

## UMWELTINNOVATIONSPROGRAMM

### Abschlussbericht

#### zum Vorhaben

*Intelligentes Gütertransportsystem (KfW-Aktenzeichen: NKa3 – 002084)*

#### Zuwendungsempfänger/-in

*SEW-Immobilien GmbH*

#### Umweltbereich

*BMUB-Umweltinnovationsprogramm – Innovativer Umweltschutz in Unternehmen*

#### Laufzeit des Vorhabens

*20.02.2014 – 31.12.2024*

#### Autor/-en

*Dr. Frank Schönung, Maximilian Winter*

**Gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit  
und Verbraucherschutz**

#### Datum der Erstellung

*(07.11.2025)*

## Berichts-Kennblatt

|  |  |
|--|--|
| Aktenzeichen UBA: 90 030/62  | Projekt-Nr.: 2084  |
| Titel des Vorhabens: Intelligentes Gütertransportsystem  |  |
| Autor/-en (Name, Vorname):<br><br>Schönung, Frank; Winter, Maximilian  | Vorhabenbeginn: 20.02.2014<br><br>Vorhabenende<br>(Abschlussdatum): 31.12.2024 |
| Zuwendungsempfänger/-in (Name, Anschrift):<br><br>SEW-Immobilien GmbH<br>Ernst-Bickle-Str. 24<br>76646 Bruchsal  | Veröffentlichungsdatum:<br><br>Seitenzahl: 35                                  |
| Gefördert im Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz   |  |
| Kurzfassung (max. 1.500 Zeichen):<br><br>SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG in Bruchsal zählt zu den weltweit führenden Unternehmen in der Antriebs- und Automatisierungstechnik. Mit dem Fokus auf mobile Transport- und Assistenzsysteme wurde ein autonomes, wetterunabhängiges Transportsystem entwickelt, das durch eine Logistikkapsel und mobile Assistenten einen durchgängigen Materialfluss zwischen Innen- und Außenbereichen ermöglicht. Ziel ist die Optimierung intralogistischer Prozesse durch automatisierte Übergaben, Emissionsreduktion und effiziente Flächennutzung - auch über unterirdische Trassen.<br>Die Logistikkapsel transportiert bis zu 1,5 Tonnen, bewältigt Rampen und Aufzüge, nutzt berührungslose Energieversorgung sowie ein Navigationssystem mit GPS, Laser und Kamera. Die Steuerung erfolgt über eine eigene Softwarearchitektur, ergänzt durch WLAN- und Mobilfunkkommunikation. Eine Demonstrationsstrecke zwischen zwei Werkshallen wurde 2024 erfolgreich in Betrieb genommen.<br>Ökologisch zeigt das System deutliche Vorteile gegenüber Elektrostaplern: 27,2 MWh Energieeinsparung und bis zu 24 Tonnen CO <sub>2</sub> -Reduktion jährlich. Wirtschaftlich überzeugt es durch stark reduzierte Personal- und Energiekosten. Technologisch bietet es modulare Komponenten, kontaktlose Energieversorgung und eine skalierbare, intermodale Transportlösung. Die Lösung ist primär für innerbetriebliche Transporte konzipiert, und auf fast alle Branchen übertragbar. Erste Kundenanfragen bestätigen das Marktpotenzial. |  |
| Schlagwörter:<br><br>Intermodaler Transport, Intralogistik, Energieeffizienz, Werkstransport, SEW EURODRIVE  |  |

## Report Coversheet

|   |   |
|---|---|
| Reference-No. Federal Environment Agency: 90 030/62   | Project-No.:2084                          |
| Report Title: Intelligent freight transport system  |   |
| Author/Authors (Family Name, First Name): Schönung, Frank; Winter, Maximilian   | Start of project: 20.02.2014              |
|   | End of project: 31.12.2024                |
| Performing Organisation (Name, Address):<br><br>SEW-Immobilien GmbH<br>Ernst-Blickle-Str. 24<br>76646 Bruchsal  | Publication Date:<br><br>No. of Pages: 35 |
| Funded in the Environmental Innovation Programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection.  |   |
| <p>Summary (max. 1.500 characters):</p> <p>SEW-EURODRIVE GmbH &amp; Co KG, based in Bruchsal, Germany, is one of the world's leading companies in drive and automation technology. Focusing on mobile transport and assistance systems, the company has developed an autonomous, weather-independent transport solution consisting of a logistics capsule and mobile assistants. This system enables continuous material flow between indoor and outdoor areas, aiming to optimize intralogistics through automated transfers, reduced emissions, and efficient land use - including underground routes.</p> <p>The logistics capsule carries up to 1.5 tons, handles ramps and elevators, and features contactless energy supply, navigation with GPS, laser and camera support. Control is managed via SEW's proprietary software architecture, with communication through WIFI and cellular networks. A demonstration route between two production halls was successfully commissioned in 2024.</p> <p>Environmentally, the system offers clear advantages over electric forklifts: 27.2 MWh in annual energy savings and up to 24 tons of CO<sub>2</sub> reduction. Economically, it significantly lowers personnel and energy costs.</p> <p>Technologically, it features modular components, contactless charging, and scalable intermodal transport. Designed primarily for in-plant logistics, the solution is transferable to other industries with similar transport needs. Initial customer inquiries confirm market potential.</p> |   |
| <p>Keywords:</p> <p>Intermodal transportation, intralogistics, energy efficiency, SEW EURODRIVE</p>   |   |

## INHALTSVERZEICHNIS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Einleitung .....</b>  | <b>4</b>  |
| 1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. der Projektpartner.....   | 4         |
| 1.2. Ausgangssituation .....  | 4         |
| <b>2. Vorhabenumsetzung.....</b>  | <b>6</b>  |
| 2.1. Ziel des Vorhabens.....  | 6         |
| 2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten) .....   | 7         |
| 2.3. Umsetzung des Vorhabens .....  | 8         |
| 2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen) .....  | 12        |
| 2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten .....   | 12        |
| 2.6. Konzeption und Durchführung des Messprogramms.....   | 14        |
| <b>3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung.....</b>  | <b>15</b> |
| 3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung .....   | 15        |
| 3.2. Stoff- und Energiebilanz.....  | 18        |
| 3.3. Umweltbilanz .....   | 22        |
| 3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse .....   | 26        |
| 3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren .....   | 28        |
| <b>4. Übertragbarkeit .....</b>   | <b>29</b> |
| 4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung .....   | 29        |
| 4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des<br>Verfahrens/der Anlage/des Produkts)..... | 29        |
| 4.3. Kommunikation der Projektergebnisse .....  | 30        |
| <b>5. Zusammenfassung .....</b>   | <b>31</b> |
| <b>6. Literatur .....</b>   | <b>35</b> |

## 1. Einleitung

### 1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. der Projektpartner

Die SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG mit Hauptsitz in Bruchsal ist ein weltweit führender Anbieter von Antriebs- und Automatisierungstechnik. Das Unternehmen entwickelt und produziert Lösungen für die industrielle Antriebstechnik, darunter Getriebemotoren, Frequenzumrichter, Steuerungssysteme sowie ganzheitliche Automatisierungskonzepte. Mit über 20.000 Mitarbeitenden in mehr als 50 Ländern zählt SEW-EURODRIVE zu den globalen Marktführern in seinem Segment.

Neben den etablierten Kernprodukten treibt SEW-EURODRIVE die Entwicklung innovativer Technologien für Industrie 4.0 voran. Ein Innovationsschwerpunkt ist das Geschäftsfeld Mobile Transport- und Assistenzsysteme, das eine Schlüsselrolle für die Automatisierung und Digitalisierung der Intralogistik spielt.

Das Projekt wurde vollständig durch SEW-EURODRIVE umgesetzt, ohne externe Projektpartner, und ist Teil der langfristigen Strategie, neue Lösungen für die intelligente Fabrik und flexible Materialflüsse zu entwickeln.

### 1.2. Ausgangssituation

Die Leistungsfähigkeit des Güterverkehrs ist ein zentraler Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft. Bereits im Jahr 2012 betrug die Güterverkehrsleistung in Deutschland rund 633 Mrd. Tonnenkilometer (tkm), wovon über 70 % auf den Straßengüterverkehr entfielen (Destatis 2013). Frühere Prognosen wiesen bereits auf ein deutliches Wachstum des Straßengüterverkehrs hin, bedingt durch Globalisierung, Just-in-Time-Produktion und den zunehmenden Online-Handel (ProgTrans 2007).

#### Aktuelle Situation

Die Güterverkehrsleistung in Deutschland lag 2023 bei etwa 675 Mrd. tkm. Der Modal Split zeigt weiterhin eine klare Dominanz des Straßengüterverkehrs:

- Straße: ca. 71 %
  - Schiene: ca. 20 %
  - Binnenschifffahrt: ca. 6 %
  - Sonstige: ca. 3 %
- (Destatis 2025).

Trotz vielfältiger politischer Initiativen zur Stärkung des Schienengüterverkehrs und zur Förderung des kombinierten Verkehrs konnte der Straßenanteil bislang nicht signifikant reduziert werden. Hauptgründe sind die hohe Flexibilität des LKW-Transports, die zunehmende Kleinteiligkeit der Sendungen im E-Commerce sowie strukturelle Engpässe im Schienennetz (Sachverständigenrat 2024).

## **Zukünftige Herausforderungen**

Prognosen des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV 2024) zeigen, dass die Verkehrsleistung im Güterverkehr bis 2040 um rund ein Drittel gegenüber 2019 steigen wird. Parallel verschärfen sich die Rahmenbedingungen:

- Überlastung der Infrastruktur: Staus in Ballungsräumen und Engpässe an Verkehrsknotenpunkten (Sachverständigenrat 2024)
- Klimaschutzaufgaben: Strengere CO<sub>2</sub>-Grenzwerte bis zur Treibhausgasneutralität aller Sektoren bis 2045
- Kostensteigerungen: Steigende Energiepreise und Fahrermangel
- Urbanisierung: Zunehmende Restriktionen für LKWs in Innenstädten

Diese Entwicklungen verdeutlichen, dass klassische Maßnahmen - etwa Straßenausbau oder moderate Schienenförderung - nicht ausreichen. Es besteht ein dringender Bedarf an innovativen Transportlösungen, die ökologische und ökonomische Ziele vereinen.

## **Herausforderung: Logistische Werkverbünde**

Neben dem überregionalen Güterverkehr stehen Unternehmen zunehmend vor der Aufgabe, interne Materialflüsse in Werkverbünden zu automatisieren.

Viele Produktionsstandorte bestehen aus mehreren Hallen, die durch Freiluftabschnitte voneinander getrennt sind. Während innerhalb der Hallen fahrerlose Transportsysteme (FTS) etabliert sind, entstehen an den Übergängen Medienbrüche, die meist manuell überbrückt werden müssen.

Hauptursachen sind Witterungseinflüsse, Sicherheitsanforderungen und fehlende Infrastruktur und Komponenten für Outdoor-FTS. Dies verhindert bislang einen durchgängigen, automatisierten Materialfluss - ein entscheidender Faktor für Just-in-Time- und Just-in-Sequence-Produktion (Fraunhofer IML 2025; Linde Material Handling 2025).

## **Bedarf für neue Lösungen**

Die zunehmenden Restriktionen für LKW-Verkehr in urbanen Räumen, das wachsende Stückgut- und Paketaufkommen sowie die Automatisierungslücken in Werkverbünden verdeutlichen den Bedarf an neuen Konzepten. Hier setzt die Logistikkapsel-Lösung von SEW-Eurodrive an, die einen durchgängigen, witterungsunabhängigen Materialfluss zwischen Gebäuden ermöglicht.

## 2. Vorhabenumsetzung

### 2.1. Ziel des Vorhabens

#### **Technische Realisierbarkeit demonstrieren**

Das Projekt soll zeigen, dass eine effiziente und gezielte Güterverteilung innerhalb komplexer Logistikumgebungen, insbesondere mit Fahrten durch den Außenbereich, durch den Einsatz autonomer Transportfahrzeuge möglich ist. Dies umfasst die Integration in bestehende Prozesse und die sichere Steuerung der Fahrzeuge.

#### **Flexibilität des Logistiksystems aufzeigen**

Ein zentrales Ziel ist die Darstellung der hohen Anpassungsfähigkeit des Systems. Es soll verdeutlicht werden, wie sich das System an unterschiedliche Schnittstellen und bauliche Gegebenheiten anpassen lässt, ohne umfangreiche Umbauten oder zusätzliche Infrastruktur.

#### **Umweltverträglichkeit verifizieren**

Das Demonstrationsprojekt soll die ökologischen Vorteile gegenüber konventionellen Transportlösungen nachweisen. Dazu gehören die Reduktion von Emissionen, die effiziente Nutzung vorhandener Infrastruktur und die Minimierung des Flächenverbrauchs.

#### **Mehrwert durch intelligente Logistikprozesse zeigen**

Das System soll nicht nur Transport ermöglichen, sondern auch die Verknüpfung von Sequenzierung und Pufferung demonstrieren. Dadurch entsteht eine durchgängige, automatisierte Transportkette, die manuelle Prozesse reduziert und die Effizienz steigert.

#### **Option einer unterirdischen Trasse demonstrieren**

Anhand eines Tunnelabschnitts soll gezeigt werden wie das System unterirdische Strecken nutzen kann, um Verkehrsflächen zu entlasten, durch öffentliche Bereiche voneinander abgetrennte Werksgelände zu verbinden und die Sicherheit sowie den Flächenverbrauch zu optimieren.

