
Bachelorarbeit

Analyse und konstruktive Neugestaltung
eines Elektrohängebahnsystems zum
Einsatz in der Lebensmittelindustrie

Vorgelegt von:
Jan Schultze

Karlsruhe, Juli 2024

Betreut von:
Dr.-Ing. Jan Oellerich

Bachelorarbeit Nr. AA-82604-10560 am

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme

Karlsruher Institut für Technologie

Thema: Analyse und konstruktive Neugestaltung eines Elektrohängebahnsystems zum Einsatz in der Lebensmittelindustrie

Autor: Jan Schultze

Jan Schultze

Scherrstraße 13

76137 Karlsruhe

email: uctrj@student.kit.edu

Ich versichere hiermit wahrheitsgemäß, die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben, die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht zu haben und die Satzung der des KIT zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der jeweils gültigen Fassung beachtet zu haben.

Karlsruhe, den 29.07.2024

Ort, Datum

.....
Jan Schultze
(Jan Schultze)

Danksagung

Zu Beginn möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans vom IFL bedanken für die Ermöglichung der Kooperation zwischen dem IFL und der Camelstack GmbH. Weiterhin gilt mein Dank meinem Betreuer Dr.-Ing. Jan Oellerich für die vielen Hilfestellungen und Ratschläge. Außerdem bedanke ich mich bei Johannes Linowski, dem Geschäftsführer der Camelstack GmbH.

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit ist in Kooperation zwischen dem KIT und der Camelstack GmbH entstanden, um ein neuartiges Elektrohängebahnsystem für kleine Traglasten zu entwickeln. Das ultraleichte EHB-System (uEHB) soll in der Lebensmittelindustrie zum vollautonomen Kochen eingesetzt werden. Zuerst wird der Stand der Technik in einer Literaturrecherche herausgearbeitet. Anschließend wird ein bestehendes Konzept analysiert und ein neuer Designvorschlag über eine geeignete Methodik erstellt. Mithilfe eines 3D-Druckers wird ein Prototyp gebaut und getestet. Zum Abschluss findet eine Bewertung des Systems und ein Ausblick statt.

Abstract

This thesis was created in cooperation between KIT and Camelstack GmbH to develop a new type of electric monorail / overhead conveyor system for small loads. The ultra-light EMS (uEMS) is intended to be used in the food industry for fully autonomous cooking. First, the state of the art is identified in a literature search. Then an existing concept is analyzed and a new design proposal is created using a suitable methodology. A prototype is built and tested using 3D printing. Finally, an evaluation of the system and an outlook are given.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	iv
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	vi
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung	4
1.3 Kapitelübersicht	5
2 Recherche	7
2.1 Klassifizierung Materialflusssysteme	7
2.2 Stand der Technik	11
2.2.1 Bauform	11
2.2.2 Traglast	13
2.2.3 Definition und Beschreibung von EHB-Systemkomponenten	14
2.2.4 Bestandteile des Schienensystems	16
2.2.5 Linearführungen und Hängeförderer	19
2.2.6 Energieübertragung	23
2.2.7 Datenübertragung	23
2.2.8 Steuerung	25
2.2.9 Positionsbestimmung	25
2.3 Anwendung von Elektrohängebahnen und Hängeförderern	26

2.4	Aktuelle Herausforderungen von Hängeförderern - Was macht Supertrack anders?	28
2.5	Anforderungen an das System	30
2.6	Identifikation von notwendigen Schnittstellen zur übrigen Systemperipherie	34
3	Methodik	36
3.1	Vorgängerversion: Analyse der Verbesserungspotenziale	36
3.2	Morphologischer Kasten EHB	38
3.3	Auswahl der Teilsysteme aus dem Morphologischen Kasten und Begründung	40
4	Konstruktion	46
4.1	Abbildung und Beschreibung der finalen Konstruktion	46
4.2	Konstruktionshistorie: Iterationen von Anfang bis Ende	51
4.2.1	Version 1: Laufrollenführung mit Gelenk	51
4.2.2	Version 2: Laufrollenführung als Starrkörperkonstruktion	54
4.3	Strukturberechnung der Schiene: mechanisches Ersatzmodell (Biegebalken) .	55
4.4	3D-Druck	58
5	Bewertung der Ergebnisse/Diskussion	59
6	Zusammenfassung und Ausblick	63
6.1	Zusammenfassung	63
6.2	Ausblick	63
6.3	Conclusion	64
	Literaturverzeichnis	67

Abbildungsverzeichnis

1.1	Statistik Amazon Roboter und Mitarbeiter	2
2.1	Ordnungssystem des Materialflusses	7
2.2	Sortieranlage nach VDI 3619	9
2.3	Bauform gemäß VDI 4441 und VDI 3643	12
2.4	Elektrotragbahn und Elektropalettenbahn nach VDI 4422	13
2.5	EHB Fahrzeug nach VDI 4441	15
2.6	Verschiedene Verzweigungen im Schienensystem	17
2.7	Vertikalförderer (a): Aufzug, (b): Steig- und Gefällestrecke, (c): Aktuatorik am Fahrzeug	19
2.8	Übersicht Linearführungen, Quellen: (Schaeffler Technologies AG Co. KG d), (Schaeffler Technologies AG Co. KG c), (Schaeffler Technologies AG Co. KG e)	20
2.9	Übersicht Linearantriebe, Quellen: (Schaeffler Technologies AG Co. KG a), (Schaeffler Technologies AG Co. KG b), (Wittenstein alpha GmbH 2024)	21
2.10	Darstellung des EHB-Systems als Blackbox und dessen Schnittstellen	34
3.1	EHB-Fahrzeug der Vorgängerversion (ohne Tragprofil der Schiene zur bes- seren Ansicht)	36
3.2	EHB-Fahrzeug der Vorgängerversion mit Tragprofil der Schiene	37
3.3	Laufrollenführung mit zwei Gelenken: Curviline	41
4.1	Finale Konstruktion in der Vorderansicht, Benennung gemäß Tab. 4.1	46
4.2	Finale Konstruktion in der Seitenansicht, Benennung gemäß Tab. 4.1	47
4.3	Seitenansicht der Kurve	48
4.4	Finale Konstruktion in der Hinteransicht und Draufsicht, gemäß Tab. 4.1	49
4.5	Mittelpunktsbahn des EHB-Fahrzeugs: Raumkurve $s(t)$ und Orientierung des Relativsystems	49

4.6	Drehkreuz in Hauptflussstellung und Nebenflussstellung	50
4.7	Version 1.1: Konstruktion mit einem Kugelgelenk	51
4.8	Drehkreuz mit einseitiger Zahnstange: Probleme in der Topologie der Schiene	52
4.9	Version 2: Starrkörperkonstruktion	54
4.10	Technische Zeichnung des Schienenprofils	56
4.11	Aufteilung des Schienenprofils in Teilflächen A_i	57
5.1	Kontaktstruktur der Laufrollen als x-Anordnung	60
5.2	Peripheral-Free Electrified Monorail System (PEMS)	61

Tabellenverzeichnis

2.1	Einteilungskriterien von Fördermitteln	8
2.2	Vor- und Nachteile von verschiedenen Linearführungssystemen	22
2.3	Konkurrenzmatrix	28
2.4	Anforderungsliste	33
3.1	Morphologischer Kasten	39
3.2	Value Benefit Analyse: Bauform	40
3.3	Value Benefit Analyse: Energieversorgung und Motor	42
3.4	Value Benefit Analyse: Antrieb und Positioniersystem	43
3.5	Value Benefit Analyse: Datenübertragung	44
4.1	Bezeichnung der Bauteile und Bauteilnummer	50
4.2	Bezeichnung, Formelzeichen und Einheiten	56

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Digitalisierung und die damit verbundene Menge an Informationen, die in digitaler Form vorliegt und drahtlos übermittelt werden kann, haben die gesamte Kommunikationsinfrastruktur verändert. Das Internet ist nicht nur die Basis für die private Kommunikation, sondern auch die zentrale Technologie für die Vernetzung der Produktion (BMW Bundesministerium 2019). Die Digitalisierung und Vernetzung der industriellen Produktion unter Verwendung moderner Technologien ist die vierte industrielle Revolution. Es geht um die Integration von Cyber-Physical Systems (CPS), dem Internet der Dinge (IoT), Cloud Computing und Big Data in die Produktionsprozesse von Unternehmen, um sie flexibler, effizienter und individualisierter zu gestalten.

Die vierte industrielle Revolution hat die “Smart Factory” zum Ziel. In dieser sind Mensch, Maschinen, Produkte und Prozesse vernetzt. Durch diese Vernetzung und Automatisierung kann flexibel, auf Nachfrage produziert werden. Dadurch schwindet die Vorratslagerung und die Lagerhallen schrumpfen. Ein weiteres Phänomen der Industrie 4.0 ist, dass individualisierte Produkte immer gefragter sind. Eine automatisierte Produktion kann auf diese Anforderungen dynamisch reagieren (Vogel-Heuser, Bauernhansel und ten Hompel 2017). Neben der Künstlichen Intelligenz sind Cyber Physische Systeme (CPS) eine Basisinnovation der Industrie 4.0. Sie sind das Fundament der smarten Fabrik. CPS bestehen aus autonomen und eingebetteten Systemen und spielen für die Digitalisierung von Supply Chains eine große Rolle (Fraunhofer IML 2024).

In der Praxis sind CPS Objekte, Geräte, Gebäude und Verkehrsmittel, mitunter auch ganze Produktionsanlagen (Vogel-Heuser, Bauernhansel und ten Hompel 2017, S.12, S.33). Zum Beispiel werden Cyber-Physische Systeme in Form von mobilen Robotern als Fahrerlose Transport Fahrzeuge (FTF) [engl. Automated Guided Vehicle (AGV)] in der Logistik bereits heute vielseitig eingesetzt. Mobile Roboter [engl. Autonomous Mobile Robot (AMR)]

sind autonom in der Entscheidungsfindung und sorgen durch ihre Selbstorganisation für einen effizienten Materialfluss. Ihre Steuerung erfolgt dezentral. Dies erfordert, dass die Roboter untereinander kommunizieren können. Hierfür werden standardisierte Datenschnittstellen benötigt.

Die Nutzung von mobilen Robotern als intralogistische Fördermittel ist ein Trend, der seit Jahren in der Wirtschaft beobachtet werden kann. Die Automatisierung einer Firma kann gut am Beispiel von Amazon nachverfolgt werden. 2012 akquirierte Amazon die Firma Kiva Systems und erwarb damit Robotertechnik, was den Startschuss für die Automatisierung von Amazon bedeutete (About Amazon 2019). In Abbildung 1.1 kann nicht nur die absolute Zunahme der (hauptsächlich mobilen aber auch einigen stationären) Roboter bei Amazon beobachtet werden, auch die relative Betrachtung zeigt: die Anzahl der Mitarbeiter sinkt, während die der Roboter stetig zunimmt.

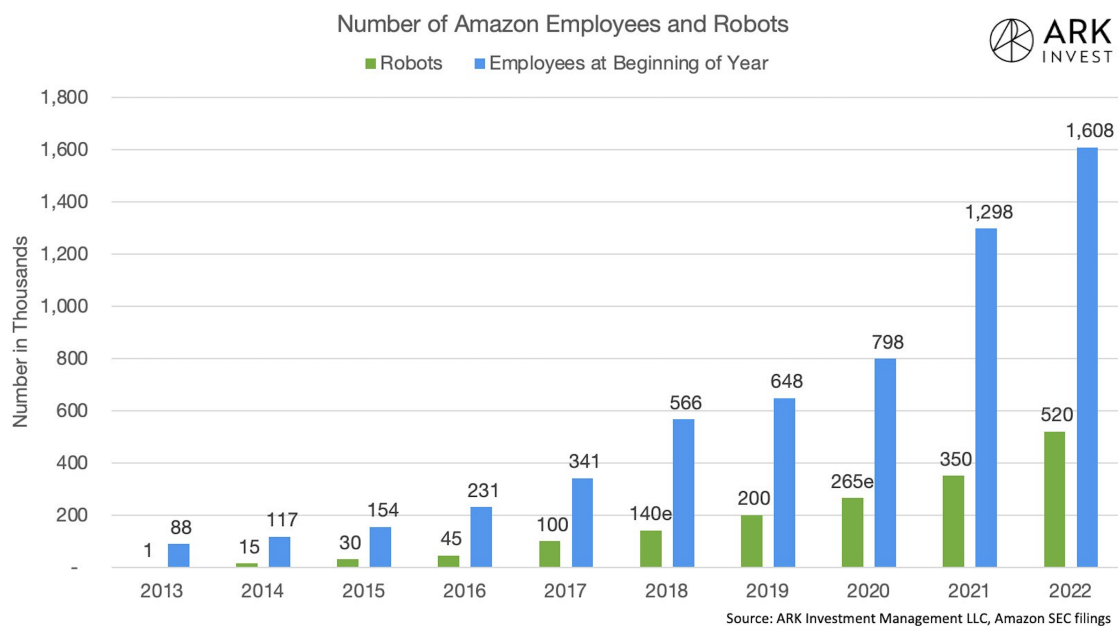


Abbildung 1.1: Statistik Amazon Roboter und Mitarbeiter, Quelle: Deutscher Robotik Verband (2022), Seite 1

Besonders in der Prozesstechnik ist die Automatisierung von Produktionsprozessen möglich. Ein Teilgebiet der Prozesstechnik bildet die Lebensmittelproduktion. Die Herstellung von Gerichten ist gut reproduzierbar. Die gleiche Menge an Zutaten muss nach vorge-

gebener Zeit in bestimmter Menge dem Prozess hinzugefügt oder entfernt werden. Die Entwicklung hin zu einer smarten Fabrik ist hier besonders gut möglich.

Die Nutzung digitaler Technologien in der Gastronomie ist bereits weit verbreitet. Ein Beispiel: Kunden verabreden sich via Messenger im Park und bestellen ihre Pizza per App. Allergien des Nutzers sind im Nutzerprofil hinterlegt und die jeweiligen Gerichte werden nicht vorgeschlagen. Zur Vier-Käse Pizza werden nach Kundenwunsch noch Oliven hinzugefügt. Die Pizza ist fertig und der Pizza Kurier bekommt die optimale Route per Handy App empfohlen. Der Standort des Fahrers wird getrackt und so ist für den Kunden jederzeit nachvollziehbar, in welchem Produktionsschritt sich sein Essen befindet. Nach Erhalt der Lieferung muss der Kunde in der App swipen und den Empfang bestätigen. Zuletzt wird der Service und das Essen online bewertet.

Die Daten sind bereits in digitaler Form vorhanden. Jedoch fehlt es an autonomen Lösungen gemäß der smarten Fabrik. Es gibt bereits einige Anbieter, die eine Automatisierung in industriellen Küchen anstreben. McDonalds testet bereits ein teilautonomes System zur Warenausgabe in Fort Worth, Texas unter dem Namen der Order Ahead Lane. Bisher werden für die Pick Up-Abholung per Auto lange Wartezeiten in Kauf genommen. Bei der Order Ahead Lane können Kunden ihre Bestellungen im Vorhinein über die McDonald's-App aufgeben und sparen dadurch Zeit bei der Abholung. Vor Ort erhalten Sie ihr Essen über ein automatisches Fördersystem. McDonalds optimiert nicht nur das Just-in-Sequence-Prinzip für ihre Kunden sondern kann so zusätzlich Personalkosten einsparen (McDonalds 2022). Auch interessant ist die Küchenzeile "automated Makeline" von useHYPHEN. Hier werden primär Bowls und Salate zubereitet. Chipotle ist ein bekannter Fastfood Hersteller in den USA, der die Küchenzeile bereits nutzt. Die vom Personal geschnittenen Zutaten werden in Behälter gegeben, die eine mechanische Öffnungsklappe zum portionieren an der Unterseite haben. Die am Anfang leere Schüssel wandert unter den Behältern hindurch und die einzelnen Zutaten fallen schwerkraftgetrieben in die Schüssel (HYPHEN 2024). Diese Teilautomatisierung und Individualisierung im Kochen ist eine Vision, die noch weiter gedacht werden kann.

Virtuelle Restaurants, auch unter den Synonymen "ghost kitchen" oder "dark kitchen" bekannt, sind Gastronomiebetriebe, die exklusiv für Lieferdienste und Pick-Up Bestellungen eingerichtet worden sind. In einem Restaurant ohne Gäste werden Gerichte zubereitet, die meistens per Kurier an die Kunden ausgeliefert werden (Otto 2019). Der Trend entwickelte sich parallel zur Covid Pandemie und ist Teil der fortschreitenden Urbanisierung. Die

dark kitchen ist aber nicht voll automatisiert und noch keine smart factory, weil hier der Kochprozess von menschlichen Köchen übernommen wird.

1.2 Aufgabenstellung

Diese Arbeit ist eine Kollaboration zwischen dem KIT und der Camelstack GmbH. Das Institut für Förderung und Logistik am KIT ist Teil der Fakultät für Maschinenbau mit Fokus auf die Fragestellungen rund um die Logistik von morgen. Die Camelstack GmbH beschäftigt sich mit dem Trend der Dark Kitchens und dem autonomen Kochen. Zentrales Element dieser Arbeit ist eine ultraleichte Elektrohängebahn (uEHB) zum Transport von kleinen Lasten [engl. ultralight electric monorail system (uEMS)]. Der große Vorteil von EHBs in diesem Kontext ist, dass die Lagerungs- und Kochprozesse auf verschiedenen Ebenen stattfinden können und die Übergabe schwerkraftgetrieben stattfindet. Das Projekt der uEHB läuft unter dem Namen Supertrack. Ziel dieser Arbeit ist es den Designvorschlag der uEHB auf Verbesserungspotenziale zu überprüfen und diese in einem Prototypen umzusetzen. Für die konstruktive Umsetzung ist eine Analyse der Anforderungen an ein EHB-System notwendig. Durch eine Literaturrecherche sollen die Anforderungen strukturiert erarbeitet werden. Durch eine geeignete Methodik werden die Teilsysteme ausgewählt und ein Gesamtkonzept erarbeitet. Abschließend erfolgt eine Bewertung des Systems und ein Ausblick in die Zukunft.

Das Schienensystem Supertrack fokussiert sich auf den Usecase in einer Dark Kitchen. Ziel ist die Vollautomatisierung im Kochen, wobei das Schienensystem nur eine Teilkomponente darstellt. Neben dem Schienensystem gibt es Silos mit Dispensern. Diese sind für Schüttgüter wie Nudeln, Reis, Linsen oder Bohnen gedacht. Für wässrige und viskose Flüssigkeiten (z.B. Soßen) gibt es ein Dosiersystem aus Schlauch und Pumpe. Für das Erhitzen und Kochen ist eine Kocheinheit mit 2 Rotationsfreiheitsgraden zuständig. Zwischengeschaltet ist eine stationäre, kippbare Wiegestation.

Die Funktionsweise wird anhand eines einfachen Beispiels klar. Per App wird eine Essens-Bestellung geordert: Penne mit Tomatensoße für 2 Personen. Ein EHB-Fahrzeug fährt somit zum Nudel-Dispenser und ein Fahrzeug zum Tomatensoßen-Dispenser. Durch eine oszillierende Bewegung der Dispenser-Trommel mit Auslassöffnung können die Mengen gut portioniert werden. Die Öffnung mündet in die kippbare Wiegestation und das Gewicht wird nochmals überprüft. Nach dem Messen werden sie zum Weitertransport auf das

EHB-Fahrzeug verladen. Die Nudeln müssen nun gekocht, die Tomatensoße muss lediglich erhitzt werden. Folglich fahren beide Fahrzeuge zu unterschiedlichen Kocheinheiten. Die Nudeln und die Tomatensoße werden in die jeweilige Kocheinheit gekippt. Hierzu ist eine Aktuatorik am EHB-Fahrzeug nötig. Zu den Nudeln wird über das Dosiersystem Wasser hinzugegeben. Damit die Tomatensoße nicht anbrennt, ist eine entsprechende Sensorik zur Temperaturmessung und Aktuatorik für die Schwenkbewegung notwendig. Die Rotation um die Schwenkachse ist der erste Freiheitsgrad der Kocheinheit. Nachdem beide Zutaten erhitzt bzw. gekocht sind werden diese in einen Behälter gekippt. Die Rotation um die Kippachse ist der zweite Freiheitsgrad der Kocheinheit. Die Abförderung erfolgt durch die Entnahme des fertigen Gerichts durch den Kunden bzw. Lieferdienstfahrer.

Das Hängebahnsystem Supertrack soll jedoch nicht spezifisch auf den Usecase Dark Kitchens zugeschnitten und damit begrenzt werden, sondern möglichst universell einsetzbar sein. So ist nicht nur der Einsatz in Dark Kitchens denkbar. Flurfreie, schienengeführte Systeme sind weit verbreitet in der Stückgutfördertechnik. Mit Blick auf die smarte Fabrik ist besonders eine modulare Bauweise wichtig, die eine einfache Reorganisation erlaubt.

1.3 Kapitelübersicht

In Kapitel 2: “Recherche” findet eine Literaturrecherche statt. Neben einer grundlegenden Einführung in Materialflusssysteme wird ein besonderes Augenmerk auf den Stand der Technik von Elektrohängebahnen gelegt. Für eine gelungene Diskussion ist eine Definition der Begriffe notwendig. Neben Elektrohängebahnen werden Hängeförderer wie Power and Free Förderer und Taschensorter kurz thematisiert. Da die Bauweise des finalen Systems von Supertrack einer Linearführung sehr ähnelt, wird auf verschiedene Linearführungen und deren Antrieb eingegangen. Es wird auf die einzelnen Teilsysteme einer EHB wie Energieübertragung, Datenübertragung, Positionsbestimmung, Steuerung, die Schiene und ihre Verzweigungen eingegangen. Zuletzt folgt eine Analyse verschiedener Hersteller und deren EHB-Systeme sowie eine Zusammenstellung der Anforderungen an ein EHB-System.

In Kapitel 3: “Methodik” wird mithilfe eines Morphologischen Kastens das EHB-System in seine Teilsysteme untergliedert und die verschiedenen Ausprägungen dieser Teilsysteme werden untereinander verglichen. Über eine Value Benefit Analysis (VBA) sollen Verbesserungspotenziale identifiziert und ein passendes Gesamtsystem ausgewählt werden, wobei die Entscheidung durch die VBA quantifiziert und nachvollziehbar wird.

