

4FLOW
Your supply chain solution

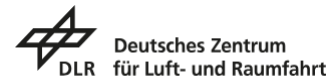


mFUND
Das Startkapital für die Mobilität 4.0

ubilabs



4PL Intermodal



Schlussbericht



HEGEL

Nutzung des Potenzials von Hypernetzwerken in Güterverkehr und Logistik

Förderkennzeichen:

01F2201A
01F2201B
01F2201C
01F2201D
01F2201E
01F2201F

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

**Verbundname: Hypernetwork of German Logistics - Nutzung
des Potenzials von Hypernetzwerken in Güterverkehr und
Logistik**

Akronym: HEGEL

Förderkennzeichen: 01F2201

Laufzeit:

01/2022 – 03/2025

Verbundkoordinator:

4flow SE / 4flow research

Dr. Ole Hansen

Hallerstraße 1

10587 Berlin

T +49 (0)30 39740-0

F +49 (0)30 39740-100

o.hansen@4flow.com

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	5
I. Kurzdarstellung.....	6
1. Zielstellung.....	6
2. Voraussetzungen sowie Stand der Wissenschaft und Technik.....	6
3. Ablauf des Vorhabens.....	7
4. Übersicht Ergebnisse.....	8
II. Eingehende Darstellung.....	9
1. Einleitung.....	9
2. Verwendung der Zuwendung.....	9
3. Ergebnisse.....	9
a. Übersicht Arbeitspakete.....	10
b. Systemanalyse logistischer Netzwerke und deren Märkte [KLU].....	10
c. Datenakquise für logistische Hypernetzwerke [IIS].....	14
d. Modellierung von logistischen Hypernetzwerken [DLR].....	22
e. Potenzialstudien zur Transparenz von logistischen Hypernetzwerken [4flow].....	38
f. Innovative Dienstleistungen für logistische Hypernetzwerke [ubilabs].....	43
4. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	48
5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	49
6. Fortschreibung des Verwertungsplans.....	49
7. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	49
Literaturverzeichnis.....	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht verschiedener Arten von Ergebnissen aus HEGEL.....	8
Abbildung 2: Datenrahmen zu logistischen Datenquellen in Deutschlands	13
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Evaluationsprozesses mit Evaluationsmatrix rechts.....	15
Abbildung 4: Vereinfachte und grafische Darstellung der Ontologie des erstellten Knowledge Graphen.....	17
Abbildung 5: Visuelle Darstellung eines Auszugs des erstellten Knowledge Graphen	17
Abbildung 6: Statistik des deutschen KV-Marktes 2022	19
Abbildung 7: Statistik des deutschen KV-Marktes 2022 nach Segmentierung	19
Abbildung 8: Tracking-Ergebnisse für Stückgutverkehr im Raum Nürnberg.....	20
Abbildung 9: Visuelle Abbildung der Verschneidung der Tracking-Ergebnisse mit Informationen aus OpenStreetMap.....	20
Abbildung 10: Schematische Darstellung des Tourenaufbaus mittels neuronaler Netze. Quelle: eigene Darstellung	21
Abbildung 11: Vergleich von Merkmalen realer und synthetischer Touren. Quelle: eigene Darstellung	21
Abbildung 12: Abbildung des Multigraph-Netzwerks mittels einer Supra-Adjazenzmatrix nach Cozzo et al. (2016)	24
Abbildung 13: Vier verschiedene Typen von Multi-Graphen nach Boccaletti et al. (2016).....	25
Abbildung 14: Intermodales Teaching Tool.....	27
Abbildung 15: Verkehrszellen in dem Nachfragemodell Demo-GV. Quelle: eigene Darstellung des DLR	30
Abbildung 16: Nationales KV-Netz (oben). Daten zu Terminals nach Hecht & Liedtke (2020) Ausschnitt aus dem agentenbasierten Verkehrssimulationsmodell MATSim mit der Erweiterung auf KV-Simulation (unten).....	30
Abbildung 17: Struktur des Lebensmittel-Hypernetzwerks – Akteure, Verbindungen, Daten und Modellierungsansätze. Quelle: eigene Darstellung der KLU.....	32
Abbildung 18: Simulationsergebnisse der Basis- und Zukunftsszenario mit verbessertem Umschlag. Quelle: eigene Darstellung des DLR	33
Abbildung 19: Ergebnisse aus dem Rücklauf der Terminalbefragung. Quelle: Thümler (2025).....	34
Abbildung 20: Vergleich eines hypothetischen Ausbruchsmusters mit der räumlichen Verteilung von Filialen unterschiedlicher Handelsketten. Quelle: eigene Darstellung der KLU	35
Abbildung 21: Verteilung von belieferten Filialen des Aldi Nord Lager Bargteheide und des Edeka Nord Lager Valluhn / Zarrentin. Quelle: eigene Darstellung der KLU	35
Abbildung 22: Datenbankdiagramm der selbst entwickelten Universal Freight Network Specification	36
Abbildung 23: Das Schienengüterverkehrs-Ökosystem	37
Abbildung 24: Vorgehen der Fallstudie bei einem Netzwerk mit Schwerpunkt auf unimodale Transporte	39
Abbildung 25: Ergebnisse Fallstudie zu Netzwerk mit Fokus auf unimodale Transporte	40
Abbildung 26: Ein Ausschnitt der Daten zur Servicezugänglichkeit des Terminaloperators Contrargo. Quelle: eigene Darstellung der KLU	42
Abbildung 27: Konzept des interaktiven, operativen Logistik-Tools mit Echtzeitdaten und Integration verschiedener Datenquellen	47
Abbildung 28: Interaktive Analyse der Abdeckung Deutschlands durch logistische Knotenpunkte in der UFNS Suite (Link: https://ufns.ubilabs.dev/)	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die inhaltlichen Arbeitspakete im Projekt	10
Tabelle 2: Ausgewählte Netzwerkindikatoren (Ducruet 2017)	26
Tabelle 3: Andere Veröffentlichungen	50
Tabelle 4: Abschlussarbeiten.....	51

I. Kurzdarstellung

1. Zielstellung

Die Übergeordnete Zielstellung des Projekts HEGEL bestand darin, intermodale logistische Hypernetzwerke mit Hilfe von Modellen transparent, verständlich und nutzbar zu machen. Ferner sollten folgende Teilzielstellungen erreicht werden:

- Die Erschließung öffentlicher Datenquellen mit der mCloud¹ als zentralem Baustein sowie die Ergänzung empirischer und modellierter Daten auf der Plattform. Zunächst sollten Datenanforderungen und -bedarfe definiert und beschrieben werden. Darauf folgt das Erschließen und Beschreiben der zu verwendenden öffentlichen Datenquellen sowie die Ergänzung um empirische und modellierte Daten zur Bedienung der Datenbedarfe. Dieses Teilziel wird ab Beginn des Projekts verfolgt und stellt die Datenbasis für weitergehende Entwicklungen bereit.
- Die Entwicklung und exemplarische Implementierung eines Konzepts zur Darstellung von intermodalen (Straße, Schiene, Binnenschifffahrt) logistischen Hypernetzwerken. Auf das Konzept für die Beschreibung und Darstellung von Hypernetzwerken folgt die exemplarische Implementierung.
- Das Aufzeigen von Potenzialen der Hypernetzwerke für die Logistik und die Verkehrsplanung. Zu Ersterem führen insbesondere die Praxispartner aus der Logistik Fallstudien durch. Es wird von den Partnern 4PL Intermodal und 4flow jeweils mindestens eine umfassende Fallstudie erstellt. Die Potenziale für die Verkehrsplanung werden durch die Partner KLU und DLR in qualitativer Form beschrieben und dokumentiert.
- Die Entwicklung, Konzeption und prototypische Implementierung innovativer und skalierbarer Dienstleistungen (z.B. Karten-Dashboards).

2. Voraussetzungen sowie Stand der Wissenschaft und Technik

Das Projekt befasste sich mit den Forschungsgebieten Güterverkehr, intermodale Transportnetzwerke, Hypernetzwerke und Physical Internet (Montreuil 2011). Zur Informationsrecherche wurden gängige Dienste wie z.B. Google Scholar und SCOPUS verwendet. Für die Dokumentation kamen, insbesondere in den angefertigten Abschlussarbeiten, verschiedene Dienste wie beispielsweise Citavi oder Zotero zum Einsatz. In der Güterverkehrsforschung wird die Wichtigkeit logistischer Netzwerke immer mehr betont (Tavasszy und Friedrich 2019). Ein intermodales Transportnetzwerk-Modellierungsproblem lässt sich aufgrund sehr komplexer Wechselwirkungen – auch auf unterschiedlichen Zeitskalen – aus verschiedenen Blickwinkeln betrachten. In den vergangenen Jahren wurden einschichtige Netzwerke vornehmlich im Kontext der Graphentheorie untersucht, wobei aktuell der Fokus immer mehr auf der ganzheitlichen Betrachtung des Gesamtsystems aller relevanten Akteure liegt. So können wichtige Einblicke in die Netzwerkstrukturen gewonnen werden und maßgebende Eigenschaften wie Anzahl der Verbindungen, Dichte der Knoten sowie Dynamiken im Gesamtsystem, qualitativ analysiert werden (Zappa und Lomi 2015). Mit Blick auf vielschichtige Dynamiken kommt der Gesamtsystemlogik bei der Betrachtung von Wertschöpfungssystemen erhöhte Bedeutung zu (Papert und Pflaum 2017). Das Konzept der mehrschichtigen Netzwerke wird um so genannte Hypernetzwerke erweitert. Diese erlauben zusätzlich, die dynamische Zustandsänderung der einzelnen Knoten abzubilden –

¹ Inzwischen als „Mobilithek“ bekannt – siehe <https://mobilithek.info/>

beispielsweise werden hier durch die Verspätung eines Containers eines Netzwerkakteurs in Schicht 1 das Netzwerk in Schicht 2 ebenfalls beeinträchtigt, Wechselwirkungen also explizit abgebildet (Xu et al. 2021). Hypernetzwerkansätze stammen aus dem Bereich der komplexen Netzwerke und wurden bereits auf viele weitere Bereiche übertragen (Aleta und Moreno 2018). Für die Güterverkehrs-Modellierung und Logistik existieren hier ebenfalls erste Ansätze (Tavasszy, Ruijgrok and Davydenko 2012).

Es existieren viele Datenquellen, welche die Logistikindustrie und ihre Akteure, Leistungen und historische Entwicklungen von Nachfrage, Angebot oder Preisen beschreiben (z. B. Top100 der Logistik sowie L.Immo Online). Da hier jedoch die Verknüpfungen zwischen den Netzwerken der verschiedenen Industriesektoren und den Transportmodalitäten fehlen, lassen sich allein auf dieser Grundlage noch keine Hypernetzwerke bilden. Die Relevanz der Hypernetzwerke als Schritt in Richtung eines Physical Internet in der Logistik wird u.a. durch das europäische Forschungsprojekt ALICE beschrieben. Das Physical Internet kann neben intermodalen Transporten auch Themen wie Standardisierung von Containern, Tourenplanung oder Stadtlogistik betreffen. Allerdings wurde noch nicht hinreichend beantwortet, wie das Konzept des Physical Internets in der Praxis operationalisiert werden kann. Im Bereich mehrschichtiger Logistiknetzwerke gibt es in der Literatur bereits erste Untersuchungen, die die Vorteile des Physical Internets gegenüber einer digitalen Zusammenarbeit untersuchen (Franklin and Dong 2020).

3. Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Vorhabens gliedert sich in sechs Arbeitspakete (AP), die nachfolgend kurz zusammengefasst werden. Das übergeordnete Arbeitspaket zur Begleitforschung (AP 0) wurde von 4flow geleitet und erstreckte sich über die gesamte Dauer des Projekts. Die Kühne Logistics University (KLU) übernahm die Leitung der Systemanalyse logistischer Netzwerke und deren Märkte (AP 1). Hier wurden u.a. logistische Netzwerke mit Hilfe einer breiten Literaturrecherche analysiert, Sekundärquellen identifiziert und bewertet und darauf basierend Teilmärkte und Datenbedarfe definiert. Die Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Supply Chain Services (IIS) leitete die Datenakquise für logistische Hypernetzwerke (AP 2). In diesem Arbeitspaket wurden Methoden zur Entwicklung großer Datenmengen entwickelt, bestehende Methoden zur Verschneidung unstrukturierter Daten evaluiert und weiterentwickelt, Primärdaten logistischer Anbieternetzwerke sowie von Warenflüssen und Transportketten erfasst und Datenlücken abgeleitet. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Verkehrsforschung (DLR) war hauptverantwortlich für die Modellierung von logistischen Hypernetzwerken (AP 3). Es wurden intermodale Transportketten mittels deskriptiver Multi-Network Verfahren analysiert, Netzwerkdynamiken mittels KI-Verfahren optimiert, entwickelte Modelle parametrisiert, Simulationen durchgeführt sowie ausgewertet und Verknüpfungslogiken entwickelt. Die Leitung der Potenzialstudien zur Transparenz von logistischen Hypernetzwerken (AP 4) wurde von der 4flow SE (4flow) übernommen. Parallel zur Integration der bisherigen Ergebnisse in die Verkehrsmodellierung wurden Potenzialstudien mit den Schwerpunkten unimodale sowie intermodale Transporte durchgeführt und zusätzliche Dienstleistungen konzipiert. Die Ubilabs GmbH (ubilabs) übernahm schließlich die Leitung der übergeordneten Konzipierung innovativer Dienstleistungen für logistische Hypernetzwerke (AP 5). Hierzu wurden Anforderungen von Nutzern innovativer Softwareservices in der Logistik aufgenommen, Daten-Pipelines zur Verarbeitung großer Datenmengen aus logistischen Netzwerken konzipiert sowie verknüpft, bevor anwenderorientierte, interaktive Visualisierungen erstellt wurden.

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde der aktive Austausch mit anderen Stellen gesucht, so dass inhaltliche Diskussionen mit u.a. dem mFund-Projekt DiSTILL (Digitales Simulations-Tool zur Weiterentwicklung des Lausitzer Reviers zur Internationalen Logistkdrehscheibe Lausitz), dem Horizon-Europe-Projekt ReMuNet (Resilient Multimodal freight Transport Network) sowie dem SGKV (Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr e.V.) zustande kamen.

4. Übersicht Ergebnisse

In HEGEL wurde eine Vielzahl an Ergebnissen erreicht, die es Akteuren der Wirtschaft, der Wissenschaft sowie der Politik erleichtert, die Potenziale von Hypernetzwerken hinsichtlich Verbesserungen bei Kosten, Nachhaltigkeit und Resilienz zu erschließen. Ein beispielhafter Auszug dieser Ergebnisse findet sich in Abbildung 1 wieder. Der linke obere Quadrant zeigt ein Beispiel für Erkenntnisse aus Erhebungen und Interviews zum intermodalen Markt, die durchgeführt, analysiert, strukturiert und teilweise in der Mobilithek zur Verfügung gestellt wurden. Diese Ergebnisse sind für quasi alle Akteure relevant, da sie die Transparenz eines ansonsten stark intransparenten Angebotsmarkts erhöhen und so Potenziale in einem ersten Schritt offenlegen können. Der rechte obere Quadrant veranschaulicht die in GIS-Systemen verorteten Verhaltensdaten, die im Projekt erhoben und analysiert wurden. Die hieraus abgeleiteten Erkenntnisse wurden zur Erstellung der verkehrspolitischen Empfehlungen durch das DLR genutzt. Der linke untere Quadrant zeigt das Vorgehen bei einer der Fallstudien zur Bestimmung intermodaler Potenziale. Es kann als Anleitung zur Evaluierung von Potenzialen der Priorisierung von intermodalen Transporten, insbesondere durch Akteure der Privatwirtschaft, genutzt werden. Schließlich stellt der rechte untere Quadrant beispielhaft eine der konzipierten innovativen Dienstleistungen inklusive umgesetzter Visualisierung dar. Die zum Abschluss des Projekts ausgestalteten Ideen, Konzepte und Prototypen sind vor allem für Akteure der Wirtschaft, in bestimmten Fällen aber auch für andere Zielgruppen von Nutzen.

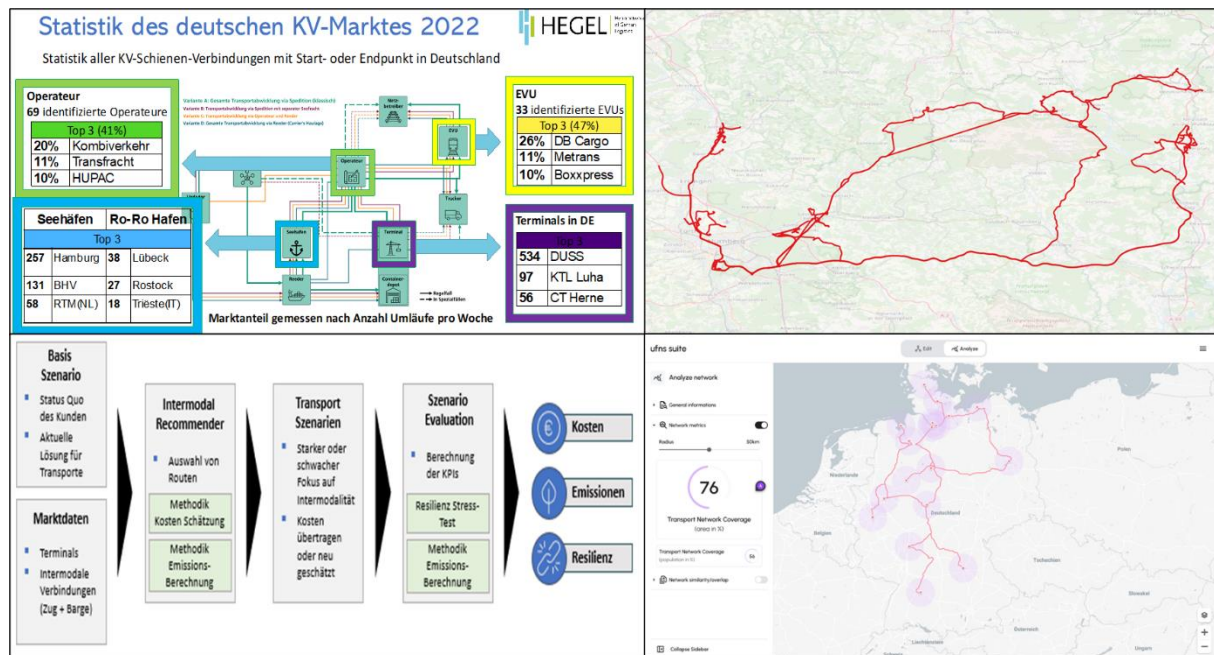


Abbildung 1: Übersicht verschiedener Arten von Ergebnissen aus HEGEL

II. Eingehende Darstellung

1. Einleitung

Dieser Schlussbericht beschreibt die Ergebnisse der Arbeiten, die im Zeitraum vom 01.01.2022 bis 31.03.2025 im Gesamtprojekt *Nutzung des Potenzials von Hypernetzwerken in Güterverkehr und Logistik (Förderkennzeichen 01F2201)* erarbeitet wurden. Aufbau und Struktur des Berichts orientieren sich an der Vorlage des mFund aus dem Jahr 2025. Das Projekt HEGEL fokussierte den intermodalen Transportmarkt als zentralen Forschungsgegenstand. Intermodale logistische Hypernetzwerke sollten transparent, verständlich und nutzbar gemacht werden. Dazu beitragen sollten die Erschließung öffentlicher Datenquellen mit der Mobilithek als zentralem Baustein sowie die Ergänzung empirischer und modellierter Daten auf der Plattform. Ferner sollte ein Konzept zur Darstellung von intermodalen (Straße, Schiene, Binnenschifffahrt) logistischen Hypernetzwerken entwickelt und exemplarisch implementiert werden. Auf diese Vorarbeiten fußten die Identifikation und beispielhafte Bewertung von Potenzialen der Hypernetzwerke für die Logistik in Unternehmen in Form von Fallstudien sowie für die Verkehrsplanung. Der letzte Bestandteil des Projekts war die auf alle vorherige Arbeiten aufbauende Entwicklung, Konzeption und prototypische Implementierung innovativer und skalierbarer Dienstleistungen, insbesondere solchen mit angeschlossenen Visualisierungen.

2. Verwendung der Zuwendung

Der wesentliche Teil der Zuwendung wurde für Personalausgaben verwendet. Diese Ausgaben spiegeln sich in den erzielten Ergebnissen der Arbeitspakete wider. Die entstandenen Reisekosten resultieren aus den notwendigen Projekttreffen zwischen den Verbundprojektpartnern sowie aus der Teilnahme an wissenschaftlichen Konferenzen, welche als Plattformen für die Präsentation von Forschungsergebnissen sowie den Austausch von aktuellen Erkenntnissen aus Wissenschaft und Praxis genutzt wurden. Zudem entstanden Kosten im Rahmen der Schließung von Datenlücken mittels kommerziell erwerblicher Datensätze. Weitere Teile der Zuwendung wurden u.a. für die Teilnahme von Mitgliedern aus dem Expertengremium, z.B. am Meilensteintreffen, aufgewendet. Ein detaillierter Verwendungsnachweis je Projektpartner existiert parallel zu diesem Dokument.

Eine relevante Änderung im Vergleich zur ursprünglichen Arbeitsplanung hat sich bei der Bearbeitung von Arbeitspaket 2.3 ergeben. Hier wurde ursprünglich geplant, eine Umfrage durchzuführen, um Informationen über den Markt und die Kooperationsformen zu sammeln. Allerdings hat sich im Verlauf des Projekts herausgestellt, dass der Markt heterogener ist als erwartet und dass die Zusammenhänge der Kooperationen komplexer sind als zunächst angenommen. Aus diesem Grund wurde entschieden, die Methodik zu ändern und statt der Umfrage nun mindestens 30 Interviews durchzuführen. Diese Entscheidung wurde in Abstimmung mit dem Projektträger getroffen. Durch die Interviews erwarten die Projektpartner ein besseres Verständnis der komplexen Zusammenhänge und kann gezielter auf die verschiedenen Bedürfnisse der Kooperationspartner eingehen. Bezüglich der Zeit- und Kostenplanung ergeben sich durch den Wechsel der Erhebungsmethode keine weiteren Änderungen.

3. Ergebnisse

a. Übersicht Arbeitspakete

Die nachfolgenden Abschnitte beinhalten die Darstellung der Ergebnisse der inhaltlichen Arbeitspakete (AP 1 bis AP 5), die Tabelle 1 übersichtsartig zusammenfasst.

Tabelle 1: Übersicht über die inhaltlichen Arbeitspakete im Projekt

AP 1	Systemanalyse logistischer Netzwerke und deren Märkte [KLU]
AP 1.1	Analyse logistischer Netzwerke
AP 1.2	Identifikation und Bewertung von Sekundärquellen
AP 1.3	Definition zusätzliche Datenbedarfe und Teilmärkte
AP 2	Datenakquise für logistische Hypernetzwerke [IIS]
AP 2.1	Entwicklung von Methoden zur Erhebung großer Datenmengen
AP 2.2	Evaluierung und Weiterentwicklung von bestehenden Methoden zur Verschneidung unstrukturierter Daten
AP 2.3	Primärdatenerhebung zur Erfassung logistischer Anbieternetzwerke
AP 2.4	Primärdatenerhebung zur Erfassung von Warenflüssen und Transportketten
AP 2.5	Ableitung der Datenlücken
AP 3	Modellierung von logistischen Hypernetzwerken [DLR]
AP 3.1	Analyse der intermodalen Transportketten mittels deskriptiver Multi-Network Verfahren
AP 3.2	Optimierung der Netzwerkdynamiken mittels KI bzw. ML-Verfahren
AP 3.3	Parametrisierung des entwickelten Modells
AP 3.4	Simulation und Auswertung der Ergebnisse
AP 3.5	Entwicklung von Verknüpfungslogiken
AP 4	Potenzialstudien zur Transparenz von logistischen Hypernetzwerken [4flow]
AP 4.1	Integration in die Verkehrsmodellierung
AP 4.2	Potenzialstudie mit Schwerpunkt unimodale Transporte
AP 4.3	Potenzialstudie mit Schwerpunkt intermodale Transporte
AP 4.4	Konzipierung zusätzlicher Dienstleistungen
AP 5	Innovative Dienstleistungen für logistische Hypernetzwerke [ubilabs]
AP 5.1	Aufnahme von Anforderungen der Nutzer innovativer Softwareservices in der Logistik
AP 5.2	Konzeption von Daten-Pipelines zur Verarbeitung großer Datenmengen aus den logistischen Netzwerken
AP 5.3	Verknüpfung und anwenderorientierte, interaktive Visualisierung der gesammelten Daten

In allen AP erfolgte eine enge Zusammenarbeit sowie detaillierte Abstimmung der Projektpartner unter der Projektkoordination von 4flow.

b. Systemanalyse logistischer Netzwerke und deren Märkte [KLU]

i. Analyse logistischer Netzwerke

Zur Vorbereitung auf zukünftige Arbeitspakete wurden zunächst umfangreiche Literaturrecherchen durchgeführt. Diese beinhalteten eine Analyse verschiedener Begriffe im Zusammenhang mit Netzwerken und Kollaboration sowie eine Überprüfung von Veröffentlichungen zum Thema Logistik, insbesondere der aktuellen Version der „Top100 der Logistik“, die vom Partner IIS herausgegeben wird. Zusätzlich wurden Praxisberichte, White-Paper und wissenschaftliche Literatur gesichtet und die Erkenntnisse integriert. Um den heterogenen Logistikmarkt umfassend zu erfassen, wurden die Teilsegmente nach Transportart, Kundenanforderungen und spezifischen Leistungsmerkmalen kategorisiert. Die Marktsegmente wurden von klein-stückigen und leichten Gütern bis hin zu

Massenguttransporten eingeteilt, wobei komplexe und integrierte Leistungen mehrere Schritte entlang der logistischen Kette kombinieren. Die Trennung der Teilmärkte ist oft schwierig, da Logistikleistungen im Kontext von Leistungsbündeln erbracht werden.