#### **Interaktion verschiedener Fahrzeugtypen demonstrieren**

Die Zusammenarbeit zwischen SEW-Logistikkapseln und mobilen Logistikassistenten (MLA) wird getestet, um die Kooperationsfähigkeit und die Flexibilität des Gesamtsystems zu verdeutlichen. Das Ziel ist eine durchgängige, automatisierte, intermodale Logistiklösung für innerbetriebliche Werkstransporte zu realisieren.

#### **Anpassbarkeit des Systems verdeutlichen**

Durch die Realisierung mehrerer Schnittstellen zu Quellen und Senken wird gezeigt, wie das System in unterschiedliche Produktions- und Logistikumgebungen integriert werden kann. Dies bildet die Grundlage für zukünftige Erweiterungen und den Einsatz im regionalen Güterverkehr.

## 2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)

Die entwickelte Lösung adressiert die unter Kap 1.2 geschilderte Problemlage: Wie lässt sich ein durchgängiger Materialfluss in komplexen Logistikumgebungen realisieren, wenn Transporte nicht nur innerhalb von Hallen, sondern auch über Außenbereiche und Rampen erfolgen müssen? Der Demonstrator zeigt, dass dies durch den Einsatz autonomer Transportfahrzeuge möglich ist – und zwar ohne Medienbrüche und mit hoher Flexibilität.

Im Zentrum steht die SEW-Logistikkapsel, die direkt an die mobilen Logistikassistenten (MLA) angebunden ist. Dadurch wird eine nahtlose Übergabe zwischen unterschiedlichen automatisierten Systemen erreicht. Die Logistikkapsel übernimmt nicht nur den hallenübergreifenden Transport, sondern kann auch als Pufferstation („Lagerbock“) genutzt werden, um Sequenzierung und Zwischenlagerung zu ermöglichen. Dies schafft eine durchgängige, automatisierte Transportkette und reduziert manuelle Eingriffe erheblich.

Mechanisch ist das Fahrzeug für den kombinierten Innen- und Außeneinsatz ausgelegt und trägt eine Nutzlast von bis zu 1,5 Tonnen. Das omnidirektionale Fahrwerk mit SEW-Fahr-Lenk-System erlaubt präzise Bewegungen auch in engen Bereichen. Rampen mit Steigungen bis 12% bei einer Geschwindigkeit von 1m/s sowie Fahrten durch Aufzüge wurden erfolgreich demonstriert. Für den Outdoor-Betrieb ist die Sensorik durch ein Druckluftsystem zur Selbstanteinführung der Laserscanner gegen Feuchtigkeit geschützt. Der modulare Aufbau basiert auf dem SEW-Baukasten für mobile Systeme, was die Anpassbarkeit an unterschiedliche Einsatzszenarien erleichtert.

Die Energieversorgung erfolgt über eine erstmalig eingesetzte innovative Kombination aus Kondensator und Batterie. Die Logistikkapsel verfügt über eine elektrische Energiespeicherkapazität von 1.910 Wh. In Verbindung mit der induktiven Energieübertragung über *MOVITRANS*® erreicht das System eine Ladeleistung von bis zu 11 kW, sodass eine vollständige Aufladung in nur 13 Minuten möglich ist. Damit wird eine hohe Verfügbarkeit sichergestellt, selbst bei intensiven Einsatzzyklen.

Auch die fahrzeuginterne Softwarearchitektur wurde speziell für die Anforderungen des Projekts entwickelt. Das Navigationskonzept basiert auf der SEW-SLAM-Lösung *MoviNAV* und wurde für den Outdoor-Betrieb angepasst. Verschiedene Lokalisierungstechnologien wie GPS, Laser und Kameras wurden im Rahmen des Projekts evaluiert, um eine robuste Positionsbestimmung zu gewährleisten. Für die Objekterkennung kommen 3D-Stereokamera zum Einsatz. Die Kommunikation erfolgt über WLAN und Mobilfunk mit dynamischer Umschaltung, sodass eine stabile Verbindung auch bei wechselnden Umgebungen gegeben ist. Die Integration in die SEW-Softwarearchitektur erfolgte auf Basis des internen Leitsystems SLK und der SEW-eigenen USS-Softwarearchitektur für mobile Assistenzsysteme. Dies ermöglicht die zentrale Steuerung und Überwachung aller Fahrzeuge und insbesondere den Transport eines Ladungsträgers über mehrerer Transportsysteme hinweg.

Die Umweltverträglichkeit wird nicht nur durch die optimierten Logistikprozesse mit weniger Umschlagpunkten und neuen Pufferkapazitäten erreicht, sondern auch durch die Integration lokaler Energieerzeugung. Im Zuge des Bauprojekts wurden zwei Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von über 3 MWp installiert, die den Vorteil einer direkten Kopplung von

Erzeugung und Verbrauch bieten. Kennzahlen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion werden in Kapitel 3.3 dargestellt.

Das Sicherheitskonzept basiert auf bewährten Standards aus der Intralogistik und wurde für den Demonstrator übernommen. Eine Zertifizierung für den Echtbetrieb steht noch aus, bildet jedoch die Grundlage für eine spätere Serienanwendung.

### **2.3. Umsetzung des Vorhabens**

#### **Festlegung des Transportprozesses**

Zu Beginn des Projekts wurden die bestehenden Materialflüsse innerhalb der Werkhallen systematisch aufgenommen und analysiert. Auf dieser Basis erfolgte die Planung der neuen Werkhalle unter besonderer Berücksichtigung der Integration eines Logistikkapsel-Fahrzeugs in das Gesamtsystem. Dabei wurden die relevanten Transportvolumina, Schnittstellen und Übergabepunkte definiert.

Im weiteren Projektverlauf reduzierte sich das ursprünglich geplante Transportvolumen durch den intelligenten parallelen Einsatz alternativer mobiler Logistikassistenten auf abschließend noch eine Logistikkapsel mit dem Fokus auf die Verbindung der Werkhallen über Outdoor-Strecken.

#### **Planung der Demonstrationsstrecke**

Zur Erprobung der entwickelten Technologien wurde eine Demonstrationsstrecke zwischen Halle Nord und Halle 2 eingerichtet (vgl. Abbildung 1). Die Tests umfassten die automatische Übergabe von Transportgütern zwischen zwei autonomen Systemen (SEW-Logistikkapsel und SEW-MLA), die Fahrt durch Aufzüge, Tunnel und Rampen mit bis zu 12 % Steigung, den Betrieb im Außenbereich sowie die Übergänge zwischen unterschiedlichen Werkhallen.

Die erfolgreiche Validierung dieser Teilstrecke zeigte die technische Machbarkeit eines durchgängigen, automatisierten Materialflusses auch über komplexe Streckenverläufe hinweg.

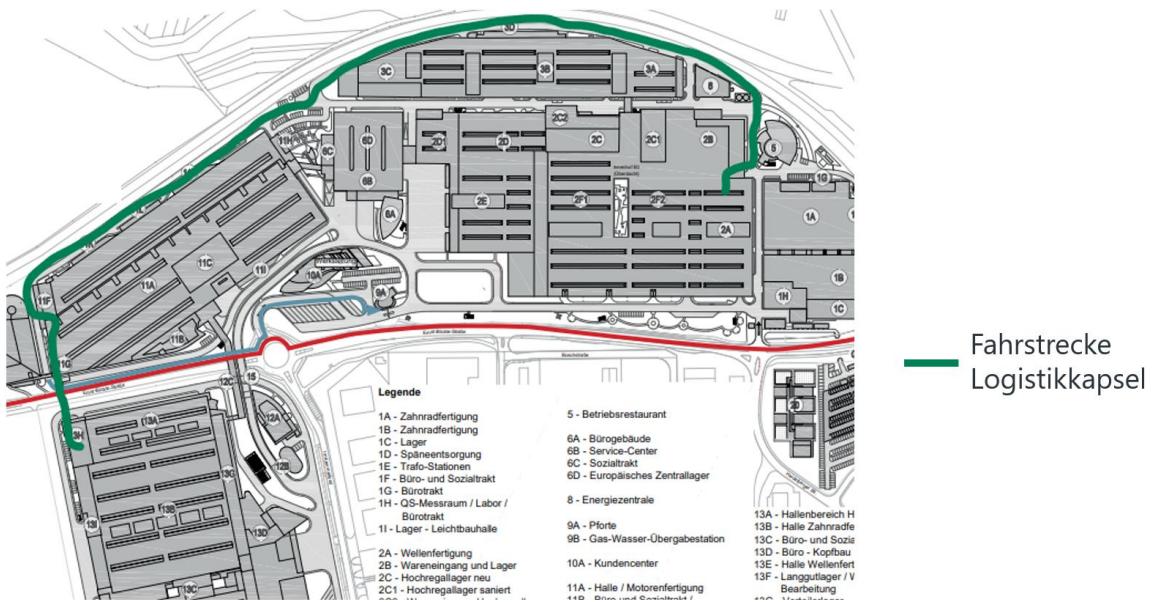


Abbildung 1: Demonstrationsstrecke SEW-Standort Graben-Neudorf

### Planung und Umsetzung der Bauwerke

Die bauliche Planung begann unmittelbar nach Projektstart im Jahr 2014. In einer frühen Konzeptphase wurden zunächst verschiedene Trassenvarianten zwischen den bestehenden Werkhallen untersucht und hinsichtlich technischer Machbarkeit, Kosten und Eingriffstiefe bewertet. Durch den Änderungsantrag von 2015 und die Fokussierung auf die SEW-Logistikkapsel änderten sich noch einmal mehrere Anforderungen.

Im Jahr 2019 wurde der Verbindungstunnel zwischen Halle Nord und Halle Süd fertiggestellt (vgl. Abbildung 2 und Abbildung 3). Dieser bildet die infrastrukturelle Grundlage für die unterirdische Transportlösung.

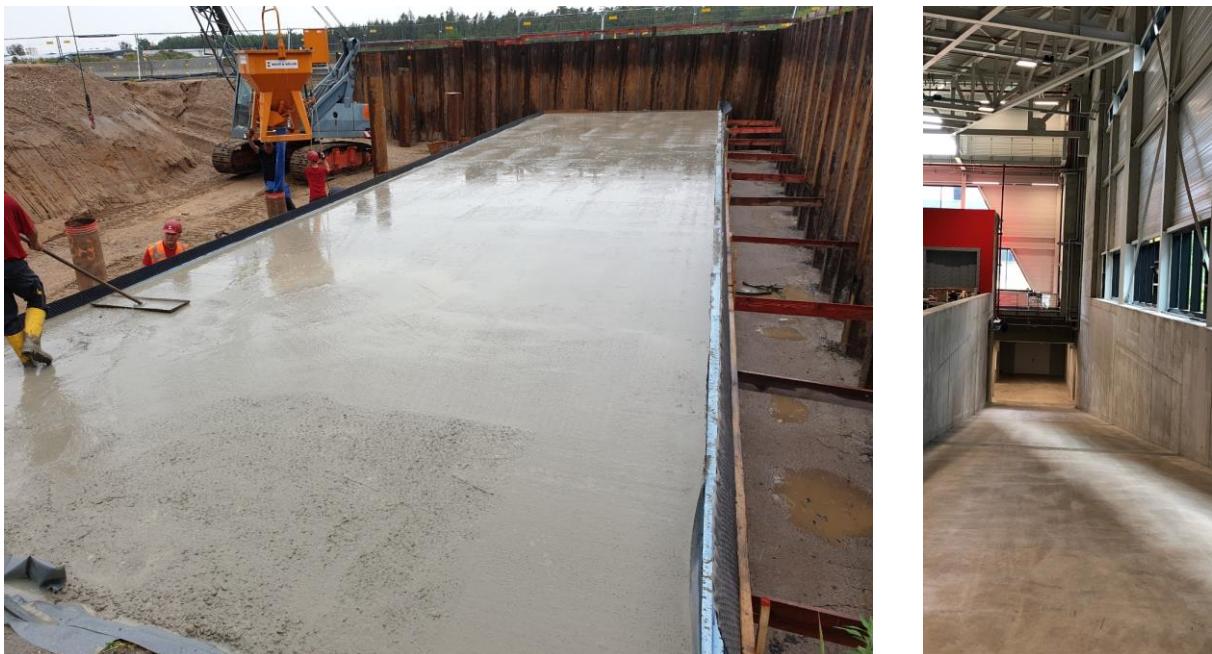


Abbildung 2: Tunnelbauwerk: links Herstellung in offener Bauweise, rechts fertiggestellt mit Rampe Halle Süd



Abbildung 3: Tunnelbauwerk, Bauabschnitt Halle Nord

Mit der Fertigstellung der Halle Nord im Jahr 2022 sowie der Installation der Vertikalförderer (vgl. Abbildung 4) zur Anbindung des Tunnels wurde die bauliche Voraussetzung für einen witterungsunabhängigen Materialfluss zwischen den durch die Kreisstraße K3532 getrennten Werksgeländeteilen geschaffen. Die Bauwerke wurden so ausgelegt, dass eine spätere Erweiterung des Streckennetzes und die Integration zusätzlicher Fahrzeugtypen möglich ist.