In Kapitel 4: “Konstruktion” erfolgt die Abbildung der finalen Konstruktion mit einer Beschreibung der einzelnen Bauteile. Es folgt eine Beschreibung der Konstruktionshistorie der einzelnen Versionen. Die Schiene wird gemäß der Festigkeitslehre durch ein mechanisches Ersatzmodell überprüft. Es wird auf die Details im Prototypenbau eingegangen (z.B. wie das verwendete Material der Schiene). Da die Iterationen schnell erfolgen, wird das Konzept 3D gedruckt. Die Elektronik wird mit einem Baukastensystem namens Tinkerforge angesteuert.

In Kapitel 5: “Bewertung” erfolgt die Bewertung des Systems. Es wird auf die Vor- und Nachteile der verschiedenen Iterationen eingegangen. Des Weiteren erfolgt ein Vergleich mit verschiedenen uEMS. Unter anderem dem Konzept einer peripheriefreien EHB, welches am IFL entwickelt wurde.

In Kapitel 6: “Zusammenfassung” findet die Zusammenfassung und der Ausblick statt. Es sollen noch nicht umgesetzte Konzepte, Problemstellen, Verbesserungsmöglichkeiten und Zukunftsvisionen aufgezeigt werden.

2 Recherche

2.1 Klassifizierung Materialflusssysteme

Materialflusssysteme dienen dem Transport von Gütern in der Produktion und dem Vertrieb. In Abbildung 2.1 wird ersichtlich, dass der Materialfluss in verschiedene Ordnungen eingeteilt werden kann. Das EHB-System Supertrack ist für den Materialfluss der 3. und 4. Ordnung ausgelegt. Materialflusssystem ist somit ein Überbegriff für den Transport vom Wareneingang bis zum Warenausgang. Doch es findet nicht nur der Fluss von physikalischen Gütern, sondern auch ein Informationsfluss statt. Entscheidend ist, dass der Fluss zum Stocken kommen kann. So werden die Waren nicht nur transportiert, sondern auch angehalten, um sie zu bearbeiten, zu montieren, zu prüfen, zu verpacken und zu handhaben. Materialflusssysteme sind längst mehr als reine Transportsysteme und insbesondere das Handling der Materialien in der Montage und Fertigung rückt immer mehr in den Vordergrund. Aber nicht nur das temporäre Anhalten, sondern auch ein längerfristiges Lagern (speichern und puffern) wird im Materialflusssystem vorgesehen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass der Flussprozess verzweigt ist und ein Sammeln, Sortieren und Verteilen der Güter erfolgen muss. (Arnold und Furmans 2019, S.13–16)

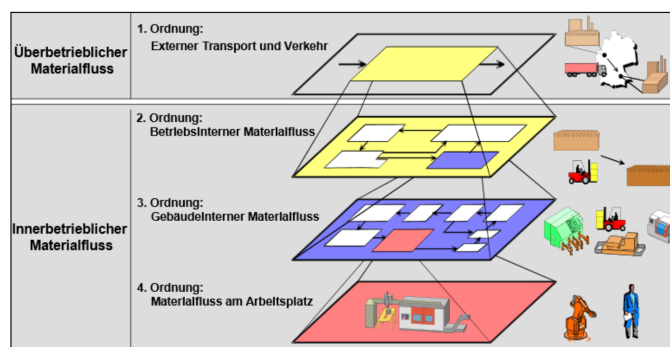


Abbildung 2.1: Ordnungssystem des Materialflusses, Quelle: Aylak (2015), Seite 29

Was wird transportiert: Fördergüter

Eine binäre Unterteilung von Fördergütern erfolgt in Stückgüter und Schüttgüter. Während der Fluss von Schüttgütern, Flüssigkeiten und Gasen stetig ist, werden Stückgüter diskret transportiert. Die Förderanlagen werden entsprechend ihrem Arbeitsprinzip in Stetigförderer und Unstetigförderer unterteilt (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2017, S.6). Stetigförderer sind z.B. Bandförderer oder Rutschen. Unstetigförderer sind z.B. Gabelstapler oder FTS. Wird ein Schüttgut jedoch verpackt, also z.B. Sand in einen Behälter oder Wasser in eine Flasche gefüllt, dann wird ein Schüttgut zu einem Stückgut. Die maßgebliche Norm für Packmittel ist die DIN 55405.

Womit wird transportiert: Förderanlage / Förderzeuge / Fördermittel

Förderzeuge sind Fahrzeuge mit denen die Fördergüter, in Ausnahmefällen auch Personen, transportiert werden. Während Fahrerlose Transport Systeme gleislos oder durch Induktionsleitungen spurgeführt sind, sind Elektrohängebahnen gleisgebunden (siehe: Tabelle 2.1). Dass EHB-Systeme flurfrei sind, ist besonders nützlich in der Montage, da sie eine Bodenfreiheit gewährleisten und zur Sicherheit der Monteure beitragen. Im Kontext von flurfreien, schienengeführten Förderzeugen und deren Entwicklung ist besonders der Automatisierungsgrad interessant. Hängeförderer werden händisch verschoben. Schleppkettentransporter (auch Power-And-Free-Förderer genannt) werden mechanisch über eine Schleppkette angetrieben. Elektrohängebahnen sind elektrifiziert und automatisiert. Das Arbeitsprinzip von allen ist unstetig. Der Transport durch Elektrohängebahnen erfolgt primär in der Ebene, also mit einer zweidimensionalen Förderrichtung. Häufig werden durch stationäre Vertikalförderer oder Schienensteigungen jedoch dreidimensionale Bewegungen ermöglicht (mehr dazu siehe: 2.2.4).

Einteilungskriterien von Fördermitteln			
Arbeitsprinzip	stetig	unstetig	
Flurbindung	flurgebunden	flurfrei	vertikal
Führung	gleislos	gleisgebunden	spurgeführt
Automatisierungsgrad	manuell	mechanisiert	automatisiert
Förderrichtung	eindimensional	zweidimensional	dreidimensional

Quelle: (Aylak 2015) S.24

Tabelle 2.1: Einteilungskriterien von Fördermitteln

Wie wird transportiert: Förderanlagen, Sortieranlagen und Intralogistik

Neben der Durchsatzrate ist vor allem die Art des zu sortierenden Fördergutes grundlegendes Auswahlkriterium für das Sortiersystem (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2017, S.2). Die Durchsatzraten reichen von einigen 1000 bis zu mehreren 10.000 Stück pro Stunde. Moderne Sortiersysteme wie der Loadrunner, entwickelt vom Fraunhofer IML schaffen bei gerade mal 60 FTF eine Sortierleistung von 10.000 Paketen pro Stunde (Fraunhofer IML 2021). Die Art des Förderguts unterteilt sich in gut und schlecht sortierbare Fördergüter. Gut sortierbar sind z.B. Päckchen. Bei forminstabilen Stückgütern wie z.B. Beutel oder Kleidung bietet sich jedoch der hängende Transport an.

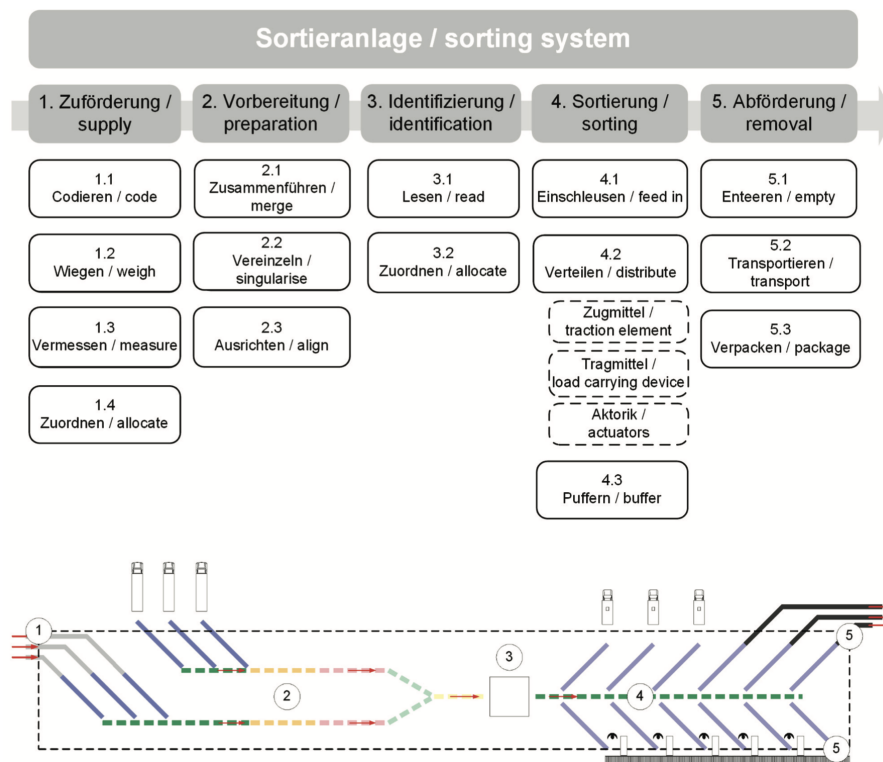


Abbildung 2.2: Sortieranlage nach VDI 3619, Quelle: Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2017), Seite 5

Das in Abbildung 2.2 gezeigte Schema einer Sortieranlage macht die Bestandteile eines technischen Sortiersystems deutlich. Die Eingangsschnittstelle zum Sortiersystem bildet die Zuförderung. Danach erfolgt die Vorbereitung, in der verschiedene Förderströme über Verzweigungen zusammengeführt werden und das Fördergut für den nächsten Schritt, die

Identifizierung, ausgerichtet wird. Die Identifizierung des Förderguts erfolgt in der Regel mittels Barcode. Selten kommen RFID-Tags zum Einsatz. Im vierten und vorletzten Schritt erfolgt die Sortierung mittels eines Sorters. Dieser verteilt die Stückgüter auf ihre Endstellen. Zuletzt erfolgt die Abförderung, welche die Ausgangsschnittstelle zum Sortiersystem bildet (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2017, S.6). Die Abförderung erfolgt an Lastübergabesystemen. Neben stationären Lastübergabesystemen benötigt ein Sortiersystem eine periphere Infrastruktur wie Puffer und Vertikalförderer (VDI, Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2022, S.11–S.12)

Weit verbreitete Stetigförderer für hängende Waren sind neben Elektrohängebahnen auch sogenannte Hängeförderer. Da sich die Anwendungsgebiete von EHB und Hängeförderern überschneiden, sollen diese im Kapitel 2.2.5: Hängeförderer und Linearführungen kurz thematisiert werden.

Zukunft der Logistik: smarte Fabrik, Automatisierung und Fahrerlose Transportsysteme (FTS)

Fahrzeuge, die automatisiert fahren, sind Teil eines „Fahrerlosen Transportsystems FTS“ (Böge und Böge 2021, S.960). Die VDI 2710 beschäftigt sich mit der ganzheitlichen Planung von flurgebundenen Fahrerlosen Transport Systemen. Spricht man von einem Greenfield Projekt, so handelt es sich um die Neuerrichtung einer Anlage. Bei einem Brownfield Projekt wird auf ein bestehendes System zurückgegriffen, welches erweitert wird. Bei Brownfield Projekten ist der Retrofit der einzelnen Komponenten von besonderer Bedeutung (VDI, Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2022). Retrofit bedeutet hierbei, dass bestehende Systeme nachgerüstet werden und die neueren Systeme mit den alten kompatibel sind.

Fahrerlose Transportsysteme agieren autonom - also ohne Kontrolle durch den Menschen. Ihre Steuerung erfolgt dezentral. Das bedeutet, dass die einzelnen Fahrzeuge untereinander kommunizieren müssen, um z.B. Staus zu vermeiden. Sie benötigen jedoch eine Leitsteuerung, welche die Fahrzeugziele vorgibt. Wichtig für die Kommunikation untereinander sind vor allem standardisierte Datenschnittstellen. Eine moderne Richtlinie zur Standardisierung der Datenschnittstellen von FTF ist die VDA 5050. Elektrohängebahnen sind gemäß der VDI 2710 kein FTS, da sie flurfrei sind (VDI, Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2022). Als Teil einer Intralogistik Lösung ist es aber wichtig, dass EHB-Systeme mit der Leitsteuerung und den FTF kommunizieren können. Um z.B. an Lastübergabestationen einen pufferfreien Abtransport zu ermöglichen.

Neben den Vorteilen wie einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit und einer Kostensenkung haben automatisierte Systeme generell immer die Nachteile von langen Amortisationszeiten, potenziellem Ausfallrisiko und komplizierten Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten (Concentric Engineering Uptime 2024).

2.2 Stand der Technik

Elektrohängebahnen werden vorwiegend in Montagelinien eingesetzt. Prominentestes Beispiel ist die Automobilindustrie. Ein besonderer Vorteil von EHB ist, dass die Handhabung schwerer Lasten flurfrei erfolgt und ein Drehen, Kippen und Schwenken der Autokarosserie möglich ist. Das erhöht die Sicherheit der Monteure und steigert die Effizienz. Mehr zur Anwendung in Kapitel 2.3. Ihre Einteilung erfolgt hauptsächlich nach Bauform der Laufschiene in: Oberläufer, Außenläufer und Innenläufer.

Bevor eine sinnvolle Diskussion des EHB-Systems erfolgen kann, muss die Beschreibung der einzelnen Bauteile und Teilsysteme erfolgen. Um eine konsistente und einheitliche Dokumentation der verschiedenen technischen Systeme zu gewährleisten, wurde 1990 in der ISO 9851 eine Definition der Begrifflichkeiten auf Englisch unternommen. Da es keine deutsche Übersetzung gibt und die ISO 9851 mit 34 Jahren ohnehin etwas in die Jahre gekommen ist, bezieht sich diese Arbeit auf die Begriffe gemäß der VDI 4441: Elektrohängebahnen - Eigenschaften und Anwendungsgebiete. Dies ist für diese Arbeit insofern problematisch, da die VDI 4441 eine Richtlinie für Bauformen im Lastbereich ab 500kg ist (vgl. VDI 3643). VDI- oder DIN-Normen für ultraleichte EHB-Systeme existieren schlichtweg nicht. Somit ist die VDI Richtlinie 4441 für uEHB lediglich zur Orientierung geeignet.

2.2.1 Bauform

Nach VDI 4441 werden Schienensysteme grundsätzlich in 3 Arten unterschieden.

Oberläufer: Die Laufrollen laufen auf dem Oberflansch eines I-Trägers. Oberläufer haben den Nachteil, dass ihre Bauhöhe die größte aller Bauarten ist. Ihre Vorteile sind, dass sie eine gute Zugänglichkeit des EHB-Fahrzeugs aufweisen und die Wartung sehr einfach ist. Außerdem weisen sie von allen Bauformen den geringsten Materialeinsatz auf. Deshalb haben sie sich als Standardbauform ab 500kg pro Fahrzeug durchgesetzt. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.5)

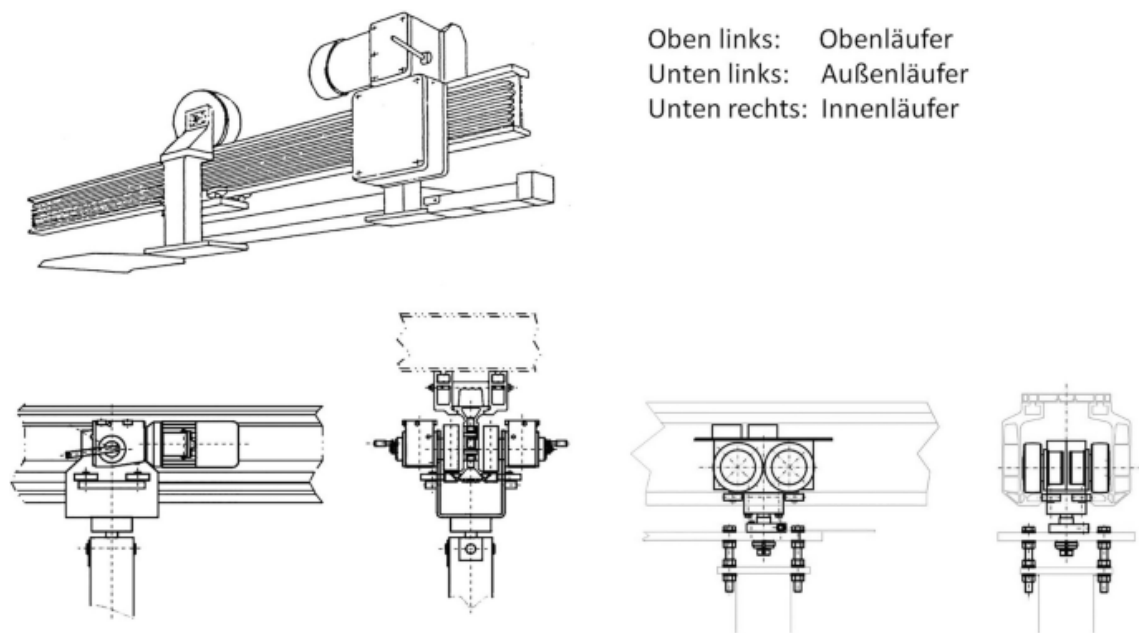


Abbildung 2.3: Bauform gemäß VDI 4441 und VDI 3643, Quelle: Johannes Fottner (2022),
Seite 56

Außenläufer: Die Laufrollen laufen beidseitig des Stegs auf dem Unterflansch des I-Trägers und sind im Bauraum der Schiene integriert. Der Vorteil dieser Bauform ist, dass die Schiene direkt an den Hallenstahlbau angeschlossen werden kann. Sie weisen jedoch mehr Bauteile als Obenläufer auf (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.6).

Innenläufer: Die Laufrollen laufen in einer Hohlchiene mit C-Profil. Innenläufer haben die Vorteile, dass ihre Bauweise sehr kompakt ist und dass die EHB-Fahrzeuge durch das C-Profil umschlossen und dadurch geschützt werden (vor Verschmutzungen, mechanischen Schlägen, etc.). Ihr Nachteil ist, dass bei Defekt eines Fahrzeugs die Demontage relativ schwierig ist und eine Handverschiebbarkeit und Entnahmestellen für das EHB-Fahrzeug vorgesehen werden müssen. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012).

Ausführung als Doppelspurtechnik: Innenläufer, Außenläufer und Obenläufer können durch die parallele Anordnung einer zweiten Schiene als Doppelspur ausgeführt werden. Der Vorteil einer Doppelspur ist, dass die zwei parallelen Laufschiene eine Momentenaufnahme entlang der Fahrtrichtung ermöglichen und so Pendelbewegungen unterdrücken. Außerdem wird die Nutzlast erhöht. Die Nachteile sind der größerer Bauraum und die höheren Kosten

(Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012).

Invertierbare Schiene - Elektrotragbahn: Wird die Schiene auf den Kopf gestellt entspricht das dem Prinzip einer Elektrotragbahn. Wird diese als Doppelspurtechnik ausgeführt, entspricht das einer Elektropalettenbahn. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2000). Eine Elektropalettenbahn wiederum kann als Regalbediengerät verwendet werden, wenn sie einen zusätzlichen vertikalen Freiheitsgrad erhält.

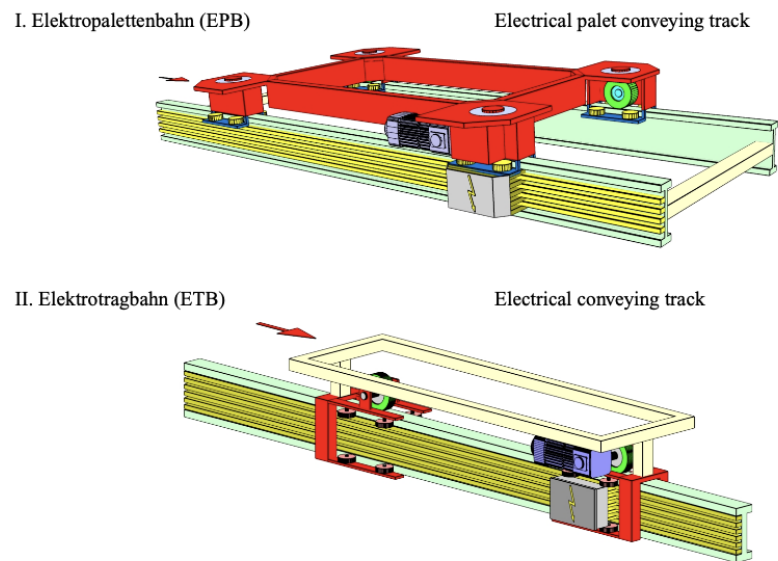


Abbildung 2.4: Elektrotragbahn und Elektropalettenbahn nach VDI 4422, Quelle: Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2000), Seite 1

2.2.2 Traglast

Neben der Bauform ist die Traglast ein weiteres sinnvolles Einteilungskriterium. Hierfür gibt es allerdings bisher kaum globale Standards. In der VDI 3643 wird eine EHB mit einer Traglast von 500kg pro EHB-Fahrzeug beschrieben. Viele Hersteller halten sich an die VDI 3643 aber es haben sich auch weitere Traglastklassen entwickelt: 200kg, 250kg, 500kg, 1200kg, 3000kg und 3600kg (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 1998, S.7). Für ultraleichte Elektrohängebahnen (uEHB) mit niedrigen Traglasten gibt es wenige Konzepte. Die Telelift GmbH ist ein Anbieter, die ein EHB System zum Transport von Traglasten bis zu 15kg anbietet. Das System kommt zum Transport von Medien in Bibliotheken und

Verwaltungsgebäuden sowie zum Transport von Laborproben etc. in Krankenhäusern zum Einsatz (Telelift GmbH 2024).

Generell gilt, dass uEHB dann eingesetzt werden, wenn eine hohe Präzision und eine schonende Handhabung der Güter erforderlich sind. Ein Traglastbereich von wenigen Kilogramm bis etwa 100 Kilogramm ist hierbei üblich. Eine standardisierte Definition oder eine offizielle Norm existiert nicht, aber die Traglastbereiche können aus Branchenstandards und spezifischen Produktinformationen von Herstellern entnommen werden. Diese Arbeit orientiert sich an der Definition für uEHB gemäß der Dissertation “Konzeptentwicklung ultraleichter Elektrohängebahnsysteme und deren Bewertung für Logistik-Applikationen” von Dr.-Ing. Batin Latif Aylak. Laut dieser sind Traglasten bis zu 20 kg “leichte Lasten” (Aylak 2015, S.1).

