

## Projektabschlussbericht

### Projekt *LastMileTram RheinMain V*

| Projekt                                                                                                   |                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>LastMileTram RheinMain V (LMT V)</b>                                                                   |                                                                                                                     |
| <b><i>Operativer Probetrieb des multimodalen urbanen Logistikkonzepts der LastMileTram</i></b>            |                                                                                                                     |
| Gefördert von: <b>Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum</b> | Laufzeit: <b>01.01.2024 – 31.12.2024</b>                                                                            |
| Förderer-Nr.: <b>2695 0458 2024 0011</b>                                                                  | Gesamtkosten: <b>193.900,00 EUR</b>                                                                                 |
| Projektleitung                                                                                            |                                                                                                                     |
| Projektleitung                                                                                            | <b>Prof. Dr. Kai-Oliver Schocke, schocke@fra-uas.de</b><br><b>Benjamin Federmann, benjamin.federmann@fra-uas.de</b> |
| Institution:                                                                                              | <b>Frankfurt University of Applied Sciences – FRA UAS</b>                                                           |
| Autor:                                                                                                    | <b>Benjamin Federmann, FRA UAS</b>                                                                                  |



# Inhalt

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildungsverzeichnis .....                                                          | 4  |
| Tabellenverzeichnis .....                                                            | 5  |
| 1 Einleitung .....                                                                   | 6  |
| 2 Projektfortschritt .....                                                           | 10 |
| 2.1 Ursprüngliches Vorhaben .....                                                    | 10 |
| 2.1.1 Abschluss der Vorbereitungen – AP 1 .....                                      | 11 |
| 2.1.2 Vorbereitung der Tram (S-Wagen) – AP 2 .....                                   | 12 |
| 2.1.3 Sechsmonatiger Testbetrieb – AP 3 .....                                        | 14 |
| 2.1.4 Bearbeitung der Forschungsfragen – AP 4 .....                                  | 16 |
| 2.1.5 Projektmanagement und Kommunikation – AP 5 .....                               | 17 |
| 2.2 Chronologie des Projektverlaufs .....                                            | 19 |
| 2.3 Maßnahmenempfehlungen für einen möglichen Dauerbetrieb .....                     | 23 |
| 2.3.1 Definition der Prozesse .....                                                  | 23 |
| 2.3.1.1 Streckenplanung .....                                                        | 25 |
| 2.3.1.2 Ladungsträger und Beladung .....                                             | 31 |
| 2.3.1.3 Optimierung der Prozesskette und Übergabepunkte .....                        | 34 |
| 2.3.1.4 Haftungsrisiken .....                                                        | 36 |
| 2.3.1.5 Vertragsgestaltung und Versicherungsfragen .....                             | 36 |
| 2.3.1.6 „Dangerous Goods“ als besondere Herausforderung .....                        | 39 |
| 2.3.1.7 Einbeziehung weiterer Stakeholder .....                                      | 39 |
| 2.3.1.8 Dokumentation der Situation im Umfeld der Be- und Entladestellen .....       | 41 |
| 2.3.1.9 Dokumentation des provisorischen City Hubs für die Cargobikes .....          | 42 |
| 2.3.2 Projektpartner .....                                                           | 45 |
| 2.3.3 Herausforderungen und Ansätze für die Weiterentwicklung .....                  | 48 |
| 2.4 Umsetzung der Forschungsfragen .....                                             | 51 |
| 2.4.1 Absolutergebnisse des Probebetriebs und Kennzahlen des Projektabschnitts ..... | 57 |
| 2.4.1.1 Liefermengen und -daten „Amazon“ Lastenradtouren .....                       | 57 |
| 2.4.1.2 Beispielhafte Daten eines ONO-Lastenrads .....                               | 58 |
| 2.4.1.3 Prozessdaten der VGF Gütertram .....                                         | 59 |
| 2.4.1.4 Abgeleitete Ergebnisse aus den Realdaten .....                               | 60 |
| 2.4.2 Szenarienvergleich .....                                                       | 60 |
| 2.4.3 Bewertung der Wirtschaftlichkeit aus der Perspektive der FRA UAS .....         | 64 |
| 2.4.4 Sozioökologische Auswirkungen auf Beschäftigung und Teilhabe .....             | 65 |
| 2.4.5 Ganzheitliche ökologische Bewertung .....                                      | 67 |
| 2.4.6 Transferpotenziale für andere Städte .....                                     | 68 |

|       |                                                         |    |
|-------|---------------------------------------------------------|----|
| 2.4.7 | Digitalisierung und Technologieintegration.....         | 70 |
| 3     | Fazit und Ausblick aus der Perspektive der FRA UAS..... | 71 |

## Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1 – Ursprünglicher Streckplan der Cargotram der VGF für das Projekt LMT (Quelle: VGF) .....                                                                                                                                  | 10 |
| Abbildung 2 – Anordnung der Hartplastiktaschen im S-Wagen .....                                                                                                                                                                        | 12 |
| Abbildung 3 – Geplante Beklebung der Gütertram im neutralen Design .....                                                                                                                                                               | 13 |
| Abbildung 4 - VGF Gütertram des Typs P-Wagen.....                                                                                                                                                                                      | 20 |
| Abbildung 5 - Besuch des Ministers Gremmels (v.l.n.r. Danea Klimczyk, LMTV; Stadtrat Siefert, Stadt Frankfurt am Main; Prof. Dr. Schocke, FRA UAS; Prof. Dr. Rägler, FRA UAS; Minister Gremmels, HMWK) .....                           | 21 |
| Abbildung 6 - Besuch von Minister Mansoori der LastMileTram (v.l.n.r. Prof. Dr. Schocke, FRA UAS; Minister Mansoori, HMWEVW; Andre Lütgeharm, Amazon Logistics; Stadtrat Siefert, Stadt Frankfurt am Main; Kerstin Jerchel, VGF) ..... | 21 |
| Abbildung 7 – Lieferflussdiagramm (Lesbarkeit wird bei Detailabbildungen in der Folge erhöht).....                                                                                                                                     | 25 |
| Abbildung 8 – Lieferflussdiagramm-Legende .....                                                                                                                                                                                        | 25 |
| Abbildung 9 – Ausschnitt aus dem Lieferflussdiagramm: Amazon DHE 1 Raunheim .....                                                                                                                                                      | 26 |
| Abbildung 10 – Ausschnitt aus dem Lieferflussdiagramm: Tram-Station "Stadion" .....                                                                                                                                                    | 27 |
| Abbildung 11 – Ausschnitt aus dem Lieferflussdiagramm: Tram-Station "Zoo" .....                                                                                                                                                        | 28 |
| Abbildung 12 – Ausschnitt aus dem Lieferflussdiagramm: Tram-Station "Betriebshof Gutleut" .....                                                                                                                                        | 29 |
| Abbildung 13 – Ausschnitt aus dem Lieferflussdiagramm: Knotenpunkt an der FRA UAS.....                                                                                                                                                 | 29 |
| Abbildung 14 – Ausschnitt aus dem Lieferflussdiagramm: Abschluss des Zustellzyklus .....                                                                                                                                               | 30 |
| Abbildung 15 – Umladevorgang Gütertram zu Lastenrad .....                                                                                                                                                                              | 33 |
| Abbildung 16 – Knotenpunkt für die Lastenräder an der Tram-Station „Zoo“ .....                                                                                                                                                         | 35 |
| Abbildung 17 – Lastenrad im provisorischen Hub in der Tiefgarage.....                                                                                                                                                                  | 43 |
| Abbildung 18 – Schließfachsystem für Akkus im hinteren Bereich der Tiefgarage .....                                                                                                                                                    | 44 |
| Abbildung 19 – Blick in ein geöffnetes Schließfach mit entnehmbarer Batterieeinheit .....                                                                                                                                              | 44 |
| Abbildung 20 – Hauptakteure des Projekts LastMileTram RheinMain V .....                                                                                                                                                                | 45 |
| Abbildung 21 – Einstieg mit Stufen beim P-Wagen – logistischer Nachteil im Vergleich zum S- oder R-Wagen.....                                                                                                                          | 49 |
| Abbildung 22 - beispielhafte Befestigung der Transporttaschen und Oversize Packages in der VGF Gütertram.....                                                                                                                          | 52 |
| Abbildung 23 - Entfernte Sitzflächen der Sitzbänke im P-Wagen, Pakete nur testweise fixiert, keine finale Befestigung im Zusammenhang mit dem Transport .....                                                                          | 54 |
| Abbildung 24 – Beispielhafter Fahrtverlauf einer möglichen Route in der Frankfurter Innenstadt einer "ONO" mit Verlauf der Akkuladung (Abbildung zeigt bewusst keine operative Route, sondern eine Probetour) .....                    | 58 |

## Tabellenverzeichnis

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1 – Chronologie der Projektmeilensteine .....                                                      | 19 |
| Tabelle 2 - Tourdaten von Amazon Logistics für den Probebetrieb .....                                      | 57 |
| Tabelle 3 - Daten des Lastenrads "ONO" im Zusammenhang mit dem Probebetrieb .....                          | 58 |
| Tabelle 4 - Prozessdaten VGF Gütertram Woche 1 .....                                                       | 59 |
| Tabelle 5 - weitere Prozessdaten der VGF Gütertram .....                                                   | 59 |
| Tabelle 6 - Kilometerleistungen der Verkehrsträger der multimodalen Logistikkette des Projekts LMT V ..... | 60 |
| Tabelle 7 – Vergleich der Zustellvarianten.....                                                            | 64 |
| Tabelle 8 – Vergleich cargobikegestützter und konventioneller Logistiksysteme im sozialen Kontext.....     | 67 |

# 1 Einleitung

Die Kurier-, Express- und Paketdienst (KEP)-Branche in Deutschland verzeichnete nach einem pandemiebedingten Boom in den Jahren 2020 und 2021 eine Stabilisierung der Sendungsvolumina. Im Jahr 2023 wurden 4,18 Milliarden Sendungen transportiert, was einem Anstieg von 0,6 % gegenüber dem Vorjahr entspricht. Der Gesamtumsatz stieg um 2,2 % auf 26,5 Milliarden Euro. Langfristige Prognosen gehen von einem weiteren Wachstum aus, mit einem erwarteten Volumen von 4,96 Milliarden Sendungen bis 2028. Diese Entwicklung stellt Städte und die Politik vor die Herausforderung, die Anforderungen der KEP-Branche mit den Zielen urbaner Logistikkonzepte in Einklang zu bringen<sup>1</sup>.

Die KEP-Branche sah sich 2024 nicht nur mit einem weiterhin steigenden Paketvolumen konfrontiert, sondern auch mit Herausforderungen wie Fachkräftemangel, steigenden Betriebskosten durch Inflation sowie verstärktem Druck zur Erreichung von Klimazielen. Erste Schätzungen deuten darauf hin, dass das Paketvolumen in Deutschland bis Ende 2024 erneut um ca. 1 % zunehmen könnte. Der Marktführer DHL Group spricht sogar von 1,8 Milliarden Paketen, was einem Anstieg von ca. 4,7 % zum Vorjahre entsprechen würde<sup>2</sup>. Parallel dazu zwingt das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) mit einer Treibhausgasreduzierung um 65 % bis 2030 gegenüber 1990 die Branche, nachhaltige Lösungen wie die Elektrifizierung der Lieferketten stärker zu priorisieren.

Das Projekt LastMileTram RheinMain V zielte darauf ab, den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) als integralen Bestandteil urbaner Lieferketten zu nutzen und diesen mit elektrisch betriebenen Lastenrädern für die Auslieferung auf der letzten Meile zu kombinieren. Ziel war es, die ökologische und wirtschaftliche Machbarkeit dieses Ansatzes zu überprüfen, konkrete Handlungsempfehlungen für dessen Umsetzung abzuleiten und die Übertragbarkeit auf andere Städte zu evaluieren. Dieses Konzept bietet nicht nur eine Reduzierung von Emissionen und Verkehrsaufkommen, sondern auch eine Lösung für die steigenden Anforderungen an flexible und nachhaltige Logistikprozesse.

Die Motivation für das Projekt ergibt sich aus mehreren Aspekten. Der Bericht "Verkehrsentwicklung in Deutschland" des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) betont die Bedeutung alternativer Mobilitätskonzepte, da die Anzahl der Erwerbstätigen und die Verfügbarkeit konventioneller Ressourcen zur Energiegewinnung sinken<sup>3</sup>. Gleichzeitig verdeutlicht der "Global EV Outlook 2023" der International Energy Agency die Herausforderungen der Elektromobilität, wie begrenzte Reichweiten und die unzureichende Ladeinfrastruktur<sup>4</sup>. Neuere Daten aus 2024 zeigen jedoch auch, dass politische Maßnahmen wie das Förderprogramm „Klimafreundliche Logistik“ der Bundesregierung die Umsetzung

---

<sup>1</sup> BPEX-Studie 2024, bpex-ev.de, Abschnitt „Marktdaten und Prognosen“; <https://www.bpex-ev.de/presse/meldung/kep-studie-2024.html>

<sup>2</sup> Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/476935/umfrage/anzahl-der-befoerderten-pakete-durch-die-deutsche-post/>

<sup>3</sup> BMDV, Verkehrsentwicklung in Deutschland, S. 8; <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehrsentwicklung-in-deutschland.pdf>

<sup>4</sup> Global EV Outlook 2023, International Energy Agency, S. 16; <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>

solcher Konzepte fördern. Im urbanen Raum gewinnen batteriebetriebene Fahrzeuge, wie Lastenräder, zunehmend an Bedeutung, sind jedoch durch technische und infrastrukturelle Einschränkungen begrenzt<sup>5</sup>. Hier setzt das Konzept der Güterstraßenbahn an, da es eine effiziente und umweltfreundliche Lösung darstellt<sup>6</sup>.

Ein zentrales Ziel des Projekts war die Integration multimodaler Logistikprozesse, die auf bestehenden Infrastrukturen aufbauen. Die Verkehrsgesellschaft Frankfurt (VGF) stellte dabei speziell umgebaute Straßenbahnwagen zur Verfügung, um Pakete vom Rand der Stadt Frankfurt am Main in die Innenstadt zu transportieren. Diese wurden an zentralen Umschlagpunkten auf elektrische Lastenräder umgeladen. Dieser Ansatz in den Vorgängerprojekten LastMileTram I-IV theoretisch erarbeitet, simuliert und mit verschiedenen Varianten unter Laborbedingungen erprobt. Das aktuelle Projekt erweiterte die bisherigen Ansätze um die Integration digitaler Technologien und eine stärkere Einbindung privater Partner sowie um den entscheidenden Probetrieb unter Realbedingungen.

Die erwarteten Vorteile des Projektansatzes sind vielfältig:

- **Verlagerung des Verkehrsaufkommens** in Innenstädten: Durch die Verlagerung von Gütertransporten auf die Schiene und den Einsatz von Lastenrädern kann der motorisierte Individualverkehr in den Innenstädten reduziert werden. Dies führt zu einer Verbesserung der Luftqualität und einer Entlastung der städtischen Verkehrsinfrastruktur<sup>7</sup>.
- **Verringerung von Emissionen**: Die Nutzung des ÖPNV und von Lastenrädern trägt zur Senkung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und anderen Schadstoffen bei. Dies entspricht den Zielen des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG), das eine klimaneutrale Wirtschaft bis zum Jahr 2045 in der Bundesrepublik vorsieht.<sup>8</sup>.
- **Effizienzsteigerung**: Die Kombination von ÖPNV und Lastenrädern ermöglicht eine effizientere Auslastung der Verkehrsinfrastruktur und kann die Betriebskosten im Vergleich zu rein straßengebundenen Systemen potentiell senken.

Im Zentrum des Projekts stand ursprünglich ein Testbetrieb über sechs Monate von Februar bis Juli 2024. Aufgrund besonderer Herausforderungen, darunter eine Neujustierung des Logistikpartners sowie lange Verhandlungsphasen im Zusammenhang mit relevanten Verträgen und Versicherungen, wurde der Testbetrieb auf fünf Wochen im September und Oktober 2024 verkürzt. Dies war auch erforderlich, da für den eCommerce die Monate Oktober bis Dezember die volumenstärksten Monate im Jahr darstellen. Ein Abschluss vor dem Start dieser Phase war daher aus operativen Gründen

---

<sup>5</sup> Mobilitätsforum Bund: Lastenräder, Themenseite; <https://www.mobilitaetsforum.bund.de/DE/Themen/Lastenraeder/lastenraeder.html>

<sup>6</sup> Masterplan Mobilität, Stadt Frankfurt, S. 75ff.; <https://www.frankfurt.de/Masterplan-Mobilitaet>

<sup>7</sup> Mobilitätsforum Bund: Lastenräder, Themenseite; <https://www.mobilitaetsforum.bund.de/DE/Themen/Lastenraeder/lastenraeder.html>

<sup>8</sup> KSG, Bundesministerium für Justiz, § 4 Anlage 2; <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310020.html>

erforderlich. Trotz der reduzierten Laufzeit konnten wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, die die Grundlage für zukünftige Projekte bilden. Hervorzuheben ist hierbei die im Projekt festgestellte Notwendigkeit der Nutzung geeigneter zentraler urbaner Konsolidierungsknotenpunkte in Form von Multi-Use-City-Hubs. Während des Projektabschnitts V des seit 2018 andauernden Projekts LastMileTram konnte die Tiefgarage der Hochschule übergangsweise genutzt werden.

Die wissenschaftliche Begleitung des Projekts konzentrierte sich auf mehrere zentrale Forschungsfragen, die während des Projekts aufgrund veränderter Umstände teilweise verändert und erweitert worden sind:

1. Wie können geeignete Ladungsträger zum Bündeln der Sendungen, deren Transport zu ausgewählten Übergabepunkten im Tram-Netz der VGF sowie deren Weiternutzung im Zusammenhang mit der Lastenradlogistik aus operativer, nachhaltiger und ökonomischer Sicht optimal eingesetzt werden?
  - Erweitert um die Frage der Nachverfolgung von Sendungen mittels Datenübertragung.
2. Wie können die in LMT I–IV erarbeiteten Prozesse im Realbetrieb weiter optimiert werden?
  - Hier vor allem die Kernfragen zum Einsatz der verschiedenen Verkehrsträger.
3. Wie können die Ladungsträger sicher und effizient in der Straßenbahn befestigt werden?
4. Wie kann die Entladung der Ladungsträger an den Übergabepunkten operativ erfolgen?
5. Funktioniert die Lastenradbelieferung in den Zustellbezirken?
6. Wie wirtschaftlich ist die VGF Cargotram im Vergleich zur konventionellen Belieferung unter Berücksichtigung der Inflation und CO<sub>2</sub>-Steuer?
7. Wie können Spitzen und Schwankungen im Sendungsvolumen aufgefangen werden?
8. Wie lassen sich auch größere Sendungen („Sperrgut“) in der VGF Cargotram transportieren?

Die gewonnenen Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen tragen nicht nur zur Weiterentwicklung des Logistikkonzepts der Stadt Frankfurt am Main bei, sondern dienen auch als mögliche Blaupause für andere urbane Regionen, auch über die bundesdeutschen Grenzen hinaus. Besonders im Hinblick auf die Einbindung von Sperrgut und die Bewältigung von Schwankungen im Sendungsvolumen wurden wichtige praktische Erfahrungen gesammelt, die in künftige Projektabschnitte einfließen sollten. Seit Beginn des Projektabschnitts V ist das Interesse weiterer Forschungseinrichtungen und Unternehmen ungebrems groß und hält auch nach Abschluss der operativen Projektphase an.

Dieser Bericht dokumentiert den Projektverlauf, die erzielten Ergebnisse und die gewonnenen Erkenntnisse. Im weiteren Verlauf wird der Projektfortschritt im Detail dargestellt, die Vorbereitungen

für einen möglichen Dauerbetrieb erläutert und abschließend die zentralen Ergebnisse und der Ausblick auf zukünftige Entwicklungen zusammengefasst.

## 2 Projektfortschritt

Das Projekt LastMileTram RheinMain V war als Pilotversuch konzipiert, um die Integration von Straßenbahnen in den urbanen Lieferverkehr zu erproben. Aufbauend auf den Erfahrungen vorheriger Projektphasen sollte in einem sechsmonatigen Testbetrieb untersucht werden, ob eine Gütertram in Kombination mit Lastenrädern eine wirtschaftlich tragfähige und nachhaltige Alternative zur konventionellen Paketzustellung darstellt. In der ursprünglichen Konzeption des Projekts war ein anderer Logistikpartner vorgesehen. Noch vor Beginn des operativen Betriebs zog sich der ursprüngliche Logistikpartner jedoch aus strategischen Gründen zurück. Als Ersatzprojektspartner übernahm Amazon Logistics die Rolle des Hauptlogistikpartners im Projektabschnitt. Mit diesem Wechsel ging eine signifikante Umstrukturierung der operativen Planung einher.

### 2.1 Ursprüngliches Vorhaben

Der ursprüngliche Ablauf, welches operativ nicht umgesetzt werden konnte, sah vor, vorsortierte Pakete des ursprünglichen Logistikpartners in standardisierten Transporttaschen per E-Transporter zum Übergabepunkt an die Haltestelle „Hugo-Junkers-Straße“ zu befördern. Von dort sollten die Sendungen mit einer für den Gütertransport umgerüsteten Straßenbahn vom Typ „S-Wagen“ zu den innerstädtischen Umschlagpunkten befördert werden. Die Entladung der Pakete war an den Haltestellen „Messe“, „Lokalbahnhof“ und „Zoo“ vorgesehen, wo sie auf elektrische Lastenräder des Typs „ONOMOTION ONO“ verladen und für die letzte Meile an die Endkunden verteilt werden sollten.

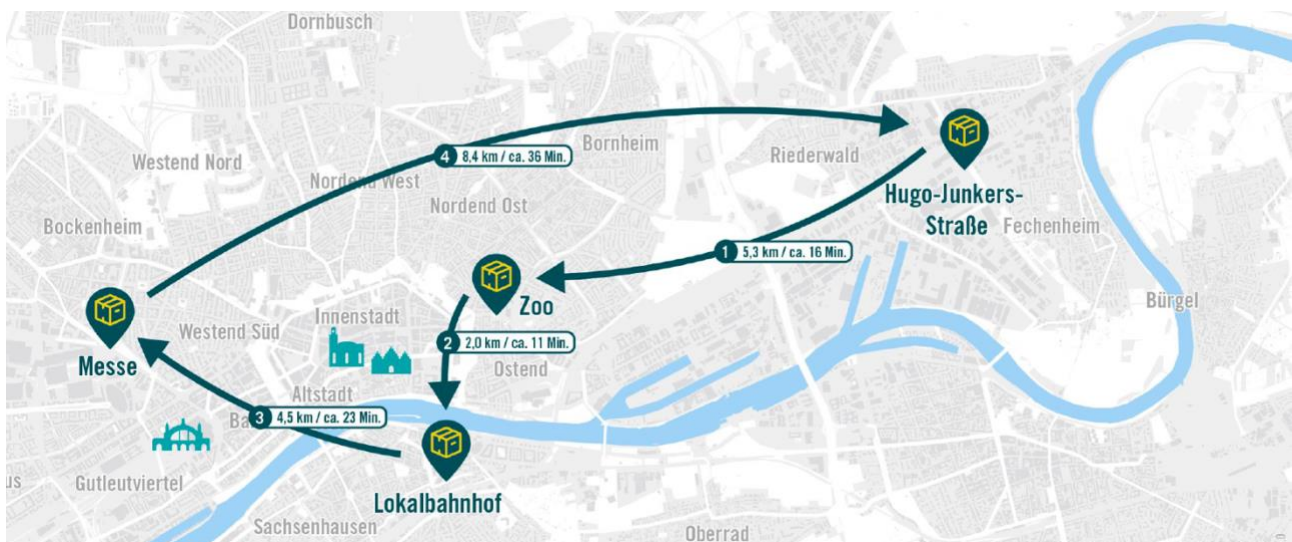


Abbildung 1 – Ursprünglicher Streckplan der Cargotram der VGF für das Projekt LMT (Quelle: VGF)

Zentrale ursprüngliche Projektpartner:

9. Frankfurt University of Applied Sciences (FRA-UAS): Wissenschaftliche Begleitung und Koordination des Projekts

10. Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main (VGF): Betrieb der Straßenbahn und infrastrukturelle Anpassungen
11. Ursprünglicher Logistikpartner: Organisation des logistischen Ablaufs, von der Vorsortierung der Sendungen bis zur geplanten Zustellung auf der letzten Meile

Die Finanzierung des Projekts wurde durch eine Fördermaßnahme des Hessische Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum abgesichert. Diese Mittel waren vorgesehen, um die wissenschaftliche Analyse und die praktische Umsetzung des geplanten Testbetriebs zu ermöglichen.

Das ursprüngliche Vorhaben wurde in folgende Arbeitspakete (AP) unterteilt:

### **2.1.1 Abschluss der Vorbereitungen – AP 1**

Die geplanten Vorbereitungen für den Testbetrieb umfassten umfangreiche Abstimmungen zwischen den Projektpartnern, um technische, betriebliche und rechtliche Rahmenbedingungen für die Umsetzung festzulegen. Dabei stand insbesondere die Entwicklung eines effizienten Umschlagprozesses im Vordergrund, der eine schnelle Be- und Entladung der Transporttaschen sowie eine reibungslose Integration der Straßenbahn in die bestehende Logistikstruktur gewährleisten sollte.

