

Potentiale eines Hyperlooptransports in der gewerblichen Logistik – Distribution und Cross Docking

Lukas Eschment (Hochschule Emden/Leer), Heiko Duin, (BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH), Dr. Thomas Nobel (to-be-now-logistics-research-gmbh), Prof. Dr.-Ing. Thomas Schüning (Hochschule Emden/Leer), Prof. Dr. Walter Neu (Hochschule Emden/Leer)

Inhalt

Inhalt	1
Zusammenfassung	1
1 Einführung	2
2 Gewerbliche Logistik	3
3 CargoTube Technologie	7
4 Distribution und Cross-Docking	7
5 Life Cycle Performance Assessment der CargoTube Technologie	9
6 Vorteile des Hyperloop in der gewerblichen Logistik.....	11
7 Literatur	11

Zusammenfassung

Moderne Gesellschaften erlangen Ihren hohen Lebensstandard unter anderem auf der Grundlage der zeitnahen Verfügbarkeit von Waren und Dienstleistungen, welche auf der schnellen und agilen Beförderung von Personen und vor allem Gütern beruht.

Gewerbliche Logistik spielt dabei mit der Belieferung von Produktionsstätten eine große Rolle. Mit der kontinuierlichen Verschmelzung des industriellen und urbanen Raumes wird eine effizienzoptimierte und emissionsarme Belieferung der Industrie eine immer wichtigere und herausforderndere Aufgabe. Logistische Dienstleister setzen zunehmend auf verstärkte Konsolidierung der Güter, beispielsweise durch Cross-Docking-Anlagen in Logistikserviceparks (LSP). So kann im Rahmen des neu entstehenden „Physical Internet“ eine optimierte Route für Warenströme gefunden werden und eine bessere Auslastung der Transportmodi garantiert werden (Montreuil 2011). CargoTube eignet sich dabei prinzipiell sehr gut, um neu entstehende Logistikserviceparks mit großen Produktionsstätten wie einem Automobilwerk zu verbinden und eine automatisierte, verlässliche und kontinuierliche Belieferung garantieren zu können.

Hyperlooptechnologien können das TEN-T um einen energiesparenden Hochgeschwindigkeitstransport ergänzen, welcher durch Minimierung der Luftreibungsverluste Kapseln in geschlossenen Rohrsystemen bei etwa 1% des Normaldrucks transportiert. Neben der damit verbundenen Reduzierung der Treibhausgasemissionen während des Betriebs ist die Vermeidung von Abrieb-, Licht- sowie Schallemissionen ein wesentlicher Vorteil gerade in dicht besiedelten Regionen.

1 Einführung

Die Einführung von schneller und agiler Logistik ermöglicht in Lieferketten Beschaffungsprinzipien wie „Just in Time“ und „Just in Sequence“ (JIS) in der Produktionsversorgung und Beschaffungslogistik. Lagerbestände können reduziert und Kapitalbindungen verringert werden, jedoch ist ein effektives und agiles Management der Lieferketten notwendig, um weiterhin die hohe Resilienz dieser zu gewährleisten.

Mit sinkenden Lieferzeiten in den Lieferketten und enger getakteten, kleineren Liefermengen wird es immer plausibler, diese in Logistikserviceparks (LSPs) zu konzentrieren und zu kommissionieren. So kann die Ware zum optimalen Zeitpunkt und unter größtmöglicher Ausnutzung der vorhandenen Transportmittel der Produktion zugeführt werden. Hierfür entstehen oft LSPs in direkter Nachbarschaft zu großen Produktionszentren. Die Verbindung dieser LSPs mit den Produktionszentren ist ein spannender Anwendungsfall für Hyperloop Technologien wie CargoTube, welche eine verlässliche und konstante Verbindung in einer geschützten Umgebung ohne Einflüsse von oder auf die Umwelt garantieren. Weiterhin kann durch den Transport im Niederdruck innerhalb der Röhre durch den stark reduzierten Luftwiderstand ein verringerter Energieverbrauch realisiert werden (vgl. Oh et al. 2019, Zhou et al. 2022). Die Vorteile einer solchen CargoTube Verbindung werden anhand von Resultaten eines Life Cycle Performance Assessments (LCPA) analysiert.

Besonders die Einsparung der Treibhausgasemissionen steht im operativen Geschäft der großen Wirtschaftsunternehmen, bei Bauprojekten aber auch vor allem im Logistiksektor an oberster Stelle. Die verfehlten Ziele der letzten Jahre sorgen für stärkere Auflagen und größere Investitionen und Subventionen des Staates, vor allem im Transportsektor. Im Vergleich zu anderen Sektoren in der EU, bei welchen die Emissionen im Vergleich zum Jahr 1990 um ca. 20% fielen, stiegen die Emissionen des Transportsektors um 20% an. Darüber hinaus werden der Energiebedarf und die Schadstoffemissionen proportional mit dem prognostizierten Anstieg der Verkehrsnachfrage zunehmen, welcher bis 2050 auf bis zu 300 % des aktuellen Wertes geschätzt wird (IFT, 2019). Abbildung 1 zeigt die Emissionen nach Sektor in Europa von 1990 bis 2016 in Kohlendioxidäquivalenten Emissionen.