Um dennoch eine möglichst konkrete Auswahl an Logistikbereichen mit ihren jeweiligen Spezifika für die Modellierung der Hypernetzwerke im HEGEL-Projekt heranzuziehen, wurden die Teilmärkte hinsichtlich ihrer Komplexität, Akteurs-Landschaft und Affinität zu unternehmensübergreifenden Kooperationen kategorisiert und im Rahmen von mehreren Workshops mit den Projektpartnern bewertet. Dabei wurde sich auf folgende vier Fokusegmente des Logistikmarkts zur näheren Untersuchung geeinigt:

- **Allgemeine Stückgutverkehre:** Transporte von individuell etikettierten Trocken- und Stapelgütern ohne besondere Behandlungsanforderungen im Gewichtsbereich oberhalb von ca. 31 kg (kleinere Sendungen siehe KEP-Dienste) bis zu ca. 2.500 kg, die in regionalen Depots gebündelt, fakturiert und mit nicht spezialisierten Standard-Lkws und Ladegefäßen auf dem Landweg befördert werden. Je nach Netzwerkorganisation liegt die Gewichtsgrenze auch oberhalb der 2.500 kg. Diese Ladungen werden entweder innerhalb des Stückgutnetzes abgewickelt und in Depots konsolidiert oder per Milkrun gesammelt und distribuiert. Dieses Marktsegment wurde u.a. aufgrund der bereits etablierten unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit in Form von Stückgut-Kooperationen ausgewählt, die der Definition von Hypernetzwerken in der Praxis sehr nahekommen.
- **Kombinierter Verkehr (Straße – Schiene):** Hier werden branchenübergreifend Rampe-zu-Rampe-Ladungstransporte von Containern betrachtet, die mit einer Kombination von Lkw und Bahn abgewickelt werden und üblicherweise einen Vorlauf per Lkw (zum KV-Terminal), einen Hauptlauf auf der Schiene (KV-Terminal zu KV-Terminal) und einen Nachlauf per LKW (zur Senke) umfassen. Dieses Marktsegment weist eine, vergleichsweise, komplexe Akteurs-Landschaft (u.a. Verlader, Operateure, Spediteure, Terminalbetreiber, EVUs, Reeder) auf und bietet deshalb zahlreiche Ansatz- und Diskussionspunkte für Kooperationen in Form von Hypernetzwerken.
- **Industrielle Kontraktlogistik im Automotive Bereich:** Darunter sind Leistungen spezialisierter, kontraktgebundener Systeme der Materialversorgung, Produktionsversorgung und Ersatzteilversorgung in der Automobilindustrie, wie beispielsweise Gebietsspeditionssysteme, JIT- und JIS-Abwicklungen, Zwischenwerksversorgung sowie geschlossene Ersatzteil-Versorgungssysteme zusammengefasst. Im Gegensatz zu den beiden erstgenannten Marktsegmenten wird hier bewusst eine Eingrenzung auf eine Verlader-Branche vorgenommen, um bei der Modellierung der Hypernetzwerke möglichst konkrete Strukturen und Verhaltensweisen ansetzen zu können. Die Automobilindustrie wurde dabei u.a. aufgrund ihrer hohen Anforderungen an die Logistikleistungen sowie ihrer hohen volkswirtschaftlichen Bedeutung ausgewählt.
- **Konsumgüterkontraktlogistik im Lebensmittel-Bereich:** Hier werden spezialisierte Transport-, Lager- und Mehrwertleistungen für die Distributionssysteme der Konsumgüterwirtschaft und des Einzelhandels, insbesondere für Lebensmittel betrachtet. Da auch innerhalb dieses Marktsegments je nach Kundenbranche starke Unterschiede bei den Logistikstrukturen auftreten, wurde sich hier ebenfalls bewusst auf eine Branche fokussiert. Der Bereich

Lebensmittel wurde dabei aufgrund seiner hohen Bedeutung für die Bevölkerungsversorgung sowie bestehender Expertise im Projektteam ausgewählt.

Auf Seiten der theoretischen Erforschung von Hypernetzwerken wurden die wichtigsten Forschungsarbeiten, die hauptsächlich mit den Bereichen Supply Chain und Logistik zusammenhängen, unter Berücksichtigung von Supernetzwerken, Hypernetzwerken und Multilayer-Netzwerken überprüft. Die Bedeutung der Untersuchung dieser Begriffe ist durch die zunehmende Anzahl von Störungen und Resilienz Problemen in der Supply Chain, im Frachttransport und in Logistiknetzwerken begründet. Die Modellierung einfacher Netzwerke kann die zugrundeliegenden Beziehungen und Wechselwirkungen in komplexen Netzwerken nicht ausreichend darstellen. Die Berücksichtigung von Aspekten aus den Bereichen der Hypernetzwerke, Supernetzwerke und Multilayer-Netzwerke ist daher nach den Erkenntnissen der Recherche zwingend notwendig, um die in der Praxis existierenden Netzwerke hinreichend abzubilden. Die vorhandene Forschung zu diesen Netzwerken ist jedoch begrenzt. Die Recherche zur Forschung zu den drei Begriffen ergab insgesamt 27 Forschungsartikel, die daraufhin analysiert wurden.

ii. Identifikation und Bewertung von Sekundärquellen

Aufbauend auf den ersten Vorarbeiten aus der Analyse logistischer Netzwerke wurden relevante Datenquellen für die deutsche Logistik identifiziert und eingeordnet. Dabei wurden sowohl die Nützlichkeit als auch der Reifegrad für die Modellierung von Hypernetzwerken bewertet. Um diese Datenquellen zu sammeln, wurden öffentlich verfügbare Quellen durchsucht und explorative Interviews mit HEGEL-Partnern und externen Experten geführt.

Im Anschluss wurden die Quellen abhängig von der Art der Daten wie folgt aggregiert und kategorisiert:

- **Nicht-öffentliche Daten:** Private Daten von Unternehmen, Daten von Institutionen auf einem Detailniveau, das der Allgemeinheit nicht zugänglich ist.
- **Kommerzielle Daten:** Von Unternehmen gesammelte Daten, die gegen eine Gebühr erhältlich sind.
- **Empirische Daten:** Umfragen bei Versendern und Transportunternehmen sowie Interviews mit Experten auf dem Gebiet.
- **Modellierte Daten:** Verwendung von Referenzwerten, Parametern und vorhandenen Daten als Eingabe, um gewünschte Daten als Ausgabe zu generieren.

Insgesamt wurden 54 Datenquellen identifiziert, von denen 20 über die Plattform "Mobilithek" (vormals „mCloud“) zugänglich sind. Jede Quelle wurde hinsichtlich wichtiger allgemeiner Merkmale, Unterscheidungsmerkmale, spezieller Abdeckungen, Periodizität, Verkehrsmittel sowie weiterer Parameter bewertet. Zusätzlich wurden Infrastrukturdaten gesammelt, um eine interaktive Karte mit Umschlagspunkten für verschiedene Transportmodalitäten in Deutschland zu erstellen und relevante Emissionsrechner als Grundlage für spätere Berechnungen in den Fallstudien identifiziert. Eine Übersicht, die auch auf der Hamburg International Conference of Logistics (HICL) veröffentlicht wurde, bewertete den Stand der Literatur zur Resilienz in Transportnetzwerken.

Es wurden verschiedene Datenquellen genutzt, um Informationen für eine interaktive Karte zu sammeln. Hierbei wurden Informationen von Unternehmensseiten automatisch ausgewertet und durch weitere Informationsquellen und die Befragung von Experten ergänzt. Die so erlangten Daten umfassen unter anderem Geo-Informationen zu Bahnhöfen und Umschlagspunkten, Informationen zu

Betreibern und ansässigen Industrien sowie Angaben dazu, ob der Umschlagspunkt privat oder öffentlich ist. Zudem wurden Abfahrtszeiten von Zügen und Netzwerke von einzelnen Logistikdienstleistern erfasst. Emissionsdaten wurden in Einklang mit bekannten Normen erhoben. Ebenfalls wurden Tarifdaten auf gängigen Frachtplattformen gesammelt.

Das Ergebnis der verschiedenen Arbeiten zeigt ein differenziertes Bild: Während strukturelle Informationen größtenteils vorhanden sind, bleibt das Verhalten der Akteure innerhalb und zwischen Unternehmen an vielen Stellen intransparent.

iii. *Definition zusätzliche Datenbedarfe und Teilmärkte*

Um festzustellen, welche zusätzlichen Daten für das HEGEL-Projekt erforderlich sind, wurde ein Workshop abgehalten, bei dem die Projektbeteiligten Ideen für den Datenrahmen diskutierten. Der resultierende Datenrahmen hatte zwei Achsen - eine vertikale, die auf Kleinmaßstab-Nachfragemodellen für den kommerziellen Verkehr basierte und eine horizontale, die alle Akteure des Logistikprozesses sowie andere potenzielle Datenquellen umfasste. Der Datenrahmen wurde als Grundlage zur Durchführung zukünftiger Modellierungen erstellt. Dabei wurden auch die Datenquellen aus AP 1.2 integriert.

Je nach Verfügbarkeit der Daten und der Bedeutung wurden die Datenquellen wie folgt (farblich) codiert:

- Grüne Zelle - eine realisierbare Überschneidung
- Gelbe Zelle - die Überschneidung existiert technisch, ist aber nicht signifikant
- Weiße Zelle - existiert nicht oder ist nicht sinnvoll
- Dicker Rahmen - eine (vermeintliche) Datenlücke
- Zahl in Klammern - die Datenquelle kann nicht explizit in das Datenmodell aufgenommen werden (z.B. kann das Attribut nur aus den Daten in dieser Datenquelle abgeleitet werden oder die Datenquelle erklärt das Attribut, anstatt es zu messen).

Structural (Spatial structure, Raumstruktur)	Location	Residents (Einwohner)	13					
		Employees (Beschaeftigte)	12, 13, 30, 36	12, 30, 36	12, 30, 50	12, 30, 50		
		Establishments (Betriebe)	14, 15, 16, 41, 42	14, 15	14, 18, 31, 50	14, 29, 50		
		Infrastructure (Terminals, ports, ...)					17, 27, 31, 32, 33, 34, 35, 25, 52	
		Type of land use (Art der Flächennutzung)						8, 20
	Capacity	Establishments (usually warehouses)	14, 41, 42	14	14, 31			
		Infrastructure					27, 31	
		Logistics equipment (excl. vehicles like containers, pallets, forklifts)		(54)	(54)	(54)		
		Stock of vehicles (Fahrzeugbestand)	13, 46, 48	46, 48	18, 46, 48, 50	29, 46, 48, 50	46, 48	46, 48
		Sources of Disruptions/Status/Weather? Disruptions from the outside = structural, from the inside = behavioral					23, 24, 39, 36, 38, 53	23, 24, 39, 36, 38, 53
Behavioral (Verhalten)	Freight generation data	Production	11, 13, 15	11, 15, 37				
		Consumption						
	Procurement/Trade/Supplier choice	OD flows				1, 4, 5, 6, 7, 9, 40, 49, 51		
		OD flows industries/industrial input output						
	Delivery tours	Location				1, 3, 9, 21, 28, 40		
		Sequence					1, 45	
		Empty vehicles/Utilization					1, 45	
		Commodity type				1, 4, 5, 6, 7, 28		
		Distance				(1), 2, 9, 49, (51)		
	Network	Travel times				2, 49, 51		
		Costs			19, (43), (57)			
		Transport volume				1, 2, 4, 5, 6, 7, 10, 13, 19, 21, 28		
	Logistics regime	Traffic volumes					3	
		Transport mode				1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 13, 19, 21, 28, 40, 43, 49, 51, 57		
		Transport market						
	Lot Size				1			
			Consumer/ Industry/Person (Product Demand)	Shipper (Logistic Demand, Product Supply)	LSP Logistic service provider incl platforms (Logistic Supply/ Transport Demand)	Carrier (Transport Supply)	Infrastructure providers	Authorities? (Research) Institutes ...

Abbildung 2: Datenrahmen zu logistischen Datenquellen in Deutschlands

Zusätzlich wurde ein weiterer Workshop mit Projektbeteiligten organisiert, um die Datenlücken im Zuge der Erstellung des vorgeschlagenen Datenrahmens zu identifizieren. Die Ergebnisse der

Datensammlung, die Systematisierung und die ermittelten Lücken wurden im Mobilthek-Portal hochgeladen und sind unter <https://mobilthek.info/offers/539540105453256704> abrufbar.

Im anschließenden empirischen Abschnitt (siehe Arbeitspaket 2) wurden verschiedene Fragestellungen behandelt, die sich auf die Rolle der Unternehmen innerhalb des Netzwerks und deren Zusammenarbeit beziehen. Dabei wurde u.a. untersucht, wie exklusiv die Zusammenarbeit ist und welche Freiheiten bei der Partnerauswahl bestehen. Des Weiteren wurden Fragen zur Entstehung neuer Beziehungen innerhalb des Netzwerks sowie zur Fokussierung auf bestimmte Branchen bei der Akquise adressiert.

c. Datenakquise für logistische Hypernetzwerke [IIS]

i. *Entwicklung von Methoden zur Erhebung großer Datenmengen*

In AP 2.1 wurde die Datenakquise für logistische Hypernetzwerke konzeptioniert und durchgeführt. Dazu wurden zunächst Methoden zur Erhebung großer Datenmengen entwickelt, um die identifizierten Datenquellen sinnvoll und mit Fokus auf die vier in AP 1 definierten Logistiksegmente zu ergänzen. Um potenzielle Kooperationen zwischen Verladern und Logistikdienstleistern zu identifizieren, wurden durch den Projektpartner IIS Transformer-Modelle zur Durchführung von Übersetzungen und Question-Answering-Anwendungsfällen identifiziert. Dabei liegt der Fokus zunächst auf dem Automobilbereich und den entsprechenden Logistikdienstleistern.

Ubilabs erhob eine eigene Datengrundlage, indem sie umfangreiche AIS-Daten (Automatisches Identifikationssystem) in Echtzeit aufzeichneten. Die so gestreamten Daten wurden in einem Data Warehouse gespeichert, analysiert und in einem BI-Tool visualisiert. Daraus wurde ein Echtzeit-Dashboard für Binnenschiffsverkehr in Häfen erstellt, auf dessen Basis Schiffsverkehre in Echtzeit und historisch analysiert werden können, Alerts auf Ereignisse gesetzt und weitere Datenquellen hinzugefügt werden können. Die Umsetzung dieser Aufgabe war jedoch mit einigen Herausforderungen verbunden, darunter das Extrahieren relevanter Daten aus den Datenströmen, die Erstellung von räumlichen Statistiken durch Hex-Raster und Topo-Json-Dateien sowie die Erstellung einer Schiffsübersicht mit einem Tracker, der die aktuelle Position hervorhebt. Zudem musste ein Drilldown durch verschiedene Detailebenen umgesetzt werden, um die Verknüpfung zwischen Dashboards mit makroskopischem und mikroskopischem Fokus zu ermöglichen.

ii. *Evaluierung und Weiterentwicklung von bestehenden Methoden zur Verschneidung unstrukturierter Daten*

Basierend auf den in AP 2.1 identifizierten Vorgehen fand die Evaluierung fortlaufend statt. So folgte eine Auswahl der Methoden für die Datenverschneidung im Projekt und eine adäquate Anpassung der gewählten Methoden vor dem Hintergrund der Projektzwecke.

Es wurde eine automatisierte Auswertung von bestehenden Verladern-Logistikdienstleister-Kooperationen im Bereich der Automotive-Kontraktlogistik geprüft. In diesem Marktsegment treffen, vergleichsweise, wenige, große Verladern (v.a. Automotive-OEM und Zulieferer) auf eine Reihe an stark spezialisierten Logistikdienstleistern. Informationen darüber, wer in diesem Markt mit wem zusammenarbeitet sind zwar in zahlreichen Fachartikeln und Pressemeldungen regelmäßig

vorhanden, liegen aber nicht in strukturierter Form vor. Aus diesem Grund hat das Fraunhofer IIS Transformer-Modelle genutzt, um auf deren Basis Übersetzungen und Question-Answering Anwendungsfälle bzgl. konkreter Paare aus Verladern und Logistikdienstleistern abzufragen. Für einen ersten Test der Methode wurden die jeweils 13 nach Umsatz größten Automotive-Verlader und 13 größten auf Automotive-Logistik spezialisierten Kontraktlogistikdienstleister herangezogen.

Um eine Datenbasis für das Transfermodell zu erhalten, wurde die Suchmaschine Google verwendet, da diese als Marktführer die besten Suchalgorithmen besitzt. Für die insgesamt 169 Paare wurde die Eingabe „Logistikdienstleister Verladern“ mit den entsprechenden Firmennamen durchgeführt und dabei insgesamt 26.372 Suchergebnisse gefunden. Da alle Transformer-Modelle lediglich einen Text mit begrenzter Länge verarbeiten können, wurden die Texte zudem in Absätze aufgeteilt und die Sprache Englisch übersetzt, da die meisten Transformer-Modelle mit englischen Texten die besten Ergebnisse liefern. Für die Textsuche wurden so 156.377 übersetzte Absätze generiert.

Die Feststellung, ob eine Kooperation besteht, kann über die Verwendung eines QA-Modells erfolgen. Dazu werden zu jedem Absatz der beiden Suchen zwei Fragen gestellt. Als erste Frage wird „Who does Verladern have a partnership with?“ und als zweite Frage „Who does LDL have a partnership with?“ verwendet. Die Antwort der ersten Frage wird mit dem Namen des LDL aus der Google Suche verglichen. Die Antwort der zweiten Frage wird mit dem Namen des Verladers aus der Google Suche verglichen. Stimmen beide Antworten mit den genannten Unternehmen überein, gilt die Kooperation als bestätigt.

Nach der ersten Auswertung belegten 194 Absätze die Kooperation eines Unternehmenspaares. Damit konnten durch die teilautomatisierte Textsuche 34 Kooperationen zwischen den Unternehmenspaaren im Bereich Automotive-Kontraktlogistik bestätigt werden.

Im zweiten Projektjahr wurde die Methode erweitert und auf den Kontraktlogistikmarkt für Lebensmittel ausgedehnt. Es wurden Paare von 13 LDL und 13 Verladern gebildet und Texte mit Hilfe eines Question-Answering-Modells auf Geschäftsbeziehungen untersucht. Die Webanalyse wurde durch automatisierte Google Websuchen und manuelle Auswertungen evaluiert. Aus 76.924 Absätzen wurden 525 Geschäftsbeziehungen identifiziert. Eine Bewertungsmatrix verglich die Ergebnisse der Webauswertung mit den tatsächlichen Ergebnissen, wobei 84 der als positiv identifizierten Absätze tatsächlich Geschäftsbeziehungen aufwiesen und 199 der als negativ identifizierten Absätze keine Geschäftsbeziehungen aufwiesen.

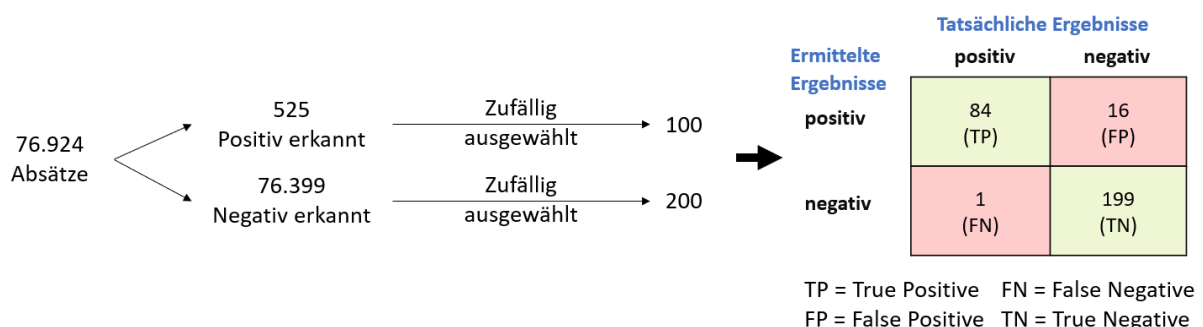


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Evaluationsprozesses mit Evaluationsmatrix rechts

Anhand der ermittelten Einträge der Evaluationsmatrix für „True Positive“, „False Positive“, „True Negative“ und „False Negative“ lassen sich die Metriken Precision, Recall und Accuracy für die Webauswertung berechnen (siehe unten). Dabei beträgt die Precision 84%, der Recall 98,8% und die Accuracy 94,3%. Bei der Evaluation wird nicht berücksichtigt, dass möglicherweise nicht alle

tatsächlichen Geschäftsbeziehungen in den 76.924 Absätzen vorhanden sind, da LDL und Verlager diese nicht öffentlich kommuniziert haben könnten. Um die Webauswertung unabhängig von der Unternehmenskommunikation zu evaluieren, wurden Primärdaten aus AP 2.3 herangezogen.

Formel 1: Precision, Recall und Accuracy als Formel und mit berechneten Werten

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} = \frac{84}{84 + 16} = 84\%$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{84}{84 + 1} = 98,8\%$$

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} = \frac{84 + 199}{84 + 16 + 1 + 199} = 94,3\%$$

Um die gesammelten Primär- und Sekundärdaten flexibel speichern und abrufen zu können, wurde der Einsatz eines Knowledge Graphen geprüft. Dabei handelt es sich um eine spezielle Datenbankstruktur, die Daten miteinander in Beziehung setzt. Die Daten der Webanalyse wurden mit Auszügen aus der Logistikmarktstudie „TOP 100 der Logistik“ sowie mit Standortdaten von Logistikimmobilien angereichert. Die Daten umfassen die 13 LDL und 13 Verlager aus dem Automobil- und Lebensmittellogistikmarkt sowie die Webdaten, die deren Zusammenarbeit belegen. Die Standortdaten enthalten Logistikimmobilien, an denen die LDL und Verlager beteiligt sind und sind geografisch über die Postleitzahl annotiert. Die Annotation in Branchen erfolgte entweder über bereits identifizierte Marktsegmente oder durch die Verknüpfung mit Wikidata, einem öffentlich zugänglichen Wissensgraphen. Die Ontologie des Graphen stellt Beziehungen zwischen LDL, Verlagern, Logistikimmobilien und Geschäftsbeziehungen dar. Dadurch wird eine flexible Speicherung und Abfrage der Daten im Vergleich zu relationalen Datenbanken ermöglicht.

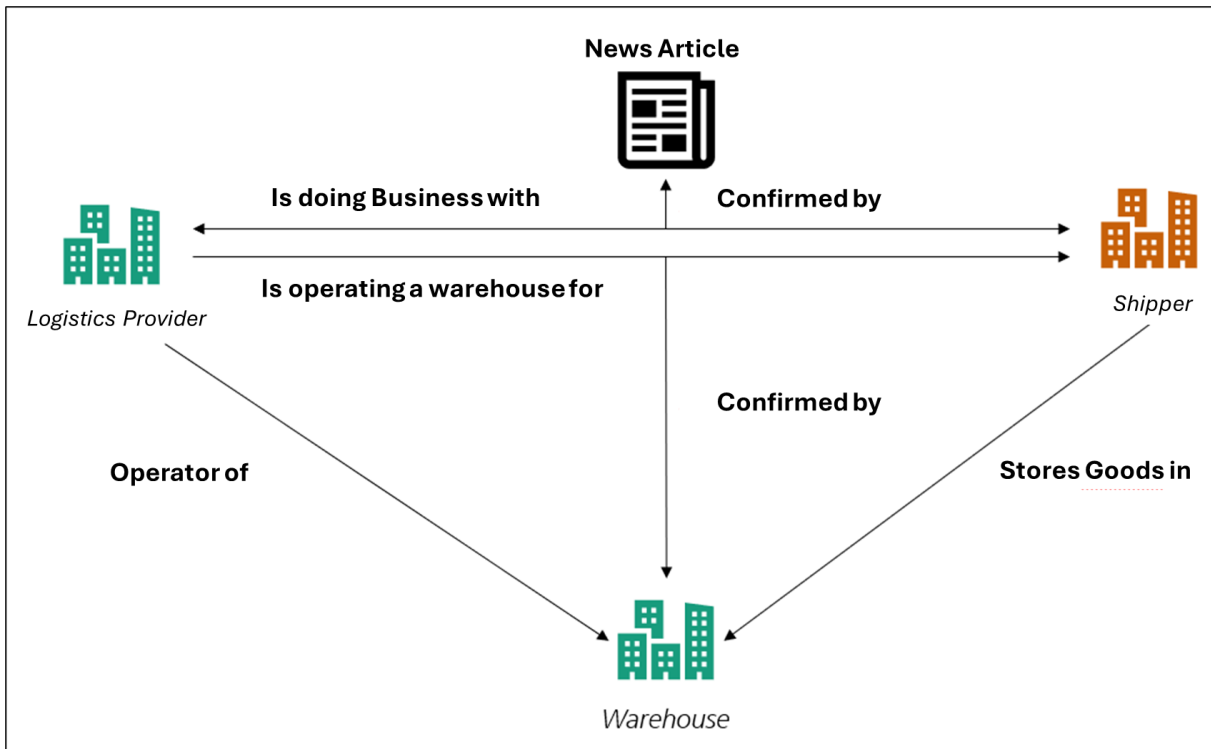


Abbildung 4: Vereinfachte und grafische Darstellung der Ontologie des erstellten Knowledge Graphen

Ein Vorteil der Graphen-Struktur ist die automatische Erstellung neuer Beziehungen zwischen Unternehmen, sobald eine Logistikimmobilie hinzugefügt wird, die von LDL A betrieben wird und in der Verlader B Waren lagert. Dies ermöglicht eine flexible Verknüpfung von unstrukturierten Daten im Projekt. Im dritten Projektjahr wurde untersucht, ob Inhalte aus dem Knowledge Graph durch natürliche Sprache abgerufen werden können. Hierbei wurde getestet, ob ein generatives KI-Modell Fragen durch Abfragen im Knowledge Graph automatisch beantworten kann.