Für den operativen Ablauf sollten die Haltestellen und Haltezeiten definiert, die gesetzlichen Vorgaben geprüft und das Fahrzeug an den neuen Einsatzzweck angepasst werden. Die VGF war dafür vorgesehen, die Fahrplanerstellung zu übernehmen und die anzufahrenden Haltestellen festzulegen. Zudem sollte sichergestellt werden, dass die Tram außerhalb der geplanten Transporteinsätze weiterhin regulär im Personenverkehr eingesetzt werden kann, um eine möglichst wirtschaftliche Nutzung der vorhandenen Fahrzeugressourcen zu gewährleisten.

Um bis zu 70 Transporttaschen sicher zu befördern, sollte die Straßenbahn technisch angepasst werden. Vorgesehen war der Einsatz von Hartplastiktaschen mit Haltevorrichtungen, um eine sichere Verstaueung der Pakete während der Fahrt zu gewährleisten und die Umschlagzeiten an den Haltestellen zu optimieren.

Neben der technischen und logistischen Planung sollten auch vertragliche Regelungen getroffen werden. Dazu gehörte insbesondere die Klärung von Haftungsfragen, da die Tram ursprünglich für den Personentransport konzipiert war und für den geplanten Warentransport zusätzliche Genehmigungen eingeholt werden mussten, die letztlich auch erteilt worden sind. Die VGF sollte sicherstellen, dass alle betrieblichen Anpassungen den regulatorischen Anforderungen entsprechen und die notwendigen behördlichen Genehmigungen für die Nutzung der Haltestellen als Umschlagpunkte eingeholt werden.

Die rechtliche Verteilung der Verantwortlichkeiten wurde im Rahmen der Planung detailliert ausgearbeitet. Der ursprüngliche Logistikpartner sollte für die Organisation der Paketzustellung und den Transport zu den Übergabepunkten verantwortlich sein, während die VGF den Betrieb der Straßenbahn sicherstellen würde. Um betriebliche Risiken und finanzielle Verpflichtungen klar zu regeln, sollten entsprechende Transportverträge zwischen den beteiligten Akteuren ausgearbeitet werden.

Zusätzlich zu den internen Abstimmungen der Projektpartner war die enge Zusammenarbeit mit den städtischen und landesspezifischen Behörden erforderlich. Die Nutzung öffentlicher Haltestellen als Umschlagpunkte hat Sondergenehmigungen erfordert, wobei gleichzeitig sichergestellt werden musste, dass der Innenstadtverkehr sowie der generelle Zweck der VGF im Bereich des ÖPNV nicht durch den geplanten Betrieb der Gütertram beeinträchtigt wird. Gespräche mit der Stadt Frankfurt und den zuständigen Behörden waren vorgesehen, um notwendige infrastrukturelle Anpassungen zu klären und die langfristige Einbindung des Projekts in die städtische Logistikstrategie zu bewerten. Zudem wurden bei der Stadt Frankfurt am Main im Straßenverkehrsamt Sonderparkzonen im Bereich der Tram-Station „Hugo-Junckers-Straße“ beantragt und bewilligt. Diese sollten sicherstellen, dass ein reibungsloser Betrieb unter Einbeziehung der E-Transporter und dem Be- und Entladen des selbigen möglich ist.

### 2.1.2 Vorbereitung der Tram (S-Wagen) – AP 2

Für den geplanten Testbetrieb war vorgesehen, einen S-Wagen der VGF für den Gütertransport umzurüsten. Damit die Straßenbahn für diese Nutzung geeignet war, sollten umfangreiche Modifikationen vorgenommen werden. Diese betrafen sowohl die Innenraumgestaltung zur Aufnahme der Transporttaschen als auch technische Maßnahmen zur Ladungssicherung sowie betriebliche Vorkehrungen, um einen flexiblen Wechsel zwischen Personen- und Güterverkehr zu ermöglichen.

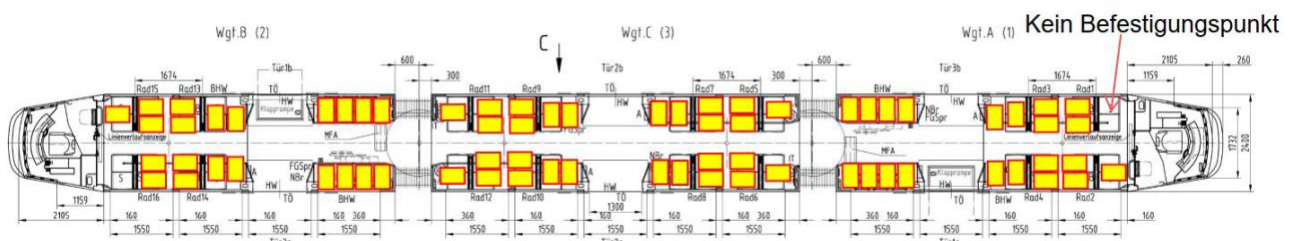


Abbildung 2 – Anordnung der Hartplastiktaschen im S-Wagen

Die geplante Fahrzeugmodifikation sah vor, dass der Innenraum des S-Wagens so umgestaltet wird, dass bis zu 70 Transporttaschen sicher transportiert werden können. Hierfür war vorgesehen, Sitzplätze zu entfernen und stattdessen spezielle Befestigungssysteme zu integrieren, um ein Verrutschen der Ladung während der Fahrt zu verhindern.

Die Transporttaschen sollten aus Hartplastik mit gesicherten Haltevorrichtungen bestehen, um eine schnelle Entnahme an den Haltestellen zu ermöglichen. Gleichzeitig mussten die Haltevorrichtungen so konzipiert sein, dass sie eine zügige Entladung an den Umschlagpunkten ermöglichen und den Gesamtprozess beschleunigen.

### Geplantes Design und Sichtbarkeit der Gütertram

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Vorbereitung der Tram war die Beklebung des Fahrzeugs. In Abstimmung mit der Frankfurt University of Applied Sciences (FRA-UAS) und den weiteren Projektpartnern wurde festgelegt, dass die Tram kein werbliches Design eines einzelnen Unternehmens erhalten sollte. Stattdessen war ein neutrales Erscheinungsbild geplant, das den Pilotcharakter des Projekts hervorheben sollte.

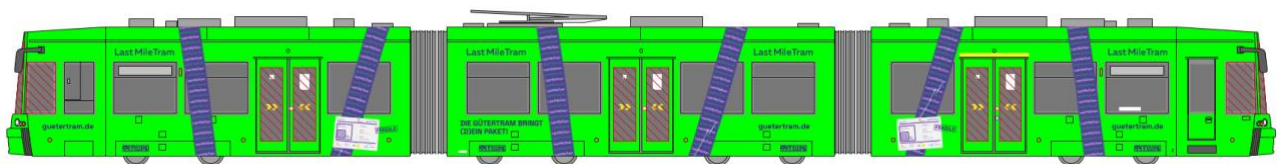


Abbildung 3 – Geplante Beklebung der Gütertram im neutralen Design

### Betriebliche Rahmenbedingungen und Backup-Fahrzeug

Neben den physischen Anpassungen an der Straßenbahn sollten auch betrieblich-organisatorische Maßnahmen umgesetzt werden. Die ursprüngliche Planung sah vor, dass der S-Wagen außerhalb der Transporteinsätze weiterhin regulär im Linienverkehr eingesetzt werden kann, um eine wirtschaftliche Nutzung der Fahrzeugkapazitäten sicherzustellen. Dafür sollten Lösungen entwickelt werden, die einen schnellen Wechsel zwischen Personen- und Güterbetrieb ermöglichen, ohne längere Ausfallzeiten oder betriebliche Einschränkungen.

Um den geplanten Testbetrieb zuverlässig durchführen zu können, war vorgesehen, dass die VGF ein Backup-Fahrzeug bereitstellt. Sollte der regulär eingeplante S-Wagen ausfallen, sollte damit sichergestellt werden, dass der tägliche Transport der Pakete ohne Unterbrechung stattfinden kann.

### Sicherheitsanforderungen und Genehmigungen

Im Rahmen der ursprünglichen Planung wurde berücksichtigt, dass für den Betrieb der umgerüsteten Straßenbahn umfangreiche sicherheitsrelevante Anforderungen erfüllt und behördliche Genehmigungen eingeholt werden müssten. Die Einhaltung der BOStrab (Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen) wurde als Voraussetzung identifiziert, um die Betriebszulassung der modifizierten Tram sicherzustellen. Dies wurde umgesetzt.

Es war vorgesehen, dass die technischen Anpassungen des Innenraums sowie die betrieblichen Abläufe mit den zuständigen Behörden abgestimmt werden, um die erforderlichen Genehmigungen für

die geplante Nutzung der Straßenbahn als Gütertransportmittel zu erhalten. Zudem sollten Maßnahmen zur Ladungssicherung und betrieblichen Sicherheit überprüft und genehmigungsfähig ausgestaltet werden.

Die Projektpartner hatten vorgesehen, die notwendigen Abstimmungen mit den Aufsichtsbehörden frühzeitig zu initiieren, um sicherzustellen, dass alle rechtlichen und sicherheitstechnischen Anforderungen im Vorfeld des Testbetriebs geklärt würden. Dies wurde umgesetzt.

### **2.1.3 Sechsmonatiger Testbetrieb – AP 3**

Der ursprünglich geplante sechsmonatige Testbetrieb sollte den praktischen Einsatz der Gütertram unter realen Bedingungen erproben und gleichzeitig belastbare Daten zur betrieblichen Effizienz und Umweltbilanz liefern. Ziel war es, den gesamten Transportprozess – von der Beladung über den Transport bis zur Entladung und Weiterverteilung per Lastenrad – systematisch zu analysieren und Optimierungspotenziale zu identifizieren.

Der Testbetrieb war für den Zeitraum vom 19. Februar 2024 bis zum 26. Juli 2024 angesetzt und sollte über diese Zeit hinweg schrittweise erweitert werden. Für die Durchführung war eine tägliche Fahrt der Tram im Zeitfenster zwischen 9:00 und 13:00 Uhr geplant. Aufgrund der betrieblichen Rahmenbedingungen sollte jedoch kein minutengenaue Fahrplan festgelegt werden.

Die ursprüngliche Planung sah vor, dass der Testbetrieb in drei Phasen, die eine sukzessive Erweiterung der Transportstrecke vorsahen, ausgeweitet wird:

#### **Phase 1 – Einführung der Haltestelle „Messe“**

In den ersten Wochen des Testbetriebs sollten die Pakete ausschließlich zur Haltestelle „Messe“ transportiert und dort auf Lastenräder umgeladen werden. Diese erste Phase war dazu vorgesehen, die Abläufe beim Be- und Entladen zu testen, mögliche Engpässe frühzeitig zu erkennen und erforderliche Anpassungen an der operativen Koordination vorzunehmen.

#### **Phase 2 – Erweiterung um den Lokalbahnhof nach ca. 3 - 4 Wochen**

Nach der erfolgreichen Einführung der ersten Umschlagstelle sollte die Transportstrecke um den Lokalbahnhof ergänzt werden. An beiden Haltestellen hätten die Pakete entladen und anschließend per Lastenrad weiterverteilt werden sollen. In dieser Phase sollte die logistische Koordination der Lastenräder verbessert und die Umschlagzeiten weiter optimiert werden.

#### **Phase 3 – Integration des Umschlagpunkts „Zoo“ nach weiteren 3 - 4 Wochen**

In der letzten Stufe des Testbetriebs war vorgesehen, die Haltestelle „Zoo“ als weiteren Umschlagpunkt einzubinden. Dies sollte die Transportkapazität erhöhen und die operative Belastung auf mehrere Standorte verteilen. Gleichzeitig sollte untersucht werden, wie sich eine größere Anzahl von Haltestellen auf die Gesamtfahrzeit und die Effizienz der Zustellung auswirkt.

Der ursprünglich geplante Ablauf des Warentransports sah vor, dass der ursprüngliche Logistikpartner die Pakete in seinem Logistikzentrum vorsortiert und in standardisierten Transporttaschen verpackt. Anschließend sollten sie per E-Transporter zur Haltestelle „Hugo-Junkers-Straße“ gebracht und dort in die Straßenbahn verladen werden. Die Entladung und Weiterverteilung der Pakete sollte an den definierten Umschlagpunkten „Messe“, „Lokalbahnhof“ und „Zoo“ erfolgen, wo die Sendungen auf Lastenräder umgeladen und an die Endkunden zugestellt werden sollten.

Während der Fahrt war vorgesehen, dass ein Mitarbeiter des ursprünglichen Logistikpartners an Bord der Tram bleibt, um die Ladungssicherung zu überwachen und den Umschlag an den Haltepunkten zu koordinieren.

Die VGF war dafür eingeplant, die Fahrplanerstellung zu übernehmen und das erforderliche Fahrpersonal bereitzustellen. Zudem sollte die technische Umrüstung des S-Wagens so gestaltet werden, dass die Ladeflächen einen effizienten und schnellen Umschlag der Transporttaschen ermöglichen. Ein reibungsloser Betriebsablauf sollte gewährleistet werden, um eine praxisnahe Erprobung des Konzepts unter realen urbanen Bedingungen zu ermöglichen.

Während des Testbetriebs sollte die Messung betrieblicher Kennzahlen erfolgen, darunter:

1. Dauer der Be- und Entladeprozesse,
2. Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit des Transports,
3. Effizienz der Lastenradlogistik an den Umschlagpunkten,
4. CO<sub>2</sub>-Reduktion durch die Nutzung der Straßenbahn im Vergleich zur konventionellen Paketzustellung.

Diese Werte sollten durch die wissenschaftliche Begleitung der Frankfurt University of Applied Sciences erfasst und analysiert werden, um eine fundierte Entscheidungsgrundlage für eine mögliche Skalierung des Systems zu erhalten. Zudem sollte ein digitales Simulationsmodell (digitaler Zwilling) erstellt werden, um verschiedene Betriebsstrategien zu modellieren und Optimierungspotenziale zu identifizieren.

Die sechsmonatige Testphase war darauf ausgelegt, die Voraussetzungen für eine langfristige und wirtschaftlich tragfähige Implementierung der Gütertram zu analysieren. Dabei sollten nicht nur betriebliche Herausforderungen identifiziert, sondern auch gezielte Optimierungsmaßnahmen entwickelt werden. Zudem galt es zu prüfen, inwieweit das Konzept auf andere Städte oder Logistiknetzwerke übertragbar wäre.

#### **2.1.4 Bearbeitung der Forschungsfragen – AP 4**

Die wissenschaftliche Begleitung durch die Frankfurt University of Applied Sciences (FRA-UAS) sollte fundierte Erkenntnisse zur Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Umweltbilanz der multimodalen Transportlösung liefern.

Um den geplanten Einsatz der Gütertram mit bestehenden Logistikprozessen vergleichen zu können, sollten sowohl betriebliche Kennzahlen aus dem Testbetrieb erfasst als auch modellbasierte Simulationen zur Bewertung verschiedener Szenarien durchgeführt werden.

Ein besonderer Fokus lag auf der Effektivität des Umschlagsystems. Es war vorgesehen, die Lade- und Entladeprozesse detailliert zu untersuchen, um potenzielle Engpässe zu identifizieren und die Standzeiten der Tram an den Haltestellen zu minimieren. Dabei sollten insbesondere die Handhabung und Sicherung der Transporttaschen, die Verteilung der Umschlagpunkte sowie die Synchronisation mit der Lastenradlogistik analysiert werden.

Auch die ökologischen Auswirkungen der geplanten Transportlösung sollten im Rahmen der wissenschaftlichen Untersuchungen analysiert werden. Geplante Berechnungen sollten zeigen, in welchem Umfang der Ersatz herkömmlicher Lieferfahrzeuge zu einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen könnte. Erste Modellierungen deuteten darauf hin, dass der Einsatz der Gütertram die Emissionen um bis zu 56,8 % im Vergleich zur konventionellen Paketzustellung senken könnte. Zur Bewertung der Umweltwirkungen waren Modellrechnungen vorgesehen, die mit bestehenden Branchen-Logistikprozessen verglichen werden sollten.

Die Wirtschaftlichkeit des Konzepts war ein weiteres Forschungsthema. Neben den direkten Betriebskosten sollten auch potenzielle Einsparungen durch eine Reduzierung der Verkehrsbelastung, eine optimierte Tourenplanung und eine effizientere Flächennutzung betrachtet werden. Die Analyse sollte klären, unter welchen Bedingungen die langfristige Integration der Gütertram wirtschaftlich tragfähig wäre.

Ein geplanter Bestandteil der wissenschaftlichen Untersuchungen war die Nutzung eines digitalen Zwillings des gesamten Transportprozesses. Mithilfe dieses Simulationsmodells sollten verschiedene

Betriebsstrategien erprobt und analysiert werden, um herauszufinden, welche Anpassungen an Infrastruktur und Abläufen notwendig wären, um den Betrieb zu optimieren.

Zusätzlich war vorgesehen, rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen zu analysieren. Dabei sollte geprüft werden, welche Anforderungen für eine langfristige Integration der Gütertram in bestehende Verkehrs- und Logistikkonzepte der Stadt Frankfurt erfüllt werden müssten.

#### **2.1.5 Projektmanagement und Kommunikation – AP 5**

Für die Frankfurt University of Applied Sciences (FRA-UAS) war vorgesehen, die Leitung des Projektmanagements zu übernehmen und die Abstimmung zwischen der Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main (VGF), der ursprüngliche Logistikpartner und dem Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum zu koordinieren.

Die ursprüngliche Planung sah vor, dass die beteiligten Akteure regelmäßige Projekttreffen abhalten, um logistische, betriebliche und infrastrukturelle Fragen zu besprechen.

Dazu sollten unter anderem gehören:

1. Integration der Tram in den bestehenden ÖPNV-Fahrplan,
2. Organisation der Umschlagprozesse an den definierten Haltestellen,
3. Koordination der Lastenradlogistik für die Weiterverteilung der Sendungen.

Parallel dazu sollten auch rechtliche und genehmigungstechnische Fragen geklärt werden. Die Nutzung von Straßenbahnhaltestellen als logistische Umschlagpunkte hätte Sondergenehmigungen erfordert, die in Abstimmung mit den zuständigen städtischen Behörden beantragt werden sollten. Die VGF war eingeplant, die Einholung dieser behördlichen Genehmigungen zu übernehmen und sicherzustellen, dass alle geplanten betrieblichen Anpassungen den regulatorischen Vorgaben entsprechen. Dies wurde so umgesetzt.

#### **Geplante Kommunikationsstrategie und Öffentlichkeitsarbeit**

Nach den ursprünglichen Planungen sollten alle Pressemitteilungen und Veröffentlichungen zwischen den Projektpartnern abgestimmt werden, um eine transparente Berichterstattung sicherzustellen, die sowohl die wissenschaftlichen Erkenntnisse als auch die betrieblichen Abläufe angemessen widerspiegelt.

Die Kommunikationsstrategie war darauf ausgelegt, nicht nur den geplanten Projektfortschritt zu dokumentieren, sondern auch potenzielle Partner für eine mögliche zukünftige Skalierung zu gewinnen und die Akzeptanz multimodaler Logistiklösungen im urbanen Raum zu fördern.

Da das Projekt durch das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum gefördert werden sollte, wäre eine detaillierte Dokumentation und Berichterstattung über den Projektverlauf erforderlich gewesen. Die ursprüngliche Planung sah vor, dass die FRA-UAS regelmäßige Zwischenberichte sowie einen umfassenden Abschlussbericht erstellt, in dem die Ergebnisse, Herausforderungen und Erkenntnisse aus dem geplanten Testbetrieb zusammengeführt werden.

## 2.2 Chronologie des Projektverlaufs

Das Projekt durchlief seit 2017/2018 über mehrere Jahre hinweg eine Entwicklung, die von anfänglicher Konzeptarbeit über strukturelle Änderungen bis hin zur praktischen Umsetzung im städtischen Raum reichte. Die tatsächliche Projektumsetzung, insbesondere der vierwöchige Testbetrieb im September und Oktober 2024, war geprägt von organisatorischen Weichenstellungen, partnerschaftlicher Koordination und politischer Flankierung. Im Folgenden wird die Chronologie des tatsächlichen Projektverlaufs dargelegt.

Tabelle 1 – Chronologie der Projektmeilensteine

| Datum           | Ereignis                                                                                              |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 01.01.2024      | Start der Projektförderung durch das Land Hessen                                                      |
| Mitte Jan. 2024 | Aufnahme der Gespräche mit Amazon Logistics als weiterer möglicher Projektpartner                     |
| 13.02.2024      | Vorstellung des Pilotbetriebsplans mit dem ursprünglichen Logistikpartner als Partner                 |
| 01.08.2024      | Wechsel des Logistikpartners – Amazon Logistics übernimmt operative Zustellung                        |
| 06.09.2024      | Unterzeichnung des Kooperations- und Transportvertrags und offizielle Betriebsaufnahme.               |
| 26.09.2024      | Präsentation des Projekts im Rahmen des Hessischen Nachhaltigkeitstags, Besuch des Ministers Gremmels |
| 04.10.2024      | Letzter Betriebstag der Gütertram im Pilotbetrieb                                                     |
| 08.10.2024      | Abschlussveranstaltung mit Vorstellung erster Ergebnisse, Besuch des Ministers Mansoori               |

Gemeinsam mit Amazon wurde ein eigenes, dreistufiges Zustellkonzept implementiert: Zunächst wurden Sendungen mit Elektrotransportern aus dem Verteilzentrum Raunheim zur Übergabehaltestelle „Stadion“ transportiert. Von dort übernahm die Gütertram den Transport in die Innenstadt, wo die Pakete auf Lastenräder umgeladen wurden. Der Wechsel zu dieser Station erfolgte aufgrund der deutlich besseren Erreichbarkeit vom Distributionscenter DHE1 der Amazon Logistics in Raunheim.

Aufgrund situativer Entscheidungen konnten die zunächst geplanten Fahrzeuge der S- und R-Wagen nicht genutzt werden. Die VGF bereitete daher eine vorhandene Hochflurstraßenbahn des Typen P für den Einsatz als Gütertram vor. Die Umrüstung erfolgte im Rahmen eines Ausbildungsprojekts. Im Innenraum wurden Sitzpolster entfernt, Befestigungssysteme installiert und eine flexible Nutzung sichergestellt. Die verwendeten Hartplastiktaschen konnten in speziell definierten Bereichen der Tram

sicher fixiert werden. Die maximale Aufnahmekapazität lag im Projekt operativ bei 30, in einem möglichen Ausbau bei einer Skalierung nach dem Pilotprojekt bei bis zu 70 Taschen pro Fahrt.



Abbildung 4 - VGF Gütertram des Typs P-Wagen

Am 6. September 2024 erfolgte die offizielle Betriebsaufnahme der Gütertram.

Die Abstimmung der täglichen Betriebsprozesse erfolgte eng zwischen Amazon, VGF und der FRA UAS, die das Projekt auch operativ koordinierte. Der tägliche Betrieb war auf eine Fahrt im Zeitraum von 9:00 bis 13:00 Uhr ausgelegt. Die Beladung fand an der Haltestelle „Stadion“ statt, die Entladung an der Schleife „Zoo“ oder am Betriebshof „Gutleut“. Nach der Entladung übernahmen Lastenräder die Zustellung in der Umgebung.

Ergänzend dazu wurde das Projekt im Rahmen des 8. Hessischen Nachhaltigkeitstags 2024 öffentlich präsentiert. Die Integration in diesen landesweiten Aktionstag verlieh dem Vorhaben zusätzliche mediale Aufmerksamkeit und unterstrich seine Bedeutung als Modellprojekt für klimafreundliche Logistik in Ballungsräumen.



Abbildung 5 - Besuch des Ministers Gremmels (v.l.n.r. Danae Klimczyk, LMTV; Stadtrat Siefert, Stadt Frankfurt am Main; Prof. Dr. Schocke, FRA UAS; Prof. Dr. Rägler, FRA UAS; Minister Gremmels, HMWK)



Abbildung 6 - Besuch von Minister Mansoori der LastMileTram (v.l.n.r. Prof. Dr. Schocke, FRA UAS; Minister Mansoori, HMWEVW; Andre Lütgeharm, Amazon Logistics; Stadtrat Siefert, Stadt Frankfurt am Main; Kerstin Jerchel, VGF)

Der reguläre Betrieb der Gütertram umfasste eine Fahrt pro Tag, jeweils Montag bis Freitag, gesteuert durch die VGF. Das Fahrzeug wurde durch geschultes Personal mit Straßenbahnfahrberechtigung gesteuert. Die Beladung an der Tram-Station „Stadion“ übernahmen Mitarbeitende des Transporteurs. Für die Entladung und Übergabe an die Lastenräder an den Zielhaltestellen war ein separater Transporteur zuständig. Dieser nutzte „Delivery Bags“, in denen jeweils bis zu 18 Pakete transportiert wurden.

Im Durchschnitt wurden täglich 9,33 Lastenradtouren durchgeführt. Jede Tour transportierte rund 69 Pakete, zum Abschluss des Testbetriebs konnte dies auf 73 erhöht werden. Damit lag das Paketvolumen pro Tag bei ca. 320 bis 350 Sendungen. Die Umladezeit zwischen Tram und Rad betrug im Realbetrieb weniger als die ursprünglich angesetzten 15 Minuten. Der Zustellerfolg lag bei 97,86 %, was den Vergleich mit konventionellen Zustellmethoden erlaubte.

