

**Konzeptentwicklung ultraleichter Elektrohängebahnsysteme und deren
Bewertung für Logistik-Applikationen**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und
Verfahrenstechnik der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Batin Latif Aylak

aus

Antalya, der Türkei

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Noche

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne

Tag der mündlichen Prüfung: 30.03.2015

Danksagung

Zunächst gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. –Ing. Bernd Noche, der mir als Lehrstuhlleiter des Lehrstuhls für Transportsysteme und -logistik stets alle Möglichkeiten zur freien wissenschaftlichen Arbeit gegeben hat. Er gab mir die Möglichkeit, mich fachlich weiterzubilden, bedeutende Kongresse weltweit für Publikationen wahrzunehmen und meine wissenschaftlichen Ideen zu verfolgen. Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. –Ing. Bernd Künne, der sich bereit erklärt hat, meine Dissertation als Zweitgutachter zu betreuen.

Die persönliche, angenehme und kreative Atmosphäre an seinem Lehrstuhl sind ebenso wichtig gewesen wie die großzügige Bereitstellung der notwendigen Mittel, die für die Grundlagenforschung so wichtig sind. Seine große Erfahrung in der Industrie ist in der Diskussion und Strukturierung von relevanten Forschungsthemen für die künftige Anwendung von ultraleichten Elektrohängebahn immer sehr hilfreich gewesen.

Allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Transportsysteme und -logistik danke ich für die Ratschläge, die kritischen und konstruktiven Diskussionen sowie für ihre Unterstützung.

Abschließend möchte ich meiner Familie danken: Ihr habt mich begleitet und stets als Ventil hergehalten, wenn es mal notwendig war. Euch vielen Dank – für alles.

Duisburg, im März 2015

Batin Latif Aylak

für meine Eltern

und

Geschwister

Kurzdarstellung

In der aktuellen konjunkturellen Situation beabsichtigen viele Logistikunternehmen, ihre Innovationsfähigkeit zu optimieren, um im Wettbewerb bestehen zu können. Diese Haltung geht aus der Erkenntnis hervor, dass Innovation dazu beiträgt, neue Konzepte zu erstellen und zu entwickeln, die wiederum höhere Gewinne generieren können. In dieser Arbeit wird ein innovativer Ansatz für den industriellen Transport leichter Waren untersucht, basierend auf dem Konzept einer Elektrohängebahn einschließlich deren Konstruktionsmerkmale, ihrer Betriebsspezifikation und der hierfür erforderlichen Software. Simulationsergebnisse hinsichtlich mechanischer und logistischer Eigenschaften werden dabei im Detail gezeigt.

Als ultraleichte Elektrohängebahnsysteme werden in dieser Arbeit seilbasierte Systeme mit einzeln angetriebenen Laufkatzen bezeichnet. Deren Laufkatzen fahren automatisch auf dem Seil, angetrieben durch unabhängig eingebaute Energiequellen, wobei sich deren Lauf nach Signalen und Funktionen des Systems richtet.

Fünf verschiedene Konzepte von ultraleichten Elektrohängebahnsystemen werden in dieser Arbeit visualisiert und ihre Komponenten erläutert. Diese Konzepte basieren auf den technischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten.

Mit Hilfe von CAD-Software werden die Konzepte visualisiert. Nach dem Konzeptvergleich wird ein optimales System ausgewählt und ausführlich beschrieben. Im Anschluss werden erforderliche Finite-Elemente-Methode-Analysen für das ausgewählte Konzept ausgeführt. Diese Analysen helfen dabei, die kritische Spannung und die Verschiebungsgrenzen von Konstruktionen unter Kraftbelastung zu berechnen.

Danach wird der Prozess eines ultraleichten Elektrohängebahnsystems unter notwendigen Prämissen analysiert. Die Analyse besteht dabei aus drei Szenarien, welche darauf basieren, dass die Geschwindigkeiten der Laufkatzen bei Einzelproben schrittweise erhöht werden. Hierbei wird der Zusammenhang zwischen der Laufkatzen-Geschwindigkeit und dem Systemdurchsatz ermittelt. Ein Abstrakt-Event-Simulationsmodell eines ultraleichten Elektrohängebahnsystems wird unter Einsatz der DOSIMIS-3-Software simuliert, um die drei Szenarien umzusetzen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die logistische Anwendung des ausgewählten Konzepts zu veranschaulichen. Das ausgewählte Konzept repräsentiert jedoch kein endgültiges Design, das bereits in einer dieser Formen auch in der Praxis in Betrieb wäre. Dieses Konzept ist lediglich

konstruiert, um einen Überblick zu kürzlich eingeführten Ansätzen für zukünftige Forschung zu geben. Die branchenspezifisch angepasste Umsetzung solcher Konzepte könnte zur Realisierung niedrigerer Entwicklungskosten erheblich beitragen, sodass eine schnellere Marktreife möglich würde. Entsprechend des ausgewählten Konzepts werden notwendige Änderungen vorgenommen, damit eine neue Konzeption in der Praxis umgesetzt werden kann.

Abstract

Nowadays, all logistics firms aim to optimize their ability of innovation in order to survive in a competitive market. Innovation contributes to their development through the generation of new concepts, which in turn generate higher profits. This thesis project discusses and demonstrates in detail an innovative approach for the industrial transportation of lightweight goods based on developed overhead conveyor model concepts including their design features, operational specifications and software simulation results regarding both mechanical and logistical properties.

Ultra-light overhead conveyor systems are rope-based systems with individually driven vehicles. The vehicles can move automatically on the rope as this system works through independently built-in energy sources and signals.

Five different conceptual models of ultra-light overhead conveyor systems are represented and their components are explained in this study. These models are created based on the technical characteristics of the individual components. Through the CAD Software, models are visualized. After comparing these models, the best one is then selected and described in detail. Necessary Finite Element Method analyses for the selected model are then executed. These analyses help with the calculation of critical stress and displacement limits of structures under force load.

The process of an ultra-light overhead conveyor system is then analyzed using necessary assumptions. The analysis consists of three scenarios. These scenarios are based on increasing the vehicle speeds with equal increments in each case. The correlation between vehicle speed and system throughput is investigated. A discrete event simulation model of the system is constructed using the DOSIMIS-3-software to translate these three scenarios.

The objective of this work is to illustrate the logistical implementation of the selected model. This model does not represent a final design operating in a real life scenario. This model is solely designed to give an overview of this new approach for future research which would definitely help companies attain lower development costs as well as quicker market maturity. According to the selected model necessary revisions will be made and a new model will eventually be applied in real life scenarios.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Kurzdarstellung.....	iii
Abstract.....	v
Inhaltsverzeichnis	vi
Abbildungsverzeichnis	x
Tabellenverzeichnis	xiv
Abkürzungsverzeichnis	xv
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation	6
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	8
2 Erläuterungen der Materialflusssysteme.....	11
2.1 Materialflusssysteme	11
2.1.1 Objekt Materialflusssysteme.....	11
2.1.1.1 Physische Materialflussebenen	12
2.1.1.2 Funktionen des Materialflusses.....	13
2.1.1.3 Informationssysteme und Steuerungsebenen.....	14
2.1.2 Anpassungsfähige, automatisierte Materialflusssysteme	16
2.1.2.1 Begriffe der Automatisierung	16
2.1.2.2 Ziele der Automatisierung	18
2.1.2.3 Anpassungsfähigkeit	20
2.1.2.4 Der Unterschied zwischen Anpassungsfähigkeit und Automatisierung	21
2.2 Veränderungen der Materialflusssysteme.....	21
2.3 Anforderungen an Materialflusssysteme	22
2.4 Zusammenfassung	23
3 Analyse und Auswertung bestehender Materialflusssysteme	24

3.1	Fördermittel.....	24
3.2	Unstetigförderer	25
3.3	Stetigförderer	27
3.4	Flurgebundene Fördermittel.....	27
3.5	Automatische Flurfördermittel.....	28
3.6	Schleppkreisförderer.....	29
3.7	Flurfreie Fördermittel: Elektrohängebahn	29
3.8	Übersicht der Mängel und Ableitung des Handlungsbedarfes	30
4	Stand der Technik für flexible, flurfreie Materialflusssysteme	31
4.1	Eigenschaften des flurfreien Materialtransports	31
4.2	Stand der Technik von Elektrohängebahn	32
4.2.1	Übersicht.....	32
4.2.2	Sicherheitsanforderungen	38
4.2.3	Einsatzfelder und Applikationen.....	39
5	Konzepte	44
5.1	Erstes Konzept	46
5.1.1	Vor- und Nachteile des ersten Konzeptes.....	52
5.2	Zweites Konzept.....	52
5.2.1	Vor- und Nachteile des zweiten Konzeptes.....	57
5.3	Drittes Konzept	58
5.3.1	Ablauf des Systems	65
5.3.2	Vor- und Nachteile des dritten Konzeptes.....	66
5.4	Viertes Konzept.....	66
5.4.1	Vor- und Nachteile des vierten Konzeptes	74
5.5	Fünftes Konzept	75
5.5.1	Vor- und Nachteile des fünften Konzeptes.....	82
5.6	Vergleich der Konzepte	83
6	Ausführliche Beschreibung des fünften Konzeptes.....	87

6.1	Komplette Laufkatze	88
6.1.1	Laufkatze mit Steuerungskasten und Sensoren.....	88
6.1.2	Motorbetrachtung	89
6.1.3	Betrachtung des Akkus.....	98
6.1.4	Fahrzeit der Laufkatze	100
6.2	Betrachtung der Seile	102
6.2.1	Berechnung	102
6.2.2	Auswahl.....	104
6.2.3	Seilaufhängung.....	105
6.3	Umlenkprofile	108
6.4	Ladestation.....	109
6.5	Steuerungssystem.....	111
6.5.1	Ablaufbeispiel des Steuerungssystems.....	114
6.6	FEM (Finite-Elemente-Methode).....	117
6.7	Anordnungsvariante für das fünfte Konzept.....	121
7	Simulationsmodell: Analyse des Ablaufs im Lager	124
7.1	Einführung	126
7.2	Informationen zum Modell	127
7.2.1	Zielfunktion des Modells.....	127
7.3	Glossar	127
7.4	Simulationsmodell.....	128
7.4.1	Annahmen.....	128
7.4.2	Systemabgrenzung	128
7.4.3	Schematische Darstellung des Modells	128
7.4.4	Methoden der Modell-Validierung.....	129
7.4.5	Design der Modellexperimente.....	130
7.4.6	Parametrisierung der Quelle	132
7.5	Ergebnisse	133

7.5.1	Typisches Verhalten des Modells	133
7.5.2	Tabellierung einer typischen Ergebnisreihe	133
7.5.3	Genauigkeit der Ergebnisse	139
8	Zusammenfassung und Ausblick	140
	Literaturverzeichnis	143

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Potenziale im Unternehmen.....	7
Abbildung 1.2: Vorgehensweise und methodischer Aufbau der Arbeit zur Konzeption einer flexiblen, flurfreien Materialflusstechnik	10
Abbildung 2.1: Begriffsabgrenzungen in der Logistik.....	12
Abbildung 2.2: Ordnungssystem des Materialflusses	13
Abbildung 2.3: Funktionen des Materialflusssystems.....	14
Abbildung 2.4: Funktionsebenen für Informationsfluss und Steuerung logistischer Systeme .	15
Abbildung 2.5: Definitionen des Automatisierungsgrades.....	17
Abbildung 2.6: Teilautomatisierungen	18
Abbildung 2.7: Ziele und Wagnisse der Automatisierung	19
Abbildung 2.8: Gliederung der Flexibilitätsziele	20
Abbildung 2.9: Flexibilitätsanforderungen an Materialflusssysteme [35]	22
Abbildung 3.1: Fördermittelübersicht	26
Abbildung 4.1: Struktur des Elektrohängebahnsystems.....	37
Abbildung 4.2: Aufgabenfelder von Elektrohängebahnsystemen.....	41
Abbildung 5.1: Generelle Vorgehensweise beim Entwickeln und Konstruieren nach	44
Abbildung 5.2: Layout des ersten Konzeptes	47
Abbildung 5.3: Stützvorrichtungen	48
Abbildung 5.4: Nutzlast.....	48
Abbildung 5.5: Seile	49
Abbildung 5.6: Laufkatze	49
Abbildung 5.7: Halterung C-Schiene	50
Abbildung 5.8: Behälter.....	50
Abbildung 5.9: Rollenbahn.....	51
Abbildung 5.10: Layout des zweiten Konzeptes.....	53
Abbildung 5.11: Stützvorrichtung.....	54
Abbildung 5.12: Behälter und Nutzlast	54
Abbildung 5.13: Laufkatze	55
Abbildung 5.14: Halterung C-Schiene	55
Abbildung 5.15: Seile und Greifer	56
Abbildung 5.16: Rollenbahn.....	56

Abbildung 5.17: Gesamtkonzept.....	58
Abbildung 5.18: Laufkatze	58
Abbildung 5.19: Seil.....	59
Abbildung 5.20: Vertikale Umsetzeinrichtungen.....	60
Abbildung 5.21: Mechanischer Teil	61
Abbildung 5.22: Greifer.....	62
Abbildung 5.23: Schrittmotor	62
Abbildung 5.24: Stützvorrichtungen	64
Abbildung 5.25: Komplettes System.....	65
Abbildung 5.26: Komponenten der Laufkatze.....	67
Abbildung 5.27: Seilbahn	68
Abbildung 5.28: Laufkatze	69
Abbildung 5.29: Seilbahn 2	69
Abbildung 5.30: Metallführungen.....	70
Abbildung 5.31: Gewindestange	70
Abbildung 5.32: Oberer Teil der Laufkatze.....	71
Abbildung 5.33: Perspektive und Seitenansicht für die oberen Metallführungen	72
Abbildung 5.34: Geklemmte Seilrollen.....	72
Abbildung 5.35: Unterer Teil der Laufkatze.....	73
Abbildung 5.36: Abgabe der Nutzlasten	74
Abbildung 5.37: Laufkatze	75
Abbildung 5.38: Umlenkprofile	76
Abbildung 5.39: Komponenten der Laufkatze.....	77
Abbildung 5.40: Linker Aktor	78
Abbildung 5.41: Der Aktor.....	78
Abbildung 5.42: Haken.....	79
Abbildung 5.43: Umlenkprofil und Aktor	79
Abbildung 5.44: Gelenk und Umlenkschiene.....	80
Abbildung 5.45: Vorderansicht des Gelenks	80
Abbildung 5.46: Spurwechsel.....	81
Abbildung 5.47: Layout für das fünfte Konzept	82
Abbildung 6.1: Schwerpunkt der Laufkatze	87
Abbildung 6.2: Darstellung der Laufkatze mit Lithium- Ionen- Akkumulator	88
Abbildung 6.3: Grafik zur Ermittlung des Massenträgheitsmoments der Räder	93

Abbildung 6.4: Beispielstrecke zur Berechnung der Fahrzeit der Laufkatze	101
Abbildung 6.5: Grafik Kräfteparallelogramm	103
Abbildung 6.6: Skizze zur Berechnung des Seildurchhanges	106
Abbildung 6.7: Darstellung Seildurchhang infolge Seildehnung	107
Abbildung 6.8: Skizze zum Prinzip der Dehnungskompensation.....	107
Abbildung 6.9: Konstruktive Ausführung Pfeiler A	108
Abbildung 6.10: Magnetsensor, kurz vor der Wechselstelle installiert.....	109
Abbildung 6.11: Fahrbahn mit seitlicher Ladestation	109
Abbildung 6.12: Ladestation, seitlich der Fahrbahn installiert	110
Abbildung 6.13: Teilausschnitt Ladeschnittstelle bzw. –kontakt und Initialposition	110
Abbildung 6.14: Verbindungsstück zur regulären Fahrbahn.....	111
Abbildung 6.15: Laufkatze mit Steuereinheit und Bedienfeld	112
Abbildung 6.16: Führungsrolle der Laufkatze im Teilausschnitt	113
Abbildung 6.17: Exemplarischer Streckenablauf der Laufkatze	115
Abbildung 6.18: Grafische Veranschaulichung des Ablaufs 'Station'.....	116
Abbildung 6.19: FEM Simulation	118
Abbildung 6.20: H-Profile und Gelenk	119
Abbildung 6.21: FEM Simulation der Haken	119
Abbildung 6.22: FEM Simulation der Nase des Profils	120
Abbildung 6.23: FEM Simulation der Angriffsstelle.....	120
Abbildung 6.24: Beispiel eines Netzwerkes mit einer aktiven Vernetzung aller Stationen zueinander	122
Abbildung 6.25: Netzwerk mit den Stationen 1- 4 und die seitlich angelegte Linie zur Ladestation.....	122
Abbildung 7.1: Layout des Lagers	129
Abbildung 7.2: DOSIMIS-3 Simulationsmodell in der Designfassung	131
Abbildung 7.3: DOSIMIS-3 Simulationsmodell im aktiven Modus, das Modell des Systems wird durchsimuliert	132
Abbildung 7.4: Durchsatz-Analyse der Beladestation_1 nach drei verschiedenen Geschwindigkeiten	137
Abbildung 7.5: Durchsatz-Analyse der Beladestation_2 nach drei verschiedenen Geschwindigkeiten	137
Abbildung 7.6: Durchsatz-Analyse der Beladestation_3 nach drei verschiedenen Geschwindigkeiten	138

Abbildung 7.7: Durchsatz-Analyse der Beladestation_4 nach drei verschiedenen Geschwindigkeiten	138
--	-----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Merkmale von ultraleichten EHB im Vergleich zu herkömmlichen EHB nach [1]	3
Tabelle 4.1: Vor- und Nachteile von Elektrohängebahnsystemen	33
Tabelle 4.2: Vorschriften und Richtlinien für Elektrohängebahnen	38
Tabelle 5.1: Komponenten des Systems für das erste Konzept	51
Tabelle 5.2: Komponenten des Systems für das zweite Konzept	57
Tabelle 5.3: Hauptkomponenten der Laufkatze	59
Tabelle 5.4: Schritte für die Auswahl des Schrittmotors	63
Tabelle 5.5: Bewertungsmatrix	84
Tabelle 6.1: Motorbetrachtung	96
Tabelle 6.2: Eigenschaften der Kombination [81]	97
Tabelle 6.3: Eigenschaften des Motors [81]	98
Tabelle 6.4: Stromverbrauchende Geräte und installierte Leistung	99
Tabelle 6.5: Zusammenhang zwischen Seildurchhang und Kraftreaktionen an den Pfeilern sowie Seil-Gesamtlänge	104
Tabelle 6.6: Technische Details zu den gewählten Seilarten [83]	105
Tabelle 6.7: Übersicht zu den ausgewählten Seilarten und deren Material [83]	105
Tabelle 6.8: Übersicht Zusammenhang zwischen Seildehnung und Durchhang	106
Tabelle 7.1: Einsatzgebiete der Simulationstechnologien	125
Tabelle 7.2 : Glossar der in diesem Modell verwendeten Bezeichnungen	127
Tabelle 7.3: Simulationsbauteile der Lager Simulation	130
Tabelle 7.4: End-Statistik (Geschwindigkeit der Laufkatze=1,0 m/s)	134
Tabelle 7.5: End-Statistik (Geschwindigkeit der Laufkatze=1,1 m/s)	135
Tabelle 7.6: End-Statistik (Geschwindigkeit der Laufkatze=1,2 m/s)	136

Abkürzungsverzeichnis

3D	Three-Dimensional
AGV	Automated Guided Vehicle
CAD	Computer-Aided Design
CAN	Controller Area Network
CNC	Computerized Numerical Control
EHB	Elektrohängebahn
FIFO	First In- First-Out
FTF	Fahrerlose Transportfahrzeuge
FTS	Fahrerloses Transportsystem
FUP	Funktionsplan
GMR	Giant-Magneto-Resistance
HRL	Hochregallager
IP	International Protection
KG	Kilogramm
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
KOP	Kontaktplan
MFR	Materialflussrechner
N	Newton
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Tool Center Point
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Kapitel 1

1 Einleitung

Derzeit existieren für Logistikunternehmen noch keine Applikationen von ultraleichten Elektrohängebahnen (EHB). Potentiale für eine entsprechende technische Innovation sind aber durchaus vorhanden, sodass die Forschung und Entwicklung in diesem Bereich sehr erfolgsversprechend ist. Basierend auf dem aktuellen Forschungsstand sind hierzu allerdings genauere Untersuchungen vonnöten.

Antworten auf daraus resultierenden Fragen werden nachfolgend als relevante Informationen über Logistiksysteme und -anwendungen gegeben und erläutert.

Der Begriff der ultraleichten Elektrohängebahn ist bisher nicht definiert, da es sich bei dem hierzu entwickelten Konzept um eine technische Innovation handelt. Es bedarf daher der Herleitung einer geeigneten Definition aufgrund der besonderen technischen Konstruktion und deren Leistungsmerkmale. Um eine Definition von „ultraleichten Elektrohängebahnen“ herzuleiten, bietet es sich an, sich zunächst die Definition zu den herkömmlichen Elektrohängebahnen anzusehen und auf Basis derer eine Differenzierung vorzunehmen.

Bei den herkömmlichen Elektrohängebahnen handelt es sich um schienengebundene Förder-Systeme, bestehend aus einzelnen Fahrzeugen, die auf einem mehr oder weniger verzweigten Bahnsystem agieren [1]. Diese Systeme gibt es in verschiedenen Bauarten und sind für unterschiedliche Lastenbereiche ausgelegt. Die Nutzlast für das Fahrzeug wird mit 500 kg angegeben (inkl. Gehänge und Transportgut) [2]. Es gibt aber bspw. auch Varianten bis max. 300 kg, 1.500 kg oder 10.000 kg Traglast [3]. Neben der Nutzlast ist auch das Eigengewicht dieser Systeme vergleichsweise hoch, was nachträgliche Veränderungen nur unter großem Montageaufwand möglich macht.

Die technische Innovation besteht darin, dieses System so zu modellieren und weiterzuentwickeln, dass es in Form einer ultraleichten Bauweise für ultraleichte Lasten ausgelegt ist. Der Konzeption sowie den Berechnungen wird daher eine maximale Nutzlast von 20 kg zugrunde gelegt. -Wobei dieser Wert exemplarisch ist und als Richtwert dient. Auch geringfügig größere Lasten sind nicht grundsätzlich auszuschließen. Hierfür müssten die Berechnungen der Systemkomponenten allerdings angepasst und das System ggf. weiterentwickelt werden.

Das Prinzip der ultraleichten Elektrohängebahn besteht darin, dass das Verhältnis Nutzlast zu Eigenlast sehr vorteilhaft ist. Bei der Materialauswahl für das System sollte deshalb Wert darauf gelegt werden, dass möglichst leichte Materialien für die Konstruktion gewählt werden, wie z. B. Carbon oder entsprechende Kunststoffe.

Aus diesem Grund lässt sich auch die besondere Konstruktion des Systems erklären, welches eben nicht auf (schweren) Schienen basiert, sondern auf einer ultraleichten Konstruktion aus einem speziell geeigneten Kunststoff-Seil, das über Pfosten gespannt ist und auf diese die Kräfte überträgt. Das Seil selbst und damit die Gesamtkonstruktion verfügt also über ein sehr geringes Eigengewicht, was das System auch so variabel macht, da es leicht montier- und veränderbar ist. Aufgrund seiner Materialeigenschaften ist es daher bspw. einer Stangenkonstruktion vorzuziehen, die ihrerseits dem ultraleichten Charakter der Konstruktion entgegenwirken würde.

Damit kann ein Elektrohängebahnsystem für einen limitierten Lastenbereich im unteren Niveau erschlossen werden und somit eine Ergänzung zu den bereits bestehenden schienengebundenen Elektrohängebahnen erfolgen. Beide Systeme konkurrieren dabei nicht miteinander, da sie für unterschiedliche Lastenbereiche und damit unterschiedliche Anwendungsfelder ausgelegt sind. Im Folgenden wird überblicksartig aufgezeigt, welche Merkmale ultraleichte Elektrohängebahnen gegenüber den herkömmlichen Elektrohängebahnen haben (vgl. Tab. 1.1).

Tabelle 1.1: Merkmale von ultraleichten EHB im Vergleich zu herkömmlichen EHB nach [1]

Konstruktion	(herkömmliche) EHB	Ultraleichte EHB
Nutzlast	ab 500 kg (auch geringere Lasten möglich)	max. 20 kg
System	Bahnsystem, bestehend aus Laufschiene	Seilsystem
Flexibilität/ Variabilität	innerhalb des Schienensystems hoch Schienensystem selbst aber relativ starr, nachträglich nur mit großem Aufwand veränderbar Steigungen und Höhenunterschiede nur begrenzt überwindbar	sehr hoch, da leichte Demontage und Installation, nachträgliche Veränderungen ohne großen Aufwand umsetzbar Höhenunterschiede problemlos realisierbar
Anwendungsbereich	innen bzw. überdachte Flächen	innen
Stromzufuhr	über Stromschiene	über einen in der Laufkatze integrierten Akku, der über eine im System eingeschlossene Ladestation aufgeladen wird
Variabilität der Fahrgeschwindigkeit	gegeben: Geschwindigkeiten können angepasst werden, geschwindigkeitsgeregelter Synchronbetrieb mehrerer Fahrzeuge möglich	gegeben: Einzelantrieb pro Fahrzeug ermöglicht unterschiedliche Geschwindigkeiten, auch im kurzen Wechsel
Instandhaltungsaufwand	relativ hoch, da relativ hoher Montage- bzw. Demontageaufwand	Seile können durch relativ geringen Aufwand gewechselt werden → positive Auswirkung auf Produktion im Unternehmen, da geringe Störfälle
Kosten	relativ hoch, insbesondere aufgrund des hohen Materialaufwands (Lauf- und Stromschiene, Weichen, Fahrwerke)	geringer im Vergleich zu herkömmlichen EHB, da Verzicht auf „teure“ Schienensysteme Materialsparendes Gerüst

Anhand der in Tabelle 1.1 genannten Merkmale von herkömmlichen und ultraleichten EHB werden schon verschiedene Vorteile erkennbar. Als nachteilig erweist sich die begrenzte Nutzlast, die im Vergleich zu den herkömmlichen EHB sehr gering ist. Dadurch ist der Anwendungsbereich vergleichsweise eingegrenzt. Auch weisen schienengebundene Systeme

aufgrund ihrer Konstruktion eine höhere Robustheit und Stabilität auf. Bei einem 1-Seil-Prinzip ist hingegen keine Seitenstabilität möglich. Da die ultraleichte EHB ausschließlich für die innerbetriebliche Nutzung in der Halle konzipiert ist, entfallen Windlasten und dergleichen, deshalb wird dieser Aspekt hier vernachlässigt. Weiterhin wird die Geschwindigkeit, insbesondere in der Kurve gering gehalten, demzufolge treten keine nennenswerten Zentrifugalkräfte auf.

Ansonsten bietet die ultraleichte EHB aber eine Reihe von nennenswerten Vorteilen gegenüber den herkömmlichen Schienensystemen:

- Es ist leicht montier- und veränderbar, sodass eine optimale Anpassung an die situativen Bedingungen im Unternehmen (auch nachträglich) möglich ist.
- Es eignet sich auch für einen nachträglichen Einbau oder auch nur temporäre Nutzung.
- Es ist vergleichsweise material- und damit kostensparend.
- Es ist sehr variabel in seinem Aufbau.
- Höhenunterschiede können problemlos und ohne großen Aufwand überwunden werden. Die herkömmlichen EHB sind hingegen standardmäßig für Ebenen ausgelegt. Im Bedarfsfall ist hier, durch den Einsatz stärkerer Motoren, eine Steigung von maximal 3° überwindbar, für höhere Steigungswinkel bedarf es Schleppwerke oder spezieller steigfähiger EHB.
- Das System ist vergleichsweise platzsparend.

Daneben bietet das System eine Reihe von denkbaren Einsatzszenarien und eignet sich für vielfältige Zwecke. Abgesehen vom innerbetrieblichen Transport könnten auch, durch ergänzende technische Apparaturen an der Laufkatze, Kontroll-, Datentransport-, Mess- und Instandhaltungsfunktionen möglich sein. –Wobei dies zunächst noch eine Vision darstellt.

Auch im Falle einer notwendigen Instandhaltung an der Konstruktion selbst ist diese aufgrund ihrer flexiblen Bauart in Bezug auf schienengebundene Systeme vergleichsweise unproblematisch, da Bauteile relativ einfach ab- und wieder anmontiert und so Teile ausgetauscht werden können.

Herkömmliche Elektrohängebahnen werden in der Industrie seit einiger Zeit eingesetzt, um den Transport von Gütern und Produkten zu erleichtern und zu beschleunigen. Eine neuzeitliche Form dieser Methode ist deren erweiterte Form als 'Ultraleichte Elektrohängebahn', bei der sich die Laufkatze nicht auf einem Schienensystem, sondern auf Seilen bewegt. Diese Alternative wird bereits in einigen Betrieben angewandt, auch wenn sich

die Serienreife dieser Technik noch in der Forschungsphase befindet und der Technologiestand weitere Potenzialerschließungsmöglichkeiten bietet. Im Folgenden werden wesentliche Gründe dafür genannt, warum solche ultraleichten EHB in Zukunft zum Einsatz kommen werden.

Einer der wichtigsten Aspekte ist die Variabilität, die eine solche Anlage zulässt. Je nach Bedarf kann die Infrastruktur des Systems beliebig geändert und an neue Arbeitsaufträge angepasst werden. Hierzu können die Seile vom Gerüst kurzfristig demontiert und an anderer Stelle wieder installiert werden. Dabei ergeben sich keine Änderungen an Steuerung und Transportvorgang, da Fahrweg und Fahr(t)ziel für jedes Fahrzeug individuell programmierbar und durch die Automatisierung und den Einsatz von Sensoren der Transport bestehen bleibt. Der wesentliche Unterschied zu den herkömmlichen EHB besteht darin, dass vorher ein festgelegter Transportweg gegeben war, der nicht oder nur mit viel Aufwand geändert werden konnte. Die ultraleichte EHB ermöglicht nun eine Flexibilisierung des Transportweges.

Ein anderer wichtiger Grund ist die Tatsache, dass bei der Nutzung von ultraleichten EHB in hohem Maße Kosten eingespart werden können, was sich bereits bei der Beschaffung der Anlage bemerkbar macht, insbesondere deshalb, da die Konstruktion sehr materialsparend ist. Im Vergleich zu herkömmlichen EHB ist der finanzielle Einsatz für die Investition geringer, bei gleichzeitig höherer Leistung. Auf „teure“ Schienensysteme, deren ständige Wartung, Instandhaltung und Kontrolle kann somit verzichtet werden. Die Seile können je nach Art und Gewicht der Last mit sehr hohen Bruchlasten verwendet werden. Sollte ein Seil dennoch defekt sein, kann es sofort ausgetauscht und der Transport fortgesetzt werden. Auch hier zeichnet sich die Variabilität der Seile aus. Im Vergleich zur herkömmlichen EHB ist im Fall einer Störung im Schienensystem eine Instandhaltung oder ein Austausch mit hohem Aufwand verbunden, was sich in der Folge negativ auf die Abläufe im Betrieb auswirkt und zu Verzögerungen und stockender Produktion führt.

Als günstig bei den ultraleichten EHB gilt, dass beim Gerüst an Material gespart werden kann, da der Gerüstbau nur eine geringe Last zu tragen hat. Außerdem zeichnen sich die ultraleichten EHB durch relativ preiswerte Fahrwerke und einer extrem hohen Verfügbarkeit aus.

Zu den betrieblichen Aufgaben eines Unternehmens gehört es, einen schnellen Transport der Ware zu realisieren, denn dies spart Zeit und ermöglicht den reibungslosen Ablauf in der Produktion, was schließlich das Bestehen und die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens sichert und fördert.

Dieser Nutzen wird dadurch möglich, dass sich die Fahrzeuge auf dünnen Seilen bewegen können, völlig automatisch und, mit Ausnahme der Be- und Entladung, ohne personellen Einsatz auskommen. Welche Geschwindigkeiten dabei erreicht werden können, lassen die Seilroboter erkennen, auf deren Prinzip die Ausgestaltung der EHB aufbaut. Der Einzelantrieb pro Fahrzeug ermöglicht unterschiedliche Geschwindigkeiten auch im kurzen Wechsel.

Der Antrieb der ultraleichten EHB erfolgt über einen Elektromotor. Dessen Energiebedarf wird von einem Akkumulator gespeist, der automatisch aufgeladen werden kann. Durch die Stromzuführung sind außerdem Zusatzfunktionen im Fahrzeug möglich, wie z. B. heben, senken und greifen.

Ein weiteres wichtiges Merkmal der ultraleichten EHB ist die Bodenfreiheit in der Lager- oder Produktionshalle. Durch die Befestigung des Systems an einem Gerüst und der Arbeit 'im Luftraum', kann die Bodenfläche anderweitig genutzt werden. Außerdem ist ein Transport über mehrere Ebenen möglich, da die ultraleichte EHB auch Steigungen und Gefälle mühelos überwinden kann. Ebenso ist bei Bedarf eine Richtungsänderung der Laufkatzenfahrt möglich. Somit zeichnet sich das System durch eine einfache und variable Linienführung aus. Wegen der einfachen Bedienbarkeit und einer günstigen Automatisierung sind Erweiterungen bei bestehenden Anlagen gut möglich.

Basierend auf einer umfassenden Literatur-Recherche wird in Kapitel 1.1 die grundlegende Idee zu 'Ultraleichten Elektrohängebahnen' erläutert; in Abschnitt 1.2 folgen Zielsetzung und Vorgehensweise dieser Arbeit.

1.1 Ausgangssituation

Unternehmen aller Wirtschaftszweige sind bestrebt ihre Innovationsfähigkeit zu optimieren, um im globalisierten Wettbewerb bestehen zu können. Innovationen sollen zur Weiterentwicklung von Unternehmen beitragen. Ein möglichst hoher Gewinn ermöglicht es diesen wiederum sich neue Technologien anzuschaffen oder zu entwickeln [4].

Sämtliche Bemühungen um mehr Effizienz wirken sich in diesem Sinne dann auch in erheblichem Maße auch auf die Weiterentwicklung der Transportsysteme aus [5]. Diese haben die Aufgabe, einen effizienten Materialfluss an verschiedensten Orten zu ermöglichen. Es kann davon ausgegangen werden, dass Innovationen im Bereich Logistik in Zukunft immer wichtiger werden [6]. Selbst Firmen, die bereits über eine hohe Reputation verfügen, sehen sich vor die Aufgabe gestellt, die Organisation der Transportsysteme stetig

weiterzuentwickeln [7]. Das Ziel ist eine optimierte Leistung mit einem individuell angepassten Transportsystem, deren Effizienz durch eine geeignete Technik ermöglicht wird.

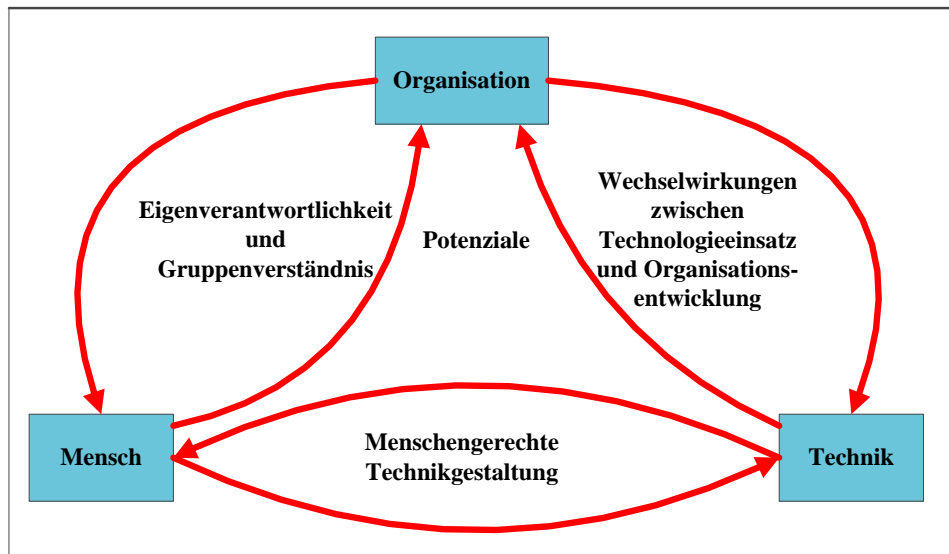


Abbildung 1.1: Potenziale im Unternehmen [5]

Die Ansprüche der Kunden bestimmen letztlich auch, welche Technik eines Transportsystems gewählt wird und welches innovative Verfahren umzusetzen ist [5]. Bei der Neukonzeption eines Transportsystems dürfen die Potenziale neuer Technologien nicht außer Acht gelassen werden, um die geforderte Effizienz zu erreichen. Insbesondere auf dem Gebiet der Informationstechnik sollte das sogenannte Re-Engineering genutzt werden.

Da die meisten Unternehmen davon ausgehen, dass logistische Konzepte eine hohe Leistung zur Folge haben, werden diese ihren Fokus verstärkt auf optimierte und vollautomatisierte Transportsysteme richten, die notwendigen Transportwege optimiert umsetzen.

All diese Entwicklungen machen deutlich, weshalb die Themen Innovation und Technik momentan viel Anklang finden - vor allem in produzierenden Unternehmen. Eine logistische Neugestaltung ist auf allen Ebenen eines Unternehmens möglich und auch in allen damit verbundenen Wertschöpfungsketten.

Experten sind sich einig, dass die aktuellen, dynamischen Marktverhältnisse einen positiven Einfluss auf die Entwicklung weiterer Innovationen haben, was neue Konzepte im Bereich Logistik zum einen erforderlich macht, diese aber auch fördert. Eine wichtige Voraussetzung ist dabei eine schnelle Reaktion, um die Systeme an eventuell eintretende Behinderungen und Veränderungen innerhalb der Abläufe anzupassen [8].

Im Materialfluss spielt dieser Anspruch bei vollautomatisierten Transportsystemen eine entscheidende Rolle, da die Lösung interner und zwischenbetrieblicher logistischer Probleme zunehmend die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen bestimmt.

Der Materialfluss, welcher lediglich einen Teil eines Transportsystems darstellt, entwickelt sich zu einer zentralen Funktion. Während die Funktion des Transportes früher lediglich darin bestand, Produkte örtlich zu verbringen, werden heute aufeinander abgestimmte Unterstützungs- und Transportaufgaben zielgerichtet in die Materialfluss-Konzipierung integriert und somit zu einer wesentlichen Komponente des Gesamtprozesses.

Durch die Forderung einer Gesamtoptimierung wirken sich die Materialfluss-Lösungen direkt auf das jeweilige Transportsystem aus. Aus der Forderung nach einer hohen Anpassungsfähigkeit unterliegen Materialflusssysteme und so auch die Transportsysteme außerordentlichen Veränderungen hinsichtlich ihres Aufbaus. Sie sollen so flexibel wie möglich auf Struktur-, Mengen- und Produktveränderungen reagieren [4]. Diese sehr hohen Leistungsanforderungen an den Materialfluss können derzeit nicht völlig erfüllt werden.

Die Anlässe hierfür sind vielseitig. Die geforderte Anpassungsfähigkeit steht vor allem in einem Interessenskonflikt zu der nach wie vor anhaltenden Tendenz der Automatisierung, aus der heraus in gewissem Umfang Strukturen und Abläufe definiert und bestimmt werden. Eine Erhöhung des Automatisierungsgrades wird umgesetzt, um eine bessere Kontrolle der komplexen logistischen Abläufe zu ermöglichen und die logistische Leistungsfähigkeit der Unternehmen zu sichern. Wegen mangelnder technischer Anpassungsfähigkeit der Informations- und Materialflusssysteme wird jedoch verhindert, dass nötige strukturelle Maßnahmen verwirklicht werden [9]. Die Ansprüche, das Materialflusssystem an Veränderungen des Transportsystems anpassen zu können, scheitern am meist zu hohen Veränderungsaufwand. Die fehlende Kompatibilität und Schlüssigkeit der eingesetzten Steuerungssysteme, vor allem aber deren fehlende Veränderungsfähigkeit, stellen einen großen Nachteil dar.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Gemäß den vorangegangenen Erörterungen besteht die Herausforderung darin, künftig die Entwicklung von anpassungs- und wandlungsfähigen Materialflusssystemen zu fördern, damit möglichst viele Transportsysteme unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Dabei sehen immer weniger Unternehmen eine Lösung in hoch automatisierten Transporteinrichtungen.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die folgenden Zielstellungen erfüllt werden:

- Gestaltung und Visualisierung verschiedener Konzepte mit Hilfe von 3D-CAD Software (Grafische Modellierung und Visualisierung).
- Beschreibung einzelner Komponenten und Abläufe der Konzepte.
- Vergleich der Konzepte.
- Entscheidung für das optimale Konzept.
- Darstellung der Korrelation zwischen der Laufkatzensgeschwindigkeit und dem Systemdurchsatz mit Hilfe eines Simulationswerkzeuges.

Das Ziel der hier vorliegenden Arbeit kann somit folgendermaßen formuliert werden:

Es sind die Konzepte für ein ultraleichtes Elektrohängebahnsystem zu entwickeln, die den zunehmenden Ansprüchen dynamischer Prozesse gerecht werden.

Im nachfolgenden Kapitel 2 werden in einem ersten Schritt die Materialflusssysteme erläutert. Es sind verschiedene Arten der Anpassungsfähigkeit zu definieren, wobei eine anpassungsfähige und veränderbare Automatisierung nur einen Teil der Anforderungen darstellt. Im Kapitel 3 werden bekannte Materialflusssysteme auf ihren Zielerfüllungsgrad sowie ihre Qualifikation untersucht und bewertet. Hier wird die Begründung für die spätere Festlegung auf eine flurfreie Materialfluss-Technik geliefert. In Bezug auf das weitere Konzept wird anschließend, ergänzend zur vorhergehenden Bewertung, der Stand der Technik aus Forschung und Industrie in Kapitel 4 aufgearbeitet.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Konzeptionierung eines ultraleichten Elektrohängebahnsystems. Die verschiedenen Konzepte werden in Kapitel 5 veranschaulicht und miteinander verglichen.

Nach dem Vergleich der Konzepte wird das optimale Konzept ausführlich im Kapitel 6 beschrieben.

Kapitel 7 beinhaltet die Simulation und Untersuchung eines Warenlagers, um die Realisierbarkeit des erarbeiteten Konzeptes zu ermitteln.

Abschließend wird das bestmögliche Konzept aus den verschiedenen Konzepten ausgewählt, um somit das größte Potenzial als Ausgangspunkt für zukünftige Weiterentwicklungen zu bestimmen.

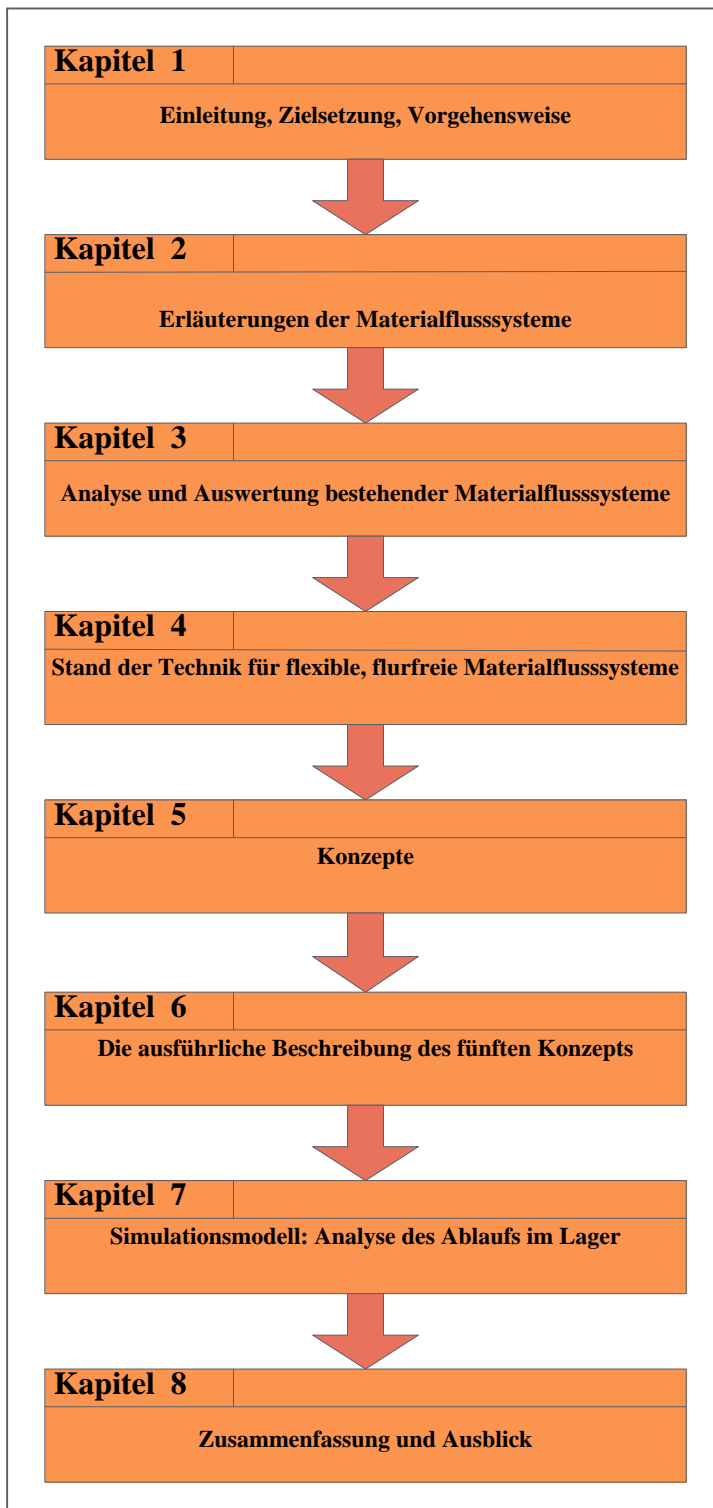


Abbildung 1.2: Vorgehensweise und methodischer Aufbau der Arbeit zur Konzeption einer flexiblen, flurfreien Materialflusstechnik

Kapitel 2

2 Erläuterungen der Materialflusssysteme

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Materialflusssysteme zunächst erläutert, um anschließend darauf aufbauend bestehende Materialflusssysteme zu beschreiben.

2.1 Materialflusssysteme

Die Logistik sowie ihre Methoden und Verfahren beruhen auf dem Dreiklang aus [10]:

- Technik,
- Informatik und
- Betriebs- und Volkswirtschaft.

Aus technischer Sicht stellt Logistik den Materialfluss als eine Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von Gütern innerhalb fester Bereiche und damit als physische Funktion logistischer Prozesse in den Vordergrund. Aus der betriebswirtschaftlichen Sicht der Logistik entspricht dies einem speziellen Führungsansatz, effiziente Flüsse von Objekten (Güter, Informationen, Gelder, Personen) zu entwickeln, zu gestalten, zu lenken und zu realisieren, und zwar unternehmensweit und für übergreifende Wertschöpfungssysteme. Dabei wird der Fokus auf die Distribution, das Marketing, das strategische Handeln, die Kosten und die überbetriebliche Vernetzung gerichtet. Die Sicht der Informatik auf die Logistik definiert diese als Spezialfall der Datenverarbeitung, bei dem ein Datenstrom mit der Bewegung von Gütern unmittelbar verknüpft ist. Die Betrachtungen erstrecken sich dabei von der Verarbeitung von Informationen am essentiellen materialflusstechnischen Objekt über die Kommunikation entlang der logistischen Kette hin zur weltumspannenden Informationskette für den Abgleich von Beständen und Nachfragen [10].

2.1.1 Objekt Materialflusssysteme

Das Design des Materialflusses und des zugehörigen Informationsflusses ist ein Kernbereich der Logistik. Das Ziel des System-Designs ist es, die richtigen Produkte in der richtigen Quantität und Qualität, zum richtigen Zeitpunkt, am richtigen Ort, zu minimalen Kosten zur

Verfügung zu stellen. Die Logistik umfasst die gesamte Kette von der Beschaffung beim Lieferanten über den Materialtransport bis zur Distribution an den End-Kunden (siehe Abb. 2.1).

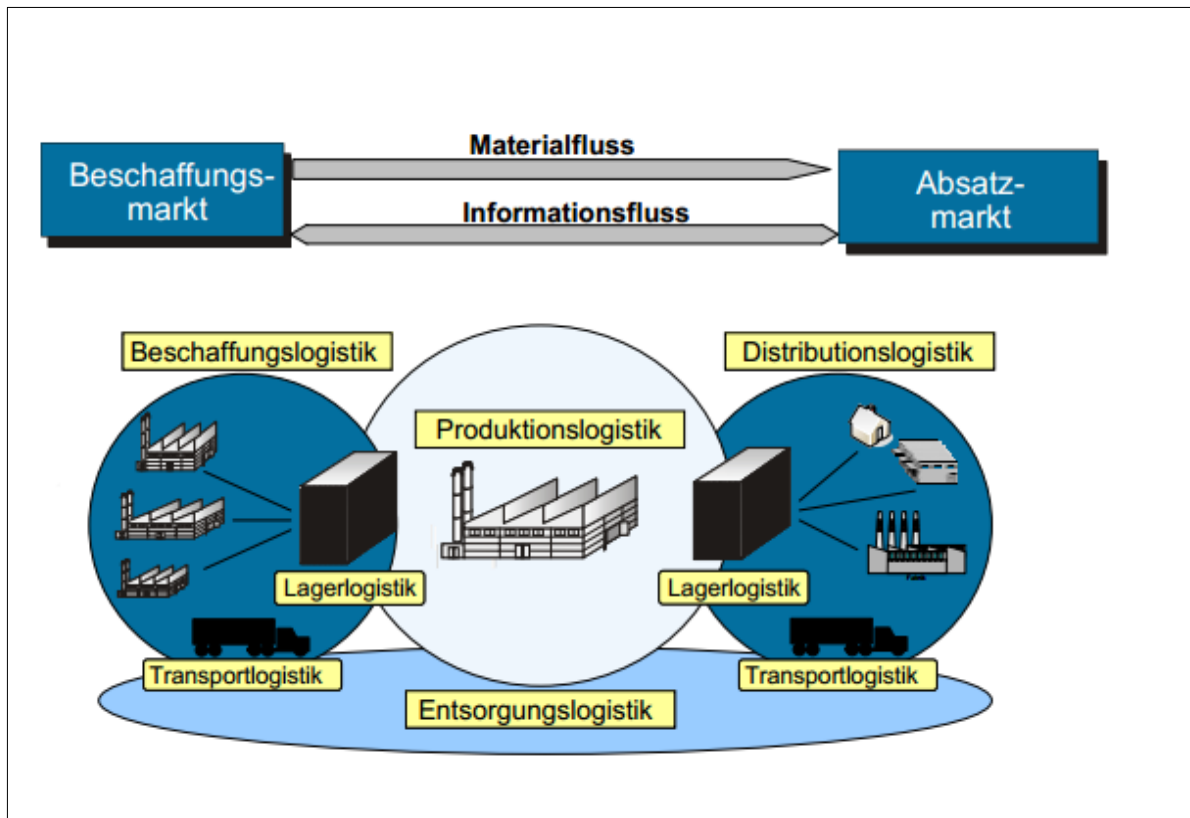


Abbildung 2.1: Begriffsabgrenzungen in der Logistik [11]

Der Materialfluss ist definiert, als die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- oder Verarbeiten sowie bei der Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Materialflussebenen [12].

2.1.1.1 Physische Materialflussebenen

Der physische Materialfluss kann in folgende vier Stufen hierarchisch kategorisiert werden (siehe Abb. 2.2) [13], [14]:

1. Externer Transport und Verkehr (überregionale, regionale und lokale Ebene):
Transporte zwischen verschiedenen Produktionsstandorten des Unternehmens oder zwischen Unternehmen und seinen Zulieferern oder Kunden. Diese Stufe ist den Materialflüssen der Beschaffungs-, Distributions- und Entsorgungslogistik zuzuordnen und kennzeichnet den überbetrieblichen Materialfluss.
2. Betriebsinterner Materialfluss:

Transporte innerhalb eines Werksgeländes zwischen den verschiedenen Bereichen oder Werksgebäuden des Betriebes.

3. Gebäude-interner Materialfluss:

Transporte innerhalb eines Werksgebäudes, zwischen Abteilungen oder Maschinen- und Arbeitsplatzgruppen verschiedener Bereiche und Transporte zwischen einzelnen Betriebsmitteln oder Arbeitsplätzen. Bedingt durch die Produkteigenschaften und die in einem Betrieb vorliegende Fertigungstiefe kann sich der gebäudeinterne Materialfluss auch in mehrere Ebene gliedern.

4. Materialfluss am Arbeitsplatz:

Versorgung und Handhabung am Arbeitsplatz.

Die Stufen 2 bis 4 umfassen alle Bewegungen innerhalb eines Werkes und werden daher als innerbetrieblicher Materialfluss bezeichnet.