2.2.3 Definition und Beschreibung von EHB-Systemkomponenten

Laufschiene: Die Laufschiene ist das Trag- und Führungselement für die EHB-Fahrzeuge. Üblicherweise werden die Schienen stranggepresst. Aufgrund seiner hohen spezifischen Zugfestigkeit kommt meistens Aluminium zum Einsatz, seltener kaltgewalzter Stahl (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 1998, S.3). An der Laufschiene erfolgt auch die Befestigung von Elementen für Energie- und Datenübertragung und zur Positionsbestimmung. Üblicherweise werden die Schienenstöße zwischen zwei Schienen nicht zusammen geschweißt, sondern über Stoßverbinder miteinander verbunden (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012).

Laufbahn: Die Laufbahn ist Teil der Laufschiene. Die Laufrollen der EHB-Fahrzeuge laufen auf der Laufbahn. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012).

Aufhängebügel: Er dient zur Montage der Laufschiene an der Aufhängung (wird meistens am Stahlbau der Gebäudeinfrastruktur geklemmt). Der Aufhängebügel ist in der Höhe einstellbar. Bahnsysteme werden häufig als ein Durchläuferträgersystem montiert. Die Stoßverbinder sind hier meistens Schraubverbindungen. Der Vorteil eines Durchläuferträgersystems ist, dass Aufhängungen und Schienenstöße sich gegenseitig nicht beeinflussen. Bei höheren Traglasten muss man eventuell Abstände zwischen Stoßverbinder und Aufhängungen berücksichtigen. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.20)

EHB-Fahrzeug (engl. EMS-trolley): Ein EHB-Fahrzeug besteht aus mindestens einem angetriebenem Fahrwerk. Häufig wird über eine Traverse ein Fahrwerk mit einem nicht

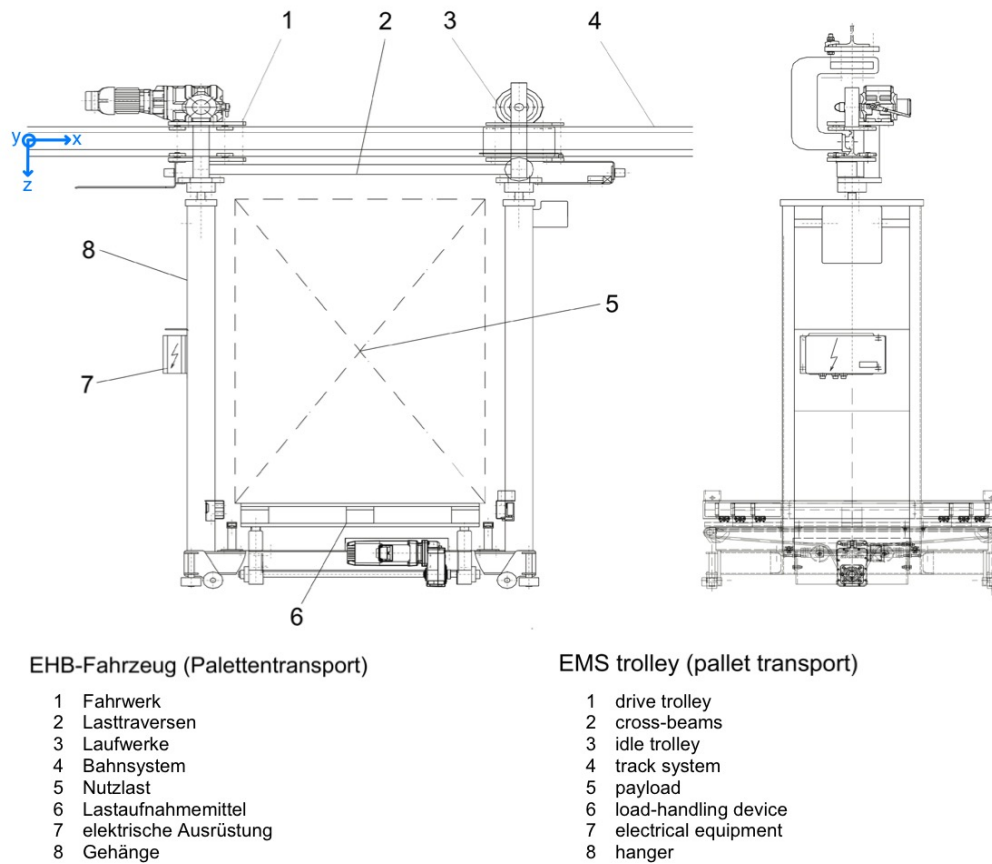


Abbildung 2.5: EHB Fahrzeug nach VDI 4441, Quelle: Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2012), Seite 4

angetriebenem Laufwerk zu einem EHB-Fahrzeug zusammengeschlossen (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.10).

Fahrwerk: Dieses setzt sich aus einem Tragkörper, Tragrollen, Seitenführungsrollen, einer Schwenklagerung und einem Antrieb mit Ausrückkupplung zusammen. Außerdem sollten Aufnahmen für Fahrzeugsteuerung, Sensoren und Stromabnehmer im EHB-Fahrzeug vorgesehen werden. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.10).

Laufrollen / Laufrad / Laufräder / Antriebsräder / Tragrollen (engl. conveyor rollers): Sie dienen zur Lastaufnahme in vertikaler Richtung (z-Achse). Sie sollten geräuscharm sein und hohe Lasten, Schienenstöße und lange Stillstände aushalten. Gegossenes Polyurethan hat sich hier durchgesetzt. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012,

S.11).

Tragachsen: Sie sind Achsen der Laufrollen. Ein EHB-Fahrzeug kann mehr als zwei Tragachsen aufweisen um die Nutzlast zu steigern. Üblich sind Drei- und Vierachs-Fahrzeuge. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.7)

Seitenführungsrollen: Sie dienen zur horizontalen Lastaufnahme (y-Achse) und zur lateralen Führung. Sie besitzen eine eigene Laufbahn, die vertikal angeordnet ist (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012).

Lastaufnahmemittel / Gehänge: Gehänge können aktiv oder passiv sein. Passive Gehänge werden an Be- und Entladestationen durch z.B. Rollenförderer oder Gabelstapler beladen. Aktive Gehänge besitzen eigene Sensoren und Aktuatoren: vor allem zum Heben, Drehen und Schwenken. Bei aktiven Gehängen ist besonders das übertragene Drehmoment zu beachten. Es wird eine Möglichkeit zur Momentenaufnahme benötigt. Diese kann über die Doppelspurtechnik oder über eine Momentenaufnahme am Fahrwerk (innerhalb oder außerhalb der Laufschiene) erfolgen. Bei Be- und Entladestationen werden stationäre Stabilisierungsrollen am Gehänge vorgesehen, welche eine Pendelbewegung unterdrücken. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.12-13).

Globales Koordinatensystem

Um eine konsistente Beschreibung von EHB-Systemen zu gewährleisten, wird ein Koordinatensystem für die Schiene eingeführt (siehe: Abbildung 2.5). Die Längsachse der geraden Schiene entspricht der x-Achse. Die z-Achse zeigt nach unten. Gemäß der Rechte-Hand-Regel zeigt die y-Achse quer zur Schienenlängsachse und spannt mit der x-Achse die Horizontale Ebene auf. In der x,y-Ebene befindet sich der Großteil des Schienensystems. Lediglich Vertikalförderer oder Vertikalkurven und danach folgende Schienengeradstücke erlauben eine Bewegung des EHB-Fahrzeugs in z-Richtung.

2.2.4 Bestandteile des Schienensystems

Verschiebeweichen und Drehkreuze/-scheiben sind Verzweigungs- und Zusammenführungselemente. In Kleinanlagen reichen Kreissysteme ohne Verzweigungen eventuell noch aus, aber um die Komplexität einer Großanlage zu erfüllen sind Weichensysteme unerlässlich.

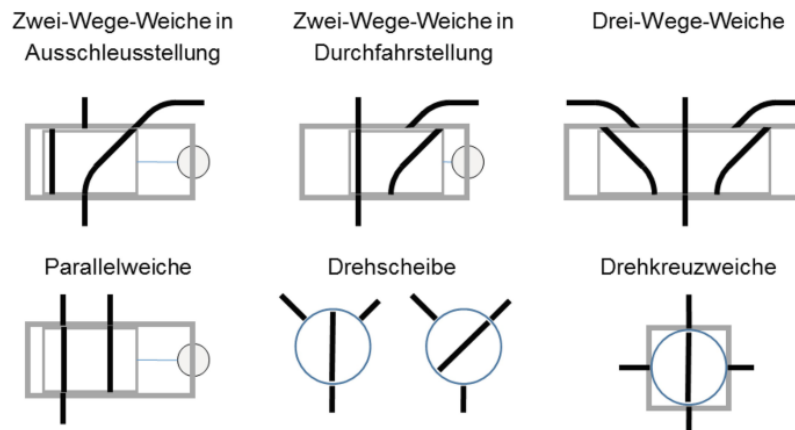


Abbildung 2.6: Verschiedene Verzweigungen im Schienensystem, Quelle: Johannes Fottner (2022), Seite 59

Verschiebeweichen

Verzweigungen im Schienensystem werden häufig durch Verschiebeweichen über einen Verschiebeschlitten realisiert. Der Verschiebeschlitten weist je nach Bauform unterschiedlich viele gerade Schienenstücke und Schienenbögen auf. Durch eine Linearaktuatorik wird der Verschiebeschlitten im Leerzustand verschoben. 2-Wege-Weichen (mit einem Weichenbogen und einem geraden Schienenstück) und 3-Wege-Weichen (mit zwei Weichenbögen und einem geraden Schienenstück) sind hierbei der Standard (siehe Abbildung 2.6). Selten kommen V-Weichen (mit zwei Weichenbögen) zum Einsatz. Parallelweichen bestehen aus einem (oder mehreren) Schienengeradstück und werden im Gegensatz zu den bisher genannten Weichen auch im beladenen Zustand geschaltet. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.26-27)

Verschiebeweichen sind quasistetige Verzweigungs- und Zusammenführungselemente. Das heißt, mehrere EHB-Fahrzeuge können die Weiche passieren, ohne dass eine Schaltbewegung notwendig ist. Je höher die Durchsatzraten, desto mehr macht sich dieser Vorteil bemerkbar (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012).

Drehkreuze und Drehscheiben

Drehkreuze und Drehscheiben werden durch eine Rotationsaktuatorik betrieben. Sollen besonders große Winkel zwischen Ein- und Ausfahrsschiene auf kleinem Bauraum realisiert

werden, kommen Drehscheiben zum Einsatz. Sie werden im beladenen Zustand geschaltet. Drehkreuze sind besonders an layoutbedingten Kreuzungen des Schienensystems vorzusehen. Ein Wechsel des Schienenstrangs ist dabei nicht zwingend erforderlich. Sie haben den Nachteil, dass sie nur entlang der Hauptstrecke quasistetig sind. Beim Ausschleusen aus dem Hauptfluss muss jedes Mal eine Drehung erfolgen (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S. 28).

Vertikale Bewegung

Um eine Bewegung in die dritte Dimension zu ermöglichen gibt es verschiedene Lösungen. Die praktikabelste ist ein System, das Steig- und Gefällestrecken überwinden kann. Der Übergang zur Steigstrecke erfolgt über einen Vertikalbogen. Steigstrecken stoßen an ihre Grenzen falls das System nicht mit 90° steigfähig ist. Müssen größere Höhendifferenzen überwunden werden, erhöht sich automatisch der Flächenbedarf. Die meisten Systeme schaffen keine 90° Steigung, da der Leistungsbedarf des Motors stark ansteigt. Der Leistungsbedarf ist abhängig von Gesamtgewicht, Fahrgeschwindigkeit und Steigungswinkel. Deshalb gibt es stationäre Einrichtungen: Vertikalförderer (auch Vertikalumsetzer oder Heber genannt) wie Aufzüge oder Seilzüge. Sie sind jedoch unstetig und stoßen bei hohen Durchsatzraten an ihre Grenzen. Auch sind sie als kritische Einrichtungen zu betrachten, da sie bei einem Defekt die gesamte Anlage stilllegen können (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.21-24). Für kurze Vertikalstrecken kann eine Aktuatorik am Fahrzeug vorgesehen werden.

Stoßverbinder und Dehnstoß

Treffen zwei Schienen aufeinander, werden sie durch einen Stoßverbinder miteinander verknüpft. Sie dienen zur Kraft- und Momentenübertragung. Temperaturschwankungen verursachen Längenänderungen der Schiene. Sie entstehen vor allem saisonal (Sommer/Winter), lokal (Indoor/Outdoor) und durch den Tag-Nacht-Zyklus. Bei längeren Strecken ist also ein Dehnstoß vorzusehen um temperaturbedingte Längenänderungen auszugleichen. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.19)

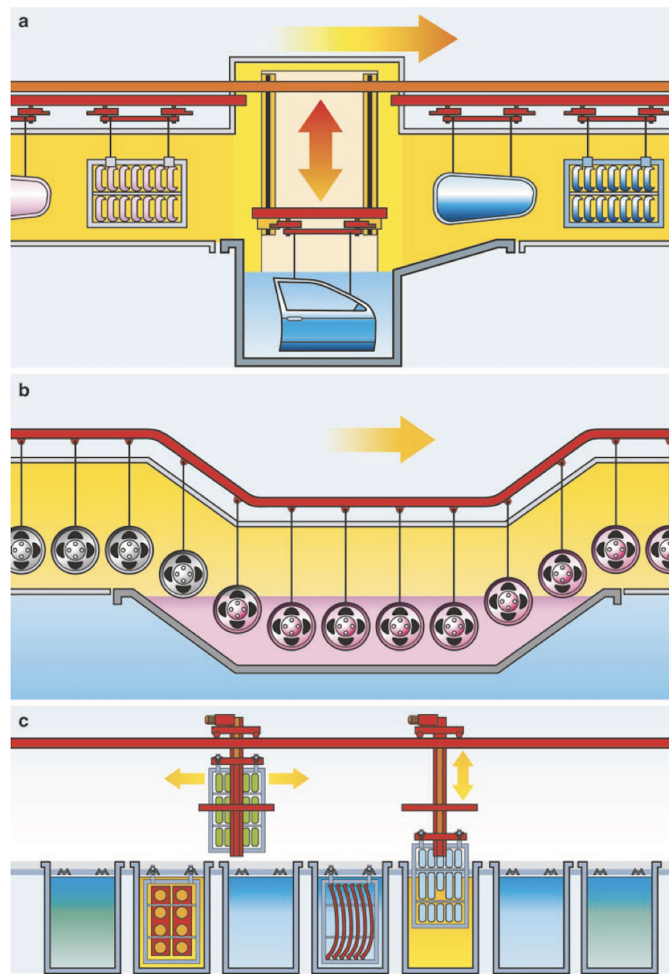


Abbildung 2.7: Vertikalförderer (a): Aufzug, (b): Steig- und Gefällestrecke, (c): Aktuatorik am Fahrzeug, Quelle: Martin (2021), Seite 29

2.2.5 Linearführungen und Hängeförderer

Da das System Supertrack keine klassische Hängbahn ist, sondern insbesondere zu Linearführungen Überschneidungen besitzt, werden diese im Folgenden thematisiert. Und da die Anwendungsgebiete von EHB und Hängeförderern miteinander konkurrieren, werden diese auch kurz genannt.

Einteilung Linearführungen/ Geradführungen: Linearführungen besitzen im Gegensatz zu EHB-Systemen kein Netz aus Schienen, sondern sind in ihrer räumlichen Bewegung limitiert. Sie werden insbesondere zur Translationsbewegung verwendet, können aber auch

einen Rotationsfreiheitsgrad aufweisen. Zum Einsatz kommen sie u.a. bei Werkzeugmaschinen wie CNC- und Fräsmaschinen oder in der Montage. Ihr großer Vorteil ist eine extrem hohe Positionsgenauigkeit bei hohen Traglasten. Auf der ersten Ebene werden Linearführungen in Gleit- und in Wälzführungen unterschieden. Es gibt zusätzlich Sonderbauformen wie hydrostatische und aerostatische Führungen, welche dem Funktionsprinzip einer Gleitführung entsprechen. Gleitführungen haben einen hohen Abrieb und müssen stark geschmiert werden. Aufgrund ihres schlechten Wirkungsgrades werden sie nicht weiter betrachtet. Wälzführungen besitzen Wälzkörper wie Kugeln oder Zylinder um die Abnutzung der Laufrille zu senken und die Energieeffizienz zu steigern. Auch Nadeln oder Kugelumlaufbuchsen kommen häufig zum Einsatz. Das Funktionsprinzip von Wälzführungen kann nach ihrer Kinematik in Wellenführungen, unterstützte Wellenführungen oder Laufrollenführungen unterschieden werden. (Böge und Böge 2021, S.1262–S.1274)

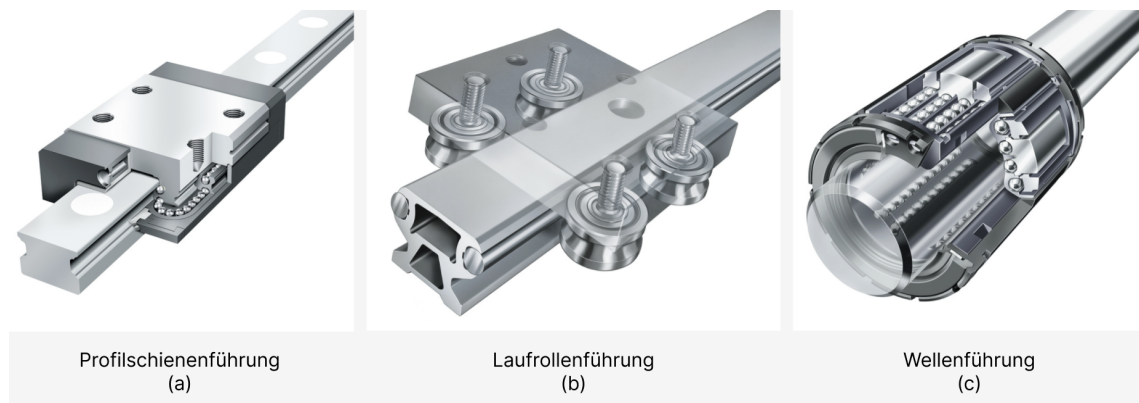


Abbildung 2.8: Übersicht Linearführungen, Quellen: (Schaeffler Technologies AG Co. KG d), (Schaeffler Technologies AG Co. KG c), (Schaeffler Technologies AG Co. KG e)

Wellenführungen: Sie bestehen aus einer Rundstange und einer Kugelumlaufbuchse (Linienkugellager). Die Bauweise erlaubt eine Rotation um die ganze Achse.

unterstützte Wellenführungen: Sie bestehen aus einem Rundprofil mit Unterstützung und einer geschlitzten Kugelumlaufbuchse. Die Unterstützung erfüllt zwei Funktionen: sie dient zur Befestigung der Linearführung an der Maschine, wodurch die Steifigkeit erhöht wird und sie verhindert eine vollständige Rotationsbewegung um die Längsachse.

Profilschienenführungen / Laufrollenführung: Durch ein Profil entlang der Schiene werden Laufrillen für Wälzkörper geschaffen. Durch die definierte Position wird kein Rota-

tionsfreiheitsgrad mehr zugelassen. Dieser Aufbau erhöht die Steifigkeit und lässt nur eine Translationsbewegung zu. Profilschienenführungen haben als Wälzkörper eine Kugelumlaufbuchse, während Laufrollenführungen Kugellager als Wälzkörper besitzen. (Schaeffler Technologies AG Co. KG 2024)

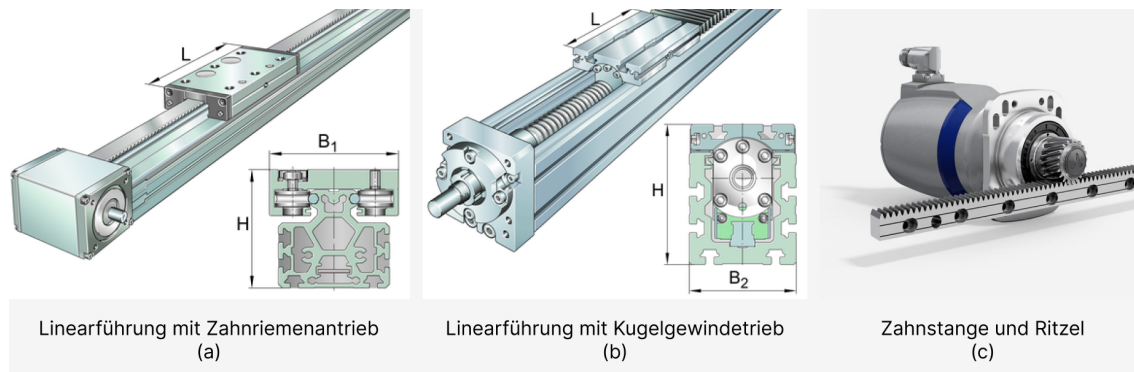


Abbildung 2.9: Übersicht Linearantriebe, Quellen: (Schaeffler Technologies AG Co. KG a), (Schaeffler Technologies AG Co. KG b), (Wittenstein alpha GmbH 2024)

Aktuatorik von Linearführungen: Der Antrieb kann durch verschiedene Systeme erfolgen. Diese unterscheiden sich vor allem in der Positionsgenauigkeit, der Geschwindigkeit und im Preis. Die verschiedenen Systeme sind:

- Zahnriemen (Timing belt)
- Ritzel und Zahnstange (Rack and pinion)
- Spindelsystem (Ball screw) / Kugelgewindetrieb
- Linearmotorsystem (Linear motor)

Beim Zahnriemen und Spindelsystem ist der Motor stationär, im Gegensatz zum Antrieb mittels Linearmotor oder über Ritzel und Zahnstange wo der Motor am Fahrzeug selbst angebracht ist. Erfolgt die Anbringung stationär, ist das System zwangsweise in seiner räumlichen Bewegung limitiert, weil unendlich lange Zahnriemen oder Spindeln aufgrund von Durchbiegung und Schwingung nicht möglich sind (TECNOTION B.V.). In Tabelle 2.2 werden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Systeme im Detail vorgestellt.

Einteilung Hängeförderer: Hängeförderer besitzen im Gegensatz zu Linearführungen eine theoretisch unbegrenzte räumliche Ausdehnung (des Schienennetzes). Generell gibt es drei verschiedene Arten von Hängeförderern, wenn man nach der Antriebsart bzw. dem

	Zahnriemen	Zahnstange	Spindel	Linear Motor
Positionsgenauigkeit [μm]	± 50	± 40	± 5	± 0.1
maximale Beschleunigung [m/s^2]	50	40	10	100
maximale Geschwindigkeit	+	+	-	+
Zuverlässigkeit/ Ausfallwahrscheinlichkeit	-	-	-	++
Wartung	-	-	-	++
Modularität	-	+	-	++
Installationsaufwand	-	+	+	+
Lautstärke [dB]	-	--	-	++
Sauberkeit/ Abrieb	--	-	-	++
Investitionskosten	+	+	-	-
Kosten über Lebensdauer	+	+	+	+

Quelle: (TECNOTION B.V.)

