztechnik im Schienenfahrzeug abgeschlossen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Auftrag VBK 	<p>Auf Grundlage des vorbereiteten Wagenkastens konnten die Projektpartner HITACHI RAIL (ehem. THALES), INIT und KIT-FAST unter Steuerung der AVG zusätzliche technische Komponenten für die KI-basierte Regelung und die Ladungssicherung im Schienenfahrzeug 810 vom Typ GT8-100C-2S einbauen. Dies umfasst u.a. ein Kamerasystem zur Umfelderkennung und Distanzbemessung zum idealen Haltepunkt, ein Messgerät zur Erhebung des Fahrzeugbremsverhaltens, das Leittechnik Gateway (LTG) als Schnittstelle zur Fahrzeugleittechnik, ein neuer Bordcomputer sowie das dazugehörige TouchIT3 zur Informationsanzeige, eine Rechneinheit für die KI und ein Router zur Kommunikation zwischen Ladungsträger und Schienenfahrzeug. Während des Umbauprozesses wurde zudem ein Umbautagebuch geführt, um die einzelnen Arbeitsschritte bei künftigen Abstimmungen mit der TAB und dem EBA nachvollziehen zu können.</p> <p>Für das LTG und das Messgerät wurde darüber hinaus durch die Unterbeauftragte VBK ein Gutachten zur Rückwirkungsfreiheit beim TÜV Rheinland beauftragt. Die anschließenden Messfahrten zur Erhebung des Fahrzeugbremsverhaltens wurden ebenfalls über die AVG organisiert. Während der Erhebungszeit befand sich das Fahrzeug im Einsatz der VBK Fahrschule auf der öffentlichen Schiene. So konnten unter realen Bedingungen Daten zum Bremsverhalten des Schienenfahrzeugs 810 vom Typ GT8-100C-2S im BOStrab-Bereich erhoben werden.</p>

<p>Einbau der Ladungssicherungstechnik im Schienenfahrzeug abgeschlossen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Auftrag VBK 	<p>Auf Grundlage des vorbereiteten Wagenkastens konnte der Projektpartner KIT-FAST unter Steuerung der AVG die notwendigen Komponenten der Ladungssicherung im Schienenfahrzeug verbauen. Dies umfasst den Bau eines Multifunktionsbereichs bzw. einer Mehrzweckfläche, der im Schienenfahrzeug 810 vom Typ GT8-100C-2S nicht vorhanden war, sowie einer Haltestange unterhalb der Klappsitze. An dieser Querstange kann der am Ladungsträger angebrachte Schließmechanismus bei der automatisierten Anfahrt einrasten und sichert den Ladungsträger.</p> <p>Für den Umbau wurden von Seiten der AVG und der VBK in Abstimmung mit der Betriebsleitung BOStrab und dem EBL die einzuhaltenden Normen definiert und an das KIT-FAST übergeben.</p>
<p>Gütertramkonzept demonstriert.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Auftrag VBK - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten 	<p>Zur Demonstration des Gütertramkonzeptes und zur Vorbereitung der Abschlussveranstaltung wurden von der AVG zahlreiche Abstimmungstermine und Funktionstests vor Ort geplant sowie umgesetzt und begleitet. So konnte sichergestellt werden, dass das angestrebte Ziel zur Demonstration der automatisierten Be- und Entladung sowie der Ladungssicherung während der Fahrt im Schienenfahrzeug erreicht wird. Auch die technische Machbarkeit der KI-basierten Regelung zum punktgenauen Halten des Schienenfahrzeugs konnte im Rahmen der Funktionstests nachgewiesen werden. Bei der Abschlussdemonstration wurde dieser Halteassistent jedoch nicht demonstriert, da zu diesem frühen Entwicklungsstadium keine ausreichende Ausfallsicherheit gewährleistet werden konnte.</p>

Tabelle 2.2.2: Verwendung Teilvorhaben B (KIT)

Geplantes Ergebnis	Verwendung der Zuwendung	Erzieltes Ergebnis
Ableitung von Anforderungen	- Personalmittel	Die Anforderungen an das Gütertram-Fahrzeug sowie an die technischen Systeme für die Ladungshandhabung wurden erarbeitet und dokumentiert.
Randbedingungen Fahrzeugplattform	- Personalmittel	Die Randbedingungen aus der BOStrab, der EBO, den Regelwerken der Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH (VBK) und der Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH (AVG) sowie einschlägigen Normen und anerkannten Regeln der Technik wurden abgeleitet und dokumentiert.
Fahrzeugkonzept	- Personalmittel	Ein morphologischer Kasten mit den Kategorien (Parameter)Transportmodus, Ladungsträger, Beladungstechnik (Handhabung), Beladungsmethode, Position Ein-/Ausladungsöffnung, Befestigungsmethode, Beladungsart, Verkehrsart und Umschlagplatzart wurde ausgearbeitet. Dabei wurden auch die Erkenntnisse aus AP1 zum Logistikkonzept berücksichtigt. Aus dieser Entscheidungsmatrix wurden durch Kombination unterschiedlicher Ausprägungen mehrere Lösungsansätze entwickelt und bewertet.
Aus- und Umbaukonzept	- Personalmittel	Für das am besten bewertete Fahrzeugkonzept wurde für den von der AVG zur Verfügung gestellten Zweisystem-Hochflurstadtbahnwagen vom Typ GT8-11C-2S auf Grundlage von technischen Zeichnungen und Dokumentationen analysiert, welche Sitzkästen und/oder Komponenten im Schienenfahrzeug nicht, teilweise und vollständig entfernt sowie welche Sitzkästen und/oder Bauteile verschoben werden können. Darauf basierend konnte eine detaillierte Planung für den mechanischen Umbau des Stadtbahnfahrzeugs erstellt werden.

Anbindung IKT-Plattform	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Sachkosten für Kommunikationstechnik 	Zur Einbindung des Be- und Entladeprozesses in die IKT-Plattform wurden die Kommunikationsmöglichkeiten definiert. Der Ladungsträger wurde mit einem eigenen Access-Point ausgestattet, welcher sich sowohl in öffentliche Netze als auch in eigene Access Points (bspw. am Bahnsteig oder in der Tram) einwählen kann. Zusätzlich wurde die Möglichkeit einer 5G-Verbindung mittels SIM-Karte vorgehalten.
Festlegung und Definition der betrieblichen Randbedingungen für das Fahrzeugkonzept	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel 	Auf Basis statistischer Kennzahlen aus dem täglichen Betrieb der AVG wurden die betrieblichen Randbedingungen definiert. Dazu zählte insbesondere auch die Festlegung der aus bahnbetrieblicher Sicht anhand der Haltezeiten maximal möglichen Verladezeit der Güter.
Simulationsmodell Fahrzeug	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel 	Ein bereits am KIT- FAST bestehendes Simulationsmodell für Straßenbahnfahrzeuge wurde an das vorliegende Fahrzeugkonzept angepasst. Die Simulation berechnet die Längs- und Querkräfte während einer Fahrt, welche als Eingangsgrößen in die Auslegung der Ladungssicherung dienten. Dabei wurden ebenfalls Sonderfälle wie Gefahrenbremsungen oder Unfallsituationen betrachtet.
Randbedingungen Ladungshandhabung	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel 	Zur Festlegung der Randbedingungen für das System zum Ladungshandling wurden Vorgaben betrachtet, die sich aus der Form, der Größe und der Beweglichkeit der Ladungsträger ergeben. Basis hierzu waren die Ergebnisse der AP1 und AP2. Daneben wurden die fahrzeugseitigen Einschränkungen, wie zum Beispiel die Größe und Form der Fläche für das Abstellen der Ladung, erarbeitet. Ergänzend wurden relevante Randbedingungen aus der BOStrab, der EBO, den Regelwerken der Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH (VBK) und der Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH (AVG) sowie einschlägigen Normen und anerkannten Regeln der Technik berücksichtigt.

<p>Mechanisches Konzept für Ladungshandhabung und Ladungssicherung</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Investitionskosten für Ladungsträger eTrailer - Sachkosten für Komponenten der Ladungssicherung 	<p>Als Ladungsträger wurde ein elektrisch angetriebener Lastenradanhänger der Firma Nüwel angeschafft und im Projektverlauf entsprechend modifiziert bzw. erweitert.</p> <p>Unter Berücksichtigung der notwendigen Kräfte sowie der relevanten Normen konnte ein mechanisches Konzept für Ladungshandhabung und Ladungssicherung ausgearbeitet werden. Dieses basiert auf zwei handelsüblichen elektromotorischen Schnappriegelverschlüssen. Dabei wurden die elektromechanischen Komponenten direkt am Ladungsträger installiert, so dass der Eingriff in das Schienenfahrzeug minimiert werden., wodurch ein späteres Ausrollen im Markt begünstigt wird.</p>
<p>Konzept für Automatisierung der Ladungshandhabung</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Sachmittel für Ansteuerung Ladungsträger eTrailer 	<p>Für die automatisierten Fahrfunktionen wurde der eTrailer um eine zusätzliche Quersteuerung zum Erzeugen eines Lenkeinschlages am Vorderrad erweitert. Hierzu wurde ein zusätzlicher Aktor verbaut, welcher mittels Riemtrieb einen Lenkeinschlag am Vorderrad von $\pm 45^\circ$ ermöglicht. Der Aktor wurde auf eine übliche Steigung von Rampen von 6 % ausgelegt. Zur Anbindung des Aktors wurde die ursprüngliche Lenkachse gegen eine adaptierte Eigenfertigung ausgetauscht.</p>
<p>Evaluierung Konzept für Ladungshandhabung und Ladungssicherung</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel 	<p>In diversen Funktionstests wurde nachgewiesen, dass das automatisierte Ein- Und Ausfahren des eTrailers sowie dessen automatisierte Sicherung im Schienenfahrzeug innerhalb der üblichen Zeiten für den Fahrgastwechsel möglich ist</p>
<p>Umbau Fahrzeug sowie Aufbau Testbetrieb und Durchführung der Tests</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel 	<p>Die im Umbaukonzept definierten Modifikationen am Stadtbahnfahrzeug wurden mit Unterstützung der Werkstatt der VBK durchgeführt. Dabei wurden die von der AVG und der VBK in Abstimmung mit der Betriebsleitung BOStrab und dem EBL definierten, einzuhaltenden Normen entsprechend berücksichtigt.</p> <p>Zur Überprüfung der Funktionalitäten wurden gemeinsam mit den relevanten Partnern zahlreiche Tests mit dem Stadtbahnfahrzeug vor</p>

		Ort durchgeführt. Auch die technische Machbarkeit der KI-basierten Regelung zum punktgenauen Halten des Schienenfahrzeugs konnte im Rahmen der Funktionstests nachgewiesen werden. Bei der Abschlussdemonstration wurde dieser Halteassistent jedoch nicht demonstriert, da zu diesem frühen Entwicklungsstadium keine ausreichende Ausfallsicherheit gewährleistet werden konnte.
Demonstration	- Personalmittel	Zur Demonstration des Gütertramkonzeptes und zur Vorbereitung der Abschlussveranstaltung wurden gemeinsam mit den relevanten Partnern zahlreiche Abstimmungstermine und Funktionstests vor Ort durchgeführt.
Verkehrsnachfragemodell für Güterverkehr in der Region Karlsruhe	- Personalmittel	Entwicklung des logiTopp-Frameworks sowie Schaffung einer empirischen Datengrundlage für den Güterverkehr
Kombiniertes Verkehrsnachfragemodell für Güter- und Personenverkehr in der Region Karlsruhe	- Personalmittel	Kopplung des logiTopp und mobiTopp Frameworks; Entwicklung eines modularen, kombinierten Modellansatzes, der Open Source zur Verfügung gestellt wurde
Modellhafte Darstellung der Zusammenhänge des LogIKTram-Konzepts	- Personalmittel	Entwicklung eines zweistufigen Transportkettenwahlmodells zur Abbildung der intermodalen Transportkette mit LogIKTram
Konzept für die Linieneinführung und optimale verkehrliche Ausgestaltung einer Umsetzung des LogIKTram-Konzepts	- Personalmittel	Abgestimmtes Konzept zur Definition des Basiszenarios
Analyse der Wirkungen des LogIKTram-Konzepts	- Personalmittel	Bestimmung der verkehrlichen Wirkungen der LogIKTram auf Ebene der Verkehrsleistung in verschiedenen Szenarien