Abbildung 4: Vertikalförderer: links Rohbau, rechts fertiggestellt

## Fahrzeug-Engineering

In den ersten Projektjahren lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung der modularen Antriebs- und Steuerungskomponenten im Rahmen des SEW-Intralogistikbaukastens. Ziel war es, skalierbare Baugruppen zu schaffen, die sowohl für die Logistikkapsel als auch für zukünftige Fahrzeugplattformen einsetzbar sind. Dazu gehörten insbesondere Fahrwerksmodule (vgl. Abbildung 5, Energieübertragungseinheiten und Kommunikationsschnittstellen).

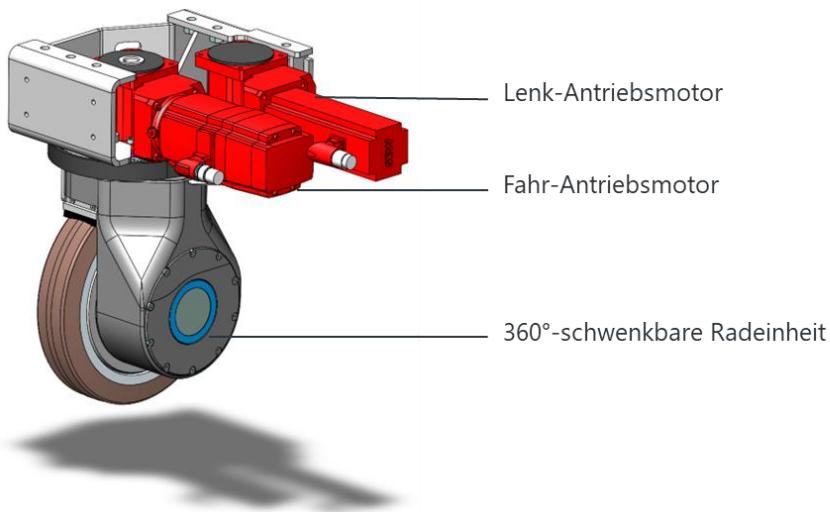


Abbildung 5: SEW-Fahr-Lenk-Modul für omnidirektionales Fahren

Auf dieser technologischen Basis wurde das Logistikkapsel-Fahrzeug später als eigenständige Neuentwicklung realisiert. Die Entwicklung umfasste Fahrwerk, Lastaufnahme, Verkleidung, Tragstruktur sowie die elektrische und kommunikative Systemarchitektur. Besonderes Augenmerk lag auf der energetischen Auslegung, der Robustheit für Innen- und Außenbereiche sowie der sicheren Interaktion mit weiteren Transportsystemen.

## Planung und Aufbau der Energieinfrastruktur (MOVITRANS®)

Für die Energieversorgung wurde das berührungslose MOVITRANS®-System implementiert. Damit konnte eine berührungslose Energieübertragung entlang der Fahrstrecke realisiert werden. Die Auslegung des Systems erfolgte auf Basis der ermittelten Leistungsanforderungen des Fahrzeugs und gewährleistet einen automatisierten, wartungsarmen Dauerbetrieb. Dabei wurde die SEW-Logistikkapsel so konzipiert, dass sie in der Lage ist die gleiche Energie-Ladeinfrastruktur zu nutzen wie die mobilen Logistikassistenten (MLA) der Generationen E1 und E2. Abbildung 6 zeigt die installierte Punkt-Ladeinfrastruktur, die sowohl von einer SEW-Logistikkapsel als auch von zwei mobilen Logistikassistenten zum berührungslosen Laden genutzt werden kann.

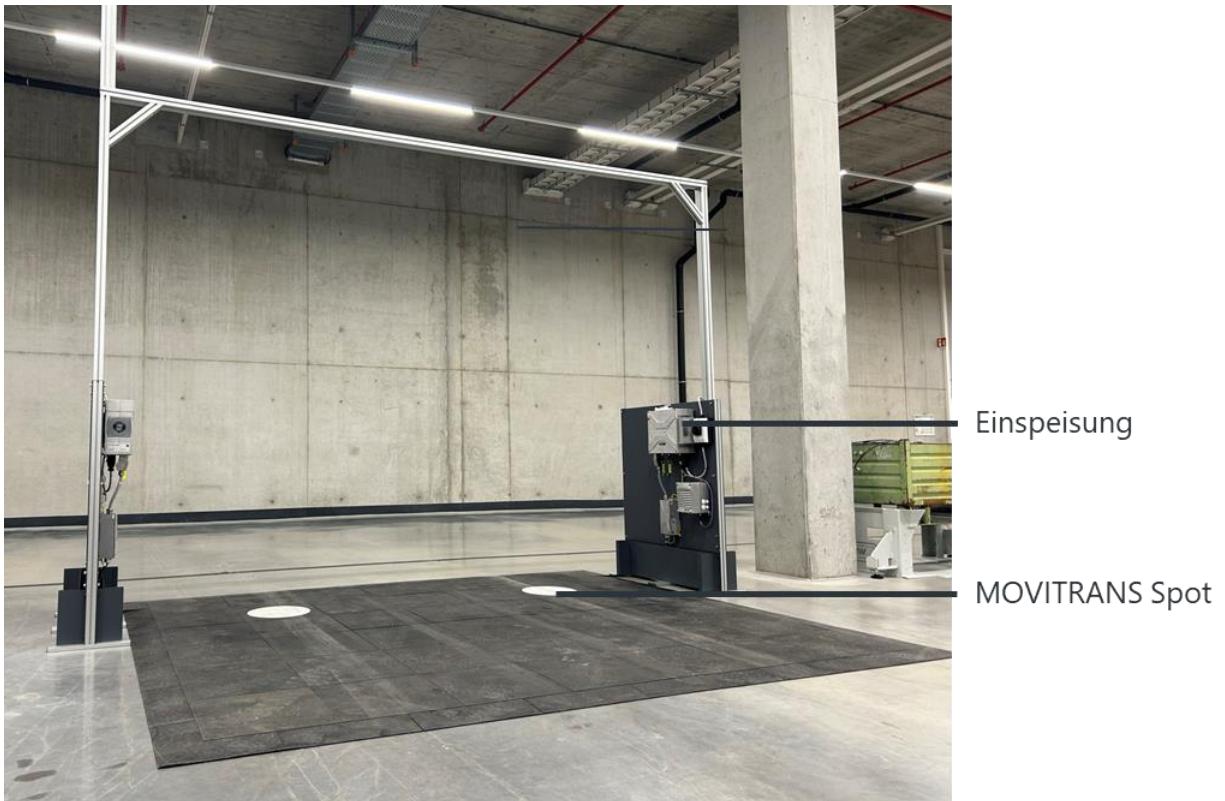


Abbildung 6: Energieversorgung durch zwei „MOVITRANS® Spot“ im Bereich vor den Vertikalförderern in der Halle Nord

### Integration und Validierung

Die Integration des Gesamtsystems erfolgte zwischen November und Dezember 2024. In dieser Phase wurden die Teilkomponenten zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem zusammengeführt und umfangreiche Testfahrten durchgeführt. Dabei wurden Energieverbrauch, Kommunikationsstabilität und Übergabesicherheit zwischen den Systemen SEW-Logistikkapsel und den mobilen Logistikassistenten validiert. Die interne Abschlussveranstaltung mit Live-Demonstration der autonomen Transportlösung fand im Februar 2025 statt und markierte den erfolgreichen Abschluss der Inbetriebnahmephase.

### 2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)

Da das intelligente Transportsystem als Demonstrator auf SEW-Werksgelände eingesetzt wurde, musste keine öffentliche Behörde benachrichtigt werden. Intern wurden Regelungen für die sichere Demonstration getroffen, insbesondere gibt es Richtlinien und Schulungen zum Umgang mit autonomen Fahrsystemen für alle Mitarbeiter von SEW EURODRIVE am Standort Graben-Neudorf.

### 2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Für die Erfassung der Betriebsdaten, im speziellen Leistungs- und Energiedaten, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Temperaturen war es nicht erforderlich Messhardware zu beschaffen und zu installieren. Alle erforderlichen Größen können mit den

in der Logistikkapsel verbauten und im Betrieb genutzten Steuerungs- und Energieversorgungskomponenten erfasst, z.T. aufgezeichnet und mit einem über WLAN oder Ethernet angebundenes Notebook gespeichert werden. Zum besseren Verständnis wie die Daten erfasst wurden wird im Folgenden das Energiesystem genauer beschrieben.

### Erläuterung des energetischen Systems

Das energetische System der Logistikkapsel besteht aus zwei Spannungsniveaus: dem Hauptenergiespeicher (Batterie) und einem Zwischenkreis, an den sämtliche Verbraucher angeschlossen sind.

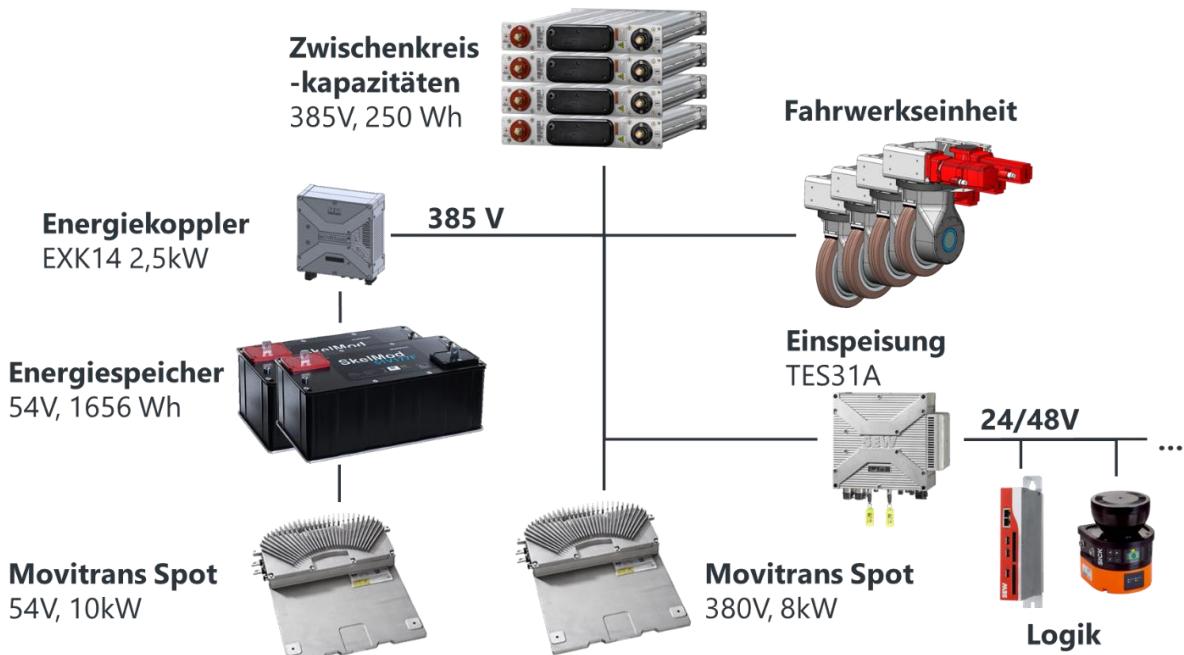


Abbildung 7: Energiesystem Logistikkapsel

Die Batterien sind über einen Energiekoppler mit dem Zwischenkreis verbunden. Zusätzlich befinden sich im Zwischenkreis mehrere Kondensatoren, die bei Lastspitzen unterstützend wirken.

Tritt eine Lastspitze auf, die nicht vollständig durch die Batterien und den Energiekoppler abgedeckt werden kann, sinkt die Spannung im Zwischenkreis ab. In diesem Fall geben die Kondensatoren Energie in den Zwischenkreis ab, um diesen zu stabilisieren. Nach Abklingen der Lastspitze speisen die Batterien wieder mehr Energie ein, als die Verbraucher benötigen, wodurch die Zwischenkreisspannung auf den Sollwert ansteigt und die Kondensatoren erneut geladen werden. Da die Kondensatoren vor und nach einer Lastspitze denselben Energieinhalt aufweisen, wird ihre Energiemenge bei der Verbrauchsermittlung nicht berücksichtigt. Für die

Analyse ist somit ausschließlich die aus der Batterie entnommene Energie relevant. Diese wird in zwei Kategorien unterteilt:

- Energie für den Vortrieb des Fahrwerks
- Energie für die Versorgung der Steuerungstechnik und Sensorik

## 2.6. Konzeption und Durchführung des Messprogramms

### **Erfassung der Betriebsdaten**

Alle für die Ermittlung der Verbrauchsdaten relevanten Komponenten - mit Ausnahme der Einspeisung TES31A - sind über einen EtherCAT-Echtzeitbus verbunden. Dadurch ist es möglich, die Leistungsaufnahme der einzelnen Gerätegruppen über den EtherCAT-Master in Echtzeit auszulesen.

- Leistungsaufnahme: Die Erfassung erfolgte alle 100 ms, was einer Abtastrate von 10 Hz entspricht.
- Fahrzeuggeschwindigkeit und -position: Diese wurden im Abstand von 1 s erfasst, entsprechend einer Abtastrate von 1 Hz.
- Steuerungstechnikleistung: Da die Einspeisung TES31A keine direkte Leistungsmessung ermöglichte, wurde die Leistungsaufnahme der Steuerungstechnik inklusive Sensorik indirekt berechnet. Grundlage war die Differenz zwischen der Energieabgabe des Energiespeichers und der Leistungsaufnahme des Fahrwerks:

$$P_{\text{Steuerungstechnik}} = P_{\text{Energiespeicher}} - P_{\text{Fahrwerk}}$$

Die erfassten Daten wurden kontinuierlich während der Fahrten aufgezeichnet und anschließend integriert, um den Energieverbrauch zu bestimmen.