Tabelle 2.2: Vor- und Nachteile von verschiedenen Linearführungssystemen

Automatisierungsgrad unterscheidet. Erstens Handhängeförderer, zweitens Einschienenkreisförderer und drittens Schleppkreisförderer (engl. Power and Free Conveyor).

Handhängeförderer werden vom Bediener händisch verschoben. Einschienenkreisförderer sind Hängeförderer mit fest verbundener Schleppkette. Der mechanische Antrieb erfolgt über eine Zugkette. Diese werden häufig in Kleinanlagen eingesetzt. Es handelt sich um einen geschlossenen Kreislauf ohne Verzweigungen. Weichen kommen erst bei größeren Anlagen zum Einsatz. Schleppkreisförderer sind Hängeförderer mit einer Schleppkette, welche entkoppelt werden kann (engl. Power and Free Conveyor). Dies erlaubt den Einsatz von Weichen und die Nutzung in einer Großanlage. Sie haben den Vorteil, dass für bestimmte Streckenabschnitte die Geschwindigkeit individuell eingestellt und das Fahrzeug zur Lagerung ganz entkoppelt werden kann. Unvorteilhaft ist jedoch, dass für die Schleppkette ein separates Tragprofil benötigt wird (Böge und Böge 2021, S.967). Eine erwähnenswerte Variante von Schleppkreisförderern sind Taschensorter, ausgelegt für kleine Traglasten und hohe Durchsatzraten.

2.2.6 Energieübertragung

Die Energieübertragung bei Power and Free Förderern erfolgt mechanisch über eine Schleppkette. Neben der hohen Lautstärke ist besonders der geringe Wirkungsgrad unvorteilhaft. Bei elektrischen Hängebahnen erfolgt die Übertragung der elektrischen Energie häufig über Stromschienen aus Kupfer. Bewegte Stromabnehmer können über Schleifkontakte den Strom von der Schiene übertragen. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.29). Eine weitere Möglichkeit ist die stationäre Energieübertragung an Ladestationen und die Speicherung mittels Akkus.

kontaktlose Energieübertragung

In Reinräumen bietet sich eine verschleißfreie Energieübertragung an. Partikel, die über Reibung entstehen, kontaminieren die Umgebung (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.29). Für Bereiche mit aggressiven Medien (die häufig zur Reinigung verwendet werden) und erhöhtem Schmutzanfall ist die kontaktlose Energieübertragung geeignet (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2008, S.20). Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass der Berührschutz erhöht wird. Unvorteilhaft sind jedoch die erhöhten Investitionskosten und die schlechtere Energieeffizienz (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012).

Das Funktionsprinzip ist, dass an den Primärleiter der Schiene (Litzleitung) eine Wechselspannung angelegt wird. Die Energie wird durch eine Spule am Fahrzeug induziert. Die in die Schiene eingebrachte Leistung wird Einspeiseleistung und die von den Fahrzeugen aufgenommene Leistung wird Pick Up Leistung genannt. Für eine möglichst große Pick Up Leistung müssen die Luftspalte zwischen Schiene und Spule möglichst klein sein (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.30). Die Ströme sind mit ca. 100A relativ hoch. Die Wechselspannungsfrequenzen liegen über 20kHz und damit im mittleren Bereich (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.29).

2.2.7 Datenübertragung

Datenübertragungssysteme werden nach ihren Kommunikationspartnern und ihren Inhalten ausgewählt. Datenübertragungssysteme lassen sich nach der Art der Informationseinheit in zwei Typen unterteilen. In binäre Datenübertragungssysteme und in Systeme zur Übertragung von Datagrammen (auch Datentelegramme genannt) (Verein Deutscher In-

genieure e.V. (VDI) 2005, S.35).

Ein Datagramm ist ein Datenpaket, das Sender, Empfänger und Nutzdaten enthält. Da strukturierte Daten im JSON Format gemäß der VDA 5050 übertragen werden sollen, kommt ein binäres System zur Datenübertragung nicht in Frage. Deshalb werden binäre Systeme im Folgenden vernachlässigt und lediglich Systeme für den Austausch von Datagrammen vorgestellt.

Systeme zur Datenübertragung werden in kontaktbehaftet und kontaktlos unterschieden. Ältere Systeme nutzen Schleifleitungen zur Datenübertragung. Moderne Systeme sind kontaktlos. Es gibt drei verschiedene physikalische Prinzipien, mit denen die kontaktlose Datenübertragung erfolgen kann:

- Induktion
- Funk (elektromagnetische Wellen - z.B. WLAN/Mobilfunk)
- Infrarot (elektromagnetische Wellen)

(Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2005, S.36)

Weit verbreitet ist der Einsatz von Breitbandfunk („WLAN“; 2,4–6 GHz), welcher Daten in hohen Übertragungsraten übermitteln kann. Mobilfunk verwendet geringere Frequenzen, was zu einer größeren Reichweite, aber auch zu geringeren Datenübertragungsraten führt (VDI, Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2022). Aber auch Leckwellenleiter kommen bei EHB-Systemen zum Einsatz (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.31). Die Datenübertragung mittels Infrarot ist veraltet, wurde aber lange Zeit für Förderanlagen genutzt (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2017, S.27). Ein großer Nachteil von Infrarot ist, dass eine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger notwendig ist (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2005, S.37-38). Weitere kontaktlose Systeme sind Lasersysteme und RFID-Transponder-Systeme (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2008, S.21). Lasersysteme brauchen genau wie Infrarot einen direkten Sichtkontakt. RFID-Transponder können Daten auf einem Mikrochip speichern. Über eine Antenne können die Daten mit einem Lesegerät ausgelesen und empfangen werden. Sie besitzen eine geringe Reichweite und werden z.B. im neuen Personalausweis verwendet.

2.2.8 Steuerung

Die Steuerung für FTF-Systeme wird in zwei Ebenen aufgeteilt. Die Leitsteuerung und die Fahrzeugsteuerung.

Fahrzeugsteuerung: Grundlage für die Fahrzeugsteuerung ist ein genaues Positioniersystem. Hauptaufgabe ist die Steuerung des Bewegungsablaufs, die Kommunikation mit der übergeordneten Steuerung (Leitsteuerung), die Energieversorgung vom Fahrtrieb/aktivem Gehänge und die Geschwindigkeitsregelung. Untergeordnete Aufgaben sind die Abstandshaltung und Auffahrsicherung. Eine Diagnosefunktion und eine Statusanzeige sollten auch vorgesehen werden. Empfohlen wird außerdem ein Handbediengerät (meistens Fernbedienung), um das Fahrzeug manuell steuern zu können (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.14).

Leitsteuerung/ Anlagensteuerung: Die stationäre Anlagensteuerung dient zur Koordination der Fahrzeugaufträge. Über eine Schnittstelle zum Menschen nimmt sie Aufgaben an und übermittelt sie an die EHB-Fahrzeuge. Neben den EHB-Fahrzeugen kommuniziert sie mit übergeordneten Rechnersystemen und stationären Einrichtungen wie Vertikalförderern. Auf die Leitsteuerung wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.31)

2.2.9 Positionsbestimmung

Ziel eines Positioniersystems ist die Lagerfassung, also die Bestimmung der exakten Position der Fahrzeug-Lage. Häufig erfolgt die Lagerfassung durch eine Kombination aus Lagekopplung und Lagepeilung. Lagepeilung ist die Messung der Lage relativ zu stationären Peilmarken. Lagekopplung bezeichnet die Bestimmung der Fahrzeuglage durch interne, kinematische Zusammenhänge (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2005, S.28-29).

Bei den Positioniersystemen kann in inkrementelle Wegmesssysteme in Kombination mit Positionsmarken und Absolute Wegmesssysteme unterschieden werden. Absolute Wegmesssystem kennen zu jedem Zeitpunkt die genaue Position des EHB Fahrzeugs, da in einer hohen Frequenz eine Lagepeilung erfolgt. Die Lagepeilung bei inkrementellen Wegmesssystemen erfolgt in einer geringeren Frequenz. Zwischen den Peilmarken wird durch interne kinematische Zusammenhänge die Position approximiert (Lagekopplung). (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.17-18).

Absolute Wegmesssysteme werden oft durch einen optischen Lesekopf realisiert, der einen Barcode oder codierte Lochschienen scannt, die entlang der Wegstrecke verlegt sind. So kann die genaue Position der FTF jederzeit bestimmt werden. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.18).

Inkrementelle Wegmesssysteme messen über translatorische oder rotatorische Inkrementalgeber die zurückgelegte Distanz. Da es aber üblicherweise zu Schlupf beim Motor (oder am Reifen) kommt, muss die Position nach bestimmten Streckenabschnitten bei allen inkrementellen Wegmesssystemen neu referenziert werden. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.17). Diese neue Referenzierung entspricht einer Lagepeilung. Eine Auswahl an Inkrementalgebern (Sensoren zur Lagekopplung) liefert die VDI 2510. Dabei können alle Inkrementalgeber auf der ersten Ebene in translatorische (auch lineare Kodierer genannt) und rotatorische Sensoren (auch Drehgeber genannt) unterschieden werden (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2005, S.29-30).

Ein veraltetes System sind Positionsschalter und Schaltlineale. Sie sind einfach im Aufbau und sehr zuverlässig. Sie liefern jedoch keine genaue Position. Bekannt ist lediglich der Streckenabschnitt, auf welchem sich das EHB-Fahrzeug befindet. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.17). Der Positionsschalter wird mechanisch durch das Schaltlineal am EHB-Fahrzeug aktiviert, wenn dieses die Schalterposition passiert.

2.3 Anwendung von Elektrohängebahnen und Hängeförderern

Um die Anforderungen an Hängeförderer bestimmen zu können, ist es sinnvoll, zunächst die Anwendungen dieser Systeme zu betrachten. Es wurde eine Marktrecherche betrieben und verschiedene Hersteller und deren Einsatzgebiete analysiert. Die Ergebnisse finden sich in der Tabelle 2.3: Konkurrenzmatrix.

Besonders beliebt sind Elektrohängebahnen in der Automobilindustrie, wo sie das Handling von Autokarosserien mit einem Gewicht von bis zu 10 Tonnen ermöglichen. Hier sind die EHB für schwere Lasten und geringe Geschwindigkeiten ausgelegt. Typische Geschwindigkeiten sind im Bereich von 1 m/s (ROFA INDUSTRIAL AUTOMATION AG 2020). Der hängende Transport bietet besonders praktische Anwendungen bei Oberflächenbehandlungen, wie der Tauchbadlackierung von Karosserien. Die Fahrzeugelektronik der EHB ist oberhalb der Karosserie angebracht und muss somit nicht mit eintauchen. In der Oberflächenbehandlung sind Hängeförderer jedoch nicht auf die Automobilindustrie beschränkt.

So ergeben sich die gleichen Vorteile bei der Pulverlackierung von Fahrradrahmen, gefolgt von einem Brennprozess im Ofen.

Eine weitere Anwendung von EHB ist die Konfektionierung von Catering-Essen für die Luftfahrt. Der Vorteil hier ist, dass die Prozessschritte präzise aufeinander abgestimmt werden können (LOUIS SCHIERHOLZ GMBH 2024). Auch im E-Commerce und in der Intralogistik sind EHB-Systeme weit verbreitet. Im E-Commerce ermöglichen sie die effiziente Handhabung und Sortierung von Paketen. In der Lagerhaltung werden sie als flexible Lager- und Kommissioniersysteme genutzt. Sie werden auch selten für den Personentransport eingesetzt, wie beispielsweise bei der Wuppertaler Schwebebahn.

Ihr Haupteinsatzzweck liegt in der Industrie, insbesondere in Montagelinien und der Logistik. Die Variantenvielfalt ist dabei hoch. Beim Transport von Autokarosserien werden C1-EHB für besonders schwere Lasten und geringe Geschwindigkeiten ausgelegt. Im Gegensatz dazu sind Taschensorter, die vor allem zum Transport von Kleidung oder im E-Commerce für den Transport von Päckchen bis zu 3 kg verwendet werden, für geringe Lasten und hohe Geschwindigkeiten und Durchsatzraten ausgelegt.

Neben industriellen Anwendungen finden Hängeförderer auch in Reinräumen Verwendung. Sie werden zum sterilen und schnellen Transport von Laborproben in Krankenhäusern genutzt (Telelift GmbH 2024) oder zum Transport von Lebensmitteln in Schlachthäusern oder Bäckereien (LOUIS SCHIERHOLZ GMBH 2024). In der Richtlinie VDI 2710 wird im Abschnitt 5.4 genauer auf Reinräume eingegangen. Für den Einsatz in Reinräumen sind bei der Konstruktion insbesondere der Verzicht auf Schweißnähte, Hinterschneidungen und Hohlräume zu beachten. Mechanischer Abrieb sollte minimiert werden, und die Oberflächen müssen regelmäßig mit aggressiven Flüssigkeiten wie alkalischen und säurehaltigen Lösungen desinfiziert werden. Auch die Temperaturbeständigkeit ist wichtig, da Dämpfe oder Heißluft eingesetzt werden können. Eine hohe Schutzklasse und Oberflächengüte, die das Eindringen dieser Medien verhindert, ist daher erforderlich (VDI, Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2022).

2 Recherche

Firma / Hersteller	Anwendung
Pentanova	- Automobilindustrie - Lebensmittel- und Getränkeindustrie - Einzelhandel - Holz- und Metallverarbeitung - Chemie und Pharma - Luftfahrt
Schierholz	- Oberflächentechnik - Airline Catering - Automobilindustrie - Reifenherstellung - Intralogistik / Warehousemanagement (Handling von Paletten) - Lebensmittel (Schlachthäuser, Fleischverarbeitung) - Haushaltstechnik (Oberflächenbeschichtung von Waschmaschinen, Heizkörpern, Sanitärkeramik, Rollläden oder Wintergärten)
ROFA	- Automobilindustrie
SEH Skyrail	- Automobilindustrie - Automobilzulieferer - Oberflächenbehandlung
AFT	- Intralogistik - Automobilindustrie - Krankenhäuser (Essen, Wäsche und Müll)
LogSystems	- Automobilindustrie - Intralogistik - Krankenhäuser
SwissLog	- Lebensmittel- und Getränkeindustrie (auch Tiefkühlwaren) - Pharma - Einzelhandel und E-Commerce
Telelift	- Transportaufgaben in größeren Bibliotheken oder in Verwaltungsgebäuden ab ca. 250.000 Medien - Transport empfindlicher Waren (z.B. Laborproben in Krankenhäusern)
Quellen: (PENTANOVA GmbH 2021), (LOUIS SCHIERHOLZ GMBH 2024), (ROFA INDUSTRIAL AUTOMATION AG 2020), (SEH Engineering GmbH 2023), (AFT Automatisierungs- und Fördertechnik GmbH Co. KG 2019), (LogSystems Fördertechnik und Automatisierungs- GmbH Co. KG 2023), (Swisslog Holding AG 2024), (Telelift GmbH 2024)	

Tabelle 2.3: Konkurrenzmatrix

2.4 Aktuelle Herausforderungen von Hängeförderern - Was macht Supertrack anders?

ultraleichte Elektrohängebahn mit modularer Lastaufnahme: Bisher existieren kaum Anbieter von uEHB-Systemen, obwohl die Anwendungsmöglichkeiten in der Theorie unzählig sind. Linearführungen sind in der räumlichen Bewegung limitiert. EHB-Systeme wie die von Telelift sind teuer und auf den Transport von leichten Waren spezialisiert. Die heutigen Produktionstechnologien stellen aber nicht nur reine Transportaufgaben an die Fördertechnik, sondern zusätzliche Anforderungen wie Handlingsmöglichkeiten und Ergonomie am Arbeitsplatz. Deshalb bietet ein System, das aufgabenspezifisch mit verschiedenen Endeffektoren ausgestattet werden kann, viele Vorteile. Einfache Linearführungen

stoßen in vielen Anwendungsszenarien an ihre Grenzen. Mit dem System Supertrack können flexibel Strecken aufgebaut und einfach umorganisiert werden. Insbesondere der schonende Transport von Waren kann mit einer uEHB wie Supertrack erfolgen. In Krankenhäusern können Laborproben sicher und ohne den Bodenverkehr zu behindern, transportiert werden. Sie eignen sich als Zuführungssysteme von Elektronikkomponenten, die von einem Cobot montiert werden. Oder in Fotostudios kann das System für Kamerafahrten oder für die Ausleuchtung verwendet werden. Auch ein Einsatz als Regalbediengerät / Pick-Roboter in Supermärkten ist denkbar.

Datenübertragung per WLAN - Abweichung von der VDI 3643: Der Hersteller SEH-Foerdersysteme ist mit der EHB Skyrail einer der modernsten Anbieter zurzeit. In ihrer Broschüre wird unter anderem die Schiene beworben, die nach der VDI 3643 konstruiert wurde (SEH Engineering GmbH 2023). Neben Schleifleitungen für die Energieübertragung über einen Stromabnehmer werden hier bis zu sechs Schleifleitungen für die Datenübertragungen vorgesehen.

Das Problem ist jedoch, dass die Intralogistiklösung eines Unternehmens selten von nur einem Hersteller eines Fahrzeugtyps hergestellt wird, sondern eine Kombination aus Gabelstaplern, Regalsortiersystemen und flurgebundenen sowie flurfreien FTF von verschiedenen Herstellern ist. Die Datenübertragung mittels Schiene funktioniert zwar sehr störungsfrei, limitiert aber zeitgleich die Kommunikation zu anderen Fahrzeugen. Sobald eine heterogene Fahrzeugflotte zum Einsatz kommt, benötigt es standardisierte Datenschnittstellen zur reibungslosen Kommunikation. Deshalb wird im System Supertrack WLAN zur Datenübertragung und die VDA 5050 zur Kommunikation zwischen den FTF und der Leitsteuerung genutzt.

Reorganisation in der smarten Fabrik - Modulares System mit quasistetigem Drehkreuz: Ein weiterer Aspekt ist die Modularität des Konzeptes. Nicht nur sind Trends kurzlebiger und das Bedürfnis nach Individualisierung immer wichtiger, auch die Möglichkeit zur Reorganisation der Intralogistik erlangt immer größere Bedeutung. Deshalb ist das Schienensystem Supertrack steckbar und jede Schiene wird mit RFID-Tags ausgestattet. Sollte das Schienensystem neu- oder umgebaut werden, kann nach einmaligen Abfahren durch das EHB-Fahrzeug die Position jeder Schiene bestimmt werden. Haltestellen können durch Magnete flexibel in die Schiene eingeklippst werden und ein Hall-Sensor kann exakt die Haltestellen bestimmen.

Bei EHB-Systemen werden häufig 2-Wege- oder 3-Wege-Verschiebeweichen eingesetzt. Das

Problem hierbei ist, dass sie richtungsabhängig sind. Einen deutlich flexibleren Aufbau erreicht man mit Drehkreuzen. Im Schienensystem Supertrack werden quasistetige Drehkreuze eingesetzt. Sie haben den Vorteil, dass sie im Gegensatz zu klassischen Drehkreuzen nicht unter Last rotieren müssen und, sobald sie gestellt sind, wie eine stetige Schienenkurve funktionieren. Klassische Drehscheiben/ Drehkreuze sind unstetig für jede Fahrt, die nicht dem Hauptfluss entspricht. Sie müssen für jeden Abbiegevorgang gestellt werden, was die Flussrate deutlich verringert.

Starrkörper in der Kurvenfahrt - Eine Elektrohängebahn ohne Gelenke: Die wohl größte Neuerung ist die Bauform von Supertrack. Im Gegensatz zur klassischen EHB hat sie keine Schwenklagerung und somit keine Gelenke. Das Konzept entspricht dem Aufbau einer Laufrollen-Linearführung. Mehr zum Aufbau und eine Beschreibung des Systems in Kapitel 4.1

Fraunhofer Opensource Betriebsplattform Logistik SELE: Silicon Economy Logistics Ecosystem ist ein vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur gefördertes Projekt mit dem Ziel, eine Hard- und Softwarebibliothek über eine Open-Source Plattform zur freien Verfügung zu stellen. Das Großprojekt mit einer Fördersumme von 25 Mio. Euro wird vom Fraunhofer IML umgesetzt.

2.5 Anforderungen an das System

Auf Basis der Recherche wird im Folgenden eine Anforderungsliste für das System ausgearbeitet (siehe: Tabelle 2.4). Die Teilsysteme werden in einem morphologischen Kasten strukturiert dargestellt (siehe: Tabelle 3.1). Mit dem morphologischen Kasten wird das Gesamtkonzept ausgewählt und mit dem bestehenden System verglichen. Es wird überprüft, ob das bisherige System die Anforderungsliste erfüllt und wo noch Verbesserungsbedarf besteht. Auf dieser Grundlage findet die Weiterentwicklung des Systems statt.

Die Kraftaufnahme erfolgt primär in vertikaler Richtung (z-Achse) durch die Laufrollen. Horizontale Kräfte (x- und y-Achse) werden bei EHB-Systemen durch die Seitenführungsrollen aufgenommen. Die Höhe der Traglast für ein uEHB-System ist je nach Anwendungsszenario frei wählbar. Für den Einsatz in einer Dark Kitchen wird eine maximale Traglast von 1 kg gefordert. Momente können nur teilweise übertragen werden. Durch eine Doppelspurtechnik oder die Verbreiterung der Schiene können größere Momente übertragen werden. Es werden 10 Nm gefordert, um ein Gewicht von 1 kg mit einer Hebellänge von

1 m halten zu können.

Der Temperaturbereich bewegt sich zwischen $+2^{\circ}\text{C}$ bis $+45^{\circ}\text{C}$ (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.9). Laut VDI 3643 können die Fahrzeuge eine Temperatur bis 55°C erreichen (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 1998). Die Abwärme entsteht durch den Motor, der sich durch den Betrieb erhitzt. Es ist darauf zu achten, dass die Leistungselektronik der Fahrzeugsteuerung keinen Schaden davon trägt. Für den Einsatz im Tiefkühlbereich, z.B. zur Anwendung in der Lebensmittelindustrie, müssen besondere Maßnahmen vorgesehen werden (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.9).