Tabelle 2.2.3: Verwendung Teilvorhaben C (FZI)

Geplantes Ergebnis	Verwendung der Zuwendung	Erzieltes Ergebnis
Anforderungsanalyse und -dokumentation	- Personalmittel	Analyse und Dokumentation von Anforderungen in Form von Use-Cases. Verfeinerung zu Funktionsmodulen und Spezifikation von Austauschformaten und Prozessen zum Datenaustausch. Ableitung von Gütekriterien mit Zielwerten. Zusammenfassung der Ergebnisse in einem Dokument „AP2-Anforderungsanalyse“.
Spezifikation der LogIKTram IKT Plattform	- Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten - Reisen	Ableitung von Technischen Anforderungen für eine integrierte IKT-Plattform für Logistikdienste im ÖPNV. Der Fokus lag hierbei auf Anforderungen an die Tracking-Komponente für die Sendungsverfolgung. Gemeinsame Entwicklung eines Architekturdiagramms und Spezifikation konkreter Austauschformate und Schnittstellen zwischen den Partnersystemen. Zusammenfassung der Ergebnisse in einem entsprechenden Spezifikationsdokument.
Integrierter IKT-Prototyp	- Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	Es wurde ein Prototyp sowie die Schnittstellen zur Integration mit Partnersystemen entwickelt. Der Fokus lag auf der Tracking-Komponente zur Verfolgung des Sendungsstatus. Hierzu entstand ebenfalls ein Frontend als Referenzimplementierung für die Einbindung der Sendungsverfolgung.
Getesteter Prototyp der IKT-Plattform	- Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	Entwicklung eines getesteten Prototyps als Teil des integrierten Gesamtsystems. Es wurden Werkzeuge für lokale Tests entwickelt. Darüber hinaus wurden Integrationstest und eine virtuelle Inbetriebnahme für die Tracking-Komponente durchgeführt.
Fahrzeugmodell und Simulationsmodell	- Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten - Material	Es wurde ein Fahrzeug- und Simulationsmodell zur Entwicklung und Test von automatisierten Tram-Fahrfunktionen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Sensorausstattungen entwickelt.

Konzept für Ladungshandling	- Personalmittel	Entwicklung eines Konzepts zum automatisierten Ladungshandling ohne Ladungsträger.
-----------------------------	------------------	--

Tabelle 2.2.4: Verwendung D (HSOG)

Geplantes Ergebnis	Verwendung der Zuwendung	Erzieltes Ergebnis
Stakeholder, Use Cases	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten 	Liste an relevanten Stakeholdern wurde definiert und fünf Domänen Transportdienstleister, Transportkunden, Zulieferer, Infrastrukturbetreiber und Regulierer zugeordnet. Die Vertreter der Domäne Transportkunden wurden im Laufe des Projekts in die Konzeption des Logistikkonzepts eingebunden. Es wurden Transportszenarien und daraus Anforderungsanalysen abgeleitet. Die drei Bereiche Stückgut, Kurier-/Express-/Paketdienste (KEP) sowie Lebensmittel- und Drogeriemärkte konnten als repräsentativ für die großen Transportströme beschrieben werden. Es wurden 100 Use-Cases definiert und daraus sechs Geschäftsmodelle abgeleitet. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die Anforderungsanalyse.
Logistikkonzept	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten 	Es wurde ein ausführliches und alle notwendigen Ebenen einer betriebswirtschaftlichen bis technischen Umsetzung abdeckendes Logistikkonzept erstellt. Ein allgemeines Vorgehensmodell für die Untersuchung eines Stadtbahnnetzes auf die Nutzbarkeit für Güterverkehre wurde erstellt. Es umfasst alle relevanten Unterthemen für eine solche Untersuchung. Dabei wurden zunächst Alternativen zur Lösung der jeweiligen Unterthemen erstellt und mit einem entwickelten Bewertungssystem analysiert und Empfehlungen erarbeitet. Das Vorgehensmodell wurde in verschiedenen Modellregionen testweise über studentische Arbeiten angewendet und damit validiert und weiterentwickelt. Die Hochschule Offenburg hatte speziell bei der Erstellung des Logistikkonzepts die Funktion der Koordination und Integration aller Einzelaspekte der

		Partner im Arbeitspaket. Final werden eine kurzfristige und eine langfristige Lösung vorgeschlagen und ausgearbeitet.
Planungskonzept	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten 	Die multimodale Transportkette wurde in einzelne Bestandteile zerlegt, und anhand der Use Cases den verantwortlichen Logistikpartnern Transportdienstleister, Zulieferer und Gütertrambetreiber zugeordnet. Anhand der jeweiligen notwendigen Transportprozesse wurden die Planungsaufgaben für die verschiedenen Zeithorizonte für strategische, taktische und operative Planung identifiziert. Notwendige Informationen, die im Rahmen der operativen Planung von den jeweiligen Partnern benötigt oder für diese bereitgestellt werden müssen, wurden identifiziert. Für jeden Partner wurden die Planungs- und Transportaufgaben in einzelne Teilschritte zerlegt, und entsprechend Reihenfolge, Abhängigkeiten, sowie notwendige Kommunikation in gemeinsamen Diagrammen festgelegt. Für die taktische und strategische Planung wurden aus öffentlichen Quelle Daten zu Fahrplänen sowie potenziellen Kundenstandorten gesammelt und eine Methodik zur Bestimmung von Lieferbeziehungen, Transportkapazitäten und -bedarfe entworfen.
Betreiberkonzept	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten 	Das Betreiberkonzept ist auf die strategische Betrachtung eines Systems Gütertram ausgerichtet worden. Da eine konkrete Umsetzung in der Modellregion im realen Betrieb nicht in LogIKTram vorgesehen war, musste das Betreiberkonzept an den Stellen unscharf bleiben, wo die konkrete Umsetzung im Detail Grundlage für eine Bewertung der verschiedenen Optionen des Betreiberkonzepts wäre. Es ist ein grundlegender Katalog von Ausprägungen eines Betreibermodells entstanden. Dabei wurden Rollen und Zuständigkeiten definiert.

Anforderungsanalyse	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten 	Auf Basis von AP1 wurde in AP 2.1 zunächst eine Use Case Analyse durchgeführt mit Ziel der Verfeinerung der Use Cases mit den Schwerpunkten IKT-Plattform und den technischen Cargo-Tram-System Konzepten. Der Umfang aller Stakeholder wurde eingegrenzt und eine Verfeinerung der Use Cases durchgeführt. Der Betrachtungsschwerpunkt der Hochschule Offenburg lag dabei bei den betriebswirtschaftlichen Abläufen auf Basis von Logistikkonzept und Betreiber-/Planungskonzept.
Anforderungsanalyse Systemkontext	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten 	In AP2.2 wurde der Systemkontext identifiziert. Weiterhin wurden auf Basis der Use Cases Funktionsmodule entwickelt und spezifiziert, mit der die LogIKTram Plattform die Durchführung der Use Cases unterstützen kann. Hierzu wurde auch initial der zugrundeliegende Informationsaustausch spezifiziert. Daraufhin erfolgte eine Verfeinerung der Use Cases durch Rückspiegelung dieser Informationen. Die Hochschule Offenburg hat im Zuge der Anforderungsdefinition Anforderungen hinsichtlich der technischen Umsetzung eines Cargo-Tram-Systems aus dem Logistikkonzept abgeleitet.
Gütekriterien	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten 	Es wurden Gütekriterien zur Bestimmung der Zielsetzung des Projekts über alle Arbeitspakete bestimmt. Dabei wurden relevante Gütekriterien in Expertengesprächen ermittelt, beschrieben und ihre Messbarkeit definiert. Ein Zielwert und die Zuordnung zu Arbeitspaketen rundeten die Arbeit ab. Dabei wurde vonseiten der Hochschule Offenburg besonders auf die Entscheidungskriterien von Transportdienstleister und Transportkunden bei der Transportmittelwahl mit Blick auf den damaligen Stand des Logistik- und Betreiberkonzepts fokussiert.
Anforderungen IKT-Plattform	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten 	Entsprechend des Logistikkonzeptes, des operativen Planungsmodells sowie dem Betreiberkonzept wurden funktionale Anforderungen an die IKT-Plattform, wie beispielsweise die Abstraktion der fahrplanbasierten

		<p>Transportplanung, der Kompensation von Verspätungen zum Fahrplan, sowie der Möglichkeit zum Tracken der Waren während des Transportes erhoben. Ebenso wurden nicht-funktionale Anforderungen wie einfache Kommunikationsstandards für die Integration des multimodalen Transports mit der Gütertram in Transport Management Systeme festgelegt. Entsprechend dieser Anforderungen wurden bestehende Softwaresysteme aller Beteiligten identifiziert, und eine gemeinsame Softwarearchitektur entworfen. Entsprechend des Planungsmodells wurden Vorgaben zur Kommunikation genutzt, um bestehende Kommunikationsstandards aus ÖPNV und Logistik auf ihre Eignung zu prüfen. In Fällen, in denen kein Kommunikationsstandard geeignet war, wurden mit entsprechenden Anpassungen und Vereinfachungen auf bestehenden Standards aufgebaut, oder neue Datenformate für die Kommunikation gemeinsam spezifiziert. Für die HSO sind insbesondere folgende Datenformate zu nennen, die für die Kommunikation zwischen IKT-Plattform und Versender / Spediteur wichtig sind: Die Transport Service Description stellt für alle interessierten Transportkunden öffentlich Informationen über die angebotenen Transportservices bereit. Der Transport Request wird vom Spediteur an die IKT-Plattform übersendet, um eine Anfrage für ein konkretes Transportszenario zu stellen. Das Transport Offer wird vom Betreiber der Gütertram / IKT-Plattform an den Spediteur als Antwort auf eine Transport Request übermittelt und beinhaltet alle notwendigen Angaben zu Beschreibung der angebotenen Leistungen für die konkrete Transportanfrage. Der Transportdurchführungsplan (TEP) wird vom Betreiber und vom Spediteur verwendet, um alle Einzelheiten des Transports und seiner Durchführung auszuhandeln und festzulegen. Der Transportausführungsstatus (TES) wird zur Verfolgung des Transports und der einzelnen Güter verwendet.</p>
--	--	--

Planungsbausteine IKT-Plattform	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten 	Aufbauend auf den einzelnen Transport- und Planungsaufgaben auf Seite des Transportkunden / Spediteurs wurden Softwaremodule zur Planung des Vor- und Nachlaufs der Transportkette, zur Anfrage und Buchung eines Transportes über die IKT-Plattform sowie zum Tracking von Transporten mit der Gütertram entwickelt und prototypisch umgesetzt. Dafür wurden Auszügen realer Transportaufträge aus den Systemen der Logistikpartner für die Modellierung und Umsetzung eines Transportdatengenerators genutzt. Für die taktische und strategische Planung wurden jeweilige Methoden zur Bestimmung von Transportbedarfen, -kapazitäten und Warenströmen anhand von öffentlichen und firmeninterner Daten aus ÖPNV und Logistik softwareseitig umgesetzt.
Schnittstellen IKT-Plattform	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten 	Schnittstellen der IKT-Plattform wurden integriert und getestet, sowie künstlich generierte Transportaufträge für den Test des digitalen Zwillings über die IKT-Plattform gebucht.
Aufbau Demonstrator	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten - Mittel für Demonstrator 	Anforderungen aus dem Logistikkonzept hinsichtlich Fahrzeug, Verlademethode und Transportbehälter wurden mit dem Team zur Entwicklung des Prototyps einer Gütertram abgestimmt, und ein eigener Demonstrator auf Spediteur/Transportkundenseite zur Visualisierung der Planung, Buchung und des Trackings entwickelt und umgesetzt. Hierbei wurden entsprechende Visualisierungsmöglichkeiten der taktischen Planung integriert, um das Gesamtkonzept der Gütertram für ein breites Publikum leicht verständlich zugänglich zu machen.
Öffentlichkeitsarbeit	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten 	Öffentlichkeitsarbeit: Die Hochschule Offenburg hat aktiv an der Verbreitung der Ergebnisse in der Fachwelt und der Wissenschaft beigetragen, siehe hierzu auch die Aufstellung der Präsentationsmöglichkeiten. Es wurden Beiträge zur Website des Projekts und der Hochschule und den allgemeinen Marketingaktionen des Gesamtprojekts verfasst, aber vor allem auch teilprojektspezifische

		Veröffentlichungen erstellt und Vorträge durchgeführt. An Fachmessen, speziell dem BVL Kongress in Berlin sowie der IT Trans in Karlsruhe, wurden aktiv Projektergebnisse durch Messestände verbreitet, Feedback eingeholt und Konzepte diskutiert. Ebenfalls wurden zahlreiche studentische Arbeiten (Projektseminar, Thesis) betreut, deren Ergebnisse aktiv in die Projektarbeit eingeflossen sind.
Projektmanagement	- Personalmittel	Projektmanagement: Das Projektmanagement wurde aktiv mit Beiträgen zu Projektberichten und -dokumentationen inkl. der geforderten Zwischenberichte, Zwischennachweise und einer Abschlussdokumentation unterstützt.

