

# **Untersuchung des Schlupfverhaltens von Reibrollenantrieben in Elektrohängebahnen (EHB)**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

von der Fakultät Maschinenbau  
der Technischen Universität Dortmund  
genehmigte Dissertation

**Dipl.-Ing. Manuel Wißuwa**

geb. in Zschopau

Tag der mündlichen Prüfung: 28.02.2025

1. Gutachter: Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Künne
2. Gutachter: Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Noche

Dortmund, 2025



## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Maschinenelemente der Technischen Universität Dortmund. Dieser Arbeit ist das Forschungsprojekt „Untersuchungen der Umsetzbarkeit in Bezug auf Flexibilität, Anpassungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit von ultraleichten Hängebahnen“ vorausgegangen. Hierbei wurde ein neuartiges Elektrohängebahnsystem für den innerbetrieblichen Transport kleiner Lasten bis 20 kg entwickelt.

Die Entwicklung des Elektrohängebahnsystems erfolgte im Rahmen des AiF IGF-Projektes Nummer 19265 und bildet die Grundlage für die Schlupfversuche und die Auswertungsfahrten in dieser Arbeit. Das Elektrohängebahnsystem wurde in der Vergangenheit bereits teilweise im Abschlussbericht [WBB+19] und auf dem 15. WGTL Fachkolloquium 2019 in Rostock [BWK+19] vorgestellt.

Ein besonderer Dank gebührt dem Fördermittelgeber Bundesvereinigung Logistik (BVL e.V.) für die Förderung des Projektes und dem Projektpartner Lehrstuhl Transportsysteme und -logistik der Universität Duisburg-Essen für die gute Zusammenarbeit. Das Kooperationsprojekt wurde an der Universität Duisburg-Essen und der Technischen Universität Dortmund im Zeitraum 01.01.2017 bis 31.07.2019 durchgeführt.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei allen Personen bedanken, die mich bei der Anfertigung dieser Dissertation unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Künne, dem Leiter des Fachgebiets Maschinenelemente, für seine fachliche und persönliche Unterstützung. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Danke für das stets offene Ohr und die wertvolle Unterstützung. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Noche für die Übernahme des Zweitgutachtens und die aufmerksame Durchsicht meiner Arbeit bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralph Sievering und Herrn Prof. Dr. Tobias Haertel danke ich für ihre Mitwirkung in der Prüfungskommission und den wertschätzenden und freundlichen Umgang.

Ein herzlicher Dank geht an meine Kollegen und Kolleginnen vom Fachgebiet Maschinenelemente für die konstruktive Zusammenarbeit. Ebenso danke ich allen studentischen Hilfskräften und Studienarbeitern, die einen wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben, für ihre große Unterstützung bei der Umsetzung der Forschungsprojekte.

Schließlich möchte ich meiner Frau, meinen Kindern und meiner Familie meinen tiefsten Dank aussprechen. Sie haben mich während des gesamten Studiums und in der Zeit der Promotion stets unterstützt, mir Rückhalt gegeben und mich in jeder Phase ermutigt, weiterzumachen.

## Zusammenfassung

Die weltweite Globalisierung und der zunehmende Kostendruck in der Logistik zwingen die Unternehmen, ihre internen Transportprozesse zu optimieren. Die Transportkosten machen oft einen erheblichen Teil der Logistikkosten aus und beeinflussen somit direkt die Rentabilität. Die Optimierung des innerbetrieblichen Transports wird daher immer wichtiger. Insbesondere bei geringen Mengen besteht diesbezüglich entsprechendes Optimierungspotential, da sich mit bisherigen Technologien eine Automatisierung wirtschaftlich nicht rentiert hätte. Vollautomatische und autonome Elektrohängebahnen bieten eine Möglichkeit, diese Lücke zu schließen, indem sie kleine Güter kostengünstig und effizient über längere Strecken transportieren.

Der Stand der Technik zeigt, dass autonome, selbstfahrende und selbsttagierende Elektrohängebahnsysteme für kleine Lasten im Bereich der innerbetrieblichen Logistik nicht zu wirtschaftlich vertretbaren Preisen auf dem Markt verfügbar sind. Ziel dieser Arbeit ist es gewesen, die Machbarkeit des Einsatzes des Elektrohängebahnsystems unter verschiedenen Bedingungen zu demonstrieren, die Grenzen des Systems zu ermitteln, die Wirtschaftlichkeit zu untersuchen und eine Grundlage für zukünftige Entwicklungsarbeiten aufzuzeigen.