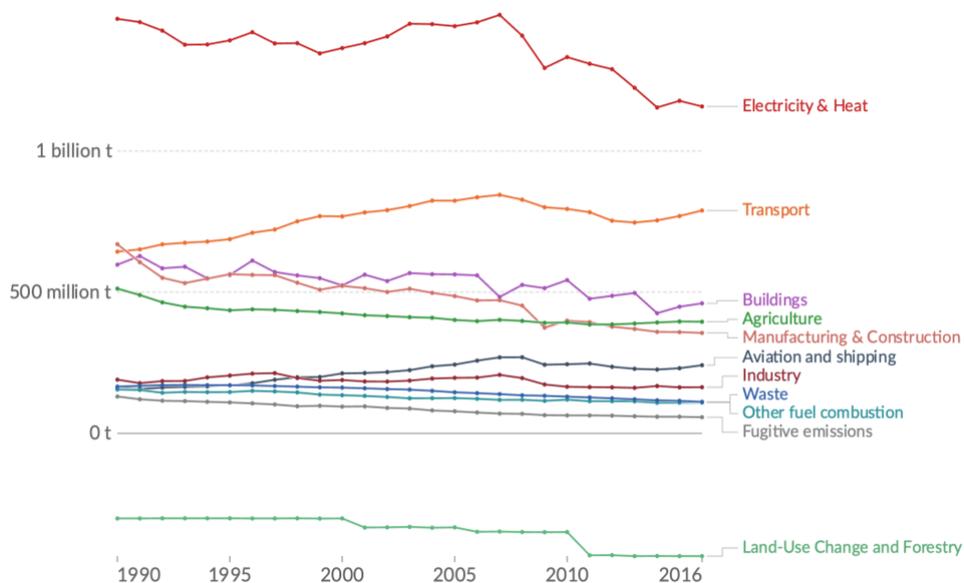


Abb. 1: Jährliche Treibhausgasemissionen in den EU-28 nach Sektoren in Kohlendioxidäquivalenten Emissionen [Tiseo 2021]

Die letzten Jahre haben gezeigt, dass die Nachfrage (z.B. durch den Online-Handel) nach schnellerem Transport von Gütern rund um den Globus deutlich zugenommen und damit einen entsprechend höheren Energieverbrauch

verursacht hat. Neue Antriebsgenerationen könnten zwar die direkten Emissionen und den Wirkungsgrad verbessern, sie können aber weder die aerodynamischen Verluste beseitigen noch den zugrunde liegenden Energiebedarf der Bewegung senken. Durch die anstehende Welle der Elektrifizierung vieler Verkehrsmittel werden Schadstoffe wie NOx und direkte CO2-Emissionen zwar verringert, aber auch Lärm- und Lichtemissionen sowie Partikelemissionen, die z. B. durch den Reifenverschleiß entstehen, können nicht reduziert werden.

2 Gewerbliche Logistik

In Europas TEN-T Netzwerk haben makrologistische Knoten wie LSPs eine zentrale Rolle in der Belieferung großer Produktionszentren erhalten. Mit Ihnen wird die Beschaffungslogistik und die Produktionslogistik miteinander verknüpft. Durch die Konsolidierung und das Cross-Docking im LSP ist es möglich, eine Optimierung des Liefermanagement, sowie der Lagerdisposition und des Versandmanagements vorzunehmen. Oft werden auch Teilesendungen verschiedener Hersteller in einem LSP zu Sammelkommissionierungen zusammengestellt.

Europa erfährt durch die zunehmende Urbanisierung ein Zusammenwachsen der städtischen Wohngebiete mit den Industriestandorten und großen Produktionsgeländen. Die vorhandene Straßeninfrastruktur wird somit sowohl durch die städtische Bevölkerung, als auch durch die gewerbliche Produktionslogistik genutzt. Nicht selten kommt es zu Staus auf den urbanen Straßen und umliegenden Autobahnen, welche die spezifischen zeitlichen Anforderungen für die Anlieferung der Ware (z.B. JIS) zu einer schwierigen Aufgabe machen. Um die Anforderungen (u.a. Lenkzeiten) einzuhalten, parken LKWs oft auch in der Nähe von Wohngebieten oder Parkplätzen, welche für diese Zwecke nicht gedacht sind. Außerdem binden die detaillierten Zeitangaben und verschiedenen Anfahrts-/Entladepunkte im Werk bei den Logistischen Dienstleistern oft und lange viel Personal, ohne mit den LKW lange Strecken bewältigen zu müssen.

Abbildung 2 zeigt die Satellitenansicht des Ballungsraumes Wolfsburg, Deutschland, in welchem klar das dort ansässige VW-Automobilwerk und die städtischen Wohngebiete der Stadt Wolfsburg zu erkennen sind. Der im folgenden Kapitel dargestellte Modellfall der urbanen Logistik wird im ePCenter Projekt näher untersucht. (ePCenter Konsortium 2021)



Abb. 2: Illustration eines urbanen Wohn- und Gewerbegebiets mit einem industriellen Zentrum in einem Ballungsraum, hier das VW-Automobilwerk in Wolfsburg, Deutschland (Google 2022)

2.1 Anwendungsbeispiel gewerbliche Logistik in Wolfsburg

Am Beispiel der Ver- und Entsorgung eines Agglomerationsraumes einer industriellen Produktionsstätte in Raum Wolfsburg wird die Integration des Hyperloop Systems in die gewerbliche Logistik erläutert. Hierbei liegt der Fokus auf Abläufen, die durch Logistische Dienstleister (LDL) vollzogen werden. Ausgangspunkt ist ein Logistikservicepark, der eine Reihe an logistischen Funktionen in sich vereint. Neben beispielsweise LKW-Stellplätzen, Trailer Yards, Leergutterminals und Steuerungsstellen gilt eine Cross-Docking Logistikanlage – zusammen mit der direkt verbundenen Hyperloop-Station - als das Herzstück des LSP. Abbildung 3 zeigt einen möglichen CargoTube LSP sowie die verschiedenen prozess-orientierten Schritte.