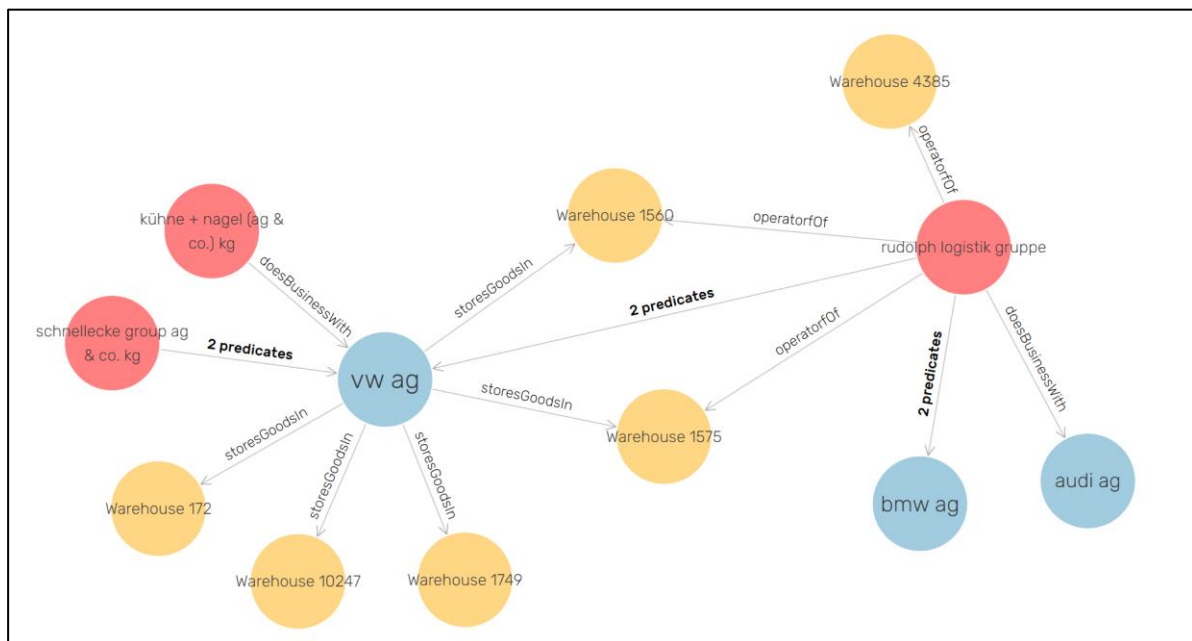


Abbildung 5: Visuelle Darstellung eines Auszugs des erstellten Knowledge Graphen

Dabei wurden im gezeigten Beispiel Logistikimmobilien in Gelb, LDL in Rot und Verloader in Blau dargestellt. Die Visualisierung erfolgte über die Graphdatenbank GraphDB.

iii. Primärdatenerhebung zur Erfassung logistischer Anbieternetzwerke

Um spezifische Fragestellungen bezüglich des Verhaltens in Hypernetzwerken zu adressieren und die in AP1 gewonnenen Erkenntnisse zu validieren, wurden von den Projektpartnern IIS und KLU qualitative, semistrukturierte Experteninterviews durchgeführt. Für jeden fokussierten Teilmarkt wurden zwischen 6-10 Expertengespräche geführt, um ein besseres Bild davon zu erhalten, wie die Teilmärkte in Deutschland funktionieren. Die Interviews wurden in Abstimmung mit den anderen Projektpartnern vorbereitet und dauerten im Schnitt 60 Minuten. Sie gewährten wertvolle Einblicke in den ansonsten undurchsichtigen Markt und halfen die Lücke schließen, die durch den Mangel an verfügbaren Daten entsteht. Die Kontakte für die Interviews wurden dabei von allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Ein interessanter Aspekt, der sich aus den Interviews ergab, war die Tatsache, dass nicht alle Geschäftsbeziehungen öffentlich kommuniziert werden. Dies kann auf verschiedene Faktoren zurückgeführt werden, wie z.B. Wettbewerbsnachteile, Vertraulichkeitsvereinbarungen und die Angst vor Akquisitionsversuchen durch Wettbewerber. Diese Erkenntnisse verdeutlichen die Bedeutung sowohl der Primär- als auch der Sekundärdatenerhebung, um einen vollständigen und aussagekräftigen Datensatz über die Geschäftsbeziehungen zwischen LDL und Verladern zu erhalten.

Um ein klares Bild des intermodalen Schienenverkehrs zu erhalten, wurden von den Projektpartnern KLU und 4flow intermodale Schienenverbindungen innerhalb Europas bis November 2022 in einer Datenbank zusammengestellt. Diese Daten wurden in den Forschungsarbeiten der Arbeitspakete 3.1, 4.2 und 4.3 verwendet. Die Daten wurden überwiegend aus öffentlich zugänglichen Online-Informationen erhoben und durch Expertendaten ergänzt. Sie umfassen Direktverbindungen, die in Deutschland beginnen oder enden oder einen Zwischenstopp zum Be- oder Entladen in Deutschland haben und regelmäßig mit einer Mindestfrequenz von einer Hin- und Rückfahrt pro Woche mit festen Start- und Endpunkten betrieben werden sowie weitere Verbindungen in Europa. Die gesammelten Daten wurden anschließend in der Mobilithek bereitgestellt und sind dort verfügbar:

- Deutsche Verbindungen (<https://mobilithek.info/offers/598528602163531776>)
- Europäische Verbindungen (<https://mobilithek.info/offers/632998123011989504>)

Diese Informationen bildeten die Basis für die Potenzialstudien in AP 4. Beispielhafte, aus den gesammelten Daten abgeleitete Visualisierungen finden sich in den Abbildungen 5 und 6.

Statistik des deutschen KV-Marktes 2022

Statistik aller KV-Schienen-Verbindungen mit Start- oder Endpunkt in Deutschland

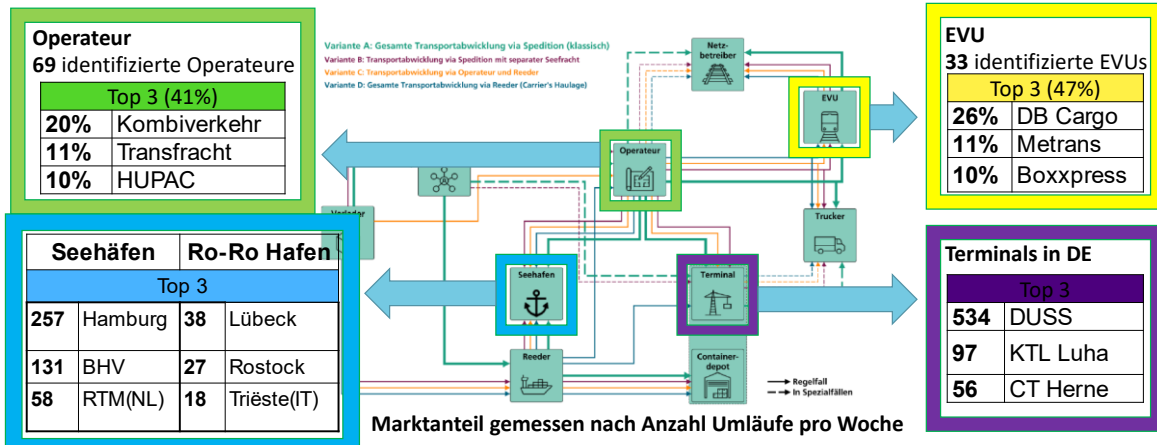


Abbildung 6: Statistik des deutschen KV-Marktes 2022

Statistik nach Segmentierung

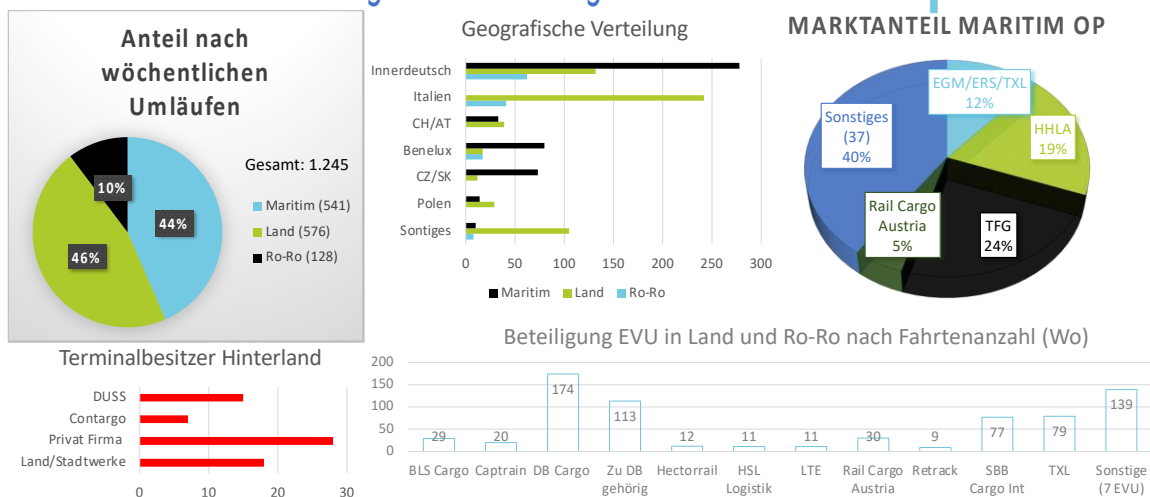


Abbildung 7: Statistik des deutschen KV-Marktes 2022 nach Segmentierung

iv. Primärdatenerhebung zur Erfassung von Warenflüssen und Transportketten

Zu Beginn der Arbeiten organisierte die KLU einen Workshop mit Francois Combes, einem Experten für Erhebungen vom französischen Institut für Wissenschaft und Technologie für Transport, Planung und Netzwerke, um sich auf eine geplante Umfrage im Rahmen des Projekts vorzubereiten. Combes führte die Teilnehmer durch verschiedene Arten von Logistikumfragen und erklärte ihre Vor- und Nachteile sowie mögliche Komplikationen.

Nach anfänglichen Schwierigkeiten in der Akquise von Teilnehmern für das Tracking von Touren und Befragung von Fahrern im Stückgutverkehr wurde die Erhebung auf alle Stückgutspeditionen im Bundesgebiet ausgedehnt. Von sämtlichen Stückgutnetzwerken wurden nach und nach persönliche Ansprechpartner gesucht, die zunächst per Mail angeschrieben und danach telefonisch kontaktiert wurden. Bei größeren Speditionen wurden Unternehmensdatenbanken genutzt, um die richtigen Ansprechpartner zu ermitteln. Generell war es herausfordernd, Teilnehmer für die Erhebung zu

generieren. Ein Beispiel der Ergebnisse des Trackings ist in Abbildung 8 für den Raum Nürnberg abgebildet.

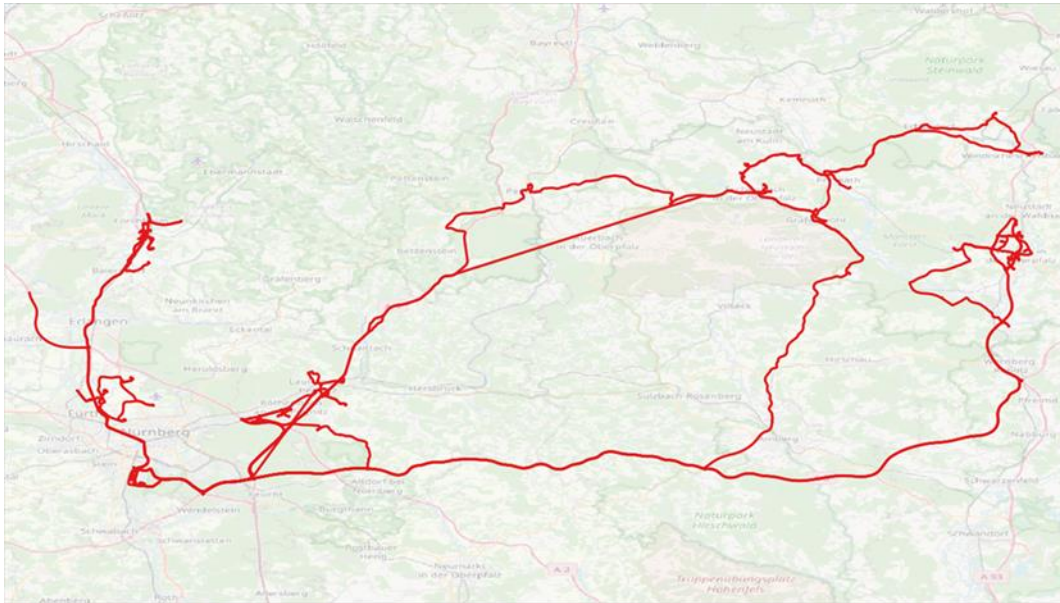


Abbildung 8: Tracking-Ergebnisse für Stückgutverkehr im Raum Nürnberg

Die Daten wurden mit anderen Quellen verschnitten, um weitere Erkenntnisse abzuleiten. Für das gezeigte Beispiel wurden Gebietsinformationen hinzugefügt, wie in Abbildung 9 dargestellt.



Abbildung 9: Visuelle Abbildung der Verschneidung der Tracking-Ergebnisse mit Informationen aus OpenStreetMap

Es wurde ferner eine Initiative zusammen mit einem Eisenbahnverkehrsunternehmen gestartet, die zum Ziel hatte, Lokomotiven mit GPS-Trackern auszustatten, um Fahrten im Seehafenhinterland-Verkehr zu erfassen. Nach Verhandlungen stellte sich jedoch heraus, dass diese Daten bereits vom Hersteller der Lokomotiven zu Fernwartungszwecken erhoben werden. Nach weiteren Gesprächen mit dem Eisenbahnverkehrsunternehmen, dem Leasingunternehmen der Lokomotiven wurden diese dem DLR zur Verfügung gestellt.

Die Erfahrungen bei der Datenbeschaffung zeigten, dass Daten nur von einzelnen Unternehmen zu erhalten sind und deshalb eine Repräsentativität nicht gegeben ist. Öffentlich zugänglich sind nur aggregierte Daten. Deshalb wurde versucht aus Mikrodaten synthetische Daten zu generieren, die einerseits anonym sind, andererseits aber die Mobilitätsmuster aus den Echtdaten wiedergeben. Dazu wurden Neuronale Netze trainiert, die die Eigenschaften der Startpunkte von Fahrzeugtours generieren (Step 1 in Abbildung 9). Davon ausgehend wurden neue Stopps generiert (Step 2) bis ein weiteres neuronales Netz das Ende der jeweiligen Tour festlegte (Step 3). In den bisher vorliegenden Ergebnissen konnte im Aggregat eine akzeptable Anpassungsgüte erreicht werden (Abbildung 10).

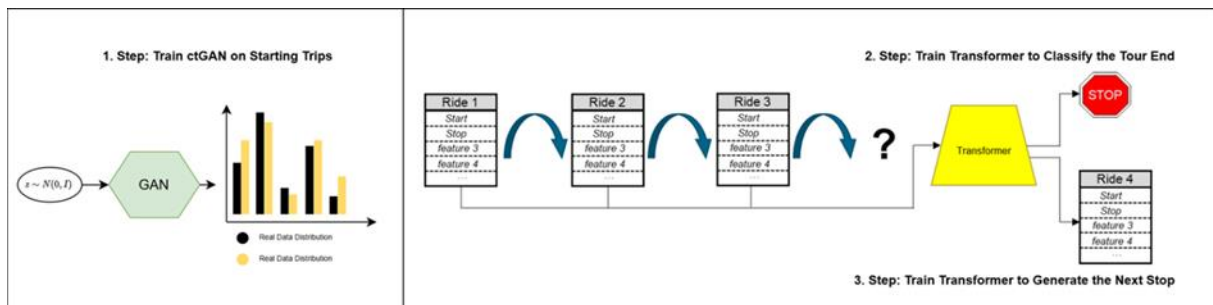


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Tourenaufbaus mittels neuronaler Netze. Quelle: eigene Darstellung



Abbildung 11: Vergleich von Merkmalen realer und synthetischer Touren. Quelle: eigene Darstellung

v. Ableitung der Datenlücken

Dieses Arbeitspaket baute auf der Analyse der Datenlandschaft auf. Im Austausch mit internen und externen Praktikern wurden Interviews durchgeführt und Datenlücken wie beispielsweise Fahrpläne in der Binnenschiffahrt oder intermodale Kostenrechnung identifiziert. Diese Lücken bildeten einen wichtigen Baustein für das weitere Vorgehen in den AP 3 & 4.

Durch den Projektpartner 4PL Intermodal wurde mittels Tracking von intermodalen Dienstleistern umfangreiche Recherche und Aufwand betrieben, um Echtzeitzustände von Ladeeinheiten aufzuzeigen. Hierzu zählt beispielsweise das Tracking von Container-LKW Fahrzeugen. Eine Ausweitung auf Seeschiffe im Bereich der Hafenterminalaktivitäten mit Schnittstelle zu intermodalen Dienstleistern im Seehafenhinterland wurde konzipiert. Die Seehäfen wurden 2023 sukzessive automatisiert erweitert eingebunden. Die Erfassung des Eisenbahnverkehrsangebots wurde in diesem Rahmen intensiviert. Die fahrplanseitigen Verbindungen wurden Echtzeitmeldungen zu den korrespondierenden Zügen gemeldet und zugeordnet. Die über die Sensoren ermittelten Daten wurden im Data Warehouse von 4PL Intermodal GmbH in Deutschland gespeichert, analysiert, geclustert und in einem BI-Tool visualisiert. Grundsätzlich wurden diese Daten auf ihre Konsistenz, ihre Muster und Anomalien untersucht. Somit können bei den 4PL Intermodal Plattformen Benachrichtigungen und automatisierte Änderungsschritte umgesetzt werden. Um die Datenqualität im intermodalen Güterverkehr bei den Netzwerken ebenfalls für die Binnenschifffahrt aufzeigen zu können, galt es diesbezügliche Funktionalitäten der Schiffsanforderungen abzubilden. Der Dienst IMSLOT wurde somit neben den anderen bestehenden Modulen um die Komponente „Schiff“ erweitert. Es gab bei der Aufarbeitung der Echtzeitdaten im Schiffsverkehr nachstehende Herausforderung bei der Umsetzung, die als Hinweise auf entsprechende bestehende Datenlücken verstehen werden können:

- Datenkonsistenz bei uneinheitlichen Strukturen zu harmonisieren
- Aufbau eines validierten Echtzeitprozesses
- Intuitive Darstellung für die Logistiker
- Zuordnung zu den jeweiligen Buchungssachverhalten der Logistiker

d. Modellierung von logistischen Hypernetzwerken [DLR]

i. Analyse der intermodalen Transportketten mittels deskriptiver Multi-Network Verfahren

Es wurde zunächst eine umfangreiche Literaturrecherche zum Stand der Forschung im Bereich "deskriptive Verfahren für Graphen und Multigraphen" durchgeführt. Diese Recherche beschreibt die verschiedenen Formen von Multinetzwerken und die gängigsten deskriptiven Indikatoren in der klassischen Graphentheorie. Durch die Identifizierung der maßgebenden Beziehungen und Interaktionen im gesamten intermodalen Netzwerk wurde es ermöglicht, die Komplexität der Transportsysteme im vollen Umfang zu modellieren. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass fast alle Transportlogistiknetzwerke multidimensional sind und aus verschiedenen Sub-Netzwerken bestehen, die aus einer Vielzahl an unterschiedlichen Knoten- und Kantentypen sowie unterschiedlichen Typen von Interaktionen bestehen.

Im Folgenden wird der Stand der Forschung im Bereich „deskriptive Verfahren für Graphen und Multigraphen“ analysiert. Die Optimierung von Graphen erlangt in der Verkehrsforschung eine zentrale Bedeutung, da sich nahezu jedes räumliche Transportproblem als Graph formulieren lässt, wie z.B. Standortoptimierungen (Facility Location Problem, Location Routing Problem), Zuordnungsprobleme (Fleet Management, Ressource Allocation Problem, Scheduling-Problem) oder auch Tourenplanungen (Vehicle Routing Problem, Travelling Salesman Problem).

Im Folgenden werden die wichtigsten Elemente zur Formulierung von Graphen-Modellen aufgezeigt (für mehr siehe Rodrigue 2020):

- **Graph:** Ein Graph $G = (V, E)$ ist eine Menge von Knoten V , die durch Kanten E verbunden sind. Ein Graph kann gerichtet (mit gerichteten Kanten) und ungerichtet sein. Wenn der Graph ungerichtet ist, können die Transporte in beide Richtungen stattfinden.
- **Knoten (Vertex):** Ein Knotenpunkt $v \in V$ kann im Verkehrswesen als ein Standort, z. B. eine Stadt, ein Kundenstandort, eine Straßenkreuzung oder ein Terminal (Bahnhöfe, Endstationen, Häfen und Flughäfen) interpretiert werden.
- **Kante (Edge):** Die Verbindung (i, j) zwischen dem ersten Knotenpunkt i und dem letzten Knotenpunkt j . In der klassischen Verkehrsforschung ist die Kante eine Abstraktion einer Verkehrsinfrastrukturverbindung. Sie hat eine Richtung, die üblicherweise durch einen Pfeil dargestellt wird. Wird kein Pfeil verwendet, so wird angenommen, dass die Verbindung in zwei Richtungen verläuft. In der Praxis sind die Geodaten z.B. in OpenStreetMaps als XML-Listen geordnet, wobei die Verkehrsträger dort nach dem Schlüssel `<highway>` klassifiziert sind (siehe <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:highway>). Jeder `<highway>` kann somit als Link bzw. Kante im Sinne der Graphentheorie interpretiert werden.
- **Weg (Pfad):** Ein Weg gibt die Folge der Knoten an, die mit den Kanten verbunden sind. Ein Weg, bei dem der Start- mit dem Endknoten identisch ist, nennt man Zyklus.
- **Baum:** Ein Baum ist ein Subtyp von Graphen, der keine geschlossenen Pfade besitzt, d.h. er enthält keine Zyklen und es gibt einen Root-Knoten (Wurzel-Knoten)
- $A(n \times n)$ gibt an, ob die Verbindung zwischen Knoten v_i und v_j besteht ($a_{ij} = 1$) oder nicht ($a_{ij} = 0$). Im Grunde werden Netzwerke als solche durch Adjazenzmatrix repräsentiert. Bei ungerichteten Graphen ist die Adjazenzmatrix symmetrisch und bei gerichteten Graphen asymmetrisch. Eine mögliche Datenstruktur zu Repräsentation der Adjazenzmatrix in **Java** ist eine **Map<Vertex, List<Vertex>>**, wobei der Schlüssel jeder Knoten $v \in V$ in G ist und Wert – eine Liste mit Knoten, die mit v verbunden sind.
- **Kostenmatrix:** Zusätzlich können die Gewichtungen in einer Adjazenzmatrix zwischen zwei Knoten angegeben werden. Somit repräsentiert die Kostenmatrix einen Graphen mit zusätzlichen Bewertungen (Widerständen) auf den Kanten.

Allerdings kann im Kontext der klassischen Graphentheorie die Komplexität der Transportsysteme nicht im vollen Umfang modelliert werden. In der klassischen Verkehrsforschung und im Bereich Operation Research werden Transportprobleme zumeist auf einer Dimension (z.B. Straßennetz) abgebildet und somit viele Interdependenzen und Informationen (beispielsweise der Umschlag zwischen Verkehrsmitteln, Wartezeiten oder Finanz- und Kommunikationsströme) ausgeblendet bleiben. Im Allgemeinen sind aber fast alle Transportlogistiknetzwerke multidimensional, d.h. sie bestehen im Kern aus verschiedenen Sub-Netzwerken, die auch aus einer Vielzahl an unterschiedlichen Knoten- und Kantentypen sowie unterschiedlichen Typen von Interaktionen bestehen.