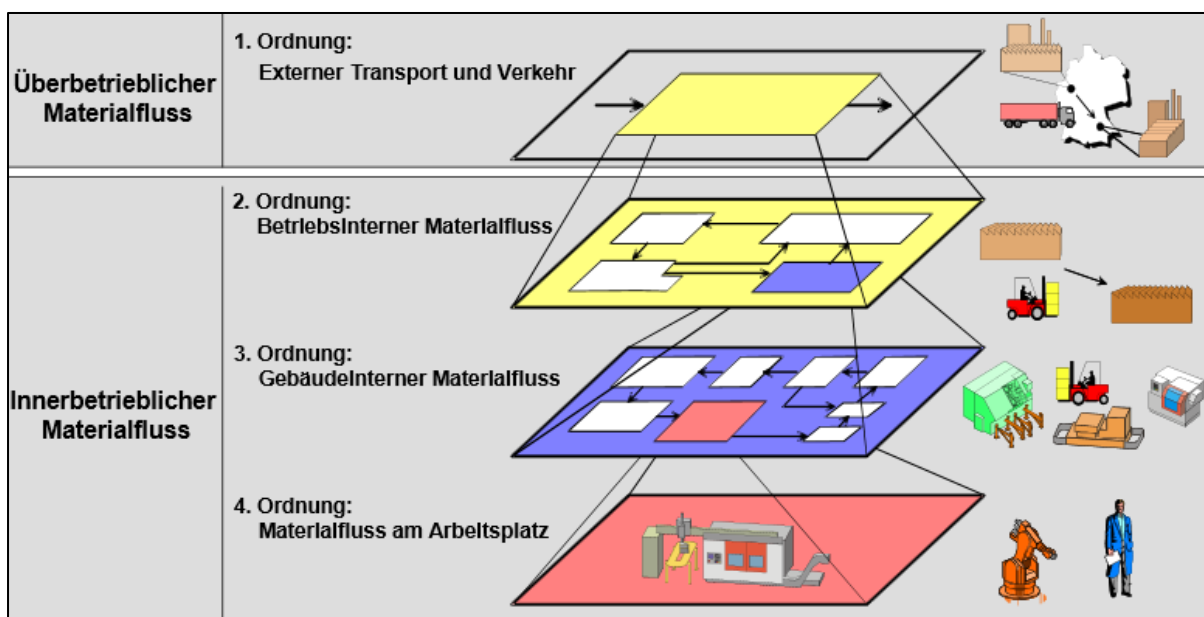


Abbildung 2.2: Ordnungssystem des Materialflusses [15]

2.1.1.2 Funktionen des Materialflusses

Die Funktionen des Materialflusses sind Bearbeiten, Prüfen, Handhaben, Fördern und Lagern. Außerdem sind Montieren, Umschlagen, Kommissionieren, Palettieren und Verpacken weitere Funktionen des Materialflusses [12].

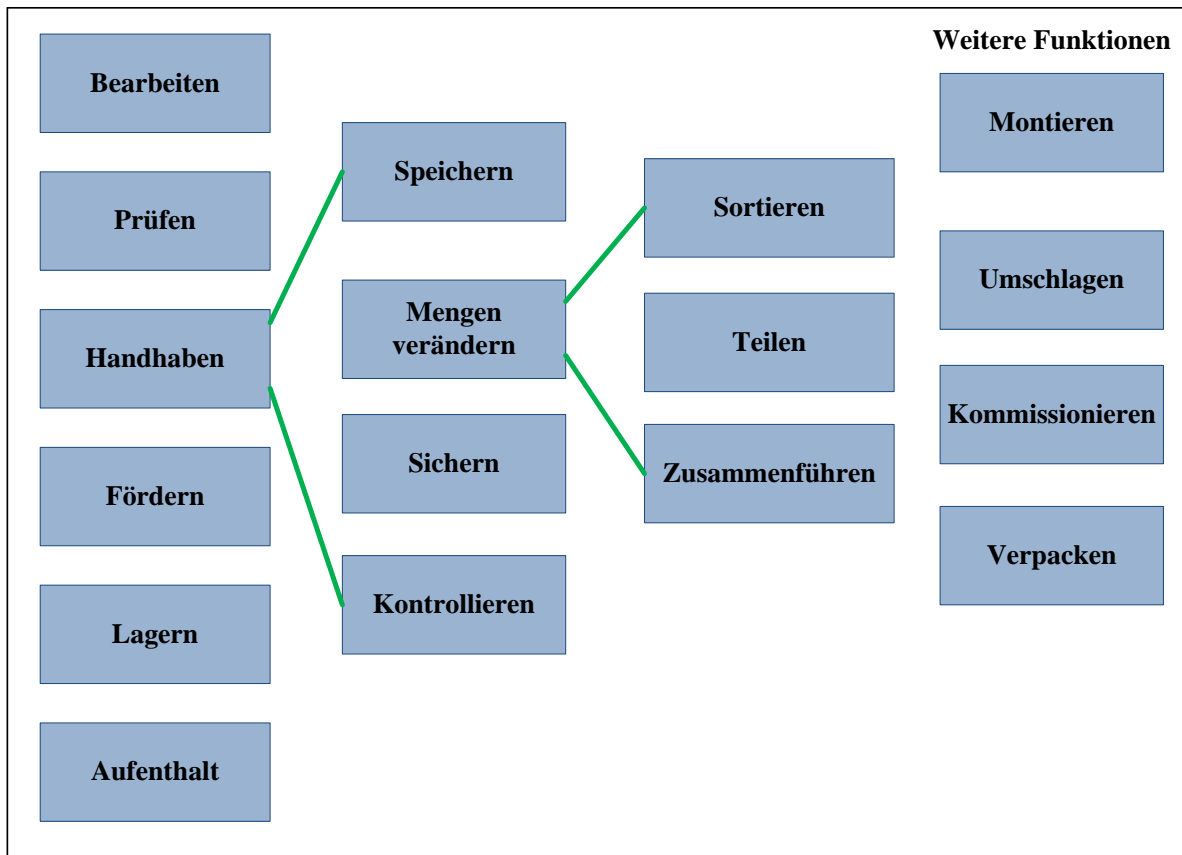


Abbildung 2.3: Funktionen des Materialflusssysteme [12], [16]

Eine effiziente Beförderung ist die wichtigste Funktion des Materialflusses. Die Hauptfunktion des Materialflusses sind Fördern, Lagern und Handhaben [16]. Alle weiteren, in Abbildung 2.3 dargestellten Funktionen eines Materialflusssysteme, lassen sich in der Regel aus den drei genannten Hauptfunktionen zusammensetzen [13].

2.1.1.3 Informationssysteme und Steuerungsebenen

Nachdem die verschiedenen Materialflussfunktionen kategorisiert wurden, werden nun Informationsflusssysteme betrachtet. Jedes Materialflusssystem unterliegt bestimmten Richtlinien, die einen effizienten Transport ermöglichen sollen, wobei innerhalb des Materialflusssysteme die jeweilige Umsetzung zu überwachen ist. Durch ein rechnergestütztes, informationsverarbeitendes System wird diese Aufgabe realisiert. In Bezug auf die Gestaltung von Informations- und Steuerungssystemen wird dessen Integration in mehreren Ebenen durchgeführt.

Diese Ebenen sind die [17]:

- Administrative Ebene
- Leitebene
- Steuerungsebene

Innerhalb der verschiedenen Ebenen ändert sich die Umsetzung durch entweder wahlweise und/oder operative Funktionen (siehe Abb. 2.4).

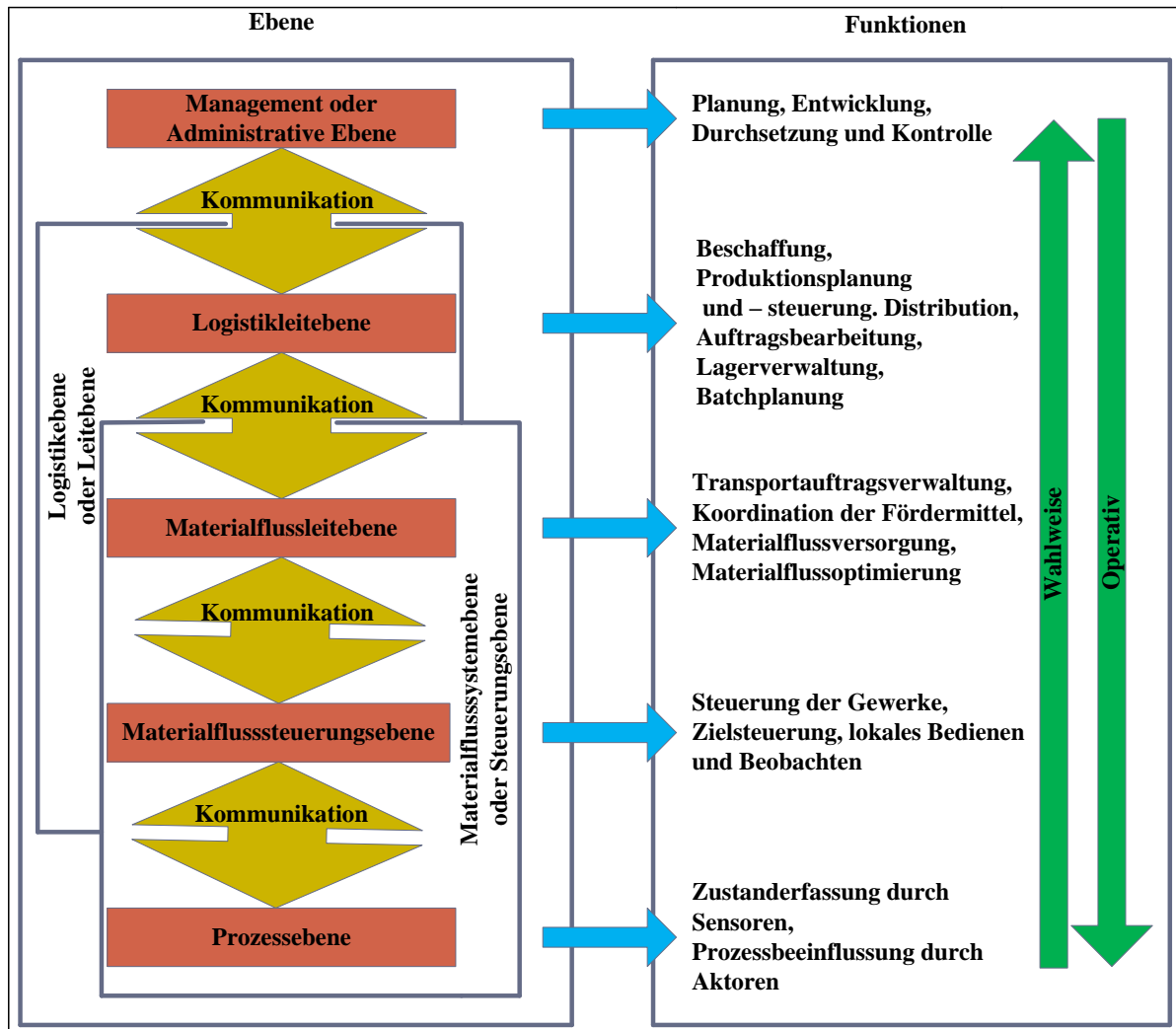


Abbildung 2.4: Funktionsebenen für Informationsfluss und Steuerung logistischer Systeme [17]

Für die effiziente und zielgerichtete Umsetzung eines Transportsystems müssen sowohl die Steuerung der berücksichtigten Transportmittel, als auch deren systemunterstützende Zielsteuerung an das jeweilige Konzept angepasst und dafür geeignet sein. Die automatische Verwaltung aller Änderungen und Anpassungen wird als obligatorisch vorausgesetzt.

Veränderungen im Transportsystem führen zu Veränderungen im Materialflusssystem, wobei diese sich hauptsächlich auf die Steuerungssysteme auswirken.

2.1.2 Anpassungsfähige, automatisierte Materialflusssysteme

In der Vergangenheit lag der Fokus verschiedener Systemumsetzungen auf der vor-Ort-Versorgung mit Gütern. Transporte waren Bestandteile von Materialflüssen, wohingegen heutzutage Materialflüsse zu wichtigen Kernkompetenzen von Transportsystemen zählen. Die Optimierung von Materialflusssystemen ermöglicht zum einen Kosteneinsparungen und trägt darüber hinaus wesentlich zu besseren Leistungen und höherer Qualität einzelner Abteilungen und Unternehmen bei.

Im Zentrum der Entwicklungen steht gegenwärtig die Vollautomatisierung. Beispiele sind Hochregallager mit automatisierten Regal-Bediengeräten oder Elektrohängebahnen in der Automobilindustrie. Hierbei werden die Grenzen der Automatisierung durch die erreichbare Wirtschaftlichkeit wie auch durch die steigenden Flexibilitätsanforderungen bestimmt. Automatisierte Systeme, die beide Voraussetzungen (Wirtschaftlichkeits- und Flexibilitätsanforderungen) erfüllen, stehen im Zentrum des Interesses. Ansätze zu einfach veränderbaren und günstigen Systemen zeigen sich hier hauptsächlich durch die Entwicklungen im Bereich der Informationstechnik und Mechatronik sowie der Integration von Mechanik, Elektronik und Informatik.

2.1.2.1 Begriffe der Automatisierung

Mechanisierte Systeme funktionieren in ihren wesentlichen Aufgaben, wie beispielsweise Fahren oder Heben, durch maschinelle Antriebe [18]. Die Technik ermöglicht, dass Personen von körperlicher Arbeit durch den Einsatz von Arbeitsmaschinen befreit sind, sowohl bei der Erzeugung von Energie wie auch in der Produktion. Obwohl handelnde Personen die Steuerung und die Kontrolle über den Arbeitsablauf behalten, wird die Arbeitsleistung größtenteils durch technische Werkzeuge übernommen. Im Vergleich zu den vorhergehenden Ausführungen beinhaltet die Automatisierung sämtliche Arbeitsschritte oder zumindest Teile der Abläufe von Wertschöpfungsketten, die ohne den Eingriff des Menschen gesteuert werden können [19].

Der Automatisierungsgrad ist das Verhältnis der Anzahl der automatisierten Fertigungsschritte zur Gesamtzahl aller Funktionen eines Systems [20]. In der Literatur gibt

es weitere Definitionen, die für die Wahl des gewünschten Automatisierungsgrades verschiedene Faktoren zugrunde legen (siehe Abb. 2.5).

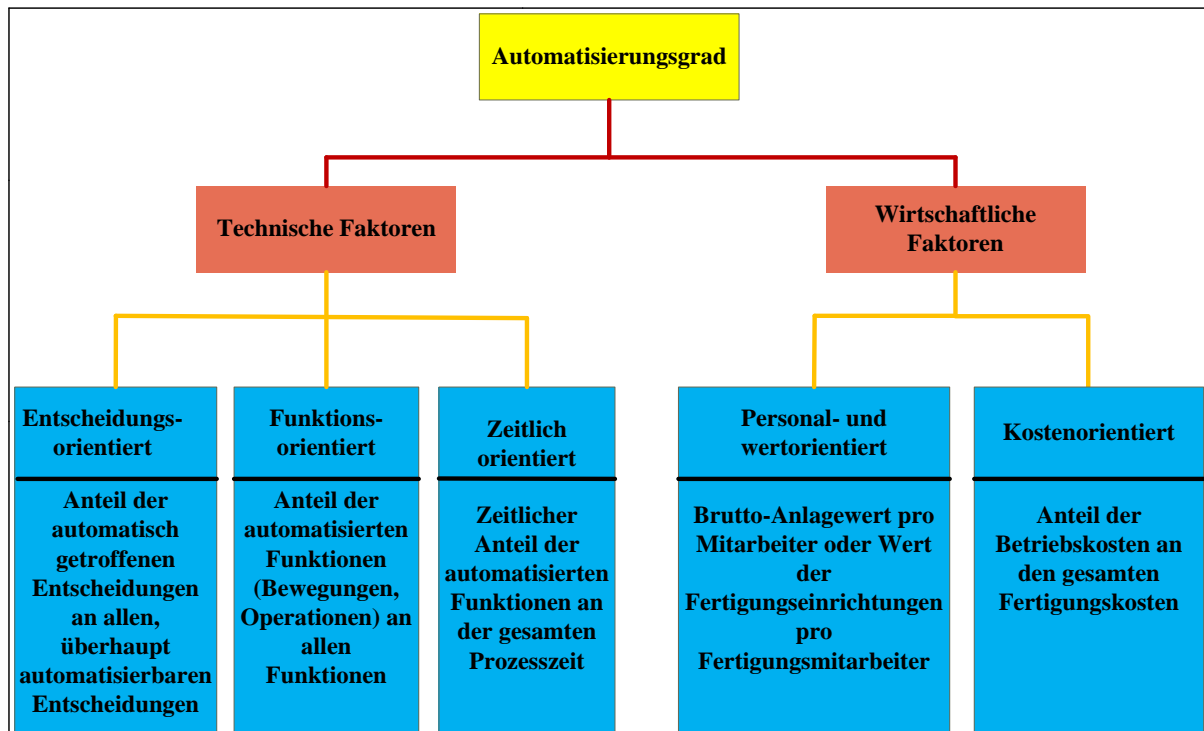


Abbildung 2.5: Definitionen des Automatisierungsgrades [21]

Ein vollautomatisiertes System ist ein System, dessen Automatisierungsgrad 100 % beträgt [20]. Der Begriff der Teilautomatisierung umfasst lediglich die Automatisierungsgradwerte zwischen 1 % bis 99 % [20]. Nahezu alle vorhandenen Materialflusssysteme sind demnach laut Definition teilautomatisiert. Die Bestimmung und Kalkulation des Automatisierungsgrades steht in enger Korrelation zu seinen Systemgrenzen.

Zur Abgrenzung und Bestimmung von Automatisierungsstufen existieren Beispiele in der Fachliteratur, die im Speziellen die Automatisierungsstufen von Materialflusssystemen beinhalten. Die Lösungen stellen deutlich mehr und detailliertere Automatisierungsstufen dar, denen darüber hinaus materialfluss- und steuerungstechnische Teile zugeordnet sind.

An dieser Stelle werden automatisierte Systeme in verschiedene Ebenen eingeteilt. Darauf aufbauend werden die Stufen der Automatisierung eingeordnet. Automatisierte Systeme lassen sich in Bezug auf Ausführung, Steuerung, Lenkung und Kontrolle unterscheiden. Außerdem wird die Automatisierung der wahlweisen Ebenen von den operativen Ebenen getrennt.

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass der Begriff der Teilautomatisierung neben dem Automatisierungsgrad und den Automatisierungsstufen verwendet wird (siehe Abb. 2.6). Zu diesem Zweck gibt es verschiedene Applikationen und Definitionen:

- [20]: Es handelt sich um eine Teilautomatisierung, wenn der Automatisierungsgrad kleiner als 1 ist. Die Bezeichnung Teilautomatisierung ist auch erlaubt, wenn Personen eine Rolle innerhalb des Systems spielen.
- [22]: Es geht um teilautomatisierte Unternehmen, wenn die Transportfunktion mithilfe der Teilautomatik für einzelne Bewegungsvorgänge erleichtert wird.
- [23]: Teilautomatisiert wird gleich mit mechanisiert angesehen. Im Vergleich zu teilautomatisiert heißt mechanisiert, dass Teilfunktionen eines Arbeitsmittels automatisch gesteuert, die Gesamtfunktionen aber von Menschen benutzt werden.
- [24]: Es handelt sich um eine Teilautomatisierung, wenn 10 % bis 60 % der Bewegungen manuell verwirklicht werden.

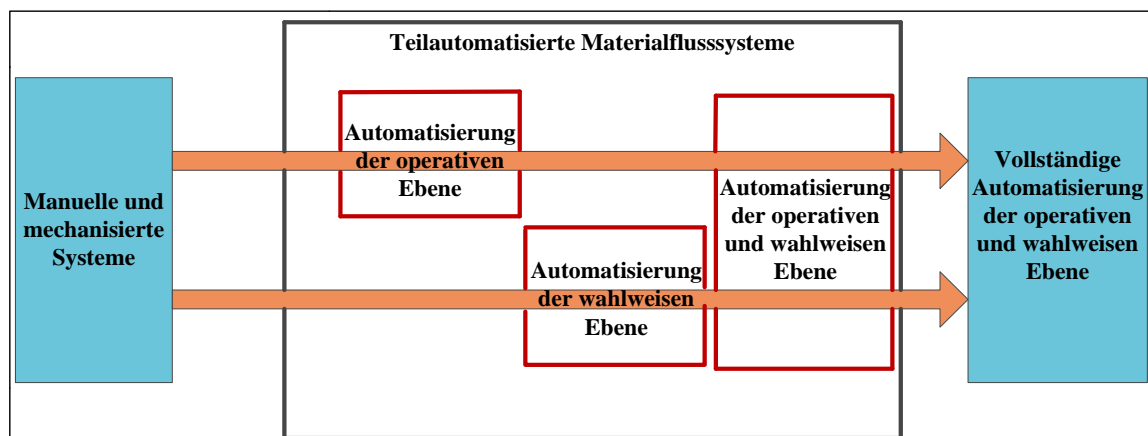


Abbildung 2.6: Teilautomatisierungen [21]

- [21]: Ein System ist teilautomatisiert, wenn eine darin handelnde Person mithilfe automatisierter Komponenten oder Subsysteme beständig oder gelegentlich darin unterstützt und gelegentlich auch ersetzt wird, bestimmte Funktionen zu erfüllen. Mithilfe der Automatisierungsmaßnahmen entsteht ein teilautomatisiertes Materialflusssystem auf der operativen und wahlweisen Ebene. Ein teilautomatisiertes System unterscheidet zwischen manuellen, mechanisierten und vollautomatisierten Systemen.

2.1.2.2 Ziele der Automatisierung

Aufgrund des hohen Investitionsaufwandes wird das System automatisiert, wenn es wirtschaftlich sinnvoll ist. Aus diesem Grund gewinnen Teilautomatisierungen heutzutage immer mehr an Bedeutung.

Um eine Entscheidung für oder wider eine Teilautomatisierung zu finden, müssen die folgenden Fragen geklärt werden:

- Wann ist eine Automatisierung erforderlich?
- Warum wird das System automatisiert?

Um diese Fragen zu beantworten, werden im Folgenden Motive, Vor- / Nachteile, Risiken und Ziele einer Automatisierung geklärt (siehe Abb. 2.7).

Ziele der Automatisierung	Wagnisse der Automatisierung
<ul style="list-style-type: none"> • Datenerfassung 	<ul style="list-style-type: none"> • lange Amortisationszeiten • lange Inbetriebnahmezeiten • Instandhaltung, Wartung • Vorhandensein und Ausfallrisiko • Verringerung der Flexibilität
<ul style="list-style-type: none"> • Kompatibilität 	
<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Qualität 	
<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Prozesssicherheit 	
<ul style="list-style-type: none"> • menschenfreundliche Ziele 	
<ul style="list-style-type: none"> • Kostensenkung 	
<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung der Leistungsfähigkeit 	

Abbildung 2.7: Ziele und Wagnisse der Automatisierung [25]

Zunächst führt die Automatisierung von Materialflusssystemen zu höherer Leistungsfähigkeit und zu sinkenden Stückkosten. Darüber hinaus werden durch eine eindeutige Struktur sowohl die Transparenz wie auch Prozesssicherheit erhöht. Zur gleichen Zeit wird das Risiko von Beschädigungen durch die automatisierten Systeme verringert und somit die Qualität des Prozesses erhöht. Darüber hinaus befreit die Automatisierung den beteiligten Menschen von langweiligen oder ergonomisch bedenklichen Aktivitäten oder von Aktivitäten in beschwerten, nicht akzeptablen Umgebungsverhältnissen.

Negative Aspekte der Automatisierung von Materialflusssystemen sind die hohen Investitionskosten sowie die relativ langen Amortisationszeiten. Investitionen mit Amortisationszeiten von mehr als fünf Jahren sind für eine Materialfluss-Optimierung üblich. Darüber hinaus entstehen lange Inbetriebnahme-Zeiten und ein hohes Ausfallrisiko, die beide einer uneingeschränkten Verbreitung von vollautomatisierten Systemen entgegenstehen. Als

nachteilig im Vergleich zu manuellen Systemen gilt auch eine geringere Anpassungsfähigkeit der Materialflusssysteme.

2.1.2.3 Anpassungsfähigkeit

Als Anpassungsfähigkeit, auch Adaptivität oder Flexibilität, gilt die Fähigkeit eines Lebewesens oder einer Gesellschaft zur Veränderung oder Selbstorganisation, dank der auf gewandelte äußere Umstände reagiert werden kann. Dies gilt im Sinne einer veränderten Wechselwirkung zwischen (kollektiven) Akteuren untereinander (Assimilation) oder gegenüber ihrer Umgebung [26]. Flexibilität kann als Alternative zur Veränderung in vorgehaltenen Dimensionen und Szenarien bezeichnet werden. Es ist die Fähigkeit, sich auf geänderte Anforderungen und Gegebenheiten einer Umwelt einzustellen [15].

Die Beschreibung der Flexibilität kann einer jeweiligen Zielstellung entsprechend angepasst werden. Durch die Einordnung verschiedener Einflussfaktoren wird der Bedarf an Flexibilität von Materialflusssystemen systematisch analysiert und daraus die folgenden strategischen und/oder operativen Flexibilitätsziele abgeleitet (siehe Abb. 2.8). Dazu gehören:

- die Robustheit gegenüber kurzfristigen Bedarfsänderungen
- die Kompatibilität technischer Änderungen
- die Robustheit gegenüber der Stochastik zusammen mit den inneren Abhängigkeiten eines Systems

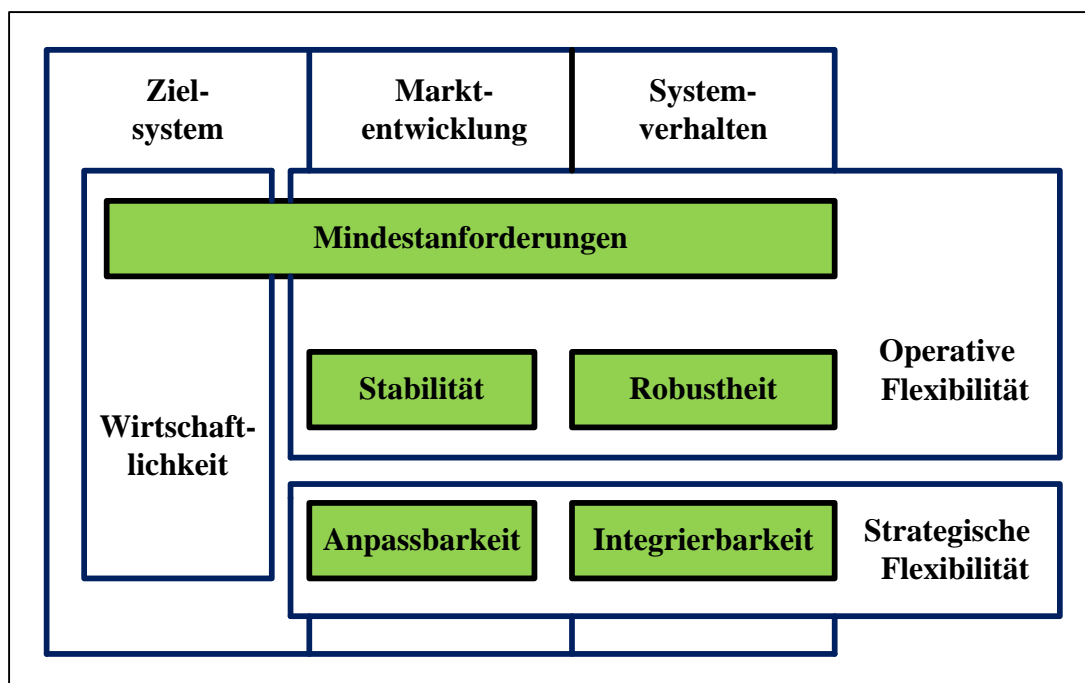


Abbildung 2.8: Gliederung der Flexibilitätsziele [15]

Bezogen auf Materialflusssysteme, -technik und -steuerung werden folgende Anforderungen an die Flexibilität unterschieden:

- Die Anforderungen an Flexibilität von Materialflussteuerungen werden eingeteilt in Bezug auf die Technik, hinsichtlich der Zielumgebung, in der Auswahl der Förderelemente und bezüglich Service, Wartung und Diagnose [27].
- Die Anforderungen an Materialflussteuerungen zwischen Planungsunterstützung, Veränderungsfähigkeit, Aktualität der Planung und Veränderungsfähigkeit werden unterschieden. Außerdem wurden die Anforderungen an Layout-Veränderungen, Veränderungsfähigkeit, organisatorische Veränderungen und Erweiterung von Materialfluskomponenten zusammengefasst [15].

Der Begriff der Reaktionskapazität oder Reaktionsfähigkeit steht oft in engem Zusammenhang mit der Anpassungsfähigkeit. Diese erzielt Freiheitsgrade für ungeplante Situationen [26] und macht es möglich, auch außerhalb vorgedachter Korridore, Szenarien und Dimensionen in einer bestimmten Weise zu behandeln [15]. Am einfachsten kann die Reaktionsfähigkeit über die Kreativität und Innovationsfähigkeit des Menschen beschrieben werden. Hauptsächlich werden neue Lösungen gefunden, die in kurzer Zeit umgesetzt werden können. Unter Wandlungsfähigkeit versteht man die Vereinigung der Eigenschaften Anpassungsfähigkeit und Reaktionsfähigkeit [28].

2.1.2.4 Der Unterschied zwischen Anpassungsfähigkeit und Automatisierung

Ein Mehr an Automatisierung bedeutet in der Regel ein Weniger an Anpassungsfähigkeit [29]. Durch die Erfüllung von Zielkriterien wie hohe Anpassungsfähigkeit bei hohem Automatisierungsgrad entstehen hohe Kosten, da sich widersprechende Faktoren nur durch eine Verbesserung und Individualisierung der Technik erreichen lassen.

2.2 Veränderungen der Materialflusssysteme

Im Fokus stehen Regeln für eine an Logistikprozesse angepasste Ablaufgestaltung, wobei technische Komponenten zur Realisierung und Umsetzung zu entwickeln und Simulationen sowie Verfahren zur Gestaltung und Kontrolle logistischer Systeme wie auch von Kooperations- und Kommunikationsproblemen an den vielseitigen Schnittstellen in der logistischen Kette zu lösen sind [30]. Hohe Anpassungs- wie auch Wandlungsfähigkeit

werden für die innerbetriebliche Logistik und die Schnittstelle zur außerbetrieblichen Logistik gefordert [31]. Bei diesen Bemühungen stehen hauptsächlich die Wirkungen auf die Bereiche Kommunikation, Organisation und Information im Fokus des Interesses [32], wobei die vorhandene Leistungsfähigkeit als ausreichend bewertet wird. Beispielsweise entfallen rund 70 % der in Deutschland entstehenden jährlichen Logistikkosten auf den innerbetrieblichen Bereich [33]. Geeignete technische Maßnahmen sollten mögliches Rationalisierungspotenzial von rund 50 % haben.

2.3 Anforderungen an Materialflusssysteme

Die Auswahl und Bewertung der Materialflusssysteme folgen technischen und wirtschaftlichen Kriterien. Die Förderaufgabe bestimmt die technischen Grundforderungen. Außerdem sind Förderstrecke, Förderlänge, Art der Fördergüter, gesetzliche Bestimmungen und Förderintensität zu berücksichtigen [34].

Um Systeme gegeneinander abzuwägen, werden neben den technischen Kriterien hauptsächlich Aspekte der Kostenrechnung berücksichtigt. Es gilt meistens die Forderung, die Förderaufgabe mit minimalen Kosten zu erfüllen. Amortisationsdauer und Investitionskosten sind hingegen maßgeblich wirtschaftliche Kriterien.

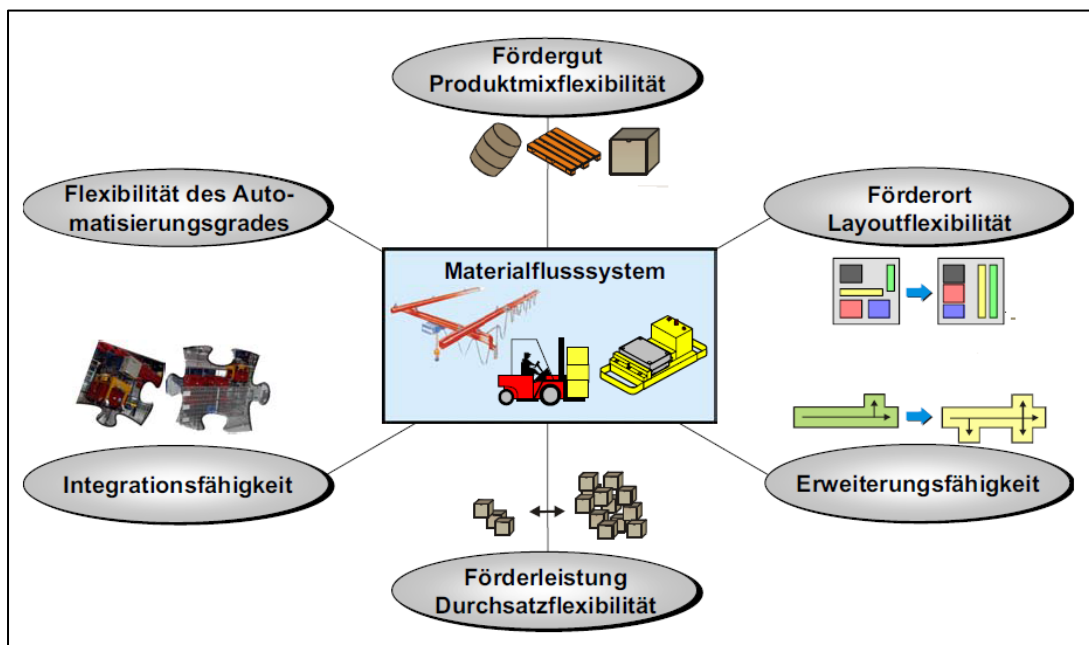


Abbildung 2.9: Flexibilitätsanforderungen an Materialflusssysteme [35]

Die folgenden Anforderungen werden an Materialflusssysteme gestellt (siehe Abb. 2.9):

- Produkt-Mix-Flexibilität:
Anpassungsfähige Materialflusssysteme können verschiedene Waren transportieren.

- **Layout-Flexibilität:**
Materialflusssystemen können verschiedene Ziel- und Quellpunkte innerhalb des Arbeitsbereiches benutzen und verschiedene Wege verwirklichen.
- **Erweiterungsfähigkeit:**
Eine Erweiterung des Applikationsbereiches des Materialflusssystems ist erforderlich
- **Durchsatz-Flexibilität:**
Geeignete Maßnahmen können nach Leistungsänderungen der Applikation ergriffen werden.
- **Integrationsfähigkeit:**
Materialflusssysteme, die auf steuerungstechnischer Seite in Applikationen integriert sind, können auch mit anderen Materialflusssystemen kombiniert werden.
- **Anpassungsfähigkeit des Automatisierungsgrades:**
Anpassungsfähige Materialflusssysteme sollen verschiedene Automatisierungsgrade sowohl auf der wahlweisen als auch auf der operativen Ebene mit den verschiedenen Aufgaben und Anforderungen entgegennehmen.

2.4 Zusammenfassung

In der vorangegangenen Darstellung wurden die Grundlagen in Bezug auf Materialflusssysteme erläutert. Dabei wurden diese schrittweise auf deren Förderfunktionen beschränkt. Mit Bezug zur Technik des Materialflusses sowie zu den technischen, steuerungstechnischen und organisatorischen Ebenen wurden die betrachteten Systeme im Verlauf dieser Arbeit eingeordnet. Zusätzlich wurden die aktuellen Entwicklungen und die Begriffe aus dem Umfeld anpassungsfähiger, automatisierter Systeme geklärt und aufgezeigt.

Kapitel 3

3 Analyse und Auswertung bestehender Materialflusssysteme

In diesem Kapitel werden vorhandene Ansätze und Techniken im Bereich der Materialflusssysteme bewertet und analysiert. Außerdem wird aus einer Übersicht zu den Fördermitteln eine Präferenz abgeleitet. Aus den in dieser Arbeit dargestellten Mängeln vorhandener Systeme wird der grundsätzliche Bedarf für weitere Optimierung abgeleitet.

3.1 Fördermittel

Aus der bisherigen Literatur sind verschiedene Systeme des Materialflusses bekannt [36]. Unterteilt werden diese nach:

- Förderrichtung: ein-, zwei- oder dreidimensional
- Automatisierungsgrad: manuell, mechanisiert oder automatisiert
- Führung: gleislos, gleisgebunden und spurgeführt
- Arbeitsprinzip: stetig oder unstetig
- Flurbindung: flurgebunden, flurfrei oder vertikal.

Die benannte Einteilung gilt, wenn deren Ordnung nach Art des betrachteten Fördermittels bzw. seiner ausgeübten Funktion abhängig gemacht wird.

Der Begriff 'Fördermittel' umfasst Maschinen, Geräte und Vorrichtungen zur Förderung von Gütern, sowie in Ausnahmefällen auch von Personen [37]. Ein Fördermittel wird in der Literatur definiert als 'Steigförderer', wenn dieser sich durch einen kontinuierlichen Massenstrom ohne Unterbrechung auszeichnet. Eingesetzt wird ein Fördermittel beim Transport großer Mengen Stückgut oder Schüttgut, wobei die beförderte Masse in ihrer Größe nicht definiert ist [38].

Technische Ausführungen werden stationär eingerichtet und verfügen über einen hohen Automatisierungsgrad. Folglich sind hier hohe Investitionen notwendig, während dagegen die Personal- und die Betriebskosten niedrig sind.

Fördermittel sind für den innerbetrieblichen und außerbetrieblichen Materialfluss erforderlich. Unterteilt werden diese in zwei Hauptkategorien, in sogenannten Stetigförderer und Unstetigförderer [39].

3.2 Unstetigförderer

Unstetigförderer sind durch eine intermittierende Förderung gekennzeichnet [40]. Hieraus ergibt sich im Vergleich zu Stetigförderern ein flächenmäßig höherer Bedarf wie auch eine gesteigerte Komplexität durch den Automatisierungsgrad. Unstetigförderer werden in der Regel geführt oder frei verfahrbar konstruiert, aber selten ortsfest [41].

Sie zeichnen sich aus durch eine hohe Anpassungsfähigkeit an zahlreichen Förderaufgaben aus. Die Realisierung verschiedener Förderaufgaben erfolgt durch eine entsprechende Dimensionierung der Fördermittel und durch eine angepasste Auswahl passender Mittel zur Lastaufnahme. Unstetigförderer sind universelle Arbeitsmittel, da eine große Menge an Zusatzgeräten für sie verfügbar ist. Das Verhältnis von Eigengewicht zur beförderten Nutzlast ist dagegen ungünstiger als bei den Stetigförderern und deutlich größer als eins [40].

Unstetige Förderer verursachen einen unterbrochenen Fördergut-Strom durch eine alternierende Bewegung der lasttragenden Teile. Das Fördergut wird vornehmlich bei Stillstand der Fördererlemente aufgenommen bzw. abgegeben [37].

Stetigförderer				Unstetigförderer		
flurgebunden				Flurfördermittel		flurfreie Förderm.
Bandförderer	Kettenförderer	Rollen- u. Kugelbahn		gleislos	gleisgebunden	Krane
Gurttförderer	Plattenbandförderer	Rollenbahn angetrieben	Schubplattformförderer	Stapler	Regalbediengerät	Beckenkran
Kurvengurttförderer	Schuppenförderer	Rollenbahn nicht angetr.	EPB/ETB	Hubwagen	Wagen	Hängekran
Teleskopgurttförderer	Kippschalenförderer	Röllchenbahn	Bodentransportsystem	Schlepper	Verschiebe-einrichtung	Stapelkran
Stahlbandförderer	Quergurttförderer	Schlepprollenförderer	Inverted P&F	FTS		Portalkran
Gliederbandförderer	Schuhsortierförderer	Rollenstauförderer		Handwagen		Drehkran
Drahtgurttförderer	Schleppkettenförderer	Kugelbahn				
Riemenförderer	Tragkettenförderer					
	Staukettenförderer					
	Schaukelförderer					

Abbildung 3.1: Fördermittelübersicht [42]

3.3 Stetigförderer

Stetigförderer sind ortsfeste oder ortsbewegliche Systeme, bei denen sich das Fördergut, wie meistens auch das Trag-Organ, auf einem festgelegten Förderweg von der Aufgabestelle zur Abgabestelle stetig mit konstanter oder schwankender Geschwindigkeit oder im Takt bewegt [43].

Aus der Gruppe der Stückgut-Stetigförderer sind die Tragkettenförderer, die angetriebenen Rollenbahnen und die Elektrohängebahnen die flexiblen Bestandteile.

Stetig arbeitende Förderer bewirken einen andauernden, also einen konstanten Fördergut-Strom, bei dem das Fördergut generell gleichmäßig über die Förderstrecke verteilt ist. Während der Bewegung der lasttragenden Teile werden diese auf- und abgegeben. Bei der Rückbewegung der lastaufnehmenden Teile zur Beladestelle erfolgt dies ohne Unterbrechung des Massenstroms, wie auch bei der Transportbewegung [37]. Die Stetigförderer stellen keine Anforderungen an hohe Gestaltungsflexibilität. Sie werden als Baukastensystem zusammengesetzt. Derartige Systeme zeichnen sich durch einen hohen Erneuerungs- und Kostenaufwand aus. Insbesondere erkennt man an den Fahrstraßen und den zugehörigen Verkehrswegen stabil eingeschränkte Restriktionen. Eine Erhöhung der Ausbringungsmenge lässt sich durch die Nutzung weiterer Ladeeinrichtungen bzw. Transportmittel bei Elektrohängebahnen erreichen, jedoch ist diese durch eine absolute Leistungsobergrenze limitiert. Zum Einsatz kommen die Stetigförderer in manueller, mechanisierter oder in vollautomatisierter Form. Die automatisierten Förderer sind dabei mit relativ hohen Kosten verbunden.

3.4 Flurgebundene Fördermittel

Die verschiedenen flurgebundenen Geräte dienen dem Transport von Paketen bzw. Waren [44]. Das am meisten eingesetzte flurgebundene Fördermittel ist hierbei der Gabelstapler, dessen Kosten ihn zu einem der günstigeren Flurfördermittel machen. Aufgrund eines flexiblen Einsatzes wird er in fast jedem Betrieb genutzt. In ihrer Anwendung erreichen Stapler eine hohe Flexibilität als manuelles Fördergerät, sie sind jedoch bezüglich der Layout-Flexibilität an Fahrgassen gebunden [45]. Manuell gesteuerte Systeme liefern die größte Flexibilität bei relativ geringen Investitionskosten. Zum Nachteil werden Einbußen in der Produktivität und fehlende quantifizierbare Kundenvorteile. Auch verursacht der Staplerbetrieb hohe Betriebs- bzw. Personalkosten, birgt ein hohes Maß an Unfall-Gefahr und führt auch zu minderer Qualität beim Fördervorgang.

Größere Einschränkungen entstehen außerdem bei Umstrukturierungen, durch die Transportwege großflächig zu verändern oder bestehende Übergabepunkte neu zu ordnen sind. Hallenbereiche auszuweiten, ist allerdings einfach möglich, da Verkehrswege bereits vorhanden sind. Zudem ist eine Erweiterungsfähigkeit des Systems in der Regel gegeben. Stapler erfüllen die Erwartungen an Durchsatz-Änderungen in einem höheren Maße als die zuvor bewerteten Stetigförderer. Dieser Durchsatz lässt sich jedoch nur bis zur maximalen Leistung steigern, wobei zusätzliche Geräte relativ einfach integriert oder höhere Auslastungen mit Hilfe organisatorischer Vorkehrungen erzielt werden können.

3.5 Automatische Flurfördermittel

Die automatischen Flurfördermittel werden in sogenannten 'Fahrerlosen Transportsystemen' (FTS) in Anspruch genommen. Diese werden auch als fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) oder Automated Guided Vehicles (AGV) benannt. Hauptmerkmale dieser Fördermittel sind deren automatische Führung ohne Einwirken von Personen und, je nach Führungsprinzip, deren Bewegung entlang realer oder virtueller Leitlinien.

Gesteuert werden die Fahrzeuge dabei automatisch durch einen Rechner [46]. In der heutigen Technik werden automatische Fördermittel in Form von Schleppern, Wagen für Transportvorgänge und von Staplern für Stapel- und Transportvorgänge gebaut.

In der Regel sind fahrerlose Transportsysteme auf wenige Ladehilfsmittel angewiesen. Aufgrund der unterschiedlichen Geometrie der Flurförderfahrzeuge kann das theoretische Potential, verschiedene Waren transportieren zu können, nicht immer genutzt werden. Eine Layout-Änderung ist bei ihnen vorteilhafter als bei den Stetigförderern, dennoch gibt es auch hier Verbesserungspotential. So ist im Vergleich zu den Stetigförderern eine einfachere Erweiterung möglich, wobei die Flexibilität der manuellen Flurförderer jedoch nicht erreicht werden kann. Wie auch bei den manuellen Flurförderern kann eine Steigerung der Verarbeitungsmenge durch weitere Transportgeräte oder auch durch organisatorische Maßnahmen erreicht werden. Eine Installation gestaltet sich komplexer als bei Staplern, jedoch einfacher als bei Stetigförderern. Die Anforderung einer Verarbeitungsmengenflexibilität wird nicht vollständig erfüllt. Der Automatisierungsgrad der fahrerlosen Fahrzeuge, d.h. das Verhältnis der Anzahl der automatisierten Schritte zur Gesamtzahl der Fertigungsschritte, kann nicht variiert werden. Sie sind aufgrund der komplizierten Installationsweise in die Leitsysteme eingebaut und verursachen hohe

Investitionskosten. Dies hat zur Folge, dass die fahrerlosen Transportsysteme in geringerem Maße integrationsfähig und flexibel hinsichtlich des Automatisierungsgrades sind.

3.6 Schleppkreisförderer

Der Schleppkreisförderer ist den Zweibahnkreisförderern zuzuordnen. Hierbei können Weichen eingebaut und somit Übergänge der Gehänge auf unterschiedliche Förderkreisläufe geschaffen werden. Eine Trennung zwischen Trag- und Zugelementen ist jederzeit möglich. Ebenso besteht die Möglichkeit, dass auf einen Antrieb verzichtet wird. Der Transport erfolgt dann manuell durch anschieben oder auch mittels der Schwerkraft [47].

Häufig werden die Schleppkreisförderer auch als „Power-and-free-Förderer“ bezeichnet. Das besondere ist, dass hier ein ständiger Umlauf der Zugkette mit eigenen Fahrzeugen und Schienen stattfindet. Unterhalb dazu verlaufen weitere Schienen, an denen entlang sich die Lastgehänge bewegen. Somit es leicht möglich, dies nach Bedarf an- oder abzukoppeln oder auf Nebenbahnen umzuleiten [48].

Das Prinzip des Schleppkreisförderers besteht also aus der Kombination von Kreisförderketten (Power) und Rollgehängen (Free). Durch seine besonderen Konstruktionseigenschaften können die Förderwege sehr freizügig miteinander kombiniert werden. Gefördert werden können Stückgüter beliebiger Art. Die maximale Nutzlast von bis zu 1 t ist ebenfalls aufgrund der besondere Kombination aus eigener Bahn Free Bahn und laufenden Lastgehänge möglich. Die genaue Nutzlast ist dabei von der Anzahl der tragenden Achsen abhängig [48].

3.7 Flurfreie Fördermittel: Elektrohängebahn

Die Elektrohängebahn (EHB) liefert ein flexibles und effizientes Transportsystem [42]. Ihr Hauptmerkmal ist das flurfreie Fördern und sie gehört heutzutage zu den meist eingesetzten Materialflusssystemen. Durch eine EHB kann die Bodenfläche sinnvoll genutzt werden. Eine EHB ist ein schienengebundenes Fördermittel und meistens unter der Hallendecke angebracht [49]. Auf den Schienen fahren jeweils individuell angetriebene Fahrzeuge. Die Stromversorgung der Motoren erfolgt dabei über eine in den Schienen integrierte Stromführung. Mittlerweile ist es bei EHBs keine Seltenheit mehr, dass diese die Funktionen Heben, Senken, Drehen, Schwenken und Greifen erfüllen. Dadurch erhöht sich ihr

Anwendungs- und Einsatzbereich. Das Transportgut, welches früher mit dem Fahrzeug verbunden war, wird heute von diesem getrennt und zwischengelagert. Das kapitalbindende EHB-Fahrzeug ist somit nur noch beim reinen Transport gebunden und kann daher schneller wieder in den Produktionsprozess integriert werden. Dieses System hat sich zu einem intelligenten Transportmittel im innerbetrieblichen Materialfluss entwickelt, denn dort zeichnet sich ein Elektrohängebahnsystem durch Flexibilität in Einsatz und Wirtschaftlichkeit aus.

3.8 Übersicht der Mängel und Ableitung des Handlungsbedarfes

Existierende Materialflusssysteme weisen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit Stärken und Schwächen im Bereich von Transportsystemen auf. Die bisher aufgeführten Auswertungen zeigen, dass die Materialflusssysteme, die einzelnen Anforderungen erfüllen und für alle eine berechnete Lösung aufweisen. Darüber hinaus bestehen jedoch gewisse Mängel, die eine Implementierung erschweren bzw. verhindern:

- Stetigförderer kennzeichnen hohe Förderleistungen, die jedoch nicht für alle Transportsysteme gelten.
- Stapler sind im Vergleich zu anderen manuellen Fördergeräten flexibler.
- Fahrerlose Transportsysteme sind flexibel, jedoch flurgebunden. Transportsysteme sind flexibel, jedoch flurgebunden.

Kapitel 4

4 Stand der Technik für flexible, flurfreie Materialflusssysteme

In der heutigen Technik spielen flurfreie Transportanlagen eine große Rolle. Im Folgenden Teil dieser Arbeit werden für automatisierte Kräne und EHB Sicherheitsforderungen, aktuelle Forschungsarbeiten, deren Einsatzfelder und Anwendungen sowie steuerungstechnische Aspekte erläutert.

4.1 Eigenschaften des flurfreien Materialtransports

Die Charakteristik und Problematik der flurbasierten bzw. flurfreien Installation ist sowohl für Hersteller als auch für Nutzer von Bedeutung. Systemwahl und –auslegung obliegen dabei der involvierten Planungsinstanz, die zwischen den verschiedenen Varianten vor der Ausführung abwägt und diese anschließend umsetzt. So ist die Unterscheidung zwischen flurgebundenen und flurfreien Materialflusssystemen folgendermaßen definiert:

- Während flurgebundene Fördermittel die Verkehrswege am Boden nutzen oder auf dem Boden montiert sind, werden als flurfrei nur diejenigen als Fördermittel bezeichnet, die fast keine Bodenfläche beanspruchen und an den Wänden, an der Decke oder an wenigen Stützen (Bsp.: Portal- oder Drehkräne) montiert sind [29].

Die Fördermittel, welche normalerweise am Boden montiert sind, können von der Decke abgehängt und über der Produktionsebene geführt werden. Um dies zu verwirklichen, sind zusätzlich Vertikalförderer für die Positionierung wie z. B. Aufzüge, Etagenförderer oder Hubstationen erforderlich. So wird beispielsweise in der Automobilbranche aufgrund sehr beengter Platzverhältnisse bevorzugt eine Endmontage-Belieferung gewählt.

Kriterien des flurfreien Materialflusses [29]:

- Hohe Überschaubarkeit durch Trennung von Produktions- und Materialflussebene.
- Im Produktionsbereich sind die Wege für den Materialtransport nicht von Bedeutung; daher niedrige Verkehrsflächen in den Produktionsräumen.
- Zusätzliche Materialflussebenen erfordern höhere Hallen und definierte bauliche Voraussetzungen (Wand- und Deckenkonstruktionen etc.).

- Aus Sicherheitsgründen sollten automatisierte Anlagen in abgesperrten Bereichen arbeiten. Abgetrennte Transport- und Personenwege führen zu weniger Störfällen.
- Zwischendecken bei Elektrohängebahnen oder Umzäunungen gesamter Bereiche bei Kränen stärken die Sicherheit und vermindern die Unfallquoten.

Für flurfreie Fördersysteme werden in der Regel Kräne und Hängebahnen mit best-performance eingesetzt. Ungeeignet sind hier die restlichen Materialflusssysteme wie z. B. Kreisförderer, Schleppzugförderer, Seilhängesysteme etc., da aufgrund der fest installierten Fahrstraßen in jedem Änderungsfall größere Umbaumaßnahmen als vergleichsweise bei Kränen oder Hängebahnen erforderlich werden.

4.2 Stand der Technik von Elektrohängebahn

Im Folgenden werden für automatisierte Kräne und EHB Sicherheitsforderungen, aktuelle Forschungsarbeiten, Einsatzfelder, Anwendungen und steuerstechnische Aspekte erläutert. Dies verdeutlicht, dass die konstruierten Komponenten auf dem Markt existieren. Durch die Modernisierung der Technik wird eine Entlastung der Mitarbeiter ermöglicht.

4.2.1 Übersicht

Für flexible Fertigungsstraßen und Montagelinien werden überwiegend Elektrohängebahnen verwendet. Die Unterteilung erfolgt in Sortier-, Speicher- und Verteiler-Transport. Die EHB bewältigt alle individuellen Transportaufgaben problemlos und ist meistens in ungenutzten Hallenebenen befestigt. Die Bodenfläche kann somit parallel zum Transportbetrieb als Arbeitsfläche genutzt und für die Produktion bereitgestellt werden. Das Konzept soll sowohl eine hohe Anpassungsfähigkeit wie auch hohe Zuverlässigkeit hervorbringen. Die Aufnahmevorrichtung kann so angepasst werden, dass verschiedenartige Produkte transportiert werden können. Wie zuvor erläutert, ist die EHB sehr anpassungsfähig und kann geänderten Aufgabenstellungen durch Erweiterungen angepasst werden.