Tabelle 2.2.5: Verwendung Teilvorhaben E (INIT)

Geplantes Ergebnis	Verwendung der Zuwendung	Erzieltes Ergebnis
Systemspezifikation IKT-Plattform	- Personalmittel	Eine Systemspezifikation für die integrierte IKT-Plattform liegt vor. Neben der Systemspezifikation wurde auch ein umfassendes Architekturdiagramm erstellt. Bei der Spezifizierung wurden möglichst standardisierte Austauschformate und Schnittstellen verwendet (VDV, EDIFACT, GTFS). Der modulare und skalierbare Datenbroker der IKT-Plattform ermöglicht eine übertragbare Anwendung für weitere zukünftige Applikationen sowie die Anbindung von domainfremden Systemen.
Integrierte Broker basierte IKT-Plattform	- Personalmittel	Die IKT-Plattform wurde implementiert. Dabei dient als zentrale Datendrehscheibe ein MQTT Broker (VermeMQ), durch ein entsprechendes Lizenzmodell, ist neben dem Einsatz im Forschungsbetrieb, einen Einsatz auch im produktiven und kommerziellen System erlaubt. Alle IKT-Systemkomponenten wurden mittels Schnittstellen und Datenaustauschformaten verbunden und getestet. Die Verwendung von Branchenstandards ermöglicht einen flexiblen Austausch der Domainfremden

		Systeme (z.B. ÖPNV, Logistik, Tracking, Simulation mittels VDV452 und VDV435)
Anbindung IKT-Plattform - Fahrzeugsystem	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Materialkosten 	In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern HITACHI RAIL und KIT-FAST aus AP4 wurde die IKT-Plattform an das Fahrzeugsystem angebunden. Der Halteassistent (HITACHI RAIL) und der Ladungsträger (KIT-FAST) wurden über den INIT Bordrechner COPILOTpc3 an den MQTT-Datenbroker angebunden. Ein biirektionaler Informationsaustausch von beiden Systemen wurde mit allen relevanten Systemkomponenten der IKT-Plattform realisiert.
Benutzerinterface Leitstelle	- Personalmittel	Alle relevante Information für den operativen Betrieb von logIKTram wurden in die Leitstellensoftware MOBILE-ITCS der INIT integriert. Der Disponenten kann die Umlaufplanung, den Beladestatus des Fahrzeuges sowie Informationen zu den Be- und Entladehaltestellen im System einsehen und ggf. steuern.
Benutzerinterface Bordrechner	- Personalmittel	Für den Fahrzeugführer wurden alle relevanten Information für den operativen Betrieb auf dem Bordrechner dargestellt. Der Fahrzeugführer erhält visuell Informationen zu den Be- und Entladestationen, dem Status der Beladung sowie Statusupdates des Bremsassistenten und wann dieser aktiv ist und somit den Bremsvorgang eingreift. Zudem wird die Distanz bis zum Haltepunkt dargestellt.
Demonstration	- Personalmittel	Für die Demonstration wurden alle relevanten ÖPNV Geräte (COPILOTpc3 und TOUCHit3) sowie deren Verkabelung und Anschluss an die weiteren Systeme von HITACHI und KIT-FAST bereitgestellt und für die Demonstration vorbereitet. Des Weiteren wurde die IKT-Plattform an das Fahrzeugsystem angebunden und der Informationsfluss an die Leitstelle (MOBILE-ITCS) sichergestellt und unter verschiedenen Bedingungen getestet. Zudem wurde eine Betreuung der ÖPNV relevanten Systeme für die Demonstration sichergestellt.

Tabelle 2.2.6: Verwendung Teilvorhaben F (MARLO)

Geplantes Ergebnis	Verwendung der Zuwendung	Erzieltes Ergebnis
Logistik- und Betreiberkonzept	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel, - Reisekosten 	Es wurde erstmals ein vollumfängliches und übertragbares Logistik- und Betreiberkonzept unter Nutzung des ÖPNV erstellt, welches die Qualität eines Leitfadens erreicht hat. Es wurden drei Transportmodi entwickelt, welche neben der Straßenbahn auch den Regionalverkehr beinhaltet. Somit sind neben Städten mit eigenständigen Straßenbahnbetrieb auch Zweisystem-Stadtbahnen und Regionalbahnen zur Erschließung von Mittelzentren abgedeckt.
Buchungssoftware als Modul der IKT-Plattform	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Unterauftrag MARLO Poland 	Es wurde ein Prototyp einer Buchungssoftware (Backend) konzeptioniert und umgesetzt. Es kann auf Kundenanfrage hin über API-Schnittstelle automatisch eine Anfrage entgegengenommen und ein Angebot ermittelt werden, welches als standardisierter Transportdurchführungsplan den am Transport Beteiligten als Grundlage zur Verfügung gestellt wird.

Tabelle 2.2.7: Verwendung Teilvorhaben G (SimPlan)

Geplantes Ergebnis	Verwendung der Zuwendung	Erzieltes Ergebnis
Erstellung eines digitalen Zwillings der verkehrlichen Abläufe für eine parametrisierbare Anzahl an Gütertrams	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Reisekosten 	Es wurde auf Basis der Software Anylogic ein Digitaler Zwilling aller Trams und der Tram-Linien inkl. aller Haltestellen erstellt, der eine Simulation der gesamten verkehrlichen Abläufe ermöglicht. Durch statistische Aufbereitung historischer Daten werden die von der Uhrzeit abhängigen Fahr- und Ausstiegzeiten dynamisch abgebildet (Rush Hour). Das Modell ist so aufgebaut, dass über Eingangsdaten neue Linien Fahrpläne definiert werden können.
Erstellung eines digitalen Zwillings der logistischen Abläufe an den Be-, Entlade- und	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Reisekosten 	Der verkehrstechnische Digitale Zwilling wurde um die Logistikkomponente erweitert. Diese umfasst Be- und Entladevorgänge der Trailer an Haltepunkten sowie den Digitalen

Umladepunkten der Gütertram		Zwilling des Trailers. Das Modell ist so aufgebaut, dass über die Eingangsdaten alle Haltestellen als Be- und Entladestationen sowie alle Tram-Linien als Transportlinien definiert werden können.
Integration des digitalen Zwillings mit der IKT-Plattform	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Reisekosten 	Der Digitale Zwilling wurde mit dem MQTT-Broker der IKT-Plattform via TIP, TEP und VDV 435 Telegrammen verbunden und kann darüber für die Plattform die Trams sowie die Trailer emulieren.
Demonstration und Anwendung des digitalen Zwillings	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel - Reisekosten 	Der Digitale Zwilling der logistischen und verkehrstechnischen Abläufe wurde zur virtuellen Inbetriebnahme und zur Absicherung der Konzeption verwendet. Es wurde ein Video der Funktionsweise des in die IKT-Plattform eingebundenen Digitalen Zwillings erstellt.

Tabelle 2.2.8: Verwendung Teilvorhaben H (DB E&C)

Geplantes Ergebnis	Verwendung der Zuwendung	Erzieltes Ergebnis
Use Cases für den regionalen Gütertransport auf dem Schienennetz des ÖPNV	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel 	Es wurde ein technisches und betriebliches Logistikkonzept erstellt. Die Nutzbarkeit Stadtbahnnetzes für Güterverkehre wurde überprüft.
Logistikkonzept für den regionalen Gütertransport auf dem Schienennetz des ÖPNV	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel 	<p>Verbindungsmöglichkeiten mit dem Regionalen Schienennetz wurden exemplarisch bearbeitet.</p> <p>Fahrzeugtechnische Anforderungen wurden diskutiert und dokumentiert.</p>
Betreiberkonzept Gütertram	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel 	Mitwirkung an der Zusammenstellung von Anforderungen von Betrieb und Betreiber.
Fahrzeugkonzept, das die durch Zulassungsbehörde und Fahrzeug vorgegebenen Randbedingungen respektiert.	<ul style="list-style-type: none"> - Personalmittel 	Aus der Analyse von fahrzeugtechnischen und bautechnischen Anforderungen des Stadtbahnbetriebes und der Schnittstellen zur Vollbahn wurden die Rahmenbedingungen erarbeitet. Die Empfehlungen und das Aufzeigen von Möglichkeiten basieren u. a. auf den vielfältigen Erfahrungen mit der Zweisystem-Stadtbahn in Karlsruhe und anderen Straßen- und Stadtbahnnetzen.

Tabelle 2.2.9: Verwendung Teilvorhaben I (Hitachi Rail)

Geplantes Ergebnis	Verwendung der Zuwendung	Erzieltes Ergebnis
Generierung synthetischer Trainingsdaten	- Personalmittel	Vor Beginn der Entwicklung mussten die H-Tafelerkennungsmodelle trainiert werden.
Erkennung von Stoppschildern anhand von Bilddaten und Stereo Vision Kameras	- Personalmittel	Dadurch werden die H-Tafel erkannt und auch die Distanzermittlung zur H-Tafel
Anbindung der entwickelten UDP-Schnittstelle zur IKT-Plattform - Fahrzeugsystem	- Personalmittel - Materialkosten - Reisekosten	In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Init aus AP4 wurde die IKT-Plattform und unsere Software an das Fahrzeugsystem angebunden. Unser Halteassistent und der Ladungsträger (KIT-FAST) wurden über den INIT Bordrechner COPILOTpc3 an den MQTT-Datenbroker angebunden. Ein bidirektionaler Informationsaustausch von beiden Systemen wurde mit allen relevanten Systemkomponenten der IKT-Plattform realisiert.

2.3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wesentlichen Kosten des Projektes entfallen auf die Personalkosten. Die kostenneutrale Verlängerung des Projektes um vier Monate hatte keine Auswirkung auf das ursprünglich geplante Fördervolumen. Nachfolgend sind die jeweiligen Positionen des zahlenmäßigen Nachweises für jedes Teilvorhaben aufgelistet.