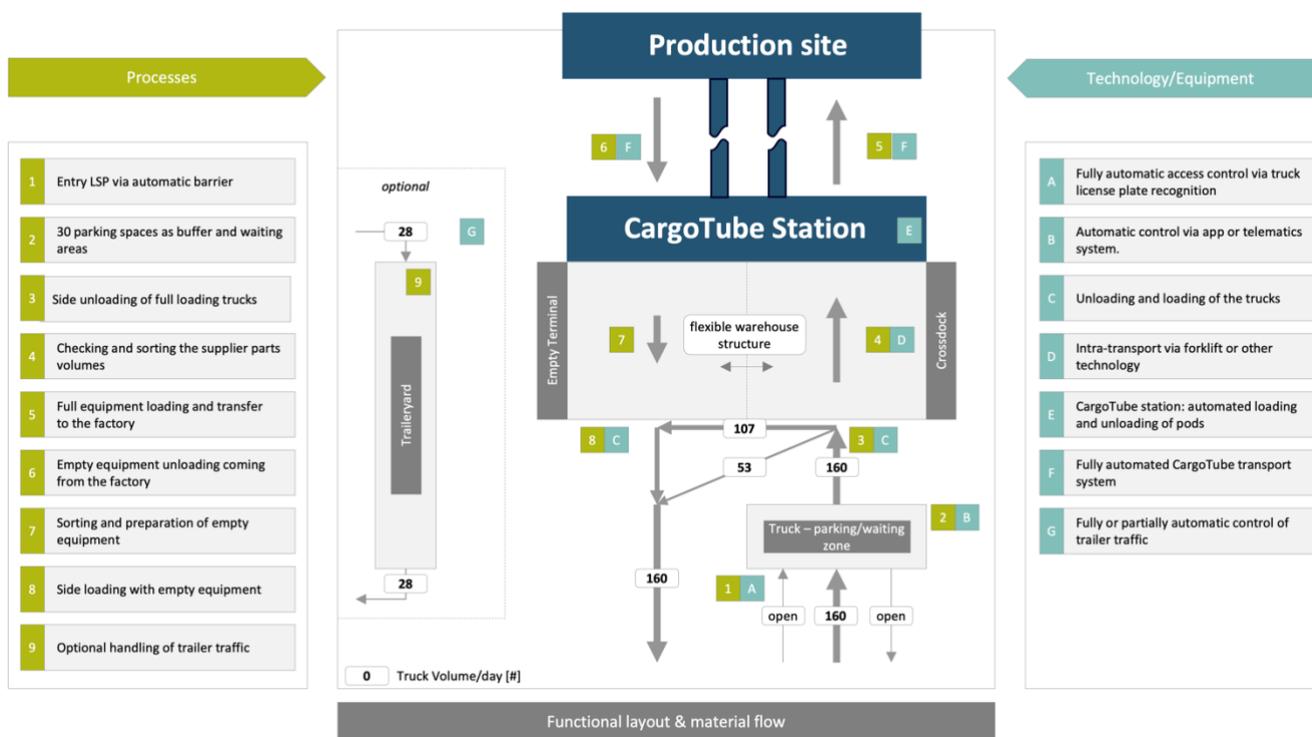


Abb. 3: Integration von CargoTube in einen kombinierten Logistikservicepark mit prozessorientierten Schritten (linke Spalte) und Auflistung der technologischen Umsetzungen (rechte Spalte)

Die Werksbelieferung mittels LKW in Wolfsburg stellt viele Herausforderungen für Logistische Dienstleister dar. LKW-Verkehre aus dem Umland aber auch aus dem weiter entfernten Ausland haben konkrete Vorgaben zu Ankunftszeiten, sowie -orten im Werk. So kommt es an Tagen mit hohem Volumen oder witterungsbedingter Verzögerungen auch zu Problemen in der Anlieferung. Im schlimmsten Fall kann dies die Produktion des gesamten Werkes beeinträchtigen. Um diesem Fall vorzubeugen, gibt es jedoch mehrere Sicherheitsmechanismen, inklusive besonders flexibler Transportmodi, um drohende Engpässe zu vermeiden.

Als Hauptladungsträger für die Belieferung des VW-Werkes werden Standardbehälter eingesetzt, welche ca. einen Kubikmeter umfassen. Im Laufe eines Tages kommen an einer ausgesuchten Logistik-Halle bis zu 10.000 Ladungsträger an, dies entspricht ca. 160 LKW. Abbildung 4 zeigt die eine beispielhafte tägliche Verteilung der ankommenden ca. 160 LKW, welche durch Konsolidierung im LSP auf Megatrailer auf 135 Shuttle LKW-Ladungen reduziert werden könnten.