Amazon hatte ursprünglich einen zweimal täglichen Zustellrhythmus vorgesehen. Da der VGF-Betrieb auf eine Tramtour begrenzt war, wurde für die zweite Tour am Nachmittag ein alternatives Konzept implementiert. Es wurde ein temporäres Hub eingerichtet, an dem die Pakete für die Nachmittagszustellung mit einem E-Transporter angeliefert und direkt auf Lastenräder verteilt wurden. An Samstagen, an denen keine Tram fuhr, wurden beide Touren über dieses Hub abgewickelt, um einen durchgängigen Service sicherzustellen. An Sonntagen wird in Deutschland in der Regel nicht zugestellt.

Am 4. Oktober 2024 fuhr die Gütertram letztmals im Rahmen des geplanten Testbetriebs. Damit endete die vierwöchige operative Phase. Alle vorgesehenen Tramtouren wurden fahrplangemäß durchgeführt. Drei Tage ohne Betrieb waren bereits zu Beginn der Testphase eingeplant. Die rechtlichen Rahmenbedingungen – insbesondere die Verantwortung für die Sendungen zwischen Amazon, VGF und den Zustellpartnern – wurden vor Beginn der Betriebsphase in Form von Verträgen fixiert.

Am 8. Oktober 2024 fand die offizielle Abschlussveranstaltung statt. Die Frankfurt UAS, VGF und Amazon präsentierten erste Ergebnisse und gaben einen Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen. In der Abschlusskommunikation wurden die erreichten CO<sub>2</sub>-Einsparungen (26,8 kg pro Tag, Annahme der FRA UAS), die hohe operative Stabilität und das Einsparpotenzial in Mengen an Fahrzeugen (zwei eingesparte Diesel- oder E-Vans in der Frankfurter Innenstadt) hervorgehoben. Das Projekt stieß auf ein breites Medien- und Politikinteresse. Mit ca. 150 Einzelveröffentlichungen und ca. 25 Videobeiträgen sowie zehn Audiosendungen ist LMT V für die FRA UAS eines der erfolgreichsten anwendungsnahen Forschungsprojekte der letzten Jahre.

## **2.3 Maßnahmenempfehlungen für einen möglichen Dauerbetrieb**

Die empfohlenen Maßnahmen für einen möglichen Dauerbetrieb unter Realbedingungen im Zusammenhang mit dem Projekt LastMileTram RheinMain basieren auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Projektphasen sowie dem Testbetrieb im September/Okttober des Jahres 2024. Eine langfristige Implementierung soll sowohl ökologisch als auch wirtschaftlich nachhaltig sein und wurde daher im Verlaufe des Gesamtprojekts immer wieder hinterfragt und hinsichtlich der Planung des Testbetriebs an die Gegebenheiten der Markt- und gesellschaftlichen Entwicklungen angepasst. Neben einer kritischen Überprüfung aller logistischen, technologischen und organisatorischen Prozesse wurden dabei gezielt Optimierungspotenziale identifiziert.

Die enge Verzahnung von Straßenbahn- und Lastenradlogistik gewährleistet einen reibungslosen Ablauf über alle Schnittstellen hinweg. So erfolgt beispielsweise die Belieferung der Tram an der Tram-Station „Stadion“ mithilfe eines E-Transporters aus dem Amazon-Lager in Raunheim. Bereits während des Testbetriebs wurde gezeigt, dass durch optimierte Be- und Entladeprozesse – die ursprünglich mit 15 Minuten pro Umladevorgang kalkuliert wurden – Zeitersparnisse erzielt werden konnten, während gleichzeitig der Zustellerfolg auf der letzten Meile mit Hilfe der Lastenräder mit 97,86 % konstant hoch blieb.

Die digitale Steuerung und ein Echtzeit-Track-&-Trace-System sichern dabei die lückenlose Nachverfolgbarkeit der Sendungen. Diese Datenbasis ermöglicht nicht nur eine kontinuierliche Analyse und weitere Prozessanpassungen, sondern liefert auch wichtige Parameter für die wirtschaftliche Bewertung des Betriebsmodells. Aus organisatorischen Gründen wurde das von Amazon eingesetzte System zum Track&Trace nicht mit externen Systemen verbunden. Das Echtzeitmonitoring über alle Verkehrsträger hinweg war im Pilotbetrieb nicht möglich. Dasselbe gilt für das von der VGF eingesetzte System zur Steuerung des Trambetriebs. Auch dieses wurde nicht mit externen Systemen verbunden.

Als weiterer wichtiger Bestandteil wurden ein zentrales City Hub für den Paketumschlag, die Nutzung als Verwahrort für die Lastenräder sowie als sozialen Ort für die Mitarbeitenden erkannt. Hier gilt es in zukünftigen Projekten noch genauer zu definieren, welche Rolle dieses Hub in einer optimalen multimodalen Prozesskette spielen sollte. Auch die Verwendung von KI-gestützten Optimierungssystemen konnte im Probetrieb nicht genauer beleuchtet werden. Auch hier empfiehlt die Projektleitung eine weitere Untersuchung in angeschlossenen Forschungsprojekten.

### **2.3.1 Definition der Prozesse**

Während der Vorbereitungen für den Testbetrieb wurde deutlich, dass die Integration der verschiedenen Mobilitätsträger eine präzise Abstimmung erfordert. Dabei ging es nicht nur um die Verladung von Paketen in die Tram, die Abstimmung von An- und Abfahrtszeiten, die Einsatzschichten,

die Haltezeiten an den Übernahme- und Abgabepunkten oder mögliche Eskalationsszenarien im Falle von Systemfehlern sondern auch um die Schaffung effizienter Schnittstellen zwischen den beteiligten logistischen Akteuren.

Im Zuge der Prozessdefinition wurden die Be- und Entladevorgänge optimiert. Durch die gezielte Testung geeigneter Ladungsträger wurde erreicht, dass sich die Verweildauer der Tram an den Haltepunkten minimiert, da diese sowohl eine stabile Ladungssicherung während der Fahrt als auch ein schnelles Handling beim Umschlag gewährleisten.

Alle Transportbewegungen wurden in Echtzeit erfasst, sodass die Steuerung des Gesamtsystems stets auf aktueller Basis erfolgte. Dies bildet die Grundlage für weitere Optimierungen und die Evaluation der Wirtschaftlichkeit.

Um das System auf eine potenzielle Skalierung vorzubereiten, wurden zudem verschiedene Anpassungsszenarien geprüft – etwa die Erweiterung der Route, Integration weiterer Umschlagpunkte oder die Anpassung an schwankende Sendungsvolumina und saisonale Veränderungen. So wurde sichergestellt, dass das Modell nicht nur für den Testbetrieb funktioniert, sondern auch zukunftsfähig und flexibel bleibt, um spätere Anpassungen an veränderte logistische Anforderungen zu ermöglichen.

### 2.3.1.1 Streckenplanung

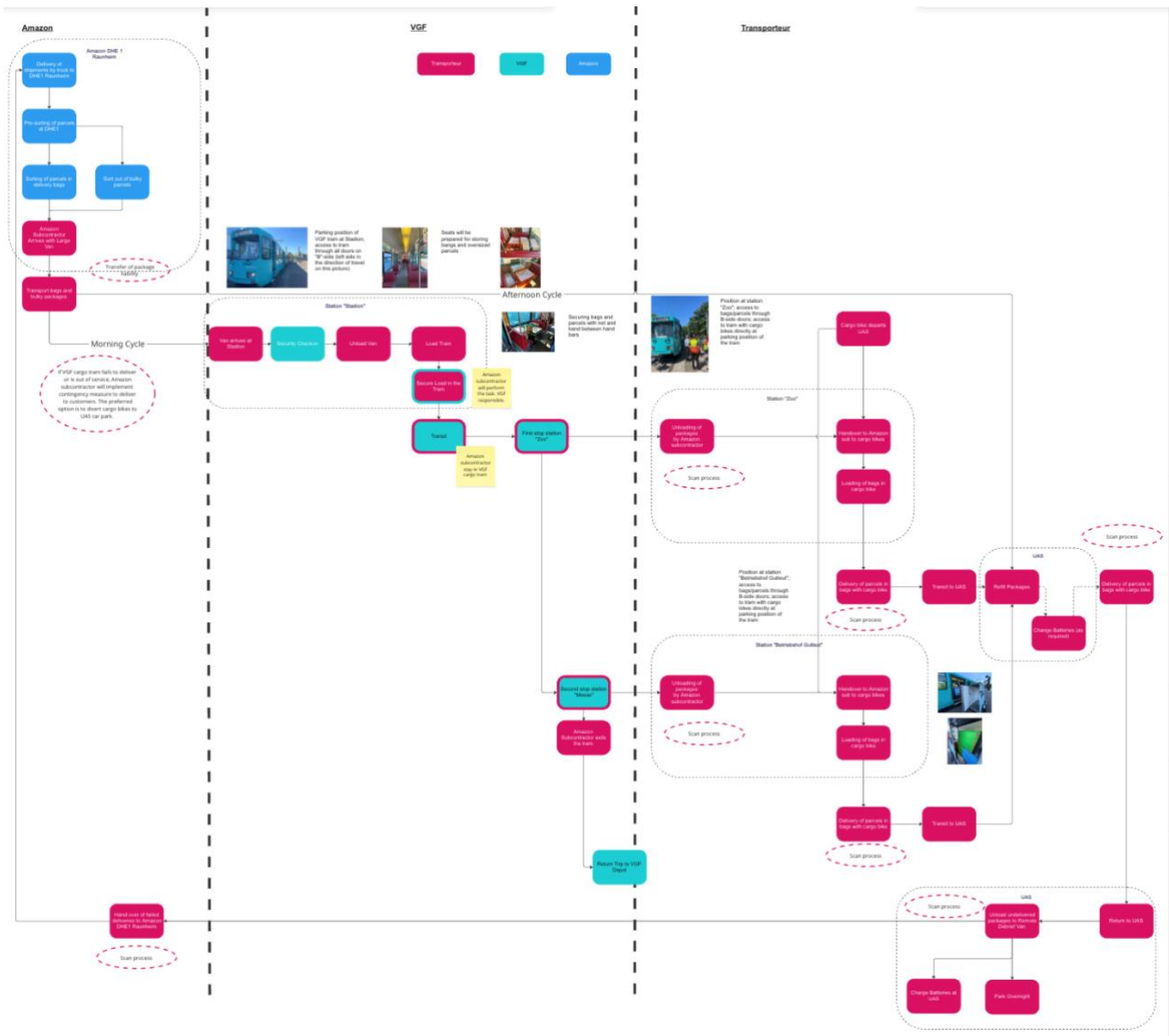


Abbildung 7 – Lieferflussdiagramm (Lesbarkeit wird bei Detailabbildungen in der Folge erhöht)



Abbildung 8 – Lieferflussdiagramm-Legende

Für die Streckenplanung wurden Haltepunkte definiert, die eine optimale Verknüpfung zwischen Straßenbahn- und Lastenradlogistik gewährleisten. Wichtige Kriterien waren dabei die Nähe zu den Hauptliefergebieten, ausreichend Platz für das Be- und Entladen sowie die Möglichkeit, Verzögerungen im Betriebsablauf zu vermeiden. Außerdem durfte der reguläre Straßenbahnverkehr der VGF nicht beeinträchtigt werden.

Daraus ergaben sich die Haltepunkte „Zoo“ und „Betriebshof Gutleut“. An der Tram-Station „Zoo“ wurde ein Teil der Sendungen über Cargo Bikes in die Innenstadt überführt, während am Betriebshof Gutleut der restliche Ladungsbestand ausgeladen und weiterverteilt wurde.

Im Folgenden wird der detaillierte Ablauf der Lieferkette anhand des Lieferflussdiagramms beschrieben, um die einzelnen Transport- und Umschlagsprozesse visuell und strukturell nachvollziehbar darzustellen.

### Wareneingang und Vorsortierung im Amazon-Lager DHE 1 Raunheim

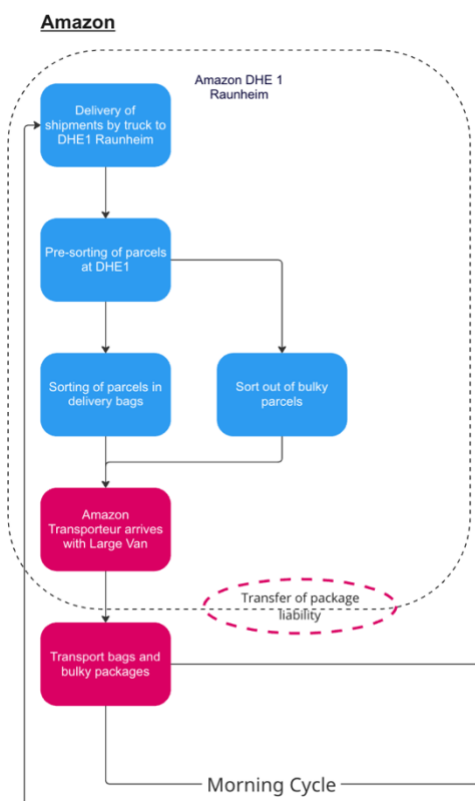


Abbildung 9 – Ausschnitt aus dem Lieferflusssdiagramm: Amazon DHE 1 Raunheim

Der Logistikprozess beginnt mit der Anlieferung der Pakete per Lkw an das Amazon-Lager DHE 1 in Raunheim. Innerhalb des Verteilzentrums erfolgt zunächst eine Vorsortierung, bei der die Pakete in zwei Hauptkategorien unterteilt werden: Standardpakete werden in Transporttaschen verpackt, während sperrige Sendungen (Bulky Parcels) gesondert erfasst und vorbereitet werden.

Nach der Sortierung werden beide Warenströme – sowohl die in Liefertaschen verpackten Standardsendungen als auch das Sperrgut – an den beauftragten Transporteur übergeben. Der Transporteur nutzt einen E-Transporter, um die vorsortierten Pakete abzuholen. Die jeweiligen Gefahrenübergänge sind im Flussdiagramm dargestellt.

Nach dem Verlassen des Amazon-Lagers in Raunheim wird der weitere Transport in zwei Zyklen abgewickelt – dem Morgenzyklus und dem Nachmittagszyklus. Beide Zyklen folgen im Wesentlichen dem gleichen Ablauf, unterscheiden sich jedoch bei der Nutzung der Tram. Diese Unterteilung ermöglicht eine optimierte Auslastung der Transportmittel sowie eine termingerechte, gestaffelte Zustellung.

### Morgenzyklus - Verladung in die Tram und Transitphase

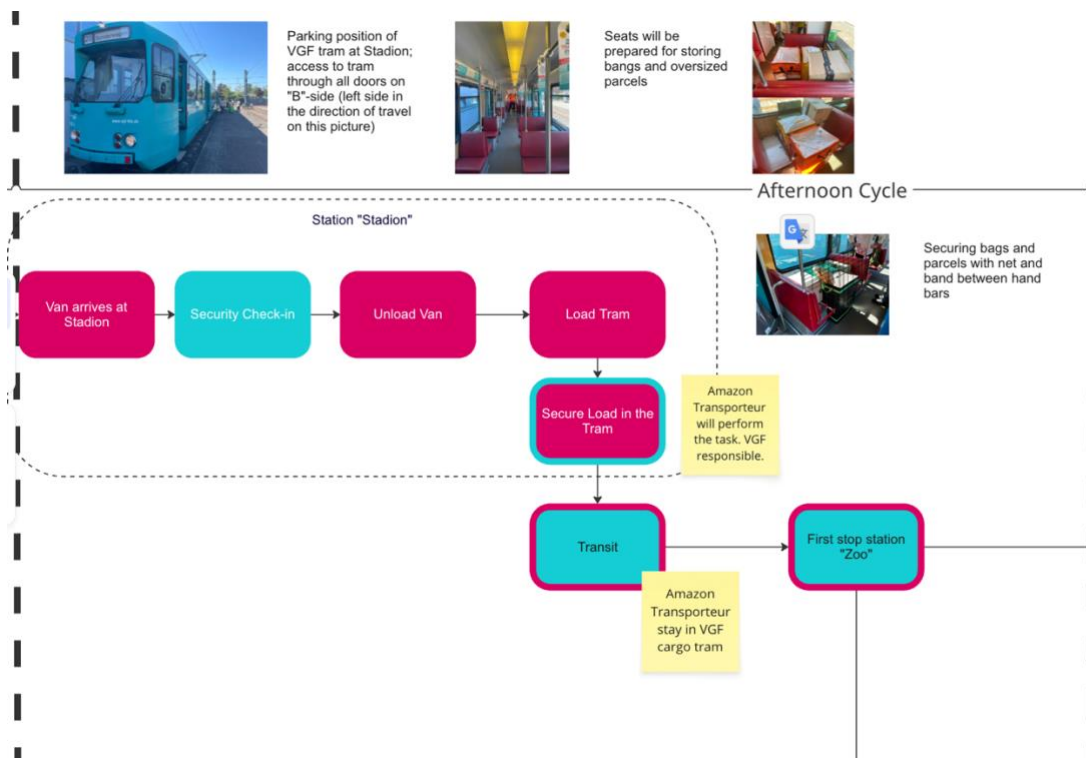


Abbildung 10 – Ausschnitt aus dem Lieferflussdiagramm: Tram-Station "Stadion"

Der Transporteur fährt mit dem E-Transporter zum Standort „Stadion“, wo die Tram der Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main (VGF) bereitsteht. Hier wird zunächst ein Sicherheitscheck durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Tram betriebsbereit ist und alle Zugänge, insbesondere die Türen auf der korrekten Seite, frei zugänglich sind. Anschließend entlädt der Transporteur den E-Transporter und lädt die vorsortierten Sendungen in die Tram.

Während des Verladevorgangs übernimmt die VGF die operative Verantwortung für den sicheren Betrieb und die Navigation der Tram, während der Transporteur den Be- und Entladeprozess sowie die Sicherung der Ladung mittels Netzen und Spanngurten durchführt. Während des Testbetriebs bleibt Amazon auch im Zusammenhang mit dem Tram-Transport haftend für die Sendungen. Dies soll bei einem möglichen Dauerbetrieb verändert werden. Nach Abschluss der Verladung startet die Tram in die Transitphase. In dieser Phase verbleibt der Transporteur in der Tram.

## Morgenzyklus - Erster Haltepunkt: Tram-Station „Zoo“

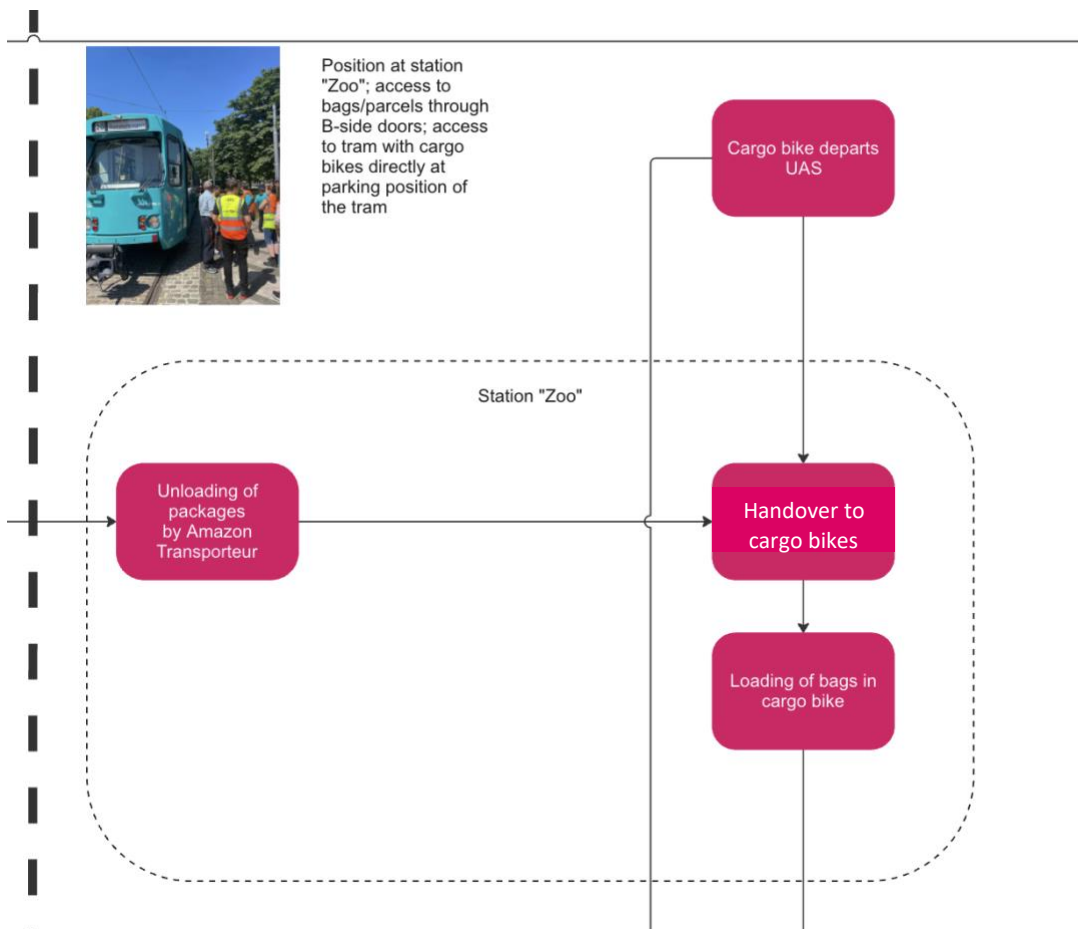


Abbildung 11 – Ausschnitt aus dem Lieferflussdiagramm: Tram-Station "Zoo"

Die Tram hält als ersten Stopp an der Station „Zoo“. An der Station „Zoo“ entlädt der Transporteur den definierten Teil der Sendungen aus der Tram. Jeder Entladevorgang wird durch einen Scan-Prozess dokumentiert, um eine lückenlose Nachverfolgbarkeit sowie Dokumentation zu gewährleisten. Anschließend erfolgt die Übergabe der entladenen Sendungen an Cargo Bikes, die dann die finale Zustellung in der näheren Umgebung übernehmen.

### Morgenzyklus - Zweiter Halt: Tram-Station „Betriebshof Gutleut“

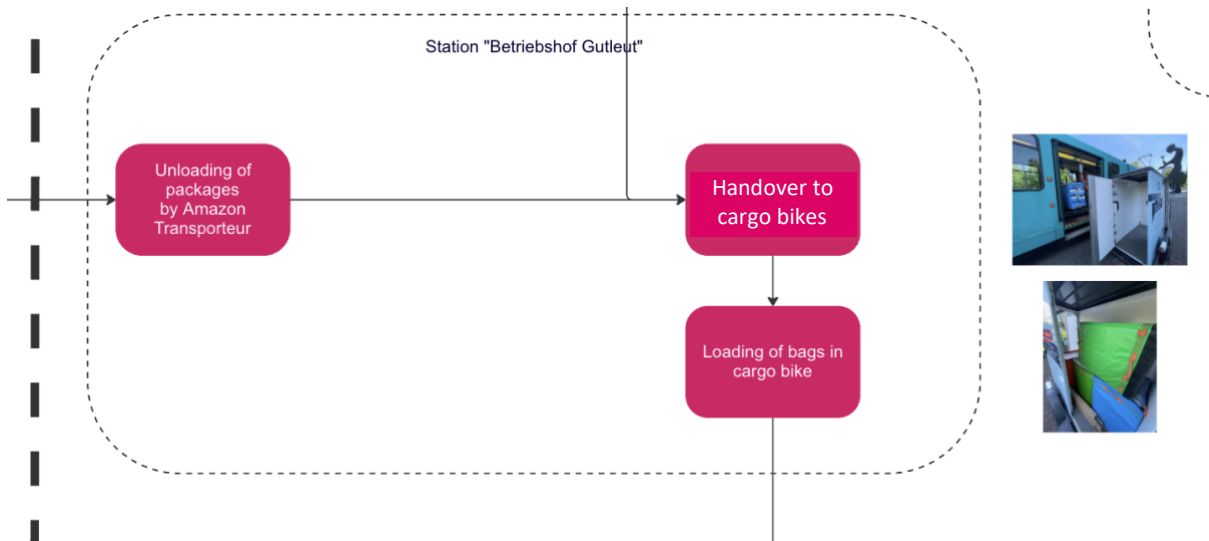


Abbildung 12 – Ausschnitt aus dem Lieferflussdiagramm: Tram-Station "Betriebshof Gutleut"

Die Tram fährt weiter zum Betriebshof Gutleut, wo sie so positioniert wird, dass über die B-Seitentüren ein direkter Zugang zu den verbleibenden Sendungen gewährleistet ist. Dort entlädt der Transporteur den Rest der Pakete und übergibt sie an weitere Cargo Bikes, die die Belieferung an den Endkunden übernehmen.

Sobald alle Sendungen am zweiten Stopp entladen wurden, steigt der Transporteur aus der Tram aus, die Tram verbleibt bis zum weiteren Einsatz am Folgetag am Betriebshof.