Tabelle 2.3.1: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben Konsortialführer

Position	Benennung im Antrag (AZK/AZA)	Verwendung
F0837	Personalkosten	<p>Projektleitung Dr.-Ing. Christoph Rentschler, insb. mit folgenden Arbeitsschwerpunkten:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Steuerung der Umbauarbeiten am Schienenfahrzeug 810 vom Typ GT8-100C-2S - Organisation und Vorbereitung der Funktionstest sowie der Abschlusssdemonstration - Projektleitung des Gesamtvorhabens gemeinsam mit Dr.-Ing. Michael Frey vom KIT-FAST - Öffentlichkeitsarbeit (u.a. Interviews sowie Beteiligung an der Regionalkonferenz Mobilitätswende

		und der IT-TRANS mit Vorträgen und Standbetreuung) Kaufmännische Sachbearbeitung: - Erstellung von Verwendungsnachweisen und Zahlungsanforderungen
F0850	Sonst. unmittelbare Vorhabenkosten	- Unterauftrag an die Werkstatt der VBK - Versicherung der im Schienenfahrzeug eingebauten Komponenten - Kosten zur Vorbereitung der Abschussdemonstration (u.a. Catering, Equipment, Fotografie)

Tabelle 2.3.2: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben B (KIT)

Position	Benennung im Antrag (AZK/AZA)	Verwendung
0812	Entgeltgruppe E12 - E15	Wissenschaftliche Mitarbeiter: Erarbeitung der Arbeitspakete gemäß Projektplan
0822	Beschäftigungsentgelte	Hilfskräfte (Studierende) zur Unterstützung des wissenschaftlichen Personals
0843	Sonstige Allgemeine Verwaltungsausgaben	Diverses Montage auf Verbrauchsmaterial für Umbau Stadtbahnwagen, Aufbau System zu Ladungssicherung und Aufrüstung Fahrradanhänger (eTrailer)
0846	Dienstreisen	Dienstreisen zu Abstimmungsterminen, Vernetzung mit anderen Projekten und zur Vorstellung der Projekthalte bei Messen und Konferenzen
0850	Gegenstände und andere Investitionen >800/410/400 €	- Elektr. angetriebener Fahrradanhänger (eTrailer) - Komponenten Automatisierung (für eTrailer) - Komponenten Kommunikationstechnik

Tabelle 2.3.3: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben C (FZI)

Position	Benennung im Antrag (AZK/AZA)	Verwendung
F0813	Material	Fertigungsmaterial für Simulationsdemonstrator (AP4)
F0831	Personalkosten	Bearbeitung der Arbeitspakete mit folgenden Schwerpunkten: - AP1: Use Case Entwicklung und Mitwirkung bei Logistikkonzept und Planungsmodellen. - AP2: AP-Koordination, Use Case Analyse, Ableitung von Anforderungen und Gütekriterien.

		<ul style="list-style-type: none"> - AP3: Konzeption und Entwicklung der IKT-Plattform mit Fokus auf die Trackingkomponente - AP4: Entwicklung einer Tram Simulation, Konzept zum Ladungshandling und Simulation zur Öffentlichkeitswirksamen Demonstration - AP6: Koordination der Öffentlichkeitsarbeit sowie Bereitstellung von LogIKTram Inhalten über unterschiedliche Kanäle (Social Media, Presse, Webseite, Newsletter). Koordination der Messeauftritte.
F0838	Reisekosten	Teilnahme an Arbeits- und Vernetzungstreffen sowie Messen
F0850	Sonstige unmittelbare Vorhabenskosten	Verwendung mit folgenden Schwerpunkten: <ul style="list-style-type: none"> - IT-Trans Standkosten - UITP GPTS Standkosten - Erstellung der Webseite und Übersetzung - Hilfswissenschaftliche Mitarbeiter*innen

Tabelle 2.3.4: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben D (HSOG)

Position	Benennung im Antrag (AZK/AZA)	Verwendung
0812+0817	Beschäftigte E12-E15	Wissenschaftliche Mitarbeiter: Erarbeitung der Inhalte
0822	Sonstige Beschäftigte	Hilfskräfte (Studierende) für kleinere unterstützende Arbeiten, v.a. Recherche
0831	Gegenstände bis 410€	Aufbau Demonstrator
0835	Vergabe von Aufträgen	Messestand BVL Berlin, Messewand für Demonstrator
0864	Dienstreisen	Aktive und passive Teilnahme an Kongressen und Messen Durchsprache der Option Gütertram in anderen Städten, v.a. Köln (ebenfalls Zweiwege-System)

Tabelle 2.3.5: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben E (INIT)

Position	Benennung im Antrag (AZK/AZA)	Verwendung
F0813	Material	<ul style="list-style-type: none"> - Bereitstellung Bordrechner COPILOTpc3 - Bereitstellung Bedienteil TOUCHit3 - Verkabelung Ethernet-Kabel im Fahrzeug 150m (Kabel von Kopf A nach B) - Weitere Verkabelung zum Einbau des COPILOTpc3 (Kabel, Backplane und Kleinteile)

F0837	Personalkosten	<ul style="list-style-type: none"> - AP-Leitung und Koordination AP3 - Technische Konzeption der IKT-Plattform - Entwicklung der Schnittstellen und Austauschformate der IKT-Plattform (Systemkomponenten) - Entwicklung und Implementierung der Erweiterungen für die Leitstellensoftware MOBILIE-ITCS - Entwicklung und Implementierung der GUI für den Fahrzeugführer auf dem TOUCHit3 - Einbau der INIT Hardwarekomponenten im Fahrzeug - Durchführung von Gesamtsystemtests (virtuell und vor Ort am Fahrzeug) - Unterstützung bei dem Aufbau und Durchführung der Demonstration
F0838	Reisekosten	Teilnahme und Präsentation auf Fachveranstaltungen (IT-Trans 2022, Karlsruhe und TRA 2024, Dublin)

Tabelle 2.3.6: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben F (MARLO)

Position	Benennung im Antrag (AZK/AZA)	Verwendung
F0823	FE-Fremdleistungen	Unterauftrag an MARLO Poland Sp. z o.o. zur Programmierung der Buchungssoftware
F0837	Personalkosten	<ul style="list-style-type: none"> - Mitarbeit von Roland Frindik in AP1 - Logistik- und Betreiberkonzept unter Einbringung der Expertise zum Kombinierten Verkehr und den generischen Logistik-Management-Modellen, die in den europäischen F&E-Projekten freightwise und i-Cargo entwickelt wurden. - Mitarbeit an AP2 – Anforderungsanalyse ausgehend aus dem Logistikkonzept für die IKT-Plattform insbesondere betreffend der Buchungssoftware - Mitarbeit an AP3 - IKT-Plattform insbes, Konzeptionierung Buchungssoftware und Koordinierung der Programmierung in Unterauftrag, Schnittstellen mit Logistikkundensoftware der Hochschule Offenburg - Mitarbeit an AP4 - Konzept Gütertram-System Einbringung der Expertise aus dem Kombinierten Verkehr hinsichtlich Ladeeinheiten, Umschlagverfahren und Ladungssicherung
F0838	Reisen	Reisen zur Teilnahme am strategischen und thematischen Austausch im Rahmen des Technologieprogramms IKT für Elektromobilität, Austausch mit anderen Verkehrsbetrieben (u.a. Frankfurt, Kassel), den

		Sachbearbeitern Güterverkehr bei der Nahverkehrsgesellschaft Baden-Württemberg (NVBW), dem BMDV in Berlin und der UIC in Paris
--	--	--

Tabelle 2.3.7: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben G (SimPlan)

Position	Benennung im Antrag (AZK/AZA)	Verwendung
F0837	Personalkosten	<p>Folgende Personen der SimPlan AG waren am Projekt mit folgenden Funktionen beteiligt:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Projektleitung: Dr. Ulrich Burges und Prof. Dr. Spieckermann: insb. mit folgenden Arbeitsschwerpunkten: <ul style="list-style-type: none"> ○ Steuerung der Aktivitäten der SimPlan AG, insbesondere der Konzeption des Digitalen Zwilling ○ Dokumentation und alle weiteren administrativen Belange. - Schnittstellenimplementierung: Jürgen Schmidpott, Dirk Wortmann mit folgendem Arbeitsschwerpunkt Implementierung der Schnittstellen zwischen dem MQTT-Broker und dem Digitalen Zwilling - Erstellung Digitaler Zwilling: Nadia Galaske, Harry Kestenbaum, Caroline Fröhlich, Christina Kihn - Erstellung Statistiken: Ilka Habenicht, Michael Klose, Sebastian Felix, Tristan Maul
F0838	Reisen	Teilnahme an gemeinsamen on site Workshops, Konsortialtreffen und Abschlussveranstaltung

Tabelle 2.3.8: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben H (DB E&C)

Position	Benennung im Antrag (AZK/AZA)	Verwendung
0837	Personalkosten	Teilprojektleitung / Bearbeitung
0838	Reisekosten	Wegen Corona & Kontaktverboten ausschließlich online bzw. lokale Treffen

Tabelle 2.3.9: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben I (Hitachi Rail)

Position	Benennung im Antrag (AZK/AZA)	Verwendung
F0813	Material	<ul style="list-style-type: none"> - Bereitstellung Stereo-Vision Kameras - Verkabelung Ethernet-Kabel im Fahrzeug 150m . Verlängerungskabel (Kleinteile) - DC/DC Converter - Halterung für Stereo-Vision Kameras
F0837	Personalkosten	<ul style="list-style-type: none"> - Entwicklung und Implementierung der SW für die Stereo-Vision Kameras - Unterstützung Sicherheitskonzept - Einbau der Software & Hardwarekomponenten im Fahrzeug - Durchführung von Gesamtsystemtests (virtuell und vor Ort am Fahrzeug) - Unterstützung bei Aufbau und Durchführung der Demonstration
F0838	Reisekosten	Teilnahme und Präsentation vor Ort in Karlsruhe
F0850	Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten	Unterauftrag an AAIT bzgl. Bremsassistenten

2.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Verlauf der Arbeiten im Projekt folgte der im Projektantrag formulierten Planung bzw. der begründeten Überarbeitung des Plans im Laufe des Projektes (kostenneutrale Verlängerung). Im Wesentlichen wurden alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet. Daher konnte zusätzlich zur erfolgreichen Demonstration der technischen Umsetzbarkeit von automatisierten Transporteinheiten ebenfalls aufgezeigt werden, dass mit dem im Vorhaben LogIKTram erarbeiteten Konzept der Kombination des Personen- und Güterverkehrs im Rahmen der innerstädtischen Logistik ein nennenswerter Beitrag zur Erfüllung der klimapolitischen, verkehrspolitischen und kommunalpolitischen Ziele geleistet werden kann. Dabei waren gegenüber der ursprünglichen Planung zusätzlichen Ressourcen für das Projekt nötig, welche als Eigenleistungen der Partner erbracht wurden.

2.5 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Ergebnisse des Verbundprojektes ermöglichen es den jeweiligen Partnern, die Forschung und Entwicklung an künftigen Themen im Bereich der Kombination des Personen- und Güterverkehrs sowohl hinsichtlich der Logistik- und Betriebskonzepte als auch auf der Ebene der technischen Systeme weiter voranzutreiben.

Die hier gewonnenen Erkenntnisse aus dem neuartigen Ansatz fließen in Form von den entwickelten Methoden und dem generierten Wissen insbesondere auch in derzeitige und zukünftige Forschungsaktivitäten der jeweiligen Partner ein. Detaillierte Beschreibungen für die einzelnen Teilvorhaben finden sich in den nachfolgenden Tabellen.