Steuerungsaufgaben, wie Blockstellensteuerung, Näherungs- und Zielsteuerung, werden durch standardisierte und kundenorientierte Elektrik-Konzepte erfüllt. So können verschiedene Quellpunkte mit verschiedenen Zielpunkten gekoppelt werden. Elektrohängebahnen transportieren Produkte über längere Distanzen und erreichen hohe Leistungen. Kurven, Drehscheiben oder Hubstationen ermöglichen neben geraden Fahrschienen, eine flexible Linienführung. Durch ihren modularen Aufbau sind die

Anwendungsgebiete der EHB vielseitig und werden deshalb in breiten Möglichkeiten eingesetzt. Sie sind universelle Materialflusssysteme und in allen Bereichen der Industriebranchen einsatzfähig, so beispielsweise in der Automobilbranche, im Catering Bereich von Flughäfen, in Vorzonen von Hochregallagern oder in Kommissionierbereichen. Elektrohängebahnen besitzen vielfältige Vorteile, vor allem bei steigender Komplexität der Anforderungen. Der innerbetriebliche Warenverkehr kann durch sie effektiv konzipiert werden, da die EHB eine äußerst vielseitige und leistungsfähige Eigenschaft besitzt, nämlich ein integriertes Steuerungssystem, das mit einer Zentralsteuerung verknüpft ist und somit einen optimalen Materialfluss bei größtmöglicher Flexibilität ermöglicht. Die Zentralsteuerung beinhaltet Fahrwerksfunktionen wie Fahren, Halten, Heben, Geschwindigkeitsregelung, Aufnahme oder Abgabe etc.. Die Zuordnung und Verwaltung von Fahraufträgen sowie ein Mitführen von Prozessdaten zur Materialflussteuerung werden durch eine permanente oder variable Codierung der Laufwerke ermöglicht. Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile von EHB aufgelistet:

Tabelle 4.1: Vor- und Nachteile von Elektrohängebahnsystemen [42]

Elektrohängebahn	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • flexible Linienführung 	<ul style="list-style-type: none"> • die komplexen Einzelantriebe sind sehr störanfällig
<ul style="list-style-type: none"> • gute Automatisierungsmöglichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • festgelegter Transportweg
<ul style="list-style-type: none"> • gute Erweiterungsmöglichkeit bei bestehenden Anlagen 	<ul style="list-style-type: none"> • eingeschränkter Traglastbereich
<ul style="list-style-type: none"> • Fahrrichtungswechsel möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • nicht geeignet zum Transport explosiver und aggressiver Materialien
<ul style="list-style-type: none"> • geräuscharmer Transport 	

Elektrohängebahnen kommen zum Einsatz, wenn der Materialtransport über längere Strecken erfolgen muss und wenn ein hoher Automatisierungsgrad erforderlich ist. Damit die Bodenfläche als Produktions- und Arbeitsfläche genutzt werden kann, werden Elektrohängebahnen an die ansonsten ungenutzten Hallendecken angebracht und bieten dort ein geräuscharmes, effizientes Transportieren, Sortieren, Speichern, Puffern und Bereitstellen von Gütern und Waren. All diese Funktionen können über Steigungen und Gefälle integriert

werden. EHB-Fahrzeuge sind dabei ausgezeichnet durch exakt bestimmbare Positionierungen. Hub-/Senkstationen oder Bauteilheber dienen dazu, Fertigungsanlagen und Montagelinien reibungslos anzubinden. Nach [50] werden Hängebahnen charakterisiert als einzeln angetriebene, flurfreie Fahrzeuge, wodurch sie für die Verbindung verschiedener Zielpunkte geeignet sind. Je nach Anforderung können die Fahrschienen angepasst werden. Die EHB besteht aus einem Schienensystem, welches eine Schleifleitung beinhaltet. Diese dient als Strom- und Informationsleitung und versorgt die Fahrzeuge mit Strom und Steuerinformationen.

Einfach formuliert können Elektrohängebahnen als Baukastensysteme dargestellt werden, welche die Komponenten Schiene, Weiche, Hub-/Senkstation, Drehscheibe und Kreuzung enthalten. Herstellerunabhängig lassen sich Elektrohängebahnen und deren Komponenten wie folgt beschreiben [29]:

- Die Fahrschiene hat die Aufgabe, verschiedene Zielpunkte zu verbinden. Dies kann in unterschiedlichster Form erfolgen, wie z. B. kurvenförmig oder gerade. Mit der Ausnahme von vertikal-gängigen Hängebahnen werden die Schienen überwiegend horizontal oder mit niedrigen Steigungen montiert. Die Profile werden bezüglich der möglichen Fahrzeuganbindungen in Innen-, Außen- und Oberläufer [2], ohne und mit Schleifleitung differenziert. Oberläufer haben ihre Antriebsrollen auf dem Obergurt der Laufschiene. Verzweigungen, Weichen, Drehscheiben oder Kreuzungen sind für den Aufbau einer EHB unverzichtbar. Um die Abnutzung zu vermindern, können wahlweise auch berührungslose Formen der Energie- und Informationsübertragung benutzt werden.
- Der Antrieb des Fahrzeugs erfolgt durch einen elektrischen Getriebemotor, wobei die Antriebskraft durch Reibschluss auf die Laufschiene übertragen wird. Allgemein besteht das Fahrwerk aus den folgenden Komponenten: Elektromotor mit Getriebe, Antriebsrollen, Gegendruckrollen und Bremsvorrichtung.
- Schienen sind Trag- und Führungselemente. Der Belastungsbereich liegt zwischen 300 und 1200 kg, wobei der Laufradabstand von großer Bedeutung ist. Durch verschiedene Linienführungen erreichen Kurven und Steigungen Überhöhungen bis zu 3°. Schienenverbinder und Stromschienen werden mit Hilfe von Klemmverbindungen an die Laufschiene montiert. Zum gegenwärtigen Stand der Technik werden Fahrschienen meistens aus Stahl oder auch aus Aluminium angefertigt.

- Lastaufnahmeeinrichtungen werden entweder manuell oder automatisch eingerichtet. Die Abhängigkeit liegt allein in der Anlagenautomatisierung, wobei diese Vorrichtungen in vielen Fällen individuell angefertigt werden. Die Förderleistung wird bei der Lastübergabe nachhaltig beeinflusst. Aufgrund dieses Problems sollte dieser Vorgang aus dem eigentlichen Materialfluss hinaus auf Parallelstrecken eingebaut werden.
- Um die Ebene einer Elektrohängebahn mit der Produktionsebene zu kombinieren, werden Umsetz-Einrichtungen, Etagenförderer oder Hub-/ Senkstationen eingesetzt. Der Unterschied besteht in Ein- und Zweisäulengeräten, die häufig am Boden platziert werden, da die Regelungen zur flurfreien Integration effiziente Deckenkonstruktionen erfordern. Gegen Anschläge in der oberen und unteren Endlage wird die Hubbewegung angewandt und über Schienen, Seilverspannungen, Teleskop- oder Scherensysteme geführt. Als Tragelemente kommen Gurte, Ketten oder Seile zum Einsatz. Der überwiegende Anteil der umgesetzten Systeme basiert auf verschiedenen individuellen Integrationsanforderungen, so dass unterschiedliche Vorgaben in Bezug auf Ersatzteile und Steuerungen gelten. Diese beruhen beispielsweise auf den Vorschriften der Automobilhersteller.
- Die Komponenten eines Elektrohängebahn-Fahrzeuges sind in erster Linie der Reibrad-Antrieb sowie ein angehängtes Trageteil, an dem das Lastaufnahmemittel angebracht ist. Dieses Fahrzeug besitzt eine eigene Steuerung und ist mit berührungslosen Auffahrsicherungen wie z. B. Initiatoren, Lichttaster, Ultraschallsensoren etc. ausgerüstet.
- Die Fahrzeugsteuerung kann folgendermaßen gegliedert werden: Ansteuerung der Antriebseinheit, Überwachung des Motors, Überwachung weiterer elektrischer Komponenten und die Auffahrsicherung. Die Anzahl der Übergabestellen ist in Relation zu den Fahrzeugen eher gering und der Vorgang der Lastübergabe ist aus diesem Grund in die Vertikal-Umsetzeinrichtungen bzw. Hubstationen eingebettet. Deshalb verfügen diese Fahrzeuge über kein Hubwerk.
- Einer der wichtigsten Bestandteile von Elektrohängebahnen ist ihre Steuerung. Diese kann entweder manuell über mitfahrende Steuerschalter oder automatisch erfolgen. Der Aufbau einer automatischen Steuerung wird so ausgerichtet, dass vor einem Verzweigungselement oder einem Entscheidungspunkt ein Zielkennzeichen für die Fahrsteuerung abgefragt wird. Die Entscheidung, welcher Fahrweg geschaltet bzw. freigegeben wird, übermittelt entweder eine zentrale oder eine

dezentrale Steuerung [51]. Als Zielkennzeichen kann z. B. ein natürliches Merkmal (Geometrie, Gewicht), ein mechanisches Merkmal (Schalter, Nocke), ein optisches Merkmal (Strichcode) oder ein elektronisches Merkmal (Transponder) genutzt werden. Über Schleifleitung oder über Funk können die erforderlichen Steuerungsbefehle geführt werden, wobei zwischen induktiven und infraroten Signalen unterschieden wird. Für die Steuerung der Elektrohängebahnen werden Handsteuerungen und vor allem speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) bevorzugt. Die Steuerung bei Elektrohängebahnanlagen hat die Funktion die Fahrzeuge zum Ziel zu führen. Eine weitere Aufgabe ist die Vermeidung von Kollisionen [52]. In der heutigen Technik stellen komplexe Materialflüsse keine Probleme mehr dar. Sie werden durch intelligente Anlagensteuerung bewältigt. Durch die Leitsteuerung werden Aufgaben wie Geschwindigkeitsreduzierung im Schwachlastbetrieb oder das Parken nicht benötigter Fahrwerke automatisch angewählt. Die Leitsteuerung der EHB kann auch durch SPS und Materialflussrechner (MFR) ersetzt werden. Ein schaltschrank-integrierter Industrie-PC steuert den Materialfluss und ist für die Auswertung digitaler Eingänge sowie die Aussetzung der Ausgänge zuständig. Kurze Reaktionszeiten werden durch permanente Datenkommunikation über einen CAN-Stromschienenbus ermöglicht. Dies führt zu einer kontinuierlichen Anpassung von Materialflusstategien. Eine umfassende Fahrwerk-Diagnose erfolgt über eine bidirektionale Datenkommunikation, deren Programm- und Parameter-Download mithilfe des Stromschienenbusses erfolgt. Weiterhin werden eine Layout-spezifische Geschwindigkeitsveränderung und eine Positionierungsgenauigkeit in Fahrtrichtung der Fahrzeuge durch ein Barcode-Band gewährleistet. In industriellen Steuerungssystemen ist die speicherprogrammierbare Steuerung von großer Bedeutung, da der Aufbau anwenderfreundlich und bereichsübergreifend funktional angelegt ist. Dieses Steuerungssystem besteht aus einem Netzteil, einem Steuerungsprozessor sowie aus Ein- und Ausgangskarten. Signalbaugruppen werden durch ihre Art und Anzahl individuell definiert, wobei diese Gruppen von der Anzahl der Aktoren und Sensoren der zu steuernden Anlage abhängig sind. Zudem existieren Kommunikations- und Funktionsbaugruppen, die zusätzlich verbaut werden können. Insgesamt können Steuerungssysteme individuell aufgebaut werden, da sie über einen modularen Aufbau verfügen.

- Roboter haben bestimmte Teilaufgaben und werden folgendermaßen unterteilt:

- Fahrzeug: Roboter werden von Ort zu Ort bewegt. Dafür ist das sogenannte Fahrzeug zuständig, um den Roboter über das gesamte System zu bewegen. Industrieroboter können auf das Fahrzeug verzichten. In diesem Fall bleiben diese stationär und können nur in den durch ihre Position festgelegten Arbeitsbereichen agieren (siehe Abb. 4.1).
- Effektor: Der Endpunkt des Roboterarmes wird als Effektor bezeichnet und kann in verschiedenster Art ausgestaltet werden, so z. B. als Greifer, Bohrer, Lötspitze etc.. Diese Werkzeuge besitzen einen Tool Center Point (TCP), wodurch das Werkzeug-Koordinatensystem festgelegt wird. Es hat seinen Ursprung in diesem Punkt und für die Positionsberechnung ist er von großer Bedeutung (siehe Abb. 4.1).
- Roboterarm: Ein Roboter ist aus mehreren Achsen bzw. aus mehreren Gliedern zusammengesetzt, welche mit Gelenken verbunden sind und sich translatorisch oder rotatorisch bewegen können. Die erwähnten Achsen werden dabei in Haupt- und Nebenachsen unterschieden. Die Aufgabe der Hauptachse ist eine zielpunktnahe Positionierung des Effektors. Während die Nebenachsen zur Feinpositionierung und zur Orientierung des Effektors dienen (siehe Abb. 4.1).

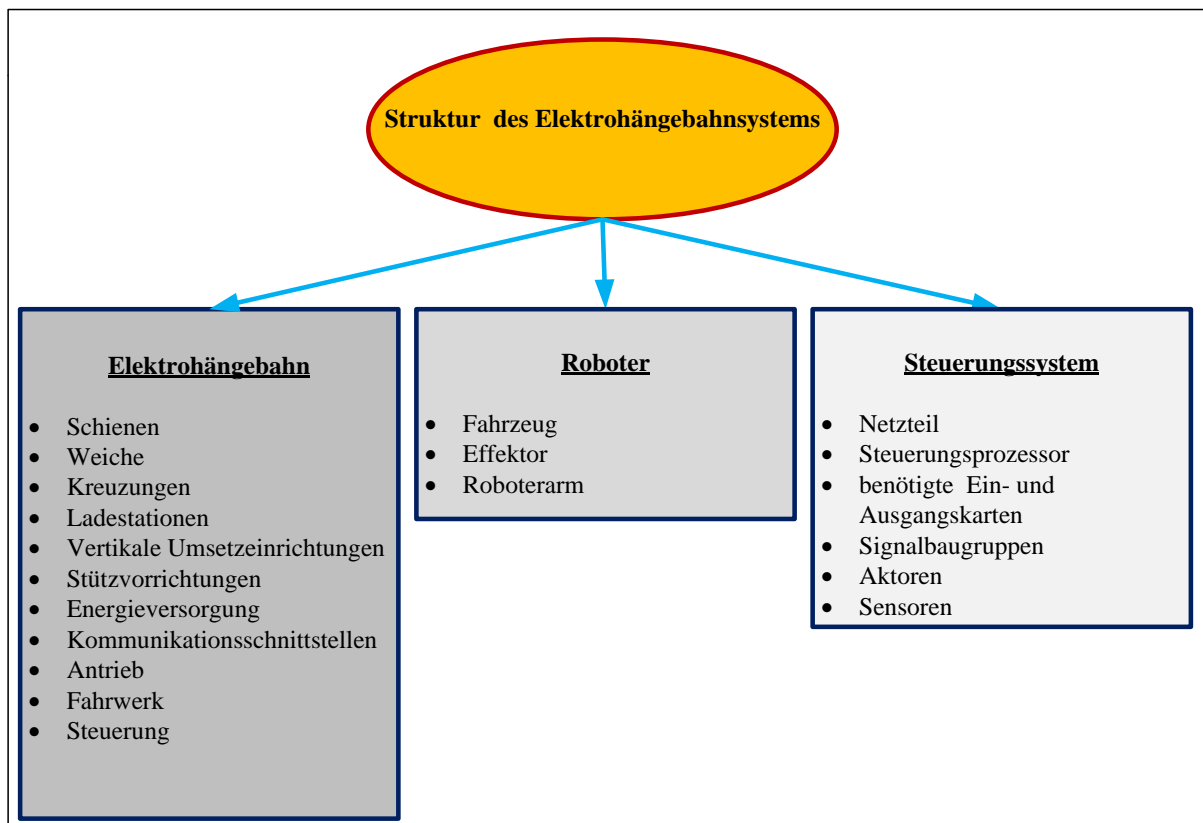


Abbildung 4.1: Struktur des Elektrohängebahnsystems

- Die Unterteilung der EHB erfolgt in Blockstrecken, je nach deren Funktion, Größe oder geforderter Sicherheit, wobei immer nur ein Fahrzeug einen definierten Abschnitt durchfahren darf. Nach [53] werden spezielle Schaltungen aufeinander folgender Stromschienen-Segmente eingesetzt. Dies bedeutet, dass das vorausfahrende Fahrzeug das hinterher fahrende anhält. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, die Fahrzeuge eines Hängebahnsystems in verfahrbare Kranbrücken eines Hängekrans einfahren zu lassen, um eine flächendeckende Versorgung zu gewährleisten.

4.2.2 Sicherheitsanforderungen

Im Gegensatz zu anderen Materialflusssystemen haben Elektrohängebahnen zusätzliche Sicherheitsanforderungen wie Regelwerke und Vorschriften. Diese Anforderungen werden im Fachausschuss Sicherheitsregeln für Schienenhängebahnen zusammengestellt und finden Anwendung auf Schienenhängebahnen für den Materialtransport inklusive Tragkonstruktionen, Schienensysteme, Fahrzeuge, Vertikal-Umsetzeinrichtungen und Fahrwerke mit Hubeinrichtungen [54].

Wichtige Vorschriften und Richtlinien für Elektrohängebahnen sind:

Tabelle 4.2: Vorschriften und Richtlinien für Elektrohängebahnen

Bezeichnung	Inhalt
[50]	Hängebahnen
[2]	Elektrohängebahn; Obenläufer, Traglastbereich 500 kg; Anforderungsprofil an kompatibles System
[55]	UVV Schienenbahnen
[54]	Sicherheitsregeln für Schienenhängebahnen
[56]	Sicherheitsregeln für Vertikal-Umsetzeinrichtungen

- Die Personen dürfen die Gefahrstellen zwischen kraftbetriebenen Teilen der Schienenhängebahn und festen Teilen der Umgebung im Arbeits- und Verkehrsbereich nicht betreten. Ist dies nicht zu vermeiden, müssen Maßnahmen wie z. B. Verkleidungen, Lichtschranken etc. angebracht werden.
- Zwischen Fahrzeugen untereinander und zwischen Fahrzeugen und Umgebung sind Sicherheitsabstände unter Berücksichtigung der Pendelbewegungen mit einem

Wert von 0,5 Metern existieren verpflichtend. Dies gilt in allen Arbeits- und Verkehrsbereichen von Personen.

- Unterhalb von Fahrzeugen einschließlich der angehängten Transportgüter gilt ebenfalls ein Sicherheitsabstand von 0,5 m. Über ständigen Arbeitsplätzen, welche für Personen für die dort auszuübenden Tätigkeiten ständig eingerichtet sind, und an Verkehrswegen, die dem Personenverkehr dienen, beträgt der Sicherheitsabstand 2,5 m.
- Sicherheitsvorkehrungen gegen herabfallendes Transportgut sind von großer Bedeutung. Maßnahmen wie z. B. geeignete Lastaufnahmemittel, aushängesichere Aufhängungen, formschlüssige Lastverklammerung, Unterfangungen oder Umwehrung des Arbeitsbereiches verringern die Unfallquoten.
- Das Vorhandensein von Not- und Befehlseinrichtungen ist im Arbeits- und Verkehrsbereich und besonders im Bereich von Lastübergabestellen sehr wichtig.

Die Unterschiede der Sicherheitsanforderungen zwischen Krananlagen und Schienenhängebahnen sind gering. Insbesondere Sicherheitsvorkehrungen, wie Sicherheitsabstände, Geschwindigkeitsreduzierung oder Vorkehrungen, die ein Herabfallen von Transportgütern verhindern, ermöglichen den Aufenthalt von Personen im Bahnbereich und stellen selbst keine weiteren Gefahrenquellen dar.

4.2.3 Einsatzfelder und Applikationen

Der Einsatz von Elektrohängebahnen ist vielseitig. Eine weit bekannte Elektrohängebahn ist jene mit 3,5 km Länge im Europa-Logistikzentrum. Die Bewegung der abrufbereiten Warenladung erfolgt auf Schieberohr-Förderanlagen, welche aus kostengünstigen Wasserrohren bestehen und im Erdgeschoss verpackt werden. Diese sind für den schonenden Hängeversand von Folien-Verpackungsautomaten gut geeignet. Die Firma hat ihren Sitz in Dortmund und beliefert aus ihrem dortigen Logistikzentrum ganz Europa mit Produkten, deren Kommissionieranteil sehr hoch ist. Das Europa-Logistikzentrum ist das größte seiner Art in Europa. Es besteht aus fünf HRL-Silos, die auf 500.000 Paletten-Stellplätze verteilt sind und das 68 Regalbediengeräte versorgt. Der Transport erfolgt über eine rund 3,5 km lange EHB mit 272 Fahrwerken für Nutzlasten von bis zu 800 kg [57].

Ein anderes Unternehmen aus Böblingen, welches sich in den Bereichen Oberflächentechnik, Materialfluss-Automation, Umwelt- und Thermoprozesstechnik spezialisiert hat, übernimmt Transportaufgaben und bedient zudem nach dem Ware-zum-Mann-Prinzip 48 Pick-Bahnhöfe

mit insgesamt 384 Kommissionierplätzen. Die Mitarbeiter haben dort die Aufgabe, die Produkte auf den bereitgestellten Versandpaletten zu kommissionieren. Die Fahrwerke der EHB-Fahrzeuge sind ausgestattet mit einem Display, auf dem die Kommissionieraufträge nach dem Pick-by-Light-Prinzip angezeigt und die erledigten Aufträge bestätigt werden.. Durch automatische Verschiebewägen und Liftstationen werden die fertig kommissionierten Paletten zum Versandbereich transportiert [57].

Das Pick-by-Light-Prinzip hat aufgrund der hohen Kommissionierleistung großes Potenzial, um auf dem Markt bestehen zu bleiben. Eine Verbindung des Prinzips mit einer Elektrohängebahn bietet eine effektive und effiziente Abwicklung logistischer Abläufe. Das Ziel, in kürzerer Reaktionszeit auszuliefern, wird mit Hilfe des Elektrohängebahnsystems erreicht, denn es ermöglicht einen Durchsatz von über 300 Paletten pro Stunde. Des Weiteren unterstützt es den Anspruch nach kürzeren Lieferzeiten bei allen Prozessen - vom Ausgangspunkt bis zum Ende der Lieferkette, d. h. vom Logistikzentrum bis zur Filiale [57].

In der Automobilindustrie verwendet man die Elektrohängebahn des Typs KB 180 mit einer Traglastkapazität von 1.500 kg und einer maximalen Geschwindigkeit von 150 Metern pro Minute. Diese Fahrzeuge können Gefälle von bis zu 45° überbrücken [57].

Die Elektrohängebahn KB 240 kann über 10.000 kg Last befördern und erreicht dabei eine Geschwindigkeit von 60 m/min. Die Firma A verwendet diese Technik für den Transport von Wohnmobilen und Caravans, die Firma B beim Transport tonnenschwerer Papierrollen [57].

Auch diese Anlagen beanspruchen das Einsatzspektrum von EHB wie von Power-And-Free-Systemen [57].

An vielen Flughäfen werden Fördermittel eingesetzt, um Produkte wie z. B. Getränke, Speisen, Trolleys, Duty-Free-Artikel, Zeitungen etc. zu den Flugzeugen zu transportieren. In Gersthofen wurde im Jahre 2008 ein Hochregallager zusammengestellt, das sich in vielen Bereichen automatisch bedienen lässt. Die dortige EHB ist 1,6 km lang und besitzt 130 Fahrwerke. Pro Tag sorgt sie bei nahezu 20.000 Transporten für die Versorgung der Flugpassagiere. Auf Geschwindigkeit und auf Hygiene wird bei solchen Prozessen großer Wert gelegt. Aus diesem Grunde hat der Hersteller eine besondere Lösung entwickelt, um den Reinigungsprozess der Trolleys zu ermöglichen. Die Entwicklung eines abkoppelbaren Gehänges sorgt während der Reinigung der Trolleys dafür, dass die Gehänge der EHB-Fahrwerke abgekoppelt werden, um mit der Ladung durch eine Waschstraße zu fahren. Abschließend erfolgt die Ankopplung automatisch [58].

Ein Ergebnis der Befragung zeigt die typischen Aufgabenfelder von Elektrohängebahnen [59]:

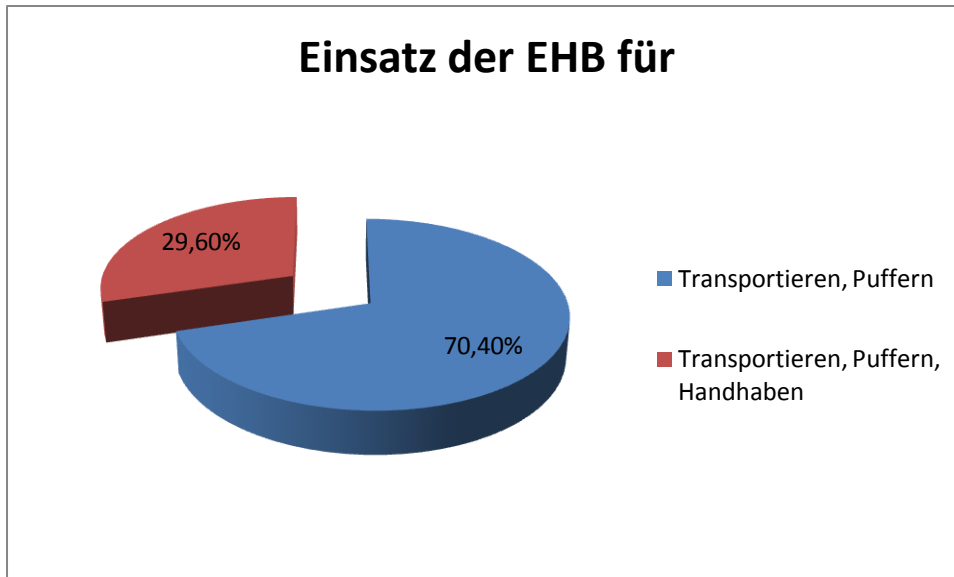


Abbildung 4.2: Aufgabenfelder von Elektrohängebahnsystemen

Es ist zu erkennen, dass die Aufgabenfelder der Elektrohängebahnen immer noch zu ca. 70 % im Bereich des Transportes und Pufferns liegen (siehe Abb. 4.2).

Elektrohängebahnen besitzen den Vorteil, dass sie in der Regel in einer separaten Förderebene operieren und somit keine Produktionsfläche beanspruchen. Die zunehmende Verbreitung von EHB beruht auf ihrer flexiblen Steuerbarkeit sowie auf ihrer Fähigkeit, einfach mit anderen mechanischen Baugruppen kombiniert werden zu können [60].

Veröffentlichte Arbeiten decken ein breites Spektrum des Einsatzes von Elektrohängebahnsystemen ab.

Diese fokussieren Großanlagen mit Aufgaben der Massengut-Förderung über und unter Tage, Einsatzfelder in der Gießereitechnik und im Personentransport bis hin zu Postbeutel-Beförderung und zu Aktentransport-Systemen als vielerlei Möglichkeiten, fahrzeuggestützte Fördersysteme zu verwenden [59].

Der überwiegende Teil der Veröffentlichungen ist allerdings dem Bereich des innerbetrieblichen Transportes zuzuordnen und befasst sich mit Elektrohängebahnsystemen, die in ihrer system-technischen Basisausführung der [2] entsprechen.

Meist werden sie in der industriellen Mittel- und Großserienfertigung angewandt, vorwiegend aber in der Automobilindustrie [61]. Sie werden eingesetzt als einzeln steuerbare Fahrzeuge für Transporte zwischen Lager- und Fertigungsbereichen [62], um räumlich getrennte Produktionsstätten zu verknüpfen [63], [64], als Zubringer für die Montage [65] oder als fahrbarer Montagearbeitsplatz [66].

Mit Blick auf das Datum der Publikationen stellt man im Zeitablauf stark veränderte Inhalte fest. Während die Artikel aus den 70er Jahren vorwiegend die Vor- und Nachteile zum

KonkurrenzsysteM Power und Free Förderer [67], [68] sowie die Entwicklung der zugehörigen Weichen, Aufzüge und Übergabestationen [69] beschrieben, geht es in späteren erschienenen Veröffentlichungen um Sonderausführungen der EHB Fahrzeuge, die hinsichtlich Lastaufnahmemitteln [70], [71], [72], Verkettung mit anderen Fördermitteln [73] oder partiellen Leistungssteigerungen, z. B. der Steigfähigkeit [74] verbessert wurden.

Auffallend ist, dass die meisten der beschriebenen Anlagen die in der VDI-Richtlinie als Ausgangsbasis implizierten Minimalanforderungen des Transportierens und Pufferns bei weitem überschreiten. Unter dem Aspekt, Hängebahntechnik bei systematischer Vorgehensweise weiterzuentwickeln, wozu umfassende Untersuchungen eingesetzter Maschinenelemente der Lauf- und Fahrwerke im Gesamtzusammenhang der Systemtechnik von Elektrohängebahnen nötig wären, ist festzustellen, dass bislang nur wenige Arbeiten hierzu durchgeführt wurden [59]

Die im Rahmen der Forschungsaktivität durchgeführte Recherche ergab, dass auf der Homepage des Deutschen Patent- und Markenamts insgesamt 108 Ergebnisse zum Suchwort „Elektrohängebahn“ erzielt werden können [75]. Die hier gefundenen Patente auf Elektrohängebahnen beruhen aber ausschließlich auf Schienensystemen. Sie beziehen sich teilweise auf Systeme mit berührungsloser Energie- und Datenübertragung und sind teilweise mit Positionsvorrichtungen versehen, die für die Fahrzeuge der Elektrohängebahnen relevant sind. Des Weiteren wurde auch ein Antrieb für das Fahrzeug der Elektrohängebahn erfunden. In Bezug auf die Umsetzung von Weichen für Elektrohängebahnen konnten ebenfalls verschiedene Ergebnisse gefunden werden. So bestehen bspw. Vorrichtungen als Weichen, die mittels einer pendelnden Drehbewegung geschaltet werden. In anderen Fällen wird z. B. mit einer senkrecht zur Fahrebene ausschwingenden Weiche gearbeitet [75].

Ein interessantes Anwendungsfeld bezüglich des Transports von Waren stellt der Einsatz von unbemannten Drohnen dar. Diese Technologie „steckt allerdings noch in den Kinderschuhen“ und kann zum jetzigen Zeitpunkt eher noch als Zukunftsvision betrachtet werden. Dennoch gibt es auch hier erste visionäre Forschungsprojekte.

Unter dem Einsatz von Drohnen mit kleinen Rotoren wäre es möglich, ca. 2,5 kg Nutzlast zu transportieren und pro Lieferung ca. 16 km zurückzulegen. Zwar gibt es innerhalb der Drohnentechnik schon einige Vorteile zu verbuchen, es bestehen aber noch erhebliche Hürden und Sicherheitsbedenken.

Ein Paketdienstunternehmen hat in diesem Kontext ein eigenes Forschungsprojekt durchgeführt und den Einsatz eines sogenannten, „Paketkopters“ getestet. Hierbei handelt es sich um eine Lieferdrohne mit dem Ziel der autonomen Paketlieferung [76], [77]. Dies

könnte perspektivisch bspw. im Rahmen der Auslieferung von eiligen Medikamenten zum Einsatz kommen, aber auch bei der Paketzustellung an geografisch schwer zugängliche Adressen. Bisher haben sich allerdings nur kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) und einige Start-up- Firmen mit zivilen Transporten durch Drohnen befasst.

Bevor die Päckchenlieferung per Drohnen praktisch umgesetzt werden kann, müssen noch eine Reihe rechtlicher Hürden genommen werden. In diesem Zusammenhang sei auch erwähnt, dass weder in den USA noch in Deutschland eine generelle Zulassung für zivile unbemannte Fluggeräte im Luftraum besteht. In Deutschland lautet die entsprechende gesetzliche Vorgabe im Konkreten, dass der Einsatz von unbemannten Luftfahrtgeräten außerhalb einer Sichtweite des Steuerers oder mit einer Gesamtmasse von mehr als 25 kg grundsätzlich verboten ist [78].

Kapitel 5

5 Konzepte

In diesem Kapitel werden verschiedene Konzepte von ultraleichten Elektrohängebahnsystemen veranschaulicht. Die Methodik für das Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte und Systeme wird in [79] beschrieben. Abbildung 5.1 zeigt die systematische Vorgehensweise dieser Richtlinie, in der die Strukturen auf der Grundlage von Funktionen, existierender und neu synthetisierter Lösungsprinzipien, in realisierbaren Modulen gestaltet werden.

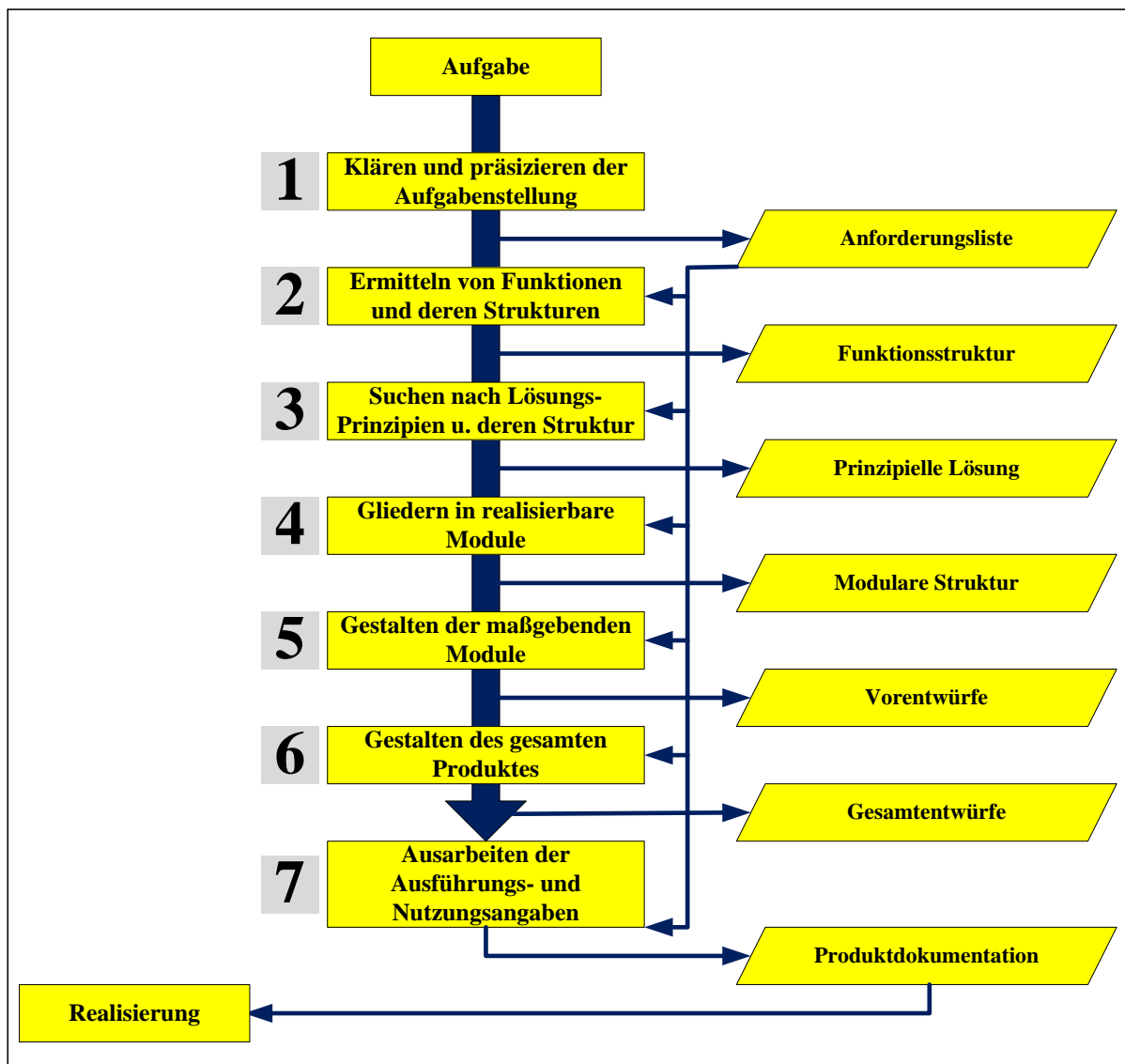


Abbildung 5.1: Generelle Vorgehensweise beim Entwickeln und Konstruieren nach [79]

Die Komponenten eines Elektrohängebahnsystems sind nachfolgend aufgeführt:

- Schienen
- Weiche
- Kreuzungen
- Ladestationen
- Vertikale Umsetzeinrichtungen
- Stützvorrichtungen
- Energieversorgung
- Kommunikationsschnittstellen
- Antrieb
- Fahrwerk
- Steuerung

Die folgenden Prozeduren helfen dabei, Schritt für Schritt ein ultraleichtes Elektrohängebahnsystem zu entwerfen:

- Anlageplan zeichnen
- Träger entwerfen
- Größe des Fördermittels festlegen
- Höhe der Seilbahn festlegen
- Richtung des Materialflusses festlegen
- Senkrechten Ausrundsbogen auswählen
- Antrieb einrichten
- Horizontale Wegbiegung festlegen
- Voraussetzungen der Schutzvorrichtungen festlegen
- Zwischenraum der Laufkatze festlegen
- Maximale Geschwindigkeit des Fördermittels festlegen
- Länge des Fördermittels festlegen
- Antreibende Traglast festlegen
- Maximale Nutzlast festlegen
- Art des Zugseils festlegen
- Maßnahmen zur Betriebssicherheit ergreifen

Außerdem wurden weitere Konzepte im Zusammenhang mit der ultraleichten Elektrohängebahn entwickelt.

5.1 Erstes Konzept

Das erste Konzept besteht aus einem Seilsystem und Laufkatzen, welche vier Be- und Entladestationen miteinander verbinden und Nutzlasten transportieren. Dieses System wird aus vier Stützpfählern, zwei umlaufenden Seilen, vier Umlenkrollen, einer Laufkatze mit Haltevorrichtung mit Behälter, einem Gehäuse pro Laufkatze für die Energieversorgung, Kommunikationsschnittstellen, Antrieb und Steuerung aufgebaut.

Die Laufkatze hängt in zwei parallel untereinander geführten Seilen und verfährt darauf mit einer eigenen Energieversorgung. Die Laufkatze transportiert die Nutzlast in einem Behälter, der mit der Haltevorrichtung an der Laufkatze befestigt ist. Letztere versorgt vier Be- und Entladestationen, welche von Personen überwacht und organisiert werden. Die Laufkatze wird mittels menschlichen Einsatzes be- und entladen.

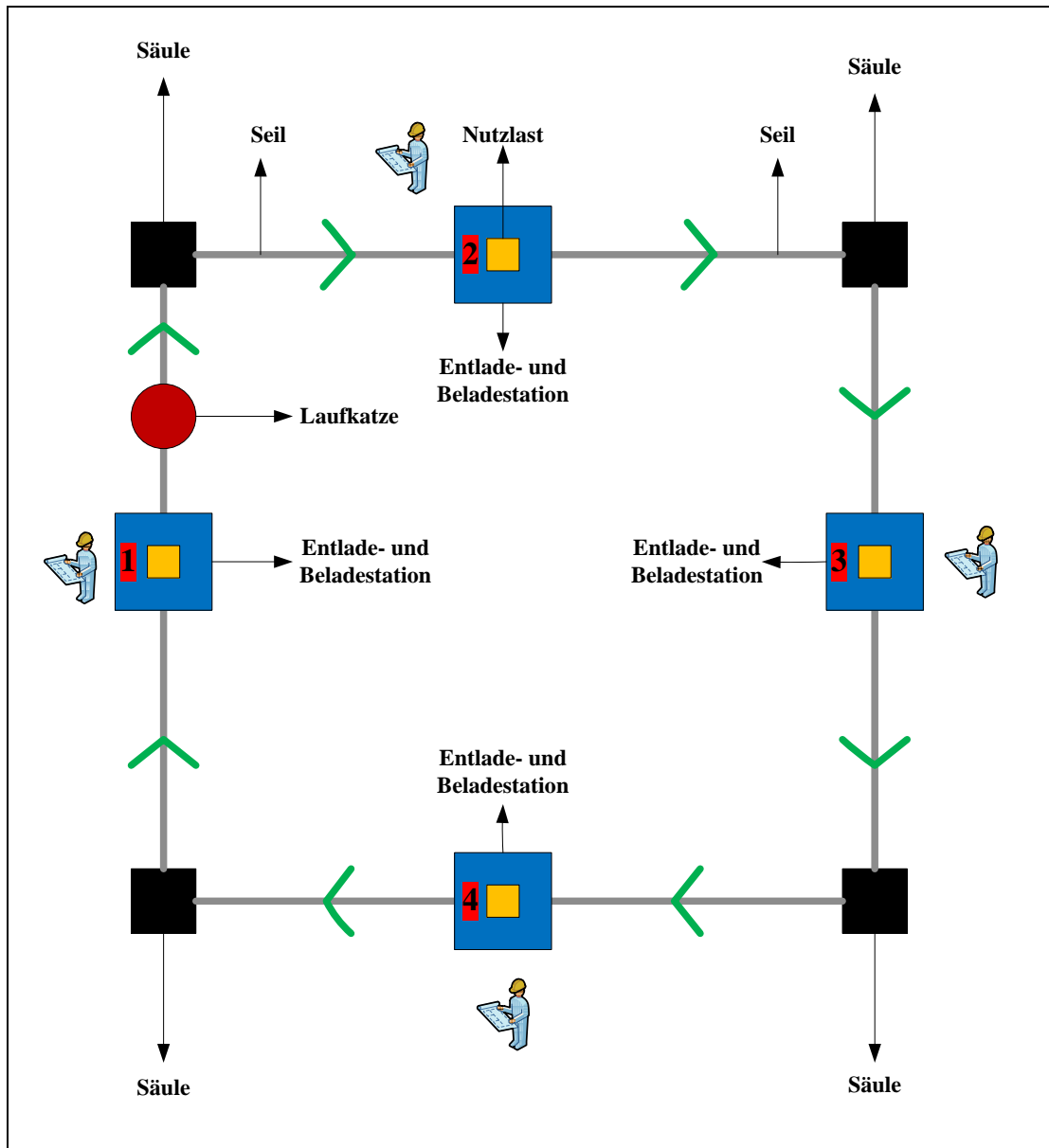


Abbildung 5.2: Layout des ersten Konzeptes

Wie in der obigen Abbildung 5.2 zu sehen ist, sind die Stationen in einem Rechteck angeordnet, wobei eine Station immer mit jeweils zwei anderen verbunden ist. Die Laufkatze verfährt grundsätzlich in eine Laufrichtung, so dass Station 4 von Station 1 aus nur über die zwischen ihnen liegenden Stationen 2 und 3 angefahren werden kann.



Abbildung 5.3: Stützvorrichtungen

In Abb. 5.3 sind die Stützvorrichtungen des ersten Konzepts, die Außenfeiler, dargestellt. Sie stellen die Befestigung dar, an denen die Seile für die Laufkatzen montiert und gespannt werden.

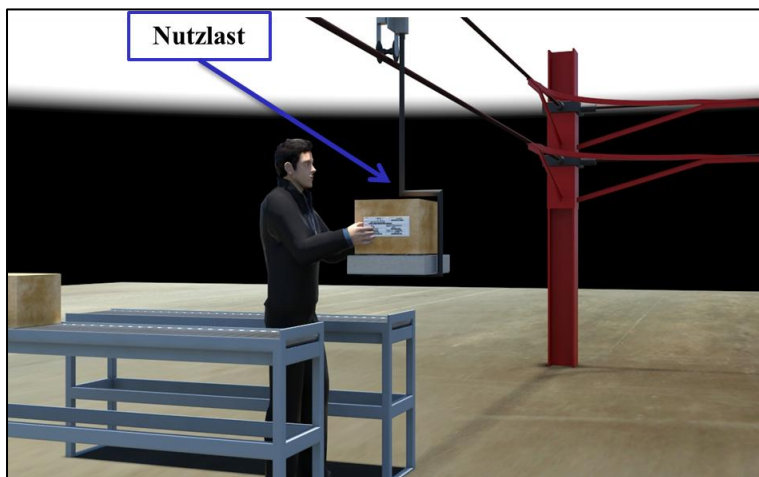


Abbildung 5.4: Nutzlast

In der obigen Abbildung 5.4. wird exemplarisch eine Nutzlast in die Haltevorrichtung der Laufkatze gelegt. Wichtig ist, dass für dieses Konzept das Gewicht der Nutzlast 20 kg nicht übersteigt. Von daher muss es genau bestimmt werden. In diesem Konzept wiegt jede Nutzlast 20 kg.

Die nachfolgende Abbildung 5.5 zeigt die im System genutzten Seile. Diese werden je nach Anforderungen an das System ausgewählt und nach der jeweils erforderlichen Mindestbruchlast ausgelegt. Die Seile sind übereinander angeordnet, um, wie nachfolgend zu sehen, für die Laufkatzen zusätzliche Stabilität zu erzeugen.

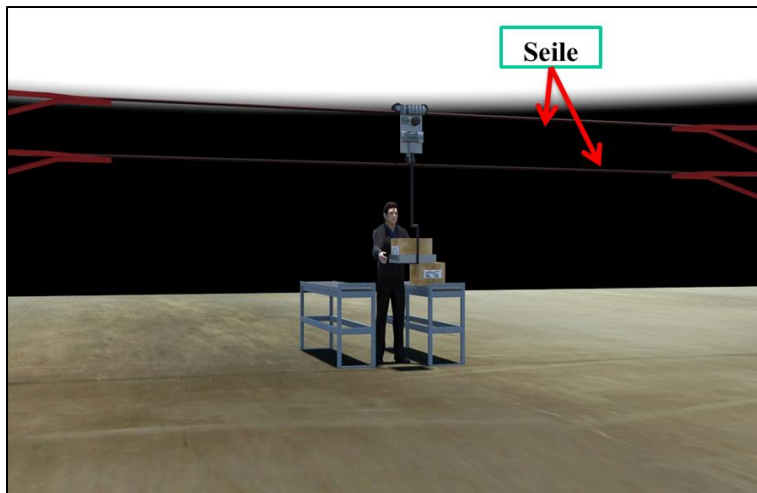


Abbildung 5.5: Seile

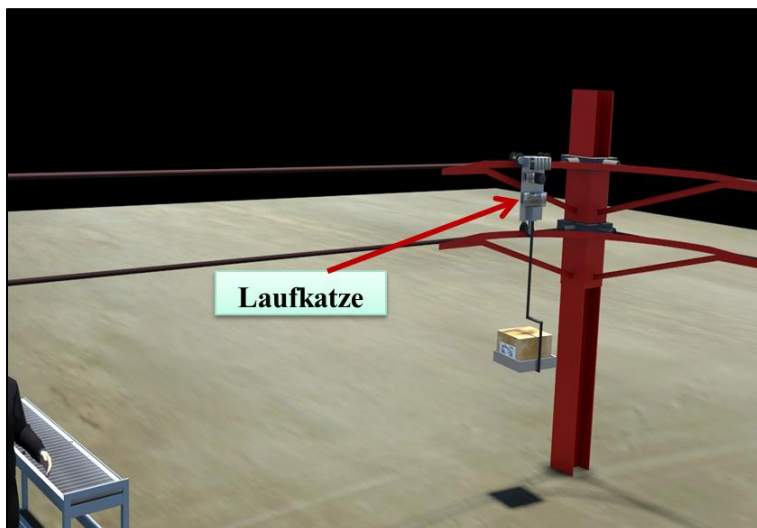


Abbildung 5.6: Laufkatze

In diesem Bild wird die Laufkatze betrachtet (siehe Abb. 5.6). Sie ist die komplexeste Komponente des Systems. Die Laufkatze arbeitet mit einem Schrittmotor und ist mit einem Steuerungssystem ausgestattet, mittels dessen sie sich auf dem Seil fortbewegt. Sie ist mit drei Rädern ausgestattet, um auf den Seilen zu fahren. Zwei Räder werden benötigt, um auf dem oberen Seil zu fahren, ein Rad bewegt sich auf dem unteren Seil. Die oberen Räder fungieren als Rollen, um das Gewicht der Laufkatze auf dem oberen Seil zu halten, das untere Rad ist mit dem Schrittmotor verbunden und sorgt für den Vortrieb. Mit dieser Technik sollen die Schwingungen der Laufkatze beim Befahren der Seile auf ein Minimum reduziert werden. Hier ist es wichtig, dass nur eine einzige Bewegungsrichtung ausgeführt wird.

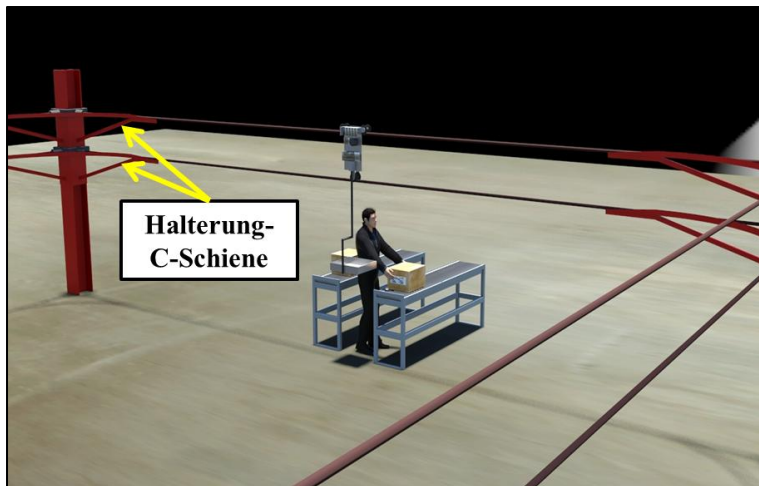


Abbildung 5.7: Halteung C-Schiene

Um an den Pfeilern um die Kurve fahren zu können, sind Halterungen in C-Form an den Pfeilern angebracht (siehe Abb. 5.7). Diese können beliebig stark gekrümmt werden. Für das Konzept wird eine Krümmung von 90° verwendet, da nur vier Pfeiler vorhanden sind. Die Halterung ist so geformt, dass sie als Schiene für die Laufkatze fungiert, damit diese ungehindert von der Seilfahrbahn aus um die Kurve fahren kann. Derartige C-Schienen sind Standardelemente, die frei im Handel käuflich sind. Sie wurden gewählt, um die Richtungswechsel leicht zu bewerkstelligen. Als Alternative stehen Weichen zur Verfügung, die allerdings einen weitaus höheren Kostenfaktor darstellen.

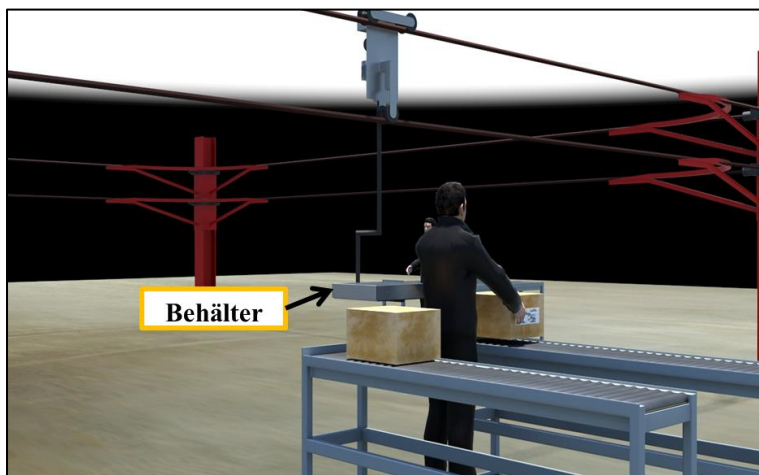


Abbildung 5.8: Behälter

Die obige Abbildung 5.8 zeigt die Haltevorrichtung der Laufkatze mit dem Behälter. Darin wird vom Bediener die Nutzlast eingelegt oder entnommen. Die Behälter sind starr mit der Haltestange an der Laufkatze befestigt. Um ein Herausfallen oder Verrutschen der Nutzlasten zu vermeiden, benötigen die Behälter eine ausreichende Wandhöhe. Auf die Höhe der

Behälterwände muss bei der Auswahl der Nutzlasten geachtet werden, da die Nutzlasten nicht beliebig hoch sein dürfen um noch in die Behälter zu passen.



Abbildung 5.9: Rollbahn

Abbildung 5.9 zeigt die Rollbahnen, die als Be- und Entladestationen der Nutzlasten für das System fungieren. Die Nutzlasten werden auf die Bediener zu oder von diesen weggeschoben, und in die Behälter geladen oder daraus entnommen. Alternativ können auch einfache Tische verwendet werden.

Tabelle 5.1: Komponenten des Systems für das erste Konzept

BAUTEILNUMMER	ANZAHL	OBJEKT	BESCHREIBUNG
1	4	Pfeiler	IPB Träger
2	8	Spannvorrichtungsseil	
3	8	Seil	
4	6	Rad	
5	1	Laufkatze	
6	1	Hallenboden	
7	4	Halteung-C-Schiene-oben	
8	1	Behälter	
9	8	Rollbahn	
10	2	Nutzlast	
11	6	Schrittmotor	

Tabelle 5.1 zeigt eine Übersicht über die verwendeten Systemkomponenten des ersten Konzepts.

Im Rahmen der Auswahl der Anzahl der einzelnen Objekte wurden auch Ersatzteile mit berücksichtigt (u. a. bei der Anzahl der Räder oder Schrittmotoren).

5.1.1 Vor- und Nachteile des ersten Konzeptes

Die Vor- und Nachteile des ersten Konzepts können wie folgt zusammengefasst werden:

Vorteile:

- Autonom gesteuerte Laufkatze
- Laufkatze gerät während der Fahrt nicht in Schwingungen.

Nachteile:

- Spurwechsel der Laufkatze ist um Stationen außerhalb der Stammstrecke nicht realisierbar
- begrenzte logistische Möglichkeiten
- Aufwand für die Umsetzung ist sehr hoch.