### Morgenzyklus - Finaler Knotenpunkt an der Frankfurt University of Applied Sciences, Tiefgarage

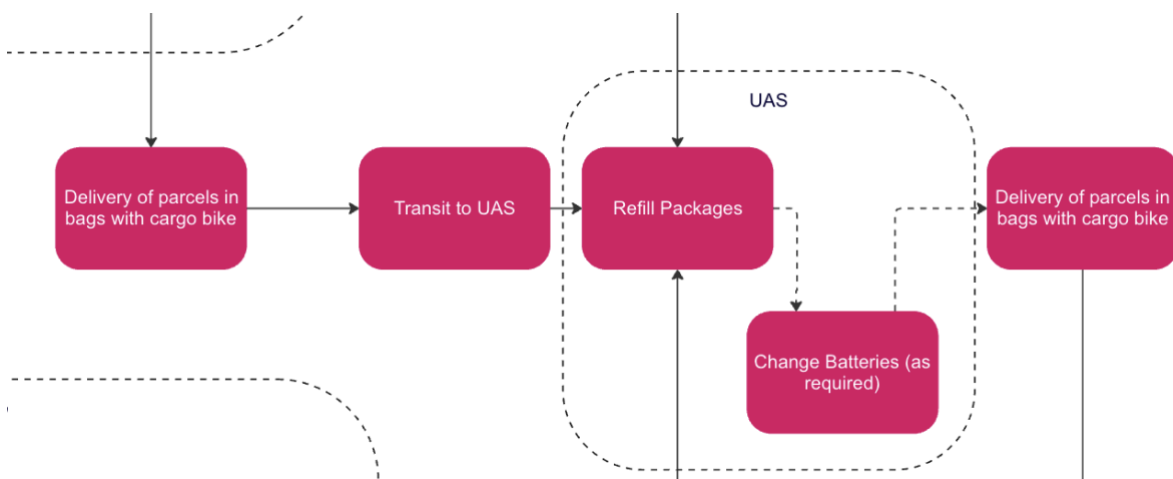


Abbildung 13 – Ausschnitt aus dem Lieferflussdiagramm: Knotenpunkt an der FRA UAS

Nachdem die Cargo Bikes die Zustellung auf der letzten Meile abgeschlossen haben, kehren sie zur Frankfurt University of Applied Sciences zurück. Die Tiefgarage der Hochschule wurde im Zuge des Testbetriebs als „Notlösung“ für ein City Hub verwendet. An diesem finalen Knotenpunkt wird ein

Batteriewechsel durchgeführt, um die Einsatzbereitschaft der Cargo Bikes sicherzustellen. Zudem werden etwaig notwendige weitere Vorbereitungen für den Nachmittagszyklus vorgenommen.

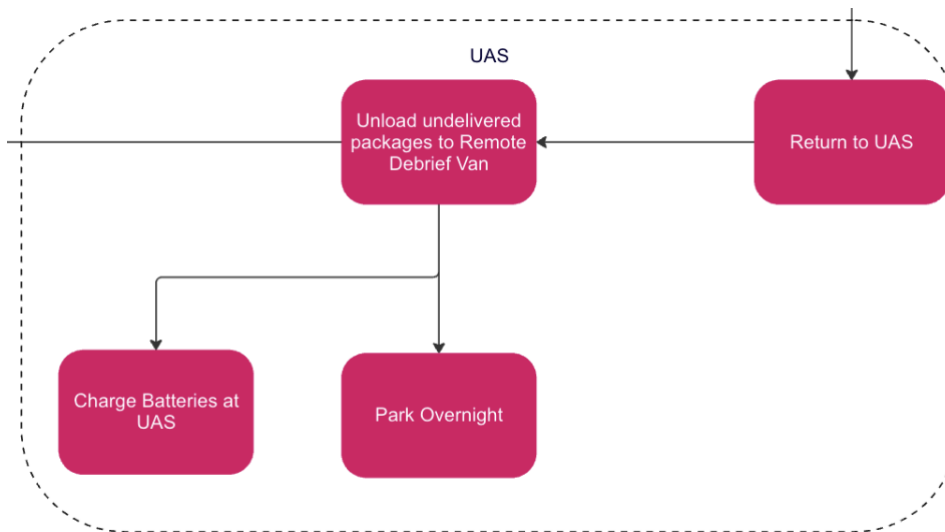


Abbildung 14 – Ausschnitt aus dem Lieferflussdiagramm: Abschluss des Zustellzyklus

Ein wesentlicher Bestandteil des Abschlusses des Morgenzyklus ist zudem die Bearbeitung von nicht erfolgreichen Zustellungen. Erstmals nicht zugestellte oder mehrfach fehlgeschlagene Zustellversuche von Paketen werden an der FRA UAS in einen speziell dafür vorgesehenen Van eingeladen. Anschließend erfolgt die Rückführung dieser Sendungen an das Amazon-Lager in Raunheim, womit der gesamte Kreislauf geschlossen wird.

Nach Abschluss des jeweiligen Zustellzyklus – sei es im Morgen- oder im Nachmittagszyklus – werden die Cargo Bikes je nach Bedarf entweder an der Frankfurt University of Applied Sciences geladen oder über Nacht sicher abgestellt, um ihre volle Einsatzbereitschaft für den nächsten Einsatz zu gewährleisten.

### Notfallplan

Sollte die Tram während des Transits oder im Zustellprozess ausfallen oder nicht einsatzfähig sein, wird der Notfallplan aktiviert. Die bevorzugte Option ist eine direkte Umleitung der Cargo Bikes zum FRA UAS-Parkplatz, um den Zustellprozess nahtlos fortzuführen und Verzögerungen in der finalen Paketzustellung zu vermeiden.

### Nachmittagszyklus – City-Hub an der FRA UAS

Im Gegensatz zum Morgenzyklus, bei dem die Sendungen zunächst an der Tram-Station „Stadion“ angeliefert und in mehreren Schritten durch die Tram über die Tram-Stationen „Zoo“ und „Betriebshof Gutleut“ in die finale Auslieferung überführt wurden, wurde im Nachmittagszyklus ein deutlich

abweichendes Konzept erprobt. Hier lieferte der Transporteur die Pakete direkt mit einem E-Transporter an das City Hub, den „finalen Knotenpunkt“ an der Frankfurt University of Applied Sciences.

Dieser Übergabepunkt befindet sich in einer Tiefgarage, die – trotz ihrer praktischen Lage – hinsichtlich ihrer infrastrukturellen Eignung für eine vollumfängliche Stadtlogistik nur eingeschränkt geeignet ist.

Von diesem zentralen Behelfs-Hub aus starteten anschließend die Lastenräder, die die Sendungen in die angrenzenden Zustellbezirke verteilten. Auch in diesem Zyklus wurde der Be- und Entladevorgang durch einen kontinuierlichen Scan-Prozess lückenlos dokumentiert, um eine vollständige Nachverfolgbarkeit zu gewährleisten. Die hier gewonnenen Daten bieten wertvolle Einblicke in die Effizienz des direkten Umschlags an einem zentralen Knotenpunkt und liefern wichtige Parameter für die zukünftige Evaluation und mögliche Optimierung des Betriebsmodells.

Diese Vorgehensweise zeigt, wie alternative Übergabestellen, selbst wenn sie nicht optimal für die Anforderungen urbaner Logistik konzipiert sind, als provisorische Lösung genutzt werden können – insbesondere um bestehende Infrastrukturen flexibel einzubinden und so den Gesamtprozess zukunftsfähig zu gestalten.

### **Samstagszustellungen**

Der Einsatz der VGF Gütertram war aus organisatorischen Gründen nur von Montag bis Freitag während des Testbetriebs möglich. Der Transporteur stellt regelmäßig auch an Samstagen Amazon-Sendungen zu. Es war daher erforderlich, eine einvernehmliche Lösung für die Samstagszustellung zu erarbeiten. Alle Projektbeteiligten haben sich auf eine Systematik für den Morgen- und Nachmittagszyklus an Samstagen entschieden, die der Planung für die Nachmittagszyklen von Montag bis Freitag entspricht. Vorteilhaft für das Projekt war hierbei, dass die Anzahl der Datensätze aus dem Betrieb der Lastenräder auf der letzten Meile damit erhöht werden konnte.

#### **2.3.1.2 Ladungsträger und Beladung**

Die Verwendung der Ladungsträger beeinflusste die Raumnutzung innerhalb der Tram, die Geschwindigkeit und Qualität der Be- und Entladeprozesse sowie die Sicherheit der transportierten Sendungen. Im Projektverlauf wurden verschiedene Konzepte evaluiert, wobei sich die ursprüngliche Idee des Einsatzes von Containermodulen des Typs ONO-CM als nicht optimal erwies. Während diese Module theoretisch den Vorteil einer standardisierten und wiederverwendbaren Lösung boten, zeigten die Tests erhebliche praktische Nachteile. Die Container hatten mit etwa 90 Kilogramm ein hohes Eigengewicht, was das Handling erheblich erschwerte und zu längeren Lade- und Entladezeiten führte. Zudem ließ sich der vorhandene Platz in der Tram durch die starren Container nicht optimal nutzen, sodass pro Fahrt weniger Pakete transportiert werden konnten als mit alternativen Lösungen.

Ein weiterer Nachteil bestand darin, dass die Containermodule spezifisch für bestimmte Lastenradtypen konzipiert waren, wodurch ihre Flexibilität innerhalb der multimodalen Transportkette

eingeschränkt wurde. Darüber hinaus hätte die Nutzung dieser Module umfassende Umbauten innerhalb der Tram erfordert, um eine sichere Fixierung zu gewährleisten, was sowohl mit erheblichen Kosten als auch mit technischen Herausforderungen verbunden gewesen wäre. Zudem zeigten sich im Zusammenhang mit der Beladung der Tram sowie der Ladungssicherung in der Tram erhebliche Hürden. Die notwendigen baulichen Veränderungen hätten Kosten verursacht, die einen wirtschaftlichen Betrieb einer Cargotram stark gefährdet hätten.

Aufgrund dieser Erkenntnisse entschied man sich für den Einsatz von flexiblen Transporttaschen, die in den Logistikprozessen von Amazon bereits etabliert waren und eine effizientere Nutzung des verfügbaren Platzes in der Tram ermöglichten. Diese Transporttaschen wiesen ein Eigengewicht von lediglich etwa einem Kilogramm auf, was das Handling im Vergleich zu den schweren Containermodulen erheblich erleichterte. Sie hatten ein durchschnittliches Fassungsvermögen von etwa 18 Paketen, wobei die tatsächliche Anzahl abhängig von der Paketgröße und dem -gewicht variierte. Im Vergleich zum Verwenden der ONO-Containermodule als Standardladungsträger, wobei eine maximale Kapazität von etwa 480 Paketen pro Tramfahrt möglich gewesen wäre, könnten bei einem weiteren Aus- und Umbau des P-Wagens mit den Amazon-Transporttaschen deutlich über 1.000 Pakete pro Tramfahrt transportiert werden, wenn entsprechende Transportsysteme dafür installiert werden können. Dies stellte eine erhebliche Steigerung der Transporteffizienz dar und reduzierte gleichzeitig die Kosten für die benötigten Transportfahrten.

Ein wesentlicher Vorteil der Transporttaschen war ihre einfache Stapelbarkeit, die eine flexible Nutzung des Laderaums in der Tram ermöglichte. Im Gegensatz zu den Containermodulen, die aufgrund ihrer starren Bauweise eine festgelegte Anordnung erforderten, konnten die Transporttaschen variabel platziert und entsprechend den logistischen Erfordernissen optimiert werden. Dies führte nicht nur zu einer besseren Raumausnutzung, sondern ermöglichte auch eine schnellere Be- und Entladung. Die Sicherung der Taschen innerhalb der Tram erfolgte über ein modulares Spannsystem, das ein Verrutschen während der Fahrt verhinderte und somit die Sicherheit der Sendungen gewährleistete. Wichtig zu erwähnen ist, dass in dem als für einen Dauerbetrieb ungeeigneten P-Wagen der VGF nur geringfügige bauliche Veränderungen vorgenommen worden sind. Die Raumausnutzung hätte daher auch in dieser älteren Tram-Generation noch optimiert werden können, bspw. mit Regalsystemen oder dem kompletten Umbau der Tram.

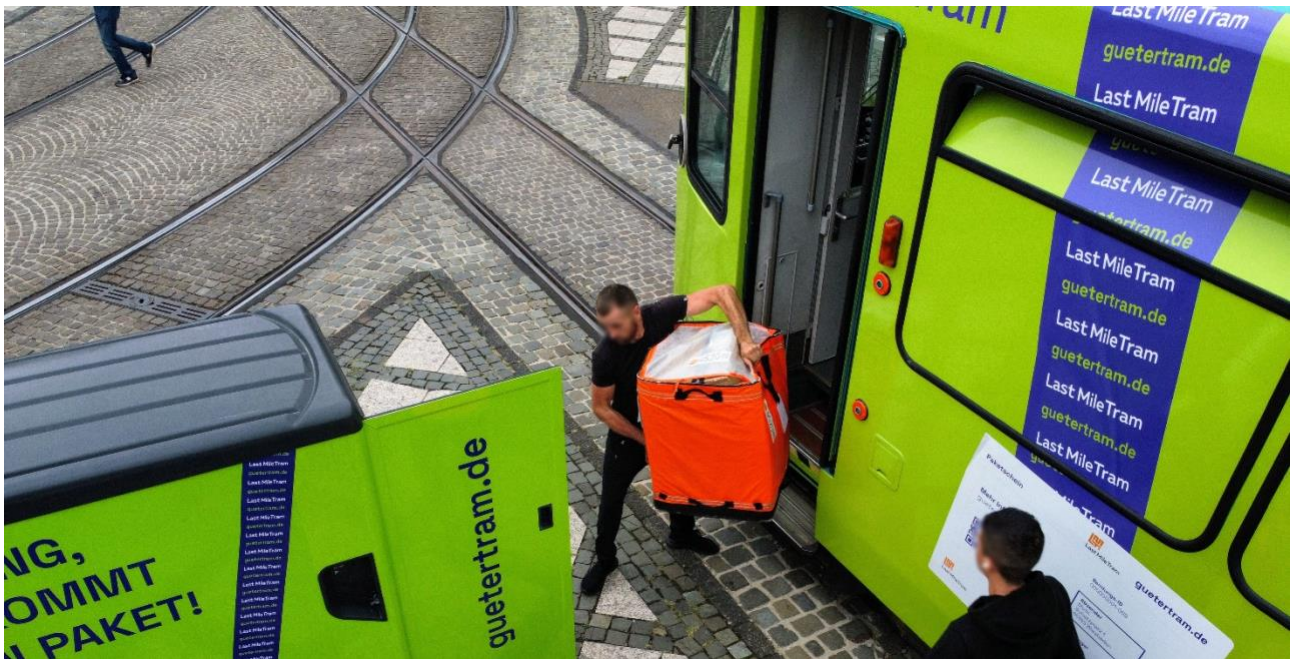


Abbildung 15 – Umladevorgang Gütertram zu Lastenrad

Die Nutzung der Transporttaschen hatte zudem direkte Auswirkungen auf die Prozesszeiten beim Be- und Entladen der Tram. Ursprünglich war für jeden Umladevorgang eine durchschnittliche Ladezeit von 15 Minuten eingeplant. Durch die Nutzung der flexiblen Transporttaschen konnte dieser Wert im operativen Testbetrieb auf etwa 7 Minuten reduziert werden können. An der Tram-Station „Stadion“, an der die Beladung der Tram erfolgte, wurde ein standardisierter Ablauf eingeführt, um die Übergabe der Sendungen vom E-Transporter in die Tram möglichst effizient zu gestalten. Der für die Be- und Entladung zuständige Transporteur stellte sicher, dass die Taschen in einer definierten Reihenfolge verladen wurden, um eine gleichmäßige Gewichtsverteilung zu erreichen und gleichzeitig einen schnellen Zugriff auf priorisierte Sendungen zu ermöglichen. Auch die Entladezeiten an den Umschlagpunkten konnten durch diese Maßnahmen optimiert werden. An der Station „Zoo“, an der ein Teil der Sendungen auf Lastenräder umgeladen wurde, wurde eine durchschnittliche Entladezeit von sieben Minuten erreicht.

Die Konfiguration des Laderaums innerhalb der Tram wurde ebenfalls angepasst, um eine maximale Transportkapazität zu erreichen. Während in der ursprünglichen Planung angedacht war, die Taschen auf Vierersitzreihen mit Bodenplatten zu sichern, stellte sich im Testbetrieb heraus, dass dieses Konzept nicht praktikabel war. Stattdessen wurde ein mehrreihiges Beladungsschema entwickelt, das eine effizientere Raumnutzung ermöglichte. Die Taschen wurden in mehreren Ebenen hintereinander gestapelt und mit speziellen Spannnetzen gesichert, um ein Verrutschen während der Fahrt zu verhindern. Diese Methode erwies sich als besonders effizient, da sie eine schnelle Entnahme der Taschen ohne aufwendige Umlagerungen ermöglichte. Zudem wurde darauf geachtet, dass die Türen der Tram jederzeit zugänglich blieben, um einen reibungslosen Be- und Entladeprozess sicherzustellen.

Die Entscheidung für die Transporttaschen erwies sich nicht nur aus logistischer, sondern auch aus wirtschaftlicher Sicht als vorteilhaft. Im Vergleich zu den ursprünglich vorgesehenen Containermodulen waren die Anschaffungskosten für die Test-Transporttaschen deutlich geringer und durch die effizienteren Umschlagsprozesse konnten auch die laufenden Betriebskosten reduziert werden. Die eingesetzten Taschen während des Pilotbetriebs wurden von Amazon Logistics ohne Kosten für die Hochschule bereitgestellt. Ein weiterer Vorteil lag in der hohen Flexibilität des Systems. Während die ONO-Containermodule nur mit bestimmten Lastenradtypen kompatibel waren, konnten die Transporttaschen ohne Einschränkungen in verschiedenen Fahrzeugtypen genutzt werden. Dies erhöhte die Skalierbarkeit des Systems erheblich und machte es für eine potenzielle Ausweitung auf andere Städte attraktiver.

Die während der Testphase gesammelten Erkenntnisse zur Nutzung der Standard-Transporttaschen von Amazon in Verbindung mit dem Prozess der LastMileTram bilden eine solide Grundlage für zukünftige Optimierungen. Eine der zentralen Fragestellungen für eine langfristige Implementierung wird sein, wie sich die Be- und Entladeprozesse weiter beschleunigen lassen, um die Verweildauer der Tram an den Umschlagpunkten weiter reduzieren zu können.

#### **2.3.1.3 Optimierung der Prozesskette und Übergabepunkte**

Während der Entwicklung des Pilotprojekts mussten die beteiligten Parteien Haftungsfragen und Risikoverteilungen verhandeln, die von ihren üblichen Geschäftsmodellen abwichen. Amazon Logistics erklärte sich im Rahmen des Projekts ausnahmsweise bereit, die Haftung für Schäden an der Straßenbahn und der Straßenbahninfrastruktur zu übernehmen, sofern diese im Zusammenhang mit dem Transport von Paketen entstehen. Diese Regelung wurde von Amazon Logistics als Ausnahme betrachtet und ausschließlich für die begrenzte Dauer des Pilotbetriebs ermöglicht.

Im Logistiksektor ist es in der Regel so, dass der Transportdienstleister für Schäden an Ausrüstung und Infrastruktur während des Transports haftet.

Für eine Skalierung des Modells wird daher angenommen, dass der Transportdienstleister (hier: VGF) künftig die Transporthaftung gemäß den gängigen Standards der Logistikbranche übernehmen müsste. Dies würde voraussichtlich eine zusätzliche Versicherung außerhalb des regulären Personenverkehrsgeschäfts der VGF erfordern.

Im Morgenzyklus erfolgte der Gefahrenübergang in mehreren Phasen:



Abbildung 16 – Knotenpunkt für die Lastenräder an der Tram-Station „Zoo“

### Übergabe an die Lastenräder

Die Sendungen wurden an die wartenden Lastenräder übergeben, die die finale Zustellung in den urbanen Zustellgebieten übernahmen.

Um die Transparenz im Transportprozess zu erhöhen und jederzeit nachvollziehen zu können, wo sich eine Sendung befindet, sollte zukünftig ein Track-&-Trace-System genutzt werden.

Die Handhabung der Sendungen innerhalb der multimodalen Lieferkette erforderte gezielte Optimierungen, um die Verweildauer an den Umschlagpunkten zu minimieren und den Umschlagsprozess effizient zu gestalten sowie manuelle Prozesse auf ein Minimum zu reduzieren. Das Verarbeiten von Sendungsbündeln in den Transporttaschen hat hier bereits einen wertvollen Beitrag leisten können.

### Tramprozess

Die Be- und Entladeprozesse wurden daher systematisch optimiert. An der Tram-Station „Stadion“ erfolgte die Verladung der Transporttaschen nach einem standardisierten Ablauf, um eine gleichmäßige Gewichtsverteilung innerhalb der Tram sicherzustellen. Der beauftragte Transporteur

übernahm die physische Handhabung der Sendungen und stellte sicher, dass die Taschen korrekt gesichert wurden, um ein Verrutschen während der Fahrt zu verhindern. Innerhalb der Tram wurde die Ladung durch spezielle Spannnetze fixiert, wodurch eine stabile und sichere Transportlösung gewährleistet wurde.

Die Entladung an den Umschlagpunkten „Zoo“ und „Betriebshof Gutleut“ wurde so organisiert, dass die Transporttaschen in einer logistisch sinnvollen Reihenfolge positioniert wurden, um die Entnahme zu beschleunigen. Die Lastenrad-Kuriere warteten bereits an den Übergabepunkten, sodass die Taschen direkt nach dem Entladen weiterverteilt werden konnten. Durch diesen optimierten Prozess konnte die durchschnittliche Entladezeit pro Haltepunkt auf etwa sieben Minuten reduziert werden, während ursprünglich von einer Verweildauer von bis zu 15 Minuten ausgegangen wurde.

Falls Pakete nicht zugestellt werden konnten, wurden diese an der Frankfurt University of Applied Sciences gesammelt und wieder an das Amazon-Depot zurückgeführt. Dieser Prozess stellte sicher, dass nicht zustellbare Sendungen effizient bearbeitet und erneut in den Logistikprozess integriert wurden.

#### **2.3.1.4 Haftungsrisiken**

Die grundsätzliche Haftungsstruktur wurde im Transportvertrag zwischen den Partnern klar definiert. Dieser Vertrag regelte ausschließlich die Teilung der Haftungsrisiken innerhalb des Politbetriebs und kann keine dauerhafte Anwendung finden.

Die vertraglich festgelegte Haftungsstruktur wurde entwickelt, um einen möglichst reibungslosen Ablauf des Transportprozesses zu gewährleisten und gleichzeitig alle Beteiligten vor unklaren oder widersprüchlichen Haftungsansprüchen zu schützen. Eine Haftungsgrenze wurde auf Basis der Vertragsverhandlungen zwischen VGF und Amazon erarbeitet. In der Testphase von LMTV wurden keine haftungsrelevanten Vorfälle dokumentiert, jedoch zeigte sich, dass insbesondere der Übergang der Haftung von Amazon an die VGF sowie weiter zum Transporteur auf die Lastenräder ein kritischer Punkt sein kann. Da dieser Übergang an den Umschlagpunkten „Zoo“ und „Betriebshof Gutleut“ erfolgt und dort in sehr kurzer Zeit zahlreiche Sendungen umgeschlagen werden, ist eine eindeutige Dokumentation dieses Prozesses erforderlich, wenn es zu einer Skalierung kommen kann.

#### **2.3.1.5 Vertragsgestaltung und Versicherungsfragen**

Die vertragliche Grundlage für LastMileTram RheinMain V generell wurde zwischen der Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main (VGF), Amazon und der Frankfurt University of Applied Sciences (FRA UAS) in einem Kooperationsvertrag festgelegt. Für die spezifischen Transportprozesse

wurde ein gesonderter Transportvertrag zwischen VGF und Amazon vereinbart. Dieser Vertrag definierte die Rechte und Pflichten der beteiligten Parteien, insbesondere in Bezug auf die Bereitstellung der Infrastruktur, die operative Durchführung des Transports, die Haftung sowie die Versicherungsbedingungen. Da das Projekt eine komplexe multimodale Lieferkette mit mehreren Schnittstellen zwischen den Akteuren umfasste, war es notwendig, klare Regelungen zu treffen, um Verantwortlichkeiten eindeutig zuzuweisen und mögliche rechtliche Streitigkeiten zu vermeiden.

Die Vertragslaufzeit für den Testbetrieb wurde vom 6. September 2024 bis zum 11. Oktober 2024 festgelegt. Falls das Forschungsprojekt verlängert werden sollte, verpflichteten sich die Partner, eine schriftliche Abstimmung vorzunehmen. Zudem enthielt der Vertrag eine Regelung, die es jeder Partei erlaubte, die Vereinbarung mit einer Frist von sieben Tagen ohne Angabe von Gründen zu kündigen. Diese Klausel diente dazu, eine hohe Flexibilität zu gewährleisten, insbesondere da es sich um ein Pilotprojekt mit zahlreichen variablen Faktoren handelte.

Die VGF übernahm im Rahmen der Verträge die Bereitstellung der Tram sowie deren Fahrbetrieb, während Amazon und der Transporteur für die gesamte logistische Abwicklung der Sendungen verantwortlich waren. Die FRA UAS hatte die Aufgabe, die wissenschaftliche Begleitung des Projekts zu gewährleisten und die Kommunikation zwischen den Partnern zu koordinieren. Zudem beauftragte die FRA UAS die VGF für die Bereitstellung der VGF Gütertram zu zuvor vereinbarten Konditionen. Die Vertragspartner vereinbarten zudem, dass die VGF lediglich für den regulären Betrieb der Tram verantwortlich war und keine Haftung für die transportierten Sendungen übernahm. Alle logistischen Prozesse, einschließlich der Beladung, Entladung und Sendungsverfolgung, lagen in der Verantwortung von Amazon und der Transporteur, wobei dies nur für die Umsetzung des Probetriebs galt.