### 3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung

#### 3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung

Das Vorhaben hat zentrale Projektziele erfolgreich demonstriert und wichtige technologische Meilensteine erreicht. Besonders hervorzuheben ist die Realisierung des autonomen Fahrens im Innen- und Außenbereich, was eine große und neue Herausforderung darstellte. Damit konnte das übergeordnete Ziel - die Verbindung verschiedener Werkshallen auch über Freiflächen mit Witterungseinflüssen - umgesetzt werden. Diese Fähigkeit ist ein entscheidender Schritt hin zu flexiblen und zukunftsfähigen Logistiklösungen.



Abbildung 8: SEW-Logistikkapsel bei Regen im Freien auf dem Werksgelände des SEW-Standort Graben

Die Inbetriebnahme der Logistikkapsel erfolgte am 20.12.2024. Seitdem wird sie für Demonstrationszwecke genutzt und zeigt die Machbarkeit des Systems unter realen Bedingungen. Ein produktiver Dauerbetrieb ist derzeit noch nicht aufgenommen, befindet sich aber in Diskussion und bildet die Grundlage für den geplanten Werksverbund.

Im Projektverlauf mussten Anpassungen vorgenommen werden, um veränderte Rahmenbedingungen im Produktionsumfeld von SEW-Eurodrive zu berücksichtigen. Die Konzeption der Materialflüsse und die dafür notwendige Fahrzeugflotte wurden überarbeitet, um das intelligente Gütertransportsystem in den Produktionsverbund der Hallen Süd, Nord und Halle 2 einbinden zu können. Die Transportprozesse haben sich dabei so verändert, dass ein Großteil der Transporte innerhalb der Fabrikhallen inzwischen mit einem alternativen Transportsystem, dem mobilen Logistikassistenten der Generationen E1 und E2, durchgeführt wird. Die in Abschnitt 2.1 gestellten Zielsetzungen *Flexibilität des Logistiksystems* aufzeigen

und *Anpassbarkeit des Systems* waren Voraussetzung, dass diese erforderlichen massiven Anforderungsänderungen umgesetzt werden konnten und wurden somit erfüllt.



Abbildung 9&10: Lastübergabe zwischen Logistikkapsel und MLA

Die verbleibenden Transporte für das intelligente Gütertransportsystem konzentrieren sich aus diesem Grund auf Verbindungen zwischen den Hallen (Indoor und Outdoor), wo das System seine Vorteile - insbesondere den intermodalen Warentransport - am besten ausspielen kann.



Abbildung 10: Nutzung der Vertikalförderer

Auf Basis dieser Anpassungen wurde die Anzahl der im Projekt aufzubauenden outdoorfähigen Fahrzeuge von ursprünglich sechzehn auf ein Fahrzeug reduziert. Die Verzögerung beim Bau der Halle Nord und des Verbindungstunnels war ein wesentlicher Grund für die Projektverlängerung.

Weitere Herausforderungen:

- Energetische Effizienz: Das System arbeitet weniger effizient als geplant (Details siehe Abschnitt 3.2), eine Erhöhung der Gesamteffizienz konnte durch die intelligente Kombination der Transportmodi nachgewiesen werden.
- Integration in bestehende Infrastruktur: Anpassungen an Schnittstellen und Fahrwegen waren notwendig, um die Fahrzeuge in die Produktionsumgebung einzubinden.

Insgesamt ist das Vorhaben als technische Demonstration ein Erfolg. Es hat gezeigt, dass automatisiertes Fahren in komplexen Logistikumgebungen - inklusive Außenflächen - realisierbar ist. Die zuverlässige *Nutzung unterirdischer Trassen* für automatisierte Materialflüsse wurde ebenso nachgewiesen wie die zuverlässige *Interaktion verschiedener Fahrzeugtypen*. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine solide Basis für die Weiterentwicklung und den zukünftigen produktiven Einsatz im Werksverbund. Auf die

Erreichung des Ziels *Umweltverträglichkeit verifizieren* wird in den Abschnitten 3.2 und 3.3 eingegangen.

### 3.2. Stoff- und Energiebilanz

#### Ergebnisse

Die Auswertung der Messdaten ergab für eine vollständige Fahrt über eine Strecke von 1,1 km einen mittleren Energieverbrauch von 1005 Wh bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 0,48 m/s.

Die gemessene Leistungsaufnahme des Fahrwerks in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit war wie folgt:

| Geschwindigkeit | Leistungsaufnahme | Temperatur am Umrichter | Leistungsaufnahme | Temperatur am Umrichter |
|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|
| 0.2 m/s         | 227 W             | 35.9 °C                 | 235 W             | 40.7 °C                 |
| 0.4 m/s         | 519 W             | 37.5 °C                 | 508 W             | 40.7 °C                 |
| 0.6 m/s         | 860 W             | 37.9 °C                 | 841 W             | 40.7 °C                 |
| 0.8 m/s         | 1295 W            | 38.3 °C                 | 1138 W            | 40.7 °C                 |
| 1.0 m/s         | 1791 W            | 38.7 °C                 | 1452 W            | 40.6 °C                 |

*Tabelle 3.1: Messdaten Energieverbrauch bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten*

Die Leistungsaufnahme im Dauerbetrieb sinkt kontinuierlich und pendelt sich nach ca. 1h Betriebszeit bei einem nahezu konstanten Wert bei Temperatur und Leistungsaufnahme ein. Es wird also ein stationärer Zustand erreicht.

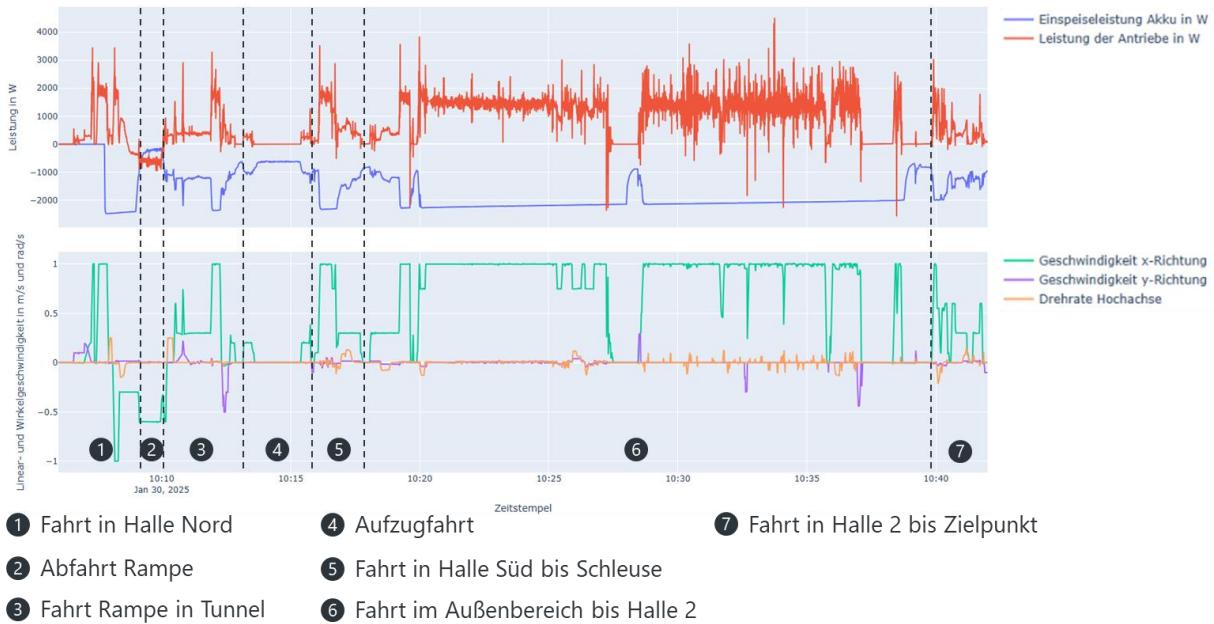
| Geschwindigkeit | Beginn der Fahrt  |                         | Ende der Fahrt    |                         |
|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|
|                 | Leistungsaufnahme | Temperatur am Umrichter | Leistungsaufnahme | Temperatur am Umrichter |
| 1.0 m/s         | 1764 W            | 36.2 °C                 | 1286 W            | 42.4 °C                 |

*Tabelle 3.2: Leistungsaufnahme einer Testreihe in Abhängigkeit der Zeit / resultierender Temperatur*

Für die Auswertung werden die gemessenen Größen im stationären Betrieb genutzt, da dieser Zustand bei einem kontinuierlichen Betrieb der Logistikkapsel vorliegt. Somit wird von einem konstanten Energieverbrauch von 1,29kW bei konstanter Geschwindigkeit und Teillastbetrieb (600kg Zuladung) ausgegangen.

Weitere Analysen zeigten, dass eine Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit zu einer Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs bezogen auf die Fahrdistanz führt. Dies liegt darin begründet, dass der Leistungsbedarf von Steuerungstechnik und Sensorik nahezu konstant

bleibt, während die Leistung für die Fahrantriebe linear mit der Geschwindigkeit ansteigt und somit bei der daraus resultierenden kürzeren Fahrtzeit weniger Energie beansprucht wird. Temperaturunterschiede zwischen Innen- und Außenbereich hatten keinen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch.



*Abbildung 11: Exemplarische Darstellung der Leistungsaufnahme der einzelnen Gerätegruppen (oben) und der Fahrzeuggeschwindigkeit (unten) eines kompletten Fahrtverlaufs auf der Strecke. Die Leistungsaufnahme des Fahrwerkes ist in Rot, die Energieabgabe der Energiespeicher ist in Blau dargestellt. Die Leistungsaufnahme der Steuerungstechnik und Sensorik entspricht der Differenz der beiden Graphen. Die senkrechten schwarzen Linien mit den Markierungen kennzeichnen den Bereich, in dem sich das Fahrzeug zum entsprechenden Zeitpunkt befand.*

Auf Basis der Messreihen, die aus zusammenhängenden Fahrten mit mehreren unterschiedlichen Fahrabschnitten (vgl. Abbildung 11) bestanden, wurden alle relevanten Größen für die Vergleich der Transportlösungen ermittelt.

### **Ermittlung der Energieverbräuche der Transportalternativen**

Im Folgenden wird eine Gegenüberstellung des elektrischen Energiebedarfs des durchgängigen Transportsystems mit einer konventionellen Transportlösung für die Transportaufgabe im ursprünglich geplanten Demonstrator vorgenommen. Um eine Vergleichbarkeit und somit die Zielerreichung nachweisen zu können wurde die Vergleiche auf Basis der Messwerte mit dem durchgängigen Transportsystems durchgeführt.

Als Grundlage für die Berechnung des Energiebedarfs des Demonstrators dienen die in der angepassten Fachtechnischen Beschreibung aufgeführten Strecken und Transportfahrten. Abbildung 12 zeigt das projektierte Mengengerüst der Fahraufträge im täglichen Durchschnitt.

Der Energiebedarf der konventionellen Lösung wird hier auf Basis eines beispielhaften Elektrostaplers (Linde E20) berechnet, der eine mit der SEW-Logistikkapsel vergleichbare Transportlast aufweist.

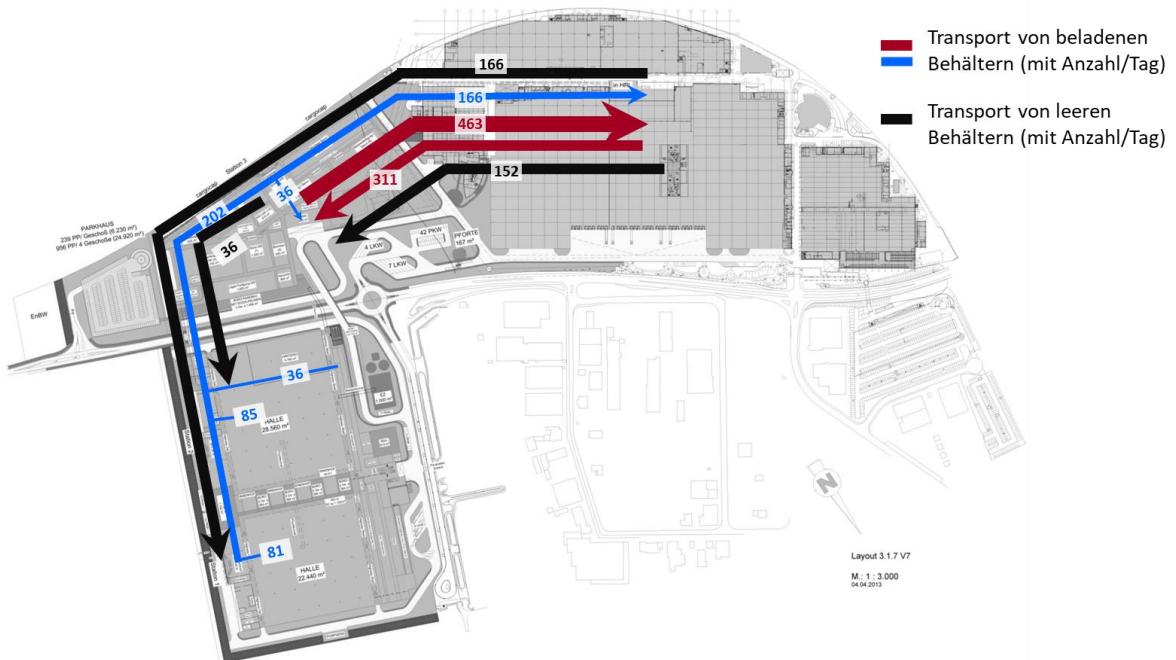


Abbildung 12: Mengengerüst der Transportaufgabe für den Energievergleich

Folgende Randbedingungen werden für die vergleichende Energiebetrachtung getroffen:

- Die mittlere Last eines beladenen Behälters beträgt 600 kg.
- Ein voller Behälter wird durchschnittlich über eine Strecke von 500 m transportiert. Ein leerer Behälter über eine Strecke von 760 m. Diese Strecken wurden anhand der Distanzen aus Abbildung 15 der angepassten fachtechnischen Beschreibung mit einer Gewichtung auf Basis des Mengengerüsts (vgl. Abbildung 12) errechnet.
- Der Transportbedarf für volle Behälter beläuft sich auf 976 Behälter/Tag. Der Transportbedarf für Leerbehälter beläuft sich auf 354 Leerbehälter/Tag. (Der Grund hierfür ist, dass über einige Strecken Transportfahrten in beide Richtungen erfolgen. Somit ist es möglich nach dem Transport die leeren Behälter direkt für den anschließenden Transport zu verwenden. In diesem Fall ist also kein Leerbehälter-transport nötig.)
- Entsprechend der Modellbildung ergeben sich bei der konventionellen Transportlösung am Tag 366 Fahrten mit einer Beladung von je zwei vollen Behältern sowie 244 Fahrten mit einer Beladung von je einem Behälter. Die Verteilung für den Transport von Leerbehältern ist analog: Dadurch ergeben sich am Tag durchschnittlich ca. 165 Fahrten mit je zwei Leerbehältern und ca. 55 Fahrten mit je einem Leerbehälter.
- Die Fahrten der SEW-Logistikkapsel werden unter voller Ausnutzung des Laderaums betrachtet daraus ergeben sich 52 Vollast-Fahrten pro Tag. Der mobile Logistikassistent (MLA) hat eine Transportkapazität von einem Behälter, sodass Vollastfahrten gemäß Modellbildung in der angepassten fachtechnischen Beschreibung, die mit dem MLA durchgeführt werden, mit der doppelten Anzahl an Fahrten berücksichtigt werden. Daraus ergeben sich 872 Fahrten pro Tag mit einem beladenen Behälter und 387 Fahrten mit Leerbehältern für den mobilen Logistikassistenten.

Die Berechnung zur Ermittlung des Energieverbrauchs der Alternativen (Stapler und SEW-

Logistikkapsel) basiert auf dem in der angepassten fachtechnischen Beschreibung beschriebenen Fahrzyklus mit den Arbeitsabschnitten:

- Lastaufnahme (Bei der Logistikkapsel erfolgt dies automatisiert mithilfe eines Logistikassistenten (Fahrerloses Transportfahrzeug mit Lastaufnahmemittel). Bei der Betrachtung des Staplers erfolgt die Lastaufnahme mit seiner integrierten Hubgabel.)
- Fahren (Beschleunigung mit  $a_{max} = 0,5 \text{ m/s}^2$ , Konstantfahrt mit  $v_{mittel} = 1 \text{ m/s}$  (SEW-Logistikkapsel) bzw.  $5,56 \text{ m/s}$  (Linde E20), Verzögerung mit  $-a_{max}$ )
- 3 Stopps während der Fahrt für beide Transportalternativen, welche aufgrund von kreuzendem Verkehr und Fußgänger angenommen werden.
- Lastabgabe (analog Lastaufnahme)

Es wird zwischen folgenden Lastfällen unterschieden:

- Volllast: Hier wird das jeweilige Transportmittel mit zwei durchschnittlich beladenen Behältern betrachtet. (Dieser Fall entspricht 1200 kg Nutzlast), beim Transport mit dem MLA werden für eine Volllastfahrt zwei Teillastfahrten bilanziert.
- Teillast: Hier wird das jeweilige Transportmittel mit einem durchschnittlich beladenen Behälter betrachtet. (Dieser Fall entspricht 600 kg Nutzlast)
- Leerfahrt (1 Behälter): Das jeweilige Transportmittel transportiert einen Leerbehälter. (Dieser Fall entspricht 0 kg Nutzlast)
- Leerfahrt (2 Behälter): Das jeweilige Transportmittel transportiert zwei Leerbehälter. (Dieser Fall entspricht 0 kg Nutzlast)

Für die Alternativen „Durchgängiges Transportsystem“ und „Linde E20“ lassen sich die mittleren Energieaufnahmen pro Tag aus den jeweiligen Energieaufwänden der oben aufgezählten Lastfälle errechnen. Hierfür werden die jeweiligen Energieaufwände nach den zuvor erwähnten Fahrten pro Tag gewichtet.

$$E_{Tag} = n_{Voll} \cdot E_{Voll} + n_{Teil} \cdot E_{Teil} + n_{Leer1} \cdot E_{Leer1} + n_{Leer2} \cdot E_{Leer2}$$

(mit  $E_{Tag}$  = Energieaufnahme des Gesamtsystems pro Tag;  $E_{Voll}$  = Energieaufnahme einer Fahrt des Lastfalls „Volllast“;  $E_{Teil}$  = Energieaufnahme des Lastfalls „Teillast“;  $E_{Leer1}$  = Energieaufnahme einer Fahrt des Lastfalls „Leerfahrt1“;  $E_{Leer2}$  = Energieaufnahme einer Fahrt des Lastfalls „Leerfahrt2“)

Dabei werden die einzelnen Energien wie folgt berechnet:

$$E_{Tag} = \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^n P_{AA,j,i} \cdot t_{AA,j,i} \right)$$

(mit  $E_j$  = Energieaufnahme einer Fahrt des Lastfalls  $j$ ;  $P_{AA,j,i}$  = Leistungsaufnahme des Lastfalls  $j$  in Arbeitsabschnitt  $i$ ;  $t_{AA,j,i}$  = Dauer des Arbeitsabschnitts  $i$  in Lastfall  $j$ )

Die Leistungsaufnahmen  $P_{AA,j,i}$  und die zugehörige Dauer  $t_{AA,j,i}$  der einzelnen Arbeitsschritte wurden aus den an der Modellstrecke ermittelten Kennzahlen in Verbindung mit dem Ablauf eines realen Transportzyklus abgeleitet. Aus der Multiplikation aus Leistungsaufnahme und Arbeitsschrittdauer ergeben sich die folgenden Daten zur Energieaufnahme der beiden Transportlösungen.

| Energieaufnahme SEW-Logistikkapsel in Wattstunden          |  |                         |                    |                  |              |            |       |
|--|--|-------------------------|--------------------|------------------|--------------|------------|-------|
|  | Lastaufnahme   | Fahren (mit 2 x Warten) |                    |                  |              | Lastabgabe | Summe |
|  |  | Beschleunigung (3x)     | Konstantfahrt (3x) | Verzögerung (3x) | Warten (2 x) |            |       |
| Volllast ( $E_{Voll}$ )                                    | 41,7   | 3,3                     | 294,1              | 0,2              | 6,9          | 41,7       | 387,9 |
| Teillast ( $E_{Teil}$ )                                    | 20,9   | 2,8                     | 280,0              | 0,0              | 6,9          | 20,9       | 331,4 |
| Leerfahrt ( $E_{Leer2}$ )                                  | 41,7   | 2,4                     | 408,5              | 0,0              | 6,9          | 41,7       | 501,3 |
| Leerfahrt ( $E_{Leer1}$ )                                  | 20,9   | 2,4                     | 408,5              | 0,0              | 6,9          | 20,9       | 459,6 |
| $E_{Tag,Logistikkapsel}$                                   | $366 \cdot 387,9\text{Wh} + 244 \cdot 331,4\text{Wh} + 165,9 \cdot 501,3\text{Wh} + 55,3 \cdot 459,6\text{Wh} = 331,4\text{kWh}$ |                         |                    |                  |              |            |       |
| Energieaufnahme Linde E20 in Wattstunden                   |  |                         |                    |                  |              |            |       |
|  | Lastaufnahme   | Fahren (mit 2 x Warten) |                    |                  |              | Lastabgabe | Summe |
|  |  | Beschleunigung (3x)     | Konstantfahrt (3x) | Verzögerung (3x) | Warten (2 x) |            |       |
| Volllast ( $E_{Voll}$ )                                    | 2,2  | 40,7                    | 125,4              | -6,5             | 0,3          | 2,2        | 233,2 |
| Teillast ( $E_{Teil}$ )                                    | 1,1  | 35,4                    | 111,6              | -5,6             | 0,3          | 1,1        | 203,7 |
| Leerfahrt ( $E_{Leer2}$ )                                  | 2,2  | 30,6                    | 164,4              | -4,8             | 0,3          | 2,2        | 247,1 |
| Leerfahrt ( $E_{Leer1}$ )                                  | 1,1  | 30,6                    | 164,4              | -4,8             | 0,3          | 1,1        | 244,8 |
| $E_{Tag,Stapler}$ :  | $366 \cdot 233,2\text{Wh} + 244 \cdot 203,7\text{Wh} + 165,9 \cdot 247,1\text{Wh} + 55,3 \cdot 244,8\text{Wh} = 189,6\text{kWh}$ |                         |                    |                  |              |            |       |
| Energieaufnahme SEW-Logistikkapsel & MLA E1 in Wattstunden |  |                         |                    |                  |              |            |       |
|  | Lastaufnahme   | Fahren (mit 2 x Warten) |                    |                  |              | Lastabgabe | Summe |
|  |  | Beschleunigung (3x)     | Konstantfahrt (3x) | Verzögerung (3x) | Warten (2 x) |            |       |
| Volllast ( $E_{Voll}$ )                                    | 41,7   | 3,3                     | 294,1              | 0,2              | 6,9          | 41,7       | 387,9 |
| Teillast ( $E_{Teil}$ )                                    | 20,9   | 2,8                     | 280,0              | 0,0              | 6,9          | 20,9       | 331,4 |
|  | 12,4   | 2,5                     | 38,9               | 0,2              | 2,8          | 12,4       | 69,3  |
| Leerfahrt ( $E_{Leer2}$ )                                  | 41,7   | 2,4                     | 408,5              | 0,0              | 6,9          | 41,7       | 501,3 |
| Leerfahrt ( $E_{Leer1}$ )                                  | 20,9   | 2,4                     | 408,5              | 0,0              | 6,9          | 20,9       | 459,6 |
|  | 24,9   | 1,7                     | 47,3               | 0,0              | 2,8          | 12,4       | 89,1  |
| $E_{Tag,LK+MLA}$ :   | $52 \cdot 387,9\text{Wh} + 872 \cdot 69,3\text{Wh} + 387,2 \cdot 89,1\text{Wh} = 115,1\text{kWh}$                                |                         |                    |                  |              |            |       |

Tabelle 3.3: Energieaufnahme der SEW-Logistikkapsel, des Vergleichsstaplers und der kombinierten Lösung mit SEW-Logistikkapsel und dem mobilen Logistikassistenten

Aus Tabelle 3.3 ist ersichtlich, dass die kombinierte Lösung mit der SEW-Logistikkapsel und den mobilen Assistenzsystemen eine Energieeinsparung bezogen auf die konventionelle Lösung ermöglicht. Beim ausschließlichen Einsatz der SEW-Logistikkapsel im Entwicklungsstand als Technologiedemonstrator wird für die betrachtete Transportaufgabe keine Energieeinsparung im Vergleich zur konventionellen Lösung erreicht.

### 3.3. Umweltbilanz

Für die Umweltbilanz der neuen durchgängigen Logistiklösung sind neben der CO<sub>2</sub>-Bilanz insbesondere die Ressourcen- und Flächennutzung von Bedeutung.

### Energiebilanz

Zur Berechnung des Umweltvorteils des durchgängigen Transportsystems im Vergleich zum Stand der Technik wird der jeweilig tägliche Energiebedarf der beiden Alternativen verglichen.

Hierfür wird zuerst der tägliche Energiebedarf mit Hilfe von (Gl. 1) berechnet. Die Rechnung befindet sich in den grau hinterlegten Abschnitten von Tabelle 3.1. Damit ergibt sich für die Lösung mit der SEW-Logistikkapsel und MLA ein Energiebedarf von 115,1 kWh pro Tag. Die Lösung mit Elektrostaplern hat einen Energiebedarf von 189,5 kWh pro Tag.

$$E_{Jahr} = E_{Tag} \cdot \frac{365 \text{ Tage}}{\text{Jahr}}$$

Hochgerechnet auf ein Betriebsjahr ergibt sich bei einem täglichen Betrieb gemäß Formel eine Energieaufnahme von 42,0 MWh/a für eine Lösung als durchgängiges Transportsystem mit SEW-Logistikkapsel und Logistikassistent. Eine konventionelle Lösung (Elektrostapler) dagegen hat einen Energiebedarf von 69,2 MWh/a.