Tabelle 2.5.1: Verwertung Teilvorhaben Konsortialführer

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Logistik- und Betreiberkonzept	<p>Die Entwickelten Konzepte werden nun unmittelbar im Rahmen des Projektes regioKArgoTramTrain konkretisiert, sodass eine Demonstration im Jahr 2027 auf der öffentlichen Schiene erfolgen kann.</p> <p>Sofern die technischen und rechtlichen Voraussetzungen für einen Regelbetrieb nach Projektabschluss von regioKArgoTramTrain vorliegen, dienen die (weiter-) entwickelten Konzepte zur Definition eines neuen Geschäftsmodells mit kombinierten Gütertransportdienstleistungen, das langfristig (in 5 – 10 Jahren) angewendet werden soll.</p>
Erfahrungen mit Planung und Aufbau des Demonstratorfahrzeugs	<p>Die Erfahrungen und Erkenntnisse können direkt im Folgeprojekt regioKArgoTramTrain angewendet werden und unterstützen auch in der weiteren Arbeit im Rahmen der Gesamtinitiative regioKArgo, z.B. in Form von Beratungsleistungen der AVG im Projekt URBANE.</p> <p>Generell kann die AVG die Erkenntnisse langfristig nutzen um auch andere Verkehrsunternehmen bei Umbauarbeiten und Adaption des Geschäftsmodells zu beraten (in 5 – 10 Jahren).</p>
IKT-unterstützter Betrieb eines Stadtbahnwagens	<p>Mit Hilfe der technischen Weiterentwicklung des Schienenfahrzeugs 810 vom Typ GT8-100C-2S, auch im Zusammenhang mit der Einbindung in die IKT-Plattform, wurden die Grundlagen zur Entwicklung eines Assistenzsystems für Triebfahrzeugführende (TF) zur Optimierung der Fahrzeugposition bei der Haltestellenanfahrt geschaffen. Diese Technologie wird nun unmittelbar im Projekt regioKArgoTramTrain weiterentwickelt, sodass sie im Jahr 2027 auf der öffentlichen Schiene angewendet werden kann.</p> <p>Diese Erkenntnisse können langfristig (in 5 – 10 Jahren) nicht nur für das neue Geschäftsmodell, sondern auch für die Automatisierung der Schienenfahrzeuge genutzt werden.</p>

Tabelle 2.5.2: Verwertung Teilvorhaben B (KIT)

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Allgemeine Erkenntnisse zur methodischen Vorgehensweise sowie konkrete Umsetzungen	Vorlesungen „Berechnungsverfahren und Modelle in der Verkehrsplanung“, „Eigenschaften von Verkehrsmitteln“, „Güterverkehr“ und „Nachhaltigkeit in Mobilitätssystemen“
Allgemeine Erkenntnisse zur methodischen Vorgehensweise sowie konkrete Umsetzungen	Einbindung / Ausbildung von Studierenden im Rahmen von Abschlussarbeiten; Angebot eines güterverkehrlichen Seminars für Studierende
Allgemeine Erkenntnisse zur methodischen Vorgehensweise sowie konkrete Umsetzungen	Forschungsergebnisse fließen in Veröffentlichungen ein
Modellframework logiTopp	Veröffentlichung als Open-Source Projekt zur freien Verwendung in der Forschung
Simulationsergebnisse	Verwertung in folgenden Projekten, um weiteren Forschungsbedarf eines stadtbahnbasierten Gütertransports konkretisieren und auf bestehenden Analysen aufbauen zu können
Erfahrungen mit Planung und Aufbau und Betrieb des Lastenradanhängers	Die Erfahrungen und Erkenntnisse können direkt in das Folgeprojekt regioKArgoTramTrain eingebracht und dort weiterentwickelt werden.
Erfahrungen mit Entwicklung und Betrieb des KI-basierten Halteassistenten	Die Erfahrungen und Erkenntnisse dienen als Grundlage bei der Entwicklung eines Assistenzsystems für Triebfahrzeugführende (TF) zur Optimierung der Fahrzeugposition bei der Haltestellenanfahrt. Diese Technologie soll im Nachfolgeprojekt regioKArgoTramTrain weiterentwickelt und im Jahr 2027 auf der öffentlichen Schiene demonstriert werden.

Tabelle 2.5.3: Verwertung Teilvorhaben C (FZI)

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
IKT-Plattform	Initiierung von Gesprächen mit Industriepartnern, um ihre Lösung zu integrieren.
IKT-Plattform	Einbringen in Anschlussforschungsprojekte, um die Plattform weiterzuentwickeln und zu industrialisieren.
Konzept zur Stadtbahn-Automatisierung	Einbringen in Anschlussforschungsprojekte.
Konzept zum automatisierten Ladungshandling	Einbringen in Gespräche mit Industriepartnern zur Direktbeauftragung einer Umsetzung sowie in Anschlussforschungsprojekte.

Umfassende Simulation zur Unterstützung der Systementwicklung	Einbringen in Gespräche mit Industriepartnern und öffentlichen Einrichtungen zur Direktbeauftragung einer Umsetzung sowie in Anschlussforschungsprojekte.
---	---

Tabelle 2.5.4: Verwertung Teilvorhaben D (HSOG)

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Logistikkonzept, Planungsmodell und Betreiberkonzept, IKT-Plattform	Nutzung für die Lehre
Logistikkonzept, Planungsmodell und Betreiberkonzept, IKT-Plattform	Generierung von Anschlussprojekten in und außerhalb der Modellregion in Form von studentischen Arbeiten und/oder weiteren geförderten Forschungsprojekten
Logistikkonzept, Planungsmodell und Betreiberkonzept, IKT-Plattform	Steigerung des allgemeinen sehr guten Rufs der Hochschule Offenburg im Bereich der Forschungsleistungen
Logistikkonzept, Planungsmodell und Betreiberkonzept, IKT-Plattform	Nutzung für die Steigerung der Attraktivität der Hochschule Offenburg für Studieninteressierte
Demonstrator für Logistikkonzept und Planungsmodell	Verbreitung und Demonstration der Projektergebnisse auch über das Projektende
Logistikkonzept, Planungsmodell, Demonstrator	Nutzung der Projektergebnisse im Projekt move.mORE

Tabelle 2.5.5: Verwertung Teilvorhaben E (INIT)

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Systemspezifikation	Die erarbeitete Systemspezifikation dient als Grundlage für das Projekt regioKArgoTramTrain und wird weiter konkretisiert, so dass eine Demonstration im Jahr 2027 auf der öffentlichen Schiene erfolgen kann.
IKT-Plattform	<p>Die Erfahrungen aus der Entwicklung der IKT-Plattform dienen als Grundlage für die Weiterentwicklung Broker basierter Systeme und werden langfristig in die Weiterentwicklungen neuer INIT Systeme insbesondere unter der Nutzung von Standards (VDV435, ITxPT) einfließen.</p> <p>Die Ergebnisse werden unmittelbar im Projekt regioKArgoTramTrain weiterentwickelt, so dass sie im Jahr 2027 auf der öffentlichen Schiene angewendet werden können. Zudem kann die INIT die gewonnen Erkenntnisse aus der Entwicklung der integrierten IKT-Plattform langfristig nutzen um auch anderen</p>

	Verkehrsunternehmen ähnliche Plattformen anzubieten (in 5 – 10 Jahren).
Integration Leitstelle	<p>Die Anbindung der Leitstellensoftware MOBILE-ITCS ermöglichte die modulare Weiterentwicklung von zukünftigen Schnittstellen für ÖPNV fremde Systeme. Die Entwicklungen im Bereich der Anbindung des MQTT-Datenbroker fließen in die Weiterentwicklung der Leitstellensoftware MOBILE-ITCS ein. Dabei sind besonderes die Weiterentwicklung einer Broker-basierten Infrastruktur sowie die Weiterentwicklung von Branchenstandards wie VDV435 Internet of Mobility (IoM) und ITxPT von großen Interessen, die aktuell für die Transformation und Digitalisierung der ÖPNV-Systeme von großer Bedeutung sind.</p> <p>Des Weiteren werden die Ergebnisse unmittelbar im Projekt regioKArgoTramTrain weiterentwickelt, so dass sie im Jahr 2027 auf der öffentlichen Schiene angewendet und im live ITCS der AVG angewendet werden können.</p>
Integration Fahrzeug	<p>Durch die Anbindung des Halteassistenten und des Ladungsträgers an den INIT Bordrechner COPI-LOTpc3 und deren Darstellung auf dem Bedienteil TOCHit3 war es möglich die Darstellung und Verarbeitung von Echtzeitdaten für den Fahrzeugführer zu testen. Die Erfahrungen und Erkenntnisse können direkt im Folgeprojekt regioKArgoTramTrain angewendet werden. Zudem können wie gewonnenen Erfahrungen und der Input bei der Gestaltung der Benutzeroberfläche in Weiterentwicklungen der GUI des Bordrechners einfließen und in zukünftigen weiteren Forschungs- und Kundenprojekten zum Einsatz kommen.</p>

Tabelle 2.5.6: Verwertung Teilvorhaben F (MARLO)

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Logistikkonzept, Planungsmodell und Betreiberkonzept, Buchungswerkzeug der IKT-Plattform	<p>Diskussion mit Logistikern, Eisenbahnverkehrsunternehmen, DZSF und Kommunen: Einschätzung der Umsetzbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Regulierungsbedarf, Bereitstellung der Infrastruktur; Generierung von Anschlussprojekten in und außerhalb der Modellregion, eigenwirtschaftlich oder in Form weiterer geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekten: Überführungen in Produktionslinien und Produkte; Nachfolgeprojekt regioKArgoTram-Train wurde unter</p>

	Beteiligung von MARLO C. im November 2023 begonnen.
Logistikkonzept, Planungsmodell und Betreiberkonzept, Buchungswerkzeug der IKT-Plattform	Verbreitung der Projektergebnisse unter Fachkräften und Wissenschaftlern; Übertragung auf andere Anwendungsfälle (andere Orte, andere Verkehrsträger wie Wasserstraße und Seilbahnen)
Buchungswerkzeug der IKT-Plattform	Akquise von kommerziellen Anschlussprojekten: wirtschaftliche Verwertung, auch als eigenständiges Produkt, in logistischen Anwendungen (regionaler Kombiniertes Verkehr)

Tabelle 2.5.7: Verwertung Teilvorhaben G (SimPlan)

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Erstellung eines Digitalen Zwillings der verkehrstechnischen und logistischen Abläufe inkl. Integration in die IKT-Plattform. Betrieb in der Integrationsumgebung oder auch Stand Alone möglich.	<ul style="list-style-type: none"> - Service-Offering für Verkehrsgesellschaften: Verkauf/Angebot am Markt durch SimPlan - Service-Offering für Bahn-Ausrüster: Verkauf/Angebot am Markt durch SimPlan - Service-Offering für Kommunen Verkauf/Angebot am Markt durch SimPlan - Service-Offering für Logistikdienstleister Verkauf/Angebot am Markt durch SimPlan
Erstellung eines Digitalen Zwillings der verkehrstechnischen und logistischen Abläufe inkl. Integration in die IKT-Plattform. Betrieb in der Integrationsumgebung oder auch Stand Alone möglich.	Demonstrators für Verkehrsgesellschaften, Ausrüster, Kommunen und Logistikdienstleister als Marketing-Instrument (kostenfreier Zugang, zeitlich begrenzt).
Erstellung eines Digitalen Zwillings der verkehrstechnischen und logistischen Abläufe inkl. Integration in die IKT-Plattform. Betrieb in der Integrationsumgebung oder auch Stand Alone möglich.	Generierung eines weiterführenden Forschungsprojektes, bereits erfolgreich umgesetzt: RegioKArgo-TramTrain
Erstellung eines Digitalen Zwillings der verkehrstechnischen und logistischen Abläufe inkl. Integration in die IKT-Plattform. Betrieb in der Integrationsumgebung oder auch Stand Alone möglich.	Langfristig Erzielung regelmäßiger Umsätze im Geschäftsbereich Simulation von City-Logistiklösungen

Tabelle 2.5.8: Verwertung Teilvorhaben H (DB E&C)

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Entwicklung eines Konzeptes für kleinteilige Behälter- und Umschlagtechnik in urbanen Räumen	Unterschiedliche Transportketten wurden untersucht. Daraus können Anwendungsfälle abgeleitet und konfiguriert werden.
Entwicklung von Umschlaganlagen in räumlich engen Verhältnissen	Umschlagsanlagen unterscheiden sich nach Art der Güter, der eingesetzten Fahrzeuge und der zur Verfügung stehenden Umschlagsanlagen. Aus dem Katalog der Möglichkeiten ist eine individuelle Konfiguration möglich. Die Ergebnisse kommen u.a. für innerstädtische Umschlaganlagen sowie bei der Ausgestaltung von Gleisanschlüssen zum Einsatz.
Vertiefte Kenntnisse für den Umbau/Anpassung von Personenfahrzeugen zum Einsatz im Güterverkehr	<p>Eine Marktbeobachtung von bestehenden Schienenfahrzeugen für den Güterverkehr sowie aktuelle Entwicklungen wurde durchgeführt. Im Ergebnis wurde festgehalten, dass es Modelle für einen kombinierten Fahrzeugeinsatz wie auch für dezidierte Fahrzeuge mit Gütertransport gibt. Eine Kombination von Elementen von Güterfahrzeugen der Vollbahn wie auch deren Adaption an die Anforderungen einer Straßenbahn erscheint möglich. Grundlagen für die Anforderungen an Straßenbahnfahrzeuge mit Gütertransport wurden zusammengestellt.</p> <p>Aus den Erkenntnissen des Forschungsvorhabens wurde ein Anforderungs- bzw- Anpassungskatalog für eisen- und straßenbahnspezifische Gesetze und Regelwerke erstellt.</p>

Tabelle 2.5.9: Verwertung Teilvorhaben I (Hitachi Rail)

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Generierung synthetischer Trainingsdaten für das Trainieren ein H-Tafelerkennungsmodell für die Erkennung von Stoppbildern	Trainieren von H-Tafelerkennungsmodell für die Erkennung von H-Tafeln
Stereo-Vision Kameras zur Schätzung der Tiefe	Mit den Kameras kann man die Distanz ermitteln zur H-Tafel
Integration und Inbetriebnahme	Verbindung beider Systeme für die Inbetriebnahme

2.6 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

In Schwerin wurde durch DHL eine Paketbahn getestet. Es handelte sich um eine dedizierte Gütertram, die an einer Stelle in der Stadt Rollwagen mit Paketen aufgenommen hat und an verschiedenen Haltestellen in der Innenstadt neben jeweils einer Paketbox abgestellt hat. Das Projekt wurde nach einer Testphase Ende 2023 zunächst eingestellt.