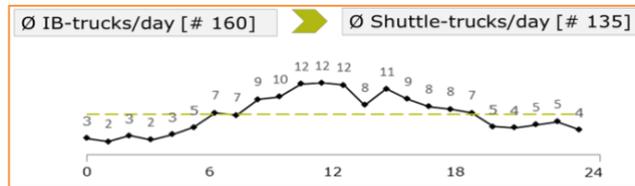


Abb. 4: Anzahl der Shuttle LKW pro Tag sowie die tägliche Verteilung (GVZe Wolfsburg & tbnlr-gmbh)

Ein LSP wird in Erwägung gezogen, um die eingehenden Waren zu konsolidieren und die Wartezeiten sowie Umschlagzeiten der eingehenden LKW zu verringern. Dies kann die Produktivität der einzelnen LKW erhöhen und wertvolle Zeit der Fahrer sparen. Darüber hinaus wird eine konsistentere und zuverlässigere Warenversorgung für das Werk erreicht, die sich während der jüngsten Teileknappheit in der Automobilindustrie als Engpass erwiesen hat. Der Transport von genormten Kisten vom LSP zum VW-Werk lässt sich am besten mit einer CargoTube-Verbindung realisieren, die eine deutliche Reduzierung der direkten Emissionen (z.B. Treibhausgas-, Lärm-, Licht- und Feinstaubemissionen) innerhalb der Stadt ermöglicht und die Anwohner entlastet. Das System ist für standardisierte Boxen ausgelegt, die für einen Großteil (ca. 80 %) der eingehenden Waren verwendet werden.

In einer Logistikhalle werden täglich bis zu 10.000 genormte Ladungsträger angeliefert. Jegliche Fracht, die über diese Dimensionen hinausgeht, wird in diesem Anwendungsfall nicht berücksichtigt. CargoTube kann rund um die Uhr als hochzuverlässiges Transportsystem arbeiten, das Waren an den Produktionsstandort liefert und gleichzeitig den Platzbedarf für Lager, Logistik oder LKW-Parkplätze am Produktionsstandort minimiert. Die Waren werden voll automatisch mithilfe des von der Umgebung unabhängigen CargoTube Systems in das Werk transportiert und an die interne Logistik übergeben.

Ein zusätzliches Merkmal in einem LSP ist die temporäre Lagerung oder Pufferung von knappen Gütern in der kombinierten CargoTube LSP-Anlage. Dies erhöht die Widerstandsfähigkeit gegenüber Unterbrechungen in der Lieferkette, die sonst zu plötzlichen Teilengpässen und kostspieligen Produktionsstillständen führen könnten.

Abbildung 5 zeigt die Platzierung der Produktionslogistik im VW-Werk und einen möglichen Standort für den LSP sowie die entsprechende CargoTube-Verbindung.



Abb. 5: Verbindung des LSP zur Logistikhalle am Produktionsstandort in Wolfsburg (GVZe Wolfsburg & tbnlr-gmbh)

2.2 Anforderungen der gewerblichen Logistik

In der gewerblichen Logistik, speziell bei Ansicht des Anwendungsbeispiels gibt es Anforderungen, die aus einer Stakeholder Analyse gewonnen werden können. Für den Logistiker und dem Auftraggeber stehen zuallererst geringe laufende Kosten im Fokus. Weiterhin ist eine minimale Flächennutzung anzustreben, da innerhalb von Produktionsstätten der Raum oft sehr begrenzt ist. Auch ein möglichst hoher Automatisierungsgrad ist erstrebenswert, da auf dem europäischen Markt aktuell ein genereller Mangel an Berufskraftfahrern herrscht.

Im Folgenden sind die Anforderungen der verschiedenen Interessensvertreter an die gewerbliche Logistik zusammengetragen:

- Minimale Betriebskosten
- Nutzung der Beschaffungsprinzipien Just in Time / Just in Sequence
- Minimale Flächennutzung der Logistik im Werk
- Verkehre minimieren
- Personalbedarf minimieren
- Optimale Auslastung der nötigen Verkehre
- Geringe THG-Emissionen
- Hohe Automationsrate

3 CargoTube Technologie

Die technische Entwicklung des Systems basiert auf den Anforderungen, die sich aus dem Anwendungsfall ergeben. Dies ist vor allem der geringe Energieverbrauch, sowie die geringen THG-Emissionen. Die Kapsel des CargoTube Systems ist für den Standard VW-Ladungsträger designt. In einem Fahrzeug sollen 5-10 Boxen transportiert werden, wobei die genaue Anzahl von finalen Vorgaben wie Kurvenradius, Belade- und Entladetechnik, sowie weiteren technischen Faktoren und Resultaten der Simulationen des Gesamtsystems abhängt. Technisch wird das System unter anderem folgende Technologien verwenden (Schüning et al. 2023):

- Doppelröhre für simultanen Transport von Pods in beide Richtungen
- Lineare Antriebstechnik (linearer Motor mit Stator im Fahrweg oder Fahrzeug und entsprechendem Energieübertragungssystem)
- Vacuum Technologie (Pumpen mit finalem Druckbereich 1-10mbar)
- Schleusentechnologie (optimiert für schnelle Zyklen)
- Druckdichte Kapsel
- Lineare Führung
- Automatisierte Lade- und Entladetechnik

Validiert werden die Technologieentscheidungen durch Simulationen des Anwendungsfalles (Duin 2023) mit den Hauptparameter Energieverbrauch sowie der Investitions- und Betriebskosten als auch des Emissionspotentials. Abbildung 6 zeigt eine Visualisierung eines CargoTube Fahrzeugs aus der Design Phase, hier mit 8 standardisierten Transportbehälter.