5.2 Zweites Konzept

Das System wird wie im ersten Konzept mit vier Stützvorrichtungen aufgebaut. Dazu kommen zwei umlaufende Seile, vier Umlenkrollen, eine Laufkatze mit Gehänge und Greifer sowie einem Kasten pro Laufkatze für Energieversorgung, Kommunikationsschnittstellen, Antrieb und Steuerung. In diesem Konzept geht es um ein automatisiertes Verfahren in Hinblick auf die Be- und Entladung. Im Gegensatz zum ersten Konzept werden die Nutzlasten durch die Laufkatze selbst be- und entladen. Der menschliche Einsatz entfällt weitestgehend.

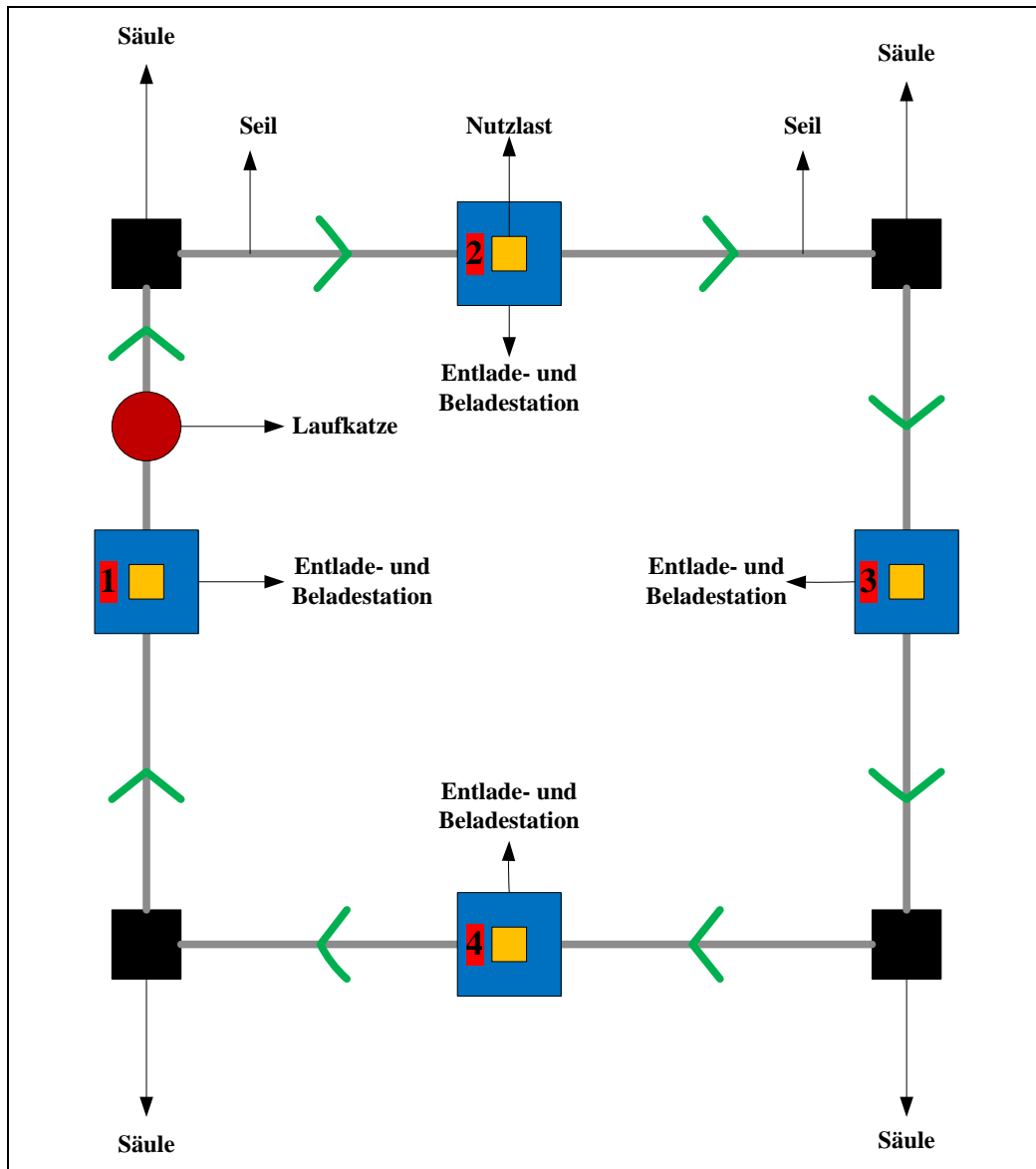


Abbildung 5.10: Layout des zweiten Konzeptes

Die Laufkatze hängt in zwei parallel untereinander geführten Seilen und fährt auf diesen mit einer eigenen Energieversorgung. Sie transportiert die Nutzlast mit einem automatischen Greifer; Laufkatze und Greifer sind mittels eines Gestänges verbunden. Die Laufkatze versorgt vier Be- und Entladestationen. Diese werden von dem automatischen Greifer bedient.

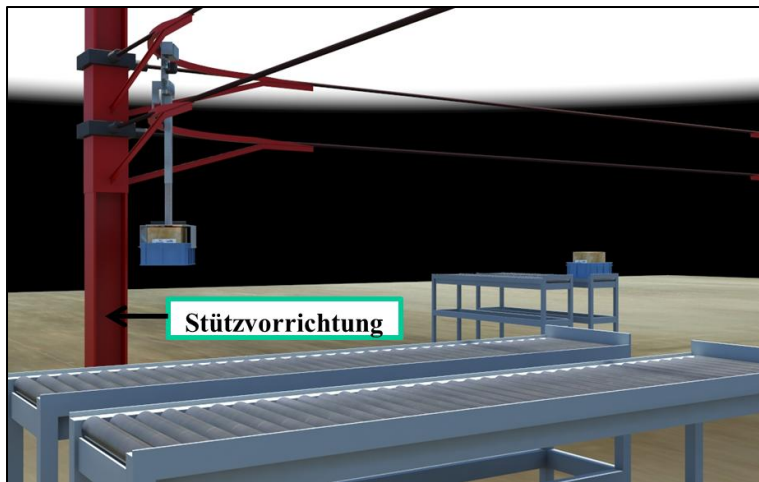


Abbildung 5.11: Stützvorrichtung

In der obigen Abbildung 5.11 sind die Stützvorrichtungen gezeigt, die auch im ersten Konzept Anwendung finden.

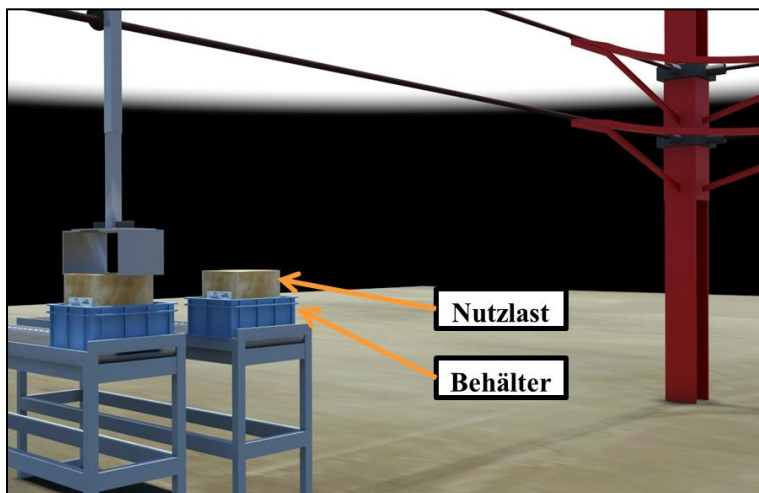


Abbildung 5.12: Behälter und Nutzlast

In der Abbildung 5.12 sieht man die Nutzlast und den Behälter. Der Behälter sorgt dafür, dass die Nutzlast während der Fahrten zwischen den Stationen unversehrt bleibt. Je nach Bedarf des Systems können Behälter und Nutzlast an verschiedenen Stellen eingesetzt werden, was wiederum vom Materialfluss abhängig ist.

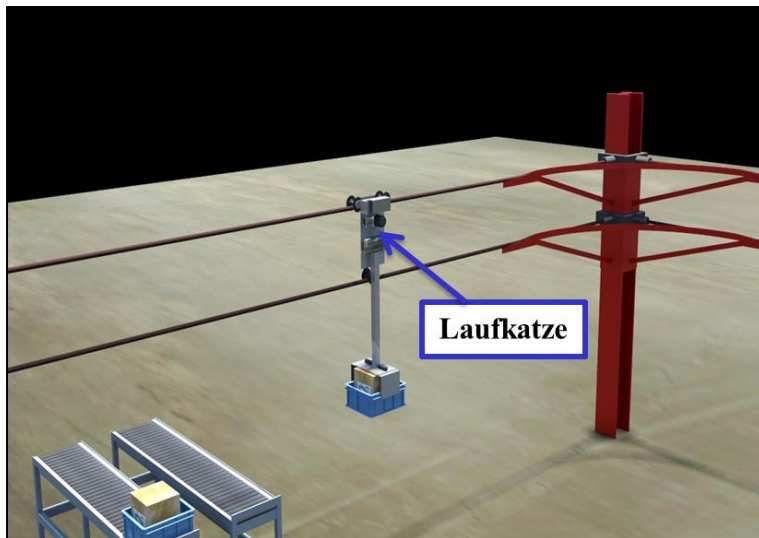


Abbildung 5.13: Laufkatze

Abbildung 5.13 zeigt die Laufkatze des zweiten Konzepts. Es wird der gleiche Schrittmotor wie im ersten Konzept eingesetzt. Das verwendete Gestänge unterscheidet sich von dem im ersten Konzept verwendeten. Hinzu kommt ein verbundener Greifer, der die Nutzlasten samt der Behälter greifen sowie transportieren kann.

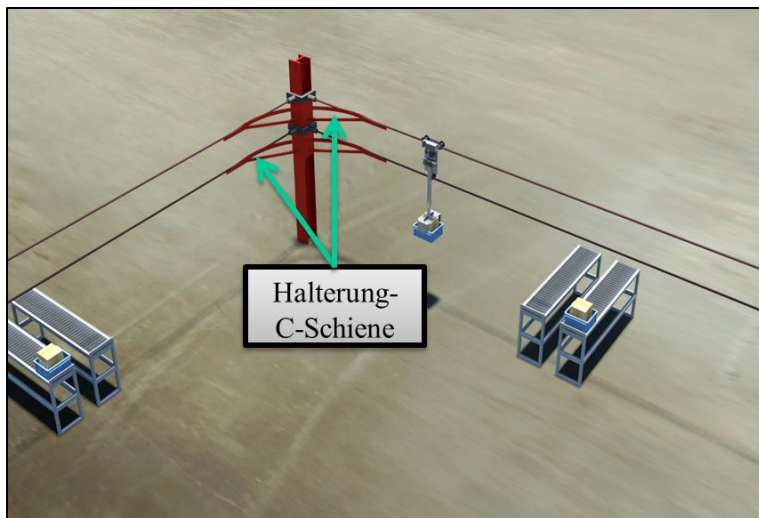


Abbildung 5.14: Halteung C-Schiene

Wie in der Abbildung 5.14 zu sehen, werden – wie auch im ersten Konzept – die C-Halterungsschienen verwendet. Mit diesen können Richtungswechsel bzw. Kurvenfahrten unkompliziert realisiert werden.

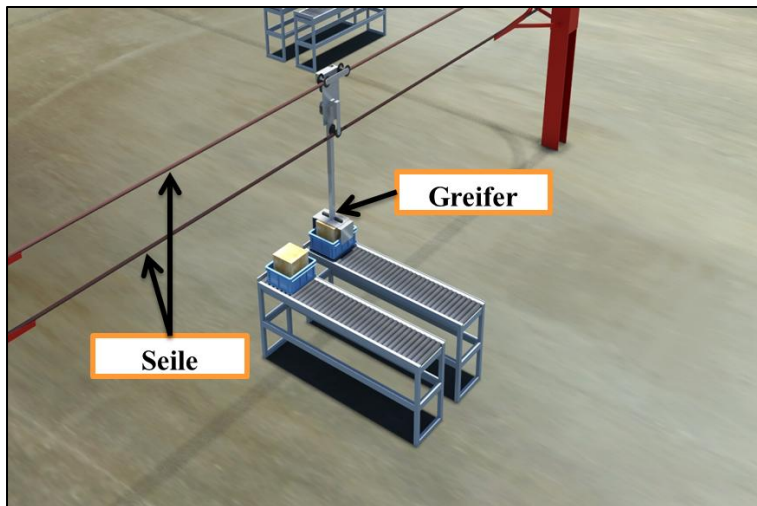


Abbildung 5.15: Seile und Greifer

Seile und Greifer werden hier zusammen dargestellt (siehe Abb. 5.15). Sowohl die Laufkatze als auch der Greifer haben jeweils einen eigenen Schrittmotor. Durch den Greifer werden die Nutzlasten auf der Rollenbahn be- und entladen.

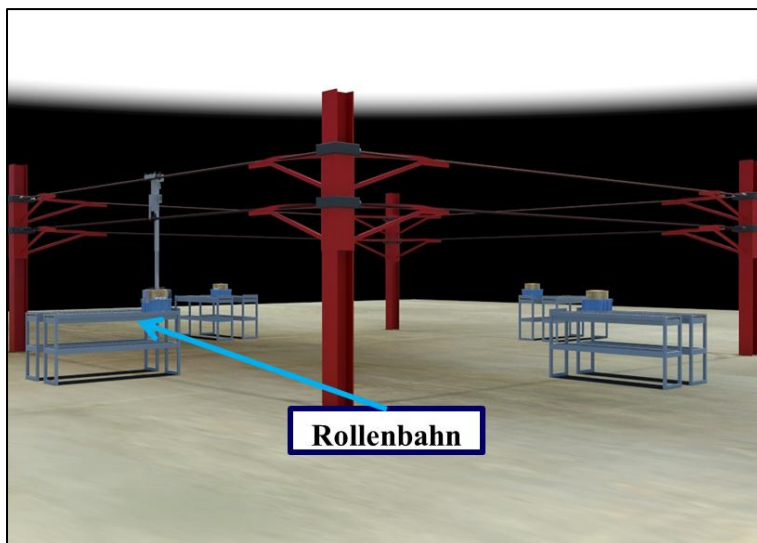


Abbildung 5.16: Rollenbahn

Die Rollenbahnen werden wie zuvor als Be- und Entladestationen verwendet (siehe Abb. 5.16).

Tabelle 5.2: Komponenten des Systems für das zweite Konzept

BAUTEILNUMMER	ANZAHL	OBJEKT	BESCHREIBUNG
1	4	Pfeiler	IPB Träger
2	8	Spannvorrichtungsseil	
3	8	Seil	
4	6	Rad	
5	1	Laufkatze	
6	1	Hallenboden	
7	4	Halterung-C-Schiene-oben	
8	1	Greifer-X-Richtung	
9	1	Greifer-Z-Richtung	
10	8	Rollenbahn	
11	2	Nutzlast	
12	6	Schrittmotor	

In der Tabelle 5.2 sind die Komponenten des Systems für das zweite Konzept aufgelistet.

Auch hierbei wurden Ersatzteile mit berücksichtigt.

5.2.1 Vor- und Nachteile des zweiten Konzeptes

Die Vor- und Nachteile des zweiten Konzepts können wie folgt zusammengefasst werden:

Vorteile:

- Autonom gesteuerte Laufkatze
- Möglichkeit, die Nutzlasten automatisch zu transportieren
- Laufkatze gerät während der Fahrt nicht in Schwingungen.

Nachteile:

- Infrastruktur ist recht kostenintensiv
- Aufwand ist sehr hoch für die Umsetzung.

5.3 Drittes Konzept

In diesem Konzept wird ein neues ultraleichtes Elektrohängebahndesign in die Logistik eingeführt und seine Komponenten erläutert. Entsprechend der Erklärung der Komponenten wird ein Modell anhand der technischen Merkmale erstellt. Das Modell wird mit Hilfe von CAD-Software visualisiert. Anschließend werden Annahmen für die Anwendungsfelder gemacht. Dieses Modell hilft Unternehmen dabei, niedrigere Entwicklungskosten sowie eine schnellere Marktreife zu erzielen.

Hauptkomponenten des Systems werden in Abb. 5.17 dargestellt und erläutert:

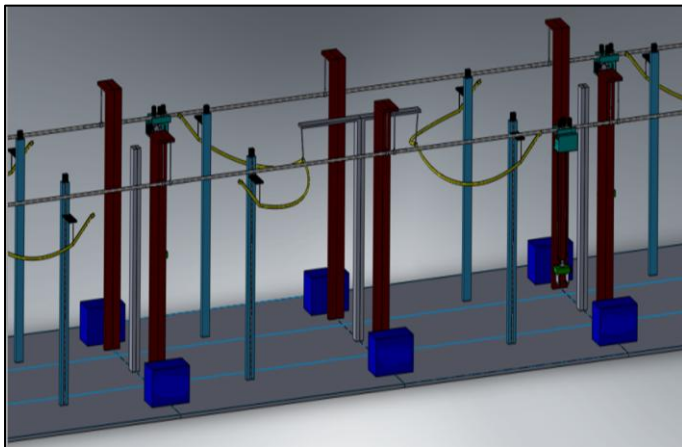


Abbildung 5.17: Gesamtkonzept

- Laufkatze:

Die besonders leichten Laufkatzen bestehen aus leistungsstarken Elektromotoren für den Vortrieb und bieten die Möglichkeit, mit einer angebauten Lastaufnahme, die mit einem Gestänge bzw. Greifer die Nutzlasten aufnehmen kann, Lasten zu tragen.

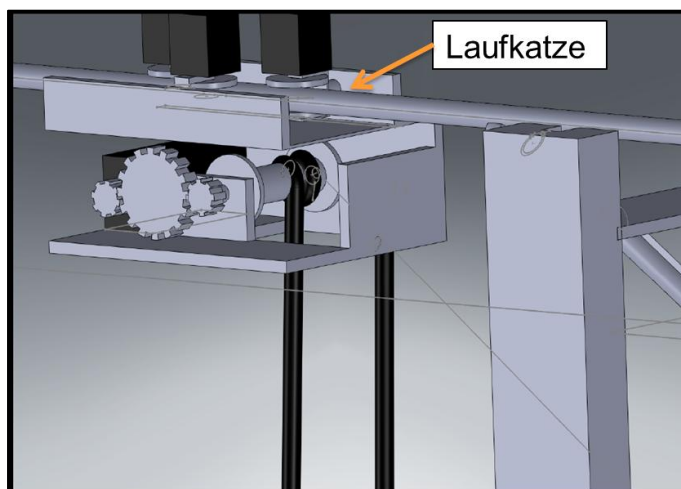


Abbildung 5.18: Laufkatze

Die Laufkatze verfügt über Räder und Schrittmotoren für den Antrieb. Sie fährt auf dem Seil wie in Abb. 5.18 zu sehen ist. Sie ist außerdem ausgestattet mit einem berührungsfreien Aufprallschutz (Indikatoren, Lichtschranken, Ultraschallsensoren) und verfügt über ein eigenes Steuerungssystem.

Tabelle 5.3: Hauptkomponenten der Laufkatze

Schrittmotor
Räder
Gestell

Tabelle 5.3 stellt die Hauptteile der Laufkatze dar. In den meisten Fällen umfasst das Laufkatze-Steuerungssystem die Auswahl der Antriebseinheit, die Überwachung des Motors, die Überwachung von zusätzlichen elektrischen Komponenten und den Aufprallschutz.

- Seil:

Wie in den vorhergehenden Konzepten werden auch hier Seile verwendet, die zudem die wichtigsten Bestandteile des ultraleichten Elektrohängebahnsystems für den Transport sind. Hier wird ein geeignetes Seil ausgewählt.

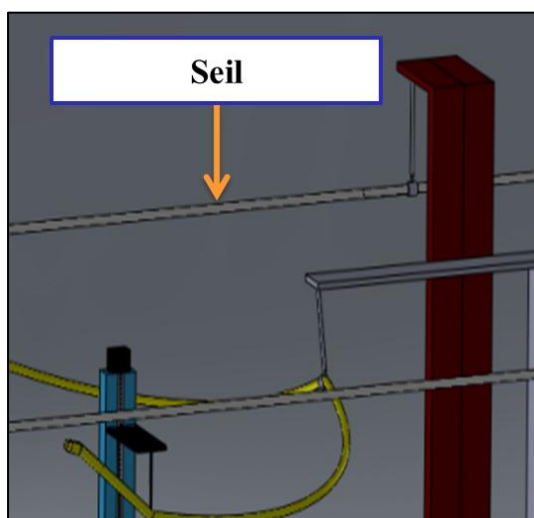


Abbildung 5.19: Seil

Abbildung 5.19 zeigt die Seilbahnen des Systems detailliert. Diese Seile sind sehr stabil und sollen bei geringem Eigengewicht große Zugkräfte aufnehmen können. Die Auswahl der Seile wird in einem gesonderten Kapitel vorgestellt. Die Laufkatzen bewegen sich

automatisch auf dem Seil. Für die Auswahl der Seile wird die Finite-Elemente-Methode verwendet, um eine möglichst sichere Auswahl treffen zu können. Es gilt, so weit wie möglich, außerhalb des Bruchdehnungsbereichs des Seils zu arbeiten und das Seil dennoch so dünn wie möglich zu gestalten, um das elektronisch unterstützte Bahnsystem gleichzeitig dauerhaft stabil und trotzdem besonders leicht zu halten.

- Vertikale Umsetzeinrichtungen:

Die Umsetzeinrichtungen, Etagenaufzüge oder Hub-/Hebeanlagen ermöglichen den Spurwechsel der Laufkatzen. An ihnen ist eine Schiene (in der Abb. 5.17 in Gelb dargestellt) befestigt, die je nach Bedarf an die Seilfahrbahn heran fährt. Berührt die Schiene die Seilbahn und bewegt sich eine Laufkatze entlang dieser, wird diese auf die Schiene umgeleitet, und so geführt bis sie wieder an einer anderen Stelle auf die Seilfahrbahn trifft. So können Be- und Entladestationen bzw. bestimmte Anschlusspunkte schneller angefahren werden.

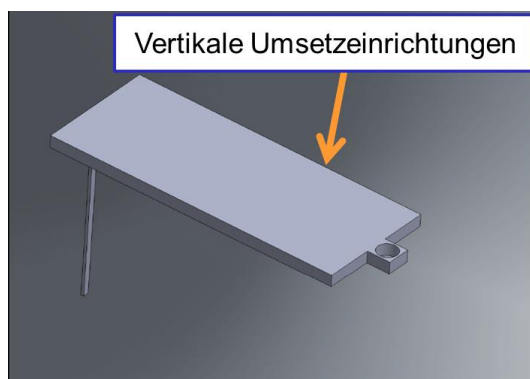


Abbildung 5.20: Vertikale Umsetzeinrichtungen

Die obige Abbildung zeigt die Hauptkomponente der Spurwechseleinrichtung (siehe Abb. 5.20). Mit Hilfe dieser vertikalen Umsetzeinrichtung wird die Schiene für den Richtungswechsel der Laufkatze bewegt bzw. an die Seilfahrbahn heran gefahren. Die Umsetzeinrichtungen werden an im Boden verankerte Ständer montiert, da eine hängende Konstruktion zu aufwendig wäre [80].

Für die Bewegung der Umsetzeinrichtungen können bewegliche Spannseile, Teleskoparme o. Ä. verwendet werden. Als Tragelemente kommen Seile zum Einsatz.

- Mechanischer Teil:

Den mechanischen Teil stellen die Schienen dar, die bereits angesprochen wurden. Sie sind aus einem möglichst leichten und gleichzeitig stabilen Material gefertigt und haben zwei Enden, die mit den Seilen der Fahrspuren verbunden werden können. Die Schienen

sind an deren Mittelpunkt an Pfeilern aufgehängt und fixiert. Die Aufhängung ist so gestaltet, dass die Laufkatze diese problemlos passieren kann.

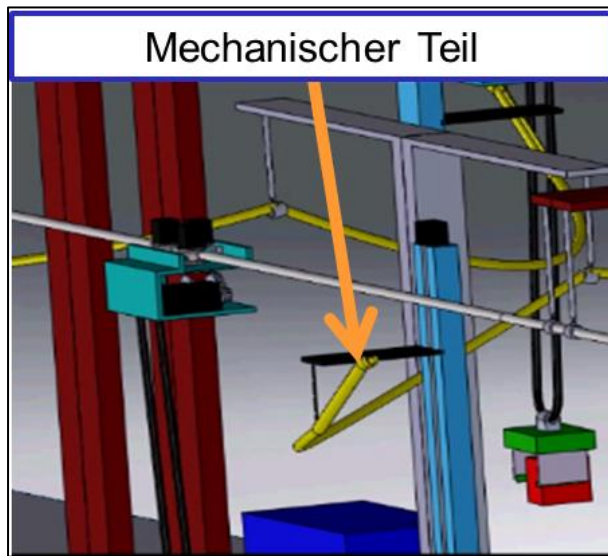


Abbildung 5.21: Mechanischer Teil

Wie bereits erwähnt, ist in der Grafik (siehe Abb. 5.21) die Schiene als mechanische Komponente des Umlenkmechanismus in Gelb zu sehen. Soll die Laufkatze von der Hauptfahrbahn aus die Richtung wechseln, wird die Schiene an die Seile der Fahrspur gefahren und die Laufkatze automatisch darauf umgelenkt. Es werden stabilisierende Mechanismen eingebaut, die die Laufkatze beim Spurwechsel und die Schiene ruhig halten. Die Schiene ist so gekrümmt, dass die Laufkatze ohne zu haken oder zu wackeln zum Zielpunkt gelangen kann. Dieser liegt, wie erwähnt, auf der gegenüberliegenden Seite des Ausgangsseils. Dort fährt die Schiene so an das Seil, dass die Laufkatze wieder ohne Probleme auf die Seilbahn fahren kann.

- Greifer:

Greifen und Halten von Objekten sind Hauptaufgaben für Robotergreifer. Die Robotergreifer sind in der Lage, Objekte sehr unterschiedlicher Form aufzunehmen. Sie können mit zwei, drei oder fünf Fingern bzw. mit einer beliebigen Anzahl anderer Greifelemente ausgestattet sein.

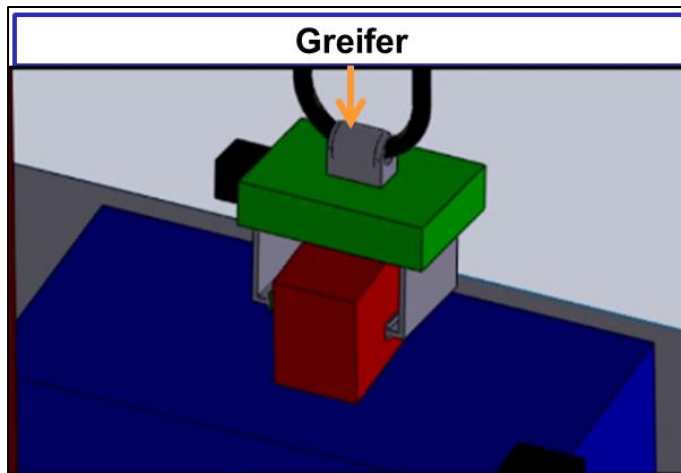


Abbildung 5.22: Greifer

Abb. 5.22 stellt den Robotergreifer des Systems dar. Der Greifprozess wird von den Greifern bzw. deren mechanischen Greifelementen ausgeführt. In diesem Fall findet das in der Industrie häufig anzutreffende mechanische Zwei-Finger-Greifprinzip Anwendung. Mit Hilfe des Greifers werden die Nutzlasten in die Haltemechanismen der Laufkatzen be- und entladen. Außerdem hat der Greifer einen eigenen Schrittmotor, so dass er unabhängig von der Laufkatze gesteuert werden kann. Die Abmessungen der Nutzlasten müssen an die Greifkapazitäten angepasst sein, da sie sonst nicht bearbeitet werden können.

- Schrittmotor:

Ein Schrittmotor ist eine Spezialausführung des Elektromotors, der in Schritten oder Stufen bewegt wird, beziehungsweise mit sanften Bewegungen wie ein herkömmlicher Motor läuft.

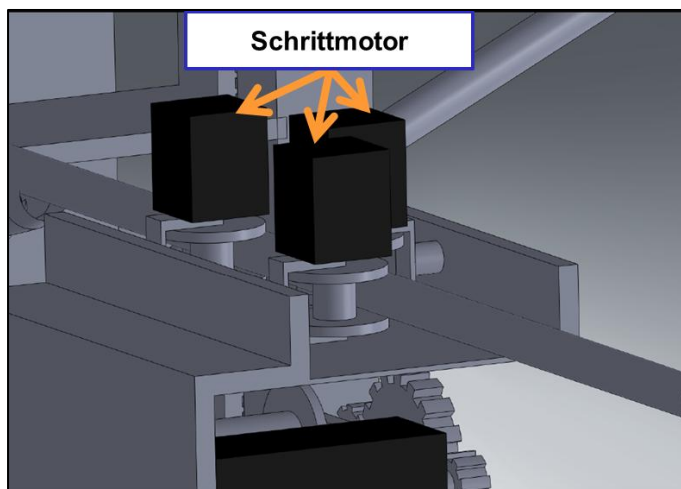


Abbildung 5.23: Schrittmotor

In der Abbildung 5.23 werden exemplarisch die verwendeten Schrittmotoren von Laufkatzen dargestellt. Diese finden häufig Anwendung in der Automation bzw. in Robotern. Der Motor teilt eine volle Umdrehung in definierte, gleichgroße Schritte ein. Die Motoren werden so angeordnet, dass die Laufkatzen zum Beispiel ohne Rückkopplungsmechanismus in beliebige Positionen bewegt werden können.

Tabelle 5.4: Schritte für die Auswahl des Schrittmotors

1. Arbeitsgeschwindigkeit in Schritten/Sekunden
2. Drehmoment
3. Lastträgheit
4. Erforderlicher Schrittwinkel
5. Beschleunigungszeit
6. Bremszeit
7. Verwendete Antriebsart
8. Betrachtung von Größe und Gewicht

Tabelle 5.4 stellt die Schritte für die Auswahl des Schrittmotors dar. Bei der Auswahl eines zu bevorzugenden Schrittmotors, sollten diese Schritte in Betracht gezogen werden. Im vorliegenden System wurde ein Schneckenantrieb verwendet. Die Schrittmotoren verfügen über ein niedriges Drehmoment und können viele Lasten ohne Getriebe fahren. Im Vergleich zu anderen Regelsystemen sind sie kostengünstig. Außerdem haben sie eine hohe Lebensdauer, da die Führungslager die einzigen Verschleißmechanismen darstellen. Daher wurde der Schrittmotor für das System ausgewählt.

- Stützvorrichtungen:

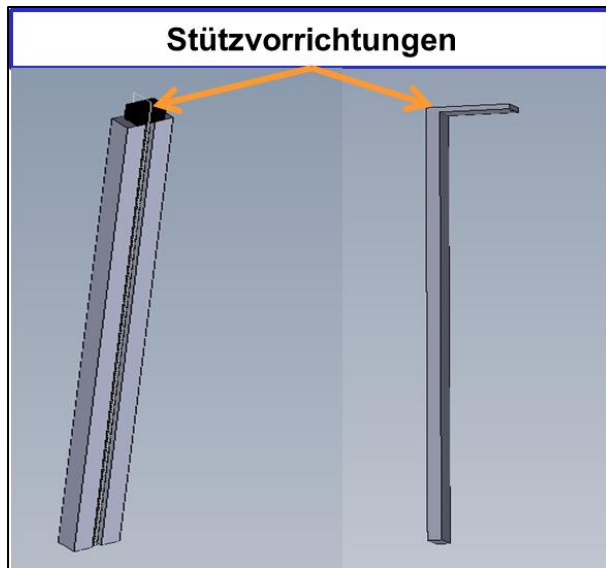


Abbildung 5.24: Stützvorrichtungen

Die Stützvorrichtungen dienen dazu, die Seile der Fahrbahnen zu fixieren und zu straffen (siehe Abb. 5.24). Von den, dem System zugehörigen, Säulen sind insgesamt acht Stück mit Schneckenantrieben ausgerüstet. Die Schneckenantriebe dienen dazu, die mechanischen Teile zu heben, und sind mit der Stützvorrichtung verbunden. Dadurch wird das mechanische Teil gehoben, sobald ein Richtungswechsel stattfinden soll. Nach dem Richtungswechsel kommt das mechanische Teil mithilfe des Schneckenantriebs wieder zum vorherigen Platz zurück, an dem sich das mechanische Teil vor dem Richtungswechsel befunden hat.

- **Steuerungssystem:**

Die Steuerung hat, wie in den anderen Konzepten, auch hier eine wichtige Bedeutung. Sie erfolgt entweder manuell über operativ mitgeführte Schalter oder automatisch durch ein Programm. Über Sensoren werden die Punkte von Umlenkpunkten oder Stationen an die Steuerung übermittelt, die dann die beteiligten Komponenten entsprechend der Zielstellung beeinflusst. Das Steuerungsverfahren wird entweder zentral oder lokal koordiniert, um eine optimale Route zwischen den einzelnen Stationen aufzubauen. Der für die Steuerung im System mitgeführte Zielindikator kann ein natürlicher Indikator sein (Form oder Gewicht), ein mechanischer Indikator (Schalter oder Nocken), eine optische Anzeige (Barcode) oder eine elektronische Anzeige (Transponder) [46]. Erforderliche operative Befehle werden entweder über die Stromschiene übertragen oder berührungslos über Funk, induktiv oder Infrarot. Die Steuerung der Weiche basiert auf den parametrisch vorgegebenen Ziel- und Routeninformationen des Fahrzeugs oder über eine externe Eingabe.

5.3.1 Ablauf des Systems

Um die Arbeitsweise des Systems im dritten Konzept noch einmal zu beleuchten, wird im nachfolgenden Abschnitt das System mit Laufkatze, Stützvorrichtungen, Seilen, Umlenkstationen, Belade- und Entladestationen, Schrittmotoren und Greifer ausführlich visualisiert (siehe Abb. 5.25).

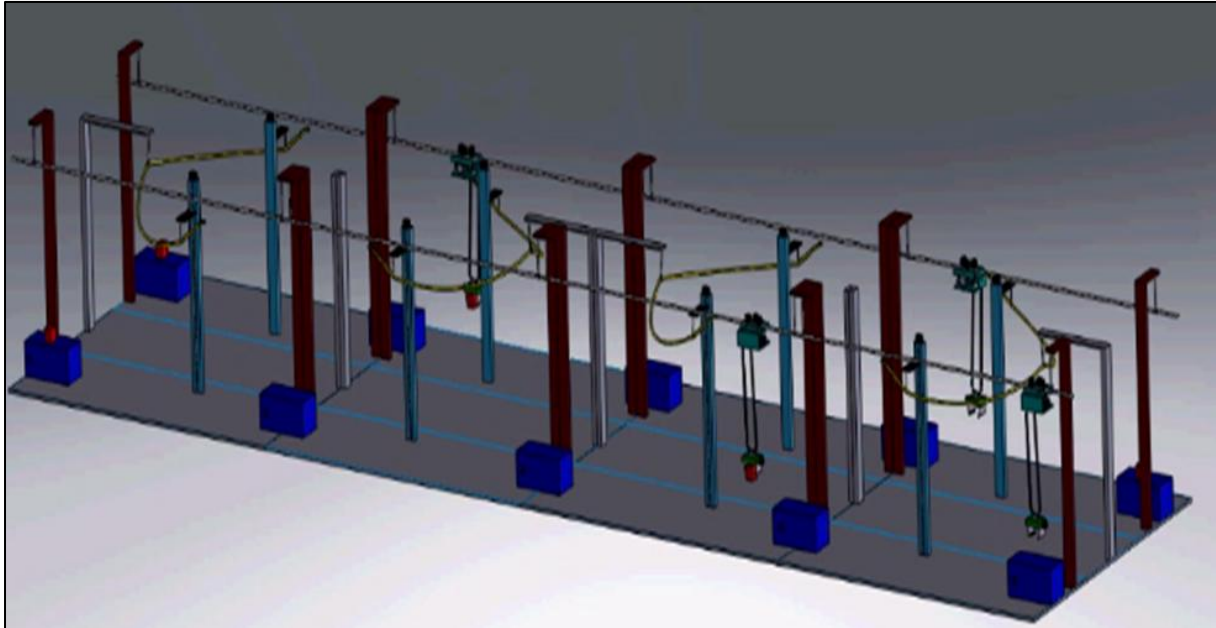


Abbildung 5.25: Komplettes System

Durch den Greifer bzw. den Greifmechanismus werden die Transportgüter sowohl beladen, als auch entladen. Für jedes wird ein Gewicht von 20 kg angenommen. Je nach Belade- und Entladestation werden individuelle Strichcodes für jede Nutzlast eingegeben. Danach wird die Nutzlast mit Hilfe des Greifers von der Station abgeholt. Im Anschluss fährt die Laufkatze bis zur Zielstation. Sobald die Laufkatze an der Zielstation angekommen ist, wird dies durch einen Sensor erfasst und die Laufkatze stoppt. Die Nutzlast kann entnommen werden. Da die Greifer eigene Schrittmotoren besitzen, können sie unabhängig von der Laufkatze gesteuert werden. Wenn ein Richtungswechsel stattfinden soll, wird die als mechanisches Teil bezeichnete Schiene durch einen entsprechenden Mechanismus angehoben. Die Enden der Schiene verbinden sich mit dem Seil der Fahrbahn, während die Laufkatze vor der Umlenkstation wartet. Sobald die erforderliche Kopplung erreicht ist, fährt die Laufkatze über die Weiche auf die Schiene weiter. Auf diese Weise werden die Nutzlasten durch den Greifer an der Zielstation entnommen, die zu diesem Zweck mit weiteren Sensoren ausgestattet sind. An den Richtungswechselstationen sind Annäherungssensoren platziert, mit denen die

Hebemechanismen für die Umlenkschienen aktiviert werden. Die Schienen werden anschließend nach oben gekurbelt.

5.3.2 Vor- und Nachteile des dritten Konzeptes

Die Vor- und Nachteile des dritten Konzepts können wie folgt zusammengefasst werden:

Vorteile:

- Autonom gesteuerte Laufkatze
- Möglichkeit, die Nutzlasten automatisch zu transportieren,
- Spurwechsel ist möglich.

Nachteile:

- Viele Komponenten in der Infrastruktur
- Hohe Investitionskosten
- Laufkatze gerät während der Fahrt in Schwingungen. Dies begründet sich daraus, dass bei einem 1-Seil-System die Seitenstabilität nicht gegeben ist.

5.4 Viertes Konzept

Das vierte Konzept arbeitet mit Seilen, die Fahrbahnen für die Laufkatze bilden. Je zwei Seile bilden eine Fahrbahn bzw. Seilstraße. Die Fahrbahnen sind fest installiert und geben die notwendigen Richtungen vor. Die Laufkatze selbst sorgt für den Richtungs- und Spurwechsel, indem sie auf die entsprechende Fahrbahn wechselt. Dabei sind die Fahrbahnen auf zwei versetzten Ebenen angeordnet. Um auf eine andere Fahrbahn zu wechseln, führt die Laufkatze eine Höhenänderung aus, wie nachfolgend detailliert beschrieben wird. Die unterschiedlichen Fahrspurhöhen sind deshalb notwendig, da aufgrund der Laufkatzenform und der Lastenhalterung, bzw. der Lastenhöhe keine Weichenfunktion realisiert werden kann, ohne eine Kollision der Fahrbahnseile mit der Nutzlast oder deren Halteseil zu verursachen.

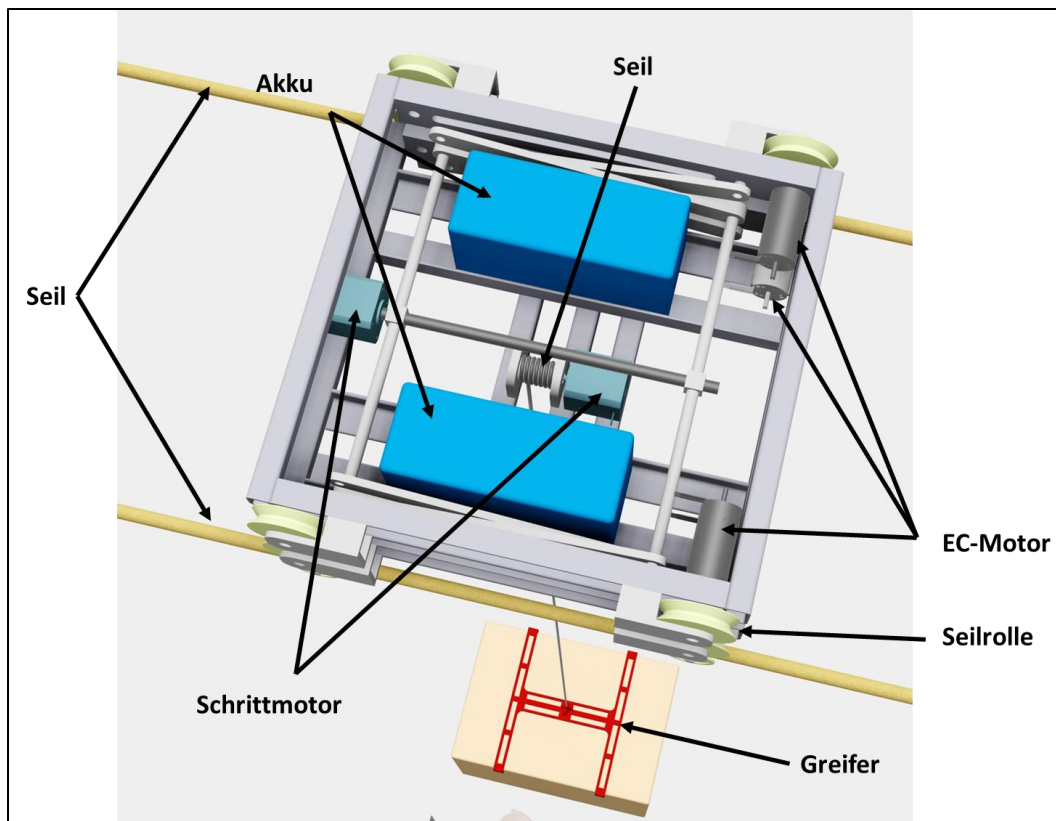


Abbildung 5.26: Komponenten der Laufkatze

In der obigen Abbildung 5.26 werden die Komponenten der Laufkatze gezeigt. In der Mitte der Laufkatze ist deutlich das Seil zu sehen, das den Lastengreifer mit der Laufkatze verbindet. Der Greifer ist unten im Bild rot gekennzeichnet und so geformt, dass er die erforderlichen Nutzlastgrößen aufnehmen kann. Das Seil ist über eine Winde mit einem Schrittmotor verbunden (im Bild türkis dargestellt). Dieser Schrittmotor wird von einem Akku (im Bild blau dargestellt) gespeist und über ein Steuermodul gesteuert. Durch den Schrittmotor und die dazugehörige Steuerung wird es ermöglicht, das zu greifende Objekt exakt zu positionieren.

Die Laufkatze fährt über mit Spurrillen versehene Räder (in der Abbildung 5.27 hellgelb) über die Seile (dunkelgelb). Die Räder werden, wie gezeigt, durch Elektromotoren angetrieben. Die Spurrillen der Antriebsräder sind so geformt, dass diese die Seile gut umschließen.

Ein zweiter Schrittmotor ist in der Abbildung 5.26 links gezeigt. Dieser ist für die Hebevorrichtung zuständig, die an den weißen Querstangen und weißen Streben entlang der Außenkanten zu erkennen sind. Mit der Hebevorrichtung kann die Laufkatze zu einer anderen Fahrspur wechseln, die, wie in den nachfolgenden Bildern gezeigt, für einen Richtungs- bzw. Spurwechsel notwendig ist.

Die beiden Akkus (blau dargestellt) speisen die Schrittmotoren für die Seilwinde und den Hebemechanismus sowie die Antriebsmotoren.

Die Spurwechsel werden dann notwendig, wenn Nutzlasten unterschiedliche Zielpunkte ansteuern, die Fahrbahnen selbst aber starr befestigt sind.

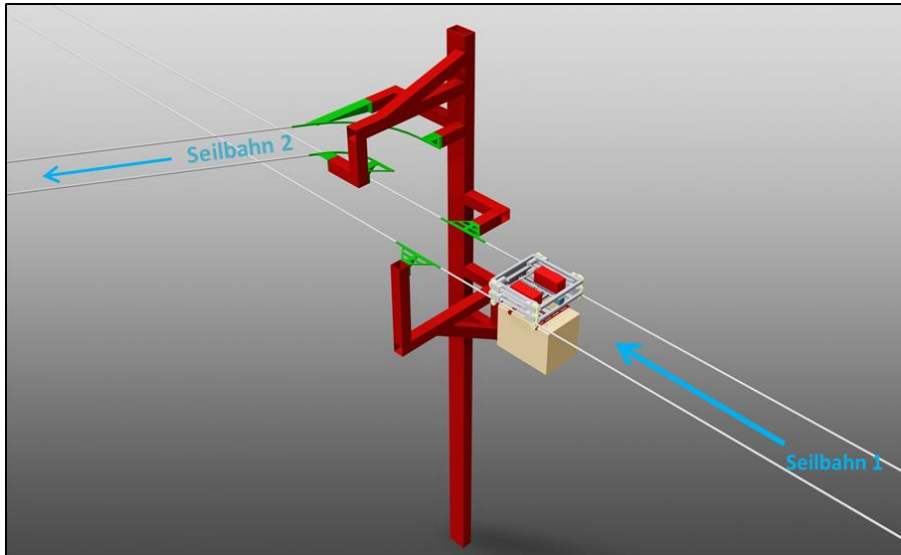


Abbildung 5.27: Seilbahn

Die Abbildung der Seilbahn zeigt eine Fahrbahn-Wechselstation. Hier wird die Laufkatze an eine Richtungswechselstation gefahren. Es können zwei Spuren gewählt werden, wodurch zunächst zwei unterschiedliche Richtungen gefahren werden können. Die Seilbahn 1 mit der Laufkatze entspricht der Bahn, aus der die Laufkatze kommt, der blaue Pfeil zeigt die Fahrtrichtung (siehe Abb. 5.27). Wie im Bild gezeigt, behält diese Spur die Richtung bei. Soll eine Nutzlast an eine andere Stelle transportiert werden, ist ein Spurwechsel zur oberen Spur (Seilbahn 2) notwendig, die in eine andere Richtung läuft als die untere Spur. Die Richtungswechselstelle ermöglicht den reibungslosen Wechsel der Laufkatze von einer Spur zur anderen. Die Seilbahnen werden fest verankert und die Steuerung der Laufkatze kann diese bei Bedarf als Koordinaten- und Orientierungspunkte verwenden.

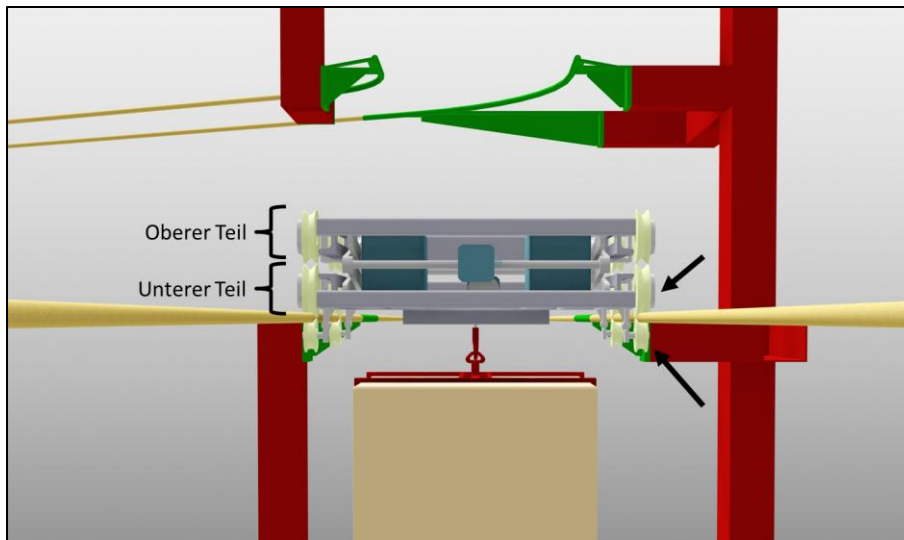


Abbildung 5.28: Laufkatze

Die Abbildung 5.28 zeigt die Laufkatze in der Seitenansicht entlang der Seilfahrbahn. Deutlich gekennzeichnet sind die zwei Teile der Laufkatze. Diese beiden sind durch die Hebevorrichtung miteinander verbunden. Jede dieser Laufkatzenkomponenten besitzt vier Räder, wobei die untere Hälfte zusätzlich vier Rollen enthält, die als weitere Führung für die Seile dienen. Die Laufkatze fährt mit dem unteren Teil auf der Seilbahn 1, wobei die oberen vorderen Seilrollen die Laufkatze antreiben. Die unteren kleinen Rollen sorgen für die Befestigung bzw. Stabilität.

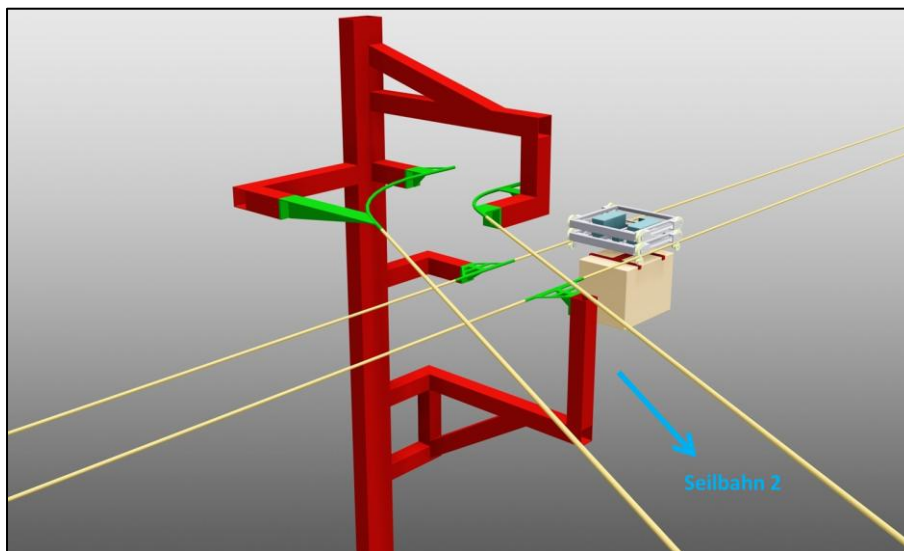


Abbildung 5.29: Seilbahn 2

Die Abbildung 5.29 zeigt die beiden Fahrbahnen noch einmal aus einer anderen Perspektive, gut zu erkennen ist nun die obere Seilbahn 2 mit der Laufkatze im Hintergrund. Bis zum Punkt des Spurwechsels wird die Laufkatze über die Elektromotoren des unteren Laufkatzenteils entlang der Ausgangspur angetrieben.

Ziel in diesem Konzept ist, ohne Hilfe von externen Aktoren oder zusätzlichen Hilfsmitteln durch den Spurwechsel die Richtung der Laufkatze von Bahn 1 zu Bahn 2 zu wechseln, so dass die Laufkatze autonom für den Spurwechsel und somit die gewünschte Richtungsänderung sorgt.

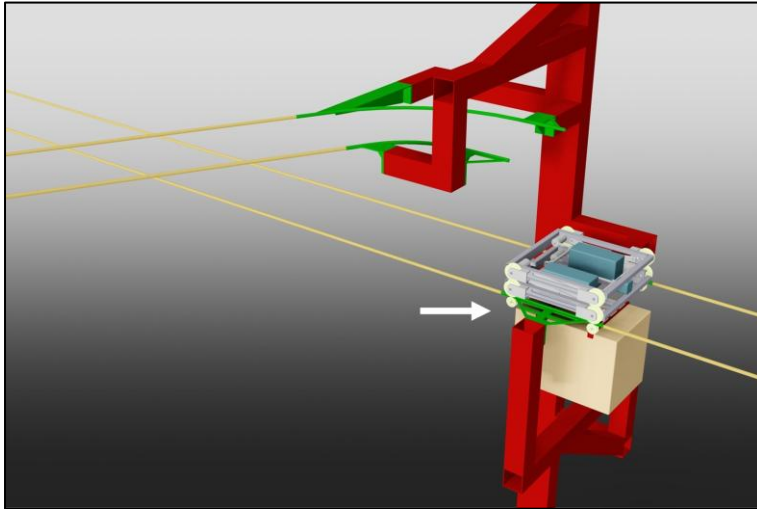


Abbildung 5.30: Metallführungen

Die Spurwechselstation ist mit Metallführungen ausgestattet, mittels derer die Seile aufgenommen und geführt werden (siehe Abb. 5.30). Zusätzlich kann mittels Sensoren das Ankommen an diesen Führungen detektiert und die Laufkatze dort zum Halt gebracht werden.