Die finanziellen Verpflichtungen der Parteien wurden in separaten Einzelverträgen geregelt. Die FRA UAS trug die Kosten für die durch die VGF bereitgestellte Tram, einschließlich Fahrpersonal und Branding, während der Transporteur für die mit der Logistik verbundenen Aufwendungen, wie den Einsatz von Lastenrädern und den Transport per E-Transporter war. Amazon war der Logistikpartner in diesem Projekt. Die FRA UAS übernahm die wissenschaftliche Begleitung und war für die Berichterstattung gegenüber den Fördermittelgebern zuständig.

Zusätzlich wurde im Vertrag eine Begrenzung der täglichen Transportmenge festgelegt. Die Anzahl der pro Tag transportierten Versandtaschen wurde auf maximal 30 begrenzt. Diese Regelung galt für die gesamte Laufzeit des Fracht-/Transportvertrags und diente dazu, den Testbetrieb innerhalb eines klar definierten Kapazitätsrahmens zu halten. Der genaue Ablauf des Transports, von der Beladung der Tram bis zur Übergabe der Sendungen an die Lastenräder, wurde in einem Flussdiagramm des Vertrags dokumentiert.

Besondere vertragliche Regelungen wurden für die Versicherung der transportierten Sendungen getroffen, jedoch nur für den Testbetrieb. Da Amazon während des gesamten Transports in der Tram haftet, mussten alle Sendungen durch entsprechende Versicherungen von Amazon oder dem Transporteur abgesichert sein. Dies umfasste sämtliche Transportphasen, von der Abholung der Pakete im Amazon-Logistikzentrum über die Fahrt mit der Tram bis hin zur finalen Zustellung per Lastenrad. Die VGF trug keinerlei Verantwortung für Schäden oder Verluste der Sendungen, auch nicht während des Transports in der Tram. Sollte es während der Fahrt zu einer Beschädigung der Pakete kommen – etwa durch betriebsbedingte Verzögerungen, technische Störungen oder plötzliche Bremsvorgänge – lag die Verantwortung bei der VGF. Diese Regelung, die nicht dem Standard von Amazon entspricht, wurde vereinbart, um sicherzustellen, dass die VGF ausschließlich als Transportdienstleister auftritt und nicht in haftungsrechtliche Auseinandersetzungen über Sendungsverluste oder Beschädigungen verwickelt wird.

Auch für die Nutzung der Tram wurden vertragliche Vereinbarungen getroffen. Der Vertrag sieht vor, dass die Tram in einem zwischen den Partnern abgestimmten Design für den Testbetrieb beklebt werden kann. Es wurde jedoch ausdrücklich festgelegt, dass kein Amazon-Branding auf der Straßenbahn angebracht wird. Diese Regelung sollte sicherstellen, dass die Tram als Teil des öffentlichen Nahverkehrs erkennbar bleibt und keine kommerzielle Werbung eines einzelnen Partners auf dem Fahrzeug platziert wird.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Vereinbarung betrifft die Regelungen zur Presse- und Öffentlichkeitsarbeit. Alle Veröffentlichungen über das Projekt mussten zwischen den Partnern abgestimmt werden, um eine konsistente Kommunikation sicherzustellen. Dies galt sowohl für Pressemitteilungen als auch für Berichte über den Projektfortschritt. Die FRA UAS war für die Koordination der Öffentlichkeitsarbeit verantwortlich und stellte sicher, dass die Kommunikation mit Medienvertretern und Fördermittelgebern einheitlich erfolgte.

Die vertraglichen Bestimmungen gewährleisteten eine klare Trennung der Verantwortlichkeiten zwischen den beteiligten Partnern. Die wissenschaftliche Begleitung durch die FRA UAS stellt sicher, dass die gewonnenen Erkenntnisse dokumentiert und für zukünftige Entwicklungen genutzt werden können. Durch die klar definierte Haftungsstruktur sowie die detaillierte Regelung der Versicherungsverpflichtungen wurde sichergestellt, dass keine rechtlichen Unsicherheiten entstehen.

### **2.3.1.6 „Dangerous Goods“ als besondere Herausforderung**

Die Beförderung gefährlicher Güter (Dangerous Goods) unterliegt speziellen gesetzlichen Vorgaben wie z. B. dem Europäischen Übereinkommens über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR)<sup>9</sup> und betrieblichen Sicherheitsanforderungen.

Amazon stellte die Einhaltung der ADR-Vorschriften gemäß der im Vertrag mit der VGF definierten Regelungen sicher. Dies umfasste insbesondere die Sondervorschrift 188 sowie die Kapitel 3.2, 3.3, 3.4 und 3.5 des ADR-Regelwerks.

Zusätzlich wurde auf Wunsch der VGF eine weitere Einschränkung für den Transport von E-Scootern vorgenommen.

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung des Projekts wurde das Thema Gefahrgut nicht weiter untersucht, da es nicht Bestandteil der Testphase war.

Für dieses Pilotprojekt erweiterte das Projektteam die für den Straßentransport geltenden Vorschriften auf Straßenbahnen. Dies lag daran, dass die Straßenbahnen nicht in den Geltungsbereich des RID fallen, Straßenbahnen die Straßeninfrastruktur im Rahmen des ADR nutzen sowie die bestehenden allgemeinen Übereinstimmungen zwischen den ADR- und RID-Vorschriften für Gefahrgüter zur Unterstützung des intermodalen Transports bestehen. Zukünftige kontinuierliche Einsätze würden die angemessene Anwendung des ADR für den Transport gewerblicher Pakete per Straßenbahn unter Einhaltung der lokalen Gesetze erneut bestätigen müssen.

### **2.3.1.7 Einbeziehung weiterer Stakeholder**

Für die Umsetzung und mögliche Verstetigung war es erforderlich, über die unmittelbaren Projektbeteiligten hinaus weitere Akteursgruppen einzubeziehen. Im Projektverlauf wurden daher gezielt externe Stellen adressiert, die in funktionaler, rechtlicher oder planerischer Hinsicht Schnittstellen zur Projektinfrastruktur aufwiesen.

Ein wesentlicher Bezugspunkt war die Stadt Frankfurt am Main. Über das Mobilitätsdezernat, das Stadtplanungsamt und begleitende Gremien flossen strategische Überlegungen zur Logistik- und Flächennutzung in die Planung ein. Die Stadtverwaltung wurde fortlaufend über Projektinhalte informiert und begleitete die konzeptionelle Weiterentwicklung in ausgewählten Abstimmungsformaten. Im Mittelpunkt stand die Frage, wie sich das Projekt mittelfristig in bestehende oder künftige städtische Strukturen einfügen ließe – etwa im Hinblick auf Mikrodepots, die Nutzung öffentlicher Flächen oder eine Anbindung an das kommunale Logistikkonzept.

---

<sup>9</sup> ADR-Gesetz vom 30. September 1969 (BGBl. II S. 1489), zuletzt geändert durch Art. 2 der Verordnung vom 20. April 2022 (BGBl. II S. 393)

Für die operative Umsetzung waren darüber hinaus mehrere Fachstellen der Stadt relevant. Die Nutzung von Haltestellen für logistische Zwecke erforderte die Koordination mit Straßenverkehrsbehörde, Ordnungsamt und Feuerwehr. Diese wurden informell und in gezielten Rücksprachen eingebunden, um Fragen der Sondernutzung, Verkehrssicherheit und rechtlichen Zulässigkeit frühzeitig zu klären.

Auch infrastrukturelle Akteure wurden angesprochen. Im Zuge der Standortsuche für ein temporäres City-Hub erfolgten Kontakte zu Parkhausbetreibern, Immobiliengesellschaften und Quartiersentwicklern, um innerstädtische Flächenpotenziale für logistische Zwecke zu identifizieren. Insbesondere dezentral gelegene Areale mit guter Anbindung an die Radinfrastruktur rückten dabei in den Fokus.

In den Zustellgebieten selbst wurden Anwohnende, Gewerbetreibende und weitere lokale Akteure punktuell informiert und – wo möglich – in die Umsetzung eingebunden. Diese Beteiligung erfolgte informell, trug aber wesentlich zum Verständnis lokaler Anforderungen bei und lieferte Rückmeldungen zu Flächenkonflikten, Verkehrsfluss oder Lärmentwicklung. Der leise und flächenschonende Betrieb der Gütertram erwies sich dabei als wesentlicher Faktor für die positive Wahrnehmung im Quartier.

Über diese operativen Abstimmungen hinaus wurde deutlich, dass die Einbindung vielfältiger Stakeholder ein Element sozialer Nachhaltigkeit darstellt. Das Konzept der Gütertram stärkt dezentrale Logistiknetzwerke, schafft wohnortnahe Beschäftigungsmöglichkeiten und senkt strukturelle Einstiegshürden. Ergonomisch gestaltete, quartiersnahe Zustellrouten mit Cargobikes bieten insbesondere für Teilzeitkräfte, Berufsrückkehrende oder Personen ohne formalen Berufsabschluss flexible Arbeitsmodelle – ein Ansatz, der die soziale Teilhabe stärkt und Diversität im Beschäftigungssystem fördert.

Parallel dazu fanden gezielte Kontakte zu anderen Verkehrsunternehmen und Mobilitätsprojekten in der Region statt. Ziel war es, Erkenntnisse auszutauschen, technologische Schnittstellen zu identifizieren und langfristige Kooperationspotenziale zu sondieren. Dabei wurde deutlich, dass sektorübergreifende Abstimmungen nicht nur für die operative Umsetzung, sondern auch für die strategische Weiterentwicklung multimodaler Logistiksysteme von zentraler Bedeutung sind.

Für die Verfestigung des Konzepts empfiehlt sich eine strukturierte Stakeholderanalyse, die operative Rollen, Interessenlagen und Kooperationspotenziale systematisch erfasst. Nur auf dieser Grundlage lassen sich tragfähige Synergien zwischen öffentlicher Hand, Logistikdienstleistern und Zivilgesellschaft erschließen – und damit robuste Entwicklungspfade für eine zukunftsfähige, sozial eingebettete urbane Logistik gestalten.

### 2.3.1.8 Dokumentation der Situation im Umfeld der Be- und Entladestellen

Die räumlichen Bedingungen an den Be- und Entladestellen beeinflussten spürbar die Leistungsfähigkeit der logistischen Übergänge im Pilotbetrieb. Die verwendeten Standorte unterschieden sich in Lage, Zugänglichkeit und Umgebungsstruktur deutlich voneinander, was sich auf Ablauf und Geschwindigkeit des Umschlags auswirkte. Während einige Orte einen reibungslosen Prozess ermöglichten, stießen andere an ihre funktionalen Grenzen, sobald mehrere Zusteller gleichzeitig tätig waren oder die Verkehrsbelastung im Umfeld zunahm.

Die Beladung der Gütertram wurde täglich an der Tramhaltestelle „Stadion“ durchgeführt. Der Standort liegt im Bereich einer Wendeschleife am südlichen Rand des Frankfurter Stadtgebiets und wurde im Linienbetrieb der VGF nur zeitweise genutzt. Diese Rahmenbedingung machte es möglich, den Ladeprozess am frühen Vormittag ohne unmittelbare Beeinträchtigung des regulären ÖPNV abzuwickeln. Die Anlieferung erfolgte aus dem Amazon-Logistikzentrum in Raunheim durch einen elektrisch betriebenen Transporter. Zwei Mitarbeitende des Transporteurs übernahmen das Verladen der Transporttaschen in das bereitgestellte Straßenbahnfahrzeug. Aufgrund der Fahrzeuggeometrie war bei der Übergabe ein genaues Anfahren sowie eine enge Abstimmung erforderlich. Der Platz an der Haltestelle war funktional, bot aber kaum Puffer, etwa für parallele Anlieferungen oder größere Volumina. Für die Beladung im Pilotbetrieb reichte die Infrastruktur aus, für einen erweiterten Betrieb wären Anpassungen an der Flächenlogistik jedoch zu prüfen.

Die Entladung der Sendungen fand an zwei Haltepunkten statt: „Zoo“ und „Betriebshof Gutleut“. Die Haltestelle „Zoo“ liegt in einem innerstädtischen Bereich mit hohem Verkehrsaufkommen, unmittelbarer Nähe zu Kreuzungen und durchgehendem Fußgängerverkehr. Der Umschlag dort erfolgte unter Zeitdruck, da das Fahrzeug planmäßig nur kurz hielt. Mehrere Lastenräder trafen nahezu zeitgleich ein und warteten entlang des Gehwegs auf die Übergabe. Die Pakete wurden direkt aus dem Innenraum der Tram entnommen und auf die Räder verteilt. Das erforderte schnelle Abläufe auf engem Raum, wobei sich immer wieder Situationen ergaben, in denen Zusteller auf wartende Passanten, parkende Fahrzeuge oder unvorhersehbare Bewegungen im Straßenraum reagieren mussten, wobei Standardabläufe etabliert worden, die etwaige Risiken minimieren konnten. Die eingeschränkte Manövrierfläche erschwerte das parallele Arbeiten. Dennoch verlief die Entladung zuverlässig. Die ursprünglich angesetzte Umladezeit von 15 Minuten konnte im Betrieb deutlich unterschritten werden, was auf eine gut eingespielte Routine und effektive Kommunikation zwischen den Zustellern hinweist. Am zweiten Standort, der Station „Betriebshof Gutleut“, waren die Bedingungen anders. Hier stand eine interne Fläche zur Verfügung, die exklusiv für den Umschlag genutzt werden konnte. Der Zugang war kontrolliert, die Bewegungsfreiheit größer und der Ablauf ruhiger. Die Lastenräder konnten in festgelegter Reihenfolge zufahren, die Entladung erfolgte strukturiert und ohne Zeitdruck. Aus

logistischer Sicht stellte der Betriebshof eine verlässliche Alternative dar – insbesondere dann, wenn ein höheres Maß an Planbarkeit erforderlich war. Allerdings lag dieser Standort abseits der regulären Verteilgebiete. Für ein tägliches System mit engem Zeitkorridor wäre er daher nur eingeschränkt geeignet, etwa als Ergänzung oder Rückgabeort für nicht zustellbare Sendungen.

Im Verlauf des Betriebs wurden die Gegebenheiten an den Standorten fortlaufend beobachtet und dokumentiert. Die Projektpartner erfassten relevante Merkmale wie die Flächenverhältnisse, den Verkehrsfluss im Umfeld, die Erreichbarkeit für Lastenräder sowie die Interaktion mit Dritten im öffentlichen Raum. Dabei wurde deutlich, dass Aspekte wie Sichtachsen, die Möglichkeit zur temporären Flächenfreigabe oder der Schutz vor Witterungseinflüssen konkrete Auswirkungen auf die Ablaufqualität haben können. Auch die Einbindung der Standorte in bestehende Wegebeziehungen spielte eine Rolle, etwa hinsichtlich der Anbindung an Radinfrastruktur oder die Möglichkeit zur Zwischenlagerung.

Die gewonnenen Erkenntnisse flossen in die Bewertung möglicher Alternativen ein. Die Standortauswahl für einen Dauerbetrieb müsste unter Berücksichtigung dieser Erfahrungen erfolgen und sowohl logistische Anforderungen als auch stadtgestalterische Rahmenbedingungen berücksichtigen. Die Belastbarkeit der Flächen, die Möglichkeit zur Einbindung in ein geregeltes Fahrplankonzept sowie die Minimierung von Störungen im öffentlichen Raum würden dabei als entscheidende Kriterien gelten.

#### **2.3.1.9 Dokumentation des provisorischen City Hubs für die Cargobikes**

Während des Testbetriebs wurde die Tiefgarage der Frankfurt University of Applied Sciences als provisorisches City Hub genutzt. Die Fläche diente mehreren Zwecken: Zum einen wurden dort Batterien der eingesetzten E-Lastenräder gewechselt oder gelagert, zum anderen bildete sie den Start- und Rückkehrpunkt für die Nachmittagstouren sowie den Sammelort für nicht zustellbare Sendungen. Die Nutzung erfolgte auf Grundlage projektinterner Abstimmungen und stellte eine funktionale, wenn auch begrenzt geeignete Lösung dar.

Die Tiefgarage wurde nicht baulich angepasst. Sie war im Ausgangszustand nutzbar, verfügte jedoch über keine eigene Ladeinfrastruktur, keine sanitären Einrichtungen und auch nicht über organisatorische Strukturen, wie sie ein professioneller Logistikstandort aufweisen würde. Dennoch konnte sie während der vierwöchigen Pilotphase dazu beitragen, betriebliche Abläufe zu bündeln und Transporte auf der letzten Meile flexibel zu gestalten.



Abbildung 17 – Lastenrad im provisorischen Hub in der Tiefgarage

Der Hub wurde vor allem im sogenannten Nachmittagszyklus genutzt. Hierbei lieferte der Transporteur die Pakete direkt per E-Transporter an die Tiefgarage, ohne dass die Tram involviert war. Von dort aus starteten die Lastenräder in die umliegenden Zustellgebiete. Die Pakete wurden zuvor vorsortiert angeliefert und vor Ort den Touren zugewiesen. Der Ort diente ausschließlich dem Umschlag und der Vorbereitung, längere Lagerzeiten waren nicht vorgesehen. Der Be- und Entladeprozess wurde durchgehend über Scans dokumentiert, sodass alle Paketbewegungen nachvollziehbar blieben.

Ergänzend zur Tourvorbereitung wurde in einem abgetrennten Bereich der Garage ein Schließfachsystem durch die FRA UAS eingerichtet. Die nummerierten Fächer wurden zur Zwischenlagerung von Akkus genutzt. Zustellende konnten dort geladene Batterien ablegen oder entnehmen, um die Fahrzeuge für den weiteren Einsatz vorzubereiten. Die Schließfächer waren mit Stromanschlüssen ausgestattet, sodass die Akkus direkt vor Ort geladen werden konnten. Die Nutzung dieser Ladeinfrastruktur war in den täglichen Betriebsablauf eingebunden. Zustellende konnten geladene Akkus entnehmen bzw. entladene dort wieder einstecken. Die Organisation des Zugangs und die Zuweisung der Fächer wurden projektintern geregelt. Die Brandschutzrisiken wurden im Vorfeld des Testbetriebs durch die FRA UAS und die örtliche Feuerwehr bewertet.



Abbildung 18 – Schließfachsystem für Akkus im hinteren Bereich der Tiefgarage

Die eingesetzten Lastenräder arbeiteten mit wechselbaren Akkus, deren Ladung direkt im Schließfachsystem innerhalb der Garage erfolgte. Geladene Batterien wurden morgens oder mittags bereitgestellt und bei Bedarf durch das Zustellteam entnommen. Die genaue Dokumentation der Akkuwechsel war nicht Gegenstand des Projekts, wurde aber intern koordiniert. Der physische Zugang zu den Akkus war problemlos möglich, das Handling war unkompliziert.



Abbildung 19 – Blick in ein geöffnetes Schließfach mit entnehmbarer Batterieeinheit

Nach Abschluss der jeweiligen Touren kehrten die Zustellende mit den Rädern wieder an den Hub zurück. Dort wurden Rückläufer entgegengenommen, ebenfalls per Scan erfasst und in einem dafür

vorgesehenen Fahrzeug zwischengelagert. Dieser Teilprozess war Teil des abschließenden Routenknotens und schloss den täglichen Zustellzyklus. Auch diese Vorgänge fanden vollständig an der Tiefgarage der Frankfurt University of Applied Sciences statt.

Die Erfahrungen mit dem provisorischen Hub zeigten, dass bestehende Flächen kurzfristig in logistische Prozesse eingebunden werden können.

### 2.3.2 Projektpartner

Ein Projekt der



In Kooperation mit



Gefördert durch



Abbildung 20 – Hauptakteure des Projekts LastMileTram RheinMain V

Die Umsetzung von LastMileTram RheinMain V erforderte eine enge Kooperation zwischen mehreren Partnern aus Wissenschaft, öffentlicher Verwaltung und Privatwirtschaft. Jeder der beteiligten Akteure hatte spezifische Aufgaben und Verantwortlichkeiten, die im Kooperationsvertrag klar detailliert geregelt wurden. Dabei war nicht nur die technische Umsetzung der Gütertram als nachhaltige Logistikköslung im Fokus, sondern auch die wissenschaftliche Evaluierung, die regulatorische Absicherung und die Integration in bestehende Verkehrsstrukturen.

#### Frankfurt University of Applied Sciences (FRA-UAS)

Die Frankfurt University of Applied Sciences übernahm die wissenschaftliche Begleitung des Projekts und fungierte als koordinierende Instanz für die wissenschaftliche Analyse und Optimierung des Systems. Die Hochschule ist eine renommierte wissenschaftliche Einrichtung mit einem besonderen Fokus auf angewandte Forschung in den Bereichen Logistik, Mobilität und Nachhaltigkeit. Sie bringt langjährige Erfahrung in der Analyse urbaner Transportlösungen mit und hat bereits in früheren Projektphasen entscheidende Forschungsarbeiten zum Wirtschaftsverkehr durchgeführt.

Im Rahmen von LastMileTram RheinMain V lag ihr Hauptaugenmerk auf der wissenschaftlichen Bewertung der betrieblichen und wirtschaftlichen Machbarkeit der multimodalen Logistikkette. Dazu wurden umfangreiche Daten erhoben und ausgewertet, insbesondere zur Optimierung der Be- und Entladeprozesse, zur Reduzierung der Verweildauer an den Umschlagpunkten sowie zur ökologischen Bilanz des Projekts. Durch die Entwicklung eines digitalen Zwillings konnte der gesamte Transportprozess simuliert und gezielt optimiert werden. Diese Simulationen ermöglichten es, potenzielle Engpässe frühzeitig zu erkennen und Strategien zu entwickeln, um die Effizienz des Systems zu steigern.

Zusätzlich war die Frankfurt UAS für die Koordination der externen Kommunikation zuständig. Veröffentlichungen und Pressemitteilungen mussten gemäß den vertraglichen Vereinbarungen im

Vorfeld mit den Projektpartnern abgestimmt werden, um eine konsistente Außendarstellung sicherzustellen.

### **Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main (VGF)**

Die Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main (VGF) ist als Betreiberin der städtischen Straßenbahninfrastruktur ein zentraler Akteur für die Umsetzung der Gütertram. Als städtisches Nahverkehrsunternehmen betreibt die VGF ein umfassendes Straßenbahnnetz und verfügt über die notwendige technische Expertise, um den Betrieb von Sonderverkehren wie dem Gütertransport per Tram zu ermöglichen.

Im Rahmen des Projekts stellte die VGF eine für den Pakettransport geeignete Straßenbahn vom Typ P-Wagen bereit, die für die Dauer des Fracht-/Transportvertrags genutzt wurde. Die VGF war für den gesamten betrieblichen Ablauf der Gütertram verantwortlich und stellte sicher, dass der Testbetrieb reibungslos in das bestehende ÖPNV-Netz integriert wurde. Dies umfasste sowohl die Planung der Fahrzeiten als auch die Bereitstellung von qualifiziertem Fahrpersonal, das speziell für den Transportbetrieb geschult wurde.

Neben dem operativen Betrieb übernahm die VGF auch die Verantwortung für die Einhaltung aller rechtlichen Vorgaben, insbesondere der Bestimmungen der BOStrab (Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen).

### **Amazon EU S.à.r.l.**

Als weltweit führendes E-Commerce-Unternehmen mit einer hochentwickelten Logistikstruktur war Amazon für die operative Steuerung der Lieferkette mit Lastenrädern und E-Transportern, die vom Transporteur genutzt worden sind, innerhalb des Projekts verantwortlich. Das Unternehmen übernahm die Organisation des Warentransports, von der Vorsortierung der Sendungen im eigenen Logistikzentrum über den multimodalen Transport per Straßenbahn bis hin zur finalen Zustellung mit Lastenrädern. Der eigentliche Transport wurde vom Transporteur durchgeführt.

Die Pakete wurden im Verteilzentrum DHE1 in Raunheim vorsortiert und für den Transport mit der Tram vorbereitet. Anschließend erfolgte der Transport per E-Transporter zur Haltestelle „Stadion“, wo die Sendungen in die Straßenbahn verladen wurden. Durch den Einsatz der Standard-Transporttaschen von Amazon wurde sichergestellt, dass der Umschlagprozess effizient ablief und die Ladezeiten an den Haltestellen minimiert wurden.

Amazon koordinierte darüber hinaus die letzte Meile der Zustellung. Die Durchführung des Transports übernahm der Transporteur ab den Entladestellen „Zoo“ und „Betriebshof Gutleut“ mit Lastenrädern auf der letzten Meile bis zu dem Empfängern.

**Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum**

Das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum war der wesentliche Fördergeber des Projekts und stellte eine finanzielle Unterstützung in Höhe von 193.900,00 Euro für das Jahr 2024 bereit. Diese Mittel wurden gezielt eingesetzt, um die wissenschaftliche Begleitung durch die Frankfurt University of Applied Sciences zu ermöglichen, notwendige infrastrukturelle Anpassungen vorzunehmen und den Testbetrieb unter realen Bedingungen umzusetzen. Die Förderung war damit die Grundlage für die praktische Erprobung des Gütertransports per Straßenbahn und diente dazu, das Potenzial dieses Logistikkonzepts für eine dauerhafte Implementierung zu bewerten.

Die finanzielle Unterstützung war Teil einer übergeordneten Strategie des Ministeriums zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im urbanen Wirtschaftsverkehr sowie zur Förderung nachhaltiger und multimodaler Transportkonzepte. Ziel war es, den innerstädtischen Lieferverkehr effizienter und emissionsärmer zu gestalten und gleichzeitig den bestehenden Verkehrsfluss zu entlasten. Die Gütertram wurde dabei als eine potenzielle Lösung zur Senkung des motorisierten Lieferverkehrs in stark frequentierten Innenstadtbereichen betrachtet, um die negativen Auswirkungen herkömmlicher Lieferfahrzeuge – wie Staus, Lärm und Emissionen – zu reduzieren.