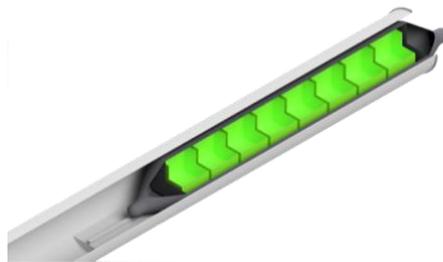


Abb. 6: Visualisierung des CargoTube Fahrzeugs (Institut für Hyperloop Technologie 2022)

4 Distribution und Cross-Docking

Beim Cross Docking (CD) handelt es sich um ein nahezu bestandsloses Distributionsverfahren, bei dem Waren ideal nicht mehr zwischengelagert, sondern direkt in einem CD-Center umgeschlagen und in diesem Fall zum Produktionsort mittels Hyperlooptechnologie transportiert werden. In der Regel sind die Güter (Produktionsteile) bereits durch den Zulieferer vorkommissioniert. Bei größeren Warenmengen eines Herstellers können jedoch auch neue Kommissionierungen vorgenommen werden, welche besser zum Ablauf in der Produktionslinie passen.

Ein LSP verfügt in der Regel über einen gesicherten Torbereich zur Abwicklung/Kontrolle des ein- und ausgehenden Verkehrs, der über die Straße (ggf. Schiene) erfolgt. Hier kann eine manuelle oder automatische Kontrolle des Verkehrs auf dem LSP-Gelände durchgeführt werden. Die eingezäunte Fläche (ca. 30.000 Quadratmeter) ist idealerweise rechteckig, um die Funktionalität des LSP optimal nutzen zu können.

Nach der Eingangsbearbeitung werden die LKW (in der Regel LKW mit Anhängern) zu den Warte-/Parkzonen geleitet. Von dort werden sie (über einen zentralen Leitstand) zu den Entladestellen in der Cross-Docking-Halle dirigiert. Generell sollte ein LSP mit integrierter CD-Halle über verschiedene (räumlich getrennte) Be-

/Entladestellen für eingehende und ausgehende Logistikprozesse verfügen, die sich z.B. in überdachten Hallenbereichen (Entladetunnel) befinden.

Die Sendungen können in der Regel manuell mit Flurförderzeugen von den LKWs entladen und direkt zu den Relationen (für die einzelnen Abladestellen im Produktionsbetrieb) transportiert werden. Dort werden sie taktgenau auf LKWs oder in Pods verladen. Prinzipiell kann dieser Prozess auch teilweise automatisiert/autonom ablaufen. Dies ist vor allem dann möglich, wenn sich die Pods in der CD-Halle auf einer Ebene befinden. Die Beladung der LKW (Megatrailer) erfolgt dagegen "außerhalb" der CD-Halle. In einem LSP mit CargoTube Anbindung werden alle Waren, welche nicht in einem Standard Ladungsträger transportiert werden können, mithilfe von Megatrailern in das Werk gebracht.

Der Kern des Cross-Docking-Ansatzes ist, dass die Sendungen bereits von den Lieferanten vorkommissioniert wurden. Für Fälle, in denen dies nicht möglich oder fehlerhaft ist, gibt es bei CD-Systemen sogenannte "Clearing"-Bereiche am Rande der Halle. Um eine permanente Versorgung des Produktionsbetriebes sicherstellen zu können, ist es zudem sinnvoll, in der Mitte der Halle einen "Pufferbereich" einzurichten, in dem Sendungen als "Reserve" oder zur kurzfristigen Zwischenlagerung gelagert werden. Im Rahmen der Steigerung der Resilienz der Produktion ist es ebenfalls denkbar, den LSP und das CD um ein angelagertes voll automatisches Zwischenlager zu ergänzen, welches ein Puffer für am Markt besonders knappe Bauteile oder Bauteile mit komplexen Lieferketten sein kann.

Von den Relationsflächen (Ausgangsflächen) können die Sendungen dann entweder per LKW (mit Megatrailern) oder über das CargoTube System an das Werk geliefert werden. Die Entladung der LKWs bzw. Pods im Werk richtet sich dann nach den internen Logistikprozessen. Hier könnten räumlich getrennte Entladezonen für LKWs und Pods eine Rolle spielen.

Ein weiterer Funktionsbereich des LSP umfasst einen Trailerplatz, der für den Transport von der CD-Halle zur Produktionsanlage genutzt wird. Ein weiterer Bereich für das Handling der verschiedenen kleineren VW-Transportbehälter und für die Retouren (Mehrwegsystem) aus dem Werk ist sehr wichtig.