Der Einsatzbereich von EHB-Systemen erfolgt normalerweise Indoor (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, 2). Nicht überdachte Outdoor-Einsätze sind die Ausnahme, weshalb das System Supertrack hierfür nicht ausgelegt wird.

Das System sollte gegen Staubpartikel und Wassertropfen geschützt sein. Eine Definition der IP-Schutzarten erfolgt nach der IEC 60 529 (EN 60 529) (EFB-Elektronik GmbH 2024).

Um den Einsatz von Vertikalförderern zu umgehen, soll das System eine Steigung von 90° bewältigen können. Dies erfordert einen entsprechend leistungsstarken Motor, da EHB-Systeme standardmäßig für die Fahrt in der Ebene ausgelegt werden (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 1998, S.5). Die Kurvenradien sollten möglichst klein sein, da das System auf kleinem Bauraum aufgebaut werden soll.

Erstrebenswert ist immer auch ein lärmfreier Betrieb, um das Personal zu schützen. Die Geräuschemission sollte 65 dB in 1 m Abstand vom Fahrwerk nicht übersteigen (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 1998, S.5).

Geschwindigkeitsbereiche von EHB-Fahrzeugen liegen üblicherweise bei 1 m/s bis 2 m/s. Sonderanwendungen erreichen bis zu 3 m/s. (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.8). Gemäß VDI 3643 erreichen die EHB-Fahrzeuge Geschwindigkeiten von $50[\text{m}/\text{min}] = 0,83[\text{m}/\text{s}]$ (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 1998, S.3). Eine Auffahrsicherung ist in jedem Fall vorzusehen. Es können mechanische und/oder elektrische Systeme zum Einsatz kommen. Bei Geschwindigkeiten über 0.5 m/s ist eine mechanische Auffahrsicherung nicht mehr ausreichend und eine elektronische zwingend erforderlich. Es gibt induktive, optische und virtuelle Auffahrsicherungssysteme (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.16).

Eine relative Luftfeuchtigkeit von bis zu 80% verursacht keine Komplikationen (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.9). Auch Werte bis 92% sind möglich (Verein

Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 1998, S.3).

Die Schiene sollte möglichst steif sein und eine maximale Durchbiegung von $L/300$ nicht überschreiten (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 1998, S.3). Die Schienenstöße sollten steckbar sein, und nicht geschweißt werden. Damit ist eine einfache Demontage und ein unkomplizierter Austausch von einzelnen Schienenstücken gewährleistet (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 1998, S.3).

Um möglichst kleine Horizontal- und Vertikalkurven fahren zu können, sollten die Kurvenradien unter 0.2 m liegen.

Der Antrieb sollte selbsthemmend sein, um bei einer Fehlfunktion in einer Gefällestrecke die Fahrzeuggeschwindigkeit zu reduzieren. Zur Wartung und Reparatur sollte eine Möglichkeit zur Handverfahrbarkeit/ Freilaufbetätigung vorgesehen werden. Hierfür ist ein entsprechender Kupplungsmechanismus notwendig (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012, S.5).

Die Schiene darf nicht geschweißt werden, um eine einfache Montage und Demontage vor Ort zu ermöglichen. Steck- oder Schraubverbindungen sind besser geeignet. Die Demontage des EHB-Fahrzeugs ist genauso wichtig, und sollte an jeder Stelle des Bahnverlaufs möglich sein.

Um eine Kollision der FTF zu vermeiden, ist zwingend eine elektronische Abstandshaltung erforderlich (Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2012). Diese kann induktiv, optisch oder virtuell sein. Weitere Sicherheitseinrichtungen wie Stopptaster, Notastaster und Bumper sollten ebenfalls vorgesehen werden.

2.5 Anforderungen an das System

Traglast m_T [kg]	1
Momente $M_{x,y,z}$ [Nm]	10
Temperatur [°C]	2 bis 50 (VDI 3643)
Einsatzbereich	- Indoor
Schutz gegen	- Staubpartikel - Wasser (IP11)
Steigung/Gefälle [°]	90
Lautstärke [dB]	65 geräuscharm in 1m Abstand (Schalldruck von $v=20\text{m/min}$) (VDI 3643)
Geschwindigkeit [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$]	1
relative Luftfeuchtigkeit [%]	30 bis 92 (VDI 3643)
maximale Durchbiegung [m]	L/300
Kurvenradien [m] (horizontal und vertikal)	$r < 0,2\text{m}$
Antrieb	- selbsthemmend - Möglichkeit zur Handverfahrbarkeit / Freilaufbetätigung - Haltebremse
Fertigung Schiene	- kein schweißen - steckbare Schienen
Wartung	an jeder Stelle des Bahnverlaufs von der Schiene demontierbar
Auffahrsicherung/ Abstandshaltung	- mechanisch (bei höheren Geschwindigkeiten nicht ausreichend) - elektronisch (zwingend erforderlich)
Sicherheitseinrichtungen	- Stoptaster - Notastaster - Bumper (mechanische Schalteiste mit elektrischem Notauskontakt)

Tabelle 2.4: Anforderungsliste

2.6 Identifikation von notwendigen Schnittstellen zur übrigen Systemperipherie

Unter Systemperipherie versteht man alle zusätzlichen Komponenten und Geräte, die nicht zum Kernsystem der Elektrohängebahn selbst gehören. Das Kernsystem der EHB ist die Schiene und das Fahrzeug. In Abbildung 2.10 werden die Teilsysteme des EHB-Systems Supertrack als Blackbox dargestellt. Schnittstellen dienen zum Austausch zwischen den Teilsystemen.

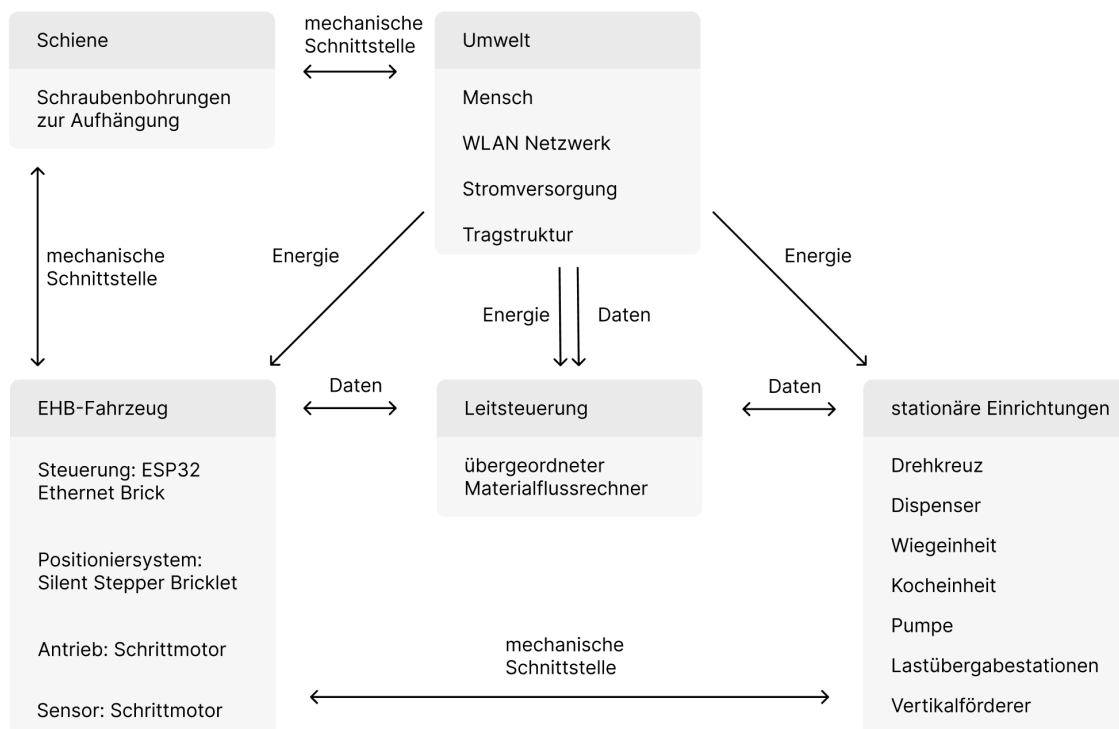


Abbildung 2.10: Darstellung des EHB-Systems als Blackbox und dessen Schnittstellen

Hardware-Schnittstellen erfüllen im Kontext der EHB zwei Funktionen: sie dienen der Energieübertragung (Strom) und dem Kraftfluss. Das Fahrzeug benötigt Strom für die Steuerung und den Antrieb. Im Prototypen erfolgt die Stromversorgung des Schrittmotors durch ein Netzteil, das an das Silent Stepper Bricklet 2.0 von Tinkerforge angeschlossen wird. Die Steuerung, der ESP32 Ethernet Brick, wird durch ein separates Netzteil per USB-C Anschluss mit Strom versorgt. Die Schiene ist ein rein mechanisches Bauteil und hat Bohrungen zur Befestigung der Schienen. Diese können als physische Hardwareschnitt-

stellen identifiziert werden, da sie die Schiene mit einer Tragstruktur verbinden und den Kraftfluss ermöglichen.

Die Software-Schnittstellen sind in Abbildung 2.10 dargestellt. Hier werden Daten über eine Funkverbindung mittels WLAN übertragen. Primär erfolgt der Austausch zwischen dem Menschen und einem übergeordneten Materialflussrechner, der die Fahraufträge der einzelnen EHB-Fahrzeuge koordiniert und deren Status abfragt. Da die Fahrzeuge später dezentral gemäß der VDA 5050 gesteuert werden sollen, können diese auch mit stationären Einrichtungen wie dem Drehkreuz und fahrerlosen Transportsystemen aus der Umwelt kommunizieren. Im Prototyp sind die Fahrzeuge noch nicht intelligent und der Leitrechner übernimmt die Kommunikation mit stationären Einheiten und koordiniert z.B. die Drehkreuze. Der Mensch kann auch direkt mit dem EHB-Fahrzeug kommunizieren über ein Handbediengerät oder Sicherheitseinrichtungen wie einen Not-Aus-Schalter.

3 Methodik

3.1 Vorgängerversion: Analyse der Verbesserungspotenziale

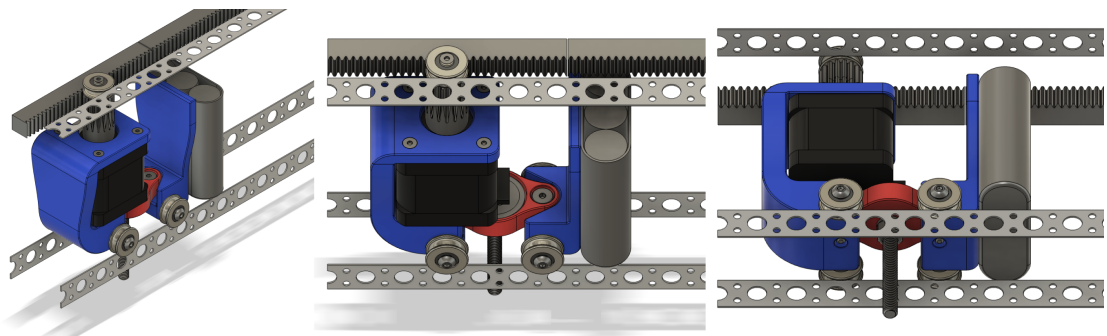


Abbildung 3.1: EHB-Fahrzeug der Vorgängerversion (ohne Tragprofil der Schiene zur besseren Ansicht)

Beschreibung der Vorgängerversion:

Der Aufbau der Vorgängerversion (siehe: Abb. 3.1 und 3.2) ähnelt dem eines Innenläufers (vergleiche mit: Abb. 2.3). Klassische Elektrohängebahnen bestehen aus einem Fahrwerk und einem Laufwerk. Sie werden über zwei Schwenklagerungen mit einer Traverse verbunden. Die Vorgängerversion, die im Rahmen dieser Arbeit überarbeitet wird, ist die Konstruktion vom kanadischen Ingenieur Matt Kars. Sie besteht aus einem Fahrwerk, an dem ein Schrittmotor angebracht wurde, sowie einem Laufwerk an dem die Batteriezellen befestigt sind. Über eine Zahnstange erfolgt der Antrieb und die Positionierung des Systems. Über dem Zahnrad ist an der Motorachse eine Seitenführungsrolle angebracht. Die Traverse (rot) ist recht kurz gehalten und ist als kritisches Bauteil zu betrachten, da hier Durchbiegung, Kerbwirkung und Spannungen maximal sind.

Analyse des Konzeptes: Innenläufer haben den Vorteil, dass Sie das EHB-Fahrzeug vor seiner Umwelt schützen. So ist dieses vor Staub, der in Gießereien vorkommt, vor Partikeln

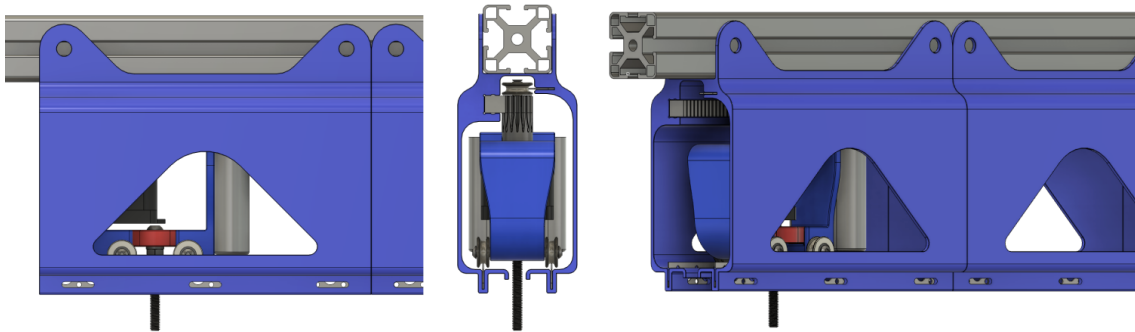


Abbildung 3.2: EHB-Fahrzeug der Vorgängerversion mit Tragprofil der Schiene

wie beim Lackieren und vor Flüssigkeiten (Tauchbadlackierung und in der Lebensmittelindustrie) geschützt. Der große Nachteil an Innenläufern ist ihre schwierige Zugänglichkeit. Sollte ein EHB-Fahrzeug kaputt gehen müssen Wartungsklappen vorgesehen werden und das Fahrzeug muss von Hand verschiebbar sein, damit es demontiert werden kann.

Metallband: Kugellager, die (als Laufrollen) auf einem metallenen Band fahren sind eine einfache Möglichkeit zur Spurführung. Die Verwendung einer Seitenführungsrolle verbessert die laterale Führung, macht die Verwendung einer Spurführung durch die Metallbänder gleichzeitig überflüssig. Die Metallbänder sind mit komplexen Arbeitsschritten in der Fertigung der Schiene verbunden. Besser wäre ein System, indem die Schiene komplett 3D-gedruckt oder stranggepresst werden kann. Ein weiterer Nachteil des Metallbandes ist der hohe Abrieb durch den Metall-Metall Kontakt zwischen Schiene und Laufrolle. Gerade in der Lebensmittelindustrie ist dies ungeeignet. Ein weiterer Kritikpunkt ist der Lärm, der durch den Metall-Metall Kontakt verursacht wird. Zuletzt entspricht der Kontakt zwischen Laufrollen und Metallband einem Punktkontakt. Ein Linienkontakt würde den Lastenbreich erhöhen und den Abrieb vermindern.

Zahnrad und Seitenführungsrolle: Die erreichbaren Geschwindigkeiten bei dem aktuellen Zahnrad Durchmesser sind sehr gering. Eine Übersetzung oder ein größeres Zahnrad sind nötig um die Geschwindigkeit zu erhöhen. Ein Übersetzungsgetriebe erhöht die Anzahl an bewegten Bauteilen und verringert den Wirkungsgrad. Außerdem ist es komplex und teuer. Deshalb muss mehr Platz in der Schiene vorgesehen werden um den Bauraum für ein größeres Zahnrad zu erhöhen. Auch ist es unlogisch die Motorachse als die Welle der Seitenführungsrolle zu verwenden. Die Drehzahlen werden dadurch unnötigerweise erhöht.

Schiene: Die Schiene ist sehr instabil und verformt sich elastisch durch die Schwerkraft, wenn sie auf die Seite gelegt wird. Ein weiterer Kritikpunkt des Systems ist die Topologie der Schiene. Indem die Zahnstange nur einseitig verbaut wurde, sind nur Kreisfahrten möglich. Außerdem ist die Einbaurichtung relevant und kann besonders an Verzweigungen zu Problemen führen. Mehr dazu in Abbildung 4.8. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Schiene nicht tordiert oder invertiert werden kann. Die Laufrollen besitzen vier Wirkflächenpaare in der Vertikalen am Boden der Schiene. Wird die Schiene umgedreht (invertiert) liegt die gesamte Last auf der Seitenführungsrolle beim Zahnrad. Der Einsatz als Elektrotragbahn ist somit nicht möglich. Problematisch ist außerdem der hohe Materialverbrauch durch die Schiene. Das Tragprofil ummantelt das Fahrzeug und ist geschlitzt. Um bei gleicher Biegebelastung ähnliche Durchiegungen und Festigkeiten zu erreichen wie durch ein ungeschlitztes Profil, benötigt es deutlich mehr Material.

Fahrzeug: Zuletzt wird die Schwenklagerung (die Gelenke und die Traverse) des EHB-Fahrzeugs betrachtet. Dieses ermöglicht zwar kleine Kurvenradien, geht aber zulasten der Tragfähigkeit und ist als kritisches Bauteil aufgrund möglicher Spannungsspitzen und Kerbwirkungen zu sehen.

3.2 Morphologischer Kasten EHB

Da das Konzept der Vorgängerversion einige Nachteile hat, soll dieses noch einmal überdacht werden. Um ein Gesamtkonzept auszuwählen wird das Elektrohängebahnsystem in seine Teilsysteme zerlegt. Für die verschiedenen Teilsysteme gibt es unterschiedliche Ausprägungen. Diese werden gesammelt und strukturiert im morphologischen Kasten dargestellt (siehe: Tabelle 3.1). In Kombination mit einer Value Benefit Analyse (VBA) kommt man so zu einer quantifizierbaren und reproduzierbaren Auswahl eines Gesamtsystems.

3.2 Morphologischer Kasten EHB

Bauform	nach VDI 3643: - Obenläufer - Außenläufer - Innenläufer	Linearführung: - Laufrollenführung - Profilschienenführung	
Energieversorgung	elektrisch: - Akku - Schleifleitung - Induktion	mechanisch: - Kardankette - Reibriemen	chemisch: - Tank
Antrieb/ Aktuatorik	reibschlüssig: - Reibrollen - Keilriemen	kraftschlüssig: - Zahnstange - Zahnriemen - Schleppkette - Kugelumlaufspindel - Schnecke	kontaktlos: - Linearmotor
Encoder (Sensorik)/ Positionsbestimmung	absolutes Wegmesssystem: - optischer Lesekopf und Barcode - codierte Lochschiene - induktiver linear Encoder	inkrementelles Wegmesssystem: - rotatorische Sensoren - translatorische Sensoren Positionsmarken: - Magnet + Hall Sensor	Sonstige: - Positionsschalter und Schaltlineale - LiDAR Sensor (VL53L1X) - Lichtschranke (Laser)
Datenübertragung	kontaktlos (kontinuierlich oder punktuell): - Induktion (Leckwellenleiter) - Funk (WLAN) - Infrarot	kontaktbehaftet: - Schleifleitung	
Verzweigung	Verschiebeweiche: - 2-Wege-Weiche - 3-Wege-Weiche - Parallelweiche	Rotationsaktuatorik: - Drehkreuz - Drehscheibe	Schaltaktuatorik am EHB-Fahrzeug: - passive Verzweigung

Tabelle 3.1: Morphologischer Kasten

3.3 Auswahl der Teilsysteme aus dem Morphologischen Kasten und Begründung

Value Benefit Analysis

Um die Ausprägungsarten zu vergleichen werden für jedes Teilsystem Kriterien wie Kosten, Bauraum, Montierbarkeit und individuelle Kriterien herangezogen um die Vor- und Nachteile bzw. die Kosten und Nutzen von jedem Teilsystem zu analysieren. Die einzelnen Kriterien werden hierbei gewichtet (in Prozent). Jede Ausprägungsart erhält pro Kriterium entweder ein Plus (zwei Punkte), einen Kreis (einen Punkt) oder ein Minus (null Punkte). Über die Gewichtung der Kriterien kann so eine Gesamtpunktzahl berechnet werden. Die maximal erreichbare Punktzahl sind zwei Punkte, das Minimum sind null Punkte. Die Gesamtpunktzahl bestimmt welches Teilsystem am besten geeignet ist. Im Anschluss erfolgt eine Synthese des Gesamtkonzepts.

Bauform

	Kosten (40%)	Bauraum (10%)	Anzahl Bauteile (25%)	Montierbarkeit (25%)	Gesamtpunktzahl
Obenläufer	o	-	o	+	1,15
Außenläufer	o	+	-	+	1,1
Innenläufer	o	+	o	-	0,85
Laufrollenführung	+	o	+	+	1,9
Profilschienenführung (Linearkugellager)	-	o	+	o	0,85

Tabelle 3.2: Value Benefit Analyse: Bauform

Oben-, Außen- und Innenläufer sind die etablierten Systeme bei Elektrohängebahnen. Sie sind sicher und erprobt. Sie weisen jedoch einige Nachteile auf. So haben sie standardmäßig neben den Laufrollen zur Aufnahme der Traglast zusätzliche Seitenführungsrollen zur lateralen Führung. Somit besitzen sie relativ viele Bauteile, was in der Produktion der EHB-Fahrzeuge aufwändig und teuer ist. Das macht sich im Kostenpunkt bemerkbar. Außerdem reduzieren viele bewegte Bauteile den Wirkungsgrad des Gesamtsystems. Ähnliche Probleme hat man bei Außen- und Obenläufern, wobei bei Obenläufern zusätzlich

die Bauhöhe ein Problem darstellt.

Profilschienenführungen sind für Kurvenfahrten ungeeignet, da sie viele Kontaktpunkte mit der Schiene haben. Eine Laufrollenführung weist deutlich weniger Bauteile auf. Für Kurvenfahrten existieren bereits Lösungen mit zwei Gelenken. Diese sind jedoch auf den 2D-Fall beschränkt (siehe: Abb. 3.3).