Eine weitere wichtige Kenngröße zum Vergleich unterschiedlicher Transportsysteme ist der nutzlastspezifische Energiebedarf, d. h. der Energieverbrauch pro transportierte Tonne und gefahrenem km (kWh/tkm). Die nutzlastspezifische Energieaufnahme ergibt sich aus dem folgenden Zusammenhang:

$$E_{spez} = \frac{E_{Tag}}{l_{beladen} \cdot (n_{Voll} \cdot m_{Voll} + n_{Teil} \cdot m_{Teil})}$$

(mit  $E_{spez}$  = spez. Energieaufnahme bezogen auf das Gesamtsystem;  $l_{beladen}$  = durchschnittliche Strecke einer beladenen Fahrt;  $m_{Voll}$  = Ladungsmasse von zwei durchschnittlichen Behältern;  $m_{Teil}$  = Ladungsmasse von einem durchschnittlichen Behälter)

Mit dieser Gleichung ergeben sich für die beiden Alternativen folgende Werte:

Für das durchgängige Transportsystem erhält man einen nutzlastspezifischen Energiebedarf von 0,39 kWh/tkm. Die Alternative mit Elektrostaplern hat einen nutzlastspezifischen Energieverbrauch von 0,65 kWh/tkm.

Tabelle 3.4 fasst die wesentlichen Daten der Energiebilanz und die damit verbundenen Energieeinsparpotenziale zusammen:

|                                    |          | kombinierte Lösung LK+MLA | konventionelle Lösung | Einsparpotenzial |
|------------------------------------|----------|---------------------------|-----------------------|------------------|
| Täglicher Energiebedarf            | kWh/Tag  | 115,1                     | 189,6                 | 74,5             |
| Jahresenergiebedarf                | MWh/Jahr | 42,0                      | 69,2                  | 27,2             |
| Nutzlastspezifischer Energiebedarf | kWh/tkm  | 0,39                      | 0,65                  | 0,26             |

Tabelle 3.4: Energiebilanz

Es ergibt sich somit ein energetisches Einsparpotenzial von 27,2 MWh/Jahr bzw. 0,26 kWh/tkm durch den Einsatz des durchgängigen Transportsystems gegenüber dem Elektrostapler. Eine produktbezogene Bilanzierung ist nicht möglich, da es sich bei den Transporten sowohl um Batchtransporte unterschiedlicher Chargengröße von unbearbeitete Sägeabschnitte und Komponenten als auch von Fertigprodukten mit sehr hoher Varianz handelt.

## CO<sub>2</sub>-Bilanz

Im Folgenden wird eine CO<sub>2</sub>-Bilanzierung der Transportalternativen durchgeführt. Da sowohl Elektrostapler als auch die SEW-Transportlösung elektrisch betrieben werden, ist hier eine Differenzierung in CO<sub>2</sub>-Äquivalente verschiedener Energieträger nicht notwendig. Für die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung wird der für 2024 vom Stromanbieter veröffentlichte Strommix angesetzt - dieser beträgt 0,380 kg/kWh. Aufbauend auf den Werten aus Tabelle 3.4 ergibt sich mit diesem Strommix die folgende CO<sub>2</sub>-Bilanz:

|  |         | kombinierte Lösung LK+MLA | konventionelle Lösung | Einsparpotenzial |
|--|---------|---------------------------|-----------------------|------------------|
| Jährlicher CO <sub>2</sub> -Ausstoß          | kg/Jahr | 15968                     | 26297                 | 10329            |
| Nutlastspezifischer CO <sub>2</sub> -Ausstoß | kg/tkm  | 0,15                      | 0,25                  | 0,10             |

*Tabelle 3.5: CO<sub>2</sub>-Bilanz mit Strommix 2024 der Stadtwerke Bruchsal*

Es ergibt sich somit ein CO<sub>2</sub>-Emissions-Reduktionspotenzial von 10,3 t/Jahr bzw. 0,10 kg/tkm durch den Einsatz des durchgängigen Transportsystems gegenüber dem Elektrostapler.

## CO<sub>2</sub>-Bilanz unter Berücksichtigung der installierten Photovoltaikanlagen seit der Werkserweiterung am SEW-Standort Graben

Für den Betrieb des Transportsystems ist die Nutzung der eigenen Stromproduktion mit den Photovoltaikanlagen, die im Rahmen der Werkserweiterung auf den Dächern der neu errichteten Hallen installiert wurden, möglich. Dadurch würde nochmals ein großer Teil des beim Betrieb des Logistiksystems entstehenden CO<sub>2</sub>-Äquivalents eingespart. Die im Rahmen der Werkserweiterung installierte Photovoltaik-Anlage hat eine installierte Peak-Leistung von über 3 MW (da die Werkserweiterung noch im Gange ist erhöht sich die installierte Peakleistung weiter) und würde mit den daraus zu erwartenden Stromerträgen für den Betrieb des Transportsystems ausreichen. In Tabelle 3.6 ist die CO<sub>2</sub>-Bilanz, die sich rechnerisch bei einer 100%-Versorgung aus der Photovoltaikanlage ergibt, dargestellt. Als CO<sub>2</sub>-Äquivalent wird ein konservativer Wert von 0,055 kg/kWh (laut Fraunhofer ISE liegen die Werte zwischen 0,2 und 0,7 kg/kWh) angenommen.

|  |         | kombinierte Lösung LK+MLA | konventionelle Lösung | Einsparpotenzial |
|--|---------|---------------------------|-----------------------|------------------|
| Jährlicher CO <sub>2</sub> -Ausstoß          | kg/Jahr | 2311                      | 3806                  | 1495             |
| Nutlastspezifischer CO <sub>2</sub> -Ausstoß | kg/tkm  | 0,02                      | 0,04                  | 0,01             |

*Tabelle 3.6: CO<sub>2</sub>-Bilanz unter Nutzung von Strom aus Photovoltaik*

Im Falle der Photovoltaiknutzung ergibt sich ein CO<sub>2</sub>-Emissions-Reduktionspotenzial von 1,5 t/Jahr bzw. 0,01 kg/tkm durch den Einsatz des durchgängigen Transportsystems gegenüber dem Elektrostapler.

## Weiter Ressourcenschonungen

### *Ressourcenbedarf Energiespeicher*

Das Energieversorgungskonzept der Logistikkapsel und des mobilen Logistikassistenten besteht aus einer berührungslosen Energieübertragung und Energiespeichern mit einer Gesamtkapazität von 1910 Wh. Diese Kombination ermöglicht es im laufenden Betrieb automatisiert den Energiespeicher zu laden. Im Gegensatz dazu muss der Energiespeicher der konventionellen Transportlösung (Elektrostapler) manuell an einer Ladestation geladen werden - eine Automatisierung ist nicht ohne weiteres möglich. Aus diesem Grund hat der Vergleichsstapler mit einer Kapazität von 50kWh ( $80\text{ V} \times 625\text{ Ah} = 50.000\text{ Wh}$ , Batteriegewicht: ca. 1.210 kg) einen deutlich größeren Energiespeicher mit entsprechend höherem Material-Ressourcenbedarf um einen wirtschaftlichen Betrieb ohne häufiges personalaufwändiges Zwischenladen zu ermöglichen.

### *Flächennutzung*

Das neue Gütertransportsystem begünstigt bei der Anwendung „Hallenverbindende-Outdoortransporte“ die Flächennutzung auf dem Werksgelände, indem der Umschlag von Indoor- zu Outdoortransporten auf bestehenden Verkehrsflächen, z.B. auf den Hauptwegen innerhalb der Gebäude stattfinden kann. Für die Lastübergabe ist die Logistikkapsel mit dem flächenbeweglichen Fahrwerk in der Lage sich so zu positionieren, dass die Beladung mit dem MLA begünstigt wird. Die Logistikkapsel kann nach der Beladung bestehende Hallentore nutzen, um den Transport im Outdoorbereich bei dauerhaftem Schutz vor Witterung fortzuführen. Bei konventionellen Lösungen sind die Fahrzeuge für den Outdoor-Transport insbesondere aufgrund ihrer Abmessungen nicht geeignet, um auf den bestehenden Verkehrsflächen im Innenbereich zu rangieren und beladen zu werden. Entsprechend müssen überdachte Flächen im Außenbereich für den Umschlag vorgesehen werden. Die Überdachung ist erforderlich, um die umzuschlagenden Ladungsträger vor Witterung zu schützen. Die benötigte Verkehrsfläche für den Umschlag sowie das Rangieren ist somit beim intelligenten Transportsystem geringer als bei konventionellen Lösungen.

Die erfolgreich nachgewiesene Nutzung des Tunnels für den automatisierten Materialfluss mit Fahrzeugen ermöglicht die Nutzung zusätzlicher unterirdischer Verkehrsflächen ohne zusätzlichen Flächenbedarf. Zusätzliche Verkehrsflächen können zudem zur Entlastung bestehender Verkehrsflächen beitragen und begünstigen somit eine Effizienzsteigerung der Transporte auf den bestehenden Wegen.

### 3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse

#### Kosteneinsparungen

Bei der Anwendung des intelligenten Transportsystems bestehend aus SEW-Logistikkapsel und mobilem Logistikassistent im innerbetrieblichen Werksverkehr ist von Betriebskostensenkungen auszugehen. Diese resultieren aus der höheren energetischen Effizienz des durchgängigen Fördersystems im Vergleich zum konventionellen Staplereinsatz sowie aus den Personalkosteneinsparungen aufgrund der Automatisierung der im Modellszenario anfallenden Materialflussprozesse.

Die Wartungskosten für das neue Transportsystem werden gleich wie beim Staplerbetrieb veranschlagt (ca. 18.000€), eine differenzierte Betrachtung dieser Kosten entfällt daher. Grundlage der nachfolgenden energetischen Analyse bilden die aktuellen Strombezugskosten von 25ct/kWh. Die Betriebskosten werden für das Modellszenario mit 976 Behältertransporten mit einer mittleren Nutzlast von 600 kg über eine durchschnittliche Förderstrecke von ca. 500 m ermittelt.

Unter diesen Rahmenbedingungen ergeben sich im ersten Betriebsjahr durch den Einsatz der Logistikkapsel und den mobilen Logistikassistenten die nachfolgend ausgewiesenen Einsparungen bei den Energiekosten.

$$\begin{aligned}\Delta K_{E,Jahr} &= (E_{Stapler,Jahr} - E_{Kombilösung,Jahr}) * k_{Strom} \\ &= \left( 69.203 \frac{kWh}{Jahr} - 42.021 \frac{kWh}{Jahr} \right) * 0,25 \frac{\epsilon}{kWh} = 6.795 \frac{\epsilon}{Jahr}\end{aligned}$$

(mit  $\Delta K_{E,Jahr}$  = jährliche Energiekosteneinsparung;  $E_{Stapler,Jahr}$  = jährlicher Energiebedarf der eingesetzten Stapler;  $E_{Logistikkapsel,Jahr}$  = jährlicher Energiebedarf der kombinierten Lösung;  $k_{Strom}$  = spezifischer Strompreis)

Die jährlichen Personalkosten für den Betrieb der zur Transportaufgabe eingesetzten Gabelstapler (Zweischichtbetrieb) belaufen sich auf etwa 1.241.250 € pro Jahr. Das neue Transportsystem verursacht deutlich geringere Personalkosten. Die Steuerung der Logistikkapseln erfolgt über die fahrzeuginterne Steuerung, die mittels WLAN-Anbindung und im Outdoor-Bereich über Mobilfunk mit dem Leitstand kommuniziert. Obwohl sich seit der Antragstellung herausgestellt hat, dass die erforderliche Leitstandskapazität für die Überwachung der automatisierten Fahrzeuge höher ist als zur Antragstellung angenommen, beläuft sich der Anteil trotzdem lediglich auf etwa 20 % einer Vollzeitstelle. Daraus ergeben sich im Zweischichtbetrieb jährliche Personalkosten in Höhe von rund 47.200 €.

$$\begin{aligned}\Delta K_{P,Jahr} &= K_{P,Stapler,Jahr} - K_{P,Kombilösung,Jahr} = 1.241.250 \frac{\epsilon}{Jahr} - 47.200 \frac{\epsilon}{Jahr} \\ &= 1.194.050 \frac{\epsilon}{Jahr}\end{aligned}$$

Bei einem dauerhaften Einsatz des neuartigen Transportsystems ist unter Berücksichtigung der prognostizierten Steigerungen bei Energie- und Personalkosten in den Folgejahren von einer sukzessiven Erhöhung der jährlichen Kosteneinsparungen auszugehen. Darüber hinaus

entfaltet das Vorhaben signifikante Wirkungen auf weitere betriebswirtschaftliche Einflussgrößen, wie die Reduktion des Unfallrisikos oder die Optimierung betrieblicher Abläufe. Diese Effekte führen zu zusätzlichen, derzeit nicht quantifizierbaren Kostenentlastungen.