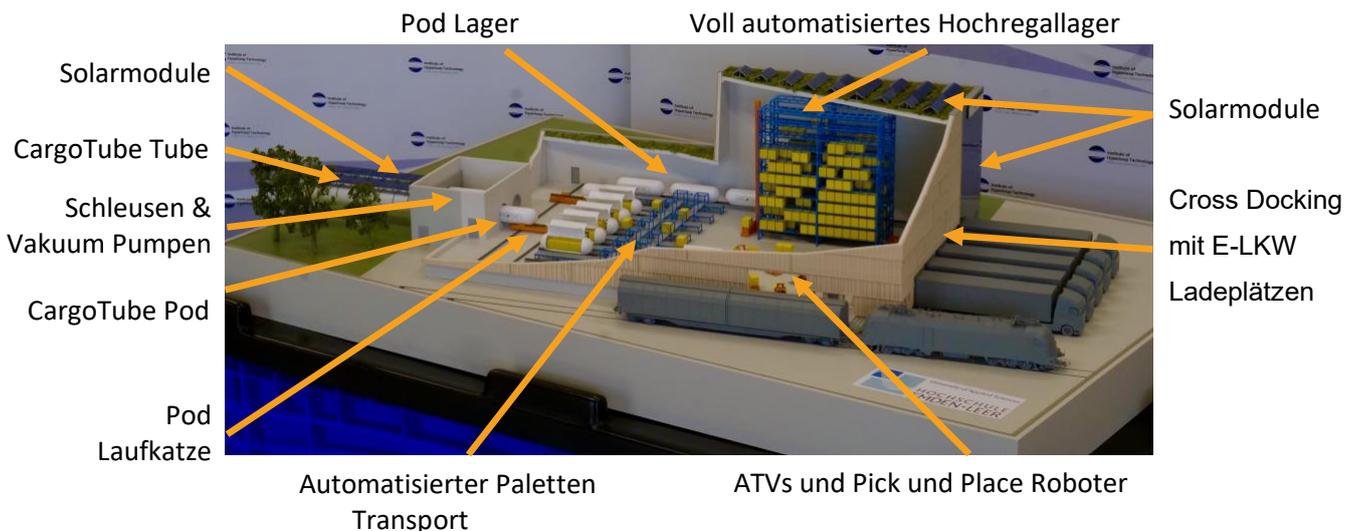


Abb. 7: Modell des CargoTube LSP (Institut für Hyperloop Technologie 2023)

Abbildung 7 zeigt ein mögliches Modell des CargoTube LSP. In dieses wurde ebenfalls ein voll automatisiertes Hochregallager integriert, um die Resilienz der Lieferkette zu stärken und weniger starke zeitliche Vorgaben für

die ankommenden Verkehre zu generieren. Elektrische LKW können mittels der Solarmodule und integrierten Ladeplätze an dem Cross-Docking Hub aufgeladen werden, während ATVS und Pick und Place Roboter im inneren des LSP die Waren verteilen. Auf der CargoTube Röhre sind ebenfalls Solarmodule installiert, welche die Energie für die Vakuum Pumpen und Schleusen Infrastruktur bereitstellen können. In diesem Modell werden einfache Durchgangs-Schleusen verwendet, welche die Pods anschließend auf Laufkatzen bringen, um diese in die Be- und Entladezone der Pods zu bringen. Verschiedene Schleusensysteme werden in weiteren Untersuchungen miteinander verglichen. Weiterhin sind Lagerplätze für durch die schwankende Auslastung aktuell nicht verwendete Pods innerhalb des LSP vorhanden. Abbildung 8 zeigt eine Detailansicht des automatisierten Paletten Transports des CargoTube LSP Modells.

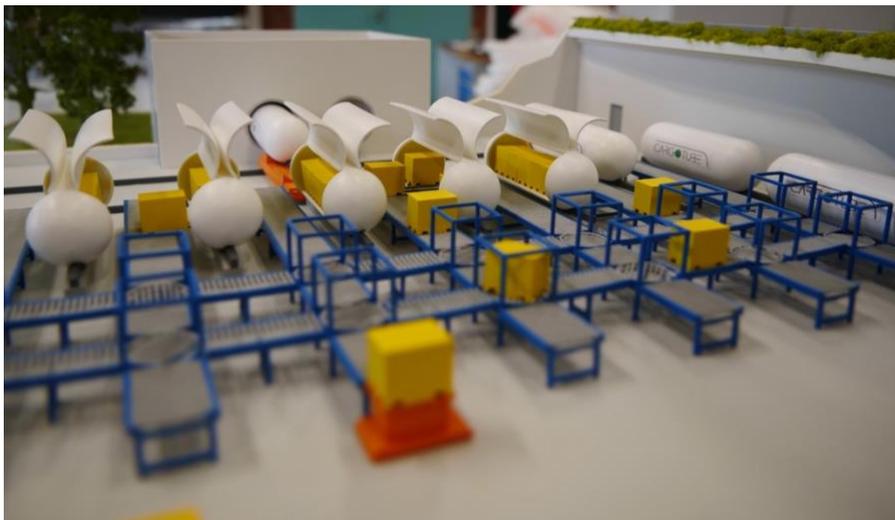


Abb. 8: Detailansicht automatisierter Paletten Transport, Cargo Pods und ATVs (Institut für Hyperloop Technologie 2023)

5 Life Cycle Performance Assessment der CargoTube Technologie

Neben den umwelttechnischen Vorteilen eines Hyperloop Systems ist für die Wirtschaftlichkeit vor allem eine schnelle Investitionsrentabilität wichtig. Um sowohl die ökonomische als auch ökologische Bilanz eines CargoTube Systems zu verstehen wird dieses in einem Life Cycle Performance Assessment mit bestehenden Transportmodi verglichen (vgl. Eschment 2023). Die detaillierten Annahmen dieses Vergleiches sind in vorherigen Publikationen genauer ausgeführt (vgl. Duin 2023, Eschment 2023).

Wichtig für das Verständnis der Abbildungen 9 und 10 ist die Annahme, dass die Kosten sowie Emissionen für den Bau einer neuen Straße nicht in die Berechnung mit aufgenommen wurden. Im Vergleich dazu ist der Bau der Infrastruktur eines CargoTube Systems in die Berechnungen mit eingeflossen. In Abbildung 10 ist ersichtlich, dass die Emissionen des CargoTube Systems größtenteils aus dem Bau des Systems kommen, wohingegen bei den elektrischen LKW, vor allem aber bei den Diesel betriebenen LKW die Emissionen hauptsächlich aus dem Betrieb stammen. Der Bau einer Straße von 10km würde ca. 50 Millionen Euro kosten, welche in Abbildung 9 (links) die beiden Szenarios mit den elektrischen und Diesel betriebenen LKW deutlich verschlechtern würden (Hahn and Hoppe, 2022; Fritz et al., 2022).