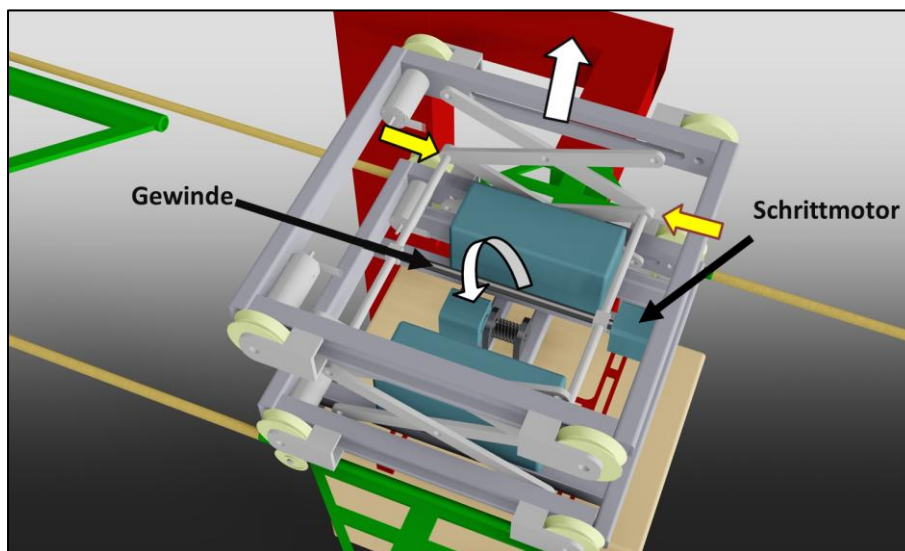


Abbildung 5.31: Gewindestange

Um den Spurwechsel vorzunehmen, muss der obere Teil der Laufkatze auf die Höhe der oberen Spur gebracht werden. Dafür wird das Prinzip einer Hebebühne verwendet. Der Schrittmotor ist an der Gewindestange befestigt und dreht diese, wodurch die Querprofile zusammengesoben werden (siehe Abb. 5.31). Die Querstreben längs der Außenkanten, die

mit den Querprofilen überkreuzt verbunden sind, werden dann so zusammengedrückt, dass der obere Teil der Laufkatze nach oben fährt (gelbe Pfeile). Durch die Verwendung eines Schrittmotors kann auch hier die Höhe des Laufkatzenteils sehr genau gesteuert und auf die obere Spur eingestellt werden.

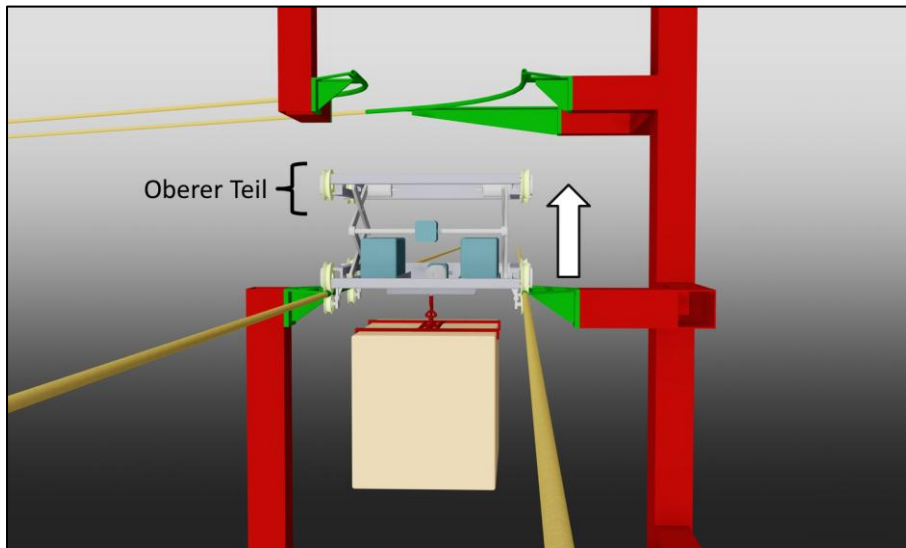


Abbildung 5.32: Oberer Teil der Laufkatze

Die Abbildung 5.32 zeigt den beschriebenen Vorgang noch einmal aus der Seitenansicht. Der Schrittmotor fährt den oberen Teil der Laufkatze nach oben. Auf der vorgesehenen Höhe kommt dieser dann zum Stillstand.

Der obere Teil erreicht das Niveau der Metallführungen der zweiten Spur. Hier stoppt der Schrittmotor. Nachdem die Hebevorrichtung der Laufkatze ausreichend weit ausgefahren und zum Stillstand gekommen ist, folgt die Vorwärtsbewegung der Laufkatze. Die Antriebe des oberen und unteren Teils der Laufkatze werden betätigt, um die Laufkatze gleichmäßig nach vorne auf die obere Spur zu fahren.

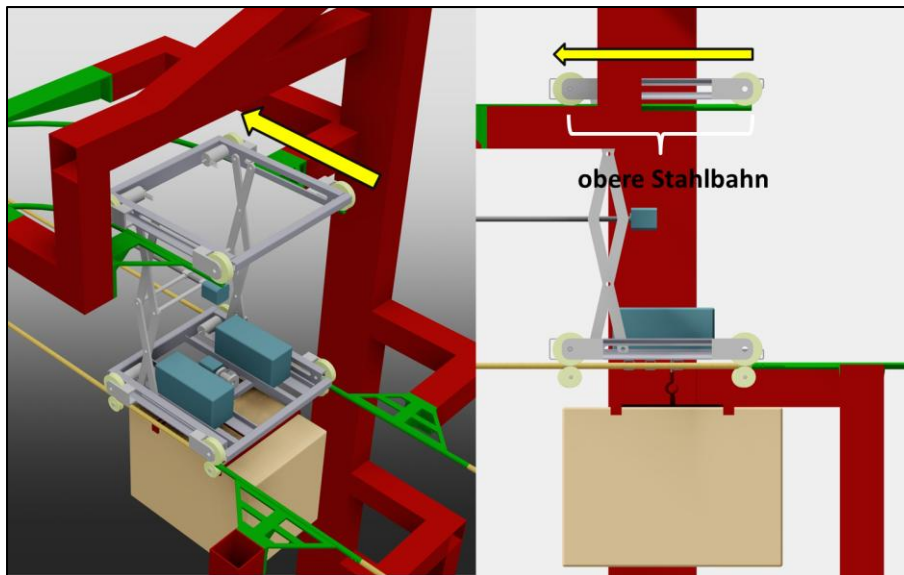


Abbildung 5.33: Perspektive und Seitenansicht für die oberen Metallführungen

Nachdem sich die Laufkatze komplett auf die obere Spur geschoben hat und sich auf der Metallführung befindet, stoppt sie (siehe Abb. 5.33).

Die Seilrollen des unteren Teils der Laufkatze (durch rote Pfeile markiert) werden so befestigt, dass sie zum normalen Betrieb zwischen die Räder und die Rollen geklemmt werden. Nachdem die Laufkatze vollständig auf der Metallführung der oberen Spur gefahren ist und angehalten hat, werden die Rollenbefestigungen gelöst und die Seile der unteren Spur freigegeben.

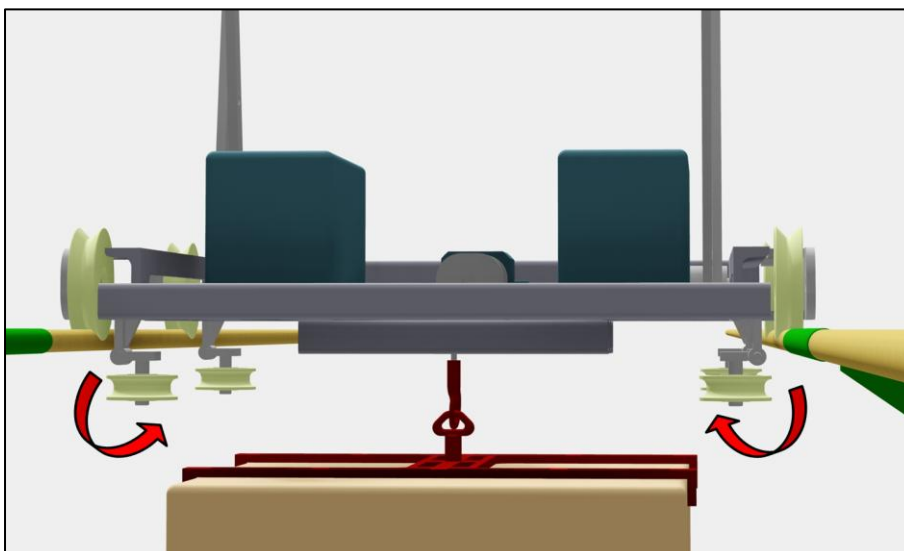


Abbildung 5.34: Geklemmte Seilrollen

Die Seilrollen werden so umgeklappt, dass sie dem unteren Teil der Laufkatze eine freie Bahn ermöglichen und nicht von den unteren Seilen behindert werden, sobald die Hebevorrichtung

wieder zusammen gefahren wird und der untere Teil der Laufkatze dadurch nach oben fährt (siehe Abb. 5.34).

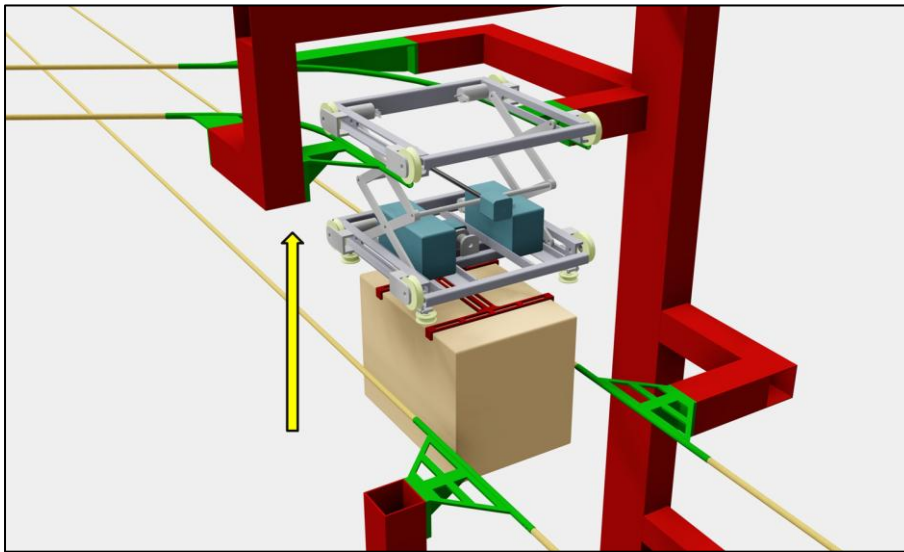


Abbildung 5.35: Unterer Teil der Laufkatze

Der Schrittmotor dreht sich jetzt in die dem Ausfahren entgegengesetzte Richtung (siehe Abb. 5.35). Der gelbe Pfeil zeigt die Bewegungsrichtung. Die Querprofile werden dadurch wieder auseinander gefahren und die Hebevorrichtung zieht sich zusammen. Da der obere Teil der Laufkatze in der Bewegungsrichtung der Hebevorrichtung fest von den Metallführungen der oberen Spur gehalten wird, kann sich durch das Zusammenziehen der Hebevorrichtung nur der untere Teil anheben. Die Nutzlast muss ebenfalls mit angehoben werden, damit es beim Weiterfahren nicht von den Seilen der unteren Spur behindert wird.

Der Schrittmotor der Hebevorrichtung stoppt, sobald die Räder der unteren Laufkatze an der oberen Metallführung angekommen sind. Zusammen mit den Rädern der oberen und unteren Laufkatze wird die Führung dann komplett eingeschlossen, so wie vorher die Seile der unteren Spur durch die Räder und Rollen der unteren Laufkatze.

Die Antriebsräder der unteren Laufkatze sorgen nun für mehr Stabilität und Befestigung, so wie die Rollen der unteren Laufkatze das bisher übernommen hatten. Die Antriebsräder der oberen Laufkatze übernehmen ab diesem Zeitpunkt den Vortrieb der gesamten Laufkatze mit der Nutzlast und fahren die obere Spur weiter in einer anderen Richtung als der Ausgangsrichtung.

Ein Richtungswechsel kann auch auf einer Spur realisiert werden, wenn die Spur beispielsweise über eine 90°-Kurve führt.

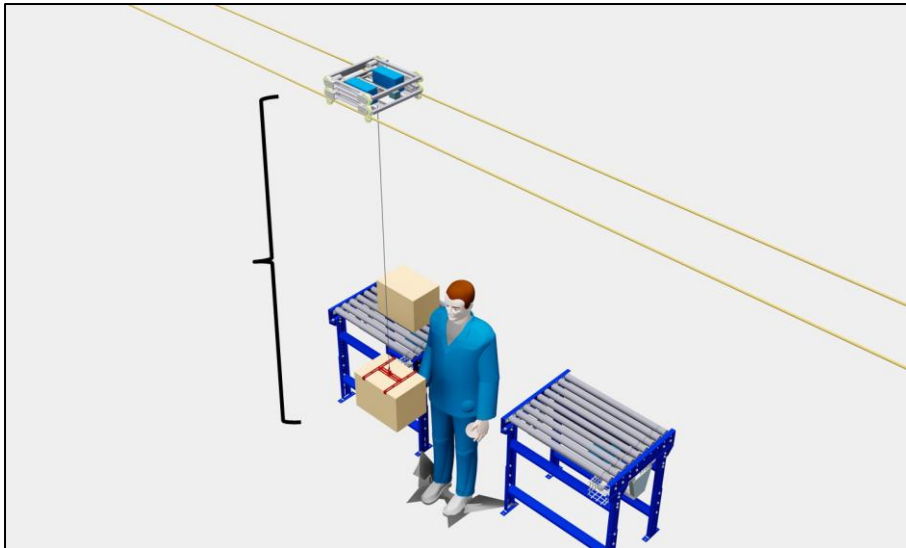


Abbildung 5.36: Abgabe der Nutzlasten

An der Entlade bzw. Beladestation wird die Nutzlast auf das Niveau der Ablagefläche herunter gefahren und bei Bedarf eine neue Nutzlast aufgenommen (siehe Abb. 5.36).

5.4.1 Vor- und Nachteile des vierten Konzeptes

Die Vor- und Nachteile des vierten Konzeptes können wie folgt zusammengefasst werden:

Vorteile:

- Autonom gesteuerte Laufkatze
- Ohne Hilfe von externen Aktoren oder Hilfen beim Richtungswechsel durch Spurwechsel
- Ebenenwechsel möglich.

Nachteile:

- Größere Anzahl von Bauteilen und somit höheres Systemgewicht
- Kostenaufwand
- Kompliziertes Steuerungssystem
- Eventuelle Zeiteinbußen beim Spurwechsel
- Zusätzlicher Mechanismus innerhalb der Laufkatze notwendig
- Zwei Akkus notwendig.

5.5 Fünftes Konzept

Bei diesem Konzept handelt es sich um eine Laufkatze, die auf einseitigen Spuren fährt. Die Richtungs- bzw. Spurwechsel werden von der Laufkatze mit Hilfe von in der Laufkatze integrierten Aktoren autonom organisiert. Die einseitigen Spuren befinden sich auf einem Höhenniveau, Spurwechsel werden wie im vorherigen Konzept an dafür vorgesehenen Stationen ausgeführt, es muss dafür aber kein Höhenunterschied überwunden werden.

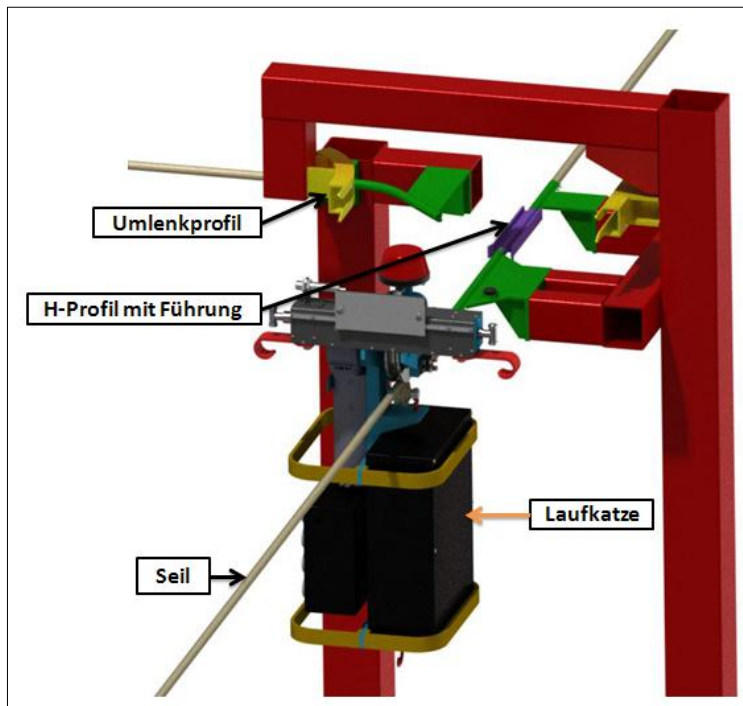


Abbildung 5.37: Laufkatze

In der Abbildung 5.37 wird die Laufkatze an der Spurwechselstation gezeigt. Die Seilbahnen enden und starten in Metallführungen, die im Bild grün dargestellt sind. Zwischen den Metallführungen der verschiedenen Spurteilen ist mittig in Violett der Umlenkmechanismus für die Laufkatze dargestellt. Es ist ein H-Profil, das mit einer Führung versehen ist. Es verbindet das Ausgangsseil, auf dem sich die Laufkatze befindet, mit dem Ende der einen oder anderen Spur. Der Umlenkmechanismus ist frei beweglich, wodurch die Richtungsentscheidung durch die Laufkatze selbst vorgegeben werden kann. In Gelb sind in der Zeichnung richtungsändernde Umlenkprofile dargestellt, die als Führungen für den Mechanismus der Laufkatze dienen. Nachfolgend werden die einzelnen Prinzipien genauer erläutert.

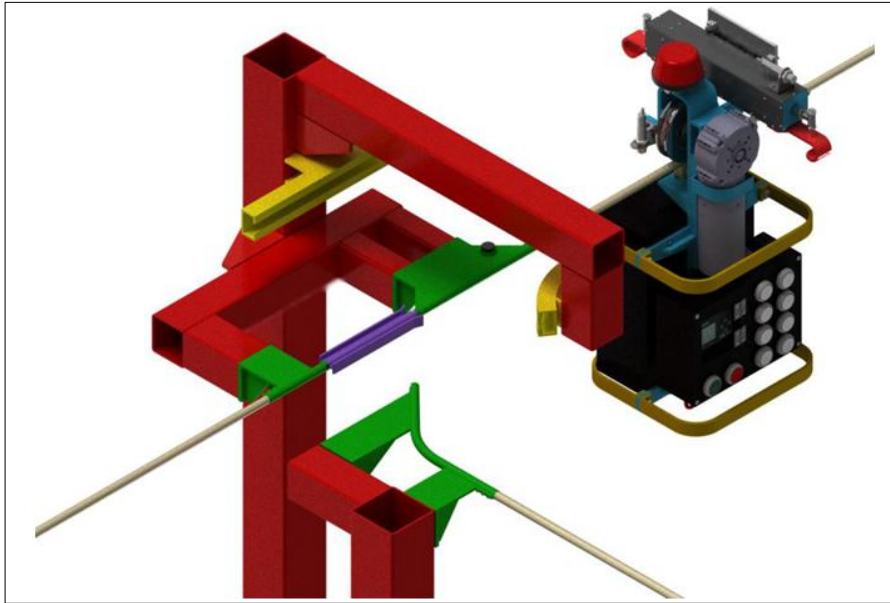


Abbildung 5.38: Umlenkprofile

In der Abbildung 5.38 sind die beiden Umlenkprofile noch einmal deutlicher dargestellt. Sie sind sich gegenüber liegend montiert und weisen den gleichen Abstand zur Fahrspur auf. Der Rotationspunkt für die Spurwechselschiene befindet sich an der Ausgangsbahn und ist der Lagerungspunkt des zuvor beschriebenen Umlenkmechanismus, der im obigen Bild violett dargestellt ist. Am hinteren Teil der Laufkatze sind in grauen Aktoren dargestellt, die für den Richtungswechsel zuständig sind.

Wenn die Laufkatze auf die rechte Spur fahren soll, wird der rechte Linearaktor so ausgefahren, dass sich das passend geformte Ende des Aktors nach außen auf die Höhe des Umlenkprofils bewegt und bei Vortrieb der Laufkatze passend in das jeweilige Umlenkprofil geschoben wird. Dort kann dieses dann beim Vorwärtsfahren nur in eine Richtung entlang des Profils bewegt werden, so dass die Laufkatze dementsprechend der vorgegebenen Richtung folgt. Die Laufrichtung der Laufkatze wird über das Umlenkprofil vorgegeben. Soll die Laufkatze nach links fahren, wird analog der Linearaktor für die linke Seite betätigt und das Ende des Aktors an der Laufkatze fährt in das linke Umlenkprofil. Die Laufkatze folgt dann analog diesem Profil.

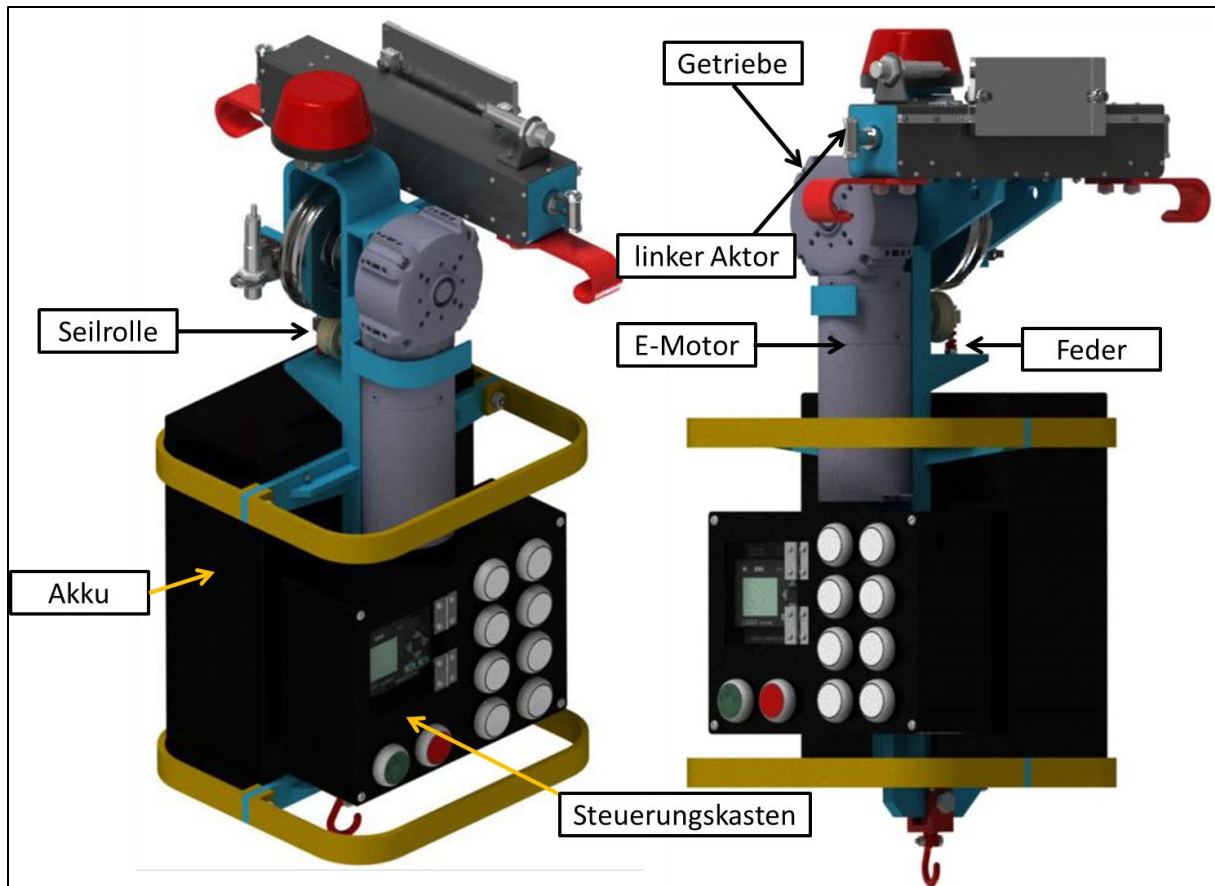


Abbildung 5.39: Komponenten der Laufkatze

Die Abbildung 5.39 zeigt eine Detailansicht der Laufkatze. Der Akku, der die Motoren der Laufkatze antreibt, wird mitgeführt. Ein Elektromotor treibt über ein Getriebe das Rad oberhalb des Seils der Bahn an. Unterhalb dieses Rades ist eine Rolle vorgesehen, durch die das Seil fester an das Antriebsrad gepresst wird. Es sorgt somit für mehr Laufruhe und Stabilität. Das Getriebe für das Antriebsrad ist notwendig, weil der Antriebsmotor senkrecht zum Antriebsrad montiert ist und die Motorbewegung übersetzt werden muss. Senkrecht zur Laufrichtung der Laufkatze sind die Linearaktoren angeordnet. Diese werden ebenfalls über den Akku gespeist und wie der Elektromotor über ein Steuermodul angesteuert. Auf beiden Seiten der Laufrolle sind Federn angebracht, die eine dämpfende Funktion für die Laufkatze übernehmen. Mit dem Haken am unteren Laufkatzengehäuse werden die Lasten aufgenommen.

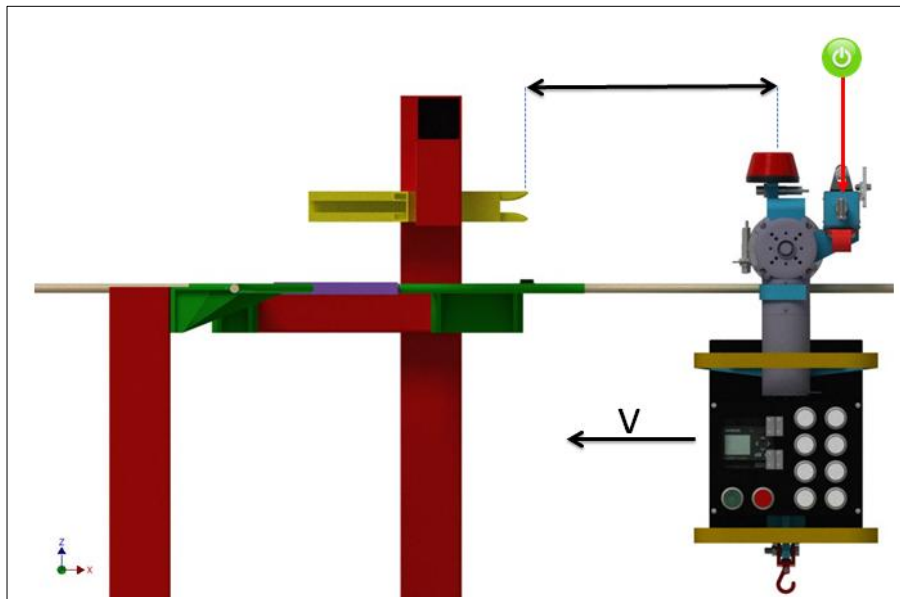


Abbildung 5.40: Linker Aktor

Die Abbildung 5.40 zeigt in der Seitenansicht die Spurwechselstation sowie die Laufkatze. Die Laufkatze bewegt sich auf die Station zu, auf deren Höhe sowohl die linke wie auch die rechte Spur zur Auswahl stehen (hier nur im Profil zu sehen). Auf der Seite der anzufahrenden Spur, wird der Linearaktor ausgefahren, um im Umlenkprofil der Seite einzuhaken. Um die Umlenkung in die linke Spur zu erzeugen, wird der linke Aktor ausgefahren; entsprechendes gilt für die Gegenseite.

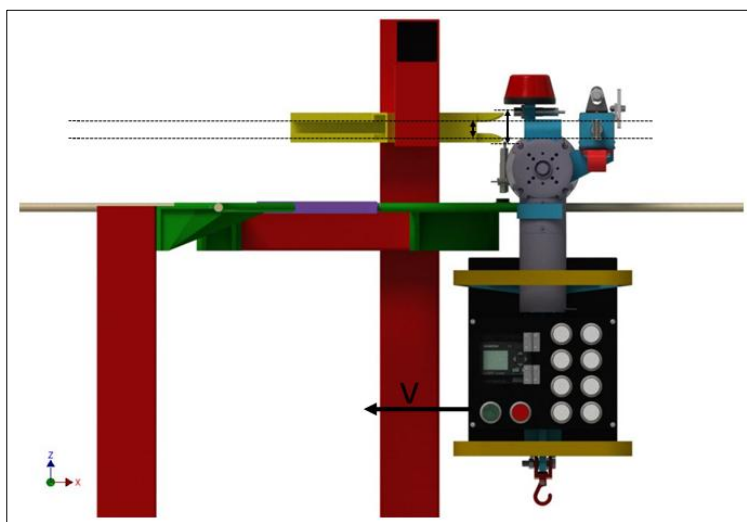


Abbildung 5.41: Der Aktor

Da die Laufkatze durch die Fahrbewegung zu schwingen beginnt, was auf die fehlende Seitenstabilität des 1-Seil-Prinzip zurückzuführen ist, sind in den Umlenkprofilen an den jeweiligen Ein- und Ausgängen sich nach außen hin vergrößernde Öffnungen vorgesehen. Dies erleichtert dem schwingenden Ende des Aktors das verhakungsfreie Einrutschen in das

entsprechende Profil. Durch das Einführen in eine zulaufende Form gelangt dieses in die nötige Position, um die Laufkatze lenken zu können (siehe Abb. 5.41).

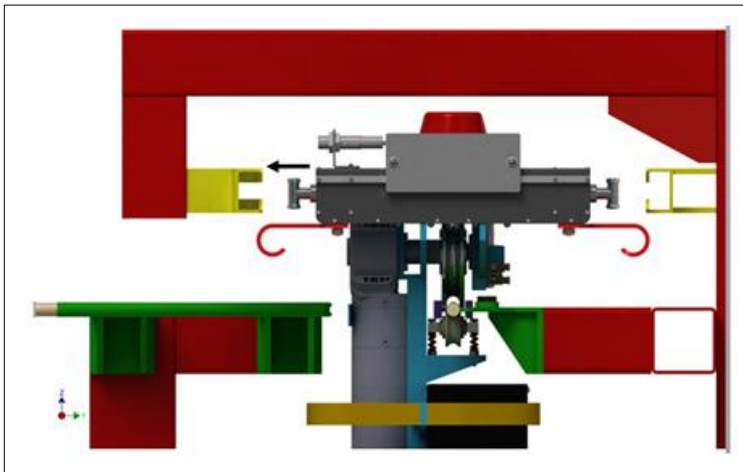


Abbildung 5.42: Haken

In der Abbildung 5.42 sind die Haken, die am Ende der Aktoren angebracht sind, nochmals im Profil zu sehen. Der Aktor fährt den Haken nach außen, bis er sich auf der Höhe der Außenwand des Umlenkprofils befindet. Um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten, können die Haken ausgefahren werden, während sich die Laufkatze in Bewegung befindet.

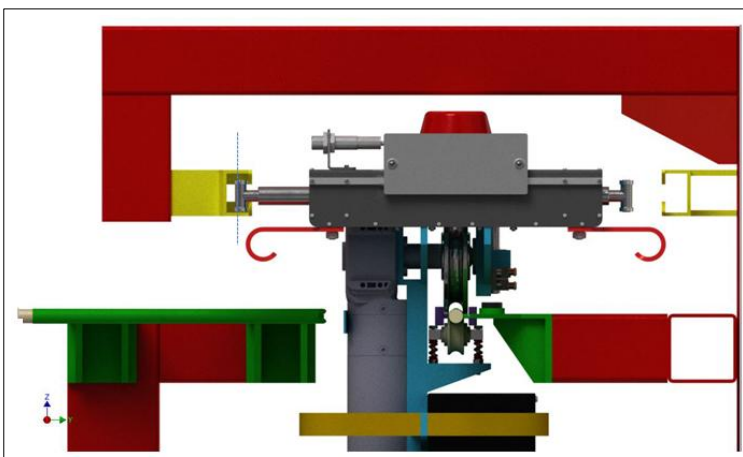


Abbildung 5.43: Umlenkprofil und Aktor

Abbildung 5.43 zeigt das passgenaue Einhängen des Aktors unter Einhaltung des gewünschten Abstandes in das Umlenkprofil. In Abbildung 5.44 befinden sich Haken und Antriebsrad der Laufkatze bereits im Umlenkprofil. Die Führung ist so geformt, dass das Rad bzw. die Laufkatze problemlos darüber rollen kann und so frei gelagert ist, dass es sich der Fahrtrichtung des Antriebsrades anpasst. Beim Rollen der Laufkatze auf die Schiene wird

diese durch den Zwang des Umlenkprofils nach außen gezogen, so dass sich die Schiene der Krafteinwirkung anpasst und ebenfalls in die Richtung gleitet.

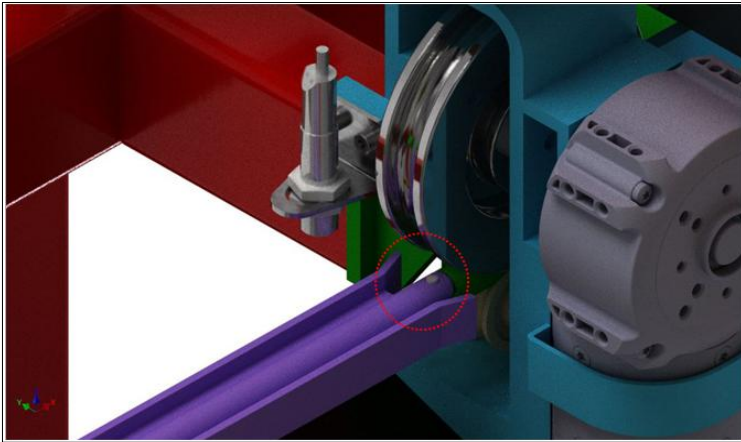


Abbildung 5.44: Gelenk und Umlenkschiene

Per Antriebsrad nähert sich die Laufkatze der Umlenkschienen. Hierbei wird die Laufkatze vollständig von der Umlenkschiene geführt. Das Drehgelenk der Schiene ist so eingebaut, dass es kein Hindernis für die Laufkatze darstellt.

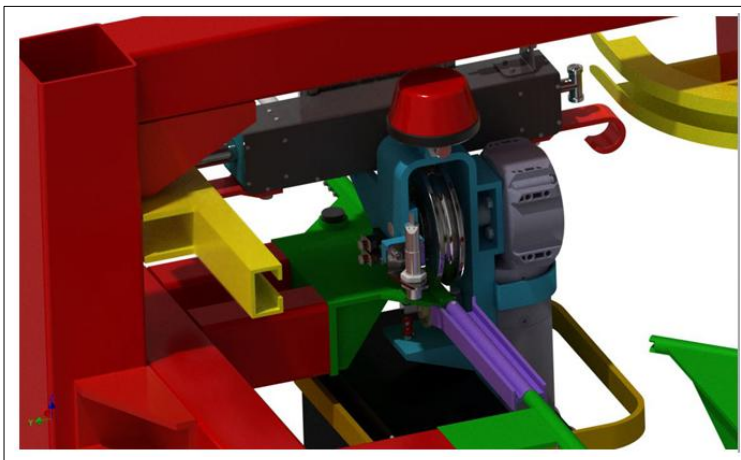


Abbildung 5.45: Vorderansicht des Gelenks

In der obigen Nahansicht ist die Stabilisierungsrolle zu sehen (siehe Abb. 5.45). Hier ist genauer erkennbar, dass sich die Kanten der Umlenkschiene zum Anfang hin nach außen öffnen. Das Spiel, das Antriebsrad und Rolle bei der Bewegung auf die Schiene haben, ist zunächst groß, so dass die Räder nicht gegen das Profil der Umlenkschiene stoßen oder behindert werden.

In Abbildung 5.46 sieht man noch einmal genauer, wie sich die Laufkatze mit dem Haken am Linearaktor links in das Umlenkprofil hinein bewegt. Die Laufkatze ist über den Haken mit dem Umlenkprofil verbunden. Die Laufkatze muss sich gezwungenermaßen mit dem Profil mitbewegen, wenn sie sich vorwärts bewegt. Sobald die Laufkatze auf der Umlenkschiene geführt wird und sich weiter vorwärts bewegt, sorgt das Umlenkprofil für die Spurhaltung von Laufkatze und Schiene.

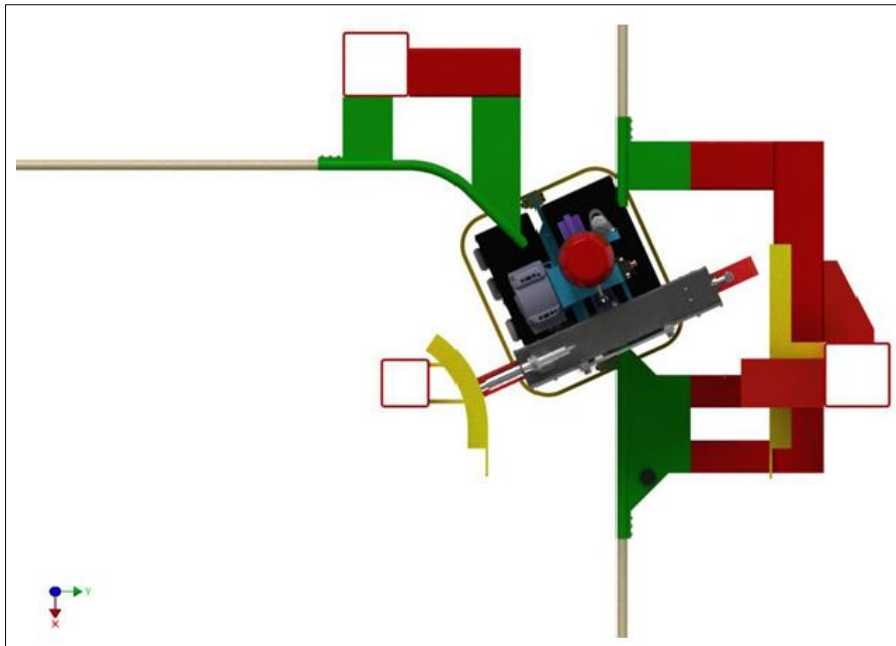


Abbildung 5.46: Spurwechsel

Bei weiterer Vorwärtsbewegung der Laufkatze und entsprechender stärkerer Belastung durch das Umlenkprofil bewegt sich auch die Umlenkschiene nachfolgend, bis sie an der linken Spur zum Halt kommt (siehe Abb. 5.46). Die Überfahrt der Laufkatze kann dann ohne Probleme erfolgen. Nach vollständiger Übertragung auf die gewünschte Spur, endet das Umlenkprofil und die Laufkatze wird aus der Führung wieder freigegeben. Analog funktioniert das Prinzip für die rechte Spur. Damit die Laufkatze auf der Umlenkschiene eine gute Führung erfährt, ist diese wie bereits beschrieben als H-Profil ausgeführt.

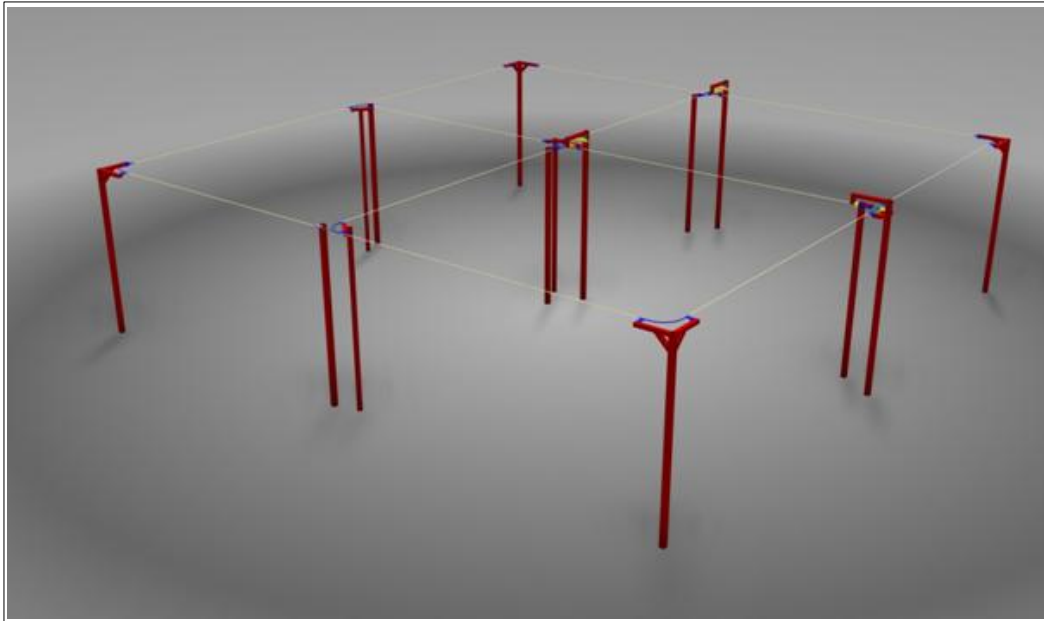


Abbildung 5.47: Layout für das fünfte Konzept

Die Abbildung 5.47 zeigt beispielhaft, wie das fünfte Konzept im Layout aussehen könnte. Die Laufkatze bewegt sich stets vorwärts und kann an den vorgesehenen Stellen die Spur wechseln. Die Be- und Entladestationen können zwischen die Pfeiler unter die Seile der Fahrbahn positioniert werden. Die Laufkatze fährt diese stationsweise je nach Programmierung ab. In den Abbildungen lässt sich die geringere Stärke der Stützpfähler erkennen. Ebenso geringer gestaltet sich der Materialaufwand für die Seile. Darüber hinaus sind die Fahrspuren jeweils nur mit einem Seil ausgestattet.

5.5.1 Vor- und Nachteile des fünften Konzeptes

Nachfolgend sind die Vor- und Nachteile des fünften Konzeptes aufgelistet:

Vorteile:

- Autonom gesteuerte Laufkatze
- Keine Hilfe externer Aktoren oder Hilfsmittel beim Spurwechsel benötigt
- Geringes Gewicht durch geringe Anzahl an Bauteilen
- Minimierter Komponentenaufwand der Laufkatze → geringer Konstruktionsaufwand
- schneller Richtungs- und Spurwechsel möglich.

Nachteile:

- komplexes Steuerungssystem notwendig
- Risiko des Kippens der Laufkatze bei schnellen Spur- bzw. Richtungswechseln.

5.6 Vergleich der Konzepte

Insgesamt wurden fünf verschiedene Konzepte vorgestellt, die sich in ihrer Anwendungsvariation und Komplexität von Konzept zu Konzept steigern. Da es sich bei dem fünften Konzept um eine zufriedenstellende Lösung handelte, wurde auf die Ausarbeitung weiterer Konzepte verzichtet.

Anfangs lag der Schwerpunkt darin, ein System zu entwickeln, bei dem eine gute Seitenstabilität gegeben ist und die Laufkatze aufgrund derer während der Fahrt nicht in Schwingungen gerät. Deshalb wurden hier zwei Seile übereinander positioniert. Der Nachteil bestand allerdings darin, dass die Laufkatze bei diesem ersten Konzept keinen Richtungswechsel vornehmen kann und das System aufgrund dieser Tatsache relativ unflexibel erscheint. Eine Verbesserung hierzu wurde durch das zweite Konzept realisiert, bei dem die Seile ebenfalls parallel übereinander angeordnet sind. Darauf aufbauend wurde das Konzept so weiterentwickelt, dass der Richtungswechsel mithilfe einer Weiche umgesetzt werden kann, woraus sich das dritte Konzept ergibt. Das vierte Konzept stellt eine weitere höhere Entwicklungsstufe dar, da hier die Laufkatze erstmals in der Lage ist, den Richtungswechsel selbst vornehmen zu können. Hierbei war es allerdings erforderlich, dass die Laufkatze vor dem Richtungswechsel abstoppen muss. Dies wurde beim fünften Konzept dahingehend verbessert, dass der Richtungswechsel während der Fahrt stattfinden kann. Außerdem wurde eine passive Weiche entwickelt, d. h. alle Steuerungen gehören direkt zur Laufkatze. Mit Hilfe eingebauter Aktoren bei der Laufkatze findet der Richtungswechsel statt.

Tabelle 5.6 zeigt eine Bewertungsmatrix der beschriebenen Konzepte. Um die Vergleichbarkeit der Konzepte deutlich zu gestalten, wurde ein Konzept als Basiskonzept ausgewählt und die weiteren Konzepte hinsichtlich der jeweiligen Kategorie mit dem Basiskonzept verglichen.

In der folgenden Darstellung wurde Konzept 1 als Basiskonzept gewählt und deshalb jede Kategorie auf „0“ gesetzt. Bessere Konzepte werden je nach Verbesserungsgrad mit +, ++ oder +++, schlechtere je Verschlechterungsgrad mit -, -- oder --- bewertet, bei keiner nennenswerten Verbesserung oder Verschlechterung wurde wiederum die „0“ eingetragen. Das Pluszeichen steht immer für eine bessere Bewertung, z. B. bedeutet eine Erhöhung der Kosten ein Minus, obwohl der Betrag der Kosten steigt.

Tabelle 5.5: Bewertungsmatrix

Kategorie	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4	Konzept 5
Gesamtkosten Seilbahn	0	-	+	-	+
Materialaufwand Seilbahn	0	-	+	-	+
Montageaufwand Seilbahn	0	-	+	-	+
Erweiterungsmöglichkeiten der Seilbahn*	0	0	+	+	+
Aufwand bei Seilbahnerweiterung*	nicht möglich	nicht möglich	-	-	+
Wartungs- und Instandhaltungsaufwand	0	0	-	-	0
Raumbedarf der Seilbahn**	0	0	+	-	+
Verhältnis Nutzlast/ Eigenlast der Laufkatze	0	-	-	-	-
Fahrstabilität	0	0	-	+	-
Arbeitsgeschwindigkeit	0	0	-	+	+
Komplexität der Steuerung	0	+	++	+++	+++
Komplexität der Gesamtanlagen	0	+	++	+++	+++
Nachnutzungsmöglichkeiten der Ausrüstung bei temporär vorgesehener Nutzung	0	0	+	-	+
Automatisierungsgrad	0	+	++	+++	+++

* Hierunter fallen sowohl die einfache Lösungserweiterung als auch Nebenstrecken mit Weichen

** In diesem Punkt werden die erforderliche Pfeilerhöhe und die erforderliche Höhen- und Breitenausdehnung der Seilaufhängung einbezogen

Das erste Konzept ist relativ einfach gehalten, wobei selbst bei diesem die Kosten durch die große Tragkonstruktion nicht unerheblich sind. Ein Spurwechsel der Laufkatzen ist nicht vorgesehen bzw. realisierbar. Die logistischen Möglichkeiten des Konzeptes sind dementsprechend begrenzt, während der Aufwand für die Umsetzung relativ hoch ist.

Das zweite Konzept ist dem ersten recht ähnlich. Die Möglichkeit, Lasten automatisch zu transportieren, um Personal einzusparen, spart Kosten, ändert aber nichts an der hohen Kostenintensität der Infrastruktur. Die Laufkatzen können nach wie vor lediglich im Kreis fahren; Spurwechsel, um Stationen außerhalb der Stammstrecke zu bedienen, sind nur mit großem Aufwand realisierbar.

Das dritte Konzept ist vergleichsweise komplex. Es benötigt viele Infrastrukturkomponenten und erfordert bei Zunahme der abgedeckten Fläche bzw. der Anzahl der Be- und Entladestationen einen erhöhten Investitionsaufwand. Auch unter der Konzipierung als

Ultraleichtvariante zur Betriebskosteneinsparung ist der Aufwand zum Aufbau des Systems sehr viel größer als bei den ersten beiden Konzepten. Durch die Anordnung der Umlenkstationen und den Aufbau der Infrastruktur ist die Anordnung der Be- und Entladestationen nicht beliebig wählbar. Ein wesentliches Merkmal dieses Konzeptes ist dessen erhöhter Kostenaufwand im Vergleich zu den anderen Konzepten.

Durch seinen Strukturaufbau kann das vierte Konzept etwas flexibler eingesetzt werden. Es sind Weichen für Spurwechsel vorgesehen, die eine Richtungsänderung zu jeder Zeit in beliebige Richtungen ermöglichen. Durch die Möglichkeit, Spurwechsel variabel zu vollziehen, können beliebig angeordnete Be- und Entladestationen angefahren werden. Nachteilig ist allerdings auch hier, dass zu jedem Spurwechsel auch ein Stahlträger gehört, um die Seile der Fahrbahn zu halten. Ein weiterer Nachteil liegt in den zusätzlich benötigten Hebevorrichtungen der Laufkatze, die zur Durchführung der Spurwechsel benötigt werden. Hinzu kommt die Notwendigkeit eines zweiten Seiles pro Fahrspur, die den Aufbau des Konzeptes zusätzlich verteuert.

Das fünfte Konzept kommt im Gegensatz zum vierten mit nur je einem Seil pro Fahrspur aus. Zusätzlich sind die Richtungswechsel durch einen kleineren, leichteren, durch die Laufkatze mitzuführenden Mechanismus, möglich. Diese Gründe ermöglichen es, die Kosten für die Infrastruktur und den Betrieb der Laufkatzen niedriger zu halten. Eine Relativierung der Kostenersparnis gründet auf der in Kapitel 5.5 beschriebenen Ausstattung der Richtungswechselstationen mit zusätzlichen Elementen. Eine weitere Kosteneinsparung entsteht durch die Möglichkeit der Fahrspurinstallation auf einer Ebene, so dass die Träger der Seile materialsparend aufgebaut werden können.

Die Erweiterungsmöglichkeiten des Systems sind bei den Konzepten 3 bis 5 am besten gewährleistet. Der Aufwand hierzu ist beim fünften Konzept aber deutlich geringer, da das Seilsystem weniger komplex ist und nur aus einem einzigen Seil besteht. Der Wartungs- und Instandhaltungsaufwand ist bei den Konzepten 3 und 4 am höchsten, was hier mit der spezifischen Konstruktionsweise begründet werden kann. Der Raumbedarf variiert ebenfalls innerhalb der Konzepte und ist bei Konzept 4 wiederum am größten, fällt bei allen anderen Konzepten vergleichsweise günstiger aus und ist bei den Konzepten 3 und 5 am günstigsten. Das Verhältnis von Nutz- und Eigenlast der Laufkatze ist beim ersten Konzept am besten ausgebildet, alle weiteren Konzepte sind vergleichsweise schlechter in diesem Punkt geeignet. Die höchste Fahrstabilität weisen Systeme auf, die mit zwei parallel zu einander verlaufenden Seilen ausgestattet sind, da hier eine gute Seitenstabilität gegeben ist und das Seil weniger stark in Schwingungen gerät. Die höchste Fahrstabilität von allen Systemen ist beim vierten

Konzept gegeben, was auf die besondere Anordnung des Systems zurückzuführen ist. Systeme aus anderen Konzepten, die nur mit einem Seil konzipiert sind, weisen hingegen eine schlechtere Stabilität- und insbesondere Seitenstabilität- auf.

Die höchste Arbeitsgeschwindigkeit kann bei den Konzepten 4 und 5 erreicht werden. Die Komplexität von Steuerung und Gesamtanlagen ist bei Konzept 1 vergleichsweise am niedrigsten, da es sich hier um eine recht einfache Ausführung handelt. Alle nachfolgenden Konzeptvorschläge weisen eine höhere Komplexität auf, wobei die Konzepte 4 und 5 am komplexesten, da von den technischen Möglichkeiten her betrachtet am weitesten fortgeschritten, sind. Auch ist hier der Automatisierungsgrad am höchsten.

Sollte eines der System nur temporär genutzt werden und für eine Nachnutzung bereitgestellt werden, kann dies am besten bei den einseitigen Varianten 3 und 5 geschehen. Am schlechtesten ist dies bei Variante 4 möglich, was wiederum auf die hohe Komplexität des vierten Systemvorschlags und dessen besondere Systemstruktur zurückzuführen ist.

Aufgrund des oben angeführten Konzeptvergleiches wird folgend das fünfte Konzept für die weitere Betrachtung berücksichtigt.

Kapitel 6

6 Ausführliche Beschreibung des fünften Konzeptes

In diesem Kapitel wird das bereits oberflächlich beschriebene Konzept 5 ausführlicher untersucht.

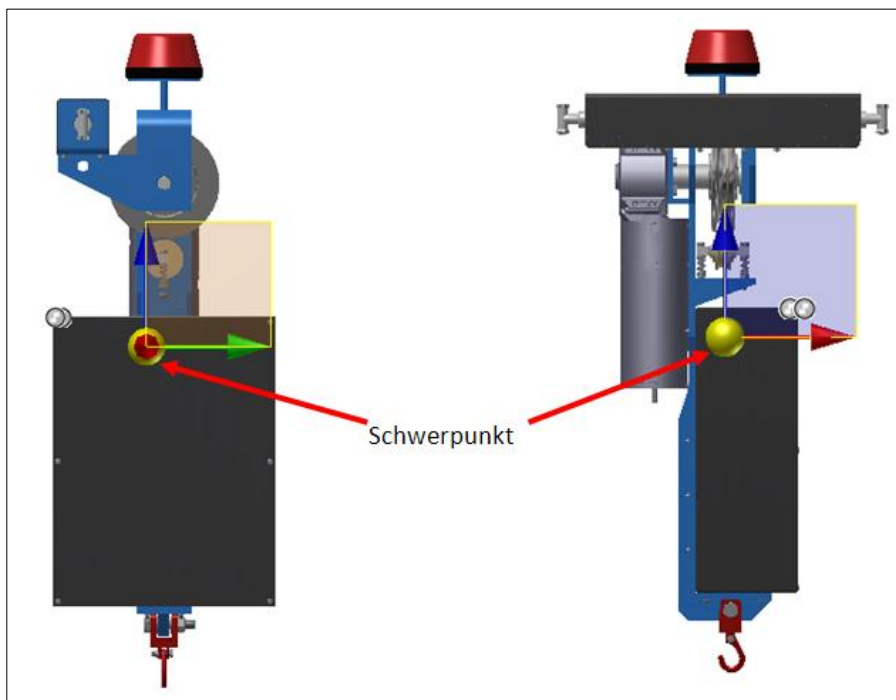


Abbildung 6.1: Schwerpunkt der Laufkatze

Um eine kontinuierliche Laufruhe der Laufkatze zu gewährleisten, ist der Schwerpunkt der Laufkatze horizontal auf der Höhe des Seils der Fahrspur auszurichten. Dabei nimmt die Schwinganfälligkeit ab, wenn der Schwerpunkt dichter an den Seilen liegt. Die Position des Gesamtschwerpunktes wird dabei stark durch die Positionen der schwereren Laufkatzen-Komponenten beeinflusst. Da der Antriebsmotor seitlich an der Laufkatze montiert ist, verschiebt sich der Schwerpunkt der Laufkatze hin zum Motor. Um dies auszugleichen, kann der Akku vom Elektromotor weg verschoben werden (siehe Abb. 6.1). Der Schwerpunkt des Akkus gleicht dann den verschobenen Schwerpunkt durch den E-Motor aus. Durch die Position des Akkus können mögliche Unwuchten durch andere Komponenten der Laufkatze ausgeglichen werden.