Die grundlegenden Konzepte und Eigenschaften der Hypergraphentheorie wurden von Berge im Jahr 1970 vorgeschlagen: „*In hypergraph, a hyperedge can contain more than two nodes, which retains the original characteristics of graph. Hypernetwork based on hypergraph theory can effectively reveal the interaction between various nodes and super edges, and can effectively describe these real systems.*“ (Meng et al. 2021). Die Formulierung und Verwendung von Multigraphen in der Grundlagenforschung ist noch nicht so weit etabliert, so dass Multinetzprobleme häufig von den einzelnen Disziplinen und Problemfeldern unterschiedlich interpretiert, notiert und formuliert werden. Boccaletti et al. (2014) definiert ein einfaches „Multilayer Network“ (Multi-Graph) als ein Tupel $M = (G; E\alpha\beta)$ wobei $G = (X\alpha; E\alpha)$ eine Ebene (Layer) von M ist, $E\alpha \in G\alpha$ - *intralayer* Kanten (Kanten, die auf einer Ebene liegen) und $X\alpha \in G\alpha$ - *eine Menge der Knoten in $G\alpha$* ist. Hier sind $E\alpha\beta \in M$ - *interlayer* Verbindungen, die

Kanten die unterschiedlichen Ebenen verbinden. Demnach kann ein Multilayer Network durch zwei Adjazenzmatrizen beschrieben werden:

- Adjazenzmatrix einer Netzwerkebene $A[a]$
- Interlayer Adjazenzmatrix von mehreren Netzwerkebenen $A[a, b]$

Ein einfacher Multigraph kann allerdings auch durch eine gemeinsame Adjazenzmatrix modelliert werden bzw. in ein konventionelles Graphenmodell überführt werden. Eine sogenannte aggregierte Supra-Adjazenzmatrix repräsentiert einen Multigraph und kann somit mehrdimensionale Datenstrukturen durch Aggregation (bzw. flattening) in 2-D Matrizen überführen (siehe Abbildung 11).

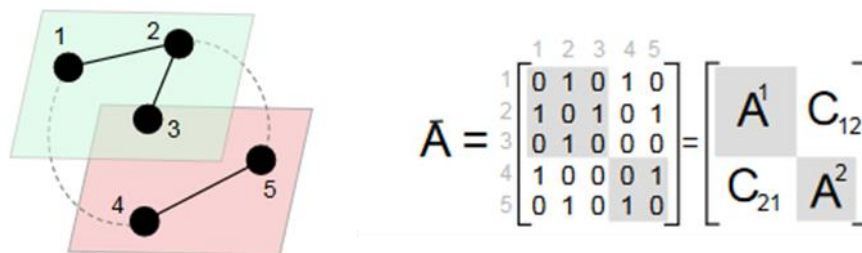


Abbildung 12: Abbildung des Multigraph-Netzwerks mittels einer Supra-Adjazenzmatrix nach Cozzo et al. (2016)

In der Fachliteratur gibt es eine Vielzahl von zum Teil widersprüchlichen Konzepten für Multigraphen. Nach Boccaletti et al. (2014) können Multinetzwerke verschiedene Formen annehmen.

- Nach Cozzo et al. (2016) ist ein „*Multiplex-Network*“ ein Netzwerk, das verschiedene Arten von Interaktionen auf verschiedene Schichten von Netzen repräsentieren kann. Solá et al. (2013) bezeichnet dagegen ein *Multiplex-Network* als ein mehrschichtiges Netzwerk, das Interaktion oder Beziehung zwischen derselben Gruppe von Knoten repräsentiert und somit die gleiche Menge an Knoten durch alle Schichten besitzt. In der Fachliteratur wird der Begriff „*Multiplex Networks*“ oft als Synonym zu den einfachen mehrschichtigen Netzwerken verwendet.
- Ein „*Temporal Network*“ besteht aus der gleichen Menge an Knoten auf mehreren Schichten, wobei jede Schicht einen Zeitschritt oder einen Systemzustand repräsentiert (siehe Abbildung 12).
- Ein „*Multidimensional Network*“ kann als ein „*Edge-Labeled Multigraph*“ verstanden werden: $G = (V; E; D)$, wobei V eine Menge von Knoten, D eine Menge von „*Labels*“, die die Dimensionen darstellen, und E eine Menge von durch D beschrifteten Kanten ist.
- „*Interdependent Networks*“ sind mehrschichtige Netzwerke, deren Knoten voneinander abhängig sind. Hier können die Knoten durch beliebige Kanten verbunden werden, so dass ein Knoten nicht unbedingt durch dieselben *Interlayer*-Kanten verbunden sein muss, wie es z.B. in Multiplex-Netzen der Fall ist. In interdependenten Netzen führt der Ausfall eines Knotens in einem Netz zum Ausfall der abhängigen Knoten in anderen Netzen. Ein Transportnetzwerk kann bspw. auch als eine Art der *Interdependent Network* interpretiert werden.

In „*Hypergraphs*“ kann jede Hyperkante (bzw. Kante) eine beliebige Anzahl von Knoten in einer geordneten Menge (Sequenz) verbinden und somit nicht auf eine typische Verbindung zwischen zwei Knoten (wie das bspw. in Sozialnetzwerken-Graphenmodellen der Fall ist) ausgelegt sein. Nach Boccaletti et al. (2016) kann jedes Hypernetzwerk in einen Multigraph transformiert werden, indem jedem Hyperedge eine eigene Schicht (bzw. Layer) zugewiesen wird (siehe Abbildung 12).

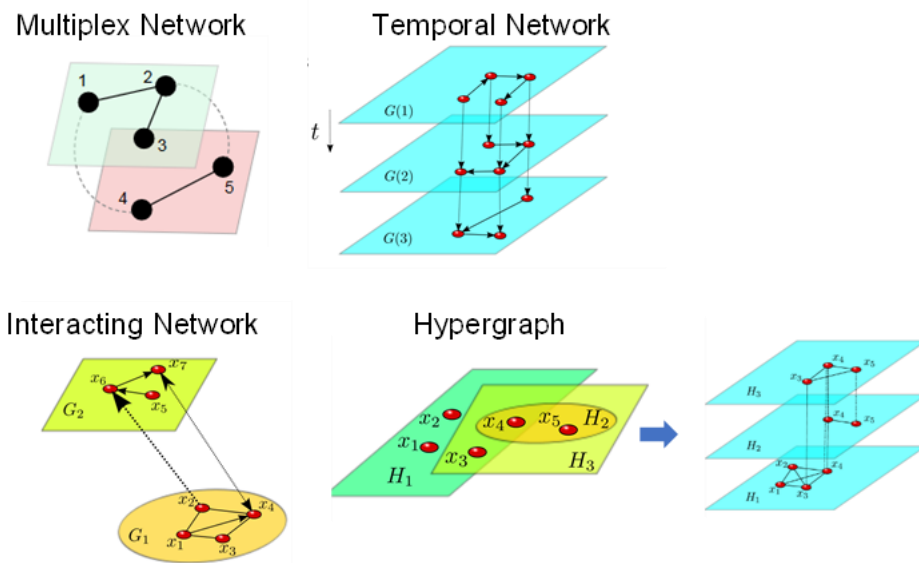


Abbildung 13: Vier verschiedene Typen von Multi-Graphen nach Boccaletti et al. (2016)

Einige Autoren verwenden den Begriff „Super-Network“, um die Netzwerke unterschiedlicher Natur (z.B. Transportnetzwerk, Finanznetzwerk und Kommunikationsnetzwerk) holistisch zu modellieren, zu analysieren und zu optimieren (siehe z.B. Su et al. 2019, Zhu et al. 2017, Xu et al. 2021).

Im Überblick können sich Multigraphen hinsichtlich folgender Merkmale unterscheiden: (i) Besitzen einzelne Schichten die gleiche Menge an Knoten und Kanten oder sind die Schichten unabhängig? (ii) Verbinden Kanten zwischen den einzelnen Schichten unterschiedliche Knoten (z.B. Knoten i auf Layer 1 wird mit Knoten j auf Layer 2 verbunden) oder sind die Kanten über die Schichten hinweg fix (Knoten i auf Layer 1 wird immer mit dem Knoten i auf den anderen Layer verbunden)? (iii) Sind die einzelnen Layer von gleicher oder unterschiedlicher Natur (z.B. physische Infrastruktur-Layer und reiner Kommunikation-Layer)?

Viele Autoren ermitteln und nutzen sogenannte Indikatoren, um die komplexen Netzwerke statisch zu analysieren und ihre Dynamiken zu modellieren (siehe Kansky 1963, Albert und Barabasi 2002, Pastor-Satorras et al. 2003, Waclaw 2007). Die Indikatoren können auch dazu beitragen, die Entwicklung eines Netzwerkes zu analysieren bzw. ein Netzwerk an zwei beliebigen Zeitpunkten zu vergleichen. Zu den gängigsten deskriptiven Indikatoren in der klassischen Graphentheorie gehören u.a.:

- Die **Anzahl der Knoten und Verbindungen** (d. h. die Größe des Netzes),
- Die **Länge und der Durchmesser** des Netzes,
- Der **Grad der Zentralität** (degree centrality): gibt die Anzahl der Verbindungen am Knoten an,
- **Betweenness-Zentralität**: gibt an, wie sehr ein bestimmter Knoten zwischen anderen liegt. Ein Maß für die Zentralität in einem Graphen auf der Grundlage kürzester Wege.
- **Clustering Koeffizient**: ist ein Maß für die Dichte, mit der sich die Knoten in einem Graphen gruppieren lassen.

So können beispielsweise verschiedene Stadttypen anhand ihrer typischen Straßenmuster und Kantenbelastung klassifiziert werden (mehr dazu in Ducruet und Lugo 2013). Wang und Cullinane (2008) messen Erreichbarkeit (Accessibility - als Proxymaß für die Erklärung der Betriebsleistung, der Wettbewerbsfähigkeit und der wirtschaftlichen Leistung von Containerhäfen) der Seehäfen mit der

Methode der Haupteigenvektoren. Tang et al. (2011) stellen einen Zusammenhang zwischen Umschlagsvolumen eines Hafens und Konnektivität fest und integrieren diese Netzwerkmerkmale in ein traditionelles Logit-Modell für den Containerseeverkehr. In Tabelle 2 werden die ausgewählten Metriken zur Bewertung und Beschreibung von Graphen oder ihre Elemente gezeigt.

Tabelle 2: Ausgewählte Netzwerkindikatoren (Ducruet 2017)

Metrik	Definition	Formel
Average shortest path length	Durchschnittliche Anzahl der Verbindungen zwischen zwei Knotenpunkten im Graphen	$l_G = \frac{1}{n(n-1) \sum d(v_i; v_j)}$
Eccentricity	Anzahl der Verbindungen, die benötigt werden, um den am weitesten entfernten Knoten im Graphen zu erreichen	$e(x) = \max d(x, y)$
Betweenness centrality	Anzahl der Durchläufe von kürzesten Pfaden über einen Knoten. Ein Knoten mit höherer Betweenness-Zentralität hat mehr Kontrolle über das Netz, da mehr Informationen über diesen Knoten laufen.	$g(v) = \sum \frac{\sigma(v)}{\sigma_{st}} = \frac{\text{number of paths that pass through } v}{\text{number of shortest paths from } s \text{ to } t}$
Clustering coefficient of a given node i	Wahrscheinlichkeit, dass zwei Knoten, die einen gemeinsamen Nachbarn haben, miteinander verbunden sind.	$c(i) = \frac{\text{number of neighbors of } i}{\text{maximal possible number of edges between neighbors of } i}$
Cumulative degree distribution	Abschätzung der Robustheit. Wahrscheinlichkeit, einen Knoten mit einer Anzahl von Verbindungen (oder Grad) gleich oder größer als k zu finden.	$P(k) = \frac{1}{N} \sum N(k)$
Rich-club coefficient	Maß zur Quantifizierung des Vernetzungsgrades zwischen den Knoten in einem Netz.	$R(k) = \frac{\text{number of edges connecting nodes of degree } \geq k}{\text{link abundance on a network with the same degree sequence of the original but with connections randomly shuffled}}$

Die komplexe Analyse der mehrstufigen Netze baut auf der klassischen Graphentheorie auf und ermöglicht es, sowohl generelle Einblicke über die multimodalen Netzwerkstrukturen zu erhalten, als auch einzelne Entscheidungen und Beziehungen in komplexen Netzwerken zu erklären (vgl. Angeloudis et al. 2013, Vidal et al. 2022, Cheung et al. 2020, Kaluza et al. 2010). Tocchi et al. (2022) bestimmt das Maß der Zentralität in einem mehrstufigen intermodalen Transportnetzwerk. Ferner werden in diesem Modell einzelne Wartelinks als Hyperlinks berücksichtigt und die Auswirkungen der Wartezeit auf die Transportentscheidungen (Verkehrsmittel, Touren, Beauftragung verschiedener Dienste) modelliert. Ducruet (2017) untersucht die Dynamik komplexer geografischen Systeme am Beispiel des globalen Seeverkehrs (Korrelationsmatrix zwischen Knoten und Kanten, Zentralität, Assortativität, Single Linkage Analysis usw.). Cardillo et al. (2013) modellieren 15 europäische Fluggesellschaften als ein Multiplex Netzwerk und klassifizieren die Knoten mit einer Node Degree, d.h. die Gesamtzahl der Verbindungen des betreffenden Knotens durch alle Ebenen.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde ebenfalls ein stationäres Modell zur Optimierung von Logistikstandorten für ein intermodales TransportlogistikszENARIO vom DLR entwickelt. Dies beinhaltet die Erarbeitung des Szenarios "Nationaler Stückgutverkehr", die Entwicklung eines Mixed-Integer-Programming Modells und die Parametrisierung mit Daten aus Primär- und Sekundärquellen. Die Daten wurden aus primär erhobenen Datensätzen und aggregierten Statistiken gewonnen und für die Optimierung nach Jahr, Gütergruppe und Region innerhalb Deutschlands disaggregiert. Der

entwickelte Optimierungsalgorithmus vergleicht iterativ ein bimodales (Straße, Schiene) und ein bimodales (nur Straße) Szenario, um optimale Standorte für Umschlagknoten zu finden.

Zur Vorbereitung der Modellierung in Arbeitspaket 3 wurde in Zusammenarbeit zwischen KLU und Ubilabs eine Fallstudie zum intermodalen Transport entwickelt. Diese befasst sich mit der Transportplanung unter schwierigen Bedingungen, bei der eine begründete Entscheidung für einen Containertransport vom Allgäu zum Hamburger Hafen getroffen werden muss. Es gibt insgesamt vier mögliche Routen über direkten Straßentransport oder intermodalen Schienentransport von drei verschiedenen Hinterland-Terminals. Die Entscheidung basiert auf einem Vergleich von Zuverlässigkeit, Preis und Emissionen zwischen den Routen, die jeweils Vor- und Nachteile aufweisen. Ziel ist es, Diskussionen unter den Studierenden anzuregen. Zur Unterstützung wurde ein Planungstool entwickelt, das den Fahrplan der intermodalen Züge berücksichtigt und die Flexibilität des Lkw-Fahrplans visualisiert. Ein Beispiel für die Visualisierung des Tools ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

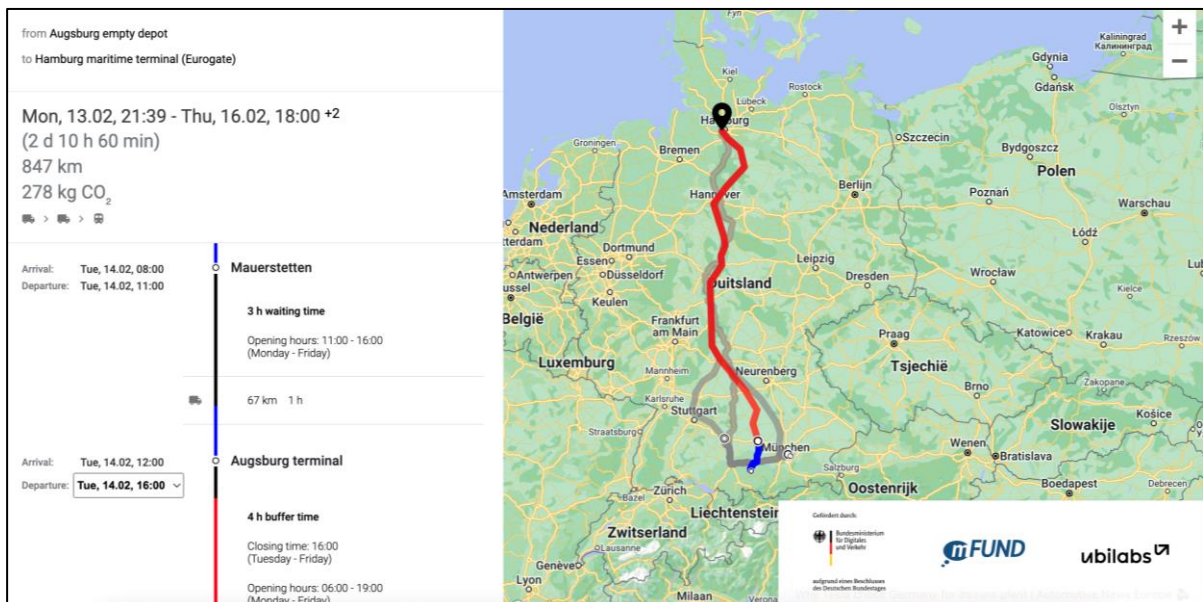


Abbildung 14: Intermodales Teaching Tool

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurde außerdem ein vereinfachtes "Spielzeugmodell" zur Untersuchung des intermodalen Verkehrspotenzials in Deutschland von der KLU erstellt. Dieses Modell wurde beim Meilensteintreffen im November 2023 vorgestellt, um ein erstes Feedback des Expertengremiums einzuholen und die Ausrichtung der Studie zu verfeinern. Ziel der Forschungsarbeit ist die Modellierung von Güterströmen, die entweder direkt per Lkw oder intermodal über die NUTS3-Regionen Deutschlands transportiert werden. Das Modell umfasst fiktive Regionen mit eigener Güternachfrage und eigenem Güterangebot sowie intermodale Terminals und deren Verbindungen. Es dient als Input für die statistische Analyse der Einflussfaktoren auf die Wahl zwischen direktem und intermodalem Transport. Die Arbeit an dieser Studie spielte eine entscheidende Rolle als Basis in den Arbeitspaketen 4.1 und 4.3.

Darüber hinaus wurden in diesem Arbeitspaket zwei Masterarbeiten geschrieben. Die erste Arbeit konzentrierte sich auf die Optimierung der Vorhersage der geschätzten Ankunftszeit (ETA) im

intermodalen Verkehr. Der Student verwendete historische Daten einer intermodalen Relation zwischen Bremerhaven und München über einen Zeitraum von 15 Jahren, um zwei diskrete Modellierungsansätze zu entwickeln und zu vergleichen: das multinomiale Logit-Modell und das geordnete Logit-Modell. Die Arbeit trägt dazu bei, die Genauigkeit von ETA-Vorhersagen im intermodalen Verkehr zu verbessern, was für ein effizientes Management von Logistiknetzwerken von entscheidender Bedeutung ist. Diese Masterarbeit wurde in Zusammenarbeit zwischen der KLU und 4PL Intermodal erstellt.

Die zweite Arbeit befasst sich mit der Herausforderung der Transparenz in der Lieferkette, insbesondere im Zusammenhang mit Echtzeit-Transportüberwachungsplattformen. Der Student der KLU identifizierte eine Lücke in der bestehenden Forschung und schlug einen Rahmen vor, der sich auf spärliche ereignisbasierte Aufzeichnungen konzentriert. Sein Ansatz kombiniert räumliche und zeitliche Analysen mit Kurvenvergleichen und dynamischen Algorithmen zur Zeitverzerrung, um Transportmodi zu identifizieren. Dies trägt zu einem besseren Verständnis der Erkennung von Transportmodi bei und verbessert die Transparenz von Lieferketten in Logistiknetzwerken.

ii. Optimierung der Netzwerkdynamiken mittels KI bzw. ML-Verfahren

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde durch das DLR eine weitere Literaturanalyse durchgeführt. Die Optimierung von Hypergraphen wird hierbei als junges Forschungsfeld angesehen, das in letzter Zeit zunehmend an Bedeutung gewinnt. So können Graphen im Kontext der Optimierung der Transportlogistik für verschiedene Zwecke eingesetzt werden. Zum einen können sie genutzt werden, um globale Netzwerke und deren Interaktionen zu analysieren, zu klassifizieren und zu bewerten. Zum anderen kann durch eine sogenannte "Graph Simplification" der Zustand des Gesamtsystems verbessert werden, indem numerische Suchen durchgeführt werden, um betroffene Knoten oder Kanten zu entfernen oder zu verschieben, um beispielsweise Robustheit oder Minimierung von Verspätungen zu erreichen. Zusätzlich können Graphen genutzt werden, um Prognosen für zukünftige Systemzustände zu erstellen, wie beispielsweise für Standortprobleme oder dynamische Tourensuche. Schließlich können Graphen auch genutzt werden, um die Fehlerfortpflanzung in einem Transportnetzwerk zu analysieren.

Mit zunehmender Intermodalität werden logistische Prozesse komplexer. Dies erfordert die Berücksichtigung zahlreicher systemrelevanter Rahmenbedingungen auf strategischer, taktischer und operativer Ebene. Herkömmliche kombinatorische Ansätze stoßen hier schnell an ihre Grenzen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, werden Methoden des maschinellen Lernens eingesetzt, die jedoch in der Logistikoptimierung selten Anwendung finden. In diesem Arbeitspaket wurde die Anwendung fortgeschrittener Deep Learning (DL) Verfahren im Kontext der intermodalen Logistik untersucht. Dazu wurde zusammen mit den Partnern 4flow und Ubilabs darauf geachtet, dass Anforderungen aus der Wirtschaft Berücksichtigung finden. Die Ergebnisse umfassen die Identifikation und Analyse des intermodalen Güterverkehrssystems, die Beschreibung der logistischen Transportprozesse, die Erstellung einer Roadmap zur Modellierung von Optimierungsproblemen mit DL sowie die Entwicklung und Evaluierung eines hybriden DL-Modells zur Lösung integrierter Probleme im intermodalen Verkehr. Diese Ergebnisse werden in einer Publikation im Journal „Transport Reviews“ veröffentlicht, die sich aktuell noch im Reviewprozess befindet. Ferner wurden diese Ergebnisse auf der internationalen Konferenz „Euro Working Group Transportation (EWGT) Conference“ sowie auf dem „International Symposium on Multi-Agent Freight Transport Simulation“ (FreighTSim) 2023 präsentiert.

iii. Parametrisierung des entwickelten Modells

Um die Entwicklung von Verknüpfungslogiken in der Netzwerkmodellierung zu erleichtern, wurde zunächst eine Literaturübersicht zu diesem Thema von der KLU erarbeitet, um wichtige Erkenntnisse aus der horizontalen kollaborativen Logistik zusammenzufassen. Zentrale Themen umfassen das Teilen von Logistikkapazitäten – wie Versand, Lagerung und Lieferservices – zwischen Unternehmen zur Effizienzsteigerung und Kostensenkung. Studien wie Tinoco et al. (2017) und Jouida et al. (2021) heben die Vorteile und Herausforderungen solcher Kollaborationen hervor und betonen die Notwendigkeit synchronisierter Richtlinien und profitabler Koalitionen. Im Bereich der Routenplanungsprobleme (VRPs) zeigen Forschungen Effizienzgewinne durch kollaborative Netzwerke. Arbeiten wie Park et al. (2016), Defryn und Sørensen (2018) und Zhang et al. (2022) konzentrieren sich auf die Reduzierung von Reisezeiten und -kosten durch gemeinsamen Kundenservice und optimierte Last-Mile-Lieferungen. Eine wiederkehrende Herausforderung in der Literatur ist die Zurückhaltung von Unternehmen, sich an kollaborativen Netzwerken zu beteiligen, mit einem Fokus auf die Wahrung der Unabhängigkeit. Ferner betonen einige Studien die Wichtigkeit der Gewinnungerechtigkeit und optimierter Transportkosten für eine erfolgreiche Zusammenarbeit.

Seitens des DLRs wurde außerdem eine Simulation der intermodalen Gütertransportkette durchgeführt. Ziel war es, das nationale KV-Netzwerk zunächst im Basisszenario und anschließend mit den umgesetzten Optimierungsmaßnahmen abzubilden. Ein zentraler Hebel zur Steigerung des KV-Anteils im intermodalen Verkehr ist die Erhöhung der Terminalkapazitäten, insbesondere durch die Reduzierung der Umschlagszeiten in intermodalen Knoten. Die Erkenntnisse aus Arbeitspaket 2.4, basierend auf der Primärdatenerhebung und -analyse zeigten, dass diese Maßnahme zu den wesentlichen Ansätzen zur Förderung des KV-Anteils zählt. Zudem eröffnen verkürzte Umschlagszeiten die Möglichkeit, neue KV-Angebote zu etablieren und zusätzliche Gütersegmente, wie Kurier-, Express- und Paketdienste (KEP), auf den Kombinierten Verkehr zu verlagern. Diese Ergebnisse flossen direkt in die simulationsgestützte Bewertung ein und bildeten eine Grundlage für die Ableitung gezielter Optimierungsmaßnahmen. In dieser Studie wurde der Paketmarkt als ein relevantes Gütersegment identifiziert, da dieser trotz hoher Anforderungen an Transportzeiten und Zuverlässigkeit aufgrund seines hohen Straßentransportanteils und kontinuierlichen Wachstums ein signifikantes Verlagerungspotenzial aufweist.