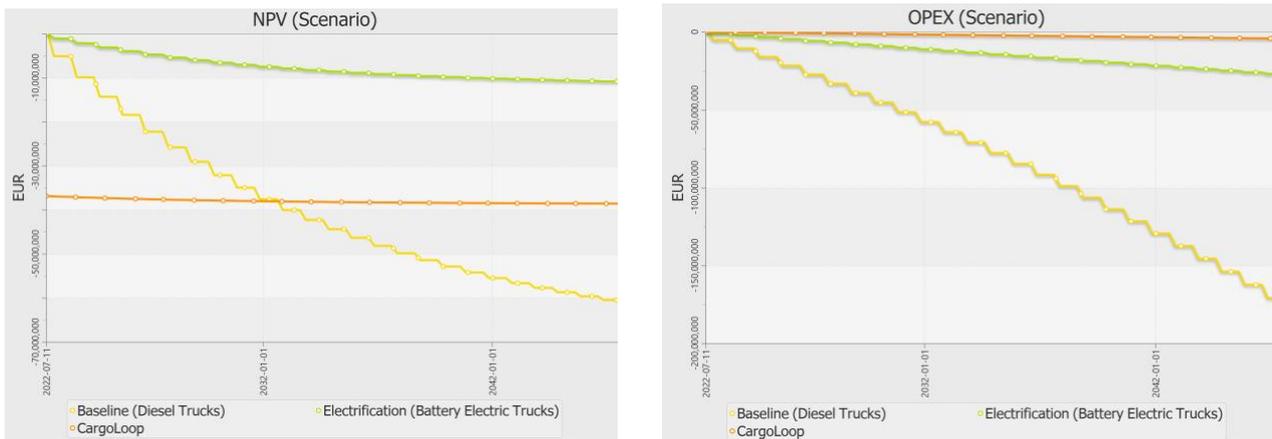


Abb. 9: Vergleich von NPV und OPEX für Hyperloop-, Diesel- und Elektro-LKW-Verbindungen zwischen einem LSP und dem VW-Werk (Balance Technology GmbH 2022)

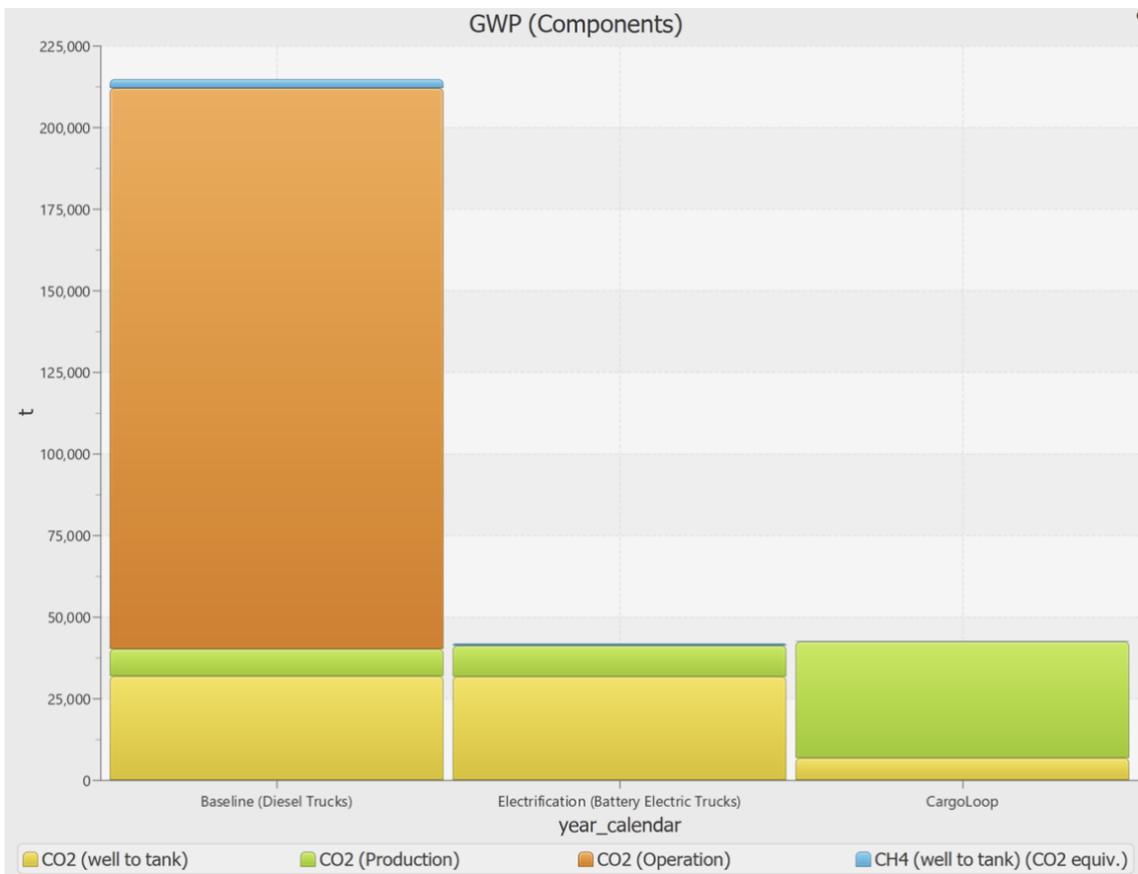


Abb. 10: Lebenszeit-Emissionen (Kohlendioxid-Äquivalent) für die Hyperloop-, Diesel- und Elektro-LKW-Lösung (Balance Technology GmbH 2022)