6.1 Komplette Laufkatze

An dieser Stelle wird die Laufkatze mit Steuerungskasten und Sensoren vorgestellt. Zudem erfolgen Berechnungen zu Motorleistung, Fahrzeit der Laufkatze und zum Akku. Diese Berechnungen stellen die Grundlage für die Auswahl geeigneter Komponenten dar.

6.1.1 Laufkatze mit Steuerungskasten und Sensoren



Abbildung 6.2: Darstellung der Laufkatze mit Lithium- Ionen- Akkumulator

Die Laufkatze ist das Transportgerät des ganzen Konzeptes, die als eine eigene Anlageneinheit zu betrachten ist. Ausgestattet ist die Laufkatze mit einer Hebe-Einheit mit EC- Motor samt Winkelgetriebe und Lasthaken, der wie eine Art Kran wirkt (siehe Abb. 6.2). Über eine gleitend gelagerte Seilrolle und eine Konter-Rolle wird die Laufkatze auf dem Polyesterseil positioniert. Die Energiespeisung erfolgt über einen Lithium- Ionen-Akkumulator. Lithium-Ionen-Akkumulator (auch Lithium-Ionen-Akku, Li-Ion-Akku) ist der Oberbegriff für Akkumulatoren auf der Basis von Lithium. Lithium-Ionen-Akkumulatoren weisen im Vergleich zu anderen Akkumulator-Typen eine hohe Energiedichte auf, erfordern jedoch in den meisten Anwendungen eine elektronische Schutzschaltung. Lithium-Ionen-Akkus sind thermisch stabil und unterliegen einem nur sehr geringen Memory-Effekt, was

dessen Eignung für den Einbau in diesem Einsatzgebiet zusätzlich begünstigt. Des Weiteren ist die Laufkatze mit zwei Aktoren ausgestattet, die seitlich herausfahrbar und für den Richtungswechsel unabdingbar sind. Diese Vorgehensweise wurde bereits in einer vorherigen Konzept-Beschreibung ausführlich erläutert.

6.1.2 Motorbetrachtung

Um die Auswahl eines geeigneten Motors treffen zu können, bedarf es näherer Betrachtungen zu den Eigenschaften, die dieser Motor aufbringen sollte. Hierzu waren Berechnungen zu Drehmoment, Drehzahl und Motorleistung nötig. Die Ergebnisse der Berechnungen sind nachfolgenden dargestellt. Ebenso ein Vorschlag für einen geeigneten Motortyp. Um das Drehmoment am Rad M_R zu berechnen, muss der Fahrwiderstand ermittelt werden. Hierzu dient folgende Formel:

$$M_R = F_{FW} \times r$$

Der Radius beträgt 0,04 Meter: $r = 0,04 \text{ m}$

F_{FW} steht für den Fahrwiderstand: $F_{FW} = \text{Fahrwiderstand}$

Diese ist die Summe aus dem Luftwiderstand F_{Luft} , dem Rollwiderstand F_{Roll} , dem Steigerungswiderstand F_{Steig} sowie dem Beschleunigungswiderstand F_{Be} :

$$F_{FW} = F_{Luft} + F_{Roll} + F_{Steig} + F_{Be}$$

Zur Ermittlung des Luftwiderstands F_{Luft} kann folgende Formel genutzt werden:

$$F_{Luft} = \frac{A}{2} \times C_W \times D \times v^2$$

D steht für die Stirnfläche des Fahrzeugs. Hierbei handelt es sich um die Projektionsfläche der Fahrzeugfront auf eine senkrechte Fläche. Als Stirnfläche wird ein maximaler Wert von 1 m^2 angenommen. Es ist nicht davon auszugehen, dass die Laufkatze größer sein wird:

$$D = 1 \text{ m}^2$$

Ein weiterer Parameter der Formel ist der Luftwiderstandsbeiwert C_W .

Es handelt sich um einen dimensionslosen Wert, der abhängig von der Fahrzeugform ist. Der Mensch hat einen Luftwiderstandsbeiwert von $C_W = 0,78$. Dieser Wert wurde für die Berechnung verwendet, da die Laufkatze einen geringeren Luftwiderstandsbeiwert hat und somit eine gewisse Toleranzspanne gegeben ist.

A ist die Luftdichte. Diese ändert sich in Abhängigkeit der Temperatur. Für die Berechnung wird folgende Konstante verwendet:

$$A = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Die Fahrgeschwindigkeit wird durch v ausgedrückt. Hierfür folgender Wert angenommen:

$$v = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Zurück zur Ausgangsformel zur Ermittlung des Luftwiderstands:

$$F_{\text{Luft}} = \frac{A}{2} \times C_W \times D \times v^2$$

$$F_{\text{Luft}} = \frac{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} \times 0,78 \times 1\text{m}^2 \times \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$F_{\text{Luft}} = 0,468 \text{ N}$$

Der Luftwiderstand beträgt nach oben stehender Berechnung 0,468 Newton.

Zur Ermittlung des Fahrwiderstands muss ferner der Rollwiderstand ermittelt werden. Hierzu dient nachfolgender Rechenausdruck:

$$F_{\text{Roll}} = \mu_r \times m \times g \times \cos \alpha$$

Um ein Gleiten zu vermeiden, wird eine gummibelegte Seilrolle verwendet, so entsteht Haftkraft zwischen Seil und Rolle.

$$\mu_r = \text{Rollwiderstandsbeiwert}$$

Der Rollwiderstandsbeiwert μ_r ist abhängig vom Reifentyp. Es wird ein Widerstandsbeiwert von 0,015 angenommen, der auch beim Autoreifen auf Asphalt gilt, da dieser als Maximalwert angenommen werden kann und davon auszugehen ist, dass er für die Konstruktion niedriger ausfallen wird und somit ein Sicherheitspuffer besteht:

$$\mu_r = 0,015$$

Dies begründet sich daraus, dass es sich bei den Konstruktionsmaterialien um Gummi auf Kunstfaser handelt und es für diese Kombination in der Literatur keine konkreten Empfehlungswerte gibt.

Der Winkel α wird mit einer Steigung von 5° angenommen.

$$F_{\text{Roll}} = \mu_r \times m \times g \times \cos \alpha$$

Für die Masse wird ein maximaler Wert von 40 kg angenommen: Dieser setzt sich zusammen aus 20 kg Maximalgewicht für die Last, die die Laufkatze bewegen kann und 20 kg Maximalgewicht der Laufkatze selbst.

$$m = 40 \text{ kg} ; g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\mu_r = 0,015 , \alpha = 5^\circ$$

$$F_{\text{Roll}} = 0,015 \times 40 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \cos 5^\circ$$

$$F_{\text{Roll}} = 5,86 \text{ N}$$

Der Rollwiderstand beträgt 5,86 Newton.

Die nächste zu ermittelnde Größe ist der Steigungswiderstand F_{Steig} . Er ist das Produkt aus Masse mal Fallbeschleunigung mal Sinus Alpha:

$$F_{\text{Steig}} = m \times g \times \sin \alpha$$

$$F_{\text{Steig}} = 40 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \sin 5^\circ$$

$$F_{\text{Steig}} = 34,2 \text{ N}$$

Der Steigungswiderstand beträgt 34,2 Newton.

Der Beschleunigungswiderstand F_{Be} kann mithilfe folgender Formel ermittelt werden:

$$F_{Be} = (e_i \times m_{Fz} + m_{zu}) \times a$$

Der Parameter e_i entspricht dabei dem Massenfaktor. Dieser muss vorab noch berechnet werden. Bekannt ist die Masse des Fahrzeugs m_{Fz} sowie die Masse der Zuladung des Fahrzeugs m_{zu} , die jeweils mit ihrem Maximalgewicht von je 20 kg angenommen werden. Ebenso ist die gemessene Beschleunigung des Fahrzeugs a bekannt. Diese beträgt $0,5 \frac{m}{s^2}$.

Für die Berechnung des Massenfaktors e_i spielen folgende Größen eine Rolle:

$$J_{Rolle} = \text{Massenträgheitsmoment der Räder}$$

$$J_{Welle} = \text{Massenträgheitsmoment der Welle}$$

Das Massenträgheitsmoment bezieht sich auf das obere Rad, da dieses mit dem Motor verbunden ist.

Ein weiterer Parameter zur Ermittlung des Massenfaktors e_i ist der dynamische Radius (ohne Verformung) r_{dyn} . Die vollständige Formel zur Berechnung des Massenfaktors e_i lautet:

$$e_i = \frac{J_{Rolle} + J_{Welle}}{m \times r_{dyn}^2} + 1$$

Zunächst muss die noch unbekannte Größe des Massenträgheitsmoments der Räder J_{Rolle} ermittelt werden. Diese lässt sich errechnen aus:

$$J_{Rolle} = \frac{m_R \times (r_1^2 + r_2^2)}{2}$$

Für die Berechnung der Formel erweist sich die nachfolgende Grafik aus Abbildung 6.3 als hilfreich:

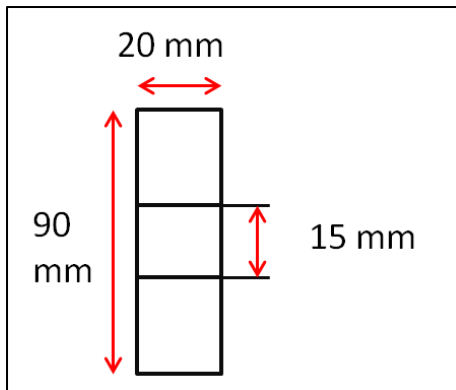


Abbildung 6.3: Grafik zur Ermittlung des Massenträgheitsmoments der Räder

$$r_1 = 0,0075 \text{ m}$$

Dieser Wert ergibt sich aus folgender Berechnung:

$$r_1 = \frac{15 \text{ mm}}{2} = 7,5 \text{ mm} = 0,0075 \text{ m}$$

Der Wert für r_2 kann in analoger Verfahrensweise ermittelt werden:

$$r_2 = \frac{90 \text{ mm}}{2} = 45 \text{ mm} = 0,045 \text{ m}$$

$$r_{\text{dyn}} = \text{mittlerer Radius}$$

$$m_R = 0,6 \text{ kg}$$

Durch das Einsetzen der Werte in die Formel ergibt sich folgende Rechnung:

$$J_{\text{Rolle}} = \frac{0,6 \text{ kg} \times ((0,0075 \text{ m})^2 + (0,045 \text{ m})^2)}{2} = 6,25 \times 10^{-5} \text{ kg} \times \text{m}^2$$

Der Massenträgheitsmoment der Welle J_{Welle} kann ausgerechnet werden, indem das Produkt aus Masse und quadriertem Wellenradius durch zwei geteilt wird:

$$J_{\text{Welle}} = \frac{m \times r_W^2}{2}$$

Letztere beide Größen sind bekannt: $m = 0,118 \text{ kg}$; $r_W = 0,010 \text{ m}$

und können daher in den Term eingesetzt werden:

$$J_{\text{Welle}} = \frac{0,118 \text{ kg} \times (0,010 \text{ m})^2}{2} = 0,59 \times 10^{-5} \text{ kg} \times \text{m}^2$$

Da nun die beiden Werte der Massenträgheitsmomente J_{Rolle} und J_{Welle} zur Verfügung stehen, können diese in die Formel zur Ermittlung des Massenfaktors e_i eingesetzt werden:

$$e_i = \frac{J_{\text{Rolle}} + J_{\text{Welle}}}{m \times r_{\text{dyn}}^2} + 1$$

$$e_i = \frac{6,25 \times 10^{-5} \text{ kg} \times \text{m}^2 + 0,59 \times 10^{-5} \text{ kg} \times \text{m}^2}{40 \text{ kg} \times (0,045 \text{ m})^2} + 1$$

$$e_i = 1,00084 \approx 1$$

Aufgrund der Tatsache, dass alle Werte zur Ermittlung des Beschleunigungswiderstands F_{Be} ermittelt wurden, können diese in die weitere Berechnung mit einbezogen werden:

$$F_{\text{Be}} = (e_i \times m_{\text{Fz}} + m_{\text{zu}}) \times a$$

$$F_{\text{Be}} = (1 \times 20 \text{ kg} + 20 \text{ kg}) \times 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = (20 \text{ kg} + 20 \text{ kg}) \times 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{\text{Be}} = 40 \text{ kg} \times 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{\text{Be}} = 20 \text{ N}$$

Der Beschleunigungswiderstand beträgt 20 Newton.

Damit sind alle Größen für die Ermittlung des Fahrwiderstands F_{FW} bekannt:

$$F_{\text{FW}} = F_{\text{Luft}} + F_{\text{Roll}} + F_{\text{Steig}} + F_{\text{Be}}$$

$$F_{\text{FW}} = 0,468 \text{ N} + 5,86 \text{ N} + 34,2 \text{ N} + 20 \text{ N}$$

$$F_{\text{FW}} = 60,528 \text{ N}$$

Es konnte ein Fahrwiderstand von 60,528 Newton errechnet werden.

Im Anschluss an diesen Rechenschritt kann nun auch die ursprünglich angestrebte Berechnung des Drehmoments am Rad M_{R} erfolgen:

$$M_R = F_{FW} \times r$$

$$M_R = 60,528 \text{ N} \times 0,04 \text{ m} = 2,4212 \text{ Nm}$$

Im Ergebnis zeigt sich, dass dieses 2,4212 Newtonmeter beträgt.

Ferner ist zu kalkulieren, wie hoch die Drehzahl n ausfallen sollte.

$$n = \text{Drehzahl}$$

$$\omega = \text{Winkelgeschwindigkeit}$$

$$n = \frac{\omega \times 60}{2 \times \pi}$$

Da gilt, dass sich die Winkelgeschwindigkeit ω aus dem Quotienten aus Geschwindigkeit und Radius r ermitteln lässt, kann die Formel entsprechend umgestellt und die bekannten Werte können eingesetzt werden:

$$n = \frac{v \times 60}{r \times 2 \times \pi} = \frac{1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 60}{0,04 \text{ m} \times 2 \times \pi} = 238,73 \frac{\text{U}}{\text{min}}$$

$$n = 238,73 \frac{\text{U}}{\text{min}}$$

Die Drehzahl beträgt nach dieser Berechnung 238,73 Umdrehungen pro Minute.

Die Motorleistung P bildet eine weitere physikalische Größe, die es zu ermitteln gilt. Sie kann berechnet werden aus dem Produkt aus Kraft und Geschwindigkeit:

$$P = \text{Motorleistung}$$

$$P = F \times v$$

$$P = 60,52 \text{ N} \times 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 60,52 \text{ W}$$

Oder auch aus dem Produkt aus Drehmoment und Winkelgeschwindigkeit:

$$P = M \times \omega = M \times \frac{v}{r}$$

$$P = 2,4212 \text{ Nm} \times \frac{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,04 \text{ m}} = 60,52 \text{ W}$$

Die Motorleistung sollte demzufolge 60,52 Watt betragen.

In der nachfolgenden Übersicht in Tabelle 6.1 sind noch einmal die eben berechneten Werte als wesentliche Merkmale des Motors zusammengestellt:

Tabelle 6.1: Motorbetrachtung

	Symbol	Wert	Einheit
Radius	r	0,04	m
Geschwindigkeit	V	1	m/s
Konstante	π	3,142	--
Winkelgeschwindigkeit	ω	25	rad/s
Gesamtgewicht	m	40	kg
Erdbeschleunigung	g	9,81	m/s ²
Kraft	F	60,52	N
Drehmoment	M	2,4212	Nm
Leistung	P	60,52	W

Die Auswahl eines geeigneten Motors sollte entsprechend dieser Leistungsmerkmale erfolgen. Auf Basis der ermittelten Werte für Drehmoment, Drehzahl und Motorleistung wurde daher gezielt recherchiert, welcher Motor für die Konstruktion in Frage kommt. In diesem Kontext konnte ein Motor mit technischen Leistungsmerkmalen ausfindig gemacht werden, die denen der Berechnungen sehr nahe kommen. Es soll sich hierbei jedoch explizit um eine exemplarische Darstellung handeln. Auch Motoren mit vergleichbaren Merkmalen können zum Einsatz kommen.

Aufgrund seiner technischen Eigenschaften eignet sich der beispielhaft ausgewählte Motor sehr gut für das Projektvorhaben, weshalb hierüber auch nähere Informationen beschafft wurden. Die Eigenschaften der Kombination können der Tabelle entnommen werden:

Tabelle 6.2: Eigenschaften der Kombination [81]

Eigenschaften der Kombination	
Abgabeleistung [W]	84
Abtriebsdrehmoment [Nm]	2,4
Abtriebsdrehzahl [U/min]	326
max. Radiallast FR [N]	400
max. Axiallast FA [N]	500
Lebensdauer [CB=1]	5.000
Gewicht [kg]	2,6
Länge [mm]	216
Umgebungstemperatur	-20° C bis +80°C
Schutzart	IP 40

Von besonderem Interesse für die Auswahl dieses Motors sind die zuvor berechneten physikalischen Größen und deren Passgenauigkeit in Hinblick auf die technischen Daten des angebotenen Motors. Das anhand der Kalkulationen ermittelte Drehmoment beträgt 2,4212 Nm, d. h. rund 2,4 Nm und ist damit identisch mit derjenigen der Kombination aus Permanentmagnet DC-Motor und Winkelgetriebe. Die Drehzahl wurde mit 238,73 U/min kalkuliert, liegt in der Produktbeschreibung mit 326 U/min zwar höher, befindet sich damit aber durchaus im Toleranzbereich. Die Motorleistung erweist sich ebenfalls als kompatibel: Errechnet wurde ein Wert von 60,5 W, die Kombination aus Permanentmagnet DC-Motor und Winkelgetriebe ermöglicht eine Abgabeleistung von 84 W.

Auch die weiteren technischen Leistungsmerkmale erweisen sich als sehr gut kompatibel für das ausgewählte Konzept. Die Eigenschaften des Motors sind in Tabelle 6.3 dargestellt:

Tabelle 6.3: Eigenschaften des Motors [81]

Motor	
Motorart	Permanent DC-Motor
Motorbezeichnung	BCI6355
Spannung [V]	24
Motordrehzahl [U/Min]	3.300
Nennleistung [W]	93
Nennstrom [A]	4,9
Drehmoment [Ncm]	26,9
Motorgewicht [kg]	1,70

Die Nennleistung des Motors von 93 W wird für die anschließende Betrachtung des Akkus als Ausgangswert übernommen.

6.1.3 Betrachtung des Akkus

Die Energiespeisung der Laufkatze erfolgt über einen integrierten Akku. Wegen des giftigen Cadmiums sind NiCd-Akkus von der weiteren Auswahl ausgeschlossen [82]. Deshalb und wegen weiterer Vorteile werden im Folgenden Lithium-Akkus vorgesehen. Um die Betriebsfähigkeit der Laufkatze zu erhalten, empfiehlt es sich, in der konstruktiven Ausführung den Akku als schnellwechselbaren Ersatz-Akku auszuführen.

Die Aufladung des Akkus erfolgt an einer entsprechend vorgesehenen Ladestation. Es ist ratsam, eine Tiefenentladung zu vermeiden und zu gewährleisten, dass die Laufkatze spätestens bei einem Akkuladestand von 20 % die Ladestation anfährt. Beim Aufladen ab ca. 80 % Ladestand könnte der Ladestrom nur in reduzierter Form zugeführt werden, was eine Aufladung auf 100 % erschweren würde.

Bei einem längerfristigen und regelmäßigen Einsatz der Laufkatze und zugunsten einer möglichst langen „Lebensdauer“ empfiehlt es sich daher, den Akku bei einem Ladestand zwischen 20 und 80 % zu nutzen. Hieraus resultieren auch die jeweiligen Prozentwerte der nachfolgenden Kalkulation.

In Tabelle 6.4 sind diejenigen Geräte bzw. Komponenten aufgezeigt, die jeweils Strom verbrauchen sowie deren Verbrauch in Watt:

Tabelle 6.4: Stromverbrauchende Geräte und installierte Leistung

Gerät	Verbrauch [in W]
SPS-Gerät	7
LED-Licht (Warnlicht)	7
Zylinderhubmagnete	8
E-Motor	93
Induktiver Sensor	2,4
Reflexionslichtschranke 1	4,8
Reflexionslichtschranke 2	4,8
Summe	127

Folgende Größen sind bekannt bzw. wurden ausgewählt:

Akku-Spannung: $U_{\text{Akk}} = 24 \text{ V}$

Akku-Kapazität: $C_{\text{Akk}} = 40 \text{ Ah}$

Installierte Gesamtleistung: $P_{\text{ges}} = 127 \text{ W}$

Akku-Rest-Energie: 20 %

Ladestrom: $I = 6 \text{ A}$

Zur Berechnung der Betriebsdauer dient nachfolgende Formel:

$$T_{\text{Betriebsdauer}} = \frac{C_{\text{Akk}} \times U_{\text{Akk}}}{P_{\text{ges}}} \times 80 \% = \frac{40 \text{ Ah} \times 24 \text{ V}}{127 \text{ W}} \times 80 \% = \mathbf{6,05 \text{ h}}$$

Die Betriebsdauer beträgt für den vordefinierten Akku-Ladestand ca. 6 Stunden.

Die Ladezeit ergibt sich aus folgender Rechnung:

$$T_{\text{Ladezeit}} = \frac{C_{\text{Akk}}}{I} \times 80 \% \times 1,3 = \frac{40 \text{ Ah}}{6 \text{ A}} \times 80 \% \times 1,3 = \mathbf{6,93 \text{ h}}$$

Sie beträgt 6,93 und damit ca. 7 Stunden.

Die obenstehenden Berechnungen gelten allerdings nur dann, wenn der Motor die ganze Zeit durchlaufen würde und auch alle genannten stromverbrauchenden Geräte gleichzeitig in Betrieb wären (Gleichzeitigkeitsfaktor [%]). Das Abschalten von Motor und Warnlicht würde dazu führen, dass in dieser Zeit nur 19 W verbraucht werden würden. Unabhängig davon verbraucht ein Motor nicht konstant 93 W, sondern der Verbrauch ist abhängig von der Belastung. Im Leerlauf nimmt ein Motor nur ein wenig Strom auf, beim Anlaufen oder bei Belastung wird mehr Strom verbraucht (Auslastungsfaktor [%]). Wie genau sich die einzelnen Szenarien auf Betriebsdauer und Ladezeit des Akkus auswirken, müsste man im Vorfeld unter den gegebenen Umständen simulieren. Ansonsten kann man auch versuchen abzuschätzen, wie viel Strom der Motor im Durchschnitt über die Arbeitszeit brauchen wird.

6.1.4 Fahrzeit der Laufkatze

Ferner ist auch von Bedeutung, welche Fahrzeit die Laufkatze für eine Strecke benötigt. Da dies natürlich abhängig von der Länge der jeweils gewünschten Strecke abhängig ist, kann hierzu nur eine exemplarische Berechnungen Auskunft geben. Diese bezieht sich auf die in Abbildung 6.4 dargestellte Beispielstrecke:

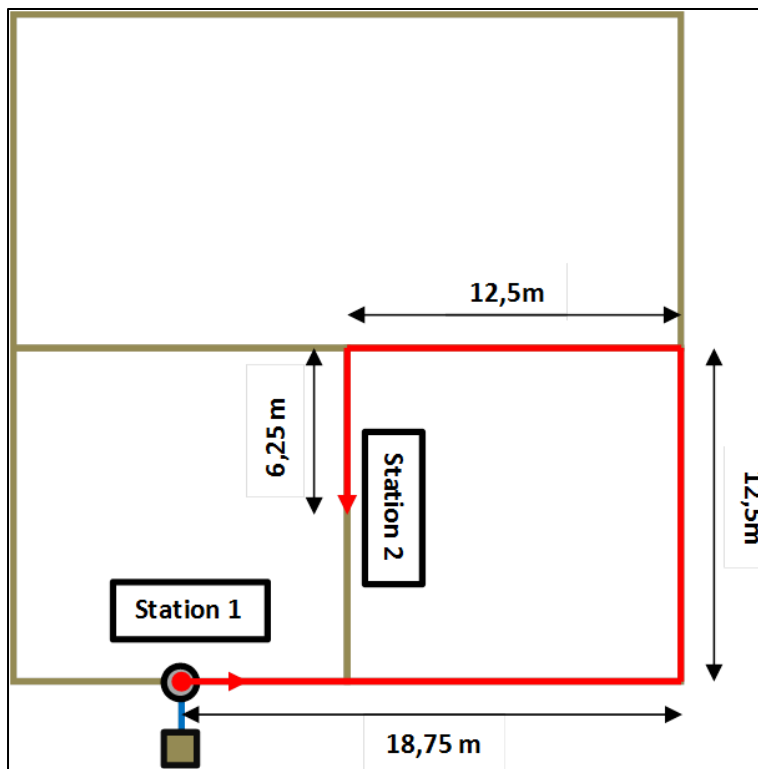


Abbildung 6.4: Beispielstrecke zur Berechnung der Fahrzeit der Laufkatze

Nach der allgemeinen Formel zur Berechnung der Zeit, ergibt sich diese aus dem Quotienten aus Weglänge und Geschwindigkeit:

$$t = \frac{s}{v}$$

Die Länge der Strecke setzt sich aus den einzelnen, in Abbildung 4 markierten Teilstrecken zusammen:

$$s = 18,75 \text{ m} + 12,5 \text{ m} + 12,5 \text{ m} + 6,25 \text{ m}$$

$$s = 50 \text{ m}$$

Insgesamt beträgt sie für das Beispiel 50 Meter.

Die Geschwindigkeit ist bereits bekannt: $v = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Somit können die Werte der Größen in die Formel eingetragen werden:

$$t = \frac{50 \text{ m}}{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$t = 50 \text{ s}$$

Die Zeit beträgt hier 50 Sekunden.

Für die Ermittlung der Fahrzeit der Laufkatze muss berücksichtigt werden, dass diese kurz vor jeder Weiche abbremsen und langsamer fahren muss. Deshalb wird die Zeit mit einem Faktor von 1,5 multipliziert:

$$t_f = t \times 1,5 = 50 \text{ s} \times 1,5$$

$$t_f = 75 \text{ s}$$

Die Fahrzeit der Laufkatze würde für die Beispielstrecke 75 Sekunden betragen.

In analoger Vorgehensweise kann die Fahrzeit der Laufkatze für alle anderen möglichen Strecken berechnet werden.

6.2 Betrachtung der Seile

6.2.1 Berechnung

Auch hinsichtlich des zur Konstruktion benötigten Seils bedurfte es im Vorfeld einiger grundlegender Überlegungen und Kalkulationen, damit dieses später auch seinen Anforderungen gerecht werden kann.

Seile können nur Zugkräfte aufnehmen und an die Auflagepunkte weiterleiten. Bei einer Ultraleichtkonstruktion ist das Verhältnis Eigengewicht (dies ist eine Linienlast [N/m]) des Seils zur Last (Eigengewicht Laufkatze + Nutzlast [N]) so gering, dass es technisch für die Berechnungen vernachlässigbar ist.

Daraus ergibt sich nachfolgendes Kräfteparallelogramm aus der Abbildung 6.5:

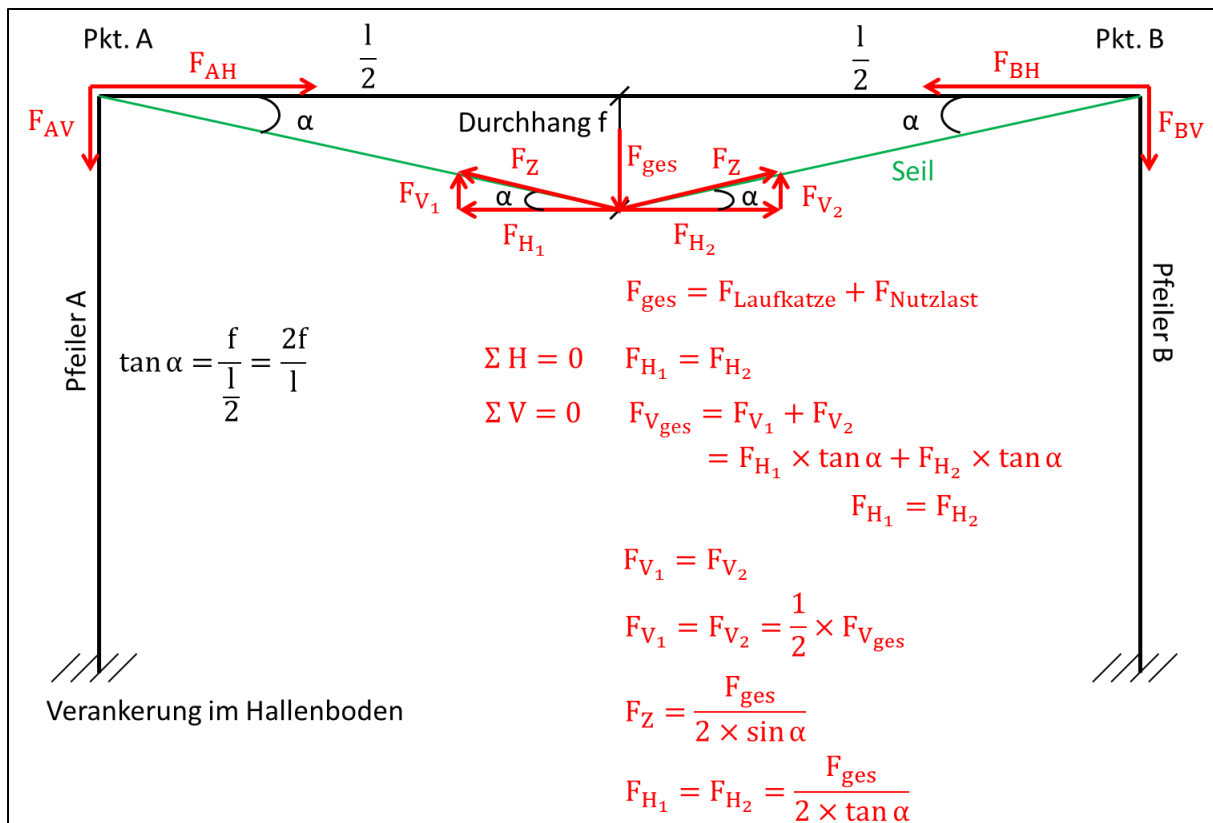


Abbildung 6.5: Grafik Kräfteparallelogramm

Das Seil überträgt die Zugkräfte F_Z an die Pfeiler. An den Seilbefestigungen der Pfeiler entstehen Horizontal- und Vertikalkräfte. Die Ableitung der Vertikalkraft an den Hallenfußboden ist unproblematisch, für die Aufnahme der Horizontalkraft sind die Stützen auf dem Hallenboden zu verankern.

Die Horizontalkräfte nehmen mit steigendem Durchhang ab und steigen bei sinkenden Durchhängen an. Man muss bei der Wahl des zulässigen Durchhangs ein Optimum wählen, um der Zielsetzung einer Ultraleichtkonstruktion gerecht zu werden. Folgende Größen sind bekannt bzw. vorgegeben:

$$l = 12,5 \text{ m} = 1.250 \text{ cm}$$

$$F_L = 200 \text{ N}$$

$$\frac{l}{2} = 625 \text{ cm}$$

$$F_N = 200 \text{ N}$$

$$F_{ges} = 400 \text{ N}$$

Mit Hilfe dieser Werte kann bezüglich des Seildurchhangs, der Kräfteaktionen an den Pfeilern und der Seil-Gesamtlänge folgende Übersicht erstellt werden:

Tabelle 6.5: Zusammenhang zwischen Seildurchhang und Kraftreaktionen an den Pfeilern sowie Seil-Gesamtlänge

$l = 12,5 \text{ m}$ $\frac{l}{2} = 625 \text{ cm}$	Durchhang f gewählt [cm]	α [°]	$\tan \alpha = \frac{2f}{l}$	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$F_z = \frac{F_{\text{ges}}}{2 \times \sin \alpha}$ [N] (A) Pfeiler	$F_H = \frac{F_{\text{ges}}}{2 \times \tan \alpha}$ [N] (A) Pfeiler	$S = \frac{l}{\cos \alpha}$ [cm]
	5	0,46	0,008	0,0079	1	25.000	25.000	1.250
	10	0,92	0,016	0,016	1	12.500	12.500	1.250
	15	1,375	0,024	0,024	1	8.333	8.333	1.250
	20	1,833	0,032	0,032	0,999	6.250	6.250	1.251
	25	2,291	0,040	0,04	0,999	5.000	5.000	1.251
	30	2,748	0,048	0,048	0,999	4.167	4.167	1.251
	35	3,205	0,056	0,056	0,998	3.572	3.572	1.253
	40	3,662	0,064	0,064	0,998	3.125	3.125	1.253
	45	4,118	0,072	0,072	0,997	2.777	2.777	1.254
	50	4,574	0,08	0,08	0,997	2.500	2.500	1.254
	55	5,029	0,088	0,088	0,996	2.273	2.273	1.255
	60	5,484	0,096	0,096	0,995	2.083	2.083	1.256
	65	5,937	0,104	0,103	0,995	1.923	1.923	1.256
	70	6,39	0,112	0,111	0,994	1.802	1.786	1.258

Weitere wichtige Kenngrößen sind:

$$F_{\text{ges}} = 400 \text{ N}$$

$$F_{\text{LK}} = 200 \text{ N}$$

$$F_{\text{N}} = 200 \text{ N}$$

Der zulässige Durchhang ist entsprechend den Hallengegebenheiten zu wählen. Dabei ist zu beachten, dass die Horizontal- und Vertikalkräfte bei der Auswahl der Pfeiler ausschlaggebend sind. Um das Eigengewicht zu minimieren, kann der Durchhang etwas höher gewählt und somit insbesondere die Horizontalkraft reduziert werden.

Ein geeignetes Seil, das auf dem Markt erworben wird, muss gemäß der EN 15567 eine Bruchlast größer als oder gleich 75.000 Newton haben ($25.000 \text{ N} \times 3$).

6.2.2 Auswahl

Im Zuge der Recherche zur Auswahl des Seils konnte eine Firma gefunden werden, die sich auf die Herstellung von Yachttauwerk und technischen Seilprodukten für den industriellen Einsatz spezialisiert hat. Es wurde mit dieser Firma ein Kontakt aufgenommen. Danach

schickte diese einen Gesamtkatalog über ihr Seilsortiment. Auf Basis dieses Katalogs wurden folgende Seile für das Konzept ausgewählt (vgl. Tabelle 6.6). Diese hier aufgelisteten Seilarten sowie die Firma sind zunächst rein exemplarisch ausgewählt, auch vergleichbare Produkte anderer Firmen werden nach wie vor in Betracht gezogen.

Tabelle 6.6: Technische Details zu den gewählten Seilarten [83]

Seilart	Ø (Durchmesser) [mm]	Bruchlast [daN]	Gewicht [kg/ 100 m]	Spulenlänge [m]	Arbeitsdehnung [%]
Typ 1	18	17.500	18	100	< 1,0
Typ 2	20	16.500	23,7	100	< 1,5
Typ 3	22	19.700	28,2	100	< 1,5
Typ 4	8	2.200	4,5	200	< 2,0
Typ 5	6	1.500	2,4	200	< 1,0

Die gewählten Seilarten bestehen aus folgenden Materialien:

Tabelle 6.7: Übersicht zu den ausgewählten Seilarten und deren Material [83]

Seilart	Material	
	Mantel	Kern
Typ 1	50 % Hybrid 50 % Polyester	Dyneema
Typ 2	Polyester	Dyneema
Typ 3	Spezialpolyester	Dyneema
Typ 4	Polyester	Dyneema
Typ 5	Polyester	Vectran

6.2.3 Seilaufhängung

Die Seilaufhängung ist so zu gestalten, dass sowohl die Seilkräfte aufgenommen und Seildehnungen kompensiert oder auf ein zulässiges Maß reduziert werden.

Längenänderung infolge thermischer Ausdehnung:

$$\Delta l = l_0 \times \alpha \times t$$

$$l_1 = l_0 \times (1 + \alpha \times t)$$

l_1 = Seillänge infolge Wärmeausdehnung
 l_0 = ursprüngliche Seillänge
 Δl = Längenänderung
 α = linearer Wärmeausdehnungskoeffizient

Längenänderung infolge der auftretenden Zugkräfte nach dem Hook'schen Gesetz:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{F}{E \times A} = \frac{\sigma}{E}$$

ε = Dehnung
 σ = Spannung
 E = Elastizitätsmodul

In der folgenden Tabelle 6.8 wird der Zusammenhang zwischen Seildehnung ε und Durchhang f veranschaulicht:

Tabelle 6.8: Übersicht Zusammenhang zwischen Seildehnung und Durchhang

$\frac{S_0}{2}$ [cm]	ε [%]	$\frac{S_1}{2}$ [cm]	Durchhang f [cm]
625	0,5	628,13	62,6
625	1,0	631,25	86,8
625	1,5	634,38	108,7
625	2,0	637,50	125,6

Bei berechneter Seillänge wird der Durchhang nach dem Satz des Pythagoras berechnet:

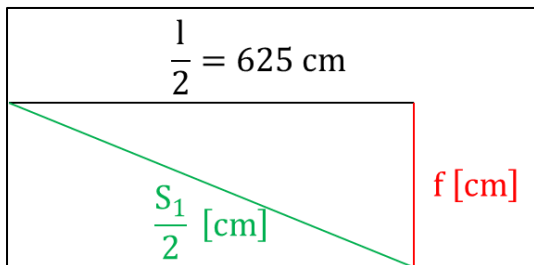


Abbildung 6.6: Skizze zur Berechnung des Seildurchhanges

$$\left(\frac{l}{2}\right)^2 + f^2 = \left(\frac{S_1}{2}\right)^2$$

$$f = \sqrt{\left(\frac{S_1}{2}\right)^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2}$$

$\varepsilon = 0,5 \%$	f [cm] = $\sqrt{394.547 - 390.625} = 62,6$
$\varepsilon = 1,0 \%$	f [cm] = $\sqrt{398.161 - 390.625} = 86,8$
$\varepsilon = 1,5 \%$	f [cm] = $\sqrt{402.438 - 390.625} = 108,7$
$\varepsilon = 2,0 \%$	f [cm] = $\sqrt{406.406 - 390.625} = 125,6$

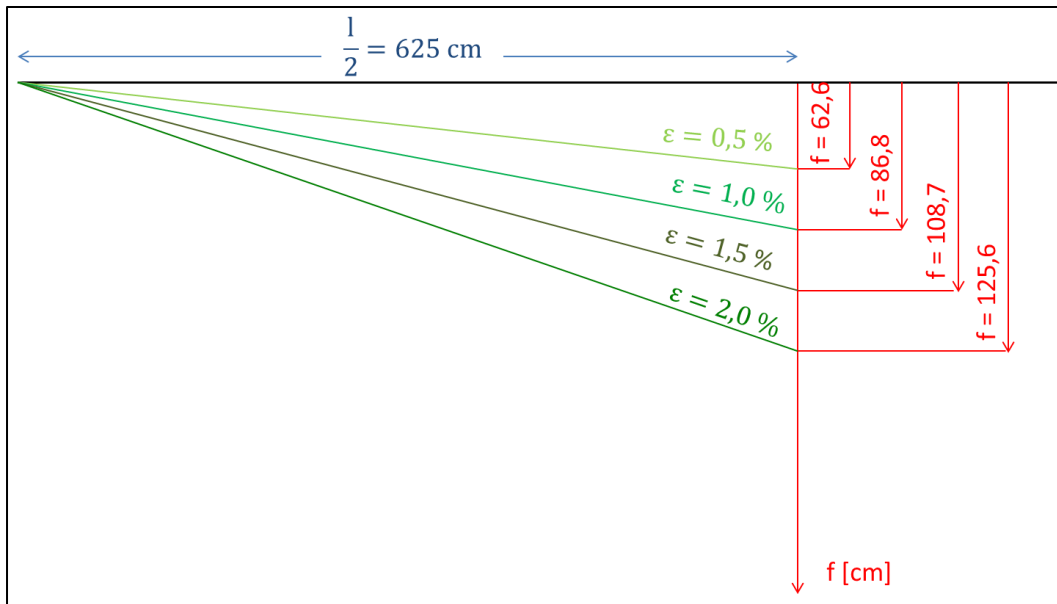


Abbildung 6.7: Darstellung Seildurchhang infolge Seildehnung

Unter folgenden Bedingungen kann nach den vorliegenden Ergebnissen auf eine Dehnungskompensation verzichtet werden:

1. Aufhängungspunkte der Seile sehr hoch (z. B. an der Hallendecke)
2. Das durchhängende Seil wird nicht durch Maschinen, Ausrüstungen und Arbeitsabläufe behindert (und umgekehrt)
3. Die Be- und Entladestationen sind für flexible Seilhöhen konzipiert

Diese ausgesprochen günstigen Bedingungen können in Einzelfällen vorliegen. Bei den weiteren Betrachtungen können diese Einschränkungen nicht grundsätzlich vorausgesetzt werden. Deshalb wird eine technische Lösung zur Kompensation der Seildehnung vorgestellt:

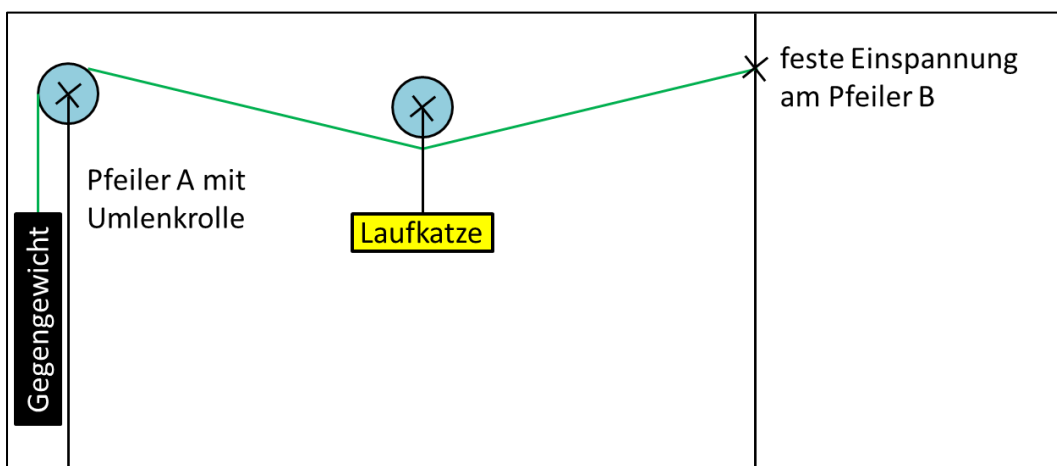


Abbildung 6.8: Skizze zum Prinzip der Dehnungskompensation

Die Dehnung wird nach technisch bekannter Methode kompensiert, indem das Seil über eine Rolle in die vertikale Richtung umgelenkt und mittels Gegengewicht gestrafft wird.

Die Pfeiler sind als Hohlprofil-Konstruktion ausgebildet und könnten Vertikalseil und Gegengewicht im Innenraum aufnehmen.

Die Masse des Gegengewichtes wird gegenüber der Zuglast des Seils infolge beladener Laufkatze möglichst hoch gewählt, um das Seilsystem stabil und schwingungsarm zu gestalten. Bei der Auswahl des Seiles ist deshalb das Gegengewicht ausschlaggebend.

Für die konstruktive Umsetzung wird folgende Lösung angeboten:

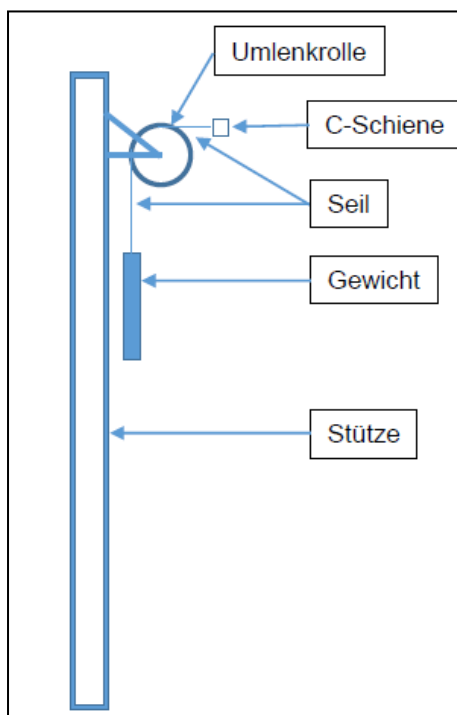


Abbildung 6.9: Konstruktive Ausführung Pfeiler A

6.3 Umlenkprofile

An dieser Stelle werden die bereits erwähnten Umlenkprofile beschrieben (siehe Abb. 6.10). Der Richtungswechsel zur Ladestation findet während der Fahrt statt. Dabei ist die Fliehkraft von Bedeutung. Erkennt der Initial-Sensor der Laufkatze ein Signal über den kurz vor der Wechselstelle installierten Magnetsensor, fährt der Aktor der Laufkatze aus. Es findet, wie schon beschrieben, ein Fahrbahnwechsel statt. Die Laufkatze befindet sich nun in Ladeposition.

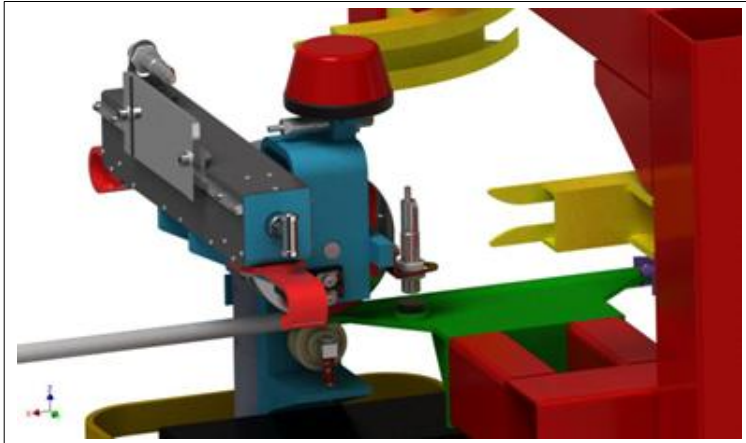


Abbildung 6.10: Magnetsensor, kurz vor der Wechselstelle installiert

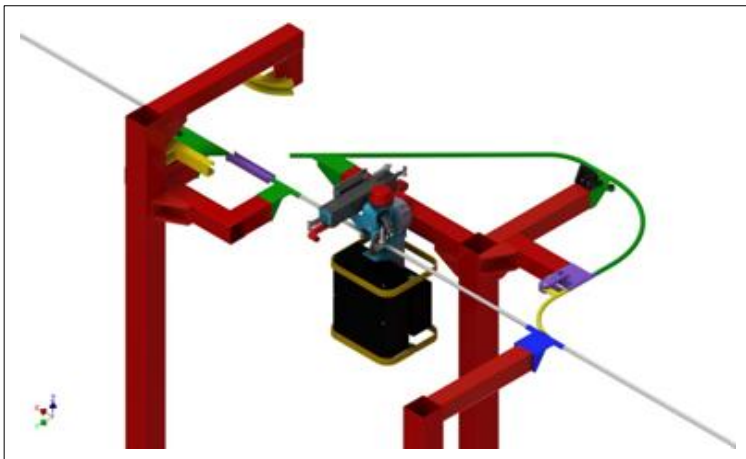


Abbildung 6.11: Fahrbahn mit seitlicher Ladestation

In Abbildung 6.11 ist erkennbar, warum flexible Umlenk-Profile notwendig sind. Laufkatzen, die nicht zwingend zur Ladestation fahren müssen, weil diese beispielsweise besetzt ist oder der Akkuladestand noch ausreicht, können die Ladestation passieren, ohne durch sie hindurch zufahren. Das Klick- System, ähnlich wie bei einem Ventil, ermöglicht die problemlose Durchfahrt. Somit kann die Ladestation fast überall dort montiert werden, wo ausreichend Raum verfügbar ist. Folglich muss keine zusätzliche Fahrbahnabzweigung oder lange Fahrbahn erstellt werden.

6.4 Ladestation

Bei der Ladestation handelt es sich um eine Akku-Ladestation, die in Verbindung mit der Fahrbahnschiene verbunden ist bzw. eine seitlich verlaufende Fahrbahn besitzt (siehe Abb. 6.12). Auf diese fahren die umgelenkten Laufkatzen durch das mit seitlichen Aktoren

ausgerüstete Fahrbahn-Wechselprinzip. Die Ladestation wird verwendet, um die Akkumulatoren der Laufkatzen aufzuladen. Die im Gerät enthaltene elektronische Schaltung, der Laderegler, steuert den Ladevorgang und setzt das Ladeverfahren um. Der Laderegler ist meistens direkt im akku-betriebenen Gerät eingebaut. Die Stromversorgung erfolgt über ein Netzteil. Die elektrische Kontaktierung wird in Abb. 6.13 erläutert. Das Stecker-Netzteil transformiert die Netzspannung auf die erforderliche Ladespannung des Akkus. Wechselstrom wird in Gleichstrom umgewandelt und der Ladevorgang elektronisch optimiert. Somit ist ein optimales Beladen des Akkus gegeben.

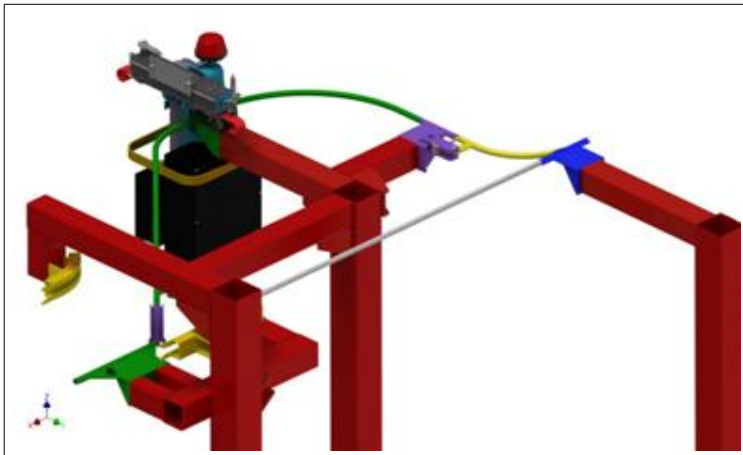


Abbildung 6.12: Ladestation, seitlich der Fahrbahn installiert

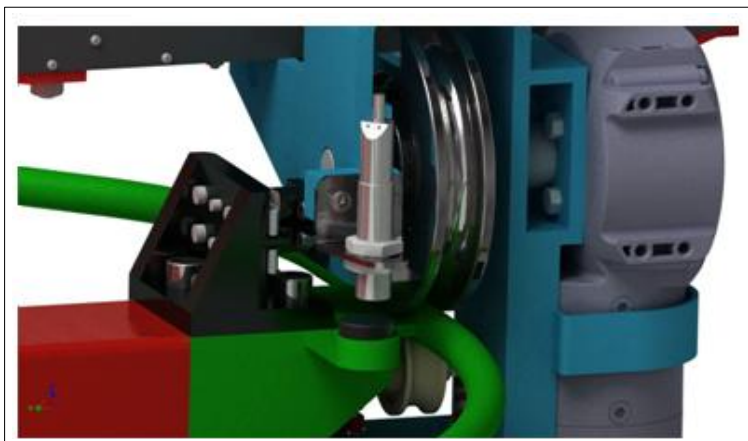


Abbildung 6.13: Teilausschnitt Ladeschnittstelle bzw. –kontakt und Initialposition

In der Vergrößerung bzw. im Teilausschnitt ist der Initial-Sensor (oben) zu erkennen, der dem Magnetsensor (unten) das Signal gibt, in erforderlicher Position zu sein (siehe Abb. 6.13). Solche Konstellationen befinden sich an strategischen Punkten entlang der Fahrbahnstrecke (Schaltpunkte). Das Signal wird mittels der SPS und der Steuerungssoftware verarbeitet und

an die Laufkatze weiter geleitet. In diesem Fall erkennt die Laufkatze das Erreichen der Endlage an der Ladestation und startet den Ladevorgang. Auf der linken Seite ist der Stromkontakt zu erkennen, der zur Schließung des Stromkreislaufes und somit der Beladung des Akkus benötigt wird. Der Ladestand kann als Prozentangabe sowohl mittels PC oder direkt im Display an der Laufkatze entnommen werden. Ist der Akku vollständig geladen, fährt die Laufkatze selbstständig an die nächste freie Station. Erst darauf folgend kann eine andere Laufkatze die Ladestation anfahren, so dass eine Staubildung vorgebeugt wird.