Abbildung 3.3: Laufrollenführung mit zwei Gelenken: Curviline, Quelle: ROLLON Corp. (2024), Seite 1

Energieversorgung und Motor

Die Verwendung eines stationären Motors und eines mechanischen Antriebs über eine Kardankette, einen Reibriemen, einen Keilriemen, eine Kugelumlaufspindel oder eine Schleppkette macht dann Sinn, wenn es feste und gerade Strecken mit vielen Fahrzeugen und wenig Kreuzungen gibt. Das passt nicht zum modularen und flexiblen Konzept von Supertrack, weshalb sie nicht in der VBA 3.3 und der VBA 3.4 aufgeführt werden.

Da der Einsatz der EHB im Indoorbereich erfolgt, sind Abgase zu vermeiden. Außerdem soll der Betrieb möglichst geräuschlos sein. Verbrennungsmotoren und mechanische Antriebe sind somit ungeeignet. Die mechanische Energieversorgung mit Kardankette oder Reib-

3 Methodik

	Kosten (20%)	Bauraum (10%)	Anzahl Bauteile (5%)	Wirkungsgrad (10%)	Gewicht Fahrzeug (10%)	Lautstärke (15%)	Verschleiß (15%)	Montierbarkeit (15%)	Gesamtpunktzahl
Elektromotor und Induktionsleitung	o	+	-	o	+	+	+	-	1,2
Elektromotor und Schleifleitung	o	o	-	+	+	o	-	-	1,25
Elektromotor und Akku	+	o	+	o	-	+	o	+	1,45
Elektromotor und Tank mit Galvanischer Zelle	o	o	o	-	-	+	o	+	1,1

Tabelle 3.3: Value Benefit Analyse: Energieversorgung und Motor

riemen ist typisch für Power and Free Förderer, weist aber einen geringen Wirkungsgrad und viel Abrieb auf. Die chemische Energieversorgung mittels Tank bietet sich besonders für mobile Outdoor Anwendungen an und ist für ein EHB-System aufgrund des geringen Wirkungsgrades ungeeignet. Somit fällt die Wahl auf einen Elektromotor. Andere Motoren wie Stirling- oder pneumatische Motoren sind aufgrund der Anforderung an ein EHB-System (z.B. Haltemoment im Stillstand) und ihren besonderen Energieversorgungen und der damit verbundenen Infrastruktur ungeeignet.

Doch auch bei Elektromotoren gibt es Unterschiede. Besonders, die Leistung, Drehmoment und Drehzahl sind wichtig bei der Auswahl. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Positionsgenauigkeit. So kann zwischen Gleichstrommotoren (Brushed DC- und BLDC-Motoren), Wechselstrommotoren (Synchron- und Asynchronmotoren) und speziellen Motoren wie Servo- und Schrittmotoren gewählt werden. In Kombination mit dem Positioniersystem wird die Auswahl eines Schrittmotors in Kapitel 3.3 “Antrieb und Positioniersystem” begründet.

Mit der Wahl des Elektromotors ergibt sich zwangsweise die elektrische Energieversorgung. Die Energieversorgung per Induktion erfordert eine sehr komplexe Montage (hohe Genauigkeiten im Abstand zwischen Leiter und Induktionsspule) und ist darüber hinaus sehr teuer. Deshalb soll im Prototyp die Energieversorgung per Akku erfolgen. Später ist eine induktive Energieübertragung aufgrund ihrer Vorteile durchaus denkbar. So verschleißt sie im Gegensatz zum Akku nicht. Auch die Anzahl der nötigen Fahrzeuge kann reduziert werden, da die Ladezeiten entfallen. Die Energieversorgung mittels Schleifleiter ist zwar effizienter als die per Induktion, da es hier aber zu Abrieb kommt ist der Einsatz in Reindräumen ungeeignet. Auch müssen die Stromabnehmer regelmäßig gewechselt werden, was zusätzliche Kosten verursacht.

Im nächsten Schritt wird die Orientierung des Motors gewählt. Die Motorachse kann horizontal oder vertikal angeordnet werden. Bei einer horizontalen Ausrichtung entsteht das Problem, dass durch das Eigengewicht des Motors ein Drehmoment um die x-Achse ausgeübt wird. Da der Motor das schwerste Bauteil ist und nicht einmal durch das Gewicht des Akkus kompensiert werden kann, wird die Motorachse vertikal angeordnet.

Antrieb und Positioniersystem

	Kosten (30%)	Bauraum (10%)	Anzahl Bauteile (15%)	Montageaufwand (15%)	Positionsgenauigkeit (30%)	Gesamtpunktzahl
Reibrollen und Positionsschalter mit Schaltlinealen	+	-	-	-	-	0,7
Reibrollen und absolutes Wegmesssystem	+	+	-	-	+	1,5
Zahnstange und inkrementelles Wegmesssystem	+	+	+	+	o	1,75
Linearmotor	-	+	-	+	+	1

Tabelle 3.4: Value Benefit Analyse: Antrieb und Positioniersystem

Positionsschalter und Schaltlineale fallen aufgrund ihrer mangelnden Flexibilität in der Positionsbestimmung aus. Soll eine bestimmte Position auf der Schiene angesteuert werden, muss ein Positionsschalter montiert werden.

Linearmotoren weisen sehr viele Vorteile auf, benötigen zum Betrieb jedoch eine Magnetbahn auf der sie schweben können, was die Anschaffungs- und Montagekosten extrem erhöht.

Um den Montageaufwand und die Kosten möglichst gering zu halten, fällt die Wahl auf ein Inkrementelles Wegmesssystem. Die Verwendung eines Schrittmotors, der sowohl Antrieb (Aktor) als auch Inkrementalgeber (Sensor) ist macht in Kombination mit einer Zahnschiene Sinn. Der Antrieb mit Reibrollen würde zu einem zu großen Schlupf führen. Über die Anzahl der Umdrehungen des Zahnrades kann unter Kenntnis des Teilkreisdurchmessers die zurückgelegte Distanz berechnet werden. Dies entspricht dem Funktionsprinzip eines Odometers. Die Wahl fällt auf ein Stirnzahnrad. Ein Schnecken Zahnrad fällt aufgrund seiner geringen Übersetzungsgeschwindigkeiten aus.

Überschreitet das Lastmoment jedoch das Motormoment kann es zum sogenannten Schrittlverlust kommen. Der Schrittmotor springt also in die vorherige oder nächste Position glei-

cher Phase zurück. Es ist also nicht nur die Auswahl des richtigen Motors von Bedeutung sondern auch die Wahl eines dazu passenden Controllers. Aufgrund dieser Ungenauigkeit muss eine Lagepeilung zur exakten Lageerfassung erfolgen. Ein ähnliches System kommt bei 3D Druckern zum Einsatz.

Datenübertragung

	Kosten (40%)	Bauraum (10%)	Anzahl Bauteile (25%)	Montierbarkeit (25%)	Gesamtpunktzahl	Anmerkungen
Schleifleitung	-	-	-	-	0	
Induktion	o	o	-	-	0,5	Übertragungsreichweite auf 0,5m begrenzt
Funk	+	+	+	+	2	
Infrarot	o	+	o	+	1,35	direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger nötig

Tabelle 3.5: Value Benefit Analyse: Datenübertragung

Eine Schleifleitung bietet im Vergleich zu den anderen Systemen nur Nachteile und fällt aus den selben Gründen wie bei der Energieübertragung weg. Die Datenübertragung durch Induktion ist eine veraltete Technik. Sie ist kostenintensiv und mit viel Montageaufwand verbunden. Die Infrarot Technik ist ebenfalls veraltet und benötigt eine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger. Standard für die Kommunikation von FTF Systemen ist die Datenübertragung mittels Funk. Da eine Schnittstelle zwischen EHB-Systemen und FTF gemäß der VDA 5050 bestehen soll, liegt die Verwendung von einem Funksystem zur Datenübertragung nahe. Im Prototypen fällt die Wahl auf die Übertragung mittels Breitbandfunk (WLAN). Die Vorteile von Mobilfunk, wie größere Reichweiten und die bessere Durchdringung von Wänden, sind beachtenswert und sollten vor der Serienproduktion des EHB-Fahrzeugs genauer untersucht werden.

Auswertung der VBA

Das Vorgängerkonzept erhält laut der VBA eine Punktzahl für die Teilsysteme von: 0,85 Punkten für die Bauform (Innenläufer); 1,45 Punkten für die Energieversorgung und den Motor (Elektromotor mit Akku); 1,75 Punkte für Antrieb und Positioniersystem (Zahnstange + inkrementelles Wegmesssystem) und 2 Punkte für die Datenübertragung (Funk).

Die maximale Punktzahl beträgt zwei Punkte. Das Konzept hat also vor allem mit Blick auf die Bauform Verbesserungsbedarf. Eine Laufrollenführung mit 1,9 Punkten (gemäß Tabelle 3.2) ist für unsere Anwendung deutlich besser geeignet. Die konstruktive Umsetzung wird in Kapitel 4.1 beschrieben. Die Energieversorgung, der Motor und das Positioniersystem werden also unverändert aus dem vorherigen Konzept übernommen.

4 Konstruktion

4.1 Abbildung und Beschreibung der finalen Konstruktion

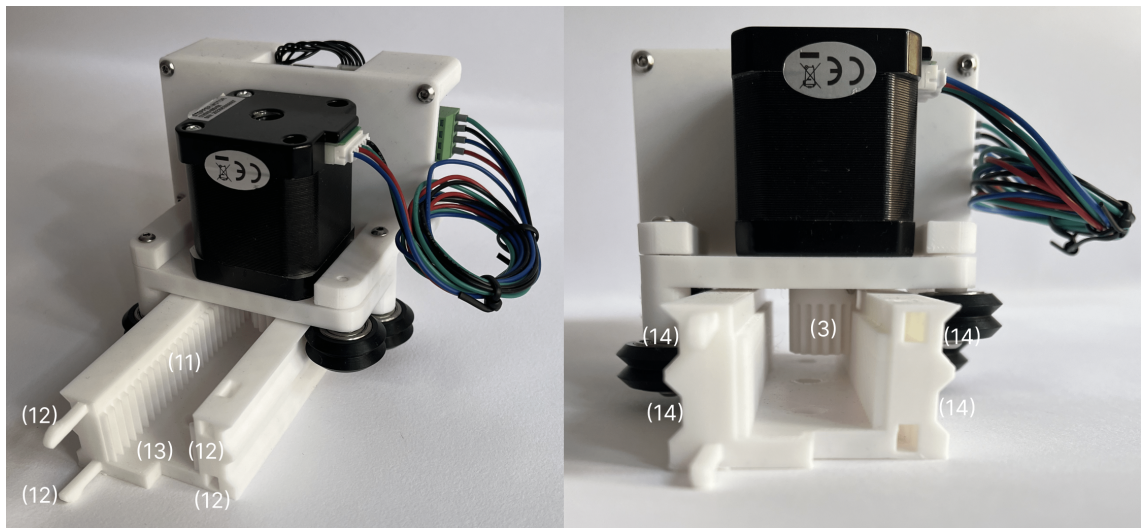


Abbildung 4.1: Finale Konstruktion in der Vorderansicht, Benennung gemäß Tab. 4.1

Um das Konzept und insbesondere die Kurvenfahrt zu verstehen ist es notwendig den Aufbau des Trolleys zu betrachten. Der Tragkörper des Fahrzeugs ist starr und besitzt keine Gelenke. Die Einführung eines Relativsystems für das EHB-Fahrzeug ist an dieser Stelle sinnvoll (siehe: rotes Koordinatensystem in Abbildung 4.5). Die Orientierung des Relativsystems ist analog zum Koordinatensystem der Schiene (siehe: blaues Koordinatensystem in Abbildung 4.5). Da es sich um einen Starrkörper handelt, kann die Anordnung der Laufrollen durch konstante Vektoren im Relativsystem des Fahrzeugs beschrieben werden (siehe: graue Vektoren v_1 bis v_4 in Abbildung 4.5). Das EHB Fahrzeug besitzt keine Tragrollen im traditionellen Sinn sondern besteht aus 4 Laufrollen. Diese sind mit Polyoxymethylen (POM), einem thermoplastischen Kunststoff beschichtet. Der Aufbau ähnelt

damit einer Laufrollenführung (vgl. Abbildung 2.8). Diese sind ähnlich wie die Seitenführungsrollen einer EHB nach VDI 3643 angeordnet (siehe: Abbildung 2.5). Jedoch sind die vorderen und hinteren Laufrollen nicht auf derselben Laufbahn sondern in z-Richtung versetzt (siehe: Abbildung 4.2). Dieser Versatz ist notwendig, da sich so für jede Rolle eine eigene Laufbahn und damit eine eigene Raumkurve ergibt. Die Vektoren v_1 bis v_4 weisen also eine z-Komponente auf und befinden sich nicht in einer Ebene. Die Laufrollen besitzen ein V-Profil, wodurch eine Lastaufnahme in z-Richtung möglich ist. Sie erfüllen also die Funktion von Tragrollen und von Seitenführungsrollen gleichzeitig. Zu erwähnen sei an dieser Stelle, dass die Laufrollen wie sie in der finalen Konstruktion abgebildet sind (siehe Abb. 4.1 und 4.2 und 4.4), nicht den geplanten Laufrollen mit geschlossenem Profil (siehe Abb. 4.9) entsprechen, da diese noch nicht geliefert wurden.

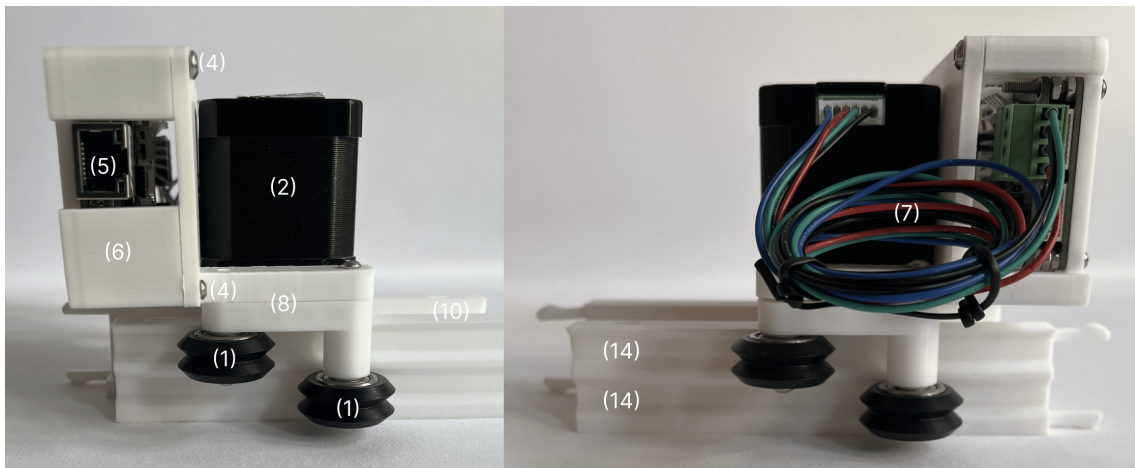


Abbildung 4.2: Finale Konstruktion in der Seitenansicht, Benennung gemäß Tab. 4.1

Ausgehend vom Mittelpunkt des EHB-Fahrzeugs kann man eine beliebige Kurve $s(t)$ durch den Raum legen. Wichtig ist, dass sich die einzelnen Laufbahnen nicht schneiden [dies geschieht bei zu kleinen Kurvenradien $r(s(t))$]. Mithilfe dieser Mittelpunktsbahn können die Bahnkurven der einzelnen Laufrollen berechnet werden. Da der Tragkörper ein Starrkörper ist, sind die Vektoren vom Mittelpunkt des Fahrzeugs zu den einzelnen Laufrollen konstant. Anders wäre dies, wenn das Fahrzeug Gelenke hätte. Die x-Achse des Fahrzeugs ist tangential zur Mittelpunktsbahn $s(t)$ und somit unterscheidet sich bei Horizontalkurven die Orientierung des Absolut- und Relativsystems nur durch eine Rotation um die z-Achse (siehe Abbildung: 4.5).

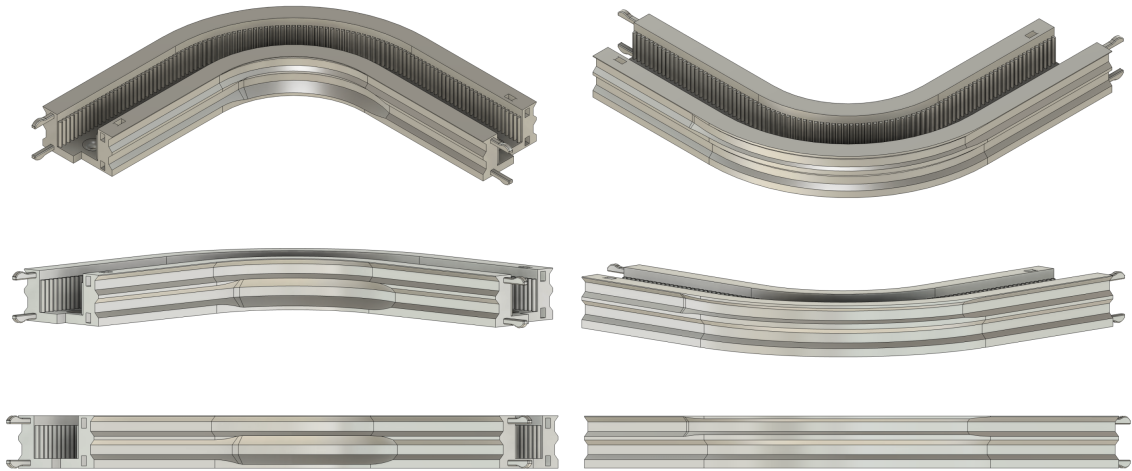


Abbildung 4.3: Seitenansicht der Kurve

Bei Schienengeradstücken ist der Aufbau recht unauffällig (siehe 4.2). Eine Translation des Fahrzeugs und somit der Laufrollen hat also keinen besonderen Einfluss auf die Schienengeometrie. Erst bei der Betrachtung von Kurven wird das Funktionsprinzip deutlich (siehe: Abbildung 4.3). Das Profil der Schiene ist nicht konstant, sondern ändert sich entlang der Längsachse, um die Rotation des Starrkörpers (um die z -Achse) zu erlauben. Es ändert sich die Tiefe der V-Nut für die Laufbahnen. Also wie weit die Laufrolle in die Schienenwand eindringt. Für die beiden vorderen Laufrollen des EHB-Fahrzeugs v_1 und v_4 ist die Rillentiefe konstant. Sie geben die Rotation vor. Die hintere Laufrolle v_2 , dringt in die Schiene ein. Die V-Nut wird tiefer. Das Gegenteil passiert bei der hinteren Laufrolle v_3 . Sie entfernt sich relativ zum Mittelpunkt.

Das Schienenprofil passt sich also dem Fahrzeug an und muss für jede Schienenkurve neu berechnet werden. Auch wichtig zu beachten ist die Zähnezah in der Kurve. Da ein definierter Abstand zwischen den Schienenwänden besteht und beide eine ganzzahlige Zähnezah aufweisen müssen, sind nur bestimmte Kurvenradien realisierbar.

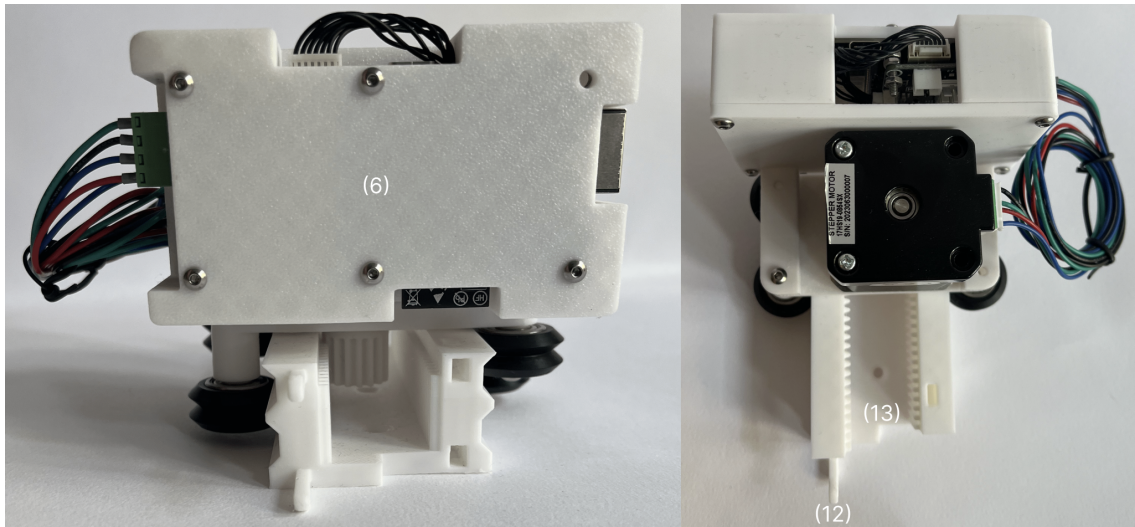


Abbildung 4.4: Finale Konstruktion in der Hinteransicht und Draufsicht, gemäß Tab. 4.1

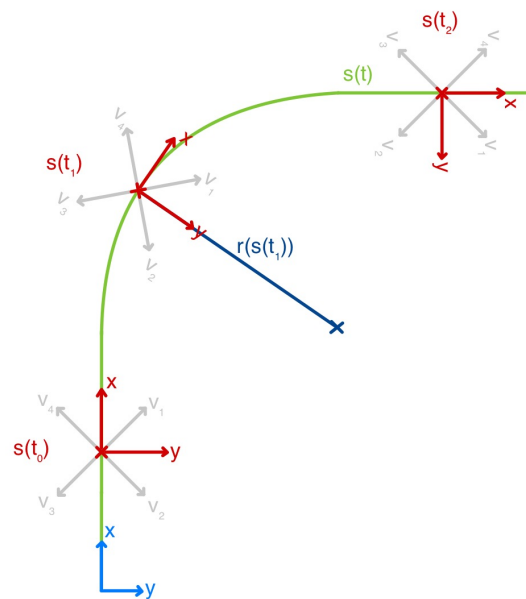


Abbildung 4.5: Mittelpunktsbahn des EHB-Fahrzeugs: Raumkurve $s(t)$ und Orientierung des Relativsystems

Bauteilnummer	Bezeichnung
1	Laufrolle
2	Schrittmotor
3	Zahnrad
4	Schraube
5	Tinkerforge Elektronik (ESP32 Ethernet Brick und Silent Stepper Bricklet 2.0)
6	Gehäuse für Elektronik
7	Kabel Schrittmotor (4 phasig)
8	Tragkörper des Fahrzeugs
9	Profilschiene: Kurve
10	Profilschiene: Schienengeradstück
11	Zahnstange der Profilschiene
12	Stoßverbinder der Profilschiene (Clipverbindung)
13	Stoßverbinder der Profilschiene (Versatz)
14	Laufbahn mit V-Profilierung / V-Nut

Tabelle 4.1: Bezeichnung der Bauteile und Bauteilnummer

Drehkreuz Konstruktion

Eine praktische Umsetzung des Drehkreuzes ist im Rahmen dieser Arbeit noch nicht gelungen. Es besteht aber ein Konzept und ein CAD Modell. Das Modell ist jedoch noch nicht final. Die Neuheit an dieser Konstruktion ist, dass das Drehkreuz quasisstetig ist. Ähnliche Konzepte wie Drehkreuze und Drehscheiben gemäß VDI 3643 (siehe Abbildung: 2.6) sind lediglich entlang des Hauptflusses stetig. Beim Ausschleusen einzelner Fahrzeuge aus dem Hauptfluss mit einem Drehkreuz nach VDI 3643 muss immer eine Schaltung erfolgen. Diesen Nachteil hat man beim Drehkreuz von Supertrack nicht.