Die bereits vor Beginn von LogIKTram bekannt gewordene dedizierte Gütertram Frankfurt wurde während der Durchführung des Vorhabens weiterentwickelt. Es ist ein Vollbetrieb geplant, welcher allerdings im Bearbeitungszeitraum von LogIKTram nicht umgesetzt wurde.

2.7 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen

Im Rahmen des Verbundprojektes LogIKTram wurden die Zwischen- und Endergebnisse über verschiedene Kanäle veröffentlicht bzw. verschriftlicht, siehe auch Darstellungen zum AP6 - Öffentlichkeitsarbeit. Dazu gehörte auch die Veröffentlichung wichtiger Erkenntnisse in nationalen und internalen Journals sowie die Vorstellung der Ergebnisse bei Konferenzen. Darüber hinaus wurden im Rahmen des Verbundvorhabens bei den Wissenschaftspartnern diverse Abschlussarbeiten betreut.

Tabelle 2.7.1: Veröffentlichungen Teilvorhaben Konsortialführer

Titel	Datum	Ort (Zeitungsnamen, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
-	-	-	-

Tabelle 2.7.2: Veröffentlichungen Teilvorhaben B (KIT)

Titel	Datum	Ort (Zeitungsnamen, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Microscopic Agent-Based Parcel Demand Model for the Simulation of CEP-Based Urban Freight Movements to and from Companies	2023	Advances in Resilient and Sustainable Transport – Proceedings of the 6 th Interdisciplinary Conference on Production,	Vorstellung des Verfahrens zur Erzeugung einer synthetischen Unternehmensbevölkerung sowie der Modellierung von ein- und ausgehenden Paketströmen von Unternehmen

		Logistics and Traffic 2023. Ed.: U. Clausen, 75–92, Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-031-28236-2_6	
Modeling Relations Between Companies and CEP Service Providers in an Agent-Based Demand Model using Open-Source Data	2023	Procedia Computer Science, 220, 486 - 494. doi:10.1016/j.procs.2023.03.062	Vorstellung des Verfahrens zur Modellierung von Vertragsbeziehungen zwischen KEP-Dienstleistern und Unternehmen sowie Analyse der Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse
Modellbasierte Ermittlung von verkehrlichen Potentialen eines stadtbahnbasier-ten Gütertransports im Projekt LogIKTram in Karlsruhe	2023	Journal für Mobilität und Verkehr, 16, 50-58. doi:10.34647/jmv.nr16.id103	Deutsche Veröffentlichung zum Erhebungs- und Modellierungskonzept; Vorstellung ausgewählter Ergebnisse der Empirie und des Modells
Integrated Agent-Based Modeling and Simulation Framework for Urban Parcel Shipments to and from Establishments	Geplant in 2025	Full-Paper vorgestellt auf 103rd Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C., USA, in 2024; Einreichung bei Journal 'Transportation Research Part E' zur Zeit in Vorbereitung	Vorstellung des kombinierten Personen- und Güterverkehrsnachgradmodells; Analyse des Einflusses der Berücksichtigung von Unternehmen in der Paketmengenmodellierung, die in bestehenden Modellen bisher unberücksichtigt blieb
Modeling Framework for the Agent-based Simulation of Rail-based Urban Parcel Transport: An Application of a Two-stage Transport Chain Selection Model	Geplant in 2024	Full-Paper vorgestellt auf 16 th World Conference on Transport Research (WCTR) in Montreal, Kanada, in 2023; aktuell im	Vorstellung des Ansatzes zur Abbildung der LogIKTram im Verkehrsmodell, insbesondere des zweistufigen Transportkettenwahlmodells

		Review für Journal 'Research in Transportation Business & Management'	
Data Collection for Microscopic Modeling of Urban Parcel Transport to and from Establishments – Empirical Insights into City Logistics in the Region of Karlsruhe, Germany	Geplant in 2024	Full-Paper vorgestellt auf 50 th European Transport Conference (ETC) in Mailand, Italien, in 2022; für Veröffentlichung in 'Journal of Urban Mobility' angenommen; Veröffentlichung ausstehend	Vorstellung und Erörterung des Mixed-Method Datenkonzepts sowie Darstellung von jeweiligen Ergebnissen; Ableitung von Anpassungsbedarfen für zukünftige Befragungen von Unternehmen

Tabelle 2.7.3: Veröffentlichungen Teilvorhaben C (FZI)

Titel	Datum	Ort (Zeitungsname, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Integrating parcel delivery services into public transport operations through a common ICT platform	2024	Springer (im Druck)	Konferenzpapier. Vorstellung des LogIKTram-Konzepts. Darüber hinaus wurde die Architektur der LogIKTram IKT-Plattform vorgestellt und diskutiert.

Tabelle 2.7.4: Veröffentlichungen Teilvorhaben D (HSOG)

Titel	Datum	Ort (Zeitungsname, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Logistikkonzept für Gütertransporte per Straßenbahn. Analyse logistischer Anforderungen an ein Güterstraßenbahnkonzept	2022	Internationales Verkehrswesen 74 (2022) 3	Der zunehmende Güterverkehr auf Stadtstraßen belastet die Anwohner, Verkehrsteilnehmer und die Umwelt. Die Nutzung von Straßenbahnen zur Bewältigung des regionalen Güterverkehrs kann dazu beitragen eine Entlastung zu erzielen, indem eine bereits vorhandene Schieneninfrastruktur genutzt wird. In dieser Studie wird

			untersucht, welche Anforderungen an die Transportdienstleitung einer Güterstraßenbahn bestehen und wie diese in das logistische Konzept integriert werden können. Die Forschungsfrage wird mit einem qualitativen Studiendesign in Form einer multiplen Fallstudie beantwortet.
Planerische Herausforderungen im intermodalen Transport. Datenmodelle für den Austausch von Planungsdaten für regionale Gütertransporte	2022	Industrie 4.0 Management 38 (2022) 6	Aktuell wird die Logistikbranche immer wieder mit verschiedenen Herausforderungen konfrontiert, wie bspw. dem Fahrer-mangel sowie den Umweltauswirkungen durch den Güterverkehr. Im Vergleich zwischen den Verkehrsträgern spricht dies für eine stärkere Verlagerung des Gütertransportes von der Straße auf die Schiene. In diesem Beitrag werden die Herausforderungen für diese Verlagerung beleuchtet, und gezeigt, inwiefern neue Datenmodelle die Transportplanung und Wirtschaftlichkeitsbewertung regionaler Gütertramtransporte vereinfachen können.
Nachhaltiger straßenbahnbasierter Gütertransport	2022	Forschung im Fokus (2022) 25	Zunehmender städtischer und regionaler Güterverkehr belastet die Anwohner, Verkehrsteilnehmer und die Umwelt. Das Projekt LogIKTram verfolgt das Ziel, regionalen Güterverkehr von der Straße auf die Schiene zu verlagern und somit eine Entlastung zu erzielen. Diese Idee soll am Beispiel einer Gütertram in der Region Karlsruhe erprobt werden. Dafür entwickelt die Hochschule Offenburg unter anderem ein Logistikkonzept und ein Planungsmodell. Beides wird in einer IKT-Plattform umgesetzt.
Güterstraßenbahn	2022	Grundlagen der Logistik, Huss-Verlag	In dem Grundlagenbuh „Grundlagen Logistik“ für Praktiker und Studium wird die Gütertram grundlegend als Option des Transports vorgestellt (Basiswissen)
Konzepte für den regionalen Gütertransport per Stadtbahn	2023	Forschung im Fokus (2023) 26	Der Anstieg des urbanen Verkehrs belastet zunehmend die Anwohner, die Nutzer der Infrastruktur sowie die Umwelt. Während für die Personenbeförderung die Straßenbahnen eine Entlastung bieten, existieren für den innerstädtischen Logistikverkehr keine passenden Angebote.

			Aus diesem Grund verfolgt das Projekt LogIKTram das Ziel, den Logistikverkehr mit einer Gütertram auf die Schiene zu verlagern. Hierfür werden ein Logistikkonzept sowie verschiedene Planungsmodelle entwickelt, die eine vereinfachte Nutzung erlauben.
Data formats for communication between freight tram operator and forwarder	2023	Emerging Cutting-Edge Developments in Intelligent Traffic and Transportation Systems: Proceedings of the 7th International Conference (ICITT 2023), Incorporating the 7th International Conference on Communication and Network Technology (ICCNT) (2024) 50	Environmental aspects, efforts to reduce traffic congestion, shorter delivery times and an expected ongoing increase in freight traffic are only some of the partly contradictory challenges that the logistics industry has been facing for years. The use of passenger trams for freight transport in cities is one of the concepts to meet these challenges. The idea as such is not a new one and has already been tested and practiced in earlier times as well as in recent years. However current concepts suffer from a lack of an integrated concept of IT solutions in logistics. This article presents the logistics and operator concept needed for this and the Information and Communication Technology (ICT) platform required on the IT side to coordinate all stakeholders involved. In particular, the newly developed data formats as well as the use of existing standard formats for data exchange from public passenger transport and the integration of existing systems are discussed.
Bibliometric analysis as a means of efficiently evaluating trends in artificial intelligence	2024 (voraussichtl)	Conference Proceedings / IEEE Xplore	Transportation planners are increasingly relying on AI to optimize logistics and solve persistent challenges. However, as AI advances rapidly, most software vendors are unable to evaluate and implement all new developments. This paper uses bibliometric methods to track and evaluate the emerging trend of neurosymbolic AI, which combines neural networks with symbolic AI to improve decision making. By analyzing literature and citation data, we gain insights into the development and impact of neurosymbolic AI. The results provide a scalable approach for practitioners to efficiently identify and

			evaluate AI trends to facilitate the strategic adoption of technologies and innovations in transportation planning.
Logistikkonzept	2024 (geplant)	Offen	Ergebnisse des Arbeitspakets 1

Tabelle 2.7.5: Veröffentlichungen Teilvorhaben E (INIT)

Titel	Datum	Ort (Zeitungsname, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Integrating parcel delivery services into public transport operations through a common ICT platform	2024	Springer Lecture Notes in Mobility, Springer Nature, Berlin	Beschreibung der IKT-Plattform und Anforderungen die an einem gemischten Waren- und Personentransport gestellt werden. Der Fokus der Veröffentlichung liegt auf der IT-Infrastruktur sowie deren Integration in ein Gesamtsystem. Die Publikation ist eine gemeinsame Veröffentlichung mit dem FZI, Autoren: Jochen Wendel, Christoph Becker, Andrea Demetrio, Felix Elgner, Hannes Hameister, Dominic Warzok

Tabelle 2.7.6: Veröffentlichungen Teilvorhaben F (MARLO)

Titel	Datum	Ort (Zeitungsname, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Logistikkonzept für Gütertransporte per Straßenbahn: Analyse logistischer Anforderungen an ein Güterstraßenbahnkonzept	2022	Internationales Verkehrswesen	modulares Logistikkonzept sowie die zugrundeliegenden Anforderungen von Seiten der Dienstleister als auch möglicher Kundengruppen
Grundlagen der Logistik	2022	Huss-Verlag ISBN-13: 978-3949994074	Kapitel 10 Transportlogistik, Unterkapitel 10.9 Güterstraßenbahn

Tabelle 2.7.7: Veröffentlichungen Teilvorhaben G (SimPlan)

Titel	Datum	Ort (Zeitungsnamen, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Verbundprojekt LogistikTram zielt auf Logistikkonzept und IKT-Plattform für Gütertransport in Straßen- und Stadtbahnen – Region Karlsruhe fungiert als Modellregion	2022	https://www.simplan.de/forschung/forschungsprojekt-logiktram/	Vorstellung des Projektes

Tabelle 2.7.8: Veröffentlichungen Teilvorhaben H (DB E&C)

Titel	Datum	Ort (Zeitungsnamen, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Logistikkonzept für Gütertransporte per Straßenbahn: Analyse logistischer Anforderungen an ein Güterstraßenbahnkonzept	2022	Internationales Verkehrswesen	In dieser Veröffentlichung wird beschrieben, welche Anforderungen an die Transportdienstleistung einer Güterstraßenbahn bestehen und wie diese in das logistische Konzept integriert werden können. Die Forschungsfrage wird mit einem qualitativen Studiendesign in Form einer multiplen Fallstudie beantwortet.