Insgesamt zeigt sich eine sehr kompetitive Basis für die Verwendung des CargoTube System in dem vorliegenden Anwendungsfall. Die aktuelle Berechnung ist auf eine Laufzeit von 25 Jahren ausgelegt. Im Verlauf des Projektes werden die Daten weiter detailliert und an den aktuellen Stand der Entwicklung angepasst. Auch verschiedene Emissionen für die Energiebereitstellung und neue Materialien sollen mit in die Berechnung einfließen.

6 Vorteile des Hyperloop in der gewerblichen Logistik

Die Integration der Hyperloop Technologie in ein LSP zur Versorgung eines größeren Industriestandortes hat einige Vorteile, welche nicht durch andere Verkehrsträger realisiert werden können. Neben einem schnellen und verlässlichen Transport stehen vor allem die Reduktion der Treibhausgas Emissionen im Vordergrund. Für den Empfänger der Waren ist besonders der zuverlässige Strom der Waren wichtig, welche mit dem CargoTube System unabhängig von Umwelt- oder Wettereinflüssen voll automatisiert an den Produktionsstandort geliefert werden können. Der Logistikdienstleister kann mithilfe des CargoTube Systems und einem ausgelagerte LSP wertvolle Personal- und LKW-Ressourcen in dem sonst sehr personal- und ressourcenbindenden Shuttle Verkehr einsparen.

Die Umwelt- und Lebensbedingungen für die Anwohner insbesondere in urbanen Bereichen werden durch die drastische Reduzierung des disruptiven LKW-Verkehrs in der Stadt stark verbessert. Emissionen wie Feinstaub, Bremsen- und Reifenabriebe, Treibhausgase, Lärm und Licht werden vermieden und CargoTube schafft somit einen relevanten Beitrag zur Verbesserung der Luft- und Lebensqualität.

7 Literatur

- Duin, H., Neu, W., Schüning, T., Eschment, L., Nobel, T., Wurst, S. (2023): The Planning of Hyperloop-Based CargoTubes Routes for Sustainable Logistic Solutions. In: Clausen, U., Dellbrügge, M. (eds) *Advances in Resilient and Sustainable Transport. ICPLT 2023. Lecture Notes in Logistics*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28236-2_19
- ePcenter Konsortium: (2021). 'Enhanced Physical Internet-Compatible Earth-friendlly freight Transportation answer (ePcenter). EU Horizon 2020 RAI programme, grant agreement No 861584', 2021. <https://epicenterproject.eu/>.
- Eschment, L.; Duin, H.; Nobel, T.; Tolujevs, J.; Wurst, S.; Yatskiv, I.; Schüning, T.; Neu, W. (2023): Automated high-speed Hyperloop cargo transportation for a sustainable logistics network, 9th International Physical Internet Conference 2023. https://www.pi.events/sites/default/files/IPIC2023_Proceedings.pdf
- Fritz D., Heinfellner H., Lambert S., 2022, „Die Ökobilanz von schweren Nutzfahrzeugen und Bussen - Bewertung ausgesuchter Anwendungsfälle alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich Reduktionspotenzial von CO2-Emissionen und Energieverbrauch“, Client: Federal Environmental Agency Austria, Wien 2022
- Hahn, W., Hoppe R. - 2022, "Kurzstudie über Klimaschutzbeiträge zur Umweltverträglichkeitsprüfung von Bundesfernstraßen im Rahmen der Aufstellung des Bundesverkehrswegeplans 2040", Client: BUND Naturschutz in Bayern e.V. Munich, Pettenkoferstr. 10a, 80336 Munich, Marburg, 2022
- Montreuil, B.: (2011). Toward a Physical Internet: meeting the global logistics sustainability grand challenge. *Logist. Res.* 3, 71–87. <https://doi.org/10.1007/s12159-011-0045-x>
- IFT (International Transport Forum) (2019): IFT Transport Outlook 2019, ISSN: 25202367 (online) https://doi.org/10.1787/transp_outlook-en-2019-en
- Oh J.S., Kang T., Ham S., Lee K. S., Jang Y. J., Ryou H. S., Ryu J. (2019): Numerical Analysis of Aerodynamic Characteristics of Hyperloop System, *Energies* 12 (3), MDPI, doi:10.3390/en12030518.
- Schüning, T., Eschment, L., Duin, H., Nobel, T., Neu, W. (2023). CargoTube – ein klimaneutraler Logistikanatz. In: Proff, H. (eds) *Towards the New Normal in Mobility*. Springer Gabler, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-39438-7_47
- Tiseo, I.: (2021). 'Transportation emissions in the European Union - Statistics & Facts', Statista. <https://www.statista.com/topics/7968/transportation-emissions-in-the-eu/#dossierKeyfigures>.
- Zhou Z., Xia C., Shan X., Yang Z. (2022): Numerical Study on the Aerodynamics of the Evacuated Tube Transportation System from Subsonic to Supersonic, *Energies* 15, no. 9: 3098. <https://doi.org/10.3390/en15093098>