Zusätzlich zur finanziellen Unterstützung spielte das Ministerium eine beratende Rolle im Genehmigungsprozess. Es unterstützte die Projektpartner bei regulatorischen Fragestellungen und koordinierte Abstimmungen mit den zuständigen Behörden, insbesondere im Hinblick auf verkehrsrechtliche Anforderungen und die Integration des Testbetriebs in die städtische Infrastruktur. Darüber hinaus war das Projekt Teil der Maßnahme Nr. 5 des Logistikkonzepts der Stadt Frankfurt, die sich mit innovativen Lösungen für den urbanen Wirtschaftsverkehr befasst. Dieses Logistikkonzept bildet einen strategischen Rahmen für die Entwicklung neuer, nachhaltiger Liefermodelle, die den innerstädtischen Verkehr entlasten und die Einhaltung der städtischen Klimaziele unterstützen sollen. Die Einordnung des Projekts in diese Maßnahme unterstreicht seine Bedeutung als Pilotprojekt für eine zukunftsfähige Logistiklösung und verdeutlicht die langfristige Zielsetzung, multimodale Transportkonzepte in die bestehenden Stadt- und Verkehrsstrukturen zu integrieren.

**Zusammenarbeit und vertragliche Rahmenbedingungen**

Die Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern wurde im Kooperationsvertrag detailliert geregelt. Die Partner verpflichteten sich dazu, relevante Informationen transparent zu teilen, regelmäßige Abstimmungen durchzuführen und eine einheitliche Kommunikationsstrategie umzusetzen.

Ein besonders wichtiger Aspekt war die gemeinsame Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, die von der Frankfurt UAS koordiniert wurde. Veröffentlichungen zum Projekt mussten von allen Partnern genehmigt werden, um eine konsistente Darstellung in der Öffentlichkeit zu gewährleisten.

Durch die enge Kooperation zwischen der VGF, Amazon, der Frankfurt UAS und dem Hessischen Ministerium wurde sichergestellt, dass das Projekt aus der Perspektive der FRA UAS nicht nur technisch und wirtschaftlich umsetzbar war, sondern auch dabei half, die Bedingungen besser zu verstehen, die für eine langfristige Skalierung gegeben sein müssen. Die unterschiedlichen Expertisen der Partner ermöglichten eine ganzheitliche Betrachtung der Herausforderungen und Potenziale der Gütertram und legten damit den Grundstein für mögliche Weiterentwicklungen und eine dauerhafte Integration in die urbane Logistik.

### **2.3.3 Herausforderungen und Ansätze für die Weiterentwicklung**

Die Durchführung des Pilotbetriebs hat eine Vielzahl an Erkenntnissen hervorgebracht – sowohl technischer als auch organisatorischer Art. Über den reibungslosen Ablauf einzelner Zustelltage hinaus rückten dabei Fragen in den Vordergrund, die für eine mögliche Verstetigung oder Skalierung des Konzepts von Bedeutung sind. Nicht alle Herausforderungen waren im Vorfeld planbar, viele ergaben sich erst im konkreten Betriebsgeschehen oder durch Rückmeldungen der Beteiligten. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die identifizierten Problemfelder sowie Überlegungen, wie mit diesen im weiteren Verlauf umgegangen werden kann.

#### **Fahrplanintegration und Nutzung bestehender Infrastruktur**

Während des Pilotbetriebs konnte die Tram außerhalb der Hauptverkehrszeiten im regulären Linienbetrieb mitfahren. Diese Lösung war praktikabel, aber nicht dauerhaft übertragbar. Sollte die Gütertram in den Regelbetrieb integriert werden, müsste sie sich mit dem öffentlichen Personennahverkehr abstimmen lassen – sowohl zeitlich als auch räumlich. Haltestellen, die bislang nicht für logistische Zwecke genutzt wurden, müssten dafür ausgebaut oder angepasst werden. Der Betrieb während laufendem Fahrgastverkehr birgt nicht nur planerische Hürden, sondern auch Konfliktpotenzial im alltäglichen Ablauf.

Ein weiterer Punkt betrifft die Fahrzeuge selbst: Im Projekt kam ein PWagen zum Einsatz, der über mehrere Einstiegstreppe verfügt. Diese behinderten das Be- und Entladen, erschwerten den Einsatz von Rollcontainern und verlangten erhöhten körperlichen Aufwand beim Umladen der Taschen. Für zukünftige Einsätze wäre ein S-Wagen geeigneter, da dieser ebenerdige Einstiege bietet und den logistischen Ablauf deutlich erleichtert.



Abbildung 21 – Einstieg mit Stufen beim P-Wagen – logistischer Nachteil im Vergleich zum S- oder R-Wagen

### **Haltestellen und Umschlagsflächen im öffentlichen Raum**

Die Haltestellen „Zoo“ und „Betriebshof Gutleut“ erwiesen sich im Testbetrieb als geeignete Standorte. Dennoch wurde deutlich, dass eine dauerhafte Nutzung dieser Orte für logistische Zwecke mit Einschränkungen verbunden wäre. Am „Zoo“ etwa war der Raum knapp bemessen. Sobald mehrere Lastenräder gleichzeitig anwesend waren, kam es zu Überschneidungen mit dem Fuß- und Radverkehr. Die Abläufe funktionierten nur deshalb, weil sie eng getaktet und aufeinander abgestimmt waren. Langfristig wäre es sinnvoll, ÖPNV-Haltestellen gezielt für den Güterumschlag auszustatten. Denkbar wären markierte Ladezonen, temporäre Sperrungen während definierter Zeitfenster oder bauliche Anpassungen, die das gleichzeitige Be- und Entladen mehrerer Fahrzeuge ermöglichen. Eine enge Zusammenarbeit mit der Stadt Frankfurt wäre Voraussetzung für solche Veränderungen im Straßenraum. Grundsätzlich gilt es die Sicherheit von Fahrgästen und aller Mitarbeitenden sicherzustellen sowie kein Risiko für den reibungslosen Ablauf des Fahrplans darzustellen.

### **Technische und ergonomische Anforderungen an Fahrzeuge und Ausstattung**

Die eingesetzten Taschen waren stabil und stapelbar, jedoch nicht ideal auf die Innengeometrie des P-Wagens abgestimmt. Eine standardisierte Lösung – etwa ein modulares Ladesystem, das sich ohne zusätzliche Sicherung verstauen und entnehmen lässt – würde nicht nur Zeit sparen, sondern auch die körperliche Belastung der Zustellenden senken.

Auch der Übergang vom Fahrzeug zum Lastenrad blieb rein manuell. Für einen höheren Durchsatz müsste über rollbare oder schienengeführte Umschlaghilfen nachgedacht werden. Diese müssten sich an unterschiedliche Fahrzeugtypen anpassen lassen und ohne festen Einbau funktionieren, um flexibel eingesetzt werden zu können.

### **Rückläuferlogistik und Ausnahmesituationen**

Die Rücknahme nicht zustellbarer Pakete wurde über den bereitgestellten Van organisiert. Dieses System funktionierte im kleinen Maßstab, würde jedoch bei steigenden Paketmengen schnell an seine Kapazitätsgrenzen stoßen. Für einen dauerhaften Betrieb wären Rücklaufstationen an dezentralen Hubs denkbar, die direkt in die Tourenplanung integriert werden können.

Zudem sollte geprüft werden, wie sich Zustellungen an Samstagen oder bei kurzfristigen Ausfällen der Tram logistisch auffangen lassen. Während des Tests war der Betrieb an Wochenenden ausgesetzt; Ersatzlösungen wie der direkte Start der Lastenräder an der Hochschule waren eingeplant, blieben aber ein Provisorium. Langfristig muss auch für diese Fälle ein stabiles Betriebskonzept vorliegen.

### **Standortwahl und Anforderungen an City-Hubs**

Die Tiefgarage der Frankfurt University of Applied Sciences war als Notlösung geeignet, aber für einen dauerhaften Betrieb nicht vorgesehen. Es fehlt an skalierbarer Stromversorgung, dedizierten Aufenthaltsräumen, ausreichend Ladepunkten für Akkus über die Kapazität des Probetriebs hinaus und logistisch nutzbaren Zugängen. Für eine Weiterführung müsste ein geeigneter Standort gefunden werden, der all diese Anforderungen erfüllt und gleichzeitig gut in das städtische Liefernetz eingebettet ist.

Die Auswahl künftiger Mikrodepots sollte systematisch erfolgen. Neben Lage, Fläche und Infrastruktur spielt auch die soziale Einbindung in das Quartier eine Rolle – etwa im Hinblick auf Lärm, Verkehrsaufkommen und Akzeptanz.

### **Rechtliche Rahmenbedingungen und Zuständigkeitsverteilung**

Die Frage nach der Verantwortlichkeit für die Sendungen war im Pilotbetrieb durch die Verträge klar geregelt. Im Falle eines dauerhaften Betriebs müssten diese neu verhandelt werden. Denkbar wäre eine

Aufteilung der Verantwortung entlang der Transportabschnitte, gekoppelt an technische Nachweise und digitale Übergabeprotokolle.

Für eine Skalierung werden Standards für Genehmigungsfragen für die Nutzung von Haltestellen, öffentlichem Raum oder städtischer Infrastruktur sowie abgestimmte Verfahren benötigt, die bisher nicht vorhanden sind. Im Verlauf dieses Projekts wurde dies mit einer Einzelgenehmigung ermöglicht.

### **Qualifikation, Verlässlichkeit und Skalierbarkeit der Zustellung**

Die eingesetzten Zustellenden arbeiteten zuverlässig, waren jedoch stark vom Ablaufplan abhängig. Bereits geringe Verzögerungen konnten den gesamten Zyklus aus dem Takt bringen. Für eine größere Skalierung müssten Puffersysteme eingebaut werden – etwa in Form von Zwischenlagern, Ersatzfahrzeugen oder flexiblen Schichten.

Auch der Qualifikationsbedarf steigt, je mehr Schnittstellen entstehen. Ein dauerhaftes System benötigt Schulungen, standardisierte Übergabeprozesse und definierte Kommunikationswege – sowohl intern als auch mit städtischen Partnern.

## **2.4 Umsetzung der Forschungsfragen**

Die Forschungsfragen wurden entwickelt, um die zentralen Annahmen des Projekts im praktischen Betrieb zu überprüfen und belastbare Erkenntnisse für die Weiterentwicklung des Konzepts zu gewinnen.

**Wie können geeignete Ladungsträger zum Bündeln der Sendungen, deren Transport zu ausgewählten Übergabepunkten im Tram-Netz der VGF sowie deren Weiternutzung im Zusammenhang mit der Lastenradlogistik aus operativer, nachhaltiger und ökonomischer Sicht optimal eingesetzt werden?**

Die eingesetzten Logistiktaschen wurden von Amazon bereitgestellt. Ihre stapelbare Bauform und standardisierte Geometrie ermöglichten eine effiziente Nutzung des verfügbaren Innenraums in den umgerüsteten Fahrzeugen. In der Praxis ließen sich potentiell bis zu 70 dieser Taschen pro Fahrt sicher unterbringen, für den Testbetrieb vereinbart wurden jedoch 30 Taschen. Durch ihre einheitlichen Maße konnten Sendungen bereits im Lager gebündelt und vorab für den weiteren Transport sortiert werden, was die Umschlagzeiten erheblich reduzierte und die Übergabe an die Lastenräder vereinfachte.

Im Hinblick auf ökologische Aspekte überzeugten die Taschen durch ihre Wiederverwendbarkeit. Ihr Einsatz führte zu einer spürbaren Reduktion von Einwegverpackungen und leistete damit einen Beitrag zur Verbesserung der Umweltbilanz. Auch aus wirtschaftlicher Sicht boten sie Vorteile: Die Kompatibilität mit bestehenden Amazon-Logistiksystemen – insbesondere mit den sogenannten

Delivery Bags – erleichterte die Implementierung und reduzierte den Integrationsaufwand. Die Beladung und Entladung verliefen reibungslos, was auf die gute Abstimmung zwischen technischer Ausführung und operativen Anforderungen zurückzuführen war. Langfristig bietet die Weiterentwicklung dieser Taschen – etwa mit integrierten RFID-Tags oder modularen Trennelementen – weiteres Potenzial zur Effizienzsteigerung.



Abbildung 22 - beispielhafte Befestigung der Transporttaschen und Oversize Packages in der VGF Gütertram

### Wie können die in LMT I–IV erarbeiteten Prozesse im Realbetrieb weiter optimiert werden?

Im Anschluss an die konzeptionellen Grundlagen aus den Projektphasen LMT I bis IV wurden zahlreiche Abläufe im Pilotbetrieb konkretisiert und unter realen Bedingungen überprüft. Einen wichtigen Beitrag hierzu leistete der digitale Zwilling aus den vorherigen Projektabschnitten, mit dessen Hilfe ursprünglich verschiedene Szenarien zur Ressourcenzuweisung, Routenplanung und Beladungsdichte durchgespielt wurden. Die Simulationen gaben Aufschluss über mögliche Engpässe und zeigten auf, wie der Betrieb unter veränderten Rahmenbedingungen skaliert werden könnte. Amazon war bei der Erarbeitung dieser Prozesse in den vorherigen Projektabschnitten nicht beteiligt.

Die zu Beginn dieses Projektabschnitts geplanten Umladezeiten zwischen Tram und Lastenrad – ursprünglich mit rund 15 Minuten kalkuliert – erwiesen sich im Tagesgeschäft als deutlich geringer. Diese Abweichung unterstrich die Praxistauglichkeit der eingesetzten Schnittstellen und wies gleichzeitig auf Optimierungsspielraum bei der Personaleinsatzplanung hin. Zudem ermöglichte das dreistufige Logistikkonzept eine klare Trennung der Zuständigkeiten: Der Transport mit E-Fahrzeugen zum Startpunkt „Stadion“, der Tramabschnitt durch die VGF und die Zustellung via Lastenrad konnten unabhängig voneinander effizient gestaltet werden. Für weiterführende Anwendungen empfiehlt sich eine Ausweitung der digitalen Planungstools auf Echtzeitdaten, um Prozesse nicht nur zu analysieren, sondern unmittelbar zu steuern.

### **Wie können die Ladungsträger sicher und effizient in der Straßenbahn befestigt werden?**

Eine zuverlässige Fixierung der Logistiktaschen war Voraussetzung für einen sicheren Transport in der Straßenbahn. Die Umrüstung der Fahrzeuge umfasste dabei einfache, aber wirkungsvolle Maßnahmen wie den Einbau von Spanngurten und -netzen. Diese wurden zwischen den entpolsterten Sitzbänken der P-Wagen installiert und verhinderten ein Verrutschen der Ladung auch bei unruhigem Fahrverhalten. Hervorzuheben ist, dass auf aufwendige bauliche Eingriffe verzichtet werden konnte – die Umrüstung erfolgte im Rahmen eines Azubi-Projekts der VGF und war somit kosteneffizient umsetzbar.

Im Betriebsalltag bewährte sich das System sowohl bei der Fahrt als auch beim Be- und Entladen. Das vom Transporteur eingesetzte Logistikpersonal konnte die Taschen zügig sichern und entnehmen, was nicht nur die Sicherheit erhöhte, sondern auch die Umschlagszeiten gering hielt. Aufgrund der begrenzten Laufzeit war eine vollständige Langzeitbewertung, etwa im Hinblick auf Materialermüdung oder Wartungsaufwand, jedoch nicht möglich. Perspektivisch könnten weiterentwickelte Halterungen zum Einsatz kommen, die mit verschiedenen Taschenformaten kompatibel sind oder sich automatisch anpassen lassen. Ergänzend wäre auch die sensorische Überwachung der Sicherung denkbar, um den Betrieb weiter zu automatisieren. Zudem empfiehlt es sich, mit R- oder S-Wagen weitere Tests vorzunehmen und ggf. weitere Standardladungsträger oder Regalsysteme zu vertesten. Während des Probetriebs kam es zu keinem Zwischenfall aufgrund sich lösender Transportgegenstände. Dies spricht für die gewählten Befestigungsoptionen des Probetriebs.



Abbildung 23 - Entfernte Sitzflächen der Sitzbänke im P-Wagen, Pakete nur testweise fixiert, keine finale Befestigung im Zusammenhang mit dem Transport

### Wie kann die Entladung der Ladungsträger an den Übergabepunkten operativ erfolgen?

Die Entladung der Gütertram an den definierten Haltestellen stellte eine logistisch anspruchsvolle Aufgabe dar, die während des Pilotbetriebs erfolgreich gelöst wurde. An den Tram-Stationen „Zoo“ und "Betriebshof Gutleut" wurden klar abgegrenzte Entladebereiche eingerichtet, an denen die Taschen durch geschultes Personal zügig von der Tram auf bereitstehende Lastenräder übergeben wurden. Bis zu sechs Lastenräder standen gleichzeitig zur Verfügung, was eine parallele Abwicklung ermöglichte. Die tatsächlichen Entladezeiten unterschritten die Planvorgaben deutlich – ein Indiz für die gute Abstimmung zwischen Infrastruktur, Personal und Abläufen. Gleichzeitig traten an einzelnen Tagen kleinere Wartezeiten auf, die in einem dauerhaft laufenden System durch Pufferzeiten oder Reservefahrzeuge aufgefangen werden mussten. Die Haltestellenwahl spielte hierbei eine wesentliche Rolle: Wendeschleifen und betriebliche Flächen wie der Tram-Station "Betriebshof Gutleut" boten deutlich bessere Voraussetzungen als reguläre Straßenbahnstationen. Für künftige Anwendungen empfiehlt sich die Einrichtung fester Mikro-Hubs in unmittelbarer Nähe zu stark frequentierten

Haltepunkten. Dort ließen sich Verladetechnik, wettergeschützte Arbeitsbereiche und Energieversorgung bündeln, um einen effizienten und ergonomischen Umschlag zu gewährleisten.

### **Funktioniert die Lastenradbelieferung in den Zustellbezirken?**

Die im Projekt eingesetzten elektrischen Lastenräder übernahmen die finale Zustellung vom Übergabepunkt bis zum Kunden – eine Aufgabe, die sie mit hoher Effizienz erfüllten. Die Pakete befanden sich in sogenannten Delivery Bags. Dieses Vorgehen vereinfachte die Handhabung und senkte die Fehlerquote.

Transporteure von Amazon nutzen Lastenräder aus Micro Mobility Hubs bereits in den fünf größten Städten in Deutschland. Auch in Frankfurt sind die Lastenräder für Amazon seit Oktober 2024 unterwegs. Besonders in der dichten Frankfurter Innenstadt mit ihrer eingeschränkten Pkw-Zugänglichkeit erweisen sich Lastenräder als ideales Transportmittel. Engstellen, Fußgängerzonen oder Halteverbotsbereiche ließen sich ohne großen Aufwand passieren. Neben der logistischen Zuverlässigkeit brachte der Einsatz der Lastenräder in diesem Projekt im Vergleich zu konventionellen Diesel-Vans auch ökologische Vorteile: Es konnte aufgezeigt werden, dass sich Emissionen reduzieren lassen. Auch Geräuschemissionen und der Platzbedarf im öffentlichen Raum verringerten sich spürbar. Für eine langfristige Etablierung müssten noch weitere Faktoren analysiert werden – etwa Wartungskosten, Fahrerbindung oder die Einbindung in größere Logistiknetzwerke. Der Testbetrieb legte dafür jedoch ein solides Fundament.

### **Wie wirtschaftlich ist die VGF Cargotram im Vergleich zur konventionellen Belieferung unter Berücksichtigung der Inflation und CO<sub>2</sub>-Steuer?**

Die ökonomische Bewertung des Systems erfolgte auf Basis der im Pilotbetrieb erhobenen Daten sowie durch Vergleich mit den Kostenstrukturen herkömmlicher Zustelllogistik. Besonders ins Gewicht fiel die Nutzung der vorhandenen ÖPNV-Infrastruktur. Da keine zusätzlichen Strecken gebaut und keine neuen Fahrzeuge angeschafft werden mussten – der eingesetzte P-Wagen stammten aus dem VGF-Bestand – konnte auf Investitionsausgaben in größerem Umfang verzichtet werden. Auch der Umbau erfolgte unter Einbindung von Auszubildenden, was den finanziellen Aufwand weiter reduzierte.

Im operativen Bereich machten sich Einsparungen durch den elektrischen Antrieb der Fahrzeuge bemerkbar. Energiekosten lagen unterhalb derjenigen für Dieselbetrieb, zugleich entfielen CO<sub>2</sub>-bedingte Aufschläge, was die Wettbewerbsfähigkeit der Lösung verbesserte. Für die TCO-Betrachtung wiederum sind die ggf. höheren Einstandskosten der Fahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Diesel-Vans zu berücksichtigen. Auch externe Effekte – wie etwa geringere Belastung der städtischen Infrastruktur oder verbesserte Luftqualität – lassen sich monetär beziffern, auch wenn sie in der klassischen Wirtschaftlichkeitsrechnung oft unterbewertet bleiben.

Für eine umfassende Bewertung fehlt derzeit noch eine vollständige Auswertung der Gesamtkosten über einen längeren Zeitraum. Die Analyse der Frankfurt University of Applied Sciences (FRA UAS) legt nahe, dass multimodale Systeme mit Straßenbahnen und Lastenrädern eine wirtschaftlich tragfähige Alternative zur Zustellung mit Lieferwagen im urbanen Raum darstellen könnten.

### **Wie können Spitzen und Schwankungen im Sendungsvolumen aufgefangen werden?**

Die Fähigkeit eines Logistiksystems, flexibel auf sich ändernde Volumina zu reagieren, ist entscheidend für seine Belastbarkeit im Alltag. Im Projektabschnitt LMT V wurde dieses Thema gezielt durch den Einsatz eines digitalen Zwillings adressiert. Verschiedene Szenarien – etwa Black Friday, Schlechtwettertage oder kurzfristige Lieferspitzen – wurden simulativ durchgespielt, um zu analysieren, welche Stellschrauben besonders wirkungsvoll sind. Dabei zeigte sich, dass insbesondere die flexible Anpassung der eingesetzten Ressourcen entscheidend dafür war, wie gut das System auf variable Bedingungen reagieren konnte.

So ließen sich etwa Lastenräder je nach Bedarf flexibel zuteilen und auch zusätzliche Tramfahrten wären theoretisch möglich gewesen. Drei Umläufe pro Tag galten als realistisch, auch wenn im Pilotbetrieb lediglich eine Fahrt durchgeführt wurde. In Kombination mit adaptiven Ladefenstern und der Möglichkeit, kurzfristig auf alternative Haltestellen auszuweichen, entstand ein belastbares System, das gut auf Volumenschwankungen reagieren konnte.

Ergänzt werden könnte dieser Ansatz künftig durch digitale Vorhersagemodelle, die auf Echtzeitdaten aus dem Warenwirtschaftssystem basieren. So ließen sich nicht nur kurzfristige Überlastungen vermeiden, sondern auch freie Kapazitäten effizient ausschöpfen. In Hinblick auf saisonale Schwankungen oder Sonderaktionen wäre dies ein vielversprechender Weg zur Stabilisierung des Betriebs.

### **Wie lassen sich auch größere Sendungen („Sperrgut“) in der VGF Cargotram transportieren?**

Die Grundidee bestand darin, modulare Innenraumelemente in der Tram zu schaffen, die sich an unterschiedliche Ladungsgrößen anpassen lassen. Zukünftig könnten flexible Haltevorrichtungen zum Einsatz kommen, die auch größere oder unregelmäßig geformte Gegenstände sicher fixieren. Die im Pilotbetrieb transportierten Sperrgut-Sendungen ließen sich bereits problemlos integrieren.

An den Übergabepunkten wäre der Einsatz mobiler Rampen, Hublifte oder Rollplattformen denkbar, um das Handling sperriger Sendungen zu erleichtern. In der Praxis könnten etwa E-Bikes, größere Möbelstücke oder Sammelbestellungen aus dem B2B-Segment auf diese Weise zugestellt werden.

Dies würde nicht nur neue Kundengruppen erschließen, sondern auch die Auslastung der Fahrzeuge verbessern.

Allerdings sind technische Anpassungen erforderlich – sowohl an den Fahrzeugen als auch an der Entladeinfrastruktur. Auch haftungs- und versicherungsrechtliche Fragen müssten im Vorfeld geklärt werden, insbesondere bei besonders empfindlicher oder wertvoller Ware.

Aus logistischer Sicht zeigt sich jedoch: Das System besitzt grundsätzlich die Flexibilität, auch für Sonderformate geöffnet zu werden, sofern entsprechende Rahmenbedingungen geschaffen werden.

Die Auswertung der Forschungsfragen verdeutlichte, welche Elemente des Konzepts bereits zuverlässig im Realbetrieb funktionierten. Gleichzeitig wurde erkennbar, an welchen Stellen weitere Anpassungen notwendig sind – sei es technisch, organisatorisch oder strukturell.

#### 2.4.1 Absolutergebnisse des Probetriebs und Kennzahlen des Projektabschnitts

Die Erfassung der Absolutzahlen für die Bereiche Logistik, Technologie, Ökologie und Ökonomie waren aufgrund der sehr verkürzten operativen Projektlaufzeit nur mit starken Einschränkungen möglich. In der Folge werden daher die Ergebnisse aufgezeigt, die während der Projektphase im September und Oktober 2024 erarbeitet werden konnten.