Für die Ermittlung der Amortisationsdauer werden die Gesamtinvestitionen in Höhe von 4,49 Mio€ vereinfacht als Einmalbetrag veranschlagt. Die Gesamtinvestition setzt sich aus den im Förderprojekt nachgewiesenen 3,05 Mio€ und 1,44 Mio€, die für 12 mobile Logistikassistenten veranschlagt werden, zusammen. In Tabelle 3.7 ist eine vereinfachte konservative Amortisationsrechnung unter Berücksichtigung der Förderung in Höhe von 20% dargestellt.

|  | Jahr 0        | Jahr 1       | Jahr 2     | Jahr 3      | Jahr 4        | Jahr 5        | Jahr 6        |
|--|---------------|--------------|------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
|  | Angaben in T€ |              |            |             |               |               |               |
| Jährliche Investitionskosten   | 4.490         | -            | -          | -           | -             | -             | -             |
| Förderung  | 610           | -            | -          | -           | -             | -             | -             |
| Investitionskosten kumuliert, verzinst, Berücksichtigung der Förderung             | 3.880         | 4.152        | 4.442      | 4.753       | 5.086         | 5.442         | 5.823         |
| Betriebskosteneinsparungen (Annahme: Personal- und Energiekostensteigerung von 2%) | -             | 1.201        | 1.225      | 1.249       | 1.274         | 1.300         | 1.326         |
| Betriebskosteneinsparungen kumuliert, verzinst                                     | -             | 1.201        | 2.510      | 3.935       | 5.485         | 7.168         | 8.996         |
| <b>Differenz (Investitionskosten - Betriebskosteneinsparungen)</b>                 | <b>3.880</b>  | <b>1.750</b> | <b>708</b> | <b>-431</b> | <b>-1.673</b> | <b>-3.026</b> | <b>-4.499</b> |

*Tabelle 3.7: Amortisationsrechnung mit Förderung*

Tabelle 3.8 zeigt die Berechnung ohne Berücksichtigung einer 20 %-Förderung.

|  | Jahr 0        | Jahr 1       | Jahr 2       | Jahr 3     | Jahr 4      | Jahr 5        | Jahr 6        |
|--|---------------|--------------|--------------|------------|-------------|---------------|---------------|
|  | Angaben in T€ |              |              |            |             |               |               |
| Jährliche Investitionskosten   | 4.490         | -            | -            | -          | -           | -             | -             |
| Förderung  | 0             | -            | -            | -          | -           | -             | -             |
| Investitionskosten kumuliert, verzinst, Berücksichtigung der Förderung             | 4.490         | 4.804        | 5.141        | 5.500      | 5.885       | 6.297         | 6.738         |
| Betriebskosteneinsparungen (Annahme: Personal- und Energiekostensteigerung von 2%) | -             | 1.201        | 1.225        | 1.249      | 1.274       | 1.300         | 1.326         |
| Betriebskosteneinsparungen kumuliert, verzinst                                     | -             | 1.201        | 2.510        | 3.935      | 5.485       | 7.168         | 8.996         |
| <b>Differenz (Investitionskosten - Betriebskosteneinsparungen)</b>                 | <b>4.490</b>  | <b>2.403</b> | <b>1.406</b> | <b>316</b> | <b>-873</b> | <b>-2.171</b> | <b>-3.584</b> |

*Tabelle 3.8: Amortisationsrechnung ohne Förderung*

Das Ergebnis lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Amortisationszeit **mit** 20 % Förderung: Amortisation im 3. Jahr
- Amortisationszeit **ohne** Förderung: Amortisation im 4. Jahr

Die Förderung des Projektes reduziert die Amortisationszeit um 1 Jahr.

Neben den genannten Einsparungen, die anhand des Modellszenarios aufgezeigt wurden, sind weitere wirtschaftliche Vorteile aufgrund der geleisteten und geförderten Investitionen in diesem Projekt zu erwarten. Dies betrifft insbesondere den geförderten Bau des Tunnels, der Rampen und die dazugehörigen Vertikalförderer zur Verbindung von Halle Nord und Halle Süd. Der Bau dieser Einrichtungen wurde durch das vorliegende Projekt initiiert und konsequent durchgeführt. Ohne die anteilige Förderung durch das BMU wäre der erfolgte Bau

dieser Einrichtungen nicht sichergestellt. Diese Verbindung der beiden Werksgeländeteile, die durch eine öffentliche Straße getrennt sind, wird über Jahrzehnte die Effizienz der werksinternen Transporte am SEW-Standort erhöhen.

### 3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Um modernen flexiblen oder sogar wandelbaren Fabriken gerecht zu werden, werden zunehmend mobile Systeme zur Realisierung der Materialflüsse eingesetzt. Im Indoor-Bereich sind Fahrerlose Transportsysteme (FTS) in vielen Fabriken für den Großladungsträger-Transport bereits etabliert. Sie sind darauf spezialisiert in einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung Ladung von einer Materialflussquelle zu einer -senke zu befördern. Die Hauptinnovation bei der vorliegenden Lösung liegt im intermodalen Transport über mehrere mobile Materialflusssysteme. Damit ist es möglich für bestimmte Einsatzfälle optimierte Transportlösungen miteinander zu kombinieren und unterschiedliche Materialflussprozesse zu optimieren.

Neben dieser Hauptinnovation sind die folgenden Innovationen hervorzuheben:

- Das *Energieversorgungssystem* besteht aus einer berührungslosen Energieübertragung und zwei Energiespeichern auf Doppelschichtkondensator- und Li-Ion-Batterie-Basis. In der vorliegenden Ausführung können die fahrzeugseitig verbauten Energieübertragerköpfe die gleiche Energieinfrastruktur nutzen wie die Logistikassistenten. Die Logistikkapsel kann gleichzeitig mit zwei Übertragerköpfen laden um den Ladevorgang möglichst schnell durchzuführen. Das Laden des Energiespeichers erfolgt automatisiert, was bei konventionellen Transportlösungen in der Regel nicht möglich ist.
- Das *Omnidirektionale Fahrwerk* ist in der Lage 12%-Steigungen zu bewältigen, was so bisher bei automatisierten Palettentransportfahrzeugen nicht möglich ist. Die Flächenbeweglichkeit des Fahrwerks erlaubt beliebige Fahrmanöver auf sehr engem Raum. Die verbauten Raddurchmesser und das Fahrwerk mit Pendelachse ermöglichen ein automatisiertes Fahren über Schwellen, Rampen und Unebenheiten wie sie im Freien auf Werksgeländen vorzufinden sind.
- Die *Umfeldwahrnehmung* ist für den Outdoor-Einsatz angepasst und ist die Grundlage für die Lokalisierung und Bahnplanung, sowie für die Hinderniserkennung, die auf Werksgeländen auf deutlich komplexere Begegnungssituationen sowie Witterungseinflüsse regieren muss als dies bei FTS im Indoor-Einsatz der Fall ist.
- Die drahtlose Kommunikation der Logistikkapsel nutzt zwei Technologien um sowohl im Indoor- als auch im Outdoor-Bereich eine zuverlässige Kommunikation zum Leitsystem, das im Rechenzentrum gehostet ist, sicherzustellen. Im Indoor-Bereich wird WLAN und im Outdoor-Bereich wird Mobilfunk verwendet.

Die Kombination der beiden Transportsysteme SEW-Logistikkapsel und mobiler Logistikassistent mit automatisierter Materialflussschnittstelle ermöglichen dem Betreiber die Auslegung bzw. Optimierung der Transportlösung nach verschiedenen Optimierungsgrößen: Durchsatz, Transportdauer, Fahrzeuganzahl und Energiekosten.

## 4. Übertragbarkeit

### 4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Die mit der Erprobung des intelligenten Transportsystems gemachten Erfahrungen sind sehr positiv. Das Potenzial einer durchgängigen innerbetrieblichen Materialflusslösung ohne Systembrüche konnte aufgezeigt werden. Insbesondere die Möglichkeit automatisierte Palettentransporte im Außenbereich durchführen zu können bietet Potenzial für eine Effizienzsteigung der innerbetrieblichen Materialflüsse. Auch das Interesse bei potenziellen Nutzern, die das System kennenlernen konnten, ist sehr groß.

Eine wichtige Erfahrung bei der Projektdurchführung war, dass ein rein quantitativer Vergleich eines innovativen kombinierten neuen Ansatzes mit herkömmlichen Materialflusslösungen nur bedingt geeignet ist, da Größen wie Flexibilität im Betrieb bei sich verändernden Randbedingungen und Prozessen nicht quantifizierbar sind. Insbesondere bei diesen über die Projektlaufzeit auftretenden Veränderungen hat die Kombination und der automatisierte Umschlag der zwei Transportsysteme Logistikkapsel und Logistikassistent seine Stärke ausgespielt. Mit einer starren Materialflusslösung wären die Planungsänderungen der Werkserweiterung ohne kostenintensive Anpassungen mit abbildbar.

### 4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts)

Der Modellcharakter der Anwendung bezieht sich auf die Anwendung im innerbetrieblichen Werkstransport. Für eine Anwendung über mehrere Betriebsstandorte oder sogar als Anwendung im Intermodalen Transportwesen unter Einbeziehung bestehender Verkehrsträgerinfrastrukturen wie sie im ursprünglichen Konzept der Logistikkapsel angedacht waren (vgl. angepasste fachtechnische Beschreibung) sind weitere Untersuchungen und die Einbeziehung der Betreiber öffentlicher Verkehrsträger sowie der Politik erforderlich.

Bezogen auf die innerbetrieblichen Werkstransporte kann die innovative Transportlösung mit Logistikkapsel und mobilem Logistikassistenten in jedem Unternehmen, das auf dem Werksgelände Transporte von Großladungsträgern mit dem Fußabdruck einer Europalette durchführt, eingesetzt werden. Der Einsatz der Lösung beschränkt sich dabei nicht nur auf die Unternehmen der Antriebs- und Automatisierungstechnik, sondern kann in allen Branchen mit diesen Transportaufgaben Anwendung finden. Die Notwendigkeit für innovative automatisierte innerbetriebliche Transportlösungen hat während der Projektlaufzeit weiter zugenommen. Grund dafür ist der weiter anwachsende Fachkräftemangel, der neben den technischen auch insbesondere in den Berufen mit logistischer Ausrichtung zugenommen hat.

Für einen zuverlässigen Einsatz im Außenbereich bei jeder vorherrschenden Witterung und zu jeder Tageszeit, müssen die eingesetzten Umfeldwahrnehmungs- und Safety-Systeme weiter verbessert und dauerhaft bei diesen Bedingungen validiert werden. Dies erfolgt bei SEW-Eurodrive mit der realisierten Logistikkapsel und in parallelaufenden internen Forschungsprojekten, die beispielsweise neue Ansätze in der Sicherer Personenerkennung

verfolgen. Neben den eigenen Arbeiten auf diesem Gebiet finden weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in anderen Unternehmen und Forschungseinrichtungen statt, deren Ergebnisse die Robustheit des Outdoorfahrens verbessern.

Bedingt durch den geforderten Modellcharakter wurde die SEW-Logistikkapsel als Technologieträger ausgeprägt, der die Evaluierung mehrerer neuer technischer Ansätze ermöglicht hat (vgl. Kap. 2.3 und 3.5). Für eine Verbreitung der Lösung kann der Technologieeinsatz reduziert bzw. an spezifische Anwendungsfälle angepasst werden, beispielsweise im Zusammenspiel Fahrgeschwindigkeit und Steigungsfähigkeit oder die Konsolidierung mehrere Steuerungs- und Rechnerplattformen. Ebenso ist eine Erhöhung der Ladekapazität denkbar, die ebenso wie die zuvor genannten Maßnahmen zu einer weiteren Erhöhung der Energieeffizienz des Systems beitragen kann. Die erfolgreiche modellhafte Demonstration ist weiterhin daran erkennbar, dass bereits Kundenanfragen für die Logistikkapsel bzw. die kombinierte Lösung mit mobilem Logistikassistent vorliegen.

#### 4.3. Kommunikation der Projektergebnisse

Der neuartige Ansatz SEW-Logistikkapsel wurde in Vorlesungen wie dem *Mechatronikkolloquium*, dem *Fahrzeugtechnologieseminar*, der Vorlesung *Robogistics*, *Logistik C* - alle an der Hochschule Karlsruhe (hka), mehrfach in der Vorlesung *Energieeffiziente Intralogistiksysteme* am KIT, in der Vorlesung *Logistik* an der HS-Pforzheim und der Vorlesung *Fabrikplanung* an der HS-Nordhausen vorgestellt. Auch auf Fachvorträgen wurde die kombinierte Transportlösung vorgestellt. Entsprechende Veranstaltungen waren z.B. das *FZI-OpenHouse* und der *Fachkongress efeuCampus*. Auf der Hannovermesse 2025 wurde die am Standort Graben-Neudorf realisierte Lösung im Rahmen einer Filmpräsentation vorgestellt. Aktuelle laufen die Planungen für die Hannovermesse 2026 bei denen diskutiert wird ob die Logistikkapsel und Informationen über die Demonstration in Graben-Neudorf präsentiert werden. Seit der Realisierung in Graben-Neudorf wurden die Ergebnisse bei mehreren Werkführungen den SEW-Mitarbeitern sowie Kunden und weiteren Geschäftspartnern vorgestellt. Seit September 2025 ist der Blog „Die Logistikkapsel-Intelligente Güterlogistik der Zukunft“ auf der SEW-Homepage veröffentlicht (<https://www.sew-eurodrive.de/blog/posts/logistikkapsel-intelligente-gueterlogistik-der-zukunft.html>). Dieser Blog ist direkt auf der deutschen Landing Page des Unternehmens verlinkt. Der Beitrag ist außerdem in der Mediathek der KIT-Science-Week zu finden.

## 5. Zusammenfassung

Die SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG mit Sitz in Bruchsal zählt zu den weltweit führenden Unternehmen im Bereich der Antriebs- und Automatisierungstechnik. Ein besonderer Fokus liegt auf dem Geschäftsfeld mobiler Transport- und Assistenzsysteme zur Optimierung intralogistischer Prozesse. Das vorgestellte Projekt wurde eigenständig von SEW-EURODRIVE realisiert und dient der Entwicklung intelligenter, flexibler Materialflusssysteme.