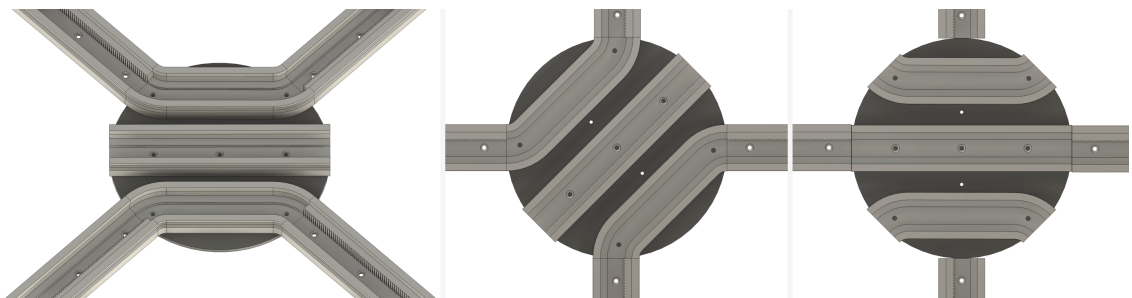


Abbildung 4.6: Drehkreuz in Hauptflusstellung und Nebenflusstellung

4.2 Konstruktionshistorie: Iterationen von Anfang bis Ende

4.2.1 Version 1: Laufrollenführung mit Gelenk

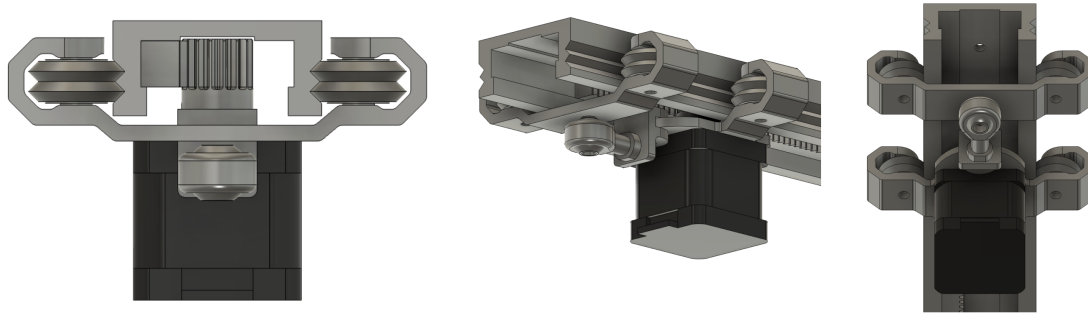


Abbildung 4.7: Version 1.1: Konstruktion mit einem Kugelgelenk

1.1 - Konstruktion mit einem Kugelgelenk: Der Aufbau mit einem Kugelgelenk ähnelt Abbildung 3.3. Ziel war es ein System zu entwickeln, das es schafft Horizontal- und Vertikalkurven zu fahren und eine 90° Steigung zu bewältigen. Dazu wurde ein Kugelgelenk statt einem Kugellager verwendet. Leider traten einige Probleme bei dieser Konstruktion auf. Mit nur einem Kugelgelenk, ist eine vertikale Kurvenfahrt nicht möglich, da der Lagerung der Laufrollen auf der Motor Seite ein Rotationsfreiheitsgrad fehlt und ein Drehmoment um die y-Achse erzeugt wird. Wichtig ist außerdem, dass die Motorachse in einer Ebene mit den beiden hinteren Laufrollenachsen liegt und nicht dazu versetzt ist. Sonst entsteht bei der Horizontalkurvenfahrt ein Drehmoment um die z-Achse.

1.2 - Konstruktion mit zwei Kugelgelenken: Dieser Aufbau schafft die Vertikalkurven, ist aber nicht mehr statisch bestimmt. Da EHB-Fahrwerk und Laufwerk beide einen Rotationsfreiheitsgrad um die y-Achse aufweisen. Dadurch kippelt das System und schleift auf der Schiene. Eine mögliche Lösung wäre es ein Feder Dämpfer System zu integrieren. In der Konstruktion 1.3 wurde das System auf den 2D-Fall beschränkt, um ein einfaches kinematisches Modell zu entwickeln.

1.3 - Konstruktion mit zwei Kugellagern: Der Aufbau ähnelt der Konstruktion Curviline (siehe: Abbildung 3.3) sehr stark. Vertikalkurven und eine Torsion der Schiene sind dadurch nicht möglich. Dieser Prototyp war der erste Meilenstein im 2D-Fall, da er problemlos funktionierte. Im Folgenden wurde sich auf die Ansteuerung des Schrittmotors

konzentriert um das System fahrbar zu machen. Mithilfe eines Elektronikbaukastens namens Tinkerforge kann der Schrittmotor über einen Mikrocontroller angesteuert werden. Der Mikrocontroller ESP32 Ethernet Brick ist das Gehirn des Systems. Über einen USB-C Anschluss erfolgt die Stromversorgung und per WLAN kann auf die Firmware zugegriffen werden. Der Ethernet Brick wird mittels Kabelanschluss an den Silent Stepper Bricklet 2.0 angeschlossen. Dieser erweitert die Fähigkeiten des Ethernet Bricks und erlaubt die Ansteuerung eines Schrittmotors. Ein externes Netzteil, welches eine Ausgangsspannung von 24 V und Gleichstrom von 8 A liefert ist für den Betrieb des Motors notwendig. Die Energieversorgung soll später durch eine Akkuzelle erfolgen.

1.4 - Drehkreuz und Topologie der Schiene mit der Zahnstange auf beiden Seiten: Nachdem der Prototyp in der Lage war gerade Strecken problemlos zu bewältigen, wurde sich im Folgenden auf die Kurvenfahrten und das Drehkreuz konzentriert.

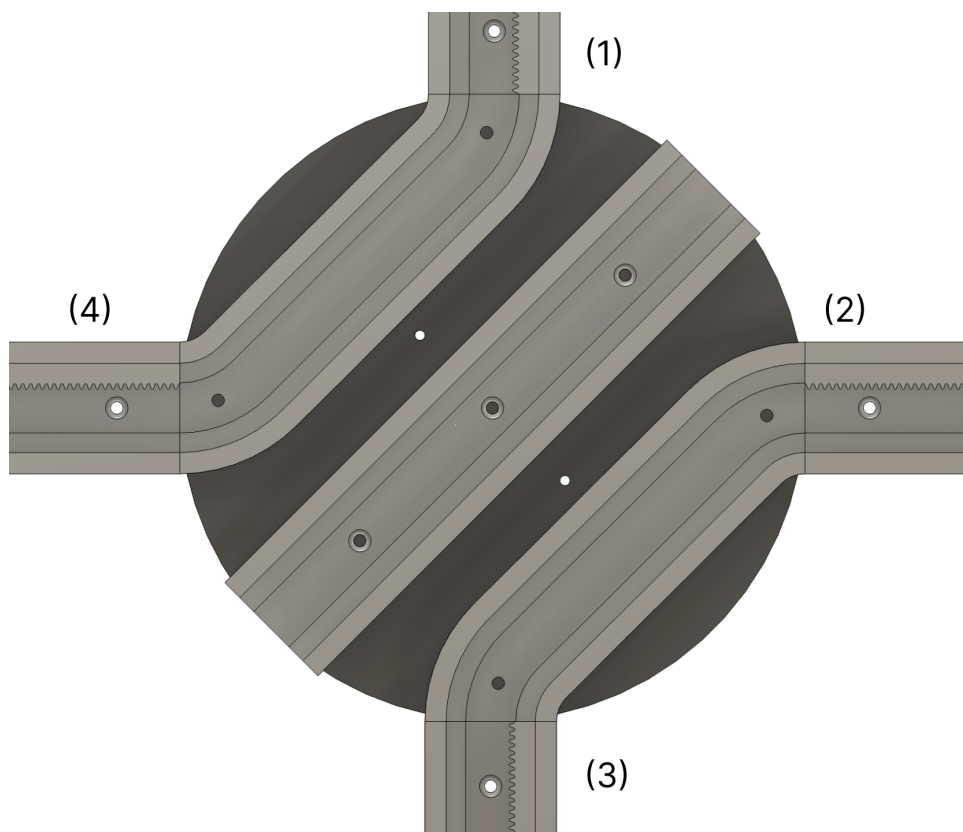


Abbildung 4.8: Drehkreuz mit einseitiger Zahnstange: Probleme in der Topologie der Schiene

Bei der Konstruktion des Drehkreuzes wurde ein großes Problem des bisherigen Systems offensichtlich. Wenn die Zahnstange nur auf einer Seite der Schiene ist, funktioniert das Konzept des quasistetigen Drehkreuzes nicht. Die Fahrt entlang des Hauptstroms von (1) nach (3) oder von (2) nach (4) ist problemlos möglich. Ändert sich die Ausschlussrichtung jedoch, kann es (muss es aber nicht) dazukommen, dass sich die Seite auf der die Zahnstange ist, wechselt. Dies ist problematisch, da das Zahnrad im Zeitpunkt des Wechsels auf beiden Seiten im Eingriff ist und sich somit nicht drehen kann. Ein Wechsel findet statt bei der Fahrt von (1) nach (4) und von (2) nach (3). Bei der Fahrt von (1) nach (2) und von (3) nach (4) findet kein Wechsel statt. Aufgrund dieser Problematik wurde das Konzept angepasst. Die Schiene besitzt nun auf beiden Seiten eine Zahnstange und die Motorachse ist leicht versetzt zur Mittellinie, sodass das Zahnrad immer nur auf einer Seite der Schiene im Eingriff ist.

Erwähnenswert sei an dieser Stelle, dass für Kurven nur bestimmte Kurvenradien und Kurvenwinkel zulässig sind. Das sind solche, die ganzzahlige Zähnezahlen erlauben. Durch das neue Konzept ist auch der Abstand der beiden Zahnstangen, also die Schienenbreite relevant. Da beide Zahnstangen ganzzahlige Zähnezahlen aufweisen müssen.

1.5 - Doppelpassung der V-Nut Laufrollen: In diesem Schritt wurde das Schienenprofil angepasst, um die Doppelpassung zu beseitigen (vgl. Abb. 4.7 mit Abb. 4.9). Die Laufrollen wurden dazu ausgetauscht. Außerdem wurde die Dicke des EHB-Fahrzeug erhöht, da eine statische Belastung zu einer starken elastischen Verformung führt, sodass die Laufrollen von der Schiene abrutschen.

4.2.2 Version 2: Laufrollenführung als Starrkörperkonstruktion

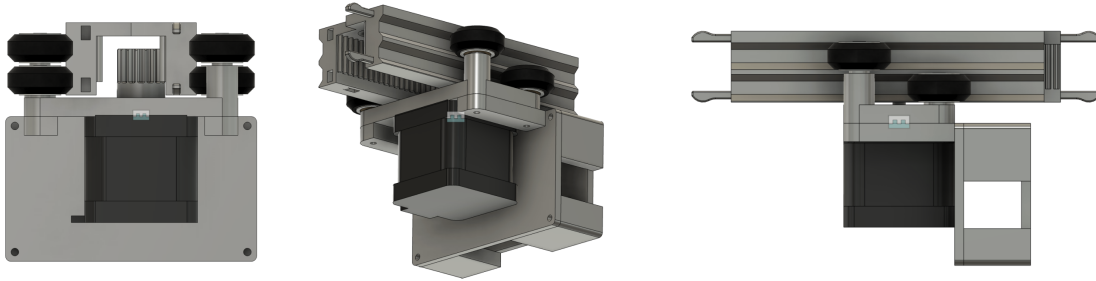


Abbildung 4.9: Version 2: Starrkörperkonstruktion

2.1 - Starrkörperkonstruktion

Die Anordnung der Laufrollen von Version 1 ist gut und hält hohe Traglasten aus. Problematisch an Version 1 ist, dass das Konzept mit zwei Gelenken viele Bauteile hat und die Fahrzeuglänge relativ lang ist. Version 2 ist eine Konstruktion die ohne Gelenke auskommt. Diese wird in Kapitel 4.1 beschrieben.

Das zugrundeliegende physikalische Prinzip ist, dass ein Starrkörper im Raum durch 3 Kontaktpunkte statisch bestimmt ist. Wählt man eine beliebige Raumkurve $s(t)$ entlang der sich der Starrkörper bewegen soll, bietet es sich an diese Raumkurve durch den Mittelpunkt des Starrkörpers zu legen. Durch die Kenntniss der Lage der Kontaktpunkte relativ zum Mittelpunkt können so auch 3 Kontaktbahnen für den Körper berechnet werden. Die Kontaktpunkte entsprechen dem Kontakt zwischen Laufrollen und Schiene. Für gerade Strecken ergeben sich wenig ereignisreiche Geometrien. Erst in der Extrusion von Kurvengeometrien wird das Konzept sichtbar. Die Profilierung der Schiene ändert sich und erlaubt so die Kurvenfahrt. Es passt sich nicht mehr das Fahrzeug der Schiene an, sondern die Schiene dem Fahrzeug.

In unserem Anwendungsfall macht eine Wahl von 4 Kontaktpunkten Sinn, da nur Druckkräfte übertragen werden können. Außerdem sollen Pendelmomente um die y -Achse unterdrückt werden und die erforderliche Schienenhöhe für ein viertes Laufrad ist zwangsweise (durch das dritte Laufrad) gegeben. Durch die Profilierung der Laufrollen können die Kontaktbahnen und damit das Schienenprofil berechnet werden. Wichtig ist, dass sich die Kontaktbahnen nicht schneiden bzw. die V-Nuten überlappen. Dies wird über einen entsprechend hohen Abstand zwischen den Laufrollen entlang der z -Achse und relativ große

Kurvenradien erreicht.

Es ist sogar eine Rotation um die Mittelpunktsbahn möglich. Dies entspricht einer Torsion der Schiene (um die x-Achse) zu einer Helix. Die Kurvenfahrt wird durch eine Krümmung der Mittelpunktsbahn erreicht. Dabei können Horizontal- und Vertikalkurven extrudiert werden (Krümmung um z- bzw. y-Achse). Eine Rotation um die y-Achse bzw. z-Achse ist nicht möglich, da sich so keine kontinuierlichen Kontaktbahnen ergeben würden und das Fahrzeug die Schiene schneiden würde. Bei zu kleinen Kurvenradien verschiebt sich der Kontaktpunkt in der Kurve nach vorne, sodass die Laufrolle an der Schiene anschlagen kann. Es entstehen 2 Kontakte an einer Laufrolle gleichzeitig. In der Praxis haben sich deshalb Kurvenradien die größer als 80mm sind als sinnvoll erwiesen.

2.2 - Schienenstoßverbinder mit Versatz: Im letzten Iterationsschritt wurde eine reibschlüssige Clipverbindung für die Schienen eingeführt, da das Fahrverhalten an den Schienenstößen sehr unruhig war. Die Profilierung des Versatzes hat zum Vorteil, dass immer nur eine Laufrolle über den Versatz fährt.

4.3 Strukturberechnung der Schiene: mechanisches Ersatzmodell (Biegebalken)

Die Berechnung der maximalen Spannung mittels eines Biegebalkens als mechanisches Ersatzmodell ist wichtig für die Dimensionierung der Schiene. Die in dieser Arbeit verwendeten Formeln stammen aus dem Skript für Technische Mechanik II von Prof. Dr.-Ing. Thomas Böhlke (Böhlke 2021).

Ziel ist die Spannungsberechnung entsprechend der Formel:

$$\sigma(x, z) = \frac{M_y(x) \cdot z}{I_y(x)} \quad (4.1)$$

Überschreitet die maximale Spannung die Festigkeit des Materials, kommt es zum Bruch. Im Prototypen wird Polylactide, kurz PLA mit einer Zugfestigkeit von 38 MPa verwendet (3D Activation GmbH). Um die Biegespannung gemäß 4.1 zu berechnen muss erst das axiale Flächenträgheitsmoment der Schiene bestimmt werden. Die geometrische Größe wird berechnet durch:

$$I_y(x) = \int_A z^2 dA \quad (4.2)$$

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit
Zug-/Druckspannung	$\sigma(x, z)$	$[\text{N}/\text{mm}^2] = [\text{MPa}]$
Drehmoment um y-Achse	$M_y(x)$	$[\text{Nmm}]$
Gesamtfläche der Schiene	$A = \sum_i A_i$	$[\text{mm}^2]$
axiales Flächenträgheitsmoment der Gesamtfläche	$I_y(x)$	$[\text{mm}^4]$
Schwerpunkt der Gesamtfläche	$P_S = (y_S z_S)$	$[\text{mm}]$
Teilfläche der Schiene	A_i	$[\text{mm}^2]$
axiales Flächenträgheitsmoment der Teilfläche	$I_{yi}(x)$	$[\text{mm}^4]$
Schwerpunkt der Teilfläche	$P_{Si} = (y_{Si} z_{Si})$	$[\text{mm}]$

Tabelle 4.2: Bezeichnung, Formelzeichen und Einheiten

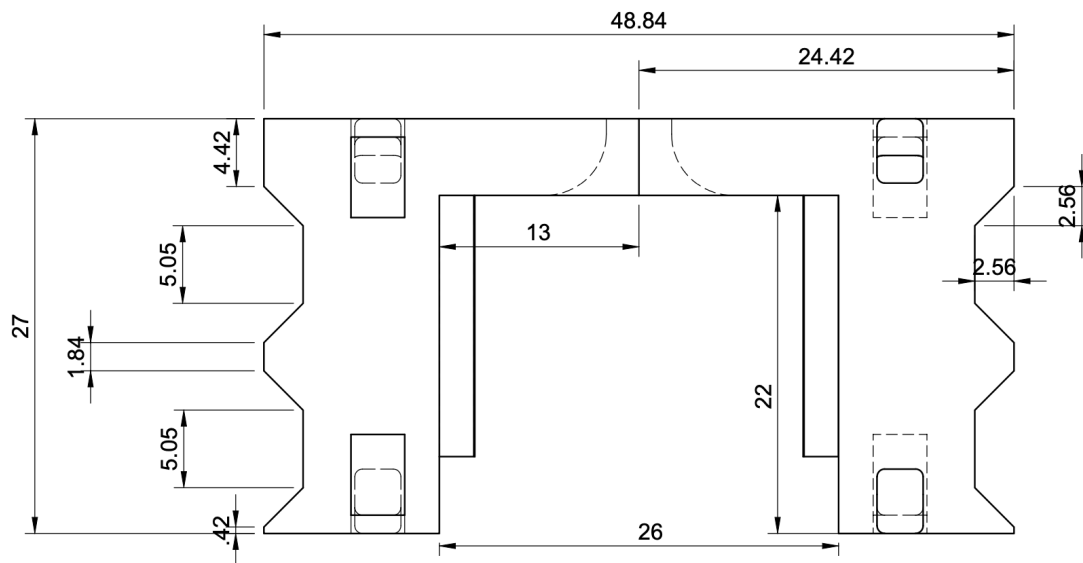


Abbildung 4.10: Technische Zeichnung des Schienenprofils

Das Flächenträgheitsmoment wird grundsätzlich in einem Koordinatensystem im Flächenmittelpunkt des Querschnitts angegeben. Dem sogenannten Hauptachsensystem (blaues KOS in Abbildung 4.11). Die Hauptträgheitsachsen sind Symmetrieachsen des Profils.

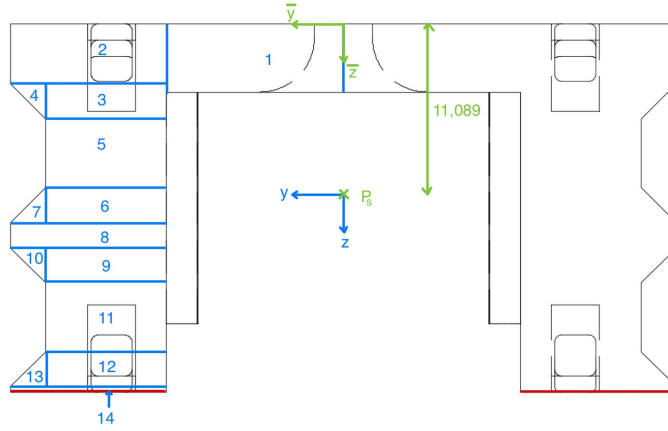


Abbildung 4.11: Aufteilung des Schienenprofils in Teilflächen A_i

Der erste Schritt ist die Berechnung des Schwerpunkts $P_S = (y_S | z_S)$ der Gesamtfläche, um den Ursprung des Hauptachsenssystems festzustellen. Hierzu wird ein Hilfskoordinatensystem (grünes KOS in Abbildung 4.11) verwendet. Da das Profil symmetrisch ist, muss $y_S = 0$ sein. Für die Berechnung der z_S -Koordinate erfolgt die Bestimmung der Flächeninhalte der Teilflächen. Hierfür ist die Bestimmung der z -Koordinate von den Schwerpunkten der Teilflächen z_{Si} durchzuführen. Über folgende Gewichtung kann der Schwerpunkt der Gesamtfläche im grünen KOS bestimmt werden: $z_S = \frac{\sum_i z_{Si} \cdot A_i}{\sum A_i}$

Damit ergeben sich die Koordinaten des Schwerpunktes der Gesamtfläche zu $P_S = (0 | 11,089)$ (angegeben im grünen KOS). Da die Schiene aus mehreren Teilflächen besteht, wird zur Berechnung der Satz von Steiner für n Teilflächen verwendet.

$$I_y = \sum_i (I_{yi} + z_{Si}^2 \cdot A_i) \quad (4.3)$$

Nun werden die Flächenträgheitsmomente der Teilflächen A_i bestimmt. Für Rechtecke: $I_{yi} = \frac{B \cdot H^3}{12}$, für gleichschenklige Dreiecke $I_{yi} = \frac{B \cdot H^3}{36}$

Bestimmt man nun alle Schwerpunkte der Teilflächen $P_{Si} = (y_{Si} | z_{Si})$, kann das Flächenträgheitsmoment der Gesamtfläche durch Gleichung 4.3 berechnet werden.