Tabelle 2.7.9: Veröffentlichungen Teilvorhaben I (Hitachi Rail)

Titel	Datum	Ort (Zeitungsnamen, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
-	-	-	-

3 Verzeichnisse

3.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Struktur des Verbundvorhabens.....	5
Abbildung 2-1: Lösungsmodule zur Konfiguration von Transportleistungen	19
Abbildung 2-2: Typen von Fahrzeugen und deren Bewertung	20
Abbildung 2-3: Typen von Umschlagplätzen.....	21
Abbildung 2-4: Einordnung Prozesse zu System Gütertram	21
Abbildung 2-5: Vorgehensmodell zur Bearbeitung von Arbeitspaket 2.....	24
Abbildung 2-6: Use Case Übersicht.....	25
Abbildung 2-7: LogIKTram Systemkontext.....	26
Abbildung 2-8: LogIKTram IKT Plattform – Funktionale Komponenten	28
Abbildung 2-9: Durchführung	29
Abbildung 2-10: Fahrzeugumgrenzung (AVG 2022)	31
Abbildung 2-11: Beanspruchungen beim Bahntransport (TSI PRM, 2014).....	32
Abbildung 2-12: Übersicht der LogIKTram Gütekriterien.....	36
Abbildung 2-13: Integration und Abgrenzung der IKT-Plattform.	37
Abbildung 2-14: Die Systemkomponenten der IKT-Plattform bestehend aus Logistik (1), ÖV- Betrieb (2), Fahrzeugsystem und Ladungsträger aus AP4 (3), Simulationsumgebung (3) und den Tracking-Komponenten (5).....	39
Abbildung 2-15: Vernetzung und Prozesse des Buchungsmoduls (MARLO Consultants GmbH)	41
Abbildung 2-16: ÖV-Systemkomponenten Integration in der IKT-Plattform.....	42
Abbildung 2-17: Visualisierung des Status der Ladung, der Be- und Entladehaltestelle (links) sowie Informationen über den Bremsassistenten (rechts)	43
Abbildung 2-18: Integration der Paketlieferung in der Leitstellensoftware MOBILE-ITCS als Kartenansicht (1), als Echtzeitinformation und Verspätungsüberwachung (2) und als Umlaufplan in der Disposition (3).....	43
Abbildung 2-19: Integration der Informationen aus der IKT-Plattform sowie dem Ladungsträger und des Tramsystems auf dem Bordrechner COPILOTpc3 und dem Bedienteil (TOUCHit3)	44

Abbildung 2-20: Betriebsmodus Virtuelle Inbetriebnahme des Digitalen Zwillings.....	45
Abbildung 2-21: Architekturdiagramm des LogIKTram-Tracking-Backends	46
Abbildung 2-22: Übersicht der einzelnen Sendungen gruppiert nach Kategorien (links), Live Tracking - in Transport (mitte) und Status einer abgeschlossenen Sendung (rechts)	48
Abbildung 2-23: Abmessungen des für den Aufbau des Demonstrators genutzten Zweirichtungsfahrzeugs.	48
Abbildung 2-24: Randbedingungen für Fahrzeugkonzeption.....	49
Abbildung 2-25: <i>Fahrzeugkonzepte Demonstratorfahrzeug</i>	49
Abbildung 2-26: Trajektorie bei Einstieg auf Seite der geplanten Endposition.....	50
Abbildung 2-27: Trajektorie 2 bei Einstieg auf gegenüberliegender Seite	50
Abbildung 2-28: Multifunktionsbereich vorher (links), nachher (rechts)	51
Abbildung 2-29: Elektrischer Fahrradanhänger der Firma Nüwel	51
Abbildung 2-30: Bemaßte Vorderansicht, Seitenansicht und Draufsicht des Ladungsträgers ...	51
Abbildung 2-31: Erweiterte Systemarchitektur des automatisierten Ladungsträgers	52
Abbildung 2-32: Komponenten der Lenkaktorik (Quersteuerung).....	52
Abbildung 2-33: Neue Lenkachse mit zusätzlicher Abtriebsscheibe.....	52
Abbildung 2-34: <i>Konzept (links) und Umsetzung (rechts) der Fahrzeugsystemseitigen Ladungssicherung</i>	53
Abbildung 2-35: Bahnsteigaufbau zum Höhenausgleich und Klappe zur Spaltüberbrückung....	54
Abbildung 2-36: Systembild der Kommunikationswege bei der Ladungshandhabung [1].....	55
Abbildung 2-37: Architektur der Fernsteuerung.....	56
Abbildung 2-38: Grafische Oberfläche der App zur Fernsteuerung des Trailers.....	56
Abbildung 2-39: Architektur Datenrekorder, umgesetzt als LTG – Leittechnik Gateway	57
Abbildung 2-40: Ergänzung Verkabelung im Fahrzeug über alle drei Wagenteile hinweg.....	58
Abbildung 2-41: Teilsysteme Halteassistent, HMI für TF- und Kommunikation mit dem Backend bzw. Ladungsträger.....	58
Abbildung 2-42: Blockschaltbild zur Funktionsweise des Leittechnik Gateway	59
Abbildung 2-43: Kommunikation und grundlegender Aufbau des implementierten Halteassistenten.....	62
Abbildung 2-44: Importiertes Straßenbahnmodell in der Unreal Engine	63

Abbildung 2-45: Validierungskarten für die Straßenbahnsimulation	63
Abbildung 2-46: RVIZ-Visualisierungstool implementiert. Dieses Tool dient zur Visualisierung der Straßeninformationen und der Topologie	65
Abbildung 2-47: Roboterarm beim Greifen und Sortieren eines Paketes	66
Abbildung 2-48: Packstation mit Übergabebereich und Bedienfeld auf Kundenseite	66
Abbildung 2-49: Modell des Ladungsträgers und der Bahn aus der Nähe.....	67
Abbildung 2-50: Albtalbahnhof in der Unreal Engine 5 mit „Lumen“ und „Nanite“.....	67
Abbildung 2-51: Beladepunkt „Hagsfeld Bahnhof“ für den Ladungsträger.....	67
Abbildung 2-52: Endladepunkt „Essenweinstraße“ für den Ladungsträger.....	67
Abbildung 2-53: Inhalte des AP 5.....	68
Abbildung 2-54: Erhebungskonzept als Mixed-Method Ansatz	71
Abbildung 2-55: Häufigkeitsverteilung ein- und ausgehender Sendungen bei Unternehmen innerhalb einer Woche; N = 52.....	72
Abbildung 2-56: Überblick Modellierungsframework logiTopp.....	74
Abbildung 2-57: Detaillierung der Modellierung von Paketsendungen zu und von Unternehmen	75
Abbildung 2-58: Flächenmäßige Verteilung der zugestellten Pakete (links); Vergleich Paketmengenverteilung nach Sektor zwischen Modell und Literatur (rechts)	77
Abbildung 2-59: Vergleich Stoppanzahl mit und ohne Verträge (links); Wochenverteilung ausgehender Pakete von Unternehmen nach KEP-Dienstleister.....	78
Abbildung 2-60: Mögliche Transportketten durch Einführung einer mit der LogIKTram verbundenen City-Hub Struktur	79
Abbildung 2-61: Transportkettenwahlmodell	80
Abbildung 2-62: Linienverlauf und räumliche Situation im Basisszenario; Kartenquelle: KVV ...	82
Abbildung 2-63: Verkehrsleistung im LogIKTram Basisszenario	83
Abbildung 2-64: Analyse der Verkehrsleistung ausgewählter Szenarien der LogIKTram	84
Abbildung 2-65: Auswahl von Fotos aus professionellem Fotoshooting.....	87
Abbildung 2-66: Startseite der LogIKTram-Projektwebsite	87
Abbildung 2-67: Exemplarische Übersicht Printmaterialien.....	88
Abbildung 2-68: Impressionen von der Abschlussdemonstration	92

3.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1.1: Muster für die Beschreibung von Use Cases.....	24
Tabelle 2.1.2: Beispiel Use Case Zwischenlagerung Vorlauf	27
Tabelle 2.1.3: Notwendige Kräfte zur Ladungssicherung	32
Tabelle 2.1.4: Kriterien für die Auswahl der Haltestellen	34
Tabelle 2.1.5: Kriterien für die Auswahl der Linien	35
Tabelle 2.1.6: Auswahl von Gütekriterien.....	36
Tabelle 2.1.7: Übersicht und Beschreibung der Komponenten im Tracking-Backend	47
Tabelle 2.1.8: Berücksichtigte Normen	53
Tabelle 2.1.9: Statusupdates zwischen Ladungsträger, Backend und Recheneinheit.....	55
Tabelle 2.1.10: Aufgezeichnete Messgrößen und Geschwindigkeitsprofil zweier repräsentativer Fahrten	60
Tabelle 2.1.11: Meilensteine	94
Tabelle 2.2.1: Verwendung Teilvorhaben Konsortialführer.....	95
Tabelle 2.2.2: Verwendung Teilvorhaben B (KIT)	98
Tabelle 2.2.3: Verwendung Teilvorhaben C (FZI)	102
Tabelle 2.2.4: Verwendung D (HSOG).....	103
Tabelle 2.2.5: Verwendung Teilvorhaben E (INIT)	108
Tabelle 2.2.6: Verwendung Teilvorhaben F (MARLO).....	110
Tabelle 2.2.7: Verwendung Teilvorhaben G (SimPlan)	110
Tabelle 2.2.8: Verwendung Teilvorhaben H (DB E&C).....	111
Tabelle 2.2.9: Verwendung Teilvorhaben I (Hitachi Rail)	112
Tabelle 2.3.1: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben Konsortialführer	112
Tabelle 2.3.2: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben B (KIT).....	113
Tabelle 2.3.3: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben C (FZI).....	113
Tabelle 2.3.4: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben D (HSOG).....	114
Tabelle 2.3.5: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben E (INIT)	114
Tabelle 2.3.6: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben F (MARLO).....	115
Tabelle 2.3.7: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben G (SimPlan).....	116