##### 2.4.1.1 Liefermengen und -daten der Lastenradtouren des Transporteurs

Tabelle 2 - Tourdaten von des Transporteurs für den Probetrieb

| Liefertage | Anzahl Touren<br>(absolut über alle Liefermodi hinweg) | Ø Tourendauer<br>in Minuten | Ø Tageskilometer<br>über zwei Touren | Ø Anzahl Pakete | Ø Paketgewicht<br>in kg | Ø Zustellquote<br>in % |
|------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------|-------------------------|------------------------|
| 24         | 224                                                    | 205,38                      | 41,74                                | 67              | 0,47                    | 97,86                  |

Die Absolutangaben aller Touren zeigen, dass das Potential der Lastenräder in Bezug auf die Tourenlänge und -dauer in einem hohen Maß genutzt werden konnten. Die Hohe Zustellquote entspricht dem Industriestandard. Dies deutet darauf hin, dass die Umstellung der Regelabläufe weder im Zusammenhang mit der Gütertram noch dem probeweisen City Hub problematisch gewesen sind. Zusätzlich erfasst werden konnte die Anzahl von ca. sieben Oversize-Paketen je Tour. Diese übergroßen Pakete werden nicht in den Delivery Bags verstaut und müssen gesondert im Lastenrad sowie der Gütertram gelagert werden. Auch das Handling dieser Pakete hat sich als unproblematisch erwiesen.

Mit ca. 18 Pakete je Delivery Bag wurde die Möglichkeit des Bündelns von Sendungen sehr gut genutzt. Die Reduzierung der manuellen Handlingvorgänge (manuelles Verräumen bei jedem Gefahrenübergang inkl. Einzelscan zur Dokumentation und Beweissicherung) hat erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der gesamten Prozesskette.

#### 2.4.1.2 Beispielhafte Daten eines ONO-Lastenrads

Tabelle 3 - Daten des Lastenrads "ONO" im Zusammenhang mit dem Probetrieb

| Liefertage | Anzahl Touren | Ø Geschwindigkeit in km/h | Ø Anzahl Türöffnungen | Ø Energieverbrauch in kWh |
|------------|---------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 24         | 48            | 13,75                     | 72                    | 980                       |

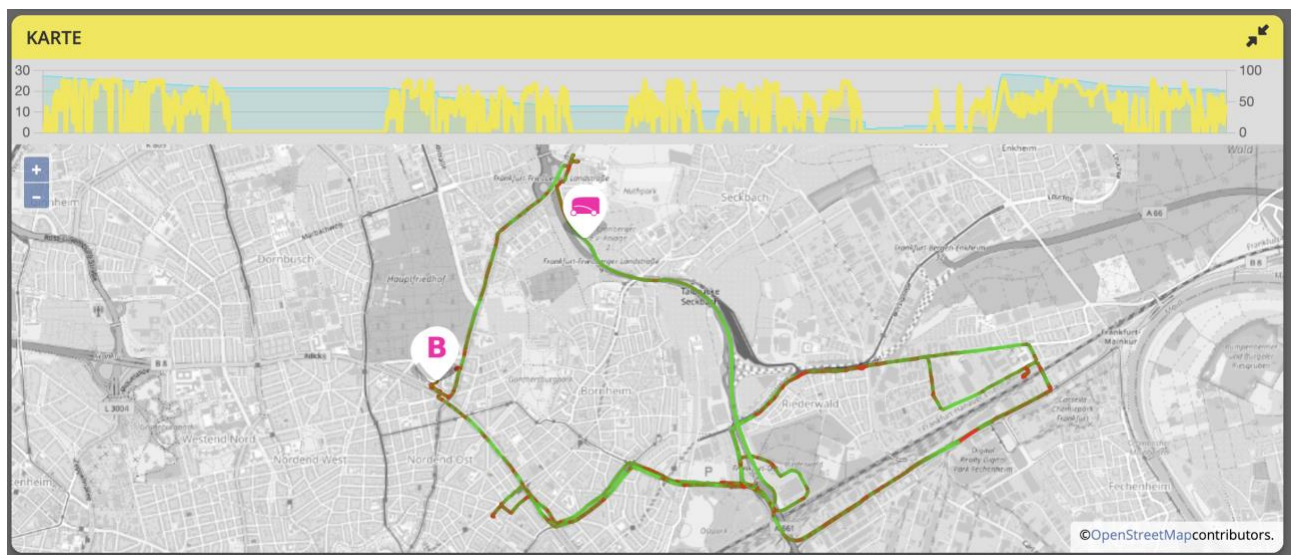


Abbildung 24 – Modellhafter Fahrtverlauf einer möglichen Route in der Frankfurter Innenstadt einer "ONO" mit Verlauf der Akkuladung (Abbildung zeigt bewusst keine operative Route, sondern eine Probetour)

Das Lastenrad „ONO“ wurde als Testlastenrad im Zuge des Probetriebes eingesetzt und ausgewertet. Ziel der Auswertung waren u.a. ein besseres Verständnis für Reichweiten und Geschwindigkeiten, Erkenntnisse zur Ergonomie sowie zur Notwendigkeit eines E-Antriebs. Die Ergebnisse zeigen, dass die Stärke des E-Antriebs von den Mitarbeitenden in der Zustellung vollumfänglich genutzt worden ist, meist mit der höchsten Unterstützungsstufe. Dies ermöglicht ein sehr rasches Anfahren nach erfolgreichem Stopp. Die geringe Durchschnittsgeschwindigkeit spricht für kurze Distanzen. Das Tourengebiet scheint daher gut gewählt und in die Gesamtprozesslandschaft integriert worden zu sein. Die Limitierung der Höchstgeschwindigkeit eines E-Pedelecs ohne Verpflichtung zu Versicherung und Führerschein bei 25 km/h erscheint auch auf Basis der Datenlage als ausreichend für einen Dauereinsatz. Das Raumvolumen von 2 Kubikmetern der „ONO“ sowie die Zugangsmöglichkeiten über zwei Türen (je eine Tür seitlich rechts sowie hinten mittig) erscheinen ausreichend; die seitliche Tür wird im operativen

Betrieb deutlich häufiger verwendet, als die hintere Tür (Verhältnis 59 zu 13 zu Gunsten der seitlichen Tür). Die Sicherung des Fahrzeugs gegen Entwendung mittels RFID-Chip wird nur in einem geringen Maße genutzt. Zwar liegt der Wert für die An- und Abmeldungen im Durchschnitt bei 21/Tour, jedoch liegt die Varianz in einem Bereich von sieben bis 50. Diese Werte deuten darauf hin, dass eine Schulung des Personals ausschlaggebend für die Sicherheit in Bezug auf mögliche Diebstähle an stehenden Fahrzeugen ist. Jeder Abmeldevorgang löst die elektronische Sicherung der Türen sowie des Fahrzeugs aus. Auf diese Weise können weder Fahrzeug entwendet noch Türen von Dritten geöffnet werden.

### 2.4.1.3 Prozessdaten der VGF Gütertram

Tabelle 4 - Prozessdaten VGF Gütertram Woche 1

| Tag      | Gutleut<br>(Abfahrt) | Stadion<br>(Ankunft) | Beginn<br>Beladung | Abschluss<br>Beladung | Stadion<br>(Abfahrt) | Zoo<br>(Ankunft) | Beginn<br>Entladung | Abschluss<br>Entladung | Zoo<br>(Abfahrt) | Gutleut<br>(Ankunft) | Beginn<br>Entladung | Abschluss<br>Entladung |
|----------|----------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|------------------|---------------------|------------------------|------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| 16.09.24 | 09:40                | 10:05                | 10:07              | 10:20                 | 10:30                | 11:00            | 11:01               | 11:05                  | 11:06            | 11:25                | 11:26               | 11:31                  |
| 17.09.24 | 09:40                | 10:04                | 10:05              | 10:20                 | 10:28                | 10:50            | 10:50               | 10:59                  | 11:00            | 11:30                | 11:31               | 11:35                  |
| 18.09.24 | 09:40                | 10:01                | 10:03              | 10:13                 | 10:24                | 10:51            | 10:51               | 11:00                  | 11:01            | 11:22                | 11:23               | 11:27                  |
| 19.09.24 | 09:40                | 10:00                | 10:02              | 10:12                 | 10:17                | 10:45            | 10:46               | 10:52                  | 10:53            | 11:18                | 11:20               | 11:23                  |

Tabelle 5 - weitere Prozessdaten der VGF Gütertram im Projektverlauf mit nur einem Stopp an der Station „Zoo“

| Tag      | Beginn<br>Beladung | Abschluss<br>Beladung | Stadion<br>(Abfahrt) | Zoo<br>(Ankunft) | Beginn<br>Entladung | Abschluss<br>Entladung | Zoo<br>(Abfahrt) | Rückkehr<br>Stadion |
|----------|--------------------|-----------------------|----------------------|------------------|---------------------|------------------------|------------------|---------------------|
| 23.09.24 | 10:00              | 10:10                 | 10:30                | 11:03            | 11:04               | 11:09                  | 11:20            | 12:00               |
| 24.09.24 | 09:56              | 10:06                 | 10:07                | 10:37            | 10:38               | 10:48                  | 10:50            | 11:25               |
| 25.09.24 | 09:56              | 10:07                 | 10:08                | 10:42            | 10:43               | 10:53                  | 11:02            | 11:40               |
| 26.09.24 | 10:00              | 10:12                 | 11:04                | 11:39            | 11:40               | 11:55                  | 12:30            | 13:05               |
| 27.09.24 | 10:00              | 10:13                 | 10:30                | 11:07            | 11:08               | 11:18                  | 11:30            | 12:15               |
| 30.09.24 | 10:05              | 10:15                 | 10:30                | 11:05            | 11:06               | 11:11                  | 11:17            | 11:57               |
| 01.10.24 | 10:25              | 10:40                 | 10:45                | 11:20            | 11:20               | 11:27                  | 11:30            | 12:06               |
| 02.10.24 | 10:05              | 10:20                 | 10:48                | 11:26            | 11:27               | 11:37                  | 12:10            | 12:45               |
| 03.10.24 | ---                | ---                   | ---                  | ---              | ---                 | ---                    | ---              | --                  |
| 04.10.24 | 09:50              | 10:00                 | 10:01                | 10:35            | 10:35               | 10:44                  | 10:45            | 11:13               |

Die Beladung der VGF Gütertram an der Station „Stadion“ erfolgte im Laufe des Betrachtungszeitraums stets zwischen 9:56 Uhr und 10:25 Uhr. Im Projekt wurde gemeinsam beschlossen, in den ersten Tagen fokussiert reibungslose Betriebsabläufe sicherzustellen. Daher wurden zunächst weniger Daten erhoben. Der Austausch der Daten wurde hauptsächlich via E-Mail sichergestellt.

Der Unterschied zwischen Tabelle 4 und 5 liegt hauptsächlich in der Nutzung des Betriebshofs „Gutleut“ als weiteren Übergabepunkt. Dies war nicht uneingeschränkt über die gesamte Dauer des Pilotbetriebs möglich, da Baumaßnahmen und damit verbundene Streckensperrungen bzw. -umleitungen den Betrieb der VGF Gütertram zum Teil nur sehr stark eingeschränkt möglich gemacht haben. Diesen Umstand gilt es grundsätzlich bei allen weiteren Forschungsvorhaben sowie einer möglichen Überführung in einen Dauerbetrieb oder einer Adaptierung an anderem Ort zu berücksichtigen. Der Geschäftszweck der VGF als zentraler Anbieter für den ÖPNV in der Region Frankfurt am Main und Bestandteil des Rhein-Main-Verkehrsverbunds (RMV) sollte rechtlich und regulativ geprüft werden, bevor Logistikanwendungen in einem rechtssicheren und durch externe Dritte

abgesicherten Rahmen stattfinden können. In diesem Zusammenhang sollten auch Kriterien definiert werden, nach denen ÖPNV oder Logistik Vorrang eingeräumt werden kann.

#### 2.4.1.4 Abgeleitete Ergebnisse aus den Realdaten

Tabelle 6 - Kilometerleistungen der Verkehrsträger der multimodalen Logistikkette des Projekts LMT V

| Liefertage | Gefahrene Kilometer Lastenräder | Gefahrene Kilometer VGF Gütertram (Äquivalent Transporter) | Gefahrene Kilometer E-Transporter Transporteur Anlieferung Stadion | Gefahrene Kilometer E-Transporter Transporteur City Hub Samstage | Gefahrene Kilometer E-Transporter Transporteur innerstädtisch | Prozessbedingte Kilometer E-Transporter für Notfallplan |
|------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 24         | 2.191                           | 336                                                        | 444                                                                | 134                                                              | 504                                                           | 313                                                     |

Auf Basis der (zum Teil hochgerechneten und geglätteten) Daten zu den Kilometerleistungen der drei Verkehrsträger VGF Gütertram, Lastenrad und E-Transporter ergeben sich 3.922 Kilometer, die ohne den Pilotbetrieb mit konventionellen Fahrzeugen mit Dieselantrieb gefahren worden wären. Dadurch ergibt sich ein potentieller negativer CO<sub>2</sub>-Fußabdruck in Höhe von 706 kg für den gesamten Betrachtungszeitraum. Wichtig zu erwähnen ist, dass dies inkl. des umgesetzten Notfallplans entstanden ist.

#### 2.4.2 Szenarienvergleich

Aufgrund der kurzen Laufzeit des Projekts im operativen Betrieb wurden die aufgezeigten Daten als Grundlage verwendet, um einen Szenarienvergleich zu erarbeiten. Dabei wurden drei Zustellszenarien durch die FRA UAS konzipiert und verglichen, die direkt abgebildet in der Realanwendung nachvollzogen werden konnten, um die Wirtschaftlichkeit sowie ökologische Auswirkungen multimodaler Logistikmodelle für den urbanen Raum zu bewerten. Grundlage der Analyse waren die realen Tourdaten von Amazon bzw. dem Transporteur und der VGF. Alle weiteren Annahmen, bspw. zu Personal, Fahrzeugkosten, etc., sind modellbasierte Kostenkalkulationen der FRA UAS.

Die Vergleichsbasis bildeten 3.000 Sendungen pro Tag.

#### Szenario A: Zustellung direkt vom Lager mit Diesel- oder E-Transportern

- 3.000 Pakete/Tag
- 24 Liefertage/Monat
- 20 Fahrzeuge mit je 150 Paketen pro Tour
- 80 km durchschnittliche Tagesfahrleistung pro Fahrzeug

- Personalkosten:  $8 \text{ h} \times 12,82 \text{ €}^{10} = 102,56 \text{ EUR/Tag/Fahrzeug}$ , in Summe 2.051,20 EUR/Tag
- Leasingkosten netto: 900,- EUR/Monat (Diesel), 950,- €/Monat (E-Transporter)
- Kraftstoff/Stromkosten netto: 1,47 EUR/l / 0,29 EUR/kWh
- Angenommene Strommenge/100 km: 20 kWh
- Angenommene Dieselmenge/100 km: 9l
- TCO Diesel-Touren/Tag: 3.012,88 EUR
  - Fahrzeugkosten Leasing:  $(900 \times 20)/24 = 750,- \text{ EUR}$
  - Personalkosten: 2.051,20 EUR
  - Kraftstoffkosten:  $20 \times 80 \times 0,09 \times 1,47 = 211,68 \text{ EUR}$
- TCO Elektro-Touren/Tag: 2.935,66 EUR
  - Fahrzeugkosten Leasing:  $(950 \times 20)/24 = 791,66 \text{ EUR}$
  - Personalkosten: 2.051,20 EUR
  - Stromkosten:  $20 \times 80 \times 0,2 \times 0,29 = 92,80 \text{ EUR}$
- CO<sub>2</sub>-Emissionen lokal: 288 kg/Tag (Diesel), 0 kg/Tag (E) (Annahmen der FRA UAS)

Im ersten Szenario wird das klassische Zustellmodell abgebildet: Der beispielhafte Versand erfolgt direkt vom Amazon-Verteilzentrum DHE1 in Raunheim mit konventionellen Transportern – entweder mit Diesel- oder Elektroantrieb. Das tägliche Sendungsvolumen beträgt 3.000 Pakete, die von 20 Fahrzeugen übernommen werden. Jedes Fahrzeug fährt dabei rund 80 Kilometer pro Tag. Sowohl die Leasingkosten als auch die Energie- und Personalkosten wurden in die Berechnung einbezogen. Die Gesamtkosten pro Tag belaufen sich auf etwa 3.012,88 Euro im Fall von Dieselfahrzeugen und 2.935,66 Euro bei E-Transportern. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen bei der Dieselvariante bei 180 g CO<sub>2</sub>/km bzw. in Summe bei 288 Kilogramm/Tag, bei der elektrischen Variante fällt dieser lokal nicht an. Obwohl letztere emissionsfrei ist, bleibt die Lösung vergleichsweise teurer als die Dieselvariante, verkehrsintensiv und flächenaufwendig – vor allem in dicht bebauten Stadtgebieten mit eingeschränkten Ladezonen.

### Szenario B: E-Lkw + Gütertram + Cargobikes

- 3000 Pakete/Tag

---

<sup>10</sup> Der Stundensatz orientiert sich am gesetzlichen Mindestlohn in Deutschland ab dem 1. Januar 2025 und ist hier nur beispielhaft verwendet

- E-Lkw transportiert 1.000 Pakete pro Tour, 3 Gesamttouren/Tag erforderlich
- 24 Liefertage/Monat
- Leasingkosten E-Lkw: 1.800,- EUR/Monat
- Tagesfahrleistung: 80 km
- Stromkosten: 0,29 EUR/kWh netto
- Angenommene Lkw-Strommenge/100 km: 60 kWh
- Gütertram-Betriebskosten: 2.000,- EUR/Tag
- 20 Cargobikes à 450,- EUR/Monat netto
- Angenommene Cargobike-Strommenge/100 km: 3 kWh
- Gesamtpersonalkosten für Lastenradtouren und Lkw-Tour: 2.102,48 EUR
- TCO/Tag: 4.572,49 EUR
  - Personalkosten: 2.102,48 EUR
  - Leasingkosten Lkw:  $1.800/24=75$ , - EUR
  - Mietkosten Cargobikes:  $(450 \times 20)/24=375$ , - EUR
  - Stromkosten:  $(80 \times 0,6 \times 0,29) + (20 \times 35 \times 0,03 \times 0,29)=20,01$  EUR
  - Cargotramkosten: 2.000,- EUR
- CO<sub>2</sub>-Emissionen lokal: 0 kg/Tag

Szenario B kombiniert verschiedene Verkehrsträger zu einem multimodularen Ansatz: Ein elektrisch betriebener Lkw bringt die vorsortierten Pakete vom Verteilzentrum zur Haltestelle „Stadion“. Dort werden sie in die Gütertram verladen, die sie zu den Entladestellen „Zoo“ und „Betriebshof Gutleut“ bringt. Von dort übernehmen Lastenräder die Zustellung in der Innenstadt. Die Kosten für Tram, E-Lkw, Personal sowie 20 Cargobikes summieren sich auf rund 4.572,49 Euro pro Tag. Durch den Einsatz ausschließlich elektrisch betriebener Fahrzeuge entstehen keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die verschiedenen Komponenten des Szenarios greifen gut ineinander und erlauben auch Rückläufe oder Zwischenlagerung bei Bedarf.

### **Szenario C: City-Hub + Cargobikes (ohne Tram)**

- 3000 Pakete/Tag
- 24 Liefertage/Monat
- Tagesfahrleistung Lkw: 50 km

- Pakete werden per E-Lkw mit Anhänger an einen zentralen City-Hub geliefert
- Leasingkosten E-Lkw mit Anhänger: 2.450,- EUR/Monat
- Betriebskosten Hub: ca. 250,- EUR /Tag (Multi-Use-Anteil)
- 20 Cargobikes à 450,- EUR/Monat netto
- Angenommene Lkw-Strommenge/100 km: 80 kWh
- Gütertram-Betriebskosten: 2.000,- EUR/Tag
- Angenommene Cargobike-Strommenge/100 km: 3 kWh
- Gesamtpersonalkosten für Lastenradtouren und Lkw-Tour: 2.102,48 €
- TCO: 2.591,34 EUR
  - Personalkosten: 2.102,48 EUR
  - Stromkosten:  $(50 \times 0,8 \times 0,29) + (20 \times 35 \times 0,03 \times 0,29) = 11,78$  EUR
  - Leasingkosten Lkw:  $2.450/24 = 102,08$ ,- EUR
  - Mietkosten Cargobikes:  $(450 \times 20)/24 = 375$ ,- EUR
- CO<sub>2</sub>-Emissionen lokal: 0 kg/Tag

Das dritte Szenario (C) setzt auf ein innerstädtisches Mikro-Depot als Übergabepunkt. Die Pakete werden per E-Lkw angeliefert und dann direkt mit Lastenrädern verteilt. Die Berechnung beruht auf den Kosten für den Betrieb des Hubs, für die Cargobikes und das Zustellpersonal. Mit einem Tagesaufwand von ca. 2.591,34 ist dieses Modell die günstigste Variante. Auch hier entstehen keine lokalen Emissionen. Die Voraussetzung für dieses Szenario ist jedoch das Vorhandensein geeigneter Flächen im städtischen Raum, was sich vielerorts schwierig gestalten kann. Rückführlogistik ist möglich, aber nicht ohne zusätzlichen organisatorischen Aufwand.

Tabelle 7 – Vergleich der Zustellvarianten

| <b>Szenario</b>    | <b>TCO/Tag (€)</b> | <b>CO<sub>2</sub>-<br/>Emissionen<br/>(kg/Tag)</b> | <b>Bemerkung</b>                                                                          |
|--------------------|--------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>A (Diesel)</b>  | 3.012,88 EUR       | 288                                                | Zweithöchste Kosten, schlechteste Klimabilanz, höchster Verkehrsaufwand und Flächenbedarf |
| <b>A (Elektro)</b> | 2.935,66 EUR       | 0                                                  | Dritthöchste Kosten, emissionsfrei, höchster Verkehrsaufwand und Flächenbedarf            |
| <b>B</b>           | 4.572,49 EUR       | 0                                                  | Skalierbar, effizient, mit Retourenmöglichkeit, geringerer Flächenbedarf                  |
| <b>C</b>           | 2.591,34 EUR       | 0                                                  | Günstigste Lösung, ideal bei vorhandenen Flächen                                          |

Die drei untersuchten Zustellvarianten unterscheiden sich also in ihrer Struktur, beim Einsatz der Fahrzeuge, in der Anzahl der nötigen Übergabepunkte sowie im Raumbedarf. Während Szenario A auf bestehende Standards zurückgreift, entwickeln B und C neue Lösungsansätze, die auf Integration, Verkehrsvermeidung und elektrifizierte Zustellung setzen.

#### 2.4.3 Bewertung der Wirtschaftlichkeit aus der Perspektive der FRA UAS

Die klassische Transporterzustellung mit Dieselfahrzeugen ist nicht nur kostenintensiv, sondern, im Vergleich zu den weiteren aufgezeigten Lieferszenarien, auch ökologisch wenig tragfähig. Selbst bei elektrifizierter Antriebstechnik verbleiben hohe laufende Ausgaben, insbesondere durch den Personal- und Fahrzeugbedarf. Hinzu kommen infrastrukturelle Belastungen durch den täglichen Einsatz zahlreicher Fahrzeuge im Stadtgebiet – sowohl hinsichtlich Flächenverbrauch als auch verkehrlicher Auswirkungen.

Die multimodalen Szenarien bieten essentielle Mehrwerte in Bezug auf die Emissionen sowie die Belastung der Innenstädte mit größeren Transportfahrzeugen über einen längeren Zeitraum je Liefertag. Szenario C – die Kombination aus E-Transporter und City-Hub mit Cargobikes – bietet aus der Perspektive der FRA UAS die niedrigsten Tageskosten und ist vollständig lokal emissionsfrei. Diese Variante ist besonders dort attraktiv, wo geeignete Mikrodepots im innerstädtischen Raum verfügbar sind. Einschränkungen bestehen vor allem bei der Rückführungslogistik und Reichweite der Cargobikes, was potenziell zusätzliche Umläufe erforderlich macht.

Szenario B, das auf die zusätzliche Einbindung der Gütertram setzt, liegt im Tageskostenvergleich über allen anderen Szenarien, bietet jedoch deutliche strukturelle Vorteile: Das System ist modular erweiterbar, kann flexibel an unterschiedlichen Haltepunkten operieren und eignet sich auch für

Rücktransporte. Die Nutzung bestehender Infrastruktur – etwa Schienenwege, Tram-Haltestpunkte und vorhandenes Personal – generiert Synergieeffekte und eröffnet langfristige Skalierungsmöglichkeiten.

Der durchgeführte Testbetrieb lieferte mehrere Anhaltspunkte für wirtschaftliche Effizienzgewinne:

1. Reduktion des täglichen Bedarfs an (E-)Transportern durch Verlagerung auf die Schiene,
2. verkürzte Betriebszeiten durch optimierte Umschlagprozesse an den Haltestellen,
3. bessere Auslastung durch gebündelte Vortransporte mit der Tram.

Besonders aussagekräftig sind zudem die ausgewerteten Prozesszeiten der Gütertram: Die durchschnittliche Beladezeit an der Station „Stadion“ betrug ca. 12 Minuten, die Entladung am Zoo erfolgte in nur 6 bis 7 Minuten. Damit wurden die ursprünglich kalkulierten Zielwerte teilweise deutlich unterschritten. Die Gesamtumlaufzeit pro Tour – inklusive Transportphase – lag zwischen 70 und 90 Minuten, was für eine hohe zeitliche Planbarkeit und operative Skalierbarkeit spricht.