Die Simulationsstudie fokussierte sich auf das deutschlandweite KEP-Netzwerk mit 50 intermodalen Terminals. Die Standortwahl der KV-Terminals erfolgte anhand der Attraktivitätsindex nach Hecht & Liedtke (2020). Diese Umschlagsknoten stellen 50 optimierte Standorte in nachfragestarken Regionen Deutschlands dar und gewährleisten die gute Anbindung der Versender an das KV-Netzwerk. Als Verkehrsnachfrage (Paketvolumen) wurden die Nachfrageprognosen für das Jahr 2030 erzeugt. Dieses Zukunftsszenario mit prognostizierten Paketvolumina von 13,9 Millionen Sendungen täglich wurde mithilfe des Nachfragemodells DEMO-GV für Deutschland modelliert. Das makroskopische Güterverkehrsmodell DEMO-GV erstellt jährliche Prognosen für die relevanten Gütergruppen in Form von Quelle-Senke-Relationen und liefert die Transportmengen zwischen einzelnen Verkehrszellen und deren Verteilung auf verschiedene Verkehrsmodi („Modal Split“). Die Verkehrszellen in Deutschland entsprechen in etwa der NUTS-3-Ebene (Landkreise, Großstädte und Überseehäfen. Siehe Abbildung 1). Für diese Studie wurden die Zentren der jeweiligen Verkehrszellen als Quellen und Senken für die Paketströme definiert. Diese werden entweder direkt über die Straße oder im KV-Netzwerk über die Direktverbindungen zwischen den 50 betrachteten KV-Terminals transportiert.

Zur Simulation der Verkehrsmittelwahl wurde das mikroskopische, agentenbasierte Verkehrssimulationsmodell MATSim (Horni et al. 2016) weiterentwickelt und für die Bewertung von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Umschlagsprozesses eingesetzt. Die Simulation bildet einen typischen Betriebstag im KV-Netz ab, wobei pro Relation ein Zug mit einer Kapazität von 70 Wechselbrücken modelliert wurde. Untersucht wurden zwei Szenarien. In Szenario A wurden alle Terminals mit Umschlagsanlagen ausgestattet, die die Umschlagskapazität von 30 Containern pro Stunde aufweisen. Daraus ergibt sich eine Umschlagsdauer von etwa zwei Stunden für die Verladung von 70 Einheiten auf einen Zug. Die Abfahrtszeit der Züge wurde auf 8:00 Uhr festgelegt, während die einzelnen Straßenverkehrsagenten ihre Fahrten bereits ab 6:00 Uhr aufnehmen. In Szenario B wurden die betrachteten Terminals mit innovativen Umschlagstechnologien ausgestattet, die eine kontinuierliche Abfertigung mit einer Umschlagskapazität von 120 Containern pro Stunde ermöglichen, sodass ein vollständiger Güterzug in 30 Minuten zusammengestellt wird.

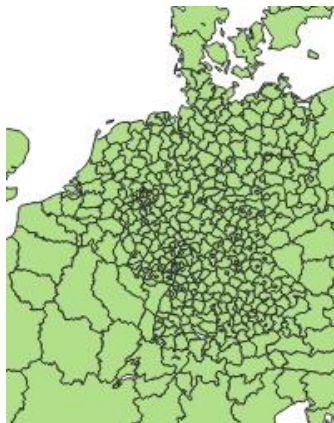


Abbildung 15: Verkehrszellen in dem Nachfragemodell Demo-GV. Quelle: eigene Darstellung des DLR

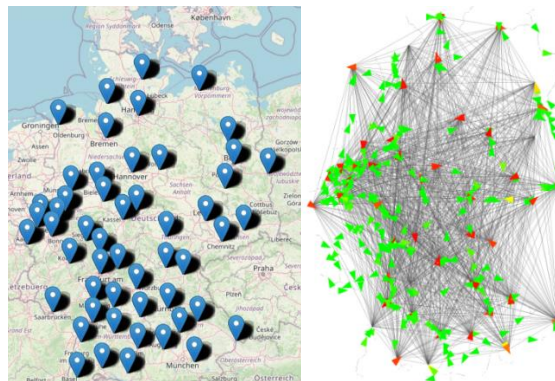


Abbildung 16: Nationales KV-Netz (oben). Daten zu Terminals nach Hecht & Liedtke (2020) Ausschnitt aus dem agentenbasierten Verkehrssimulationsmodell MATSim mit der Erweiterung auf KV-Simulation (unten).

Seitens der KLU wurden im Rahmen dieses Arbeitspaketes eine Masterarbeit betreut und eine Studie zu Hypernetzwerken im Lebensmitteleinzelhandel durchgeführt. Die Masterstudentin Yeji Kim verfasste für 4flow ihre Abschlussarbeit mit dem Titel „Implementing Company-Level External Cost Calculation: A Case Study of Real-World Company Routes“. Sie untersucht die Berechnung externer Kosten im Güterverkehr auf Unternehmensebene und analysiert deren Auswirkungen anhand realer Transportdaten. Externe Kosten, die sich aus Umweltbelastungen, Lärmemissionen, Unfällen und Staus ergeben, stellen eine erhebliche Herausforderung für eine nachhaltige Logistik dar, da sie meist nicht direkt von den Verursachern getragen werden. Durch die Anpassung etablierter nationaler Berechnungsmethoden auf die Ebene einzelner Transportwege ermöglicht die Arbeit eine detaillierte Quantifizierung dieser Kosten. Die Fallstudie zeigt, dass der Umstieg von reinem Straßenverkehr auf intermodale Transportketten mit Schienen- und Wasserstraßenanteilen eine Reduktion der externen

Kosten um bis zu 39% bewirken kann. Die Ergebnisse unterstreichen zudem, dass insbesondere standort- und zeitabhängige Kostenfaktoren wie Luftverschmutzung, Lärm und Staus eine entscheidende Rolle bei der Optimierung von Transportstrategien spielen.

Die Arbeit knüpft an das Konzept der „Modellierung von logistischen Hypernetzwerken“ an, indem sie die Parametrisierung von externen Kosten in multimodalen Transportnetzen untersucht. Die entwickelte Methodik könnte in umfassendere Modelle von Hypernetzwerken integriert werden, um realistische Kostenfaktoren in der Optimierung von Transportströmen zu berücksichtigen. Während klassische Modelle oft auf betriebswirtschaftlichen Kosten beruhen, zeigt diese Studie die Bedeutung der Berücksichtigung externer Kosten für eine nachhaltigere und effizientere Transportplanung. Insbesondere die genaue Parametrisierung der Kosten für unterschiedliche Verkehrsmodi, abhängig von räumlichen und zeitlichen Faktoren, könnte zur Weiterentwicklung von Logistikmodellen beitragen, die sowohl ökonomische als auch ökologische Optimierungsziele verfolgen.

Eine weitere Aktivität, die im Rahmen dieses Arbeitspakets an der KLU durchgeführt wurde, war die Modellierung eines datenbasierten Lebensmittel-Hypernetzwerks von Distributionslagern des Lebensmitteleinzelhandels (LEH) bis zum Endverbraucher für Deutschland. Zusätzlich wurde eine Perspektive für die zukünftige Integration vorgelagerter Stufen wie Verarbeitung und Erzeugung aufgezeigt. Die ganzheitliche Betrachtung aller Akteure und ihrer Interaktionen eröffnet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in den Bereichen Lebensmittelsicherheit, Versorgungssicherheit und Nachhaltigkeit. Im Bereich Lebensmittelsicherheit ermöglicht es beispielsweise die Simulation von Warenströmen entlang der Lieferkette zur Bewertung und Optimierung bestehender Rückverfolgungsmodelle. Zudem lassen sich kritische Kontrollpunkte identifizieren, an denen Kontaminationsrisiken gezielt minimiert werden können. Für die Versorgungssicherheit erlaubt das Hypernetzwerk die Identifikation besonders vulnerabler Regionen mit geringer Supermarktdichte oder stark konzentrierter Handelsstruktur. Es macht zentrale Akteure der Grundversorgung sichtbar und bietet eine datenbasierte Grundlage für die strategische Planung der Lebensmittelverteilung in Krisen- und Katastrophenfällen. Im Sinne der Nachhaltigkeit kann das Hypernetzwerk regionale Versorgungsketten stärken und Potenziale zur Einbindung in Kreislauf- und Wiederverwertungssysteme der Lebensmittelwirtschaft aufzeigen.

Abbildung 16 visualisiert das modellierte Lebensmittel-Hypernetzwerk und zeigt zentrale Akteure von der Erzeugung bis zum Verbrauch sowie exemplarische Verbindungen zwischen ihnen. Außerdem werden verwendete und potenzielle Datenquellen sowie Modellierungsansätze dargestellt. Die Notwendigkeit zur Modellierung ergibt sich daraus, dass trotz der Einführung des Lieferkettengesetzes in Deutschland weiterhin Zurückhaltung beim Teilen der erhobenen Daten (Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz vom 16. Juli 2021 (BGBl. I S. 2959), 2023; Qian et al., 2023) besteht. Deshalb integriert das Modell empirische Realdaten mit modellierten Daten, um die Akteure und ihre Verbindungen darzustellen.

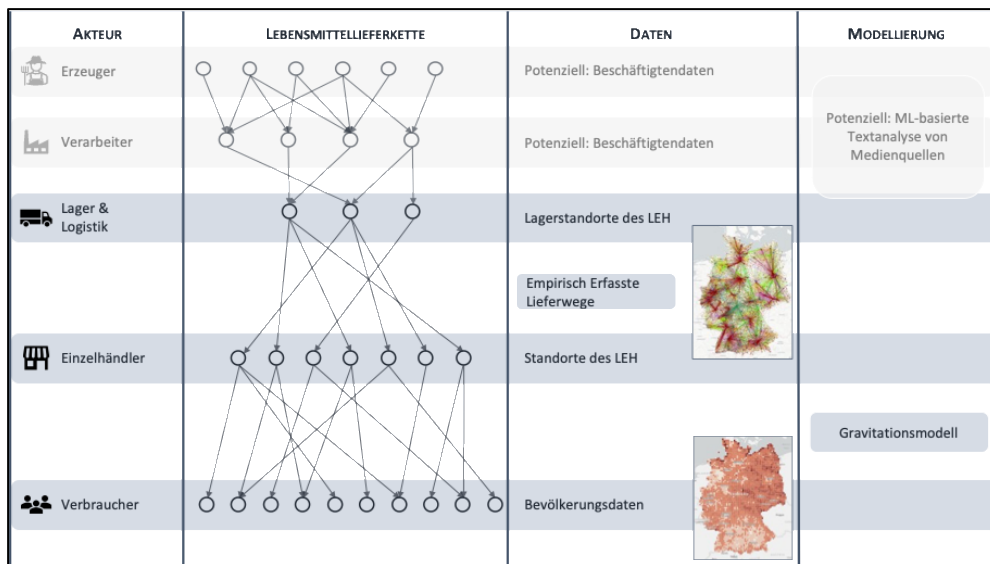


Abbildung 17: Struktur des Lebensmittel-Hypernetzwerks – Akteure, Verbindungen, Daten und Modellierungsansätze.
Quelle: eigene Darstellung der KLU

Akteure: Verbraucher werden über Bevölkerungsdaten (Statistisches Bundesamt, 2024) abgebildet. Daten zu Einzelhandelsfilialen und ihren Eigenlagern wurden beim Anbieter TradeDimensions erworben (Nielsen - TradeDimensions - Geschäfte, 2024). Eine potenzielle Erweiterung stellt die Einbindung von Daten zu Lagern externer Logistikdienstleister dar, wie sie beispielsweise vom Fraunhofer-Institut gesammelt werden. Außerdem könnten Standorte von Verarbeiter und Erzeugern über Beschäftigendaten approximiert werden.

Verbindungen und Volumina: Daten zu den konkreten Warenflüssen entlang der Versorgungskette sind sowohl kaum öffentlich verfügbar als auch schwer zu schätzen. Lediglich für die Verbindung zwischen Eigenlager und Einzelhandelsfilialen konnten empirisch erhobene Daten von TradeDimensions erworben werden (Nielsen - TradeDimensions - Geschäfte, 2024). Für das Einkaufsverhalten der Endverbraucher wurde ein Gravitationsmodell kalibriert. Für zukünftige Erweiterungen bietet sich insbesondere die Analyse von Medienquellen durch maschinelles Lernen an, um Interaktionen zwischen Akteuren abzuleiten.

iv. Simulation und Auswertung der Ergebnisse

In diesem Arbeitspaket wurde ein ganzheitliches Modell der Nahrungsmittelversorgung für Deutschland von der KLU entwickelt. Ziel war es, ein umfassendes Verständnis der Lebensmittelversorgung auf Makroebene zu erlangen, um die Lebensmittel- und Ernährungssicherheit zu verbessern. Das Modell berücksichtigt die verschiedenen Akteure in der Lebensmittelversorgungskette vom Produzenten bis zum Verbraucher und deren Wechselwirkungen. Besonderer Wert wird auf eine hohe räumliche Auflösung und die Einbeziehung des letzten Gliedes der Kette, des Einzelhändlers, gelegt.

Zur Entwicklung des Modells werden empirische Realdaten mit Modelldaten integriert, um die Akteure und ihre Verbindungen darzustellen. Diskussionen und Workshops konzentrierten sich auf die akademische Ausrichtung, zusätzliche Datenquellen und innovative Modellierungsansätze, einschließlich Notfalllogistik, humanitäre Logistik, Lebensmittelsicherheit und Ernährungssicherheit.

Schlüsselbegriffe waren Fehlerausbreitung und Rückverfolgbarkeit. Als Modellierungsansätze wurden verschiedene Methoden des maschinellen Lernens sowie das Gravitationsmodell diskutiert.

Auf Seitem des DLR wurden die Ergebnisse der in AP 3.3 beschriebenen Simulationsstudie ausgewertet. Wie Abbildung 17 zu entnehmen ist, führte die Einführung der Schnellumschlagsanlagen zu einer Erhöhung des Modal-Splits von 6 % auf 15 %. Im Szenario A mit einer Umschlagleistung von 30 Wechselbehältern pro Stunde beträgt die Transportleistung 28,17 Millionen Wechselbehälterkilometer. Bei einer Erhöhung der Umschlagleistung auf 120 Wechselbehälter pro Stunde steigt die Transportleistung auf 28,5 Millionen Wechselbehälterkilometer. Dies verdeutlicht, dass erhöhte Umschlagkapazität die Effizienz des intermodalen Verkehrs steigert und die Verlagerung von Gütertransporten auf die Schiene fördert.

Allerdings führt die höhere Umschlagkapazität auch zu einer Erhöhung der Wartezeiten in den KV-Terminals. Während die durchschnittliche Wartezeit im Szenario A mit 30 Wechselbehältern pro Stunde bei 4 Prozent liegt, steigt sie im Szenario B mit 120 Wechselbehältern pro Stunde auf 9 Prozent. Dies weist darauf hin, dass neben der Umschlagleistung auch eine effiziente Steuerung der Terminalprozesse erforderlich ist, um Engpässe zu vermeiden.

Zudem zeigt sich, dass die Fahrzeiten für Direktverkehre mit dem Lkw im Szenario A mit 30 Wechselbehältern pro Stunde um etwa 8,6 Prozent höher sind als im Szenario B mit 120 Wechselbehältern pro Stunde. Dies ist konsistent mit dem Anstieg des Anteils verlagelter Transporte um 9% und verdeutlicht die zeitlichen Effizienzgewinne im Direktverkehr, da Fahrer im Szenario mit erhöhten Umschlagskapazitäten insgesamt weniger Stunden in langen Direktverkehren verbringen müssen.

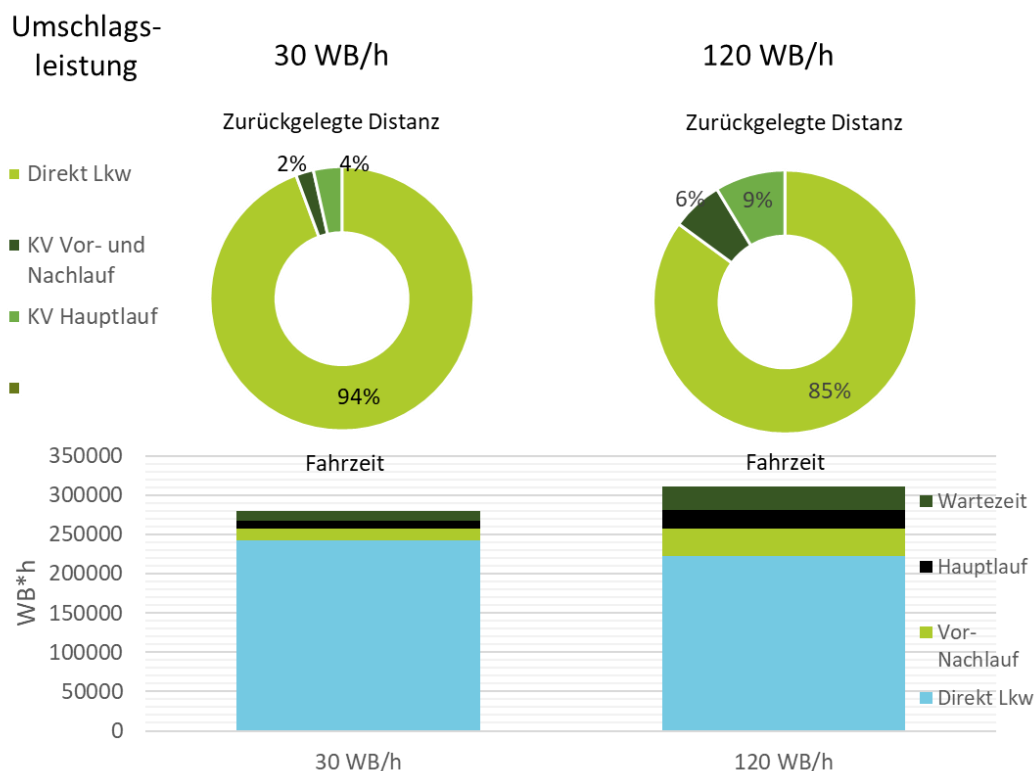


Abbildung 18: Simulationsergebnisse der Basis- und Zukunftsszenario mit verbessertem Umschlag. Quelle: eigene Darstellung des DLR

Neben der quantitativen Auswertung und Simulation des kombinierten Verkehrs wurden Abläufe in den Terminals auch qualitativ erfasst. Dabei konnten von rund 15% aller Terminals im

deutschsprachigen Raum Rückmeldungen in einer Onlinebefragung erreicht werden. Die Ergebnisse der Befragung werden in Abbildung 18 dargestellt. Neben allgemeinen Abläufen und Verbesserungspotenzialen stand vor allem die Eignung der Terminals für Güter aus dem KEP-Bereich, der als starker Ankerkunde für KV-Verbindungen dienen soll, im Mittelpunkt. Prozessdefizite und Verbesserungspotentiale wurden abgeleitet.

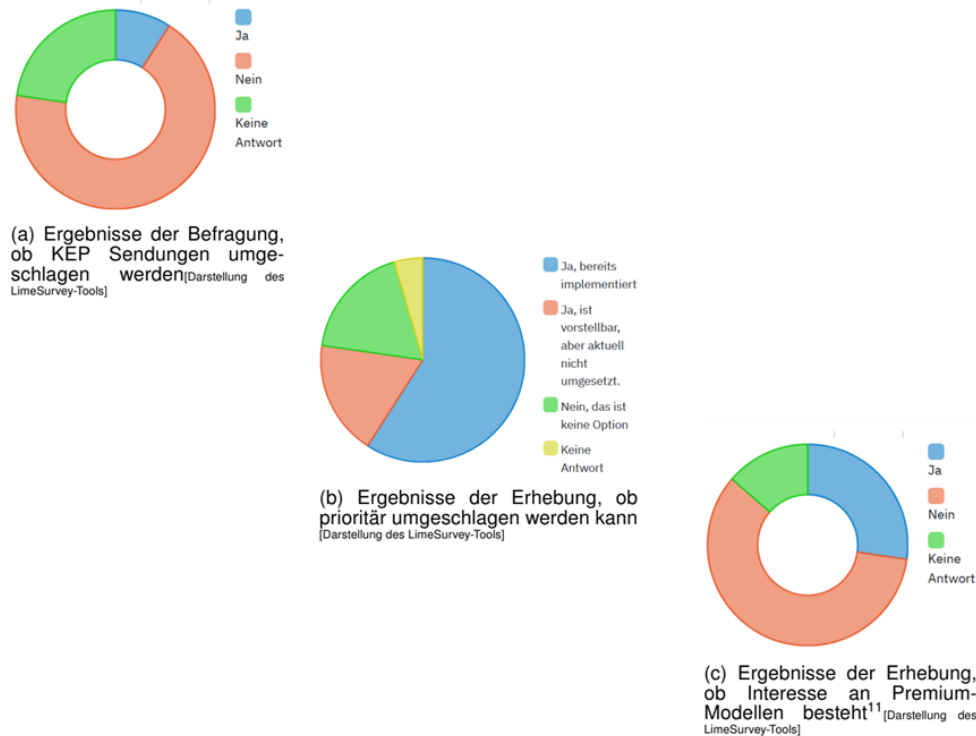


Abbildung 19: Ergebnisse aus dem Rücklauf der Terminalbefragung. Quelle: Thümler (2025)

Seitens der KLU wurde als Fortsetzung des AP 3.3 im Rahmen dieses Arbeitspakets die Beispielanwendung im Bereich der Lebensmittelsicherheit weiterentwickelt. Die Bedeutung einer detaillierten Betrachtung jeder Stufe und ihrer Interaktionen lässt sich am Beispiel der Lebensmittelsicherheit verdeutlichen: Kontaminationsquellen können auf jeder Ebene entstehen - beispielweise durch Umweltkontaminanten bei Erzeugern bis hin zu Problemen mit der Lebensmittelhandhabung auf Verbraucherebene. Um Krankheitsausbrüche anhand des Lebensmittel-Hypernetzwerks effektiv zurückzuverfolgen, sind im Unterschied zu bestehenden Makromodellen der Lebensmittelversorgung zwei Aspekte von besonderer Bedeutung: eine hohe räumliche Auflösung sowie die Einbeziehung der letzten Verbindung in der Kette vom Einzelhändler zum Verbraucher (Balster & Friedrich, 2019).