Tabelle 2.3.8: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben H (DB E&C)	116
Tabelle 2.3.9: zahlenmäßiger Nachweis Teilvorhaben I (Hitachi Rail)	117
Tabelle 2.5.1: Verwertung Teilvorhaben Konsortialführer	118
Tabelle 2.5.2: Verwertung Teilvorhaben B (KIT)	119
Tabelle 2.5.3: Verwertung Teilvorhaben C (FZI)	119
Tabelle 2.5.4: Verwertung Teilvorhaben D (HSOG)	120
Tabelle 2.5.5: Verwertung Teilvorhaben E (INIT)	120
Tabelle 2.5.6: Verwertung Teilvorhaben F (MARLO)	121
Tabelle 2.5.7: Verwertung Teilvorhaben G (SimPlan)	122
Tabelle 2.5.8: Verwertung Teilvorhaben H (DB E&C)	123
Tabelle 2.5.9: Verwertung Teilvorhaben I (Hitachi Rail)	123
Tabelle 2.7.1: Veröffentlichungen Teilvorhaben Konsortialführer	124
Tabelle 2.7.2: Veröffentlichungen Teilvorhaben B (KIT)	124
Tabelle 2.7.3: Veröffentlichungen Teilvorhaben C (FZI)	126
Tabelle 2.7.4: Veröffentlichungen Teilvorhaben D (HSOG)	126
Tabelle 2.7.5: Veröffentlichungen Teilvorhaben E (INIT)	129
Tabelle 2.7.6: Veröffentlichungen Teilvorhaben F (MARLO)	129
Tabelle 2.7.7: Veröffentlichungen Teilvorhaben G (SimPlan)	130
Tabelle 2.7.8: Veröffentlichungen Teilvorhaben H (DB E&C)	130
Tabelle 2.7.9: Veröffentlichungen Teilvorhaben I (Hitachi Rail)	130

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN noch zu vergeben	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht zum Verbundvorhaben LogIKTram - Logistikkonzept und IKT-Plattform für stadtbahnbasierten Gütertransport	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Barthelmes, Lukas; Becker, Christoph; Burges, Ulrich; Diaz Turó, Lourdes; Dittrich, Ingo; Frey, Michael; Frindik, Roland; Koch, Günter; Rentschler, Christoph; Wendel, Jochen	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2024
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) – Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH, Tullastraße 71, 76131 Karlsruhe – Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe – FZI Forschungszentrum Informatik, Haid-und-Neu-Straße 10-14, 76131 Karlsruhe – Hochschule Offenburg - Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien, Badstraße 24, 77652 Offenburg – INIT Innovative Informatikanwendungen in Transport-, Verkehrs- und Leitsystemen GmbH, Käppelestraße 4-10, 76131 Karlsruhe – MARLO Consultants GmbH, Daxlander Str. 74, 76185 Karlsruhe – SimPlan AG, Sophie-Scholl-Platz 6, 63452 Hanau – DB Engineering & Consulting GmbH, Hinterm Hauptbahnhof 5, 76137 Karlsruhe – Hitachi Rail, Thalesplatz 1, 71254 Ditzingen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19A20008
	11. Seitenzahl 135
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin	13. Literaturangaben 42
	14. Tabellen 47
	15. Abbildungen 69
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	

18. Kurzfassung

Im Rahmen des Vorhabens LogIKTram wurde basierend auf der bestehenden Straßenbahn- und Eisenbahninfrastruktur des „Karlsruher Modells“ ein neuartiges Logistik- und Lieferkonzept für einen zukünftigen Gütertransport in Straßenbahn- und Stadtbahnwagen ausgearbeitet. Dieses neue Konzept stellt eine Lösung dar, mit deren Hilfe der öffentliche Raum trotz steigender Nachfrage im Wirtschaftsverkehr mithilfe des Verkehrsträgers Schiene, speziell mithilfe von Straßen-/Stadtbahnwagen, nachhaltig entlastet werden kann. Die Erarbeitung des Konzepts sowie die prototypische Umsetzung und Demonstration kritischer Elemente erfolgte in insgesamt fünf technisch-inhaltlichen Arbeitspaketen:

- 1 - Logistik- und Betreiberkonzept: Ein auf den Anforderungen der Logistikkunden aufbauendes Logistik- und Betreiberkonzept ermöglicht eine wettbewerbsfähige Gütertram und kann mittelbar den öffentlichen, städtischen wie regionalen Raum trotz steigender Nachfrage im Wirtschaftsverkehr nachhaltig entlasten. Dabei wurden Anforderungen aus der Verkehrssteuerung und aus Planungs- und Steuerungssicht der Unternehmen berücksichtigt.
- 2 - Anforderungen an IKT und an die technische Infrastruktur: Zur Buchung eines Transportauftrages durch den Logistikkunden, zur Steuerung des Transportes der Sendungen, zur Kommunikation der beteiligten Unternehmen und zur Abrechnung der Dienstleistungen wurde eine IKT-Plattform erarbeitet. Die Anforderungen an diese Plattform wurden basierend auf Anwendungsfällen des Logistik- und Betreiberkonzepts erhoben. Ebenso wurden Anforderungen an die technische Umsetzung (Anforderungen an IT-Schnittstellen, Fahrzeuge, Fahrweg, Lade- und Umschlagtechnik) und verfügbare Technologien für Umschlag und Transport erarbeitet. Dabei wurden Aspekte des diskriminierungsfreien Zugangs zur Eisenbahninfrastruktur beachtet.
- 3 - IKT-Plattform: Die IKT-Anforderungen aus dem Logistik- und Betreiberkonzept sowie die technischen Anforderungen wurden zusammen in das Design einer IKT-Plattform überführt, welche die Evaluierung des Konzepts inklusive der Planung und Steuerung auf Seiten der beteiligten Unternehmen unterstützt. Die wesentlichen Komponenten der Plattform wurden prototypisch implementiert und demonstriert. Ein digitaler Zwilling der Gütertram, der Verkehrsabläufe sowie der logistischen Abläufe an den Be-, Entlade- und Umladepunkten der Gütertram abbildet, wurde aufgebaut. Der digitale Zwilling diente einerseits der Konzeptüberprüfung in der Konzeptionsphase und andererseits zur Optimierung des Betriebs in einer späteren Einsatzphase.
- 4 - Ladungsträger-, Umschlag- und Fahrzeugsystem: Vorbereitend für die Überführung des Konzepts in die praktische Anwendung wurde ein Fahrzeugsystem entworfen, das die reibungslose technische Integration des Gütertransports in das bestehende Netz für den schienengebundenen ÖPNV ermöglicht („Gütertram“). Dazu gehören ein Ladungsträgerkonzept und die Fahrzeugplattform mit Be- und Entladetechnik sowie die Kopplungstechnik für die Zusammenführung mit dem Personenverkehr. Kritische Elemente der Konzepte wurden in Prototypen oder simulativ überprüft und demonstriert. Berücksichtigt wurden dabei auch Anforderungen, die sich aus dem automatisierten oder teilautomatisierten Be- und Entladen ergeben.
- 5 - Wirkungsforschung und Öffentlichkeitsarbeit: Für die langfristige innerstädtische und regionale Verkehrsplanung sowie als verkehrsplanerische Vorbereitung der Umsetzung der Logistikkonzepte wurde die Wirkung des Gütertransports auf das Schienennetz und das Straßennetz ermittelt. Dazu wurden Verkehrsnachfragemodelle eingesetzt, die sowohl den Lieferverkehr als auch den Personenverkehr und deren Wechselwirkungen in der Untersuchungsregion abdecken. In verschiedenen Szenarien wurden damit die Wirkungen verschiedener Lösungen analysiert. Die Öffentlichkeit ist zu einem frühen Zeitpunkt über Vorteile und Konsequenzen der Konzepte informiert worden. Dadurch konnten im konstruktiven Dialog Vorbehalte erfasst und gegebenenfalls ausgeräumt oder in den Konzepten berücksichtigt werden. Während der Projektdauer fanden zahlreiche Informationsaktivitäten statt, um den Technologie- und Wissenstransfer vor Ort und auch in andere Regionen sicherzustellen und die Öffentlichkeit fortwährend einzubinden.

19. Schlagwörter

Gütertransport, Logistik, IKT-Plattform, Gütertram, Straßenbahn, Stadtbahn, Automatisierung, Ladungssicherung, Wirkungsanalyse

20. Verlag

21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN to be defined	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Schlussbericht zum Verbundvorhaben LogIKTram - Logistikkonzept und IKT-Plattform für stadtbahnbasierten Gütertransport <i>Final report on the joint project</i> <i>LogIKTram - Logistics concept and ICT platform for urban rail-based freight transport</i>	
4. author(s) (family name, first name(s)) Barthelmes, Lukas; Becker, Christoph; Burges, Ulrich; Diaz Turó, Lourdes; Dittrich, Ingo; Frey, Michael; Frindik, Roland; Koch, Günter; Rentschler, Christoph; Wendel, Jochen	5. end of project 30.06.2024
	6. publication date
	7. form of publication Final report
8. performing organization(s) (name, address) – Albtal-Verkehrs-Gesellschaft mbH, Tullastraße 71, 76131 Karlsruhe – Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe – FZI Forschungszentrum Informatik, Haid-und-Neu-Straße 10-14, 76131 Karlsruhe – Hochschule Offenburg - Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien, Badstraße 24, 77652 Offenburg – INIT Innovative Informatikanwendungen in Transport-, Verkehrs- und Leitsystemen GmbH, Käppelestraße 4-10, 76131 Karlsruhe – MARLO Consultants GmbH, Daxlander Str. 74, 76185 Karlsruhe – SimPlan AG, Sophie-Scholl-Platz 6, 63452 Hanau – DB Engineering & Consulting GmbH, Hintern Hauptbahnhof 5, 76137 Karlsruhe – Hitachi Rail, Thalesplatz 1, 71254 Ditzingen	9. originator's report no.
	10. reference no. 19A20008
	11. no. of pages 135
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin	13. no. of references 42
	14. no. of tables 47
	15. no. of figures 69
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	

18. abstract

As a result of the LogIKTram project, a new logistics and delivery concept for future freight transportation in light rail vehicles was developed based on the existing light rail and streetcar infrastructure of the "Karlsruhe Model". This new concept represents a solution with the help of which the public space can be sustainably relieved despite increasing demand in commercial transport with the help of the rail mode of transport, especially with the help of tram/light rail vehicles. The development of the concept as well as the prototypical implementation and demonstration of critical elements was carried out in a total of five technical and content-related work packages:

1 - Logistics and operator concept: A logistics and operator concept based on the requirements of logistics customers enables competitive freight transport and can indirectly relieve the burden on public, urban and regional areas in the long term despite increasing demand in commercial transport. Requirements from traffic management and from the planning and control perspective of companies were taken into account.

2 - ICT and technical infrastructure requirements: An ICT platform was developed for the booking of a transport order by the logistics customer, for controlling the transport of the consignments, for communication between the companies involved and for invoicing the services. The requirements for this platform were determined based on the use cases of the logistics and operator concept. Requirements for the technical implementation (requirements for IT interfaces, vehicles, routes, loading and handling technology) and available technologies for handling and transport were also developed. Aspects of non-discriminatory access to the railway infrastructure were taken into account.

3 - ICT platform: The ICT requirements from the logistics and operator concept as well as the technical requirements were transferred together into the design of an ICT platform, which supports the evaluation of the concept including planning and control on the part of the participating companies. The key components of the platform were implemented and demonstrated as prototypes. A digital twin of the freight train, which maps the traffic flows and logistical processes at the loading, unloading and reloading points of the freight train, was created. The digital twin was used on the one hand to check the concept in the design phase and on the other hand to optimise operations in a later operational phase.

4 - Load carrier, handling and vehicle system: In preparation for the transfer of the concept into practical application, a vehicle system was designed that enables the smooth technical integration of freight transport into the existing network for rail-bound public transport ('freight tram'). This includes a load carrier concept and the vehicle platform with loading and unloading technology as well as the coupling technology for merging with passenger transport. Critical elements of the concepts were tested and demonstrated in prototypes or simulations. Requirements resulting from automated or semi-automated loading and unloading were also taken into account.

5 - Impact research and public relations work: The impact of freight transport on the rail and road network was determined for long-term inner-city and regional transport planning and as transport planning preparation for the implementation of the logistics concepts. To this end, transport demand models were used that cover both delivery traffic and passenger transport and their interactions in the region under investigation. The effects of different solutions were analysed in various scenarios. The public was informed about the advantages and consequences of the concepts at an early stage. This enabled reservations to be recorded in a constructive dialogue and, if necessary, dispelled or taken into account in the concepts. Numerous information activities took place during the project to ensure the transfer of technology and knowledge both locally and to other regions and to involve the public on an ongoing basis.

19. keywords

Freight transport, logistics, ICT platform, freight train, tram, light rail, automation, load securing, impact analysis

20. publisher

21. price