Insbesondere in logistischen Werkverbünden behindern Medienbrüche zwischen Hallenabschnitten einen durchgängigen Materialfluss, da bestehende fahrerlose Transportsysteme (FTS) meist auf Innenbereiche beschränkt sind. Die daraus resultierenden manuellen Übergabeprozesse stehen im Widerspruch zu den Anforderungen moderner Produktionslogistik. Die von SEW-EURODRIVE entwickelte Logistikkapsel adressiert diese Problematik durch eine wetterunabhängige, automatisierte Verbindungslösung zwischen Gebäuden und leistet damit einen Beitrag zur Effizienzsteigerung und Nachhaltigkeit industrieller Materialflüsse.

Aus diesem Grund zielt das Vorhaben auf die Demonstration eines autonomen Transportsystems, das sich flexibel in bestehende Logistikprozesse integrieren lässt und auch Außenbereiche zuverlässig erschließt. Neben der technischen Machbarkeit steht die Umweltverträglichkeit im Fokus, etwa durch Emissionsreduktion und effiziente Flächennutzung. Ergänzend sollte die Nutzung unterirdischer Trassen erprobt werden, um Werksgelände sicher und platzsparend zu verbinden und den Flächenverbrauch weiter zu optimieren.

Im Zentrum der vorgestellten technischen Lösung steht die SEW-Logistikkapsel, die nahtlos mit mobilen Logistikassistenten interagiert. Das Fahrzeug ist für Innen- und Außeneinsatz konzipiert, trägt bis zu 1,5 Tonnen und bewältigt Rampen bis 12% Steigung sowie Aufzüge. Die Energieversorgung erfolgt über innovative Energiespeicher mit berührungsloser Ladung. Es kommen ein angepasstes Navigationssystem mit GPS, Laser und Kameraunterstützung sowie eine stabile Kommunikation via WLAN/Mobilfunk zum Einsatz. Die zentrale Steuerung erfolgt über die SEW-eigene Softwarearchitektur. Umweltfreundlichkeit wird durch optimierte Prozesse und lokale Photovoltaikanlagen gefördert.

Nach Analyse der bestehenden Materialflüsse und Definition relevanter Schnittstellen wurde eine Demonstrationsstrecke am SEW-EURODRIVE-Standort Graben-Neudorf zwischen Halle Nord und Halle 2 für die Erprobung komplexer Transportabläufe, inklusive Rampenfahrten, Aufzügen und Outdoor-Betrieb festgelegt. Die baulichen Maßnahmen begannen 2014. Verbindungstunnel, Rampen und Vertikalförderer standen mit der Fertigstellung der Halle Nord 2022 zur Verfügung. Das Fahrzeug-Engineering fokussierte auf modulare Komponenten für Fahrwerk, Energieversorgung und Kommunikation. Die berührungslose MOVITRANS®-Infrastruktur ermöglicht ein wartungsarmes Laden entlang der Strecke. Die Systemintegration erfolgte Ende 2024, gefolgt von erfolgreichen Testfahrten. Die Betriebsdaten wie Energieverbrauch, Geschwindigkeit und Steuerungsleistung wurden über interne Komponenten und ein Echtzeitbussystem erfasst.

Das Projekt erreichte zentrale Ziele, insbesondere die erfolgreiche Umsetzung automatisierten Fahrens im Innen- und Außenbereich zur Verbindung mehrerer Werkshallen. Abschluss der Inbetriebnahme war 20.12.2024.

Die Umweltbilanz des durchgängigen Transportsystems mit SEW-Logistikkapsel und mobilen Logistikassistenten zeigt signifikante ökologische Vorteile gegenüber konventionellen Elektrostaplern. Der jährliche Energiebedarf für das betrachtete Transportszenario liegt mit 42,0 MWh deutlich unter dem der Vergleichslösung (69,2 MWh), was einer Einsparung von 27,2 MWh entspricht. Auch der nutzlastspezifische Energieverbrauch fällt mit 0,39 kWh/tkm gegenüber 0,65 kWh/tkm günstiger aus. Die daraus resultierende CO<sub>2</sub>-Reduktion beträgt unter Berücksichtigung der Angaben des Energieversorgers 10,3 Tonnen pro Jahr. Wird der Energiebedarf vollständig durch die am Standort installierten Photovoltaikanlagen gedeckt, erhöht sich das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial auf bis zu 24 Tonnen jährlich. Zusätzlich reduziert das System den Ressourcenbedarf durch kleinere, automatisiert ladbare Energiespeicher und ermöglicht eine effizientere Flächennutzung durch Integration in bestehende Verkehrswege sowie die Nutzung unterirdischer Tunnel. Insgesamt belegt die Analyse die ökologischen Vorteile des Systems hinsichtlich Energieeffizienz, Emissionsvermeidung, Ressourcenschonung und Flächenoptimierung.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse des intelligenten Transportsystems aus SEW-Logistikkapsel und mobilen Logistikassistenten zeigt substanzielle Kosteneinsparungen gegenüber konventionellen Staplerlösungen. Durch die höhere energetische Effizienz und die weitgehende Automatisierung der Materialflüsse reduzieren sich die jährlichen Personalkosten von rund 1,24 Mio. € auf etwa 47.200 €. Die Energiekosten fallen ebenfalls deutlich geringer aus.

Technologisch hebt sich das System durch intermodalen Transport über mehrere mobile Einheiten ab. Zu den Innovationen zählen ein automatisiertes, berührungsloses Energieversorgungssystem, ein omnidirektionales Fahrwerk mit Outdoor-Tauglichkeit, eine für den Außenbereich angepasste Umfeldwahrnehmung sowie eine duale Kommunikationsstruktur über WLAN und Mobilfunk. Diese Merkmale ermöglichen eine skalierbare und energieeffiziente Transportlösung, die sich an unterschiedliche betriebliche Anforderungen anpassen lässt.

Die Praxiseinführung des intelligenten Transportsystems aus Logistikkapsel und mobilem Logistikassistent zeigte ein hohes Potenzial für durchgängige, automatisierte Materialflüsse, auf Werksgeländen. Der Modellcharakter der Lösung ist primär auf innerbetriebliche Werkstransporte ausgerichtet und lässt sich damit auf alle Branchen mit vergleichbaren Transportanforderungen übertragen. Eine breitere Anwendung, etwa im intermodalen Güterverkehr, bedarf weiterer Forschung und politischer Einbindung. Für den robusten Außeneinsatz sind fortlaufende Validierungen der Umfeldsensorik notwendig. Erste Kundenanfragen bestätigen die Übertragbarkeit und das Marktinteresse.

## Summary

SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG, Bruchsal, Germany, ranks among the global leaders in drive and automation technology. A strategic focus of the company lies in the development of mobile transport and assistance systems aimed at optimizing intralogistics processes. The project presented herein was independently conceived and implemented by SEW-EURODRIVE, targeting the advancement of intelligent and flexible material flow systems.

In complex industrial logistics networks, media discontinuities between buildings often impede seamless material flow, as conventional automated guided vehicles (AGVs) are typically restricted to indoor environments. The resulting manual handover procedures conflict with the demands of modern production logistics. SEW-EURODRIVE addresses this challenge through the development of a weather-independent, automated interbuilding transport solution -the logistics capsule.

The project aims to demonstrate an autonomous transport system that integrates flexibly into existing logistics processes and reliably extends operations to outdoor areas. In addition to technical feasibility, environmental compatibility is emphasized, including emission reduction and efficient land use. The concept also explores the use of underground routes to connect factory premises securely and space-efficiently, further optimizing land consumption.

At the core of the technical solution is the SEW logistics capsule, designed for seamless interaction with mobile logistics assistants. The vehicle supports both indoor and outdoor deployment, carries loads up to 1.5 tons, and navigates ramps with inclines up to 12% as well as elevators. Energy supply is ensured via an innovative inductive charging system. Navigation relies on a customized system supported by GPS, laser, and camera technologies, while communication is maintained through WIFI and cellular networks. Central control is managed via SEW's proprietary software architecture. Environmental sustainability is promoted through optimized processes and the integration of local photovoltaic systems. The safety concept adheres to established standards.

Following an analysis of existing material flows and the definition of interfaces, a demonstration route was established between Hall North and Hall 2 to test complex transport scenarios, including ramp navigation, elevator usage, and outdoor operation. Construction activities commenced in 2014, with tunnels, ramps, and vertical conveyors completed alongside Hall North in 2022. Vehicle engineering focused on modular components for chassis, energy systems, and communication. The contactless MOVITRANS® infrastructure enables low-maintenance charging along the route. System integration was finalized in late 2024, followed by successful test runs. Operational data such as energy consumption, speed, and control performance were recorded via internal components and a real-time bus system.

The project achieved its primary objectives, notably the successful implementation of automated driving in both indoor and outdoor environments to connect multiple production halls. Commissioning was completed on December 20, 2024.

The analysis of the continuous transport system using the SEW logistics capsule and mobile logistics assistant reveals significant ecological advantages over conventional electric forklifts.

Annual energy consumption is 42.0 MWh, substantially lower than the comparator system's 69.2 MWh, resulting in a savings of 27.2 MWh. Payload-specific energy consumption is also more favorable at 0.39 kWh/tkm compared to 0.65 kWh/tkm. Based on data from the energy provider, this translates to an annual CO<sub>2</sub> reduction of 10.3 tons. If the energy demand is fully met by on-site photovoltaic installations, the CO<sub>2</sub> savings potential increases to up to 24 tons annually. Furthermore, the system reduces resource requirements through smaller, automatically rechargeable energy storage units and enables more efficient land use via integration into existing traffic routes and underground tunnels. Overall, the analysis confirms the system's ecological benefits in terms of energy efficiency, emission reduction, resource conservation, and spatial optimization.

Economic analysis of the intelligent transport system demonstrates substantial cost savings compared to conventional forklift solutions. Due to higher energy efficiency and extensive automation of material flows, annual personnel costs are reduced from approximately €1.24 million to around €47,200. Energy costs are also significantly lower.

Technologically, the system distinguishes itself through intermodal transport across multiple mobile units. Innovations include an automated, contactless energy supply system, an omnidirectional chassis suitable for outdoor use, an environment perception system adapted for external conditions, and a dual communication structure via WIFI and cellular networks. These features enable a precise, scalable, and energy-efficient transport solution adaptable to diverse operational requirements.

The practical implementation of the intelligent transport system -comprising the logistics capsule and mobile logistics assistants- demonstrated high potential for continuous, automated material flows within industrial sites. The model is primarily tailored for intra-company transport and is transferable to industries with similar logistics demands. Broader application, such as in intermodal transport using existing transport modes, requires further research and political engagement. For robust outdoor deployment, ongoing validation of environmental sensors is essential. Initial customer inquiries confirm both the transferability of the solution and market interest.

## 6. Literatur

BALM – Bundesamt für Logistik und Mobilität (2024): *Güterverkehrsstatistik 2024*, Köln

BMDV – Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2024): *Verkehrsprognose 2040: Langfristige Entwicklungen im Güter- und Personenverkehr*, Berlin: BMDV

Destatis 2025 – Statistisches Bundesamt (2025), *Beförderungsmenge und Beförderungsleistung nach Verkehrsträgern*, Stand 6. November 2025

Destatis – Statistisches Bundesamt (2013): *Güterverkehr in Deutschland 2012 – Ergebnisse der Verkehrsstatistik*, Wiesbaden: Destatis

Fraunhofer IML – Institut für Materialfluss und Logistik (2025): *Fahrerlose Transportsysteme im Außenbereich*, Dortmund: Fraunhofer IML

Linde Material Handling (2025): *Innovative Automatisierungslösungen für Werkverbünde*, Aschaffenburg: Linde MH

ProgTrans AG (2007): *Güterverkehrsprognose 2025*, Basel: ProgTrans AG

Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (2024): *Jahresgutachten 2024/25*, Wiesbaden: SVR

Umweltbundesamt (UBA) (2024): *Umweltfreundlicher Güterverkehr: Indikatorenbericht*. Dessau-Roßlau: UBA.

BALM – Unternehmensstatistik: [https://www.balm.bund.de/DE/Service/Open-Data/Unternehmensstatistik/unternehmensstatistik\\_node.html](https://www.balm.bund.de/DE/Service/Open-Data/Unternehmensstatistik/unternehmensstatistik_node.html)

Wunderle, Yannick, Eike Lyczkowski, and Sören Hohmann (2024): *Safe object detection in AMRs-a Survey*, IEEE 33rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 1-8. IEEE, 2024. Anhang

Energie- und Wasserversorgung Bruchsal GmbH (2024), *Kennzeichnung der Stromlieferungen 2024*, Download von [www.stadtwerke-bruchsal.de/services/downloads/](http://www.stadtwerke-bruchsal.de/services/downloads/) vom 05.11.2025

Harry Wirth, Fraunhofer ISE: *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*, Download von [www.pv-fakten.de](http://www.pv-fakten.de), Fassung vom 18.08.2025

SEW Eurodrive (2025): *Die Logistikkapsel-Intelligente Güterlogistik der Zukunft*, <https://www.sew-eurodrive.de/blog/posts/logistikkapsel-intelligente-gueterlogistik-der-zukunft.html>