Für eine vertiefte Bewertung der Wirtschaftlichkeit – etwa im Sinne einer Total-Cost-of-Ownership-Analyse (TCO) – wird empfohlen, in einem Folgeprojekt belastbare Vergleichsrechnungen zu erheben. Dies sollte auch die Effekte von Skalierung im Dauerbetrieb und möglichen Kostenverschiebungen durch emissionsbasierte Besteuerung berücksichtigen. Dabei erscheint es sinnvoll, neben den hier getesteten Modellen (B und C) auch Hybridansätze zu prüfen.

Aus rein betriebswirtschaftlicher Sicht bietet Szenario C das günstigste Modell, während Szenario B unter infrastrukturellen und strategischen Gesichtspunkten überlegen sein kann. Beide Konzepte stellen tragfähige Alternativen zur klassischen Transporterlogistik dar und bilden eine belastbare Grundlage für politische Entscheidungsprozesse sowie die Weiterentwicklung städtischer Logistikstrategien.

#### **2.4.4 Sozioökologische Auswirkungen auf Beschäftigung und Teilhabe**

Die Organisation städtischer Logistiksysteme prägt auch die Arbeitswelt, insbesondere im Hinblick auf Beschäftigungsstruktur, Arbeitsbedingungen und soziale Teilhabe. Unterschiedliche Logistikmodi bringen dabei sehr verschiedene Anforderungen und Potenziale mit sich – nicht nur technisch, sondern auch gesellschaftlich.

#### **Multimodale Stadtlogistik mit Cargobikes**

Im multimodalen Betrieb mit Cargobikes werden für das beschriebene Szenario im Projekt „LastMileTram RheinMain V“ zwischen vier bis sechs Fahrende benötigt, um die täglichen Liefermengen auf der letzten Meile zu verteilen. Diese Anzahl kann variieren, wenn Potentiale zur Effizienzsteigerung genutzt werden. Die Touren sind kleinteiliger strukturiert als im klassischen Lieferverkehr und erlauben eine feinere Staffelung der Arbeitszeiten. Daraus ergibt sich ein hohes Maß

an Flexibilität, das vor allem für Menschen mit begrenzter zeitlicher Verfügbarkeit attraktiv ist – zum Beispiel für Studierende, Eltern mit Betreuungspflichten oder Menschen, die eine Nebentätigkeit suchen.

Die Tätigkeit selbst ist körperlich in geringem Maße fordernd und bietet einen Kontrast zur vorherrschenden sitzenden Erwerbsarbeit. Für viele stellt das ein gesundheitlich wertvolles Gegengewicht dar. Gleichzeitig sind die Einstiegshürden gering: Für das Fahren eines Cargobikes mit elektronischer Unterstützung bis zu einer Endgeschwindigkeit von maximal 25 km/h sind weder Führerschein noch umfangreiche Vorkenntnisse erforderlich. Dies senkt die Zugangsschwelle zur Erwerbsarbeit und eröffnet Beschäftigungsmöglichkeiten für Gruppen, die auf dem Arbeitsmarkt sonst oft unterrepräsentiert sind – darunter etwa Menschen ohne formale Berufsabschlüsse oder mit eingeschränkter Mobilität im herkömmlichen Sinne.

Ein weiterer Vorteil: Cargobike-Fahrende können wohnortnah eingesetzt werden. Das vermeidet lange Anfahrtswege, reduziert private Pendelzeiten und stärkt die Verankerung lokaler Arbeit im Quartier. Gerade in urbanen Gebieten, in denen Verkehr, Luftqualität und Flächenkonkurrenz zentrale Herausforderungen darstellen, entfalten solche Ansätze ein enormes integratives Potenzial.

### **Stadtlogistik ohne Cargobikes (Einsatz klassischer motorisierter Transportfahrzeuge)**

Beim konventionellen Transport mit Diesel- oder E-Transportern liegt der Personalbedarf deutlich niedriger – in der Regel reichen im beschriebenen Szenario drei Transporter mit entsprechender Personanzahl aus. Unterstützend kommen oft ein bis zwei weitere Personen für Be- und Entladung hinzu. Allerdings ist das Arbeitszeitmodell in diesem Bereich weit weniger flexibel: Die Touren folgen festgelegten Zeitfenstern und Zustellrouten, sodass die Mitarbeitenden meist in Vollzeit oder mit starren Schichtsystemen arbeiten müssen. Teilzeit oder kurzfristige Einsätze sind organisatorisch schwerer integrierbar.

Auch der Arbeitsweg ist häufig länger: Die Fahrer starten nicht im Quartier, sondern an einem zentralen Depot oder Logistikzentrum, das außerhalb der innerstädtischen Lieferzonen liegt. Daraus ergeben sich längere Pendelzeiten – nicht nur privat, sondern auch im operativen Betrieb, etwa bei der Anfahrt ins Zustellgebiet. Diese Struktur verstärkt Verkehrsaufkommen und Flächenbedarf zusätzlich.

Hinzu kommen gesundheitliche Belastungen: Viele Stunden am Steuer, hoher Zeitdruck, monotone Bewegungsabläufe. In Summe entsteht ein Tätigkeitsprofil mit vergleichsweise geringem Handlungsspielraum, das für bestimmte Zielgruppen auf dem Arbeitsmarkt nur begrenzt attraktiv ist.

### **Weitere sozioökologische Aspekte**

Neben Beschäftigungsform und Arbeitszeitmodell treten zusätzliche Wirkfaktoren auf, die für die Bewertung der beiden Systeme relevant sind:

4. **Stadtökologie:** Der Cargobike-Modus entlastet die Innenstädte nicht nur in Bezug auf Emissionen, sondern auch hinsichtlich Lärm, Flächenkonflikten und Infrastrukturverschleiß.
5. **Erreichbarkeit von Arbeit:** Cargobike-Jobs entstehen dezentral und näher an den Wohnorten – das senkt Schwellen, spart Energie und eröffnet Teilhabechancen.
6. **Diversität im Arbeitsfeld:** Die geringeren Qualifikationsanforderungen beim Radlogistik-Modell erhöhen die Zugangsmöglichkeiten für eine breite Zielgruppe potentieller Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer.
7. **Wirtschaftliche Resilienz:** Dezentral organisierte Zustellsysteme mit niedrigschwelligen Einstiegsmöglichkeiten sind weniger abhängig von einzelnen Großstrukturen – das macht sie anpassungsfähiger gegenüber Krisen, Personalausfällen oder Nachfrageschwankungen.

Tabelle 8 – Vergleich cargobikegestützter und konventioneller Logistiksysteme im sozialen Kontext

| Aspekt                     | Mit Cargobikes                                              | Ohne Cargobikes (Transporter)                                                                  |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Personenzahl               | 4–6 Zustellende pro Tag                                     | 3 Fahrende,<br>ggf. zusätzlich Lagerpersonal                                                   |
| Arbeitszeitmodell          | hohe Flexibilität,<br>geeignet für Teilzeit                 | meist Vollzeit, Schichtbindung                                                                 |
| Zugang zum<br>Arbeitsmarkt | niedrigschwellig,<br>keine Berufsausbildung<br>erforderlich | min. Führerschein Klasse B                                                                     |
| Einsatzort                 | dezentral, quartiersnah möglich                             | zentrales Depot,<br>längere Anfahrtswege                                                       |
| Gesundheitliche<br>Wirkung | körperlich aktiv, ausgleichend                              | sitzend, stressanfällig                                                                        |
| Soziale Teilhabe           | offen für breite Zielgruppen,<br>diversitätsoffen           | eingeschränkter Zugang durch die<br>Anforderung an einen gültigen<br>Führerschein              |
| Ökologische Wirkung        | emissionsfrei, lärmfrei,<br>flächenschonend                 | energieintensiv,<br>höhere Umweltbelastung bei<br>Nutzung konventioneller Diesel-<br>Fahrzeuge |
| Kostenstruktur             | geringere Fixkosten,<br>weniger Infrastrukturbedarf         | hohe Betriebskosten,<br>komplexe Fahrzeuglogistik                                              |

#### 2.4.5 Ganzheitliche ökologische Bewertung

Neben der quantifizierten CO<sub>2</sub>-Einsparung offenbarte der Projektverlauf, dass das gewählte multimodale Logistikkonzept auch aus ökologischer Gesamtsicht erhebliche Vorteile bot. Die positiven

Wirkungen beschränkten sich dabei nicht allein auf Emissionsreduktionen, sondern betrafen ebenso die Luftqualität, die Lärmbelastung, die Nutzung städtischer Verkehrsflächen sowie die Resilienz urbaner Infrastrukturen.

Basierend auf den Analysen und Bewertungen der FRA UAS ließen sich folgende Ergebnisse feststellen: Durch die weitgehende Substitution klassischer Diesel-Lieferfahrzeuge konnte die Belastung durch lokale Luftschadstoffe verringert werden. Vor allem in dicht besiedelten Stadtbereichen führte der Einsatz elektrisch betriebener Lastenräder zu einer messbaren Verbesserung der Luftqualität, da diese weder CO<sub>2</sub> noch Ruß- oder NO<sub>x</sub>-Emissionen<sup>11</sup> emittieren. Auch der Lärmpegel in den belieferten Gebieten reduzierte sich deutlich: Die eingesetzten Fahrzeuge der VGF wiesen ein niedriges Geräuschniveau auf, das in Kombination mit den nahezu lautlosen Cargobikes zu einer spürbaren Entlastung insbesondere in sensiblen Wohnquartieren beitrug.

Darüber hinaus zeigte sich ein deutlicher Effekt in Bezug auf die Nutzung des öffentlichen Raums. Während herkömmliche Lieferfahrzeuge aufgrund des teilweise notwendigen Parkens in zweiter Reihe zu Verkehrsbehinderungen und unübersichtlichen Situationen beitragen können, ermöglicht die Kombination aus ÖPNV-Infrastruktur und Fahrradlogistik eine flächenschonende Zustellung direkt vor die Haustür. Dies kann nicht nur die Verkehrsflächen entlasten, sondern kann auch die Aufenthaltsqualität im öffentlichen Raum steigern. Besonders in stark frequentierten Bereichen wie dem Zoo oder in der Innenstadt kann der Einsatz der Lastenräder zu einer Entspannung der Verkehrssituation beitragen.

Die Kombination unterschiedlicher Verkehrsträger und die teilweise Entkopplung vom motorisierten Individualverkehr führten zu einer höheren Robustheit gegenüber kurzfristigen Störungen. So konnte etwa bei temporären Straßensperrungen die Zustellung über alternative Fahrradstrecken dennoch sichergestellt werden.

Insgesamt deckten sich die im Pilotbetrieb erzielten ökologischen Effekte mit den Zielen des Bundes-Klimaschutzgesetzes sowie den Leitlinien nachhaltiger Stadtentwicklung, wie sie beispielsweise im integrierten Klimaschutzkonzept der Stadt Frankfurt festgeschrieben sind. Das Projekt unterstreicht damit eindrücklich das Potenzial multimodaler Logistiklösungen – nicht nur zur Reduktion verkehrsbedingter Emissionen, sondern auch zur spürbaren Verbesserung der urbanen Lebensqualität.

#### **2.4.6 Transferpotenziale für andere Städte**

Das in Frankfurt am Main getestete Modell – eine Kombination aus straßenbahngestütztem Warentransport und lastenradbasierter Feinverteilung – ist nicht an die Besonderheiten eines einzelnen Standorts gebunden. Vielmehr lässt sich das Konzept unter bestimmten Voraussetzungen auf andere

---

<sup>11</sup> Stickoxide, u. a. NO (Stickstoffmonoxid) und NO<sub>2</sub> (Stickstoffdioxid)

Städte übertragen. Entscheidend ist dabei weniger die exakte Replikation der Infrastruktur als die Fähigkeit, vorhandene Systeme intelligent zu verknüpfen und für logistische Zwecke nutzbar zu machen.

Ein leistungsfähiges Straßenbahnnetz bildet die operative Grundlage: Es braucht verlässliche Taktung, geeignete Schleifen oder Abstellanlagen und Haltestellen mit Umschlagpotenzial – möglichst nahe an logistisch relevanten Knotenpunkten. Diese betrieblichen Schnittstellen ermöglichen es, Waren gebündelt und planbar in die Stadt zu bringen, ohne neue Verkehrsachsen zu beanspruchen.

Ebenso relevant ist der Zugang zu stadträumlich gut gelegenen Flächen für Zwischenlagerung, Kommissionierung oder Umschlag. Diese Orte müssen nicht groß sein, aber strategisch erreichbar – etwa in Sichtweite einer Haltestelle oder direkt an einer Hauptroute des Radverkehrs. Gerade in hochverdichteten Quartieren ist die Flächensicherung eine der größten Hürden. Kommunen, die flexible Nutzungsmodelle wie temporäre Hubs, modulare Depotlösungen oder Flächenteilung im Bestand erproben, verschaffen sich hier strukturelle Vorteile.

Eine weitere Voraussetzung ist die Qualität der Radverkehrsinfrastruktur. Damit Cargobikes die letzte Meile effizient bedienen können, müssen Wege durchgängig, konfliktarm und sicher befahrbar sein. Gefragt sind nicht nur funktionale Radtrassen, sondern auch praxistaugliche Anlieferzonen, witterungsgeschützte Abstellflächen und angepasste Verkehrsführungen – idealerweise abgestimmt auf die Dimensionen und Anforderungen der Fahrzeuge.

Neben der baulich-technischen Seite entscheidet vor allem die Haltung der Kommune über den Erfolg. Städte, die logistikbezogene Klimaziele verfolgen, in interdisziplinären Prozessen denken und Schnittstellen zwischen Verkehr, Stadtentwicklung und Gewerbe aktiv moderieren, schaffen eine Grundlage für dauerhafte Lösungen. Es reicht nicht, einzelne Pilotprojekte zu fördern – gefragt ist eine Strategie, die multimodale Logistik als integralen Bestandteil urbaner Mobilität begreift.

Für die Auswahl geeigneter Standorte und Konfigurationen kann eine Typologie helfen, die quantitative Faktoren wie Verkehrsaufkommen, Paketdichte oder Flächenpotenziale sowie qualitative Kriterien wie Umsetzungsbereitschaft oder Kooperationsstruktur berücksichtigt. Daraus ließe sich ableiten, welche Stadt für welche Form multimodaler Logistik geeignet ist – und welche systemischen Anpassungen notwendig wären.

Frankfurt am Main hat gezeigt, dass solche Konzepte funktionieren, wenn Planung, Betrieb und politischer Wille ineinandergreifen.

Die Stärke des Modells liegt in seiner Modularität: Es verlangt keine perfekte Stadt, sondern flexible Systeme und klare Verantwortlichkeiten. Wo diese Bedingungen erfüllt sind, kann die Kombination aus Tram und Cargobike mehr sein als ein Pilot – nämlich ein belastbares Element städtischer Logistik in der Verkehrswende.

### 2.4.7 Digitalisierung und Technologieintegration

Was auf der Straße und Schiene sichtbar wird, ist nur ein Teil des Systems – entscheidend ist, wie gut die Akteure im Hintergrund digital zusammenspielen. Gerade hier zeigten sich im Projektverlauf deutliche Schwächen.

Der Zugriff auf Echtzeitinformationen war eingeschränkt verfügbar. Daten zu Abfahrtszeiten, Verspätungen, Verladezuständen oder Tourenfortschritt blieben fragmentiert – verteilt auf unterschiedliche Systeme, die weder miteinander kommunizierten noch auf gemeinsame Standards zugreifen konnten. Übergaben an den Umschlagpunkten wurden dadurch zu einem blinden Prozess, bei dem Pufferzeiten oft den fehlenden Informationsfluss ausgleichen mussten. Für einen verlässlichen Dauerbetrieb genügt das nicht. Was fehlt, ist eine digitale Infrastruktur, die über Organisationsgrenzen hinweg funktioniert. Dazu gehört zunächst die Einführung offener Schnittstellen (APIs), die den Datenaustausch zwischen Leitstellen, Dispositionssoftware und Zustell-Apps ermöglichen. Erst wenn alle Beteiligten auf denselben Informationsstand zugreifen können, lassen sich Abläufe koordinieren, Ausfälle auffangen und Transportketten effizient steuern.

Ergänzend dazu wäre ein zentrales Dashboard sinnvoll – nicht als bloßes Kontrollinstrument, sondern als gemeinsame Planungsplattform. Es sollte aktuelle Positionsdaten, Ladezustände, erwartete Ankunftszeiten und Tourenverläufe bündeln und in Echtzeit visualisieren. Damit könnten operative Entscheidungen schneller, fundierter und koordiniert getroffen werden.

Bereits im Projekt wurde ein digitaler Zwilling eingesetzt, der operative Daten in einem virtuellen Modell abbildet. Um sein Potenzial voll auszuschöpfen, sollte dieses System künftig gezielt erweitert werden – insbesondere zur simulationsgestützten Touren- und Kapazitätsplanung. So ließen sich z. B. alternative Routen bei Sperrungen, saisonale Volumenverteilungen oder die Verfügbarkeit von Umschlagpunkten dynamisch einbeziehen und Entscheidungen datenbasiert vorbereiten.

Parallel dazu ist ein durchgängiges, interoperables Track-&-Trace-System erforderlich, das den gesamten Transportprozess abbildet – vom Verladen über die Tramstrecke bis zur Übergabe durch das Lastenrad. Eine solche Lösung muss Systemgrenzen überwinden und allen beteiligten Akteuren in Echtzeit Transparenz bieten: Verkehrsbetrieben, Zustelldiensten, Plattformbetreibern und ggf. auch Endkunden. Nur mit einer vollständig integrierten Sendungsverfolgung lassen sich operative Sicherheit, Verlässlichkeit und Rückverfolgbarkeit im Sinne eines modernen, multimodalen Logistiksystems gewährleisten.

Kurz gesagt: Ohne digitale Integration bleibt multimodale Logistik Stückwerk. Erst wenn Prozesse, Plattformen und Partner miteinander vernetzt sind, kann das System nicht nur funktionieren, sondern wachsen. Die Weichen dafür wurden im Projekt gestellt – ihre konsequente Umsetzung entscheidet über die Zukunftsfähigkeit des Modells.

### 3 Fazit und Ausblick aus der Perspektive der FRA UAS

Der Projektabschnitt LastMileTram RheinMain V hat durch einen vierwöchigen Realbetrieb gezeigt, dass multimodale Zustellkonzepte sowohl technisch als auch organisatorisch realisierbar sind. Im Zentrum stand die Integration einer elektrischen Gütertram in bestehende innerstädtische Zustellprozesse. Gemeinsam mit der Stadt Frankfurt, der Verkehrsgesellschaft Frankfurt (VGF) und Amazon Logistics wurde ein Konzept umgesetzt, das Emissionen reduziert, Verkehrsflächen entlastet und gleichzeitig eine zuverlässige Zustellqualität ermöglicht.

Die Kombination aus E-Van, Gütertram und Lastenrädern bildete dabei das Herzstück eines Systems, das bei überschaubarem Ressourceneinsatz ein hohes Maß an Skalierbarkeit, Reproduzierbarkeit und städtischer Verträglichkeit bietet.

Der ökonomische Vergleich verschiedener Zustellszenarien auf Basis der Annahmen der FRA UAS zeigt klare Vorteile multimodaler Systeme – besonders aus ökologischer Perspektive und aus der Perspektive „lebenswerter Städte“ mit einer Stärkung des Rad- und Fußgängerverkehrs.

Die Nutzung bestehender Infrastruktur (Tramnetz, Depots, ÖPNV-Verknüpfungspunkte) ermöglicht ein hohes Maß an Integration in den städtischen Raum, wobei die rechtlichen und regulatorischen Herausforderungen vorerst bestehen bleiben. Für verbindliche Voraussetzungen bedarf es weiterer Abstimmungen.

Der Rückgriff auf reale Daten, u. a. die simulativen Ergebnisse aus dem digitalen Zwilling aus vorherigen Projektabschnitten ohne die Mitwirkung von Amazon sowie die dokumentierten Prozesszeiten, erlaubt eine belastbare Beurteilung der operativen Abläufe. Die Einbindung von Fahrplänen, Personalverfügbarkeit und logistischen Übergabepunkten hat gezeigt, dass bei entsprechender Systemarchitektur eine verlässliche Taktung ohne größere Störungen möglich ist. Verbesserungspotenziale liegen vor allem in der Optimierung der Wartezeiten an Entladestellen sowie in der Standardisierung von Schnittstellen zur Beladung und Umladung (z. B. durch den Einsatz modularer Taschen oder automatisierter Verladetechnik).

Die Definition von Haftungsgrenzen, Zugangsrechten und Betriebszuständigkeiten stellte hohe Anforderungen an alle Beteiligten. Dass diese Punkte lösbar waren, ist ein wichtiges Signal für weitere Kooperationsmodelle. Klar ist: Für eine dauerhafte Integration solcher Systeme bedarf es rechtlicher Anpassungen, insbesondere was die Genehmigungsfähigkeit von Logistikdienstleistungen im öffentlichen Schienenraum betrifft. Die VGF ist aufgrund rechtlicher Rahmenbedingungen (u. a. öffentlicher Dienstleistungsauftrag, Genehmigung durch die technische Aufsichtsbehörde etc.) derzeit nicht in der Lage, eine Gütertram im Dauerbetrieb zu ermöglichen – trotz des erfolgreichen

Pilotprojekts. Um einen dauerhaften Betrieb zu realisieren, müssen die rechtlichen Grundlagen und Vorgaben zunächst angepasst werden

## **Handlungsempfehlungen aus der Perspektive der FRA UAS**

### **1. Verstetigung des Betriebs**

Ein geregelter, mindestens zweifacher täglicher Betrieb der Gütertram sollte in Frankfurt am Main angestrebt werden. Die technischen und organisatorischen Voraussetzungen wurden im Projekt geschaffen. Wichtig ist die Etablierung standardisierter Abläufe sowie die Integration in den bestehenden Fahrplan der VGF. All dies ist jedoch nicht ohne die Klärung der rechtlichen und regulatorischen Voraussetzungen möglich. Zudem können für einen Dauerbetrieb ggf. alternative Gleise sowie in jedem Fall weitere Fahrzeuge und Mitarbeitende erforderlich sein.

### **2. Aufbau stadtweiter City-Hubs**

Für eine flächendeckende Versorgung sollten zusätzliche City-Hubs in strategisch günstig gelegenen Quartieren geprüft werden. Diese können multifunktional genutzt und modular erweitert werden. Die Kombination aus Hub und Lastenrädern bietet hohe Skalierbarkeit bei geringer infrastruktureller Invasivität.

### **3. Digitalisierung und Prozessintegration**

Die eingesetzten digitalen Zwillinge sollten weiterentwickelt werden. Ziel ist eine Echtzeitsteuerung des Gesamtsystems, inklusive Lastenverteilung, Tourenplanung, Verfügbarkeitsabgleich und Monitoring.

### **4. Institutionalisierung der Partnerschaften**

Die erfolgreiche Kooperation zwischen VGF, Amazon, der Frankfurt UAS und der Stadt Frankfurt kann durch weitere Maßnahmen verfestigt werden. Denkbar ist ein öffentlich-privater Lenkungsreis zur Fortschreibung und Skalierung multimodaler Stadtlogistik sowie andere Modelle der Zusammenarbeit.

### **5. Rechtlicher Rahmen**

Es braucht eine bundesweite rechtliche Klarstellung zur Nutzung von ÖPNV-Infrastruktur für Logistikzwecke. Die Definition von Haftungsfragen, Versicherbarkeit, Betreiberpflichten und Ausschreibungsregeln muss im Sinne kommunaler und privatwirtschaftlicher Planungssicherheit konkretisiert werden. Dies beinhaltet auch die Nutzung der ÖPNV-Haltestellen für Logistikanwendung, eine Klärung der ADR-Fragestellungen sowie die Notwendigkeit der baulichen Veränderungen an bestehender Tram-Infrastruktur und Fahrzeugen.

## **6. Sozioökonomische Effekte erfassen**

Die Effekte auf Beschäftigung, Verkehrsverlagerung und Aufenthaltsqualität sollten systematisch untersucht werden. Dazu gehören auch Akzeptanzanalysen bei Zustellenden, Anwohnenden und Stadtverwaltungen.

**Ausblick**

Das Projekt liefert nicht nur technische und organisatorische Nachweise für multimodale Logistik in Städten – es schafft auch einen konzeptionellen Bezugsrahmen für kommunale Entscheidungsprozesse. Die Gütertram ist nicht nur ein lokal emissionsfreies Verkehrsmittel, sondern ein struktureller Lösungsansatz für gleich mehrere städtische Herausforderungen: Klimaschutz, Flächennutzung, Verkehrsberuhigung und Aufenthaltsqualität.

Die Skalierbarkeit des Systems erlaubt es, perspektivisch auch andere Logistikakteure oder Warengruppen (z. B. Lebensmittellogistik, Pharmagüter) einzubinden. Die Ergebnisse sind übertragbar – insbesondere auf Städte mit vorhandenem Straßenbahnnetz, dichter Bebauung und politischem Willen zur Verkehrswende. Zudem zeigt die Perspektive der Hinzunahme fester City Hubs, dass die Forderungen der KEP-Branche u.a. durch die Ergebnisse dieses Projektabschnitts gestützt werden können.

Damit positioniert sich das Projekt LastMileTram als ein Leuchtturmvorhaben für eine nachhaltigere urbane Logistik. Die operative Machbarkeit, die ökonomische Effizienz und die positive Wirkung auf das Stadtbild legen eine Fortführung und Skalierung nahe – nicht nur in Frankfurt am Main, sondern auch in anderen deutschen und europäischen Metropolregionen.