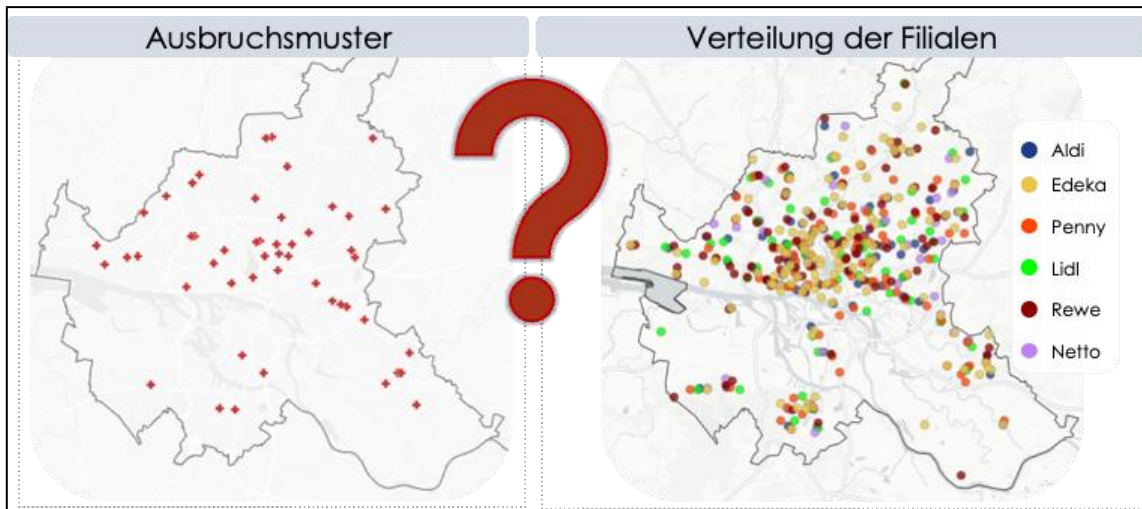


Abbildung 20: Vergleich eines hypothetischen Ausbruchsmusters mit der räumlichen Verteilung von Filialen unterschiedlicher Handelsketten. Quelle: eigene Darstellung der KLU

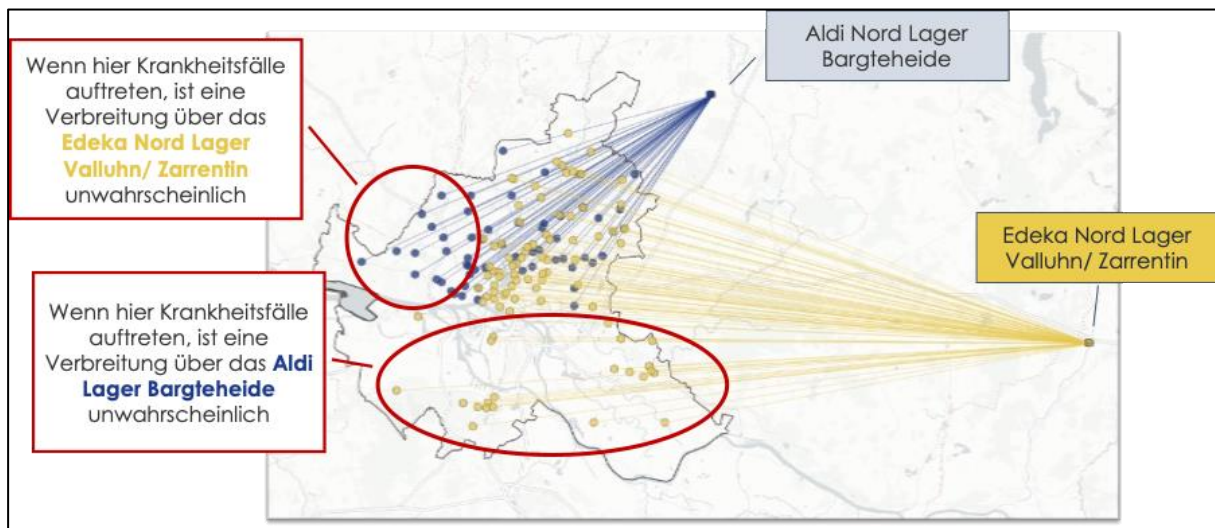


Abbildung 21: Verteilung von belieferten Filialen des Aldi Nord Lager Bargteheide und des Edeka Nord Lager Valluhn / Zarentin. Quelle: eigene Darstellung der KLU

Das im Arbeitspaket 3 an der KLU entwickelte Lebensmittel-Hypernetzwerk ermöglicht eine datenbasierte Analyse der Versorgungsstruktur in Deutschland. Besonders im Bereich der Lebensmittelsicherheit zeigt das Modell hohes Potenzial zur Unterstützung von Rückverfolgung und Risikobewertung. Die Anbindung vorgelagerter Stufen, zusätzlicher Datenquellen und Modellierungsmethoden eröffnet darüber hinaus Potenzial für zukünftige Erweiterungen.

v. Entwicklung von Verknüpfungslogiken

Im Rahmen dieses Arbeitspakets hat Ubilabs die Aufgabe übernommen, die in Arbeitspaket 2 erhobenen, ursprünglich im CSV-Format vorliegenden Daten in eine strukturierte und modulare Form zu überführen. Diese Daten enthielten Informationen zu Start- und Zielpunkten, Zwischenhalten, Betreibern, Frequenzen und geografischen Koordinaten, waren jedoch in ihrer ursprünglichen Form

für die weitergehende Verarbeitung und Analyse nur eingeschränkt nutzbar. Ubilabs entwickelte daher Python-Skripte, die die Daten in eine einheitliche Struktur, die sogenannte **UFNS** (Unified Freight Network Structure), überführten. Diese Struktur ermöglicht eine effiziente und redundanzfreie Abbildung (siehe Abbildung 21) der Daten und bietet die Flexibilität, diese um zusätzliche Informationen wie Zwischenhalte oder Zeitangaben zu erweitern. Durch diese Transformation konnte die Gesamtdatengröße signifikant reduziert und die Handhabung der Daten für eine tiefere Analyse erleichtert werden.

Im intensiven Austausch mit 4flow und dem DLR wurde der Prozess der Datenverknüpfung kontinuierlich vorangetrieben. Dabei wurden verschiedene Verknüpfungsmethoden diskutiert und teilweise implementiert. Trotz der komplexen Natur der Aufgabe, bedingt durch die Vielzahl an Datentypen und die unterschiedlichen Formate, konnten wesentliche Fortschritte erzielt und erste Ansätze für eine inhaltlich und technisch saubere Verknüpfungslogik entwickelt werden.

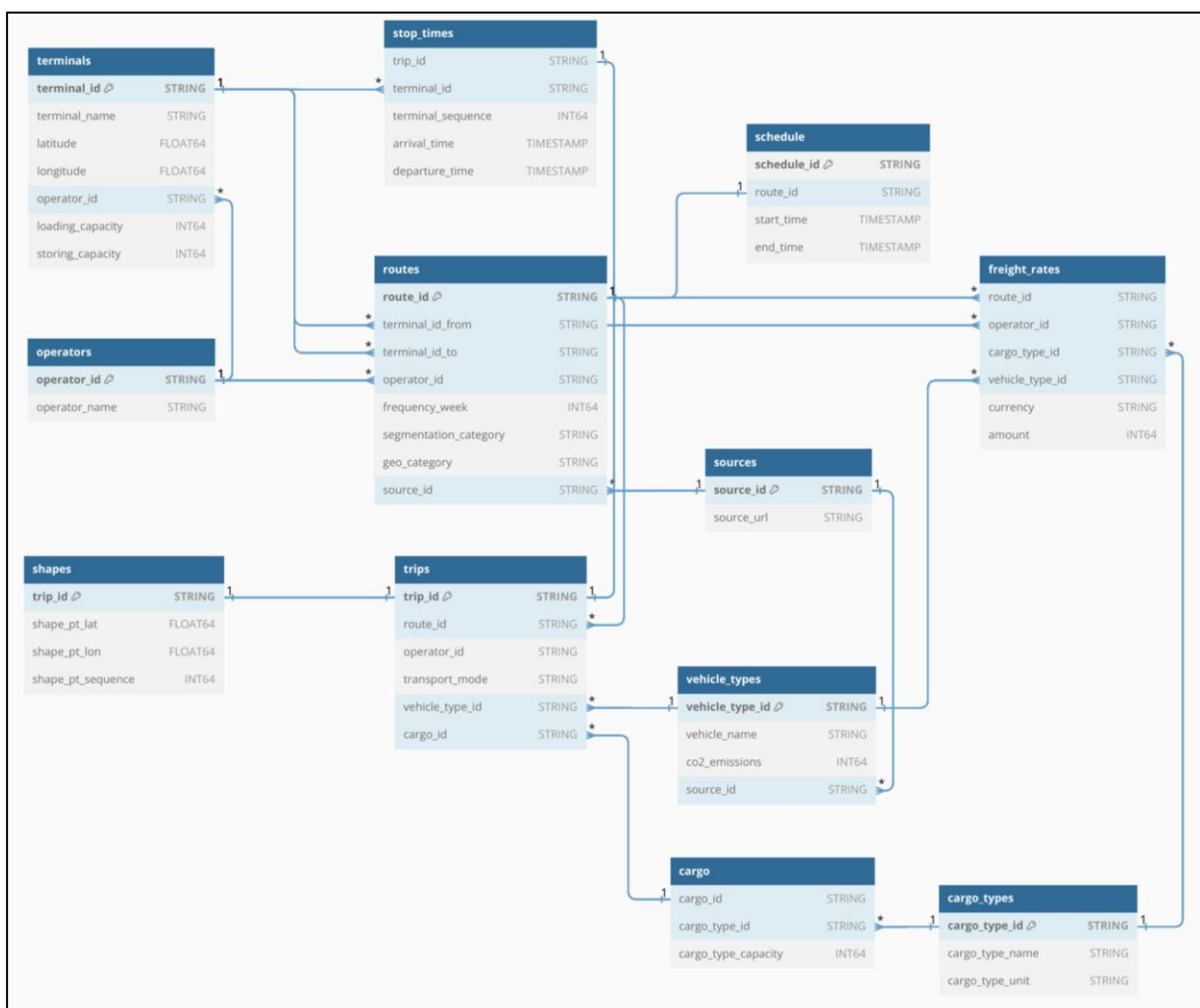


Abbildung 22: Datenbankdiagramm der selbst entwickelten Universal Freight Network Specification

Parallel dazu nutzte die KLU die „World Distance and Travel Time Matrix“ der Weltbank als Grundlage für die Potenzialstudie zu unimodalen Transporten. Während die ursprüngliche Zielsetzung auf offenen Datenquellen basierte, konnten durch gezielte Verhandlungen detailliertere Daten mit realistischen Reisezeiten und Verkehrsbedingungen gewonnen werden. Diese wurden mithilfe

probabilistischer Methoden modelliert und berücksichtigen multimodale Transporte sowie Hafeneroperationen und Umschlagszeiten.

Die Verknüpfungslogiken werden realistisch abgebildet, indem sie Interaktionen zwischen verschiedenen Verkehrsnetzwerken in einem Hypernetwork-Ansatz darstellen. Eine Analyse des Schienengüterverkehrs-Ökosystems verdeutlicht, dass die Integration intermodaler Transportketten – etwa durch standardisierte Ladeeinheiten – die Effizienz steigert. Zudem bieten Leasingmodelle und spezialisierte Terminaloperationen zusätzliche Flexibilität. Insgesamt zeigt sich, dass die Wechselwirkungen zwischen den Akteuren die Leistungsfähigkeit des Systems entscheidend beeinflussen (siehe Abbildung 22).

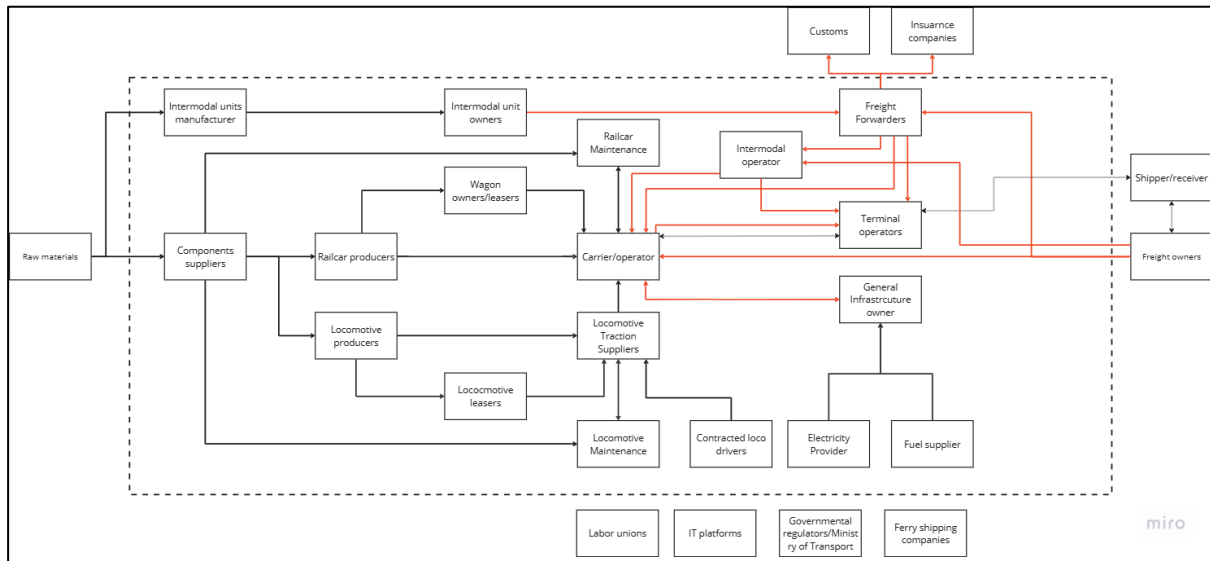


Abbildung 23: Das Schienengüterverkehrs-Ökosystem

Die KLU analysierte außerdem in einer Literaturrecherche 92 Studien zu horizontalen logistischen Kollaborationen (HLC). Untersucht wurden spieltheoretische Modelle, simulationsbasierte Optimierungsverfahren und Technologien wie Blockchain und KI. Trotz Effizienzvorteilen erschweren Datensicherheitsbedenken, mangelndes Vertrauen und regulatorische Hürden die Umsetzung. Zudem wurden zentrale, dezentrale und hybride Kooperationsmodelle betrachtet. Viele Ansätze ignorieren reale Herausforderungen wie Nachfrageunsicherheiten und operative Variabilität. Künftige Forschung sollte hybride Steuerungsstrukturen und faire Gewinnverteilungen stärker berücksichtigen. Das vollständige Manuskript ist auf Anfrage verfügbar. Die enge Zusammenarbeit zwischen den Partnern hat somit zu einer fundierten und umfassenden Lösung geführt, die sowohl die inhaltlichen als auch die technischen Herausforderungen der Datenverknüpfung adressiert. Die Ergebnisse dieses Arbeitspakets werden einen wichtigen Beitrag zur weiteren Forschung und Optimierung von Transportnetzwerken leisten.

e. Potenzialstudien zur Transparenz von logistischen Hypernetzwerken [4flow]

i. *Integration in die Verkehrsmodellierung*

Die im Rahmen des AP 2 in den Jahren 2023 und 2024 geführten Interviews wurden im Jahr 2024 ausgewertet und Erkenntnisse daraus gewonnen. Auf die Frage eines hypothetischen „idealen“ und vollständig transparenten Hypernetzwerks, bei welchem jeder Marktteilnehmer über volle Transparenz der Strukturen und Prozesse erhalten würde, waren die Antworten eher pragmatisch und die Mehrheit gab an, lediglich an Informationen interessiert zu sein, welche die eigenen Prozesse weiter optimieren könnten. Dabei wurden unter anderem weitere Kundenpotenziale, die Verbesserung operativer Prozesse, Qualitätsmessungen oder auch ETA-Berechnungen (Estimated Time of Arrival) hervorgehoben.

Darüber hinaus wurden für die in AP 1 ausgewählten Branchen die jeweiligen Logistikanteile mithilfe bestehender Erkenntnisse und einer Branchenanalyse ermittelt, sowie die jeweilige Größe dieser Teilmärkte abgeschätzt. Ebenfalls wurde die zeitliche Entwicklung von Transportaufkommen sowie die Entwicklung einzelner Verkehrsträger (die für intermodalen Transport infrage kommen) untersucht. Es wurde geprüft, in welcher Form diese Informationen in die von Ubilabs entwickelte UFNS-Suite integriert werden könnten. Gemeinsam mit Ubilabs wurde erkannt, dass es aufgrund der Top-Down-Betrachtung dieser Analyse (hauptsächlich basierend auf nationalen Statistiken) keinen Mehrwert darstellt, diese Daten direkt in die UFNS-Suite zu übertragen, da diese als Bottom-Up-Variante auf Informationen und Daten in granularer Detailebene zurückgreift. Das Ergebnis aus dieser Auswertung (steigende Logistikkosten bei rückläufigen Mengen) zeigt jedoch deutlich, weshalb die Untersuchung von Kooperationen und Prozessoptimierungen im Logistikmarkt und ebenfalls die Transparenz von Hypernetzwerken weiterhin essenziell ist.

Die im Jahr 2023 erstellte, prototypische Graph-Struktur für bisher gesammelte und ermittelte Informationen wurde im Jahr 2024 nochmals aufgegriffen und untersucht, inwieweit ein generatives KI-Modell bei der Beantwortung von Fragen im Logistikbereich herangezogen werden kann. Hier ergab sich, dass sich bei den aktuell verwendeten Modellen der generativen KI vor allem bei der Analyse und Wiedergabe von quantitativen Daten noch Schwierigkeiten ergeben und oftmals keine plausiblen Ergebnisse ausgegeben werden. Diese Problemstellung erfährt jedoch zum Zeitpunkt des HEGEL-Projektabschlusses hohe Aufmerksamkeit in der Forschung, wodurch in den nachfolgenden Monaten und Jahren qualitativ höherwertigere Ergebnisse zu erwarten sind.

ii. *Potenzialstudie mit Schwerpunkt unimodale Transporte*

Im Rahmen des Arbeitspaketes fand ein regelmäßiger Austausch zwischen den Projektpartnern statt. Das von 4flow entwickelte Konzept wurde unter anderem durch Diskussionen und Expertise von 4PL Intermodal bereichert. Es wurden zunächst interne Stakeholder bei 4flow sowie deren Kunden konsultiert, um die praktische Umsetzbarkeit von Transportplanungsansätzen zu bewerten. Dabei wurde eine neue Kennzahl, die Durchlaufzeit, als elementar wichtig aus Kundenperspektive identifiziert und dem Gesamtkonzept hinzugefügt (zusätzlich zu den bereits vorgesehen Kennzahlen Kosten, Nachhaltig und Resilienz). Sie wurde in der Konzeption der Fallstudien entsprechend mit den bestehenden Kennzahlen verknüpft. Ferner erfolgte ein intensiver Austausch mit Kundenprojekten aus dem Automobilbereich. So wurden zwei repräsentative Datensätze erstellt, analysiert und visualisiert,

um den Hypernetzwerk-Ansatz mit der herkömmlichen, klassischen Transportplanung vergleichen zu können.

Für die Entwicklung der Emissionsberechnungen wurden umfangreiche Recherchen nach dem EcoTransit-Methodenhandbuch zur Berechnung ganzheitlicher Transportketten nach ISO 14083 durchgeführt. Die Kostenberechnungen basierten zunächst auf einer Masterarbeit, die bei 4flow geschrieben wurde und wurden später durch reale Angebote aus Transportausschreibungen ergänzt. Außerdem wurden verschiedene Methoden zur Betrachtung der Resilienz verglichen und ein Konzept zur Operationalisierung entwickelt. Es erfolgte in diesem Rahmen auch ein Austausch mit dem Forschungsprojekt ReMuNet zum Thema Resilienz. Zur Analyse der Effizienz und Nachfrage intermodaler Transportketten wurden Emissions-, und Kostendaten für den Schienen- und Binnenschiffsverkehr sowie Kundennachfragedaten erhoben.

Als zentrales Ergebnis dieses Arbeitspakets wurde eine umfassende Potenzialstudie zu multimodalen Transportnetzwerken durchgeführt. Dabei wurde ein repräsentativer Datensatz genutzt, der den Transport eines Unternehmens der Lebensmittelbranche in Europa widerspiegelte. Der Fokus lag zunächst auf Lkw-Transporten, wobei intermodale Alternativen noch eine untergeordnete Rolle spielten. Um eine belastbare Datengrundlage zu schaffen, wurden bestehende Infrastrukturdaten erweitert und aktualisiert. Der von der KLU bereitgestellte Datensatz zu intermodalen Zugverbindungen wurde von 4flow aktualisiert und durch weitere Verbindungen in ganz Europa sowie aktuelle Fahrpläne für das Jahr 2024 ergänzt. Zudem wurde ein neuer Datensatz für Binnenschiffverbindungen mit besonderem Fokus auf hochfrequentierte Routen in Rotterdam, Antwerpen und Duisburg erhoben.

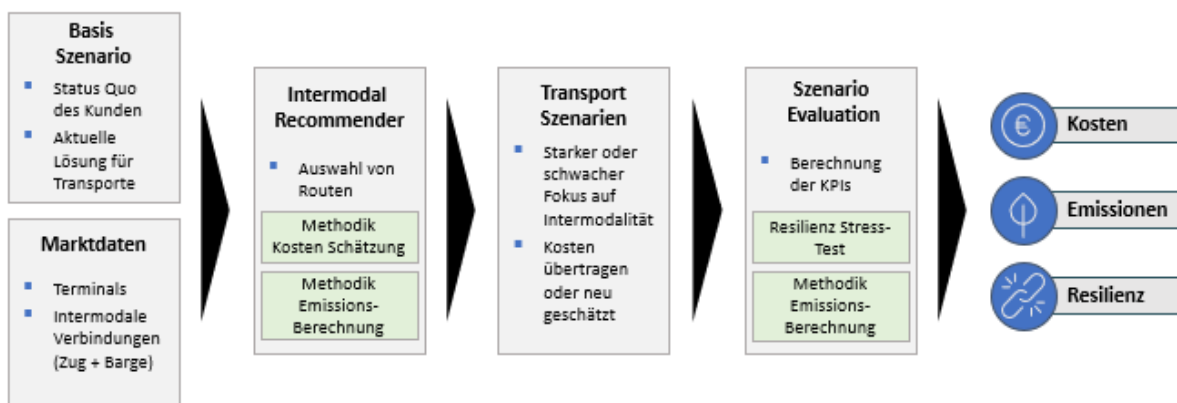


Abbildung 24: Vorgehen der Fallstudie bei einem Netzwerk mit Schwerpunkt auf unimodale Transporte

Für die Bewertung der Transportalternativen wurden verschiedene Kriterien definiert. Kostenabschätzungsfunktionen modellierten die Transportkosten auf Basis realer Daten. Die Resilienz-Bewertung erfolgte mithilfe eines KPIs, der entstehende Verspätungsdauern und zusätzliche Kosten durch Störungen quantifiziert und miteinander in Verhältnis setzt. Die Emissionsberechnung basierte auf der Methodik des EcoTransit-Handbuchs, das seit 2024 GLEC- und ISO14083-konform ist. Ergänzend wurden externe Kosten wie Lärm, Staus und Umweltbelastungen auf Basis von CE Delft (2020) einbezogen. Ein weiteres wichtiges Ergebnis der Studie war die prototypische Entwicklung des „Intermodal Recommenders“, der Infrastrukturdaten intermodaler Verbindungen mit realen Transportnachfragedaten verknüpft. Basierend auf Emissionen und Kosten werden unimodale Transportlösungen mit intermodalen Alternativen abgeglichen und optimierte Transportempfehlungen ausgesprochen. Die Resilienz-Bewertung und Berechnung externer Kosten erfolgte

unabhängig vom entwickelten Recommender, da diese Aspekte ex-post auf Netzwerkebene analysiert wurden.

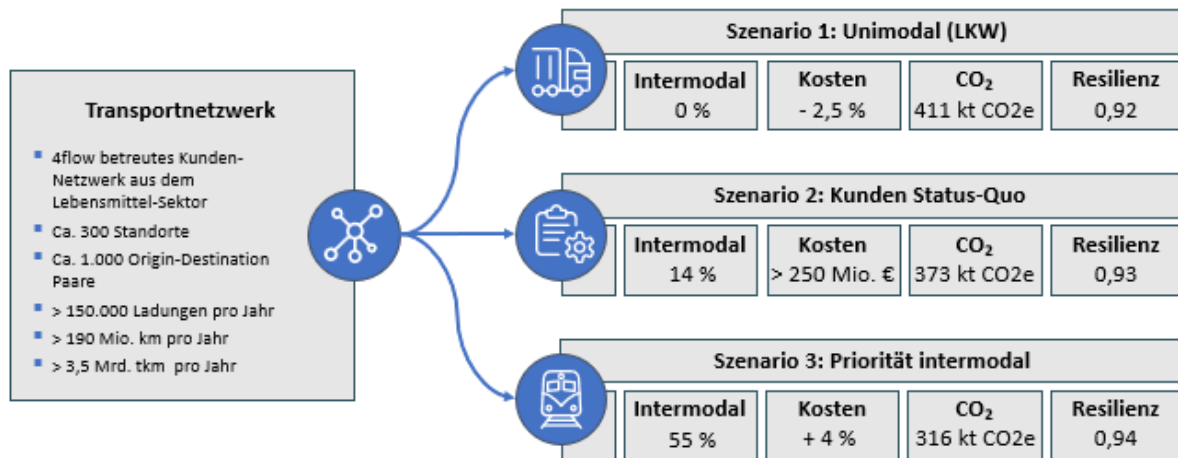


Abbildung 25: Ergebnisse Fallstudie zu Netzwerk mit Fokus auf unimodale Transporte

Parallel zu diesen Arbeiten führte die KLU eine Analyse durch, um eine effektivere logistische Planung bei großflächigen Ausnahmefällen (z.B. einer Pandemie) umzusetzen. Dabei wurden die Effekte des Ursprungs und Ziels der Sendungen, der Branche des Empfängers und der Zeitverzögerung zwischen dem Volumen der Sendungen und der Veränderung der COVID-19-Indikatoren berücksichtigt. Die vorläufigen Ergebnisse der Studie wurden auf der Europäischen Transportkonferenz 2022 in Mailand präsentiert und die Studie anschließend fortgesetzt. Die Pandemie hatte schwerwiegende wirtschaftliche Folgen, insbesondere für den Handel und den Containerverkehr. Die Studie zeigt eine signifikante geografische und sektorale Heterogenität hinsichtlich des Ausmaßes und der Dauer dieser Auswirkungen. Die Unvorhersehbarkeit von Nachfrageänderungen unterstreicht die Bedeutung genauer Frachtnachfrageprognosen, um auf unerwartete Ereignisse reagieren zu können. Diese Forschung zielt darauf ab, eine Lücke in bestehenden Studien zu schließen, indem der Umfang und die Methodik der Handelsforschung mit den spezifischen Eigenschaften von Logistiksystemen kombiniert werden. Durch die Analyse der zeitlichen Granularität von Versanddaten sollen Erkenntnisse darüber gewonnen werden, welche Logistik- und Supply-Chain-Prozesse durch Störungen unterbrochen werden. Die Ergebnisse sollen politischen Entscheidungsträgern und Industrievertretern zur Verfügung gestellt werden, um eine bessere Vorbereitung auf ähnliche Arbeitsmarktschocks zu ermöglichen. Basierend auf hochgranularen Versanddaten eines globalen Logistikdienstleisters analysierte sie mithilfe eines erweiterten Schwerkraftmodells die Effekte nicht-pharmazeutischer Interventionen (NPIs) auf den Warenverkehr. Die Ergebnisse zeigten deutliche Verzögerungen bei Transportstörungen durch NPIs und lieferten wertvolle Erkenntnisse für die Krisen-Resilienz von Lieferketten.