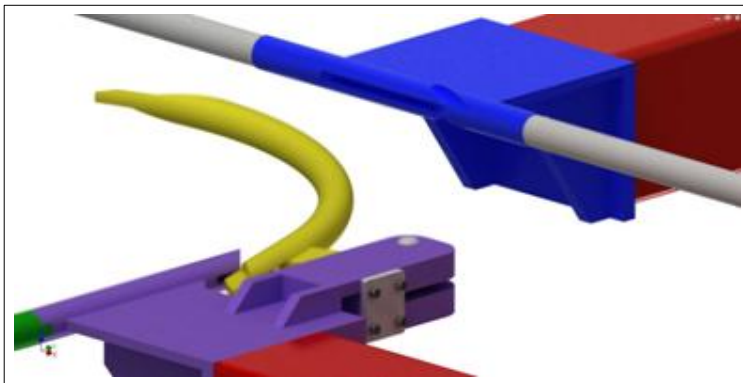


Abbildung 6.14: Verbindungsstück zur regulären Fahrbahn

Nach Beendigung des Ladevorganges wird die Laufkatze wieder zurück auf die reguläre Fahrbahn geführt. Dies geschieht über ein gebogenes Rundprofil mit einer Verjüngung am Ende und ist über eine Lang-Nut im Profil der Fahrbahn angepasst. Somit kann sich diese in die Fahrbahn einklinken (siehe Abb. 6.14). An der anderen Seite ist es radial gelagert, so dass eine Verbindung zwischen der regulären Fahrbahn und der Fahrbahn der Ladestation entsteht.

6.5 Steuerungssystem

Für den Steuerungsprozess wird eine Regelung implementiert, die die Laufkatze von einer Station zur nächsten befördert. Es wird ein Regelkreis erstellt, der mittels Abfrageschleifen ein autonomes Arbeiten der Laufkatze ermöglicht.

Der erste Prozesspunkt besteht in der Nummerneingabe der Zielstation in die Laufkatzen-Steuerung. Ist diese erkannt, startet die Laufkatze. Sie fährt mit Betriebsgeschwindigkeit zwischen den Stationen. Erreicht die Laufkatze eine Umlenkstation, wird ein Sensorsignal ausgegeben, wodurch die Laufkatze abgebremst wird. Solange die Laufkatze das Sensorsignal nicht erhält, fährt sie in Betriebsgeschwindigkeit weiter. Dieser Vorgang wird durch eine Abfrageschleife realisiert.

Ist die Laufkatze an einer Umlenkstation angekommen, wird der entsprechende Aktor zum Richtungswechsel ausgefahren, entsprechend der Richtung, in die die Laufkatze gelenkt werden soll.

Die Laufkatze bewegt sich mit der minimal benötigten Geschwindigkeit und passiert die Umlenkstation. Anschließend beschleunigt sie wieder auf die Betriebsgeschwindigkeit. Erneut startet die Abfrageschleife nach einem Sensorsignal von Umlenkstation oder Zielstation. Sobald das Signal der Zielstation empfangen wird, wird die Laufkatze gestoppt. Sie kann folglich beladen werden oder ihre Fracht entladen. Anschließend kann eine neue Stationsnummer eingegeben werden; der Steuerungsprozess startet somit erneut.

Zu Wartungszwecken und nach Betriebsschluss wird eine Standby- bzw. Aus-Funktion vorgesehen, durch die die Laufkatze in einen zuvor definierten Bereich fährt und dort bis zum nächsten Einsatz bereit steht.



Abbildung 6.15: Laufkatze mit Steuereinheit und Bedienfeld

In der Abbildung 6.15 sieht man die Steuereinheit der Laufkatze mit ihrem dazugehörigen Bedienfeld und der Eingabeeinheit. Die Steuerung erfolgt, wie schon beschrieben, über eine SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) samt Systemsoftware.

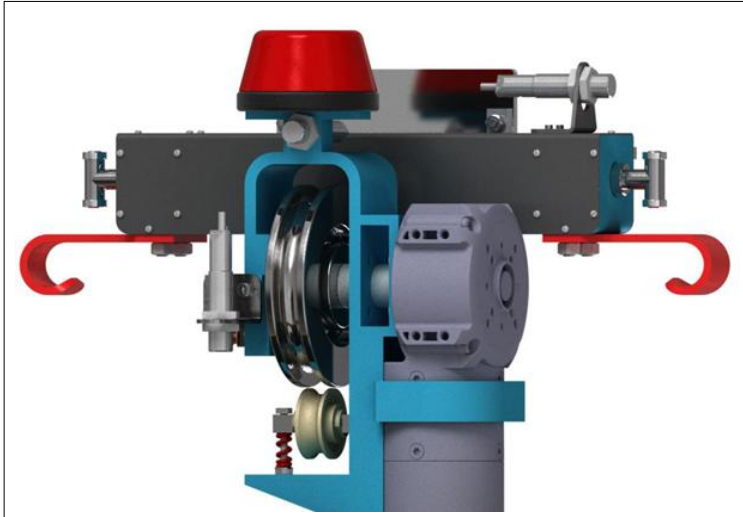


Abbildung 6.16: Führungsrolle der Laufkatze im Teilausschnitt

In der Abbildung 6.16 sieht man im Teilausschnitt nochmals die Führungsrolle der Laufkatze inklusive Konterrolle, die zwei seitlich ausfahrbaren Aktoren, eine Wartungsleuchte, die Initialsensoren und den Stromkontakt, der den Stromkreislauf schließt.

Die Initialsensoren geben an den Schaltstellen in der Anlage das Signal an den Magnetsensoren. Daraus entsteht dann die eingangs erwähnte „Wenn- dann“- Situationen sowie „Und- Oder“- Faktoren.

Ein ganz simples und einfaches Beispiel verdeutlicht:

- Wenn der Akku leer ist, dann wird die Ladestation angefahren.
- Es muss die Stationsnummer gegeben sein und der Akku muss über ausreichend Energieladung verfügen, um an die nächste Station fahren zu können.

Die Steuerung könnte mit Hilfe von Microcontrollern (MCU oder μC) erfolgen. Hierunter können integrierte Schaltungen mit Prozessoren verstanden werden, die programmierbar und vielfältig einsetzbar sind. Sie werden in sämtlichen elektronisch kontrollierten Geräten, wie den ABS-Systemen in Autos Harddisk-Einheiten im Computer, in Fotoapparaten und Videogeräten verwendet, aber auch beispielsweise in Haushaltsgeräten. Die Einsatzbereiche sind nahezu grenzenlos. Der Funktionsablauf der Schaltung wird dabei mittels eines speziellen Programmes (Software) gesteuert. Um den unterschiedlichsten Geräteanforderungen gerecht zu werden, stehen speziell auf den jeweiligen Anwendungsbereich zugeschnittene Softwarelösungen und spezifische Interfaceschaltungen (Aktoren, Sensoren) zur Verfügung [84].

Die Anpassung der Steuerung wäre vollständig mit Hilfe der Benutzerprogrammierung realisierbar. Dies ist eine Verfahrensweise, die z. B. auch bei CNC-Steuerungen durch einen

G-Code Interpreter angewendet wird. Bei dem G-Code, oder auch DIN-Code, handelt es sich um eine Maschinsprache derer sich der Programmierer bedienen kann, um bestimmte Befehle in die CNC-Maschine einzugeben [85].

Das Akronym CNC steht für Computerized Numerical Control und weist darauf hin, dass die Steuerung der Maschine mittels eines Computers erfolgt [85].

Die Bezeichnung des G-Codes leitet sich davon ab, dass die einzugebenden Befehle meist mit einem „G“ beginnen und anschließend um eine Ziffer oder Ziffernkombination ergänzt werden (z. B. G56). Daneben gibt es allerdings eine ganze Reihe unterschiedlichster Befehle, die auch mit anderen Buchstaben des Alphabets beginnen. Alle G-Code-Befehle zusammenaddiert ergeben das Maschinenprogramm.

Aufgrund der Tatsache, dass der G-Code-Befehl über ein hohes Maß an Standardisierung verfügt, ist dieser mit fast allen CNC-Maschinen kompatibel. Nach Einspielung des Maschinenprogramms in die Maschine erfolgt die Abfolge der Prozesse im Optimalfall fast vollautomatisch [85].

Die Dynamische Steuerung ist eine Regelung, die auf Ereignisse, Störungen und Anforderungen eingeht. Es erweist sich als vorteilhaft, die Details der Steuerung in Kooperation mit Experten dieses Bereichs zu gestalten. Auf diese Weise könnten SPS, Microcontroller und G-Code bei CNC-Steuerungen für das ausgewählte Konzept zum Einsatz kommen.

6.5.1 Ablaufbeispiel des Steuerungssystems

Folgender Verlauf wird Schritt für Schritt beschrieben:

Eine Laufkatze wird an Station 1 beladen und soll anschließend zur Station 2 fahren. In Form einer Systemsoftware wird die Problematik der Steuerung gelöst. Dabei spielen Magnetsensoren eine wichtige und entscheidende Rolle. Denn diese signalisieren der SPS, wo sich die Laufkatze befindet und welche Schritte folglich eingeleitet werden müssen.

Magnetische Sensoren sind berührungslose, universell einsetzbare, schaltende Sensoren zur Anwesenheitskontrolle von Magneten und ferro-magnetischen Objekten. Magnetische Sensoren bieten gegenüber induktiven Sensoren eine höhere Reichweite und können in alle Materialien eingebaut werden, ohne den Schaltabstand zu beeinträchtigen.

Bei magnetisierbaren Materialien verringert sich jedoch der Schaltabstand. Sie ermöglichen eine schnelle und sichere Erfassung in kleineren Abständen beispielsweise in Förder- und Staustrecken. Typischer Einsatz eines Positions- und Endschalters ist die Erkennung einer Lage, wie z. B. einer Transportvorrichtung wie der Laufkatze auf einer Transportstrecke oder -schiene.

Anwender sind der interne Betriebsmittel-Bau sowie der Sondermaschinen- und Anlagenbau in allen Branchen. Magnetische Näherungssensoren lösen einen Schaltvorgang aus, sobald der Magnet einen bestimmten Abstand zum Sensor erreicht hat. Die Sensoren basieren auf dem Prinzip der Sättigungs-Kernsonde oder auf dem Giant-Magneto-Resistance (GMR)-Effekt.

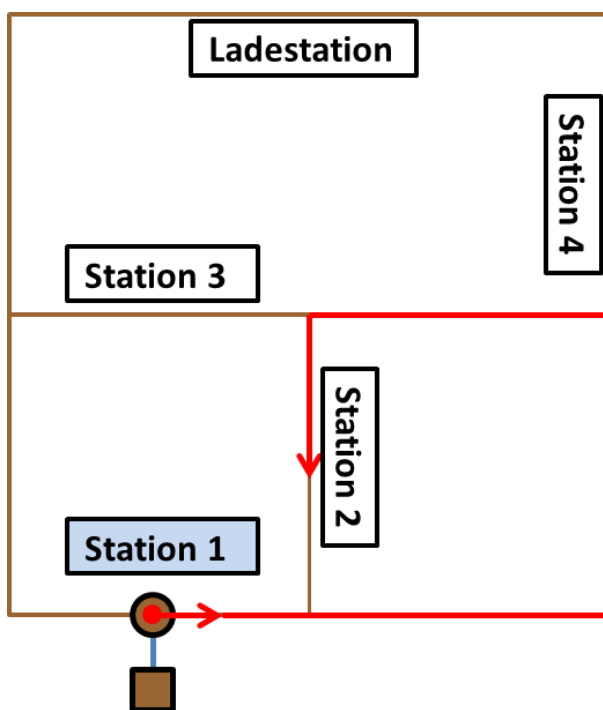


Abbildung 6.17: Exemplarischer Streckenablauf der Laufkatze

An Station 1 wird die Laufkatze nach dem Rüsten programmiert, d. h. es wird von einem Mitarbeiter eine Stations-Nr. eingegeben, die von der Laufkatze angefahren werden soll. In diesem Fall ist dies Station 2 (siehe Abb. 6.17). Diese Dateneingabe wird von der SPS folglich verarbeitet. Es wird die Transportentfernung berechnet und festgestellt, ob der notwendige Akku-Ladestand vorhanden ist. Wird dies als positiv bestätigt, startet und beschleunigt die Laufkatze. Auf der Strecke sind an bestimmten Schaltpunkten sogenannte Magnetsensoren installiert. Diese signalisieren dem System, an welcher Stelle sich die Laufkatze befindet und welche weiteren Zyklen eingeleitet werden müssen, um einen problemlosen Transportablauf zu garantieren. Der erste Schaltpunkt ist kurz vor der Wechselstelle installiert. Wird dort ein Signal geschaltet, das die Laufkatze in ihrer Position

bestätigt, wird die Geschwindigkeit gedrosselt. Die Laufkatze fährt ihren Aktor nach links heraus und kann somit die Richtung wechseln. Nach dem Wechselvorgang nimmt die Laufkatze wieder Fahrt auf und beschleunigt bis zum nächsten Schaltpunkt mit Magnetsensor. Gibt es an dem nächsten Magnetsensor wiederum ein positives Signal, wird die Geschwindigkeit erneut gedrosselt und die Laufkatze fährt an der Wechselstelle den linken Aktor heraus.

Wurde die Richtungsänderung nach links abgeschlossen, beschleunigt die Laufkatze ihre Geschwindigkeit wieder bis zum nächsten Schaltpunkt. In diesem Fall ist der nächste Schaltpunkt unmittelbar vor der Ladestation 2 installiert und dient der Signalgebung zum Stillstand an der Station. Die Laufkatze signalisiert, dass sie an Station 2 angekommen ist, drosselt die Geschwindigkeit bis zum Stillstand. Anschließend kann eine weitere Stationsnummer an der Laufkatze programmiert werden.

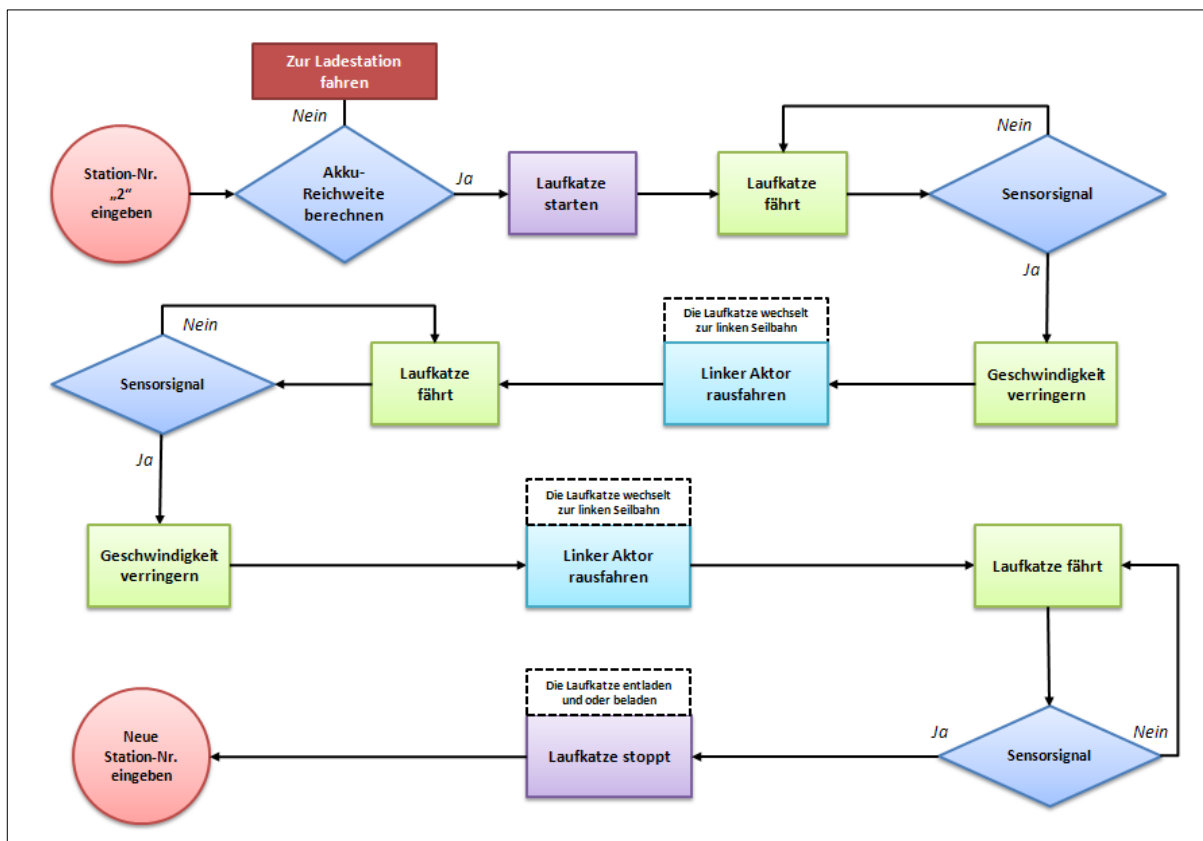


Abbildung 6.18: Grafische Veranschaulichung des Ablaufs 'Station'

Folgender Ablauf bzw. folgende Grafik soll veranschaulichen, was passiert, wenn der Akku einer Laufkatze nicht genügend Energie aufweist, um zur geforderten Station zu fahren oder anschließend die Distanz zur Ladestation überbrücken zu können (siehe Abb. 6.18).

Diesen Impuls berechnet die Laufkatze bzw. das Steuerungssystem automatisch und verhindert somit eine Staubbildung auf der Strecke durch eine liegengebliebene Laufkatze. Wird nun z. B. an Station 1 eine anzufahrende Stationsnummer eingegeben, sollte das Steuerungssystem feststellen, dass die Akkuleistung nicht ausreicht und folglich ein Signal schalten, so dass die Laufkatze in Richtung Ladestation losfährt.

Dabei beschleunigt sie bis zum ersten Schaltpunkt, der ein Signal meldet. Die Geschwindigkeit wird reduziert und der rechte bzw. linke Aktor (je nach Richtungswechselwunsch) der Laufkatze fährt heraus. Es wird rechts- bzw. linksseitig abgebogen. Anschließend wird sie wieder beschleunigt und der nächste Schaltpunkt meldet, dass die Laufkatze sich auf der Strecke befindet. Der nächste Schaltpunkt wird erreicht und anschließend wird das Tempo reduziert und der linke bzw. rechte Aktor fährt heraus. Der Fahrbahnwechsel nach links bzw. rechts wird vollzogen und die Geschwindigkeit wieder erhöht. Der letzte Schaltpunkt mit Magnetsensor signalisiert die Anwesenheit der Laufkatze und die Geschwindigkeit wird bis zum Stillstand an der Ladestation gedrosselt.

Es wird ein Stromkontakt angefahren, der nun den Ladestromkreis schließt. Die Laufkatze ist nun im Ladevorgang. Ist der Akku vollgeladen, wird sein Zustand an das System gemeldet und die Laufkatze fährt zu Station 1 in die Ausgangsstellung.

6.6 FEM (Finite-Elemente-Methode)

Die Finite-Elemente-Methode ist ein Verfahren innerhalb der Simulation, welches einen Einsatz auf vielen Gebieten des Ingenieurwesens findet. Weiterhin ist die FEM ein numerisches Verfahren, d. h. die Ein- und Ausgabedaten bestehen hierbei aus Zahlen [86]. Der Grundgedanke der FEM besteht darin, das zu untersuchende Gebiet in einzelne Teilgebiete zu zerlegen.

Diese Zerlegung wird als Diskretisierung oder auch Elementierung bezeichnet. Je größer bzw. feiner die Zerlegung ist, desto höher wird der Rechenaufwand [87]. Dabei ist es sinnvoll, das CAD-Modell für eine FEM-Berechnung zu verwenden [88]. Die FEM eignet sich dabei für die Berechnung flächenhafter und räumlicher Bauteile. Basierend auf den Daten, die dem CAD-Modell vorliegen, werden eventuell Veränderungen bzw. Vereinfachungen vorgenommen, wie beispielsweise die Eliminierung von überflüssigen Informationen.

Als nächstes wird auf der Grundlage der Geometrie das FE-Netz erstellt, bestehend aus den Finiten Elementen und Knoten. Bezeichnet wird dieser Schritt als Diskretisierung. Das Ziel

bei der Erstellung eines FE-Netzes ist die Erreichung von möglichst geringen Abweichungen von der Idealform. Wichtig ist ebenfalls die Wahl des richtigen Elementtyps.

Ebenso sind Lasten und Randbedingungen notwendig, wobei unter Randbedingungen die Lagerung des Modells und etwaige Symmetrien zu verstehen sind. Die elementare Berechnung beginnt nach der Fertigstellung des FE-Modells sowie der Lasten und Rahmenbedingungen. Übergeben wird das Modell an einen Solver, der dieses auf Plausibilität und Einhaltung der Kriterien prüft. Im nächsten Schritt wird das physikalische in ein mathematisches Modell gewandelt. Dazu wird eine Steifigkeits-Matrix erstellt, welche die Eigenschaften der Elemente repräsentiert. Mit den Lasten ergibt sich ein Gleichungssystem, welches vom Solver gelöst wird und das Endergebnis liefert. Schließlich werden die Ergebnisse ausgewertet und visualisiert.

Im Folgenden werden einige Spannungsverläufe der Umlenkstation des fünften Konzeptes untersucht. Zunächst ist die Umlenkschiene zu sehen (siehe Abb. 6.19). Diese wird mit 400 N (siehe gelber Pfeil) beaufschlagt. Als Material wird Stahl verwendet. Alternativ dazu können auch spezifisch leichtere Werkstoffe zum Einsatz kommen, z. B. Aluminium oder Carbon.

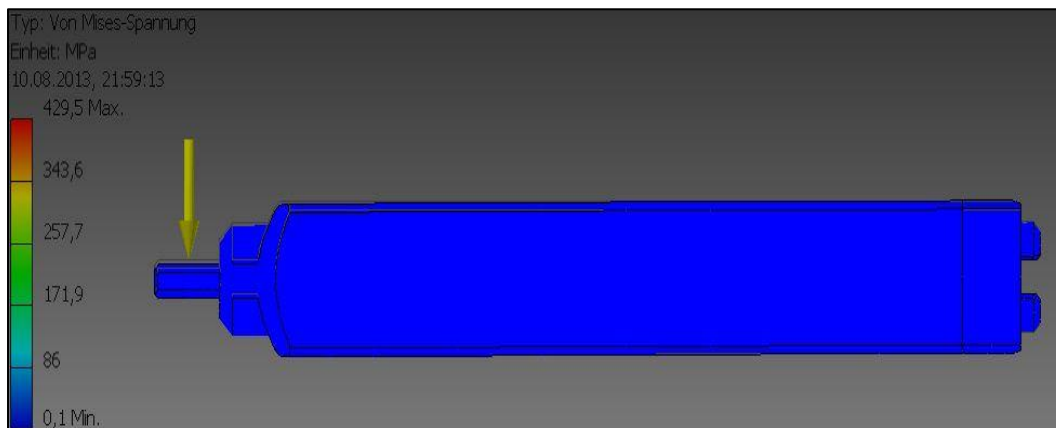


Abbildung 6.19: FEM Simulation

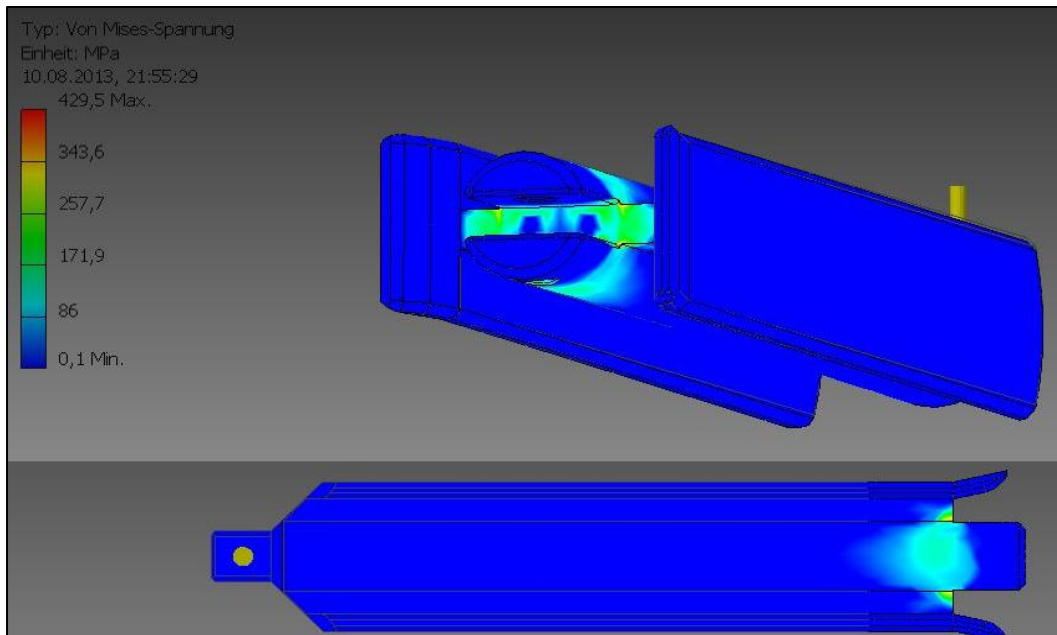


Abbildung 6.20: H-Profil und Gelenk

Im Bauteil liegt die maximale Spannung 429,5 MPa, wobei Stahl eine Zugfestigkeit von 510 MPa aufweist, sodass das Bauteil theoretisch auch diese höhere Belastung aushalten könnte. In Abbildung 6.20 wird die Umlenkschiene in einer größeren Darstellung gezeigt. Dabei ist erkennbar, an welchen Stellen die größten Spannungen im Bauteil auftreten. Da diese unterhalb der Anforderungsgrenze liegen, kann festgestellt werden, dass die Umlenkschiene mit einer Last von weit mehr 40 kg beansprucht werden kann.

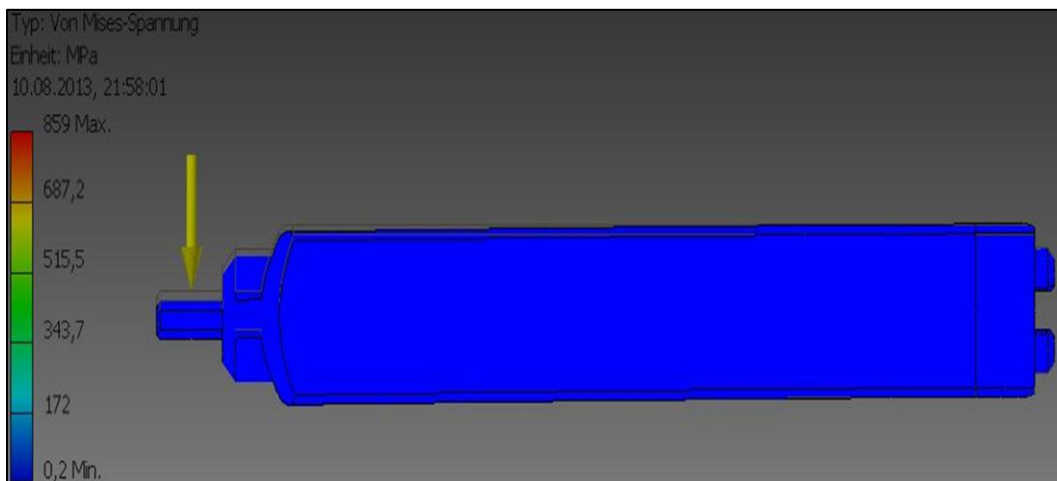


Abbildung 6.21: FEM Simulation der Haken

In der obigen Simulation wurde die einwirkende Kraft verdoppelt, so dass ca. 800 N, die einem Gewicht von 80 kg entsprechen, aufgebracht wurden (= Laufkatzen-Gewicht). Messungen ergaben eine Verformung des Bauteils um ein Millimeter nach unten. Es lässt sich erkennen, dass dieses Bauteil eine Beanspruchung von weiteren 40 kg ertragen kann (siehe Abb. 6.21).

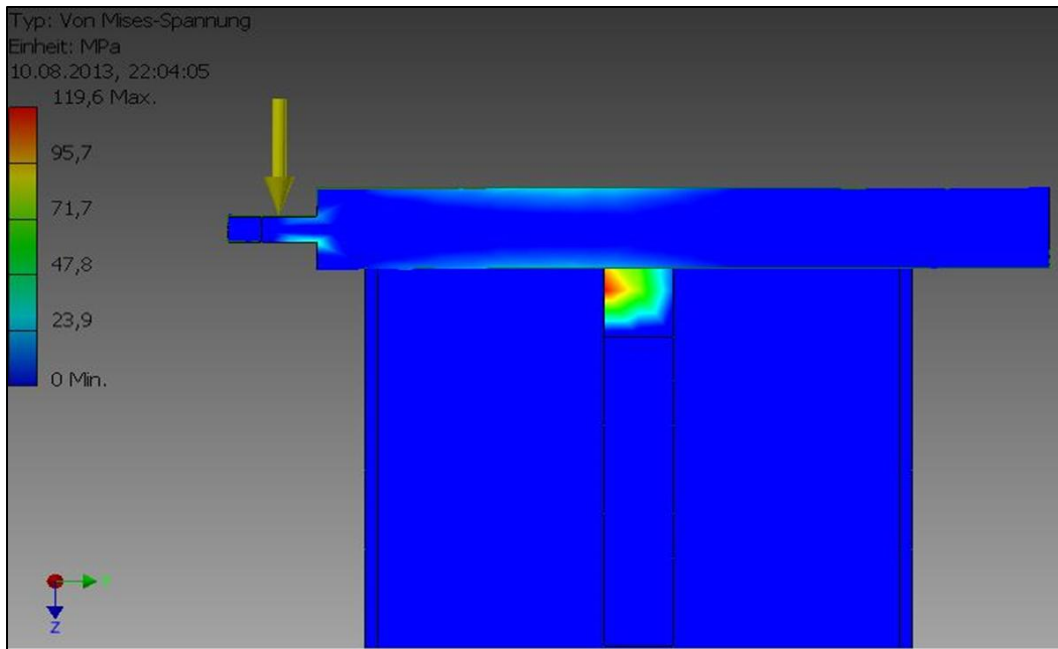


Abbildung 6.22: FEM Simulation der Nase des Profils

Nachfolgend ist die Spannungsverteilung einer Führungsschiene, so wie sie an den Spurenenden verwendet werden, gezeigt. Diese wird an der Nase für die Umlenkschiene mit einer Kraft (gelber Pfeil) von 400 N beaufschlagt (siehe Abb. 6.22).

Man erkennt den nur geringen Spannungsaufbau an der Angriffsstelle durch die Last. Spannungen entstehen überwiegend am Übergang der Versteifungsrippe zur oberen Metallplatte, an der die Führung befestigt ist (siehe Abb. 6.23). Hier besteht weiterer Optimierungsbedarf, wobei auch Stärke (Dicke) oder Anzahl der Versteifungsrippen vergrößert werden können.

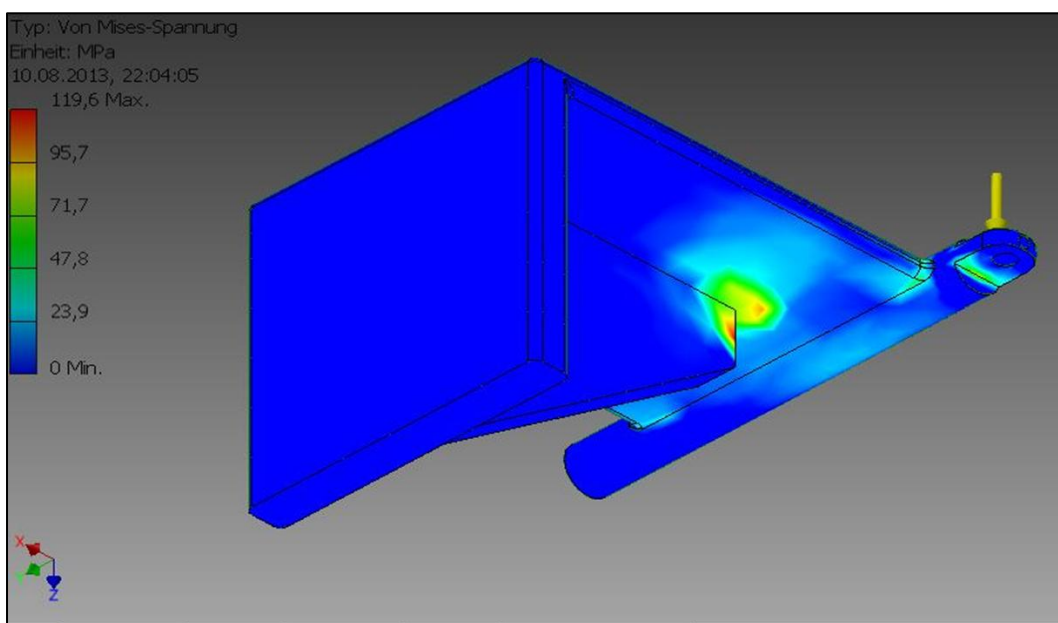


Abbildung 6.23: FEM Simulation der Angriffsstelle

6.7 Anordnungsvariante für das fünfte Konzept

Es wurden im Vorfeld insgesamt fünf Konzepte ausgearbeitet, von denen die nach einer aufgezeigten Bewertungsmatrix vorteilhafteste ausgewählt wurde. Die bisherigen Ausführungen stellen eine in sich selbständige Lösung vor. Die Seilkräfte werden über Stützen in den Hallenfußboden umgeleitet, in dem diese verankert sind. Die Anordnung der Stützen -und damit die Führung der Seile- kann entsprechend der räumlichen Gegebenheiten optimal gestaltet werden.

Ein Vorzug der gewählten Konzeption besteht darin, bauliche Einheiten der Halle in die Lastaufnahme der Seilkräfte einzubeziehen.

Grundsätzlich sind folgende Varianten möglich:

1. Seillasten werden durch Pfeiler aufgenommen (bisher ausführlich beschrieben)
2. Seillasten werden durch bestehende Wände oder andere Vertikaltragwerke (bestehende Säulen, Pfeiler usw.) aufgenommen
3. Seillasten werden durch Aufhängungen an der Deckenkonstruktion aufgenommen
4. Alle Mischvarianten sind möglich

Es kann ein Optimum bezüglich gegebener Lastenaufnahmemöglichkeiten, logistischer Anforderungen und anfallender Kosten für den ganz spezifischen Einzelfall ausgearbeitet und weiterentwickelt werden. Damit wird die hochgradige Flexibilität des Systems noch einmal verdeutlicht.

Für den Fall, dass die Seilkonstruktion an Hallenwänden oder -decken befestigt wird, muss dies mit den Bauleitern der Hallenkonstruktion im Vorfeld abgeklärt werden, um sicher zu stellen, dass die statischen Gegebenheiten der Halle ausreichen, um die zusätzlichen Lasten aufzunehmen.

Im Folgenden soll eine mögliche Anordnungsvariante vorgestellt werden, bei der die Seillasten durch Pfeiler aufgenommen werden.

Auf Basis des Laufkatzen-Modells wird ein Konzept vorgestellt, das eine Vernetzung mehrerer Be- und Entladestationen ermöglicht (siehe Abb. 6.24). Die Vorteile dieser Anordnung liegen, in Verbindung mit einem intelligenten Steuerungssystem und Systemsoftware, in deren Potential der Zeitersparnis, geringeren Kosten bei gleichzeitig hoher Transportgeschwindigkeit und Zuverlässigkeit. Zusätzlich erfordert eine solche Anlage im

Bereich des Transportes nahezu keinen Personaleinsatz, so dass als Systemfolgekosten lediglich Wartungs- und ggf. Instandhaltungskosten (Austausch bei Verschleißteilen in bestimmten Intervallen) anfallen.

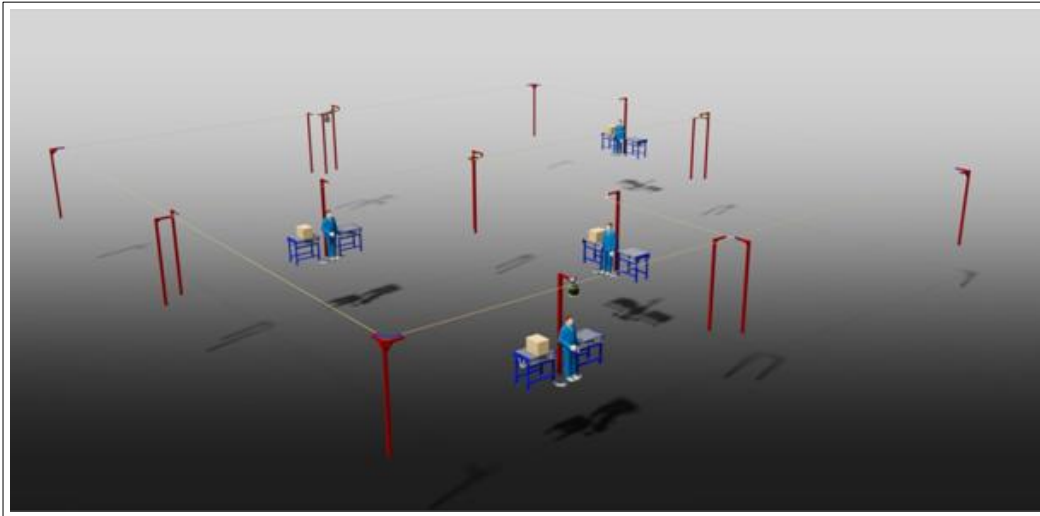


Abbildung 6.24: Beispiel eines Netzwerkes mit einer aktiven Vernetzung aller Stationen zueinander

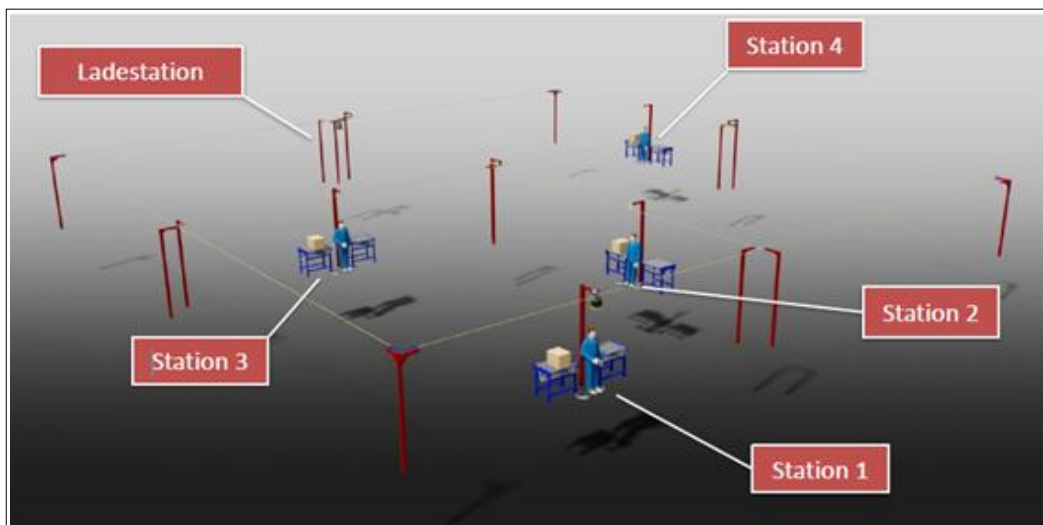


Abbildung 6.25: Netzwerk mit den Stationen 1- 4 und die seitlich angelegte Linie zur Ladestation

In Abbildung 6.25 ist eine Umsetzungsvariante eines solchen Netzwerkes zu sehen. Dabei muss beachtet werden, dass die jeweiligen Be- und Entladestationen an den Arbeitsplätzen in ihrer Anzahl variabel sind und um ein Vielfaches erweitert werden können. Je nach Größe und Anforderung der Betriebskapazitäten kann das Netzwerk entsprechend angepasst werden. Es verfügt somit über eine hohe Flexibilität und Anzahl an Umsetzungsvarianten in Bezug auf Form und Lage. Aus der Erläuterung ist ersichtlich, dass sich die Transportwege oberhalb der Arbeitsplatzebene befinden und zusätzlich zum selbstständigen Transport nur geringer

Raumbedarf besteht. In oben dargestellter Anwendung sind vier Stationen fest installiert, an denen je ein Mitarbeiter Be- und Entlade-Tätigkeit der einfahrenden Laufkatze übernimmt. Die Vernetzung der vier Stationen ist so gestaltet, dass jede Station über einen direkten Fahrweg zu jeder anderen, beliebigen Station verfügt ohne eine andere Station durchfahren zu müssen. Somit wird ein Be- und/oder Entladungs-bedingter Stau auf der Strecke verhindert. Aufgrund der akkubasierten Energieversorgung der Laufkatzen durch einen Akku besteht die Notwendigkeit einer Ladestation, um eine konstante Verfügbarkeit zu ermöglichen. In dieser Anwendung wurde dies durch eine seitlich installierte Strecke realisiert, die von allen Stationen aus erreichbar und durch ihre Führung von der Stau-Problematik ausgeschlossen ist. Durch diese Anordnung sind Wartungsarbeiten und Instandhaltungen im laufenden Betrieb möglich. Die vollautomatisierte Systemsteuerung ermöglicht einen fließenden Ablauf und kann flexibel an den aktuellen Streckenstand angepasst werden.

Kapitel 7

7 Simulationsmodell: Analyse des Ablaufs im Lager

Als Simulationen werden modellhafte Experimente zur Prüfung definierter Sachverhalte bezeichnet. Dabei stellt das Modell eine abstrahierte Abbildung eines zu untersuchenden Systems dar, das entweder bereits existiert oder künftig entstehen soll. Abstraktion der Modellierung bedeutet die Betrachtung von Struktur oder Verhalten des Systems unter vermindertem Detail-Grad im Vergleich zum Original-System.


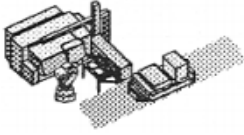

Durch die Simulationen werden Entscheidungsprozesse unterstützt, um mehrere Systemvarianten zu analysieren, die sich in Struktur oder Verhalten unterscheiden [89].

Dabei werden Zusammenhänge abgebildet, die systemimmanent wirken und zeitbezogen die logistischen Ergebnisgrößen aufgrund des dynamischen Ablaufverhaltens berechnet. Die Ergebnisse bedürfen einer Interpretation, so dass Ergebnisdaten und Zielvorgaben zu vergleichen sind. Die Variation von Struktur-, Ressourcen- und Prozessparametern muss in der Weise erfolgen, dass ein angestrebtes Ziel als Soll-Größe möglichst gut erfüllt wird. Aufgrund des gegenläufigen Verhaltens der logistischen Zielgrößen (z. B. Auslastung versus Durchlaufzeit) ist es nicht evident, wie die Stellgrößen zu parametrieren sind, um die Zielvorgaben zu erreichen. Den Anforderungen steigender Komplexität kann durch Optimierungen teilweise entgegnet werden [89].

Ultraleichte Elektrohängebahnsysteme sind seil-basierte Fördersysteme mit individuell fahrenden Laufkatzen, welche sich automatisch auf einem Seil bewegen und hinsichtlich Konstruktion und Nutzlast im unteren Gewichtsbereich anzusiedeln sind.

So können in den unterschiedlichen Detail-Stufen einer Anlagenplanung neben der Ablaufsimulation u. a. die graphische 3D Simulation, die Finite-Elemente-Methoden und die Mehrkörper-Simulation eingesetzt werden (vgl. Tabelle 7.1).

Tabelle 7.1: Einsatzgebiete der Simulationstechnologien [90]

Planungsebene	Planungsinhalt	Simulationstechnologie
Anlage 	<ul style="list-style-type: none"> • Anlagenlayout • Materialfluss/Logistik • Systemleistung • Fertigungsprinzip • Steuerungsstrategien • Entstörstrategien 	Ablaufsimulation (grob-mittel)
Zelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Zellenlayout • Ablaufvorschriften • RC-/NC Programmierung • Kollisionsvermeidung • Taktzeitoptimierung 	Ablaufsimulation (fein) Grafische 3D-Simulation
Komponente 	<ul style="list-style-type: none"> • Betriebsmittelbeanspruchung • Prozessparameter • Werkzeuge • Hilfsmittel 	Finite-Elemente-Methode (FEM) Grafische 3D-Simulation Mehrkörpersimulation (MKS)

Das Ziel ultraleichter Elektrohängebahnsysteme liegt in deren Integration in logistische Prozesse, so dass günstige Materialabläufe ermöglicht werden.

Das folgende Kapitel analysiert den Prozess eines solchen Systems, indem notwendige Annahmen zugrunde gelegt werden. Die Analyse besteht aus drei Szenarien, welche auf der fallbezogenen Erhöhung der Laufkatzenschwindigkeiten basieren. Hierbei wird der Zusammenhang zwischen der Laufkatzenschwindigkeit und dem Systemdurchsatz ermittelt.

Ein Abstrakt-Event-Simulationsmodell eines ultraleichten Elektrohängebahnsystems wird durch den Einsatz der DOSIMIS-3-Software simuliert, um die drei Szenarien umzusetzen. Auf Basis der Simulationsergebnisse wird die Korrelation zwischen Laufkatzenschwindigkeit und Systemdurchsatz ermittelt. Das Simulationsmodell zeigt den Effekt erhöhter Geschwindigkeit auf den Systemdurchsatz.

7.1 Einführung

Das Elektrohängebahnsystem stellt ein effizientes Transportmittel mit hoher Flexibilität dar, um den internen Warenverkehr optimal zu planen. Das System wird zum Transportieren, Sparen, Puffern von Lasten mit Hilfe eines flurfreien, innovativen Fördermittels eingesetzt. Aufgrund ihrer modularen Strukturen erlauben solche Fördermittel den Einsatz in vielen Bereichen [86]. Elektrohängebahnsysteme kommen vornehmlich dann in Betracht, wenn besondere Anforderungen an Geschwindigkeit, hohe Verfügbarkeit, hohe Ladekapazität und hohe Positionspräzision erzielt werden [70].

Durch die Integration des Kontrollsystems ermöglicht dieses System einen bestmöglichen Materialfluss und einen Höchstgrad an Flexibilität für vielfältige Anwendungen. Jedes Fahrzeug des Elektrohängebahnsystems ist mit einem integrierten Kontrollsystem ausgestattet, das mit dem zentralen Kontrollsystem kommuniziert. Die Kontrollanweisungen werden an Bord in Chassis-Funktionen wie Fahren, Stoppen, Geschwindigkeitsregulierung, Heben oder Übergabe und Abgang von Transportware umgesetzt [70]. Ein permanentes oder variables Codieren der Fahrten ermöglicht den Abgleich und die Verwaltung von Aufträgen sowie Förderung von Prozessdaten zum Zweck der Materialflusskontrolle.

Ultraleichte Elektrohängebahnsysteme sind wesentlich flexibler als gewöhnliche Ein-Schienenbahnen-Fördermittel und können praktisch jedem Pfad folgen, um sich sämtlichen Transportplänen anzupassen. Die Abstandsbolzen-Konstruktion ermöglicht eine Vielzahl an möglichen Konfigurationen.

Die Simulation hat sich als Imitation des Echte-Welt-Prozesses oder -Systems ergeben. Simulationswerkzeuge sind speziell entwickelt worden, um Störsignal-Effekte an Messungen zu begrenzen, die Effizienz von Produktions- und Fertigungssystemen abzuschätzen, benötigte Logistik-Funktionen und Materialhandling einzuschätzen.

In Untersuchungen wurde erarbeitet, dass Unternehmen, die Ein-Schienenbahnen-Systeme verwenden, oft erhebliche Kosten durch Wartungs- und System-Updates entstehen [91]. Daher sollten Unternehmen die Langzeitkosten und Konsequenzen der Integration eines Elektrohängebahnsystems im Arbeitsprozess berücksichtigen.

7.2 Informationen zum Modell

Die Betrachtungen der zuvor beschriebenen Untersuchungen beziehen sich auf ein Lager, welches täglich von Montag bis Freitag zwischen 08:00 Uhr und 16:00 Uhr betrieben wird. Transportgut wird zwischen Abteilungen des Lagers über ein ultraleichtes Elektrohängebahnsystem transportiert.

Gewählt wurde exemplarisch die Konstruktion des zweiten Konzeptvorschlags. Die Laufkatze hängt hier in zwei parallel untereinander geführten Seilen und fährt auf diesen mit eigener Energieversorgung. Sie transportiert Nutzlast mit einem automatisierten Greifer und ist mit diesem durch ein Gestänge verbunden. Die Laufkatze versorgt vier Belade- und Entladestationen, die wiederum über den automatisierten Greifer bedient werden.

7.2.1 Zielfunktion des Modells

Das vorliegende Modell soll folgende Frage klären:

Kann der Durchsatz gesteigert werden, indem die Geschwindigkeit der Laufkatze erhöht wird?

7.3 Glossar

Es gilt nachstehende Liste für Wort-Definitionen in diesem Modell:

Tabelle 7.2 : Glossar der in diesem Modell verwendeten Bezeichnungen

Bezeichnung	Definition
Modell, Simulation	System zur Ermittlung von Kennzahlen.
Transportgut	Transportgut, das zwischen Stationen transportiert wird.
Lager	ist ein Lager des Postzentrums
Modell, Simulationsmodell	bezeichnet das Simulationsmodell des Lagers im Simulationswerkzeug DOSIMIS-3.

7.4 Simulationsmodell

7.4.1 Annahmen

Folgende Annahmen wurden in diesem Modell getroffen:

1. An jeder Station befinden sich zwei Rollenbahnen. Eine dient der Beladung, die andere der Entladung.
2. Die Geschwindigkeit der Laufkatze ist 1 m/s. (Diese Geschwindigkeit gehört zum ersten Szenario.)
3. Die Länge des Transportguts beträgt 0,5 Meter.
4. Die Standard-Beladezeit und Standard-Entladezeit betragen 7 Sekunden.
5. Die Anzahl des Transportguts ändert sich je nach Station.
6. Alle 100 Sekunden kommt ein neues Transportgut an jeder Station an.
7. Der Materialfluss ist nur in einer Richtung zulässig.
8. Als Dauer für die Simulation wurden 480 Minuten angesetzt.

7.4.2 Systemabgrenzung

Sobald sich ein Transportgut in der Station befindet, wird dieses als system-zugehörig betrachtet. Ab diesem Zeitpunkt befindet sich das Transportgut also in der Statistik der gemessenen Kennzahlen dieser Simulation.

7.4.3 Schematische Darstellung des Modells

In Abbildung 7.1 ist ein Schema des Lagers abgebildet. Das Transportgut wird von den 'Quellen' geliefert, welches je nach Häufigkeit an die Stationen geht. An jeder Station kann beladen und entladen werden. Die Distanz zwischen Be- und Entladung beträgt an jeder Station ca. 0,5 m. Sobald ein Transportgut an der Station ankommt, wird es - wie bereits benannt - als systembezogen betrachtet und befindet sich ab diesem Punkt in der Statistik der gemessenen Anzeigen der Simulation.

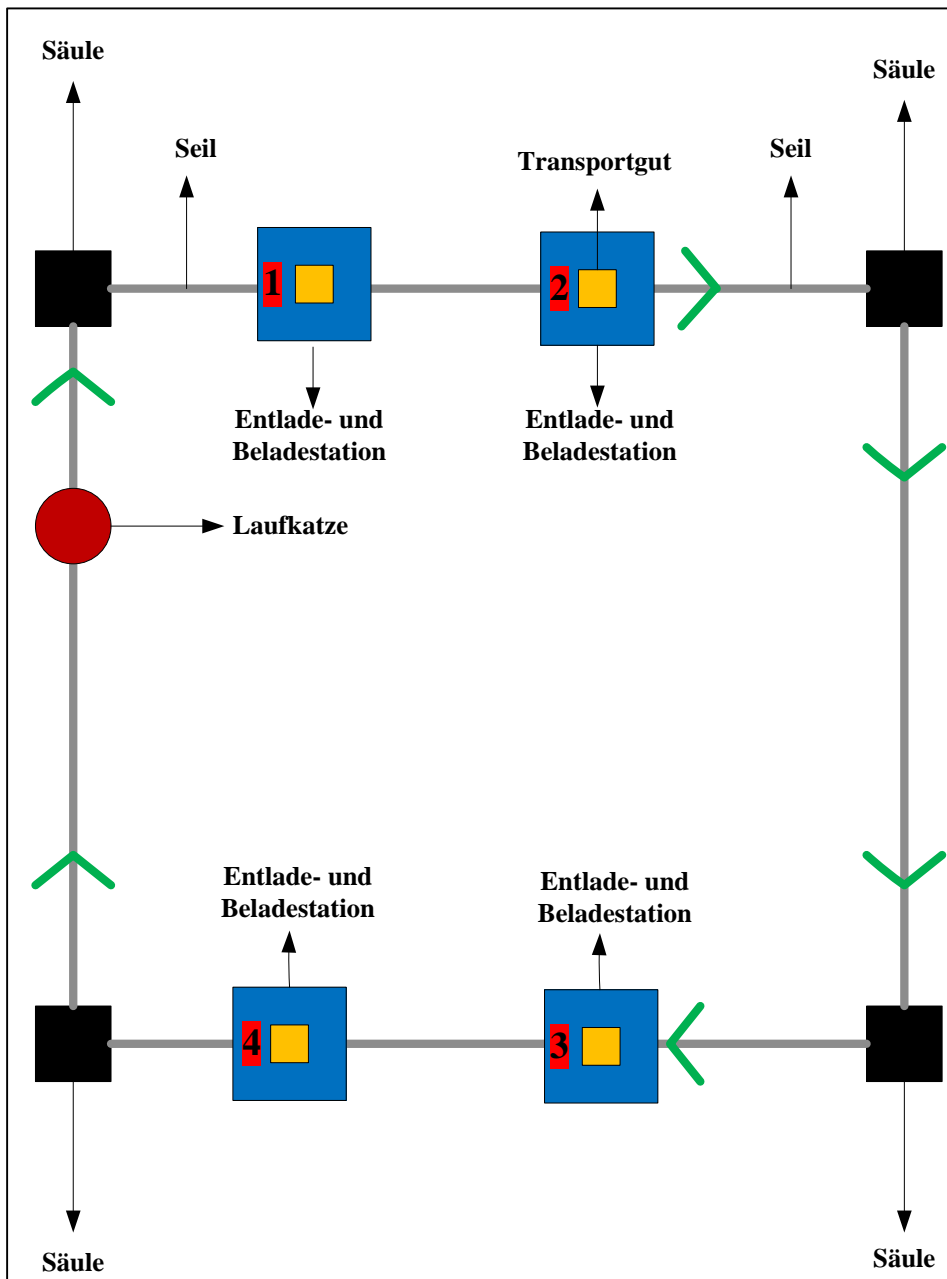


Abbildung 7.1: Layout des Lagers

Dieser Verlauf findet sich in der Abbildung wieder. Weiterhin zeigen die grünen Pfeile die Richtung des Materialflusses an.