Da sich das Profil von Schienengeradstücken entlang der x -Achse nicht ändert ist dieses konstant und ergibt sich zu:

$$I_y(x) = I_y = 45470 \text{ [mm}^4\text{]} \quad (4.4)$$

Das Moment $M_y(x)$ ist das Biegemoment um die y-Achse am Punkt x. Da die Schiene per Schraubverbindung angebracht wird, kann das Moment entsprechend einem Biegebalken mit Fest-Fest-Lagerung modelliert werden. Die Balkenlänge $l = 47 \text{ [mm]}$ entspricht dem Abstand der Schraubenbohrungen. Die Last am Balken $F \text{ [N]}$ berechnet sich aus der Traglast $m_T = 1 \text{ [kg]}$, dem Eigengewicht des Fahrzeugs $m_F = 0,5 \text{ [kg]}$ und einem Sicherheitsfaktor $S = 2[-]$. Damit ergibt sich die Gesamtlast zu: $F = (m_T + m_F) \cdot S \cdot g = 1,5 \text{ [kg]} \cdot 2 \cdot 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]} = 29,43 \text{ [N]}$. Das Moment ist maximal für $M_y(x = l/2 = 23,5) = -F \cdot l/2 = -29,43 \text{ [N]} \cdot 23,5 \text{ [mm]} = -691,605 \text{ Nmm}$

Gemäß 4.1 kommt es zu einer maximalen Spannung beim maximalen z-Wert (rot). Dieser beträgt 16 [mm] . Somit ist die Spannung maximal für:

$$\sigma(x = 23,5, z = 16) = \frac{-692 \text{ [Nmm]} \cdot 16 \text{ [mm]}}{45470 \text{ [mm}^4\text{]}} = -0,244 \text{ [MPa]} \quad (4.5)$$

Das negative Vorzeichen, gibt an, dass es sich um eine Druckspannung handelt. Die maximale Druckspannung gemäß Gleichung 4.5 in Höhe von $0,244 \text{ [MPa]}$ ist somit deutlich unter der Zugfestigkeit von PLA in Höhe von 38 [MPa] . Die Schiene sollte also auch bei starker Überbeanspruchung nicht brechen.

4.4 3D-Druck

Verwendet wurde der 3D-Drucker A1 von Bambu Lab. Als Filament wurde PLA eingesetzt.

Da das Schienensystem in der Lebensmittelindustrie zum Einsatz kommen soll, ist die Verwendung von lebensmittelechten Filamenten im finalen Produkt vorgesehen. Die Anforderungen an eingesetzte Materialien in der Lebensmittelindustrie sind hoch - sie müssen ungiftig sein und dürfen weder Geruch noch Geschmack von Lebensmitteln verändern.

Die Nutzung eines 3D-Druckers hat sich im Prototypenbau als sehr hilfreich erwiesen, da theoretische Konzepte innerhalb weniger Stunden praktisch ausprobiert werden konnten. Nun existiert ein funktionsfähiges kinematisches Modell. Zum Testen des Systems ist das 3D-Druck Verfahren noch geeignet. Bei größeren Stückzahlen müssen andere Fertigungsverfahren verwendet werden so könnten die Bauteile z.B. spritzgegossen werden.

5 Bewertung der Ergebnisse/Diskussion

Das in dieser Arbeit als final vorgestellte System ist lediglich im Rahmen dieser Arbeit beendet, bedarf aber noch weiterer Iterationen in Zukunft. Insbesondere die Entwicklung von Vertikalkurven und des Drehkreuzes stellt noch eine Herausforderung dar. Sollte sich das Fertigungsverfahren ändern, bedarf es weiterer Anpassungen des Systems.

Im Vergleich zur Vorgängerversion ist es jedoch wesentlich kompakter. Der benötigte Bau- raum ist drastisch gesunken. Indem das Konzept geändert wurde, hat sich vor allem der Ma- terialverbrauch für die Schiene reduziert. Die Steifigkeit der Schiene wurde erhöht und sie ist deutlich belastbarer gegen Biegung und Torsion. Auch wurde der Montageaufwand für das EHB-Fahrzeug reduziert, da keine Gelenke mehr benötigt werden. Der Tragkörper des Fahrzeugs kann 3D-gedruckt werden und ist somit kostengünstiger. Die lastkritische Tra- verse (rotes Bauteil in Abbildung 3.1) ist auch nicht mehr vorhanden, das EHB-Fahrzeug ist somit auch wesentlich stabiler. Die neue Konstruktion hat darüber hinaus mehr Anwen- dungsmöglichkeiten, weil das System als Ganzes mehr kann. So war der Vorgänger nur als Elektrotragbahn in der Ebene einsetzbar. Das neue Konzept kann eine dreidimensionale Förderrichtung abbilden. Dabei kann die Schiene theoretisch tordiert und invertiert werden - es können also zum Beispiel Loopings mit Drehung gefahren werden.

Ein möglicher Kritikpunkt des EHB-Systems ist die Anordnung der Laufrollen. Bei ei- ner zu hohen Belastung kommt es zu einer elastischen Verformung der Schiene und das Fahrzeug kann von der Schiene rutschen. Dies ist kritisch für die Sicherheit des Gesamtsy- stems. Der Kraftfluss könnte optimiert werden, wenn der Neigungswinkel der Laufradachse angepasst wird. Eine x-Anordnung gemäß Abbildung 5.1 wäre denkbar. Dies würde die Si- cherheit erhöhen, hätte aber auch Nachteile. So wäre bei einer Belastung in z-Richtung ein Laufradpaar weiger an der Lastaufnahme beteiligt. Praktische Tests sind nötig um die Funktionalität des Konzeptes auswerten zu können.

Bei der Fertigung aus PLA ist neben dem Abrieb insbesondere die Reinigung der EHB- Anlage durch aggressive Medien ein Problem. So bietet die Zahnstange viel Oberfläche, an

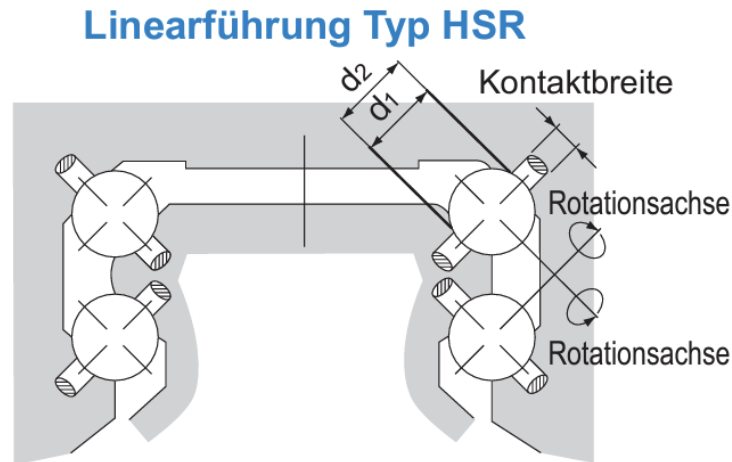


Abbildung 5.1: Kontaktstruktur der Laufrollen als x-Anordnung , Quelle: Nadella GmbH
(), Seite 553

der sich Verschmutzungen ablagern können.

Der Abstand zwischen der Tragkörpergrundfläche des EHB-Fahrzeugs und der Schiene muss erhöht werden um Vertikalkurven zu ermöglichen. Bei der aktuellen Konstruktion ist der Abstand sehr gering und das Fahrzeug würde bei einer Vertikalkurve mit relativ kleinen Kurvenradius auf der Schiene schleifen oder sogar das Schienenprofil schneiden. Hierfür müssen lediglich die Laufrollen in einem größeren Abstand zur Grundfläche angeordnet werden.

Wenn man an mögliche Fertigungsverfahren in der Zukunft denkt, ist die Wahl des Materials die erste Frage, die geklärt werden muss. Bleibt man bei Plastik, ist die Herstellung mittels 3D Druck bei größeren Stückzahlen nicht mehr Kosten und Zeit effizient. Das Spritzgießverfahren bietet sich insbesondere für Kurven an. Hierfür muss jedoch eine teure Kokille gefertigt werden, welches erst ab Stückzahlen über 100.000 Stück wirtschaftlich ist. Strangpressen würde sich für die Schienengeradstücke eignen, die Zahnstange müsste dann jedoch separat gefertigt und eingeklebt werden oder durch ein alternatives Antriebs- und Positioniersystem ersetzt werden. Sollte die Wahl auf ein Metall bzw. eine Legierung fallen (z.B. Stahl/Edelstahl), so würden sich die Festigkeit und Steifigkeit deutlich erhöhen und die Durchbiegung sinken. Dies erlaubt bei gleichbleibender Geometrie den Transport

von schwereren Lasten. Gleichzeitig steigen die Kosten. Insbesondere die Fertigung der Zahnstange aus Metall dürfte sehr teuer werden.

Auch die Energieversorgung könnte sich in Zukunft noch ändern. Eine Induktionsleitung würde die Anzahl der nötigen Fahrzeuge reduzieren, da Ladezeiten wegfallen. Ein weiteres Problem von Akkus ist, dass sie verschleisen und nach einiger Zeit getauscht werden müssen. Diese Probleme hätte man bei einer Induktionsleitung nicht.

Eine höhere Positionsgenauigkeit liefert ein Absolutes Wegmesssystem. In Kombination mit Reibrollen würde der Fertigungsaufwand für die Schiene sinken, da die Zahnstange wegfiel. Gleichzeitig steigt der Montageaufwand, da ein Codestreifen oder ähnliches entlang der Schiene angebracht werden müsste.

Nichtsdestotrotz ist das gelenkfreie System eine gute Lösung in Bezug auf die Anzahl an Bauteilen, Wartung und Kosten. Im Vergleich zur Vorgängerversion wurde das System verbessert und es haben sich neue Anwendungsmöglichkeiten ergeben. Die Konstruktion wurde für den Prototypenbau ausgelegt und ist für eine Serienproduktion noch nicht ausgereift.

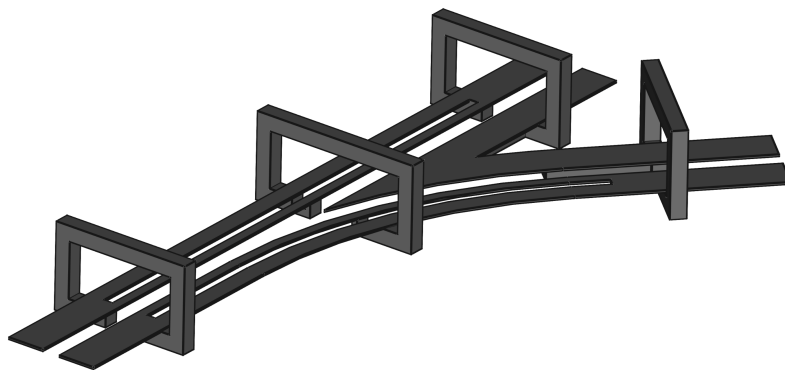


Abbildung 5.2: Peripheral-Free Electrified Monorail System (PEMS), Quelle: Sperling, Kurschilgen und Schumacher (2024), Seite 7

Zuletzt erfolgt der Vergleich mit einer Peripherie freien Lösung. Parallel zur Entwicklung von Supertrack fand die Veröffentlichung von einem neuartigen EHB System, dem Peripheral-Free Electrified Monorail System (PEMS) statt. Dieses wurde am IFL entwickelt. Das Besondere an dieser Lösung ist, dass die Aktuatorik am Fahrzeug angebracht ist und nicht durch Verschiebeweichen oder Drehkreuze erfolgt. In Abbildung 5.2 ist das

im Verzweigungsbereich geschlitzte Schienenprofil zu erkennen, in das die Aktuatorik des PEMS eingreifen kann. Diese Lösung macht insbesondere dann Sinn, wenn es mehr Verzweigungen als Fahrzeuge gibt, da so ein Minimum an Aktuatorik und somit ein Minimum an Kosten erzielt werden kann. Gibt es umgekehrt jedoch mehr Fahrzeuge als Verzweigungen, bietet sich eine aktive Verzweigung durch Verschiebeweichen oder Drehscheiben an. Ein Vorteil des PEMS ist, dass bei einem Defekt lediglich das kaputte Fahrzeug entnommen werden muss. Ein Nachteil ist, dass sich das Eigengewicht des Fahrzeugs durch die zusätzliche Aktuatorik erhöht.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die konstruktive Neugestaltung eines Elektrohängebahnsystems für kleine Traglasten zum Einsatz in der Lebensmittelindustrie. Durch eine geeignete Methodik mittels morphologischem Kasten haben sich Stück für Stück die Designparameter herauskristallisiert, welche die Anforderungsliste erfüllen. Nach mehreren Iterationen des Funktionsprinzips von EHB-Fahrzeug und Schiene ist es gelungen, ein gelenkfreies Fahrzeug zu entwerfen. Dass ein Starrkörper eine Kurve fahren kann ist dabei das Neue in der Neugestaltung des EHB-Systems. Bisher war eine gelenkfreie Fahrt nicht möglich und nur durch die große Designflexibilität mittels 3D-Druck in dieser kurzen Zeit realisierbar. Neu ist auch die große Flexibilität mittels modularen, steckbaren Schienen und quasistetigem Drehkreuz. So kann das Schienensystem einfach auf- und umgebaut werden.

6.2 Ausblick

Spannende Herausforderungen der Zukunft sind die Weiterentwicklung des bisherigen Systems, insbesondere: modulare Lastaufnahme und -abnahme Möglichkeiten mit einer Aktuatorik, vertikale Kurvenfahrten und die Konstruktion einer tordierten Schiene, sowie die Positionierung des Fahrzeugs mittels Hall-Sensor und Dynamagnet. Die konstruktive Ausgestaltung des Drehkreuzprinzips wird eine weitere spannende Herausforderung der Zukunft sein. Da die Energieversorgung aktuell noch per Netzteil erfolgt, muss als nächster Schritt eine passende Akkuzelle für das System ausgewählt werden.

Bezüglich der Positionierung besteht bereits ein spannendes Konzept. So soll jede Schiene mit einem RFID Tag ausgestattet werden. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass der digitale Zwilling des Schienen-Systems beim Auf- oder Umbau sehr einfach virtuell abgebildet werden kann. Das EHB-Fahrzeug fährt einmalig die Strecke ab und weiß so genau wo sich jede

Schiene befindet. Eine manuelle Abbildung des Schienensystems und seiner Verzweigungen ist dadurch nicht mehr nötig. Um genaue aber dennoch flexible Stopp Positionen auf der Schiene zu ermöglichen, sollen kleine Magnete genutzt werden. Diese könnten farblich markiert auf einen Plastik Clip montiert werden, welcher in die Schiene gesteckt wird. Die Schiene sollte hierfür entlang der Mittelachse eine entsprechende Rille aufweisen, sodass die Magnete auf jeder Längs-Position entlang der Schiene positioniert werden können. Ein Hall Sensor, welcher am EHB-Fahrzeug angebracht wird, kann nun zur genauen Positionsbestimmung der Magnete und damit zum genauen Anhalten an den Stopps genutzt werden.

Mit Blick auf das Dark Kitchen System gibt es noch einige Herausforderungen zu meistern. Parallel zum Schienensystem findet die Entwicklung von Kocheinheit, Wiegeinheit und von einem Dosiersystem für wässrige und viskose Flüssigkeiten statt. Bis das Gesamtsystem ausgereift ist werden noch einige Monate verstreichen, aber mit dem Elektrohängebahnsystem Supertrack wurde der erste Grundstein gelegt. Natürlich bedarf dieses noch weiterer Iterationen bis zur vollständigen Reife aber die kostengünstige und modulare Lösung ist bereits jetzt sehr vielversprechend, auch außerhalb der Lebensmittelindustrie.

6.3 Conclusion

The aim of this work was to redesign an electrified monorail system (EHB) for small loads in the food industry. As there are currently few EHB systems for small loads, this was largely unexplored territory. Using a morphological box methodology, the design parameters were identified. After several iterations, a jointless vehicle capable of navigating curves was developed. This innovation, along with modular, pluggable tracks, allows for greater flexibility and easier assembly.

Future challenges include further developing the system, particularly modular load handling with actuators, vertical curve navigation, and designing a twisted track. Positioning using RFID tags, Hall sensors, and dynamagnets is also planned. Additionally, a suitable battery cell needs to be selected, with contactless energy transfer via induction being a possible solution.

The EHB vehicle maps the track route once, eliminating the need for manual mapping. Small magnets, color-coded and mounted on clips inserted into the track, will enable precise and flexible stop positions. A Hall sensor on the vehicle will ensure accurate positioning.

While there are still challenges to address, the Supertrack EHB system has laid a promising foundation, with potential applications beyond the food industry.

Literatur

- 3D Activation GmbH. Materialdatenblatt: Polylactide (PLA).
- About Amazon (2019). Roboter in Zahlen: Daten und Fakten zur Robotertechnik bei Amazon.
- AFT Automatisierungs- und Fördertechnik GmbH Co. KG (2019). AFT Branchenlösungen.
- Arnold, D. und K. Furmans (2019). *Materialfluss in Logistiksystemen*. Springer.
- Aylak, B. L. (2015). Dissertation: Konzeptentwicklung ultraleichter Elektrohängebahnsysteme und deren Bewertung für Logistik-Applikationen.
- BMWK Bundesministerium (2019). Was ist Industrie 4.0?
- Böge, A. und W. Böge (2021). *Handbuch Maschinenbau*. Springer.
- Böhlke, T. (2021). *Skript zur Vorlesung Technische Mechanik II - Kontinuumsmechanik im Maschinenbau*. Institut für Technische Mechanik, KIT.
- Concentric Engineering Uptime (2024). AGVs: What Are the Advantages and Disadvantages?
- Deutscher Robotik Verband (2022). Mehr als 1.000.000 Roboter bis 2030 könnten den Personalmangel deutlich reduzieren.
- EFB-Elektronik GmbH (2024). IP Schutzarten nach IEC 60 529 (EN 60 529).
- Fraunhofer IML (2021). Loadrunner: Nur fliegen ist schneller.
- Fraunhofer IML (2024). Autonome und eingebettete Systeme.
- HYPHEN (2024). Streamline your kitchen, elevate your service.
- Johannes Fottner, Stefan Galka, S. H. (2022). *Elemente der innerbetrieblichen Transportsysteme*. Springer.
- LogSystems Fördertechnik und Automatisierungs- GmbH Co. KG (2023). Branchenlösung.
- LOUIS SCHIERHOLZ GMBH (2024). Effizienter Materialfluss: Smarte Lösungen für jede Branche.
- Martin, H. (2021). *Technische Transport- und Lagerlogistik*. Springer.

- McDonalds (2022). 5 Things to Know About McDonald's New Test Restaurant in Texas.
- Nadella GmbH. Eigenschaften der Linearführung.
- Otto, N. (2019). Dark Kitchen – Die Revolutionäre in der Gastronomie.
- PENTANOVA GmbH (2021). Branchen, in denen PENTANOVA tätig ist.
- ROFA INDUSTRIAL AUTOMATION AG (2020). Electrified monorail systems - Flexible on the ceiling.
- ROLLON Corp. (2024). Curviline: Curvilinear rails with radial ball bearing rollers.
- Schaeffler Technologies AG Co. KG. Angetriebene Lineareinheiten: Module mit Laufrollenführung und Zahnriemenantrieb.
- Schaeffler Technologies AG Co. KG. Angetriebene Lineareinheiten: Module mit Profilschienenführung und Kugelgewindetrieb.
- Schaeffler Technologies AG Co. KG. Laufrollenführungen.
- Schaeffler Technologies AG Co. KG. Miniaturführungen.
- Schaeffler Technologies AG Co. KG. Wellenführungen.
- Schaeffler Technologies AG Co. KG (2024). Linearführungen und -systeme für die Lebensmittelindustrie.
- SEH Engineering GmbH (2023). Fördersysteme von SEH.
- Sperling, M., T. Kurschilgen und P. Schumacher (2024). Concept of a Peripheral-Free Electrified Monorail System (PEMS) for Flexible Material Handling in Intralogistics.
- Swisslog Holding AG (2024). Branchenlösungen.
- TECNOTION B.V. Linear motors vs other drive systems.
- Telelift GmbH (2024). UniCar offene Förderbehälter, pendelnd.
- VDI, Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2022). VDI Richtlinie 2710: Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS). VDI Richtlinie 2710, Beuth Verlag, Düsseldorf, Deutschland.
- Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (1998). VDI Richtlinie 3643: Elektrohängebahn Obenläufer, Traglastbereich 500kg Anforderungsprofil an ein kompatibles System. VDI Richtlinie 3643, Beuth Verlag, Düsseldorf, Deutschland.
- Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2000). VDI Richtlinie 4422: Elektropalettenbahn (EPB) und Elektrotragbahn (ETB). VDI Richtlinie 4422, Beuth Verlag, Düsseldorf, Deutschland.
- Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2005). VDI Richtlinie 2510: Fahrerlose Transportsysteme (FTS). VDI Richtlinie 2510, Beuth Verlag, Düsseldorf, Deutschland.
- Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2008). VDI Richtlinie 4443: Kontaktlose Ener-

gieübertragung für mobile Systeme der Stückgutfördertechnik). VDI Richtlinie 4443, Beuth Verlag, Düsseldorf, Deutschland.

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2012). VDI Richtlinie 4441: Elektrohängebahnen - Eigenschaften und Anwendungsgebiete. VDI Richtlinie 4441, Beuth Verlag, Düsseldorf, Deutschland.

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2017). VDI Richtlinie 3619: Sortier- und Verteilsysteme für Stückgut. VDI Richtlinie 3619, Beuth Verlag, Düsseldorf, Deutschland.

Vogel-Heuser, B., T. Bauernhansel und M. ten Hompel (2017). *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4*. Springer.

Wittenstein alpha GmbH (2024). Produkte: Zahnstangen.