Der Projektpartner IIS erarbeitete eine Methode zur Nachbildung von Transportrelationen zwischen den Depot- und Hubstandorten der drei größten deutschen Stückgutkooperationen. Durch die Verknüpfung von Standortkoordinaten mit zeitlichen Restriktionen wurden realistische Abfahrts- und Ankunftszeiten für knapp 6.000 Transportrelationen modelliert. Diese Daten wurden so strukturiert, dass sie direkt in die von Ubilabs entwickelte UFNS integriert werden konnten und flossen in den UFNS-Demonstrator ein. Durch diese interdisziplinäre Herangehensweise wurde der Mehrwert von Hypernetzwerken in multimodalen Transporten fundiert untersucht und validiert. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen dazu bei, effizientere, nachhaltigere und resilientere Transportnetzwerke zu gestalten. Die Masterarbeit "Empirische Analyse des Auswahlverhaltens von Versendern bei eigenen Containern im intermodalen Verkehr" untersucht die Faktoren, die die Wahl von Versender-eigenen Containern beeinflussen. Durch Datenanalyse und Interviews wurden wichtige Determinanten

identifiziert, wie z.B. freie Tage, Mietkosten und Lagergebühren. Ein Entscheidungsbaum wurde entwickelt, um die Containerauswahl zu optimieren, was zu einer höheren Annahmquote und Kundenzufriedenheit führte. Diese Forschungsarbeit bietet Einblicke in die Entscheidungen von Verladern in unimodalen Transportnetzwerken.

iii. Potenzialstudie mit Schwerpunkt intermodale Transporte

Hauptverantwortlich für dieses Arbeitspaket war der Projektpartner 4PL Intermodal. Erste Überlegungen und Austausch hierzu fanden gemeinsam mit den Projektpartnern statt. Die Daten für die Fallstudie waren über die eigene Plattform „IMSLOT“ verfügbar. Ziel der Studie war es, eine systematische und zuverlässige Methodik zu entwickeln, um Angebot und Nachfrage für intermodalen Schienentransport auf NUTS3-Ebene geografisch zusammenzuführen. Diese Methodik ermöglicht es, das intermodale Schienennetz zu analysieren und Lücken und spezifische Merkmale in der Netzabdeckung zu identifizieren. Dadurch können Bereiche hervorgehoben werden, in denen die Einrichtung oder Verbesserung einer intermodalen Schienenverbindung zu besseren Angeboten und Nachfragedienstleistungen führen kann. Schließlich kann eine Mikro-Level-Validierung durchgeführt werden, um das Potenzial von vorgeschlagenen Verbindungen zu ermitteln und festzustellen. Es wurde ein Modell entwickelt, um Angebot und Nachfrage für den intermodalen Schienentransport in Deutschland zu verbinden. Dabei wurden die Daten aus Arbeitspaket 2.3 sowie die Prognosen der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025 des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) als Grundlage genutzt.

4PL Intermodal GmbH arbeitet stetig daran, das gesamte intermodale Netzwerk zu digitalisieren. Durch umfassende Analysen des nationalen intermodalen Netzwerks unter verschiedenen Gesichtspunkten wie Kosten, Zeiten, Verfügbarkeiten, Resilienzen, Qualitäten und Emissionen wurden Algorithmen entwickelt, die Auswahlmöglichkeiten für die konventionelle Routenplanung bieten. Eisenbahnverkehrsunternehmen können diese Modelle nutzen, um mit ihren Kunden neue Verbindungen zu prüfen und umzusetzen. Zur Implementierung wurden von 4PL Intermodal Serverlandschaften zur Verfügung gestellt, damit softwaretechnisch die geografische Aufbereitung vorgenommen werden kann. Damit verbunden war das Aneignen von QGIS. Diese Geoinformationssystemsoftware ermöglichte es, die vielen Daten und Aussagen leicht verständlich den Nutzern aufzubereiten.

Weiterhin wurde im Rahmen dieses Arbeitspakets dem Studenten David Becker von der KLU die Möglichkeit eröffnet, seine Masterarbeit in Kooperation mit 4PL Intermodal zu schreiben. 4PL Intermodal stellte dabei relevante Anwendungsfälle zur Verfügung.

Ferner wurde von der KLU eine Studie zum intermodalen Potenzial in Deutschland durchgeführt. Hintergrund ist die Diskrepanz zwischen den Nachhaltigkeitsplänen zur Steigerung des Anteils des Schienenverkehrs und dem tatsächlichen Rückgang dieses Verkehrsträgers. Ziel der Studie war es, zu erklären, warum die Schiene bzw. der intermodale Verkehr weniger genutzt wird als gewünscht, sowie neue Standorte für intermodale Terminals und Verbindungen zu identifizieren, die das größte Potenzial zur Steigerung des Schienenanteils haben. Methodisch ist die Studie in die Bereiche Modellierung der Güterverkehrsnachfrage und Modellierung der Verkehrsmittelwahl einzuordnen. Als Proof of Concept wurde eine vereinfachte Version auf Basis der Gesamtlogistikkosten entwickelt. Die endgültige Version enthält Prognosen des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur und nutzt die im Rahmen des Projekts gesammelten Daten.

Weiterhin hat im Rahmen dieses Arbeitspakets Reha Cekirdekci, Masterstudent an der KLU, seine Masterarbeit mit dem Titel "A Comprehensive Analysis of Capacity Shortages in Maritime Transport for the Automotive Industry" abgeschlossen. Die Arbeit untersucht die Herausforderungen und Lösungen im Zusammenhang mit Kapazitätsengpässen im maritimen Fahrzeugtransport, insbesondere im Hinblick auf die steigende Bedeutung von Autotransportschiffen für den globalen Automobilhandel. Durch eine Analyse der Entwicklung der Fahrzeugträgerflotten und der Veränderungen in der Automobilindustrie zeigt die Studie, wie der wachsende Export von Elektrofahrzeugen und die Verschiebung der Produktionsstandorte von Europa nach Asien die Nachfrage nach Seetransportkapazitäten beeinflussen. Ein zentraler Aspekt der Arbeit ist die mathematische Modellierung zur Berechnung der minimal erforderlichen Anzahl von Fahrzeugträgern und zur Durchführung einer Sensitivitätsanalyse für zukünftige Szenarien. Die Ergebnisse tragen dazu bei, das Verständnis für die strukturellen Verknüpfungen zwischen der Automobil- und der Schifffahrtsindustrie zu vertiefen und liefern wertvolle Einblicke für strategische Entscheidungen in der maritimen Logistik.

Für die KLU stellte die Schlüsselaktivität dieses Arbeitspakets die Studie über das intermodale Potenzial in Deutschland dar. Die Proof-of-Concept-Studie wurde im Jahr 2023 abgeschlossen, bei dem Meilensteintreffen dem Beirat des Projekts präsentiert und diskutiert. Das erhaltene Feedback motivierte dazu, die Anzahl der Faktoren, die die Nachfrage nach intermodalem Transport bestimmen, um den Aspekt der Servicezugänglichkeit zu erweitern. Während die physische Erreichbarkeit bereits in vielen aktuellen Modellen zur intermodalen Wahl berücksichtigt wurde, kamen die Mitarbeiter der KLU in der Diskussion mit den Mitgliedern des Beirats zu dem Schluss, dass die Servicezugänglichkeit eine weitere mögliche Ursache für die Unterauslastung von Schienen- und intermodalen Verkehrsoptionen darstellen könnte.

Um dies zu untersuchen, wurde an der KLU eine Datenerhebung zu den Dienstleistungen von 14 intermodalen Operateuren in Deutschland durchgeführt. Dabei wurden die Buchungsmöglichkeiten auf den jeweiligen Webseiten hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit und der Zugangshürden analysiert – ob eine Buchung nur nach Registrierung, ausschließlich über einen Buchungsagenten per Telefon oder direkt über die Website möglich ist. Zudem wurde erfasst, welche Informationen zu freien Kapazitäten und verfügbaren Verbindungen über die Webseiten bereitgestellt werden. Ein Beispiel der erhobenen Daten kann in Abbildung 25 eingesehen werden. Die gesammelten Daten bilden die Grundlage für eine Analyse, die untersucht, ob eine höhere Zugänglichkeit der Buchungsprozesse zu einer stärkeren Nachfrage nach den Dienstleistungen der jeweiligen Betreiber führt. Da die Datenerhebung gegen Ende des HEGEL-Projekts abgeschlossen wurde, ist die Analyse für die Zeit nach Projektende geplant.

Question N	Question short	Operator	Answer	Comment
Q1	Schedule	Contargo	Yes*	In special tool on the website
Q1.1	Capacity information	Contargo	No	No, possibly after registration
Q2	Dangerous/oversize	Contargo	Yes*	Information on each train connecton
Q3	Planning tool	Contargo	Yes	
Q4	Pricing	Contargo	Yes*	After registration
Q5	Online requesting of a quote	Contargo	Yes*	After registration
Q5.1	Pricing/slot availability on the quote	Contargo	Yes*	After registration
Q6	Direct booking only after registering	Contargo	Yes	
Q7	Booking only after a call	Contargo	Yes	

Abbildung 26: Ein Ausschnitt der Daten zur Servicezugänglichkeit des Terminaloperators Contrargo. Quelle: eigene Darstellung der KLU

iv. Konzipierung zusätzlicher Dienstleistungen

Im Rahmen mehrerer Austauschformate zu den AP 4.2 und 4.3 wurden neue potenzielle Dienstleistungen konzipiert und diskutiert. Ein zentraler Aspekt war dabei die Weiterentwicklung des von 4flow entwickelten Prototyps des Intermodal Recommenders, der in seiner Grundstruktur beibehalten, jedoch um Kapazitätsdaten für Züge ergänzt wurde. Diese zusätzlichen Daten, bereitgestellt von 4PL Intermodal, basieren auf detaillierten Fahrplänen mit verfügbaren Kapazitäten und ermöglichen eine präzisere Planung. Durch diese Erweiterung kann das Tool nicht nur auf strategischer, sondern auch auf taktischer Ebene eingesetzt werden. Unternehmen erhalten die Möglichkeit, ihre Transportplanung noch gezielter an tatsächliche Kapazitäten anzupassen, wodurch Effizienz und Flexibilität im intermodalen Verkehr erheblich gesteigert werden. Diese Innovation unterstützt Logistikunternehmen dabei, ihre Ressourcen optimal zu nutzen und auf Marktveränderungen schneller zu reagieren.

f. Innovative Dienstleistungen für logistische Hypernetzwerke [ubilabs]

i. Aufnahme von Anforderungen der Nutzer innovativer Softwareservices in der Logistik

Während der Projekttreffen sammelten 4flow und Ubilabs in zwei Workshops Anforderungen zu den Themen Resilienz und Nachhaltigkeit. Es erfolgte ein enger und regelmäßiger Austausch zwischen Ubilabs und 4flow, um gemeinsame Anwendungsfelder zu identifizieren sowie eine erfolgreiche Zusammenarbeit im Rahmen einer Bachelorarbeit.

Die Auswertung der Interviews mit verschiedenen Akteuren des intermodalen Verkehrs in AP 2.3. zeigt ein breites Spektrum an Bedürfnissen und Wünschen an innovative Softwarelösungen. Im Vordergrund stehen dabei die Verbesserung der Kapazitätsauslastung, der Kommunikation und Koordination zwischen den Partnern sowie die Erhöhung der Transparenz und Effizienz in der Supply Chain. Lösungen wie der direkte Zugriff auf Kapazitäten, automatisierte Dispositionsboards und transparente Übersichten über verfügbare Kapazitäten werden vorgeschlagen. Transparenz wird als entscheidend für Effizienz und Zuverlässigkeit angesehen, während Herausforderungen wie Prozessvereinheitlichung und Datenfragmentierung identifiziert werden. Insgesamt zeigte sich, dass die Befragten sich innovative Softwarelösungen wünschen, die eine nahtlose, effiziente und transparente Abwicklung intermodaler Transporte ermöglichen. Dabei war die Integration aller beteiligten Akteure in ein übergeordnetes, kooperatives System ein wiederkehrendes Thema, das die Grundlage für die Entwicklung zukunftsweisender digitaler Plattformen im intermodalen Transport bilden könnte.

Nicht alle Anforderungen der befragten Akteure waren für das Projekt HEGEL relevant oder in einer Softwarelösung umsetzbar. Gefordert wurden automatisierte Dispositionssysteme und transparente Kapazitätsübersichten zur Reduzierung von Leerfahrten. Eine verbesserte Kommunikation, etwa durch Slot-Buchungen oder einheitliche Datenstandards, sollte Zeitverluste vermeiden. Große Empfänger forderten Echtzeit-Tracking und präzise Zeitfenster. Einige dieser Anforderungen, wie z.B. das Slot-Management, werden bereits von Unternehmen umgesetzt und spielen in Hypernetzwerken keine Rolle. Als Ausgangspunkt wurde sich daher im Rahmen von HEGEL zunächst auf die Entwicklung eigener Ideen zur Erhöhung der Transparenz, wie z.B. ein operatives Logistik-Tool und einen neuen Hypernetwork Explorer konzentriert. In einem nächsten Schritt wurde in bilateralen Austauschitzungen zwischen Ubilabs und 4flow Anforderungen an Analyse- und Visualisierungslösungen für logistische Hypernetzwerke identifiziert. Ubilabs organisierte zudem

weitere Workshops, um praxisnahe Anforderungen zu sammeln. Diese Anforderungen flossen in eine priorisierte Anforderungsliste ein, die die Grundlage für die weitere Entwicklung bildet.

Herausforderungen bestehen in der Fragmentierung der IT-Systeme und der mangelnden Standardisierung. Die zentrale Forderung ist ein integriertes, kooperatives System. Allerdings sind nicht alle Anforderungen gleichzeitig umsetzbar, und viele fallen nicht in den Fokus des HEGEL-Projekts. Daher wurden im Projekt eine Vielzahl innovativer Softwarelösungen in unterschiedlichen Reifegraden entwickelt:

- **Intermodal Recommender:** Dieses von 4flow entwickelte Tool soll gezielt geeignete intermodale Transportrouten vorschlagen, indem es verschiedene Verkehrsträger – wie Bahn, Lkw und Binnenschiff – effizient miteinander verknüpft. Der *Intermodal Recommender* berücksichtigt dabei aktuelle Marktinformationen sowie spezifische Nutzeranforderungen, um die optimalen Routen hinsichtlich Kosten, Zeit und Nachhaltigkeit zu identifizieren.
- **Intermodal Map:** Diese interaktive Karte von 4flow bietet eine umfassende Visualisierung intermodaler Terminals in ganz Europa. Nutzende erhalten detaillierte Informationen zu jedem Terminal, darunter Betreiber, Adresse und – sofern verfügbar – Angaben zum Equipment. Zudem zeigt die Karte an, ob ein Terminal bi- oder trimodal ist, also Anbindungen an Lkw, Zug und/oder Binnenschiff bietet. Die Daten werden aus verschiedenen Quellen aggregiert und sowohl automatisiert als auch manuell aktualisiert. Ziel ist es, Transparenz über das intermodale Netzwerk zu schaffen und die Planung intermodaler Transporte zu erleichtern.
- **Terminal Finder:** Dieses von 4flow entwickelte Feature ermöglicht es, die nächstgelegenen intermodalen Terminals innerhalb eines individuell definierten Radius zu identifizieren. Dadurch wird die Planung intermodaler Transporte erleichtert, indem potenziell geeignete Terminals schnell auffindbar sind. Nutzende geben den Abfahrts- und Zielort ein und erhalten eine visuelle Darstellung passender Terminals, basierend auf den Daten der *Intermodal Map*, einschließlich bi- und trimodaler Anbindungen an Zug- und/oder Binnenschiffsverkehr.
- **Berechnungsmethodik für externe Kosten:** Seitens 4flow wurde eine neue Methodik zur Erfassung externer Kosten im intermodalen Transport entwickelt. Diese Kosten werden in sieben Kategorien unterteilt und können für Lkw, Zug und Binnenschiff berechnet werden. Die Methodik soll Unternehmen bei der Entscheidungsfindung in Bezug auf nachhaltige Transportalternativen unterstützen und erweitert die bereits im *Intermodal Recommender* integrierte Emissionsberechnung.
- **Interaktives Visualisierungstool zur Optimierung intermodaler Transporte:** Basierend auf den Erkenntnissen der bei 4flow geschriebenen Masterarbeit von Chiara Harms, können Anwendende in einem vordefinierten Setup ihre optimale Route planen – abhängig von Präferenzen wie Kosten, Nachhaltigkeit, Resilienz und Durchlaufzeit. Die Visualisierung spielt hierbei eine zentrale Rolle, um fundierte Entscheidungen zu ermöglichen. Zudem werden alternative Routen vorgeschlagen, um verschiedene Optionen gegenüberzustellen und die beste Wahl zu treffen.
- Das an der KLU entwickelte **Lebensmittel-Hypernetzwerk** bietet eine umfassende Analyse der Lebensmittelversorgung in Deutschland und macht Versorgungswege sowie potenzielle Engpässe transparent. Durch die Kombination empirischer Daten mit Modellierungen ermöglicht es eine präzise Betrachtung der gesamten Lieferkette – aktuell vom Lager bis zum Endverbraucher. Die detaillierte Abbildung der letzten Stufe vom Einzelhändler zum Konsumenten ist besonders innovativ. Das Konzept kann zukünftig um vorgelagerte Lieferkettenstufen erweitert werden. Zielgruppen sind staatliche Behörden und Institutionen,

die für Lebensmittelsicherheit, Krisenmanagement und Versorgungssicherheit verantwortlich sind.

- Eine an der KLU durchgeführte Studie analysiert die Auswirkungen von Störungen in Angebot und Nachfrage auf Lieferkettenprozesse am Beispiel von COVID-19. Durch die Nutzung detaillierter globaler Echtzeiten konnten Unterbrechungen in verschiedenen Branchen zeitlich präzise untersucht werden. Die innovative Methodologie stammt aus der Handelsforschung und ermöglicht neue mikroökonomische Einblicke. Das Projekt befindet sich in der finalen Entwicklungsphase und wird zur wissenschaftlichen Veröffentlichung vorbereitet. Zielgruppen sind Entscheidungsträger, Logistikdienstleister und Unternehmen mit physischer Produktion.
- **NLP-Based Match Finding of Logistics Service Providers:** Die vom automatisierte Analyse von Verlager-Logistikdienstleister-Kooperationen ermöglicht die Umwandlung unstrukturierter Daten in eine strukturierte Form mithilfe von Transformermodellen. Dadurch lassen sich Beziehungen im Logistikmarkt identifizieren sowie Übersetzungen und Question-Answering-Anwendungen für spezifische Verlager-Logistikdienstleister-Paare realisieren. Die Innovation liegt in der automatisierten Erkennung relevanter Zusammenhänge im Logistiksektor. Der aktuelle Entwicklungsstand befindet sich auf der Proof-of-Concept-Stufe (PoC).
- **Smart Optimizer for Drayage Transportation (SODT):** Die Effizienz des intermodalen Güterverkehrs hängt maßgeblich von der Optimierung der Transportprozesse ab, insbesondere der Vor- und Nachläufe, die einen erheblichen Kostenanteil ausmachen. Der am DLR entwickelte "Smart Optimizer for Drayage Transportation" nutzt Reinforcement Learning (RL), um die dynamische Verteilung von Lkw in intermodalen Netzwerken zu optimieren. Der RL-Agent übernimmt die automatisierte Disposition und ermöglicht eine schnelle, datenbasierte Entscheidung zur Lkw-Zuweisung basierend auf Nachfrage und Ankunftszeitprognosen. Die Hauptinnovation liegt in der Anwendung von Deep Learning zur Optimierung komplexer logistischer Prozesse. Der Entwicklungsstand befindet sich auf TRL 3-4, mit ersten erfolgreichen Tests in einer Simulationsumgebung und einer geplanten Publikation der Ergebnisse im Jahr 2025. Potenzielle Kunden sind Verlager, Logistikbetreiber sowie 3PL- und 4PL-Dienstleister.
- Das **KLU Teaching Tool** ist ein interaktives Planungstool zur Ausbildung von Studierenden im Bereich intermodaler Lieferketten. Es ermöglicht die Simulation verschiedener Transportoptionen anhand von Parametern wie Zeit, Puffer und CO₂-Ausstoß. Der Prototyp wurde in Zusammenarbeit mit der Kühne Logistics University (KLU) entwickelt und ist bereits einsatzbereit (TRL 7-8). Zielgruppen sind Universitäten, Fachhochschulen und Unternehmen mit Schulungsbedarf. Die Entwicklung erfolgte durch Ubilabs mit Unterstützung der KLU und 4PL Intermodal.
- Der **Hypernetwork Explorer** ist ein Tool zur Visualisierung und Analyse intermodaler Transportnetzwerke. Es stellt logistische Knotenpunkte und Transportverbindungen über Straße, Schiene und Wasserwege dar und ermöglicht eine datenbasierte Bewertung nach Effizienz, Kosten und Nachhaltigkeit. Die Entwicklung wurde aufgrund technischer Herausforderungen pausiert, bietet aber ein solides Fundament für zukünftige Weiterentwicklungen. Potenzielle Nutzer sind Logistikunternehmen, Verkehrsbehörden und Forschungseinrichtungen. Die Entwicklung erfolgte durch Ubilabs mit Unterstützung der HEGEL-Partner.
- Das **Operative Transport Planning Tool** ist eine Softwarelösung für das Management intermodaler Transporte. Es nutzt Echtzeitdaten aus Quellen wie Google Flood Hub und CAP APIs, um Routen zu optimieren, proaktive Umplanungen zu ermöglichen und die Resilienz im Transportmanagement zu erhöhen. Derzeit befindet sich das Tool im Prototypstadium (TRL 4-5) mit ersten integrierten Datenquellen und geplanten Tests. Zielgruppen sind Logistikunternehmen, Transportknotenbetreiber und 4PL-Dienstleister. Die Entwicklung erfolgt durch Ubilabs in Zusammenarbeit mit Datenlieferanten und Logistikpartnern.

- Die **Universal Freight Network Specification (UFNS)** ist ein Softwarekonzept zur standardisierten Vernetzung von Fracht- und Logistikdaten. Sie ermöglicht eine nahtlose Kommunikation zwischen Akteuren der Lieferkette und verbessert Effizienz sowie Transparenz im Transportsektor. Aktuell befindet sich die UFNS im Prototypstadium (TRL 4-5) mit ersten getesteten Spezifikationen und Schnittstellen. Zielgruppen sind Logistikunternehmen, Spediteure und Normierungsorganisationen, die an einer einheitlichen Standardisierung interessiert sind. Die Entwicklung erfolgt durch Ubilabs mit Unterstützung der HEGEL-Partner.
- Die **UFNS Suite** ist eine Softwarelösung zur Planung und Analyse von Transportnetzwerken, die auf dem UFNS-Standard basiert. Sie ermöglicht die Erstellung und Visualisierung von Netzwerken, unterstützt vergleichende Analysen und optimiert Transportprozesse. Zum Zeitpunkt des Projektendes befand sich die Suite in der Konzeptions- und frühen Entwicklungsphase (TRL 3-4), mit ersten Prototypen zur Erprobung. Die Hauptzielgruppe sind Logistikunternehmen, Forschungsinstitute und Beratungsfirmen, die datenbasierte Optimierungen anstreben. Die Entwicklung erfolgte in Zusammenarbeit mit Ubilabs und 4flow, um praxisnahe Lösungen zu gewährleisten.

ii. *Konzeption von Daten-Pipelines zur Verarbeitung großer Datenmengen aus den logistischen Netzwerken*

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde die UFNS Suite als Ersatz für das ursprünglich geplante Konzept einer skalierbaren Daten-Pipeline entwickelt. Hauptverantwortlich war Ubilabs, das eng mit der KLU und dem IIS zusammenarbeitete, um eine flexible und anwendungsorientierte Lösung zur Datenverwaltung und Visualisierung zu schaffen.

Die UFNS Suite ersetzt das Konzept der Daten-Pipeline, da sich im Projektverlauf herausgestellt hat, dass keine standardisierten Schnittstellen (APIs) für den Zugriff auf große Datenmengen aus logistischen Netzwerken existieren. Zudem gibt es keine einheitlichen, häufig verwendeten Datentypen zur Beschreibung logistischer Netzwerke. Stattdessen wurde die Universal Freight Network Specification (UFNS) als einheitliches Datenformat entwickelt, in dem die gesammelten Daten gespeichert, kombiniert und visualisiert werden können.

Es flossen die Erfahrungen aus den vorherigen Potenzialstudien in die Arbeiten ein. Diese basieren auf konventionellen Datenquellen, darunter die in die Mobilithek hochgeladenen Datensätze sowie die Datenbank für intermodale Schienenverbindungen in Deutschland. Diese Daten wurden bereits für intermodale Studien genutzt. Da die Studien nicht kontinuierlich aktualisiert werden müssen, sondern für spezifische Analysen verwendet werden, wurde das Konzept einer Daten-Pipeline als nicht zielführend eingestuft. Stattdessen können die Studien mithilfe neuer Daten in anderen Kontexten reproduziert werden.