7.4.4 Methoden der Modell-Validierung

Für die Validierung des Modells wird ein Elektrohängebahn-System als Untersuchungsobjekt betrachtet. Dazu werden Daten von mehreren dieser Systeme recherchiert und das Modell auf Basis dieser Werte aufgebaut. Auf diese Weise konnte eine realitätsnahe Systemkonstellation simuliert werden, um die Optimierungsanalyse durchzuführen.

7.4.5 Design der Modellexperimente

Tabelle 7.3: Simulationsbauteile der Lager Simulation

Nummer	Typ	Name	Parameter
24, 28, 38, 47	Quelle	Eingang	Annahmezeit:=(getaktet, Taktzeit:=100s)
33, 36, 42, 50	Staustrecke	Rollenbahn	Segmentlänge:=1m, Fördergeschwindigkeit:=1m/s, Anzahl der Segmente:=10
34, 35, 43, 49	Staustrecke	Rollenbahn	Segmentlänge:=1m, Fördergeschwindigkeit:=1m/s, Anzahl der Segmente:=10
18, 26, 37, 46	Beladestation	Lastenannahme	Länge:=1m, Objektlänge:=0,5m, Halteposition:=1m, Geschwindigkeit:=1m/s, Standardbeladezeit:=7s, Strategie: FIFO, Getaktet, Taktzeit:=10s
19, 25, 44, 53	Entladestation	Lastenzustellung	Länge:=1m, Objektlänge:=0,5m, Halteposition:=1m, Geschwindigkeit:=1m/s, Standardentladezeit:=7s, Getaktet, Taktzeit:=20s
27, 30, 40, 48	Blockstrecke	Fahrt zwischen zwei Rollenbahnen	Länge:=1m, Geschwindigkeit:=1m/s
51,52	Blockstrecke	Fahrt zwischen zwei Stationen	Länge:=4m, Geschwindigkeit:=1m/s
20,23	Blockstrecke	Fahrt zwischen zwei Seiten	Länge:=15m, Geschwindigkeit:=1m/s
22, 31, 41, 45	Senke	Ausgang	Annahmezeit:=(getaktet, Taktzeit:=1s)

Tabelle 7.3 zeigt die Konstruktion des Modells so wie sie in dieser Simulation benutzt wird. Blockstrecken repräsentieren die Laufkatze in diesem Modell. Die Parameter der Laufkatzen-Geschwindigkeit werden in jedem Szenario variabel angepasst.

DOSIMIS-3 ist ein Simulations-Tool und darauf spezialisiert, Fragen zur Funktionalität zu beantworten. Außerdem führt es Maßnahmen eines Logistiksystems vor und wird in der Industrie sowie in der Logistik-Ausbildung und im Logistik-Training in deutschsprachigen Ländern eingesetzt. Das Tool ermöglicht eine umfangreiche Komponenten-Betrachtung des Materialflusses [92].

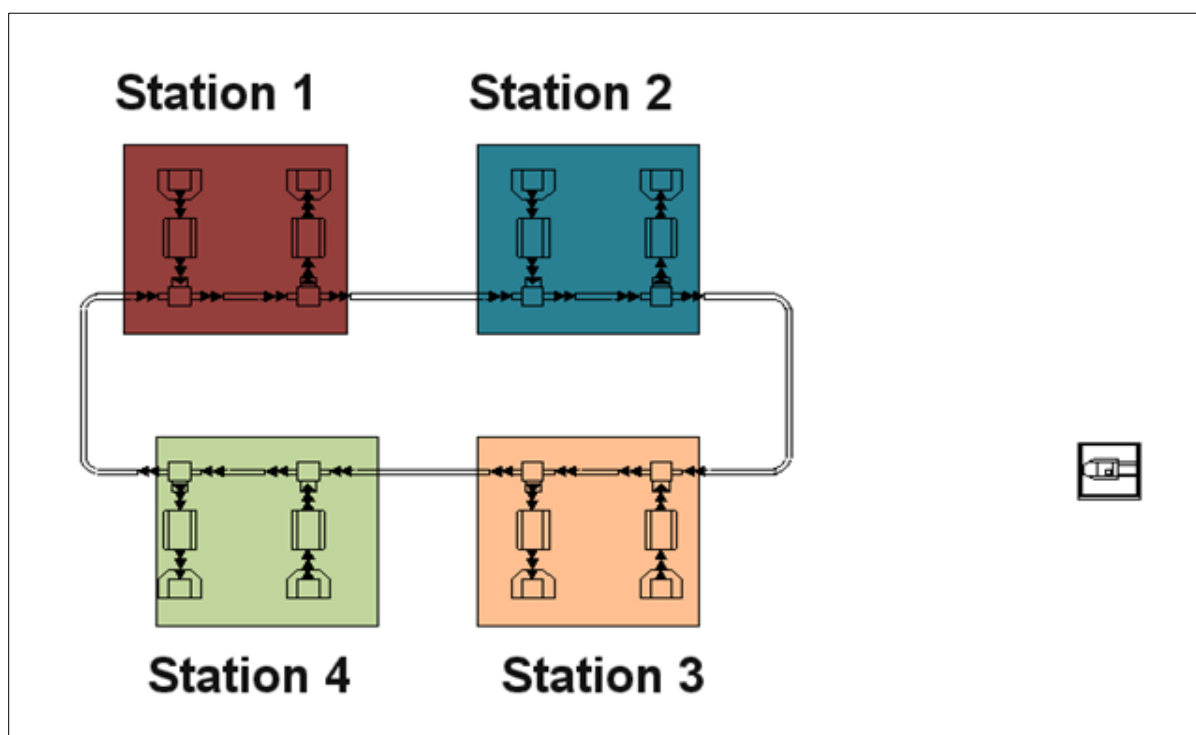


Abbildung 7.2: DOSIMIS-3 Simulationsmodell in der Designfassung

Abbildung 7.2 veranschaulicht den Aufbau des Modells, wie es in dieser Simulation verwendet wird.

Für die Darstellung in Tabelle 7.3 beträgt die Laufkatzen-Geschwindigkeit 1 m/s, entsprechend der Parameter des ersten Szenarios. Die Tabelle zeigt die einzelnen Komponenten sowie deren Parametrisierung. Nicht explizit erwähnte Parameter entsprechen den Standardwerten der DOSIMIS-3-Anwendung, da diese als Durchschnittswerte eine allgemeine Gültigkeit besitzen.

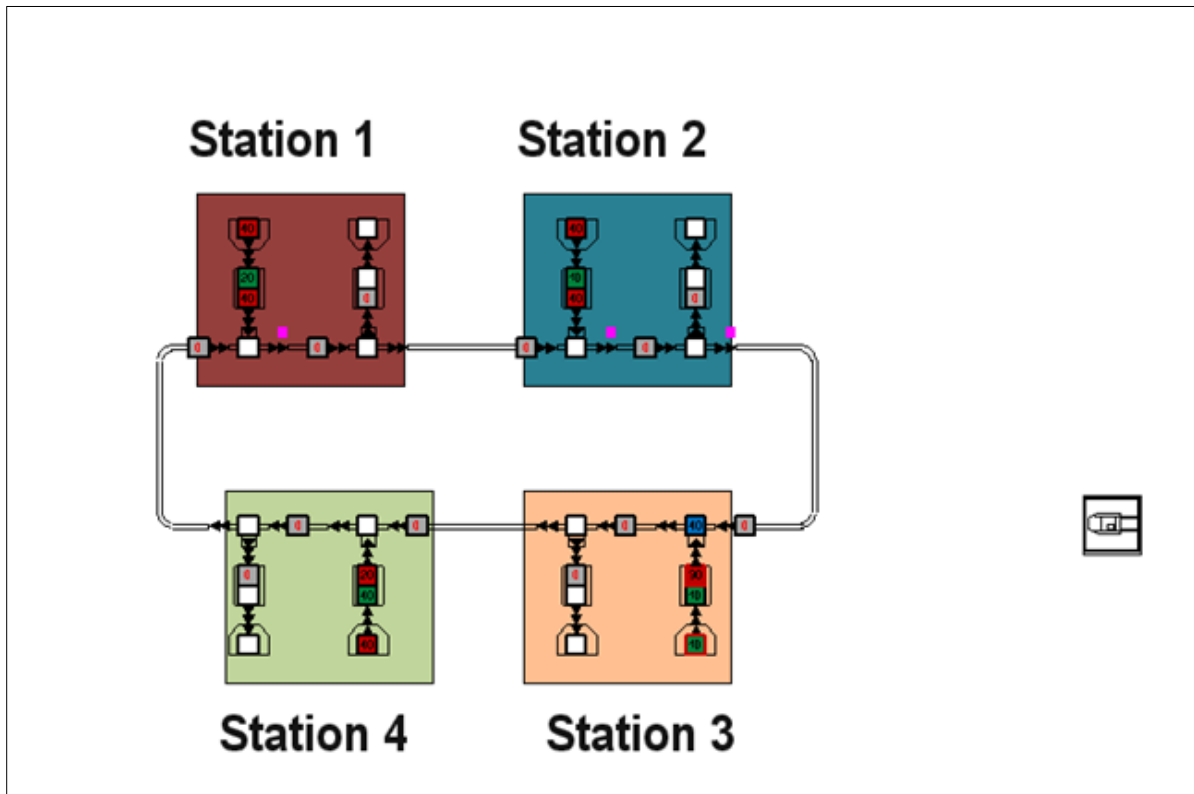


Abbildung 7.3: DOSIMIS-3 Simulationsmodell im aktiven Modus, das Modell des Systems wird durchsimuliert

Abbildung 7.3 illustriert, wie das Modell im Simulationsmodus aussieht. Es ist zu erkennen, dass in der Stau-Strecke 'Rollbahn' Transportgüter auf den Transport warten und dass ein Transportgut zur selben Zeit transportiert wird.

7.4.6 Parametrisierung der Quelle

Es hat sich gezeigt, dass die Messwerte der Quelle nicht durch die Algorithmen nachempfunden werden können, die standardmäßig bei DOSIMIS-3 implementiert sind.

DOSIMIS-3 bietet jedoch die Möglichkeit, eine angepasste Verteilung zu umzusetzen. Für diesen Zweck wird eine Datei erstellt, welche die Herkunft der Transportgüter beschreibt.

In der Realität ist ein kontinuierlicher Materialfluss in das Lager durch Transportgüter nicht gegeben. In DOSIMIS-3 sind Verteilungen möglich, die sich nach der Anzahl der Transportgüter während eines bestimmten Zeitraums oder nach Prioritäten der Transportgüter richten. Hierbei kann die Anzahl der Lasten als Ganzes bestimmt und auch die Kapazität eingestellt werden.

In diesem Fall erfolgt die Objekt-Generierung in zufälliger Reihenfolge.

7.5 Ergebnisse

Dieser Abschnitt beschreibt die Ergebnisse der Simulation. Die Funktionsweise des Systems wird aufgezeigt und die Bedeutung der Laufkatzensgeschwindigkeit für den Durchsatz analysiert.

7.5.1 Typisches Verhalten des Modells

Aufgrund der geringen Abweichungen der für dieses Modell erstellten Quellendatei sind im Verlauf der Test-Durchläufe keine Ausreißer maßgeblichen Abweichungen zu verzeichnen.

7.5.2 Tabellierung einer typischen Ergebnisreihe

Für drei verschiedene Geschwindigkeiten der Laufkatze wurde der Lastendurchsatz untersucht.

Die nachfolgenden Tabellen enthalten Werte über die Simulation. Diese entsprechen den folgenden Metriken:

- Durchsatz: Der Durchsatz beschreibt die Anzahl an Transportgütern, die in einem Intervall abtransportiert bzw. transportiert werden.
- Mittl. Belegung: Die mittlere Belegung ist der Durchschnittswert der Belegungsanzahl über den Simulationsverlauf.
- Prozent. Belegung: Durchschnittliche prozentuale Belegung.
- Auslastung: Die Auslastung ist ein prozentualer Wert der Auslastung über einen Simulationsschritt.
- Blockierzeiten: Die Anzahl an Sekunden, in welcher der Baustein nicht arbeiten kann, da in den nachfolgenden Elementen ein Stau aufgekommen ist oder der aktuelle Baustein arbeitet.

Zunächst werden drei verschiedene Geschwindigkeiten für die Laufkatze definiert. Anschließend werden diese Geschwindigkeiten mit gleichen Abstufungen bei jedem Szenario erhöht und im weiteren Verlauf die Simulationen für drei verschiedene Geschwindigkeiten ausgeführt. Zuletzt wird der Durchsatz für jede Beladestation aufgezeigt. Die Szenarien basierten auf der Laufkatzen-Geschwindigkeit mit gleichen Abstufungen. Die erste Laufkatzen-Geschwindigkeit wird gemäß einer „Real-Life“-Elektrohängebahnsystem-Anwendung ausgewählt.

Die Tabellen 7.4, 7.5 und 7.6 zeigen die Leistungsanalyse der Beladestationen entsprechend den Laufkatzen-Geschwindigkeiten.

Die über DOSIMIS-3 ermittelten Messwerte sind im Folgenden dargestellt:

Tabelle 7.4: End-Statistik (Geschwindigkeit der Laufkatze=1,0 m/s)

Nr.	Bausteinname	Durchsatz	mittl. Belegung	prozent. Belegung	Auslastung	Blockierzeiten
18	LOA_1	380	0,04	4,10	5,42	0,00
19	UNL_3	379	0,06	6,06	25,80	0,00
20	TRA_15	379	0,20	19,74	20,40	0,66
22	SIN_3	65	0,00	0,23	0,23	0,00
23	TRA_19	380	0,20	19,77	20,43	0,69
24	QUE_1	90	9496	0,00	94,82	94,82
25	UNL_1	379	0,06	6,28	11,54	0,00
26	LOA_3	379	0,04	4,09	5,41	0,00
27	TRA_16	380	0,01	1,32	1,98	0,66
28	QUE_4	90	95,16	0,00	95,03	95,03
30	TRA_30	379	0,01	1,32	1,97	0,66
31	SIN_1	68	0,00	0,24	0,24	0,00
33	ACC_1	80	9,75	97,55	97,55	99,35
34	ACC_11	68	0,02	0,24	0,24	0,00
35	ACC_3	65	0,02	0,23	0,23	0,00
36	ACC_31	80	9,77	97,65	97,65	99,57
37	LOA_2	379	0,04	4,06	5,38	0,00
38	QUE_2	89	95,42	0,00	95,14	95,14
40	TRA_17	379	0,01	1,32	1,97	0,66
41	SIN_2	76	0,00	0,26	0,26	0,00
42	ACC_2	79	9,78	97,78	97,78	99,69
43	ACC_21	76	0,03	0,26	0,26	0,00
44	UNL_4	379	0,09	9,19	14,45	0,00
45	SIN_4	108	0,00	0,38	0,38	0,00
46	LOA_4	379	0,04	4,06	5,38	0,00
47	QUE_3	89	95,68	0,00	95,32	95,32
48	TRA_48	379	0,01	1,32	1,97	0,66
49	ACC_4	108	0,04	0,38	0,38	0,00
50	ACC_41	79	9,79	97,90	97,90	99,69
51	TRA_51	379	0,05	5,26	5,92	0,66
52	TRA_52	379	0,05	5,26	5,92	0,66
53	ENT_53	379	0,07	6,86	26,60	0,00

Es stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, die Ergebnisse zu analysieren. Zum ersten kann man sich unter Statistik-Daten die Statistik-Datei ansehen.

Tabelle 7.5: End-Statistik (Geschwindigkeit der Laufkatze=1,1 m/s)

Nr.	Bausteinname	Durchsatz	mittl. Belegung	prozent. Belegung	Auslastung	Blockierzeiten
18	LOA_1	403	0,04	4,22	5,50	0,00
19	UNL_3	403	0,06	6,28	25,34	0,00
20	TRA_15	403	0,19	19,08	19,72	0,64
22	SIN_3	68	0,00	0,24	0,24	0,00
23	TRA_19	403	0,19	19,09	19,73	0,67
24	QUE_1	95	92,36	0,00	94,79	94,79
25	UNL_1	403	0,06	6,50	11,59	0,00
26	LOA_3	403	0,04	4,22	5,50	0,00
27	TRA_16	403	0,01	1,27	1,91	0,64
28	QUE_4	95	92,56	0,00	94,79	94,79
30	TRA_30	403	0,01	1,27	1,91	0,64
31	SIN_1	72	0,00	0,25	0,25	0,00
33	ACC_1	85	9,75	97,48	97,48	99,36
34	ACC_11	72	0,02	0,23	0,23	0,00
35	ACC_3	69	0,02	0,22	0,22	0,00
36	ACC_31	85	9,76	97,60	97,60	99,57
37	LOA_2	403	0,04	4,22	5,50	0,00
38	QUE_2	95	92,81	0,00	94,92	94,92
40	TRA_17	403	0,01	1,27	1,91	0,64
41	SIN_2	84	0,00	0,29	0,29	0,00
42	ACC_2	85	9,77	97,73	97,73	99,70
43	ACC_21	84	0,03	0,27	0,27	0,00
44	UNL_4	403	0,10	9,55	14,64	0,00
45	SIN_4	114	0,00	0,40	0,40	0,00
46	LOA_4	403	0,04	4,19	5,46	0,00
47	QUE_3	94	93,07	0,00	95,14	95,14
48	TRA_48	403	0,01	1,27	1,91	0,64
49	ACC_4	114	0,04	0,36	0,36	0,00
50	ACC_41	84	9,79	97,86	97,86	99,70
51	TRA_51	403	0,05	5,09	5,72	0,64
52	TRA_52	403	0,05	5,09	5,72	0,64
53	ENT_53	403	0,07	7,37	26,45	0,00

In den Leistungsgrößen der Bausteinleistung finden sich allgemeine Informationen wie Durchsatz oder Auslastung.

Tabelle 7.6: End-Statistik (Geschwindigkeit der Laufkatze=1,2 m/s)

Nr.	Bausteinname	Durchsatz	mittl. Belegung	prozent. Belegung	Auslastung	Blockierzeiten
18	LOA_1	425	0,04	4,39	5,62	0,00
19	UNL_3	424	0,07	6,58	24,98	0,00
20	TRA_15	424	0,18	18,40	19,02	0,61
22	SIN_3	74	0,00	0,26	0,26	0,00
23	TRA_19	425	0,18	18,43	19,05	0,64
24	QUE_1	101	89,90	0,00	94,59	94,59
25	UNL_1	425	0,07	6,94	11,86	0,00
26	LOA_3	424	0,04	4,35	5,58	0,00
27	TRA_16	425	0,01	1,23	1,84	0,61
28	QUE_4	100	90,10	0,00	94,79	94,79
30	TRA_30	424	0,01	1,23	1,84	0,61
31	SIN_1	79	0,00	0,27	0,27	0,00
33	ACC_1	91	9,74	97,42	97,42	99,37
34	ACC_11	79	0,02	0,23	0,23	0,00
35	ACC_3	74	0,02	0,21	0,21	0,00
36	ACC_31	90	9,75	97,53	97,53	99,57
37	LOA_2	425	0,04	4,35	5,58	0,00
38	QUE_2	100	90,35	0,00	94,79	94,79
40	TRA_17	425	0,01	1,23	1,84	0,61
41	SIN_2	89	0,00	0,31	0,31	0,00
42	ACC_2	90	9,77	97,67	97,67	99,71
43	ACC_21	89	0,03	0,26	0,26	0,00
44	UNL_4	424	0,10	9,76	14,67	0,00
45	SIN_4	118	0,00	0,41	0,41	0,00
46	LOA_4	124	0,04	4,35	5,58	0,00
47	QUE_3	100	90,61	0,00	94,96	94,96
48	TRA_48	424	0,01	1,23	1,84	0,61
49	ACC_4	118	0,03	0,34	0,34	0,00
50	ACC_41	90	9,78	97,80	97,80	99,71
51	TRA_51	425	0,05	4,92	5,53	0,61
52	TRA_52	424	0,05	4,91	5,52	0,61
53	ENT_53	424	0,08	7,69	26,09	0,00

Die End-Statistik des Materialflusssystemes liefert einen Überblick über die Ergebnisse der Simulation.

Die Abbildungen 7.4, 7.5, 7.6 und 7.7 zeigen die Durchsatz-Analyse der Beladestationen bei drei verschiedenen Geschwindigkeiten. Gemäß der Durchsatz-Analyse wird der Systemdurchsatz erhöht, wenn die Laufkatzen-Geschwindigkeit mit gleichen Abstufungen gesteigert wird. Eine notwendige technische Analyse muss erstellt werden, um die maximale Laufkatzen-Geschwindigkeit im System herauszufinden. Somit beeinflusst die Laufkatzen-Geschwindigkeit den Systemdurchsatz. Die ausgewählte Geschwindigkeit entspricht in etwa

der Schrittgeschwindigkeit. Bei einer 20 %-igen Geschwindigkeitserhöhung steigt der Durchsatz um ca. 12,5 %.

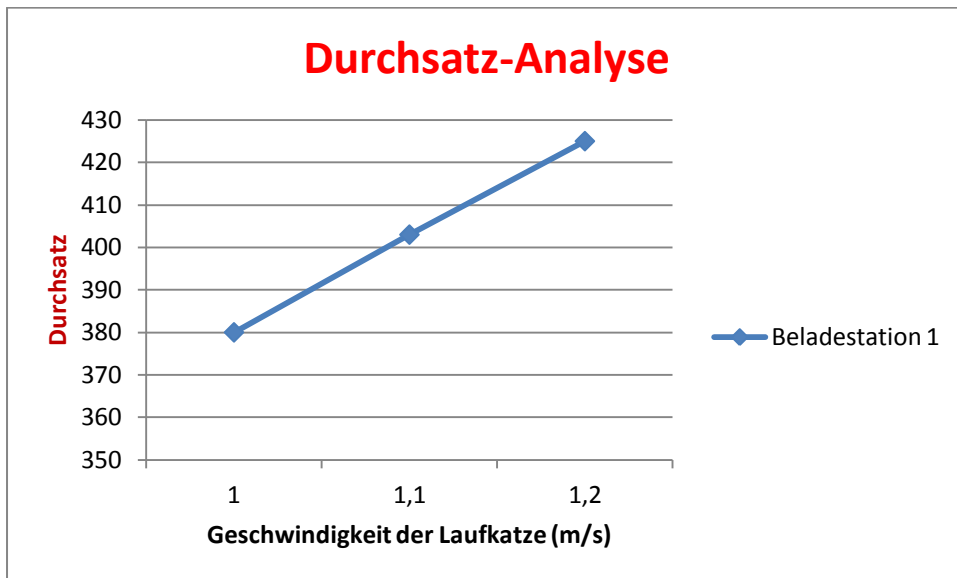


Abbildung 7.4: Durchsatz-Analyse der Beladestation_1 nach drei verschiedenen Geschwindigkeiten

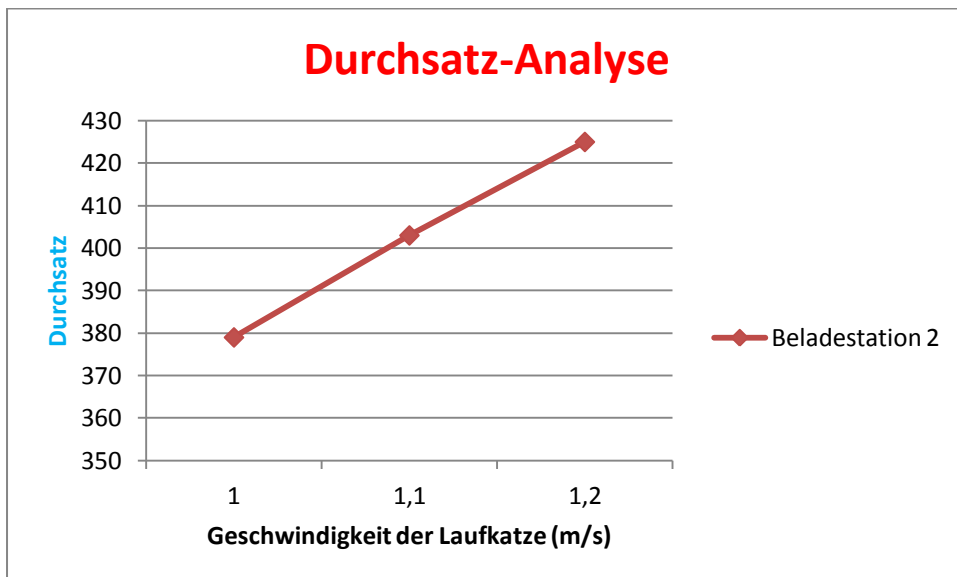


Abbildung 7.5: Durchsatz-Analyse der Beladestation_2 nach drei verschiedenen Geschwindigkeiten

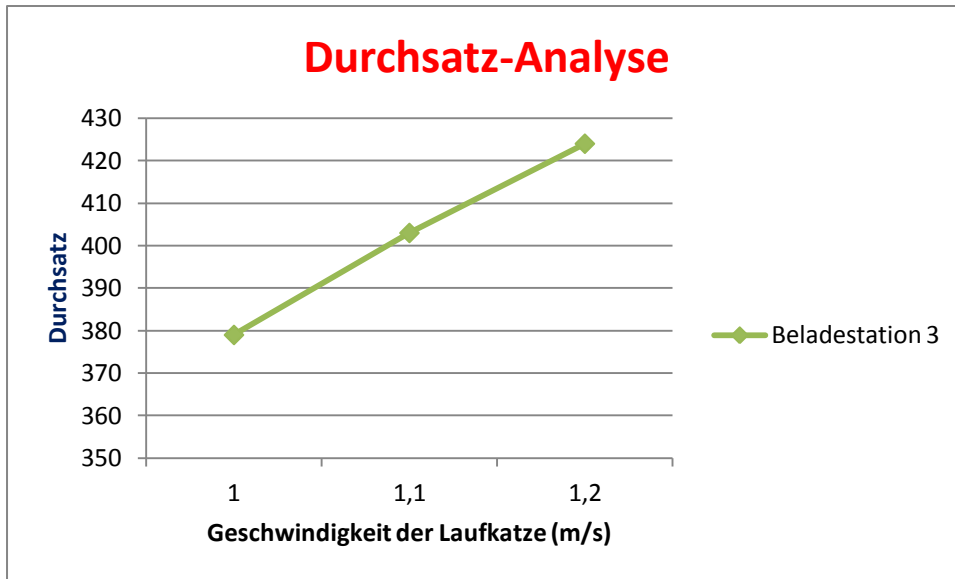


Abbildung 7.6: Durchsatz-Analyse der Beladestation_3 nach drei verschiedenen Geschwindigkeiten

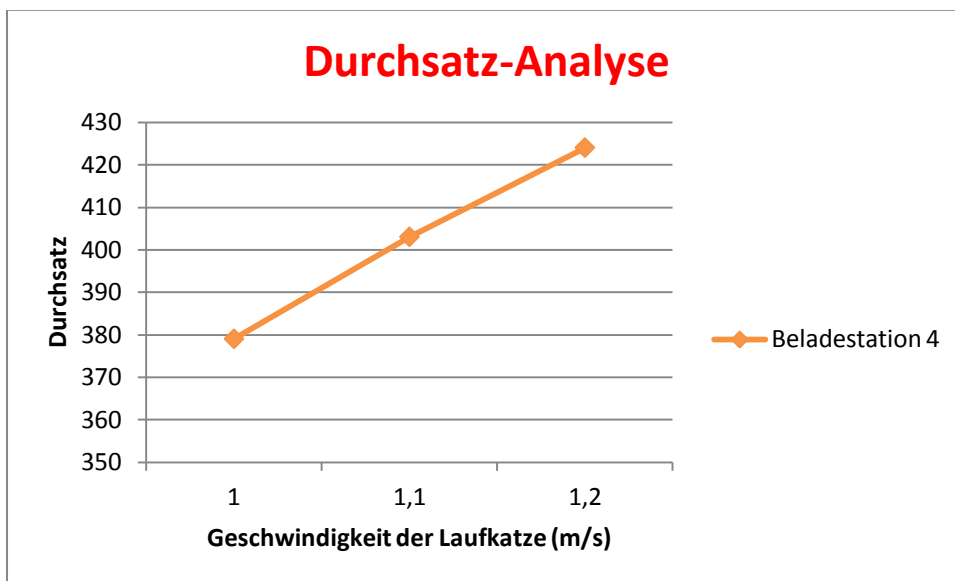


Abbildung 7.7: Durchsatz-Analyse der Beladestation_4 nach drei verschiedenen Geschwindigkeiten

7.5.3 Genauigkeit der Ergebnisse

Wie im Verlauf beschrieben, wurde durch die Recherche ein realitätsnahes Modell erstellt.

Dabei wurde festgestellt, dass für höher Durchsatz Einfluss auf die Geschwindigkeit der Laufkatze hat. Dabei muss der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf den Durchsatz im Einzelfall differenziert betrachtet werden. Liegen die anzufahrenden Stationen streckenmäßig nah beieinander, sind Be- und Entladezeiten für den Durchsatz entscheidender und der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit geringer. Ist die Entfernung zwischen den anzufahrenden Stationen groß, steigt der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf den Durchsatz an.

Der Einsatz einer weiteren Laufkatze kann nur bedingt Vorteile bringen. Folgende Einschränkungen müssen aus technischen Gründen berücksichtigt werden:

1. Auf jedem Seilabschnitt darf sich jeweils nur eine Laufkatze befinden (Tragfähigkeit der Seilkonstruktion)
2. Überholen, Vorbeifahren usw. sind nicht möglich. Die zweite Laufkatze kann nur im minimalen Abstand eines Seilabschnittes hinter der ersten herfahren.
3. Es sind Betriebssituationen denkbar, in denen sich beide Laufkatzen sich gegenseitig blockieren.
4. Der Vorteil einer hohen Flexibilität, der ganz entscheidend das gewählte Modell prägt, ist nicht mehr gewährleistet.

Der Einsatz beider Laufkatzen wäre gewissermaßen nach Fahrplan zu gestalten. Die technischen Einschränkungen können natürlich durch Erweiterungen im Seilsystem, z. B. durch Umfahrweichen der Be- und Entladestationen beseitigt werden. Das würde eine Erweiterung des bestehenden Seilsystems erfordern.

Der Vorteil zweier Laufkatzen bestünde darin, dass diese abwechselnd zum Einsatz kommen könnten, um bspw. Wartungs- und ladezeitbedingte Stillstände zu überbrücken.

Die ermittelten Ergebnisse lassen Schlüsse auf eine rechnerisch optimierte Systemvariante zu, wobei eine Änderung nicht beeinflussbarer Einflussvariablen die Gültigkeit der Resultate in Frage stellt. Aufgrund der Berechnungen in einer simulierten Idealumgebung ist eine geringfügige Abweichung in der realen Umsetzung zu erwarten.

Kapitel 8

8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden verschiedene Konzepte veranschaulicht und behandelt, wobei diese kein endgültig angefertigtes oder bereits umgesetztes Design darstellen. Diese Konzepte sind konstruiert, um einen Überblick über neu eingeführte Ansätze für künftige Forschung zu geben. Entsprechend der Konzepte werden notwendige Änderungen wie beispielsweise Durchführung der kompletten FEM Berechnungen oder Größe der Layoutfläche vorgenommen. Schließlich wird eine neue Konzeption in der Praxis angewandt werden.

Die Ergebnisse einer genauen Lösung lassen sich feststellen, nachdem eine neue Anwendung konstruiert wurde.

Durch das im Zuge dieser Arbeit beschriebene Simulationsmodell wurde der Zusammenhang zwischen Laufkatzen-Geschwindigkeit und Systemdurchsatz untersucht. Der Zusammenhang besteht in einem proportionalen Verhältnis zwischen Laufkatzen-Geschwindigkeit und Systemdurchsatz. Die Darstellungen erlauben eine Übersicht über das Real-Life-Szenario in der Praxis. Simulations-Analysen und deren Ergebnisse ermöglichen eine umfassende Darstellung von Prozessen oder theoretischen Ideen und ermöglichen somit ein besseres Verständnis.

Die dargestellte Recherche besteht aus Annahmen des Real Life Falles. Berücksichtigt wurden diverse Anwendungen von Elektrohängebahnsystemen, wobei die meisten dieser Anwendungen für die Beförderung von schweren Lasten ausgelegt sind. Ausnahmen hierbei sind Elektrohängebahnsysteme, die für leichtere Lasten bis zu 20 kg bestimmt sind. Beim Erstellen des Simulationsmodells wurden systemtechnische Spezifikationen dieser Elektrohängebahnsysteme berücksichtigt.

Zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit existiert noch keine industrielle Anwendung der ultraleichten Elektrohängebahnsysteme. Trotz des Mangels an möglichen Untersuchungen sind „ungefähre“ Simulationsergebnisse in der Durchsatz-Analyse aufgezeigt.

In absehbarer Zukunft wird ein ultraleichtes Elektrohängebahnsystems als Real-World-Anwendung für eine kleine Teststrecke geschaffen. Hierzu wird die echte Fahrgeschwindigkeit gemäß dieser Anwendung bestimmt.

Ein solches Laufkatzen-System kann in verschiedenen Bereichen angewandt werden. Von Vorteil ist der autonome Transport von Gütern. Im Sinne eines Lean Management Ansatzes

könnten so beispielsweise Komponenten „Just-in-Time“ oder „Just-in-Sequence“ an Montage-Plätze geliefert werden. In allen Bereichen der Lagerlogistik sind autonom agierende Transportmöglichkeiten sinnvoll, wobei die hier betrachteten Konzepte lediglich Gegenstände bis zu einer Masse von nicht mehr als 20 kg effizient transportieren können. Für höhere Lasten müssten im Einzelfall gesonderte Berechnungen erfolgen, um sicherzustellen, dass die Konstruktion den Kraftanforderungen gerecht wird. Ultraleichte Elektrohängebahnsysteme kommen dort zum Einsatz, wo beteiligte Personen weite Strecken zur Verrichtung der Prozessschritte zurücklegen müssen.

Anhand der Simulationsergebnisse der untersuchten Anwendung wurde eine mögliche Laufkatzen-Geschwindigkeit von 1,2 m/s ermittelt, so dass der maximale Durchsatz erreicht werden kann. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen ist der Hinweis zulässig, dass das simulierte Lagersystem weiteres Optimierungspotential aufweist. Eine Möglichkeit der weiteren Optimierung kann in der Erhöhung der Fahrzeuggeschwindigkeit auf 1,2 m/s gesehen werden, da auf diese Weise der Durchsatz weiter erhöht werden kann. Eine Erhöhung der Laufkatzen-Geschwindigkeit über den Wert von 1,2 m/s, würde jedoch die Stabilität der Laufkatze negativ beeinflussen, so dass dieses Verhalten zu berücksichtigen bleibt.

Die Auslegung des hier untersuchten Systems ergibt sich aufgrund seiner Konstruktion als ultraleichtes Elektrohängebahnsystem für niedrige Belastungen durch relativ geringe Gewichte bis maximal 20 kg.

Unter der Nutzung von Seilen anstelle von Schienen, wäre eine komplette Umkonfiguration des Systems möglich. Somit ist dieses Modell wesentlich flexibler als Elektrohängebahnsysteme. Dies ist zugleich die wichtigste Eigenschaft des angebotenen Systems.

Die robuste Technik und das hohe Maß an Flexibilität sichern einen optimalen Ablauf und garantieren den produkt- und zielorientierten Materialfluss. Ultraleichte Elektrohängebahnsysteme können individuell auf die Anforderungen hinsichtlich Lastenträger-Fähigkeit und Geschwindigkeit eingestellt werden. Diese kostengünstige Alternative wird in Einrichtungen mit Stückgut oder leichteren Lasten verwendet. Die Effektivität des gesamten Systems wird durch die Fördertechnologie wesentlich beeinflusst.

Ziel dieser Arbeit war es, ein intelligentes und ultraleichtes Elektrohängebahnsystem zu entwerfen. Das ausgewählte Konzept ist dabei für leichte Lasten geeignet. Das entwickelte Konzept bewies sich nach Abschluss der Ergebnisse flexibler als herkömmliche Elektrohängebahnsysteme. Dies gründet in Teilen auf dem wenig komplex ausgestalteten Steuerungssystem der Laufkatze. Darüber hinaus kann der Richtungswechsel mit Hilfe einer

passiven Weiche erreicht werden, wodurch dieser während der Fahrt stattfinden kann. Auch wird beim Spurwechsel keine Hilfe externer Aktoren oder Hilfsmittel benötigt.

Der hohe Erfüllungsgrad der Anforderungen wird im Wesentlichen durch einen geringeren Aufwand bei der Konstruktion des ausgewählten Konzeptes erreicht.

Literaturverzeichnis

- [1] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 4441, Blatt 1: Hängefördertechnik - Elektrohängebahnen (EHB) - Eigenschaften und Anwendungsgebiete. Beuth Verlag, Berlin, 2012.
- [2] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 3643: Elektro-Hängebahn - Oberläufer, Traglastbereich 500 kg - Anforderungsprofil an ein kompatibles System. Beuth Verlag, Berlin, 1998.
- [3] ROFA: Hängefördertechnik, Elektrohängebahnen (EHB), 2014, <http://www.rofa-ag.de/de/moll-automatisierung/index.php?id=358,80&PHPSESSID=bfc6e3b058ae824f60317eb6a16ca15b272f1921>, letzter Zugriff: 18.09.2014.
- [4] Reinhart, G.: Innovative Prozesse und Systeme. Der Weg zu Flexibilität und Wandlungsfähigkeit. In: Milberg, J./Reinhart, G. (Hrsg.): Mit Schwung zum Aufschwung. Münchener Kolloquium 1997. Landsberg/Lench, 1997.
- [5] Milberg, J.: Unsere Stärken stärken: der Weg zu Wettbewerbsfähigkeit und Standortsicherung. In: Milberg, J.; Reinhart, G. (Hrsg.): Unsere Stärken stärken: der Weg zu Wettbewerbsfähigkeit und Standortsicherung. Landsberg/Lech: Moderne Industrie, 1994, S. 11-31. (Münchener Kolloquium, 1994).
- [6] Bullinger, H.-J.: Den Wandel fordern und fördern, VDI-Gesellschaft Fördertechnik, Materialfluß, Logistik: Den Wandel fordern und fördern. Tagung Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997 (VDI-Berichte 1325), ISBN: 3-18-091325-8, S. 21-39.
- [7] Rommel, G.; Brück, F.; Diedrichs, R.; Kempis, R.-D.; Kluge, J.: Einfach überlegen, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1993.
- [8] Reinhart, G.; Koch, M. R.: Competition and Cooperation in Autonomous Manufacturing Systems. 28th International Symposium on Automotive Technology and Automation, Automotive Automation Limited, Stuttgart, Croydon, 1995, S. 263-275.

- [9] Günthner, W. A.; Allgayer, F.: Dynamische Produktionsstrukturen durch flexible Materialflußsysteme. In: Logistik im Unternehmen 11 (1997) Nr. 10, S. 28-30.
- [10] tenHompel, M.; Schmidt, T.; Nagel, L.: Materialflusssysteme – Förder- und Lagertechnik. Springer Verlag, Heidelberg, 2007.
- [11] Günthner, W. A.: Materialfluss und Logistik. Vorlesungsskriptum: fml Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, TU München, 2006.
- [12] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 2411: Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen. Beuth Verlag, Berlin, 1970.
- [13] Günthner, W. A.; Wilke, M.; Heinecker, M.: Abschlussbericht – Modulare Materialflusssysteme für wandelbare Fabrikstrukturen, 2006, http://www.fml.mw.tum.de/fml/images/Publikationen/Abschlussbericht_14021_Modulare_Materialflusssysteme.pdf, letzter Zugriff: 22.09.2014.
- [14] Bullinger, H.J.; Lung, M.M.: Planung der Materialbereitstellung in der Montage. Stuttgart: Teubner Verlag, Stuttgart, 1994.
- [15] Blessing, S.: Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen, Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München, 1999.
- [16] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen, Begriffe, Definitionen, Symbole. Beuth Verlag, Berlin, 1982.
- [17] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 3628: Automatisierte Materialflußsysteme – Schnittstellen zwischen den Funktionsebenen im Automatisierungsmodell, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [18] Haller, M.: Bewertung der Flexibilität automatisierter Materialflußsysteme der variantenreichen Großserienproduktion, Herbert Utz Verlag, München, 2000.
- [19] REFA (Hrsg.): Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme, Carl Hanser Verlag, München, 1990.

- [20] Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 19233: Automat, Automatisierung-Begriffe, Beuth Verlag, Berlin, 1972.
- [21] Mehldau M.: Beitrag zur Teilautomatisierung des Materialfluß als Instrument logistischer Systemgestaltung, in Schriftenreihe BVL, Hersg. Baumgarten H. und Ihde G.B., Dissertation TU Berlin, Bereich Logistik, Huss Verlag, München, 1991.
- [22] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 2690: Material- und Datenfluß im Bereich von automatisierten Hochregallagern, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [23] Jünemann R., Beyer, A.: Steuerung von Materialfluss- und Logistiksystemen – Informations- und Steuerungssysteme, Automatisierungstechnik, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1998.
- [24] Cox, B.: Determining economic levels of automation by using a hierarchy of productivity ratios techniques. Proceedings of 7th International Conference on Automation in Warehousing, Norcross/Georgia, 1986.
- [25] Günthner, W. A.: Materialfluss und Logistik, Vorlesungsskriptum: fml Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, TU München, 2000.
- [26] Pfohl, H.-C.: Logistik-Management, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- [27] Fleckenstein, S.: Flexible Materialflußsteuerungen. In: VDI (Hrsg.): Schnell - flexibel- kostengünstig. 6. Jahrestagung Informationstechnologie für den Materialfluß. VDI-Bericht 1395, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
- [28] Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.; Hirschberg, A.; Selke, C.: Wandel – Bedrohung oder Chance?. Änderungen vermeiden oder beherrschen, das ist die entscheidende Frage im Management 68, 1999, S. 20-24.
- [29] Handrich, W.: Flexible, flurfreie Materialflusstechnik für dynamische Produktionsstrukturen, Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München, 2001.
- [30] BMFT (Hrsg): Strategien für die Produktion im 21. Jahrhundert, Stuttgart, 1994.

- [31] Gollos, M.: Produktionssysteme und Materialfluß schnell und kostengünstig an kurze Produktlebenszyklen anpassen. In: Logistik im Unternehmen 1, Nr. 10, S. 52-53, 1999.
- [32] Wiendahl, H.-P.: Analyse und Neuordnung der Fabrik, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1991.
- [33] A.T. Kearney. Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI-Bericht 660, Düsseldorf, 1994.
- [34] Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden zur systematischen Fabrikplanung, Hanser Verlag, München, 1984.
- [35] Heinecker, M.: Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme, 2006,
http://www.fml.mw.tum.de/fml/images/Publikationen/Diss_Markus_Heinecker_Web.pdf, letzter Zugriff: 24.09.2014.
- [36] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [37] Scheffler, M.: Einführung in die Fördertechnik: Fördermittel-Funktion und Einsatz, 2.Aufl., Technik-Tabellen-Verlag, Darmstadt, 1973
- [38] Böge, A.: Technische Mechanik: Statik-Dynamik-Fluidmechanik-Festigkeitslehre, 22. Aufl., Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [39] Schulte, G.: Material- und Logistikmanagement, 2. Auflage, Oldenbourg Vahlen Verlag, München, 2001
- [40] Jünemann, R.; Thorsten, S.: Materialflußsysteme – Systemtechnische Grundlagen, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2000.

- [41] Friedrich, A.: “Hybrides Vorgehensmodell der innerbetrieblichen Fördersystemwahl-Entwicklung und Überprüfung eines Modells zur Unterstützung von Planungs- und Investitionsentscheidungen für Fördersysteme im betriebsinternen Materialfluss kleiner und mittelständischer Unternehmen”, 1.Aufl. Hamburg, 2013.
- [42] Plümer, T.: Logistik und Produktion, Beuth: Oldenbourg Verlag, 2003.
- [43] Kurth, F.; Pajer G.; Kuhnt H.: Stetigförderer 4. Auflage (Buchreihe Fördertechnik), VEB Verlag, Berlin, 1983
- [44] Koch, S.: Logistik: Eine Einführung in Ökonomie und Nachhaltigkeit, 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2012.
- [45] Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh Michael F.: Individualisierte Produkte – Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion, Springer Verlag, Berlin, 2006.
- [46] Klaus, P.; Krieger, W.; Krupp, M.: Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse, Springer-Verlag, Berlin. 2012.
- [47] Sängler K.: Fördertechnik – Stetigförderer, Diplomica Verlag, München, 1998
- [48] Böge, A.: Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, Vieweg + Teubner Verlag, 2004
- [49] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik, Vieweg Teubner Verlag , Wiesbaden, 2009
- [50] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 2345: Hängebahnen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1987.
- [51] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 2339: Zielsteuerungen für Förder- und Materialflusssysteme, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [52] Balters, D.; Caninenberg, W.: Elektrohängebahn-Fahrzeuge - Genaue Steuerung ins Ziel. In: Packung und Transport 20 (1988), No.1/2, S. 74-77, 1988.

- [53] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 4422: Elektropalettenbahn (EPB) und Elektrotragbahn (ETB), VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000.
- [54] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (Hrsg.): ZH 1/72: Sicherheitsregeln für Schienenhängbahnen, Carl Heymanns Verlag, Köln, 1983.
- [55] BG Maschinenbau- und Metall-Berufsgenossenschaft: BGV D30 Unfallverhütungsvorschrift: Schienenbahnen, Carl Heymanns Verlag, Köln, 1998.
- [56] Fachausschuss „Förder- und Lagertechnik“ der BGZ (Hrsg.): Sicherheitsregeln für Vertikal-Umsetzeinrichtungen, ZH1/159, April 1985, <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/zh159.pdf>, letzter Zugriff: 29.09.2014.
- [57] Irrgang, R.; Maienschein, B.: Flurfreie Fördertechniken: Flurfrei und nahezu universell einsetzbar. In: MM Logistik- das Portal für Logistikerscheider, 18.11.2010, <http://www.mm-logistik.vogel.de/foerdertechnik/articles/292570/index3.html>, letzter Zugriff: 29.09.2014.
- [58] Materialfluss (Hrsg.): Alles andere als starr, 19.12.2009, <http://www.materialfluss.de/forder-und-hebetechnik/ehb/alles-andere-als-starr/>, letzter Zugriff: 29.09.2014.
- [59] Käppner, M.: Computergestützte Steuerungs- und Positionierverfahren für Elektrohängbahnsysteme, Verlag Praxiswissen, Dortmund, 1995.
- [60] Bracht, U.; Janisch, H.: Literaturübersicht Fabrikplanung. Beiträge aus Fachzeitschriften des Jahres 1988, Teil 1, https://www.imab.tu-clausthal.de/fileadmin/homes/mf_imab/dateien/veroeffentlichungen/25.pdf, letzter Zugriff: 29.09.2014.
- [61] Böttner G.: “Technische Berichte 18: Förderanlagen für die Automobilindustrie”, S. 361–372, Neuhausen, 1986.
- [62] Broggi M.: “Sonderheft Lagertechnik: Fahrerlos vom Lager bis in die Produktion”, S. 80–85, 1987.
- [63] Pfeifer D.: “Flexible Automatisierung im Automobilbau Beispiel: Omega-Fertigung Praxis der Fertigungsautomatisierung”, Bad Soden, 1987.

- [64] Knopf E.: "Industrie-Anzeiger: Elektrohängebahn verbindet Bearbeitungsmaschinen", S. 60–62, 1988.
- [65] Kappeler D.: "Sonderausgabe Fördertechnik: Die Endmontage ist nicht das Schlußlicht", S. 48–53, 1990.
- [66] Lück J.: "Schweizer Maschinenmarkt: Taktfreie Einzelarbeitsplätze durch Einschienen- Hängebahn", S. 18–22, 1978.
- [67] Giessler H.: " Ein System wird zum Standard Logistik im Unternehmen ",S. 46, 1987.
- [68] Fraissi H.: "Elektrohängebahn: Schneller als Power + Free Materialfluß", S. 42–44, 1979.
- [69] Eggenstein F.; Pater H.G.; Wetzel E.: "Elektrohängebahnen, Technik, und Entwicklung", f & h-fördern und heben 32, S.863, 1982.
- [70] Schieleit, J.: "Mobile Roboter in Elektrohängebahnsystemen", Dissertation, Universität Dortmund, TÜV Rheinland Verlag, 1989.
- [71] Kunzmann M.: "Ein konsequent wirtschaftliches Containertransportsystem", Transmatik 85. Kongress "Neu Technologien im Materialfluß und in der Fördertechnik", Universität Karlsruhe, S. 15-23, 1985.
- [72] Lück J.: "Haltestelle Roboter: Elektrohängebahnen verketteten Roboter montagen", S. 23–30, 1987.
- [73] Krug J.: "Automatikkammer für fertigungsgerechte Flexibilität, -verketteter Materialfluß für Druckzylinder, Maschine und Werkzeug ", S. 28–34, 1989.
- [74] Uttscheid, G.; Rosenheim, D.: "Patentamt München: Elektrohängebahn", Nr: 0151965-A2, 1985.
- [75] Deutsches Patent- und Markenamt (Hrsg.): Elektrohängebahnen. Online verfügbar unter: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=einsteiger>, Stichwort „Elektrohängebahn“. Duisburg. 2014, letzter Zugriff: 01.03.2014.

- [76] Fuest, B.; Gassmann, M.; Hegmann, G.; Nicolai, B.: „Deutsche Post plant Drohneneinsatz wie Amazon“. In: Die Welt: Logistik, 02.12.2013, <http://www.welt.de/wirtschaft/article122487981/Deutsche-Post-plant-Drohneneinsatz-wie-Amazon.html>, letzter Zugriff: 11.03.2014.
- [77] n-tv.de: "Paketkopter" über der Konzernzentrale. Deutsche Post testet Lieferdrohne“, 09.12.2013. Online verfügbar unter: <http://www.n-tv.de/wirtschaft/Deutsche-Post-testet-Lieferdrohne-article11882201.html>, letzter Zugriff: 11.03.2014.
- [78] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg.): Kurzinformation über die Nutzung von unbemannten Luftfahrtsystemen. Bonn, 2013, http://www.brd.nrw.de/verkehr/flugplaetze_flugbetrieb/service/Broschuere-BMVBS-Oktober-2013.pdf, letzter Zugriff: 17.03.2014.
- [79] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [80] Aylak, B. L.; Cantepe, M.; Ruzayqat, M.; Noche, B.: A Developed Ultra-light Overhead Conveyor System for Logistics Applications. In: Kersten, W. (Hrsg.): Pioneering Solutions in Supply Chain Performance Management. Köln: Josef Eul Verlag, S. 275-288, 2013.
- [81] ZEITLAUF GmbH Antriebstechnik & Co KG: Permanentmagnet DC-Motor mit Winkelgetriebe EtaCrown 75, Lauf a. d. Pegnitz, 2014, https://www.zeitlauf.de/nc/online_shop_produktauswahl/detailansicht/produkte/permanentmagnet-dc-motor-mit-winkelgetriebe-etacrown-75-1.html, letzter Zugriff: 13.10.2014.
- [82] Europäisches Parlament (Hrsg.): Parlament stimmt für Verbot von Cadmium in Batterien für Elektrowerkzeuge, Pressemitteilung vom 10.10.2003, Brüssel, 2003, <http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/content/20131004IPR21519/html/Parlament-stimmt-f%C3%BCr-Verbot-von-Cadmium-in-Batterien-f%C3%BCr-Elektrowerkzeuge>, letzter Zugriff: 13.10.2014.

- [83] LIROS GmbH: Gesamtkatalog, Berg, S. 6ff., 2013.
- [84] RN-Wissen.de: Microcontroller, 2012, <http://rn-wissen.de/wiki/index.php/Microcontroller>, letzter Zugriff: 13.10.2014.
- [85] Lechner, T.: CNC Programmierung mit G-Code. In: CNC Blog, 21.12.2013, <http://www.precifast.de/cnc-programmierung-mit-g-code/>, letzter Zugriff: 13.10.2014.
- [86] Steinke, P.: Finite-Elemente-Methode-Rechnergestützte Einführung, 1.Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2004
- [87] Mathiak, F. U.: Die Methode der finiten Elemente (FEM). Einführung und Grundlagen, Neubrandenburg, 2010, http://www.mechanik-info.de/dokumente/Skript_FEM.pdf, letzter Zugriff: 29.09.2014.
- [88] Weck, M.; Brecher C.: Werkzeugmaschinen 3: Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose, 6.Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2006.
- [89] Maerz L.; H. Krug, O. Rose, G. Weigert: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2011.
- [90] Ulbrich A.S: “Simulationsgestützte Grobplanung von Kommissioniersystemen”, Zugl.: München, Techn. Univ, Diss, München, 2010.
- [91] Aylak, B. L.; Noche, B.: Ultra-Light Overhead Conveyor Systems for Logistics Applications. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 79, 7(7), 2013, S. 1035 –1037.
- [92] Neumann G.: Simulation Education in Logistics: Case Studies in a Virtual Learning Environment, Magdeburg, 2008. URL:http://www.scs-europe.net/conf/ecms2008/ecms200820CD/ecms200820pdf/lt-ECMS2008_0116.pdf, letzter Zugriff: 13.10.2014.