Das IIS bestätigte hierbei die Herausforderungen der automatisierten Datenakquise. Unternehmensinterviews zeigten, dass detaillierte operative Daten oft nicht offengelegt werden, was eine granulare, automatisierte Erfassung erschwert. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen von Ubilabs, weshalb die entwickelte UFNS als praktikable Alternative betrachtet wurde. Die von IIS erarbeiteten Inhalte flossen nach Möglichkeit in dieses Datenmodell ein. Durch die UFNS Suite wurde eine praxisnahe Lösung geschaffen, die es ermöglicht, heterogene logistische Daten zu strukturieren und für Analysen und Visualisierungen nutzbar zu machen. Sie bietet Unternehmen und Forschern ein leistungsfähiges Werkzeug zur besseren Abbildung multimodaler Transportnetzwerke.

iii. Verknüpfung und anwenderorientierte, interaktive Visualisierung der gesammelten Daten

Bereits im Jahr 2023 fanden wichtige Schritte, wie z.B. die Durchführung von Expertengesprächen, statt, um die spezifischen Anforderungen an die Entwicklung einer interaktiven Visualisierung zu klären. Der Prototyp des operativen Logistik-Tools von Ubilabs wurde speziell für die effiziente Abwicklung intermodaler Transporte entwickelt. Es integriert Datenquellen wie Google Flood Hub und Common Alerting Protocol (CAP) APIs, um eine optimierte Routenplanung zu ermöglichen. Zu den Kernfunktionen gehören interaktive Routenoptionen mit detaillierten Statistiken, die Integration verschiedener Datenquellen sowie proaktive Umplanungsfunktionen, um auf Störungen zu reagieren. Das Tool kann Unternehmen dabei unterstützen, zeitkritische Entscheidungen zu treffen und auf unerwartete Ereignisse zu reagieren, indem Echtzeitdaten zentral gesammelt und intelligent genutzt werden, um die Widerstandsfähigkeit und Reaktionsfähigkeit der Logistikbranche zu verbessern.

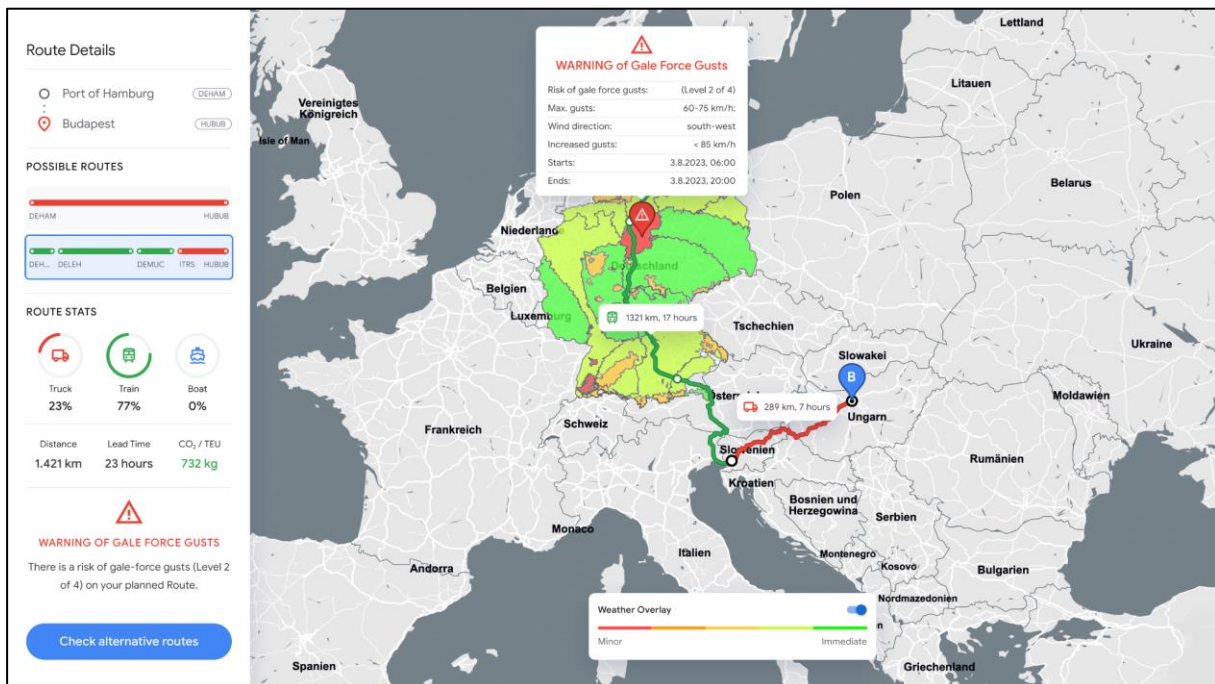


Abbildung 27: Konzept des interaktiven, operativen Logistik-Tools mit Echtzeitdaten und Integration verschiedener Datenquellen

Ebenfalls im ersten Projektjahr wurde der "Hypernetwork Explorer" entwickelt, um Daten verschiedener Akteure und Verkehrsträger vergleichbar und gemeinsam auswertbar zu machen. Kern des Konzeptes ist die Universal Freight Network Specification (UFNS), die verkehrsträgerübergreifend Fahrplandaten abbilden kann. In Anlehnung an die General Transit Feed Specification (GTFS) von Google soll die UFNS die Nutzung intermodaler Netzwerke benutzerfreundlicher und zugänglicher machen. Erkenntnisse im weiteren Verlauf des Projekts führten jedoch dazu, die Idee des Hypernetwork Explorers zu verwerfen und stattdessen eine passendere Lösung in Form der UFNS Suite zu entwickeln.

Die für das Projekt entwickelte UFNS Suite basiert auf der Universal Freight Network Specification (UFNS), die den standardisierten Austausch komplexer Transportverbindungen zwischen Akteuren der Logistikbranche ermöglicht. Ziel ist es, isolierte Datenquellen zusammenzuführen und eine einheitliche Grundlage für die Analyse multimodaler Transportketten bereitzustellen. Die Suite umfasst zwei Hauptkomponenten:

- **UFNS-Editor:** Eine intuitive Webanwendung zur Erstellung und Bearbeitung von Transportnetzwerken. Hier lassen sich Terminals und Verbindungen visuell darstellen, Eigenschaften anpassen und Netzwerke exportieren.
- **UFNS-Analyzer:** Ein Analysetool zur Identifikation von Engpässen, Kostenstrukturen und Nachhaltigkeitsaspekten. Es bietet farbcodierte Darstellungen, interaktive Netzwerkvergleiche und Risikobewertungen.

Die Visualisierung intermodaler Transportangebote wurde in enger Abstimmung mit dem Partner 4flow umgesetzt, der relevante Daten zu Zug- und Binnenschiffsverbindungen bereitstellte. Diese wurden ins UFNS-Format überführt und in einer interaktiven Karte dargestellt. Das IIS unterstützte die Analyse von Stückgutverkehren und untersuchte Möglichkeiten zur automatisierten Zuordnung von Unternehmensverflechtungen. Es zeigte sich, dass detaillierte Kundenbeziehungen in der Praxis oft nicht transparent kommuniziert werden, was die automatisierte Erfassung erschwerte. Alternativ wurde ein vielversprechender Ansatz im kombinierten Verkehr identifiziert, bei dem Bewegungsdaten zur Analyse der Nutzung intermodaler Angebote genutzt werden könnten.

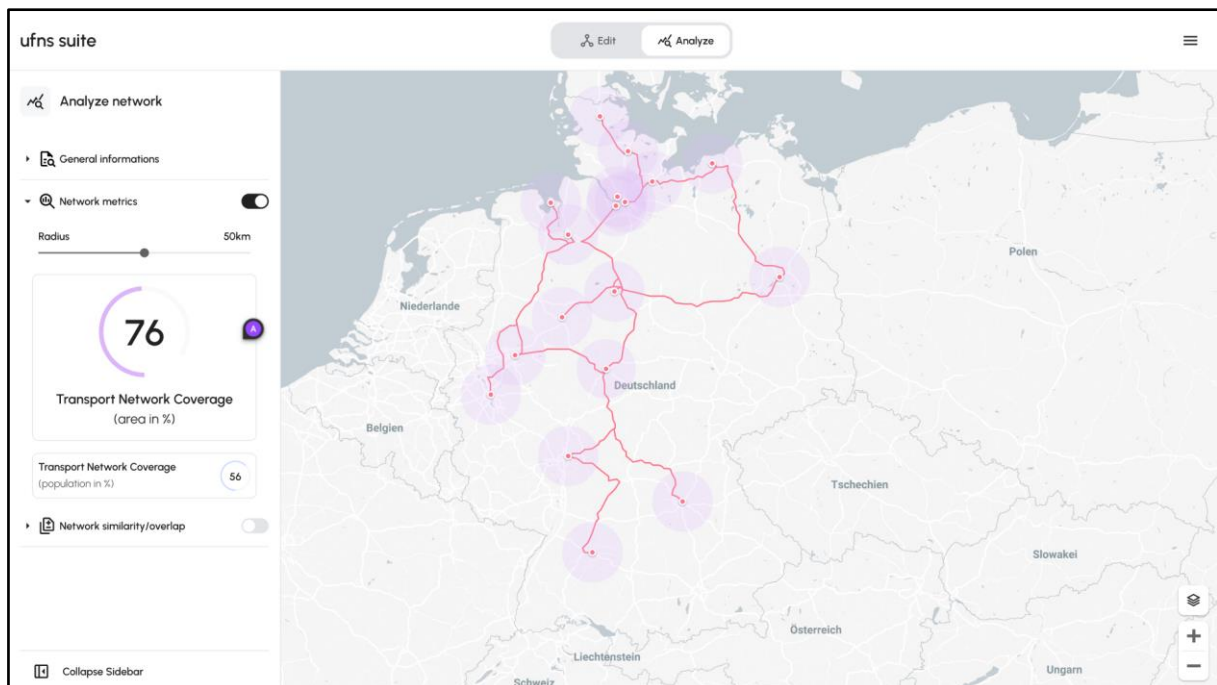


Abbildung 28: Interaktive Analyse der Abdeckung Deutschlands durch logistische Knotenpunkte in der UFNS Suite (Link: <https://ufns.ubilabs.dev/>)

4. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für die Entwicklung und Implementierung der Modelle wurde bei allen Projektpartner entsprechendes Personal (Wissenschaftliche Mitarbeiter, Entwickler, etc.) benötigt, was den wichtigsten Position im zahlenmäßigen Nachweis entspricht. Darüber hinaus umfassen wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises Kosten für die Dienstreisen im Inland und Ausland (für Konferenzen), Kosten für akquirierte Daten sowie Kosten für die durchgeführten Projekttreffen und Workshops.

5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Forschung im Projekt hat vielfältige Ergebnisse generiert. Es wurde deutlich, wie sehr Hypernetzwerke und intermodale Transporte, in der Theorie wie in der Praxis, auf die Transparenz der Märkte angewiesen sind – aber auch, wie gering die Transport im europäischen Raum aktuell noch ist. Durch die Arbeiten im Projekt wurden hierzu der Öffentlichkeit (siehe Mobilithek) genauere Daten zur Verfügung gestellt, als es bisher der Fall war. Laut unserer Kenntnis gibt es bereits erste wissenschaftliche Arbeiten, die diese Informationen dankend verwenden und dadurch genauere und bessere Ergebnisse erzeugen können.

Es wurden trotz dieser Hürden wichtige Erkenntnisse, theoretischer sowie praktischer Natur, erarbeitet. So wurden Fortschritte im Verständnis der Logistikmärkte gemacht und neue Modelle logistischer Hypernetzwerke entwickelt und mit KI-Ansätzen verknüpft. Ferner wurden Fallstudien durchgeführt, welche die Potenziale von intermodalen Transporten unterstreichen und eine Reihe an innovativen Dienstleistung konzipiert. Grundlage für alle diese Arbeiten waren das Domänen-Wissen und das Verständnis des intermodalen Markts, sowohl auf Angebots- als auch auf Nachfrageseite, welches die Projektpartner im Rahmen des Projekts erarbeitet haben.

Der Weg zur gemeinsamen Ableitung der innovativen Dienstleistungs-Konzepte war von intensiven und konstruktiven Diskussionen sowie einem kontinuierlichen Austausch zwischen Theorie und Praxis gekennzeichnet. Die zugewendeten Mittel wurden vollumfänglich zur Zielerreichung eingesetzt.

6. Fortschreibung des Verwertungsplans

Der unmittelbare und mittelbare Nutzen, der aus den dargestellten Projektergebnissen resultiert, sind sowohl die wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse als auch die wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit für andere Projekte nach Projektende. Die Basis für eine fortlaufende Verwertung bilden die Berichte, Publikationen und bereitgestellten Datensätze, die aus dem Projekt hervorgingen.

Der allgemeine in HEGEL verfolgte Ansatz konzentrierte sich in einem ersten Schritt auf eine nationale Sichtweise, wurde jedoch im Laufe des Projekts auf Grund von entsprechenden Erkenntnissen auf die europäische Ebene ausgeweitet. Hieraus ergibt sich dennoch Potenzial zum Weiterdenken und eine Möglichkeit der Übertragung der Ansätze auf weitere Regionen sowie eine Erweiterung der betrachteten Transportmodi auf z.B. die Seefracht. Ein zentraler Anknüpfungspunkt für die weiterführende wirtschaftliche Verwertung sind ferner die im abschließenden Arbeitspaket entworfenen Ansätze und Konzepte für innovative Dienstleistungen.

7. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Im gesamten Projekt wurde die wissenschaftliche Publikation der Projektergebnisse sowie die Verbreitung der Erkenntnisse im Rahmen wissenschaftlicher Konferenzen und in der Lehre kontinuierlich durch alle Projektpartner vorangetrieben. Eine Übersicht der Publikationen findet sich in Tabelle 3 (Stand Mai 2025). Eine Auflistung der im Projekt angefertigten Abschlussarbeiten erfolgt in Tabelle 4.

Tabelle 3: Andere Veröffentlichungen

Titel	Autoren	Jahr	Journal/Konferenz	Link	Status
Structured Literature Review of Transport Networks and Supply Chain Resilience	Johannes Gast, Evelina Kirkach	2022	Hamburg International Conference of Logistics	1	veröffentlicht
An Approach to Analyze the Intermodal Rail Transport Market in Germany	Gijs Kool, Hanno Friedrich	2023	International Scientific Symposium on Logistics, Dresden	2	veröffentlicht
Analysis of the European intermodal rail freight market	Gijs Kool, Hanno Friedrich	2023	European Transport Conference	3	veröffentlicht
Advanced Optimization in Intermodal Transport: A Roadmap for Integrated Optimization of Intermodal Logistics Networks	Elija Deineko	2023	Euro Working Group on Transportation	4	veröffentlicht
<i>The Intermodal Case</i>	Hanno Friedrich, Gjis Kool	2023	Kühne Logistics University	5	veröffentlicht
Learning-Based Optimisation for Integrated Problems in Intermodal Freight Transport: Preliminaries, Strategies, and State of the Art	Elija Deineko, Paul Jungnickel, Carina Kehrt	2024	Applied Sciences	6	veröffentlicht
The Dynamic Impact of the COVID-19 Pandemic on Global Supply Chains: Evidence from Granular Shipping Data	Anatolii Borisov	2025	Transportation Research Part E		Im Review-Prozess
A Neural Optimization Approach for Time-Constrained Vehicle Routing Problems with Finite Vehicle Fleet and Multiple Objectives	Stephan Olbrich, Elija Deineko, Tilman Matteis	2025	13th Symposium of the European Association for Research in Transportation		Im Review-Prozess
Modeling Commercial Vehicle Tours in Tabular Form using Generative Neural Networks	Stephan Olbrich, Elija Deineko, Tilman Matteis	2025	EURO Working Group on Transportation Conference 2025		Im Review-Prozess

Tabelle 44: Abschlussarbeiten

Titel	Projektpartner
Evaluating quantification methodologies for greenhouse gas emissions arising from transport chain operations in the context of multilayer transport networks	4flow – KLU
Analysis of transport demand and supply for intermodal rail transportation	KLU
Konzeption und Entwicklung einer interaktiven Visualisierung als Grundlage zur Optimierung intermodaler Transporte	4flow
ETA prediction for intermodal transport	4PL intermodal – KLU
Container choice in intermodal transport	KLU
Logistics software ecosystem	KLU
Demand estimation for intermodal connections & potential connections	KLU
Specialization of groupage networks in Germany	KLU
The impact of low water levels on inland waterway transport using ship location data	4flow – KLU
Location Optimization for Freight Transport Hypernetworks	DLR
Implementing Company-Level External Cost Calculation. A Case Study of Real-World Company Routes	4flow – KLU
A Comprehensive Analysis of Capacity Shortages in Maritime Transport for the Automotive Industry	KLU
Präskriptive Analyse der Umschlagsprozesse im kombinierten Verkehr zur Förderung einer nachhaltigen Verkehrsverlagerung	DLR

Literaturverzeichnis

Albert, R., & Barabási, A. L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of modern physics*, 74(1), 47.

- Aleta, A. & Moreno, Y. (2018). Multilayer Networks in a Nutshell. *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.*, 10:45-62 (2019). <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-031218-013259>
- Angeloudis, P., Bichou, K., & Bell, M. G. (2013). Security and reliability of the liner container-shipping network: analysis of robustness using a complex network framework. In *Risk Management in Port Operations, Logistics and Supply Chain Security* (pp. 129-140). Informa Law from Routledge.
- Balster, A., & Friedrich, H. (2019). Dynamic freight flow modelling for risk evaluation in food supply. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 121, 4–22. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.03.002>
- Boccaletti, S., Bianconi, G., Criado, R., Del Genio, C. I., Gómez-Gardenes, J., Romance, M., ... & Zanin, M. (2014). The structure and dynamics of multilayer networks. *Physics reports*, 544(1), 1-122.
- Boccaletti, S., Almendral, J.A., Guan, S., Leyva, I., Liu, Z., Sendiña-Nadal, I., Wang, Z., Zou, Y. (2016). Explosive transitions in complex networks' structure and dynamics: Percolation and synchronization. *Physics Reports*, 660(1), 1-94. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2016.10.004>
- Cardillo, Alessio, Massimiliano Zanin, Jesús Gómez-Gardeñes, Miguel Romance, Alejandro García del Amo, und Stefano Boccaletti. (2013). Modeling the Multi-layer Nature of the European Air Transport Network: Resilience and Passengers Re-scheduling under random failures. *Eur. Phys. J. Special Topics* 215, 23-33 ,.
- Statistisches Bundesamt. (2024). Gitterzellenbasierte Ergebnisse des Zensus 2022. <https://www.zensus2022.de/DE/Ergebnisse-des-Zensus/gitterzellen.html>
- Cheung, K. F., Bell, M. G., Pan, J. J., & Perera, S. (2020). An eigenvector centrality analysis of world container ship-ping network connectivity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 140, 101991.
- Cozzo, E., de Arruda, G. F., Rodrigues, F. A., & Moreno, Y. (2016). Multilayer networks: metrics and spectral proper-ties. *Interconnected networks*, 17-35.
- Defryn, C. & Sörensen, K. (2018). Multi-objective optimisation models for the travelling salesman problem with horizontal cooperation. *European Journal of Operational Research*, 267(3), 891-903. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.12.028>.
- Ducruet, C. & Lugo, I. (2013). Cities and Transport Networks in Shipping and Logistics Research. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 29(2), 145-166. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2013.08.002>.
- Ducruet, C. (2017). Multilayer dynamics of complex spatial networks: The case of global maritime flows (1977–2008). *Journal of Transport Geography*, 60, 47-58.
- Franklin, J. R., Dong, C. (2020). From the Digital Internet to the Physical Internet: A Conceptual Framework with a Stylized Network Model. *Journal of Business Logistics*, 42 (1): 108-119. <https://doi.org/10.1111/jbl.12253>
- Hecht M., Liedtke G., (2020). CO2-Minderung im Güterverkehr durch deutlichen Modal Shift. Bericht Nr.23/2020. TU Berlin.
- Horni, A., Nagel, K., Axhausen, K.W. (Eds.), 2016. *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. Ubiquity, London. doi:10.5334/baw.
- Jouida, S.B., Guajardo, M., Klibi, W., Krichen, S. (2021). Profit maximizing coalitions with shared capacities in distribution networks. *European Journal of Operational Research*, 288(2), 480-495. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.06.005>.

Kaluza, P., Kölzsch, A., Gastner, M. T., & Blasius, B. (2010). The complex network of global cargo ship move-ments. *Journal of the Royal Society Interface*, 7(48), 1093-1103.

Kansky, K. J. (1963). Structure of transportation networks: relationships between network geometry and regional characteristics (Doctoral dissertation, The University of Chicago).<https://www.opt.math.tugraz.at/~cela/Vorlesungen/ProSem11-12/Emser.pdf> Zugriffen am 26.06.2022

Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz vom 16. Juli 2021 (BGBl. I S. 2959), 1 (2023).

Meng, L., Ye, Z., Zhao, H., Yang, Y., Ma, F. (2021). Hypernetwork Model Based on Logistic Regression. In: , et al. *Big Data. BigData 2020. Communications in Computer and Information Science*, vol 1320. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0705-9_14

Montreuil, B. (2011). Toward a Physical Internet: meeting the global logistics sustainability grand challenge. *Logist. Res.* 3, 71–87. <https://doi.org/10.1007/s12159-011-0045-x>

Nielsen—TradeDimensions—Geschäfte. (2024).
<https://www.tradedimensions.de/adresskauf/geschaefte.html>

Papert, M., Pflaum, A. (2017). Development of an Ecosystem Model for the Realization of Internet of Things (IoT) Services in Supply Chain Management. *Electron Markets* 27, 175–189.
<https://doi.org/10.1007/s12525-017-0251-8>

Park, H., Park, D., Jeong I.-J. (2016). An effects analysis of logistics collaboration in last-mile networks for CEP delivery services. *Transport Policy*, 50, 115-125.
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.05.009>.

Pastor-Satorras, R., Rubi, M., & Diaz-Guilera, A. (Eds.). (2003). *Statistical mechanics of complex networks*, 625. Springer Science & Business Media.

Qian, C., Liu, Y., Barnett-Neefs, C., Salgia, S., Serbetci, O., Adalja, A., Acharya, J., Zhao, Q., Ivanek, R., & Wiedmann, M. (2023). A perspective on data sharing in digital food safety systems. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(33), 12513–12529.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2103086>

Solá, L., Romance, M., Criado, R., Flores, J., García del Amo, A., & Boccaletti, S. (2013). Eigenvector centrality of nodes in multiplex networks. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 23(3), 033131.

Statistisches Bundesamt. (2024). Gitterzellenbasierte Ergebnisse des Zensus 2022.
<https://www.zensus2022.de/DE/Ergebnisse-des-Zensus/gitterzellen.html>

Su, Y., Qin, J., Yang, P., & Jiang, Q. (2019). A supply chain-logistics super-network equilibrium model for urban logistics facility network optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019.

Tang, L. C., Low, J. M., & Lam, S. W. (2011). Understanding port choice behavior—a network perspective. *Networks and Spatial Economics*, 11, 65-82.

Tavasszy, L. & Friedrich, H. (2019). Supply chain elements in freight transport modelling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 121, 1-3.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.11.009>

- Tavasszy, L. A., Ruijgrok, K., & Davydenko, I. (2012). Incorporating Logistics in Freight Transport Demand Models: State-of-the-Art and Research Opportunities. *Transport Reviews*, 32(2), 203–219. <https://doi.org/10.1080/01441647.2011.644640>
- Thümler, J., (2025) Präskriptive Analyse der Umschlagsprozesse im kombinierten Verkehr zur Förderung einer nachhaltigen Verkehrsverlagerung, Masterarbeit, Berliner Hochschule für Technik
- Tinoco, S.V.P., Creemers, S., Boute, R.N. (2017). Collaborative shipping under different cost-sharing agreements. *European Journal of Operational Research*, 263(3), 827-837, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.05.013>.
- Tocchi, D., Sys, C., Papola, A., Tinessa, F., Simonelli, F., & Marzano, V. (2022). Hypergraph-based centrality metrics for maritime container service networks: A worldwide application. *Journal of Transport Geography*, 98, 103225.
- Vidal, G. H., Coronado-Hernández, J. R., & Minnaard, C. (2022). Measuring manufacturing system complexity: A literature review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-24.
- Waclaw, B. (2007). Statistical mechanics of complex networks. arXiv preprint arXiv:0704.3702.
- Wang, Y., & Cullinane, K. (2008). Measuring container port accessibility: An application of the Principal Eigenvector Method (PEM). *Maritime Economics & Logistics*, 10, 75-89.
- Xu, B., Wang, L., & Li, J. (2021). Propagation of Uncertain Events in Multilevel Handlings at Container Terminals from the Perspective of Hypernetwork. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2021, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2021/6611181>
- Zappa, Paola, und Alessandro Lomi. The Analysis of Multilevel Networks in Organizations: Models and Empirical Tests. *Organizational Research Methods*, 2015: 542-569.
- Zhang, K., Lin, X., & Li, M. (2022). Transformer-Based Reinforcement Learning for Pickup and Delivery Problems With Late Penalties. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(12), 24649-24661.
- Zhu, C. F., Zhang, Z. K., & Ma, C. X. (2017). Research on emergency logistics dynamic network based on super network. *Latin American Applied Research*, 47(1), 11-16