In den durchgeführten Versuchen wird die grundsätzliche Machbarkeit des Elektrohängebahnsystems unter verschiedenen Bedingungen geprüft. Dazu gehören Testfahrten auf verschiedenen Stahlprofilschienen und einem Polyesterseil unter Berücksichtigung von Steigungen, Kurven und Weichen in Rundkursversuchen. Weiterhin sollen Schlupfversuche mit drei verschiedenen Laufrad- und Schienenkonfigurationen (Rechteckprofil, Flachprofil und Seil) durchgeführt und detaillierte Messwerte ermittelt werden. Die Auswertung dieser Versuche konzentriert sich auf die Berechnung des Schlupfes und den Vergleich dieser Werte. Daraus können Rückschlüsse gezogen werden, welche Steigungen befahren werden können und welche Laufradkonfigurationen am besten geeignet sind. Darüber hinaus werden Steigungsversuche am vertikalen Seil durchgeführt, bei denen Faktoren wie Umschlingungswinkel, Seilspannung und verschiedene Gewichtsbelastungen berücksichtigt werden. Ziel dieser Versuche ist es, die Machbarkeit verschiedener Kombinationen der eben genannten Einflussfaktoren zu ermitteln und praktische Empfehlungen für deren Einsatz zu geben.

Die Ergebnisse der Versuche belegen die generelle Machbarkeit des Einsatzes des Elektrohängebahnsystems in der innerbetrieblichen Logistik. Die Grenzen des Systems liegen unter anderem im Bereich der Steigungswinkel und dem daraus resultierenden instabilen Fahrverhalten. Die wirtschaftliche Betrachtung bestätigt zudem eine attraktive Kostenstruktur für den betrieblichen Einsatz bei gleichzeitig hoher Flexibilität in der Streckenführung.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit sind die ersten Schritte für die Weiterentwicklung des Elektrohängebahnsystems und dienen als Grundlage für zukünftige Entwicklungsarbeiten.

## **Abstract**

Globalisation and the increasing cost pressure in logistics are forcing companies to optimise their internal transport processes. Transport costs often account for a significant proportion of logistics costs and thus have a direct impact on profitability. Optimising internal transport is therefore becoming increasingly important. There is particular potential for optimisation in this regard for small quantities, as automation would not have been economically viable with previous technologies. Fully automated and autonomous electric monorail systems offer a way to close this gap by transporting small goods over long distances in a cost-effective and efficient manner.

The state of the art shows that autonomous, self-propelled and self-acting electric monorail systems for small loads in the field of internal logistics are not available on the market at economically justifiable prices. The aim of this work was to demonstrate the feasibility of using the electric monorail system under various conditions, to determine the limits of the system, to investigate its economic efficiency and to provide a basis for future development work.

The experiments carried out will test the fundamental feasibility of the electric monorail system under various conditions. These include test runs on various steel profile rails and a polyester rope, taking into account gradients, curves and points in round-trip experiments. Furthermore, slip experiments with three different wheel and rail configurations (rectangular profile, flat profile and rope) are to be carried out and detailed measurements taken. The evaluation of these tests will focus on calculating the slip and comparing these values. Conclusions can be drawn from this as to which gradients can be travelled on and which wheel configurations are best suited. In addition, gradient tests will be carried out on the vertical rope, taking into account factors such as the angle of contact, rope tension and various weight loads. The aim of these tests is to determine the feasibility of various combinations of the aforementioned influencing factors and to provide practical recommendations for their use.

The results of the tests prove the general feasibility of using the electric monorail system in internal logistics. The limits of the system lie, among other things, in the area of the gradient angle and the resulting unstable driving behaviour. The economic analysis also confirms an attractive cost structure for operational use, while at the same time offering a high degree of flexibility in terms of routing.

The results and findings of this work are the first steps towards the further development of the electric monorail system and serve as a basis for future development work.

## Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis .....	IV
Abbildungsverzeichnis .....	VI
Tabellenverzeichnis .....	IX
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik.....</b>	<b>3</b>
2.1 Einordnung des zu entwickelnden Systems.....	3
2.2 Vorarbeiten im Rahmen der Dissertation von Batic Aylak .....	7
2.3 Schienenbahnen mit mitgeführter Antriebseinheit .....	10
2.3.1 <i>Palmersche</i> Einschienenbahn .....	10
2.3.2 <i>Lartigue</i> -Einschienenbahn.....	11
2.3.3 Wuppertaler Schwebebahn .....	12
2.3.4 H-Bahn und Skytrain .....	13
2.3.5 Ottobahn .....	15
2.3.6 Doppelmayr Monorack.....	16
2.3.7 Magal Security RoboGuard.....	18
2.3.8 GPI-System Omega .....	19
2.3.9 Einschienenbahnen für hohe Belastungen.....	20
2.3.10 Sonstige Einschienenbahnen .....	21
2.4 Schienenbahnen ohne mitgeführte Antriebseinheit .....	21
2.4.1 Futurail Wäschetransport.....	21
2.4.2 GPI „Power and Free“-Systeme.....	22
2.4.3 OCS System 150.....	23
2.5 Seilbahnen.....	24
2.5.1 Voraussetzungen.....	24
2.5.2 Einseilbahn .....	24
2.5.3 Zweiseilbahn.....	27
2.5.4 Schleppaufzug .....	28
2.5.5 Drohnen als Ersatz für die EHB .....	29
2.6 Wertung des Standes der Technik bei Schienen- und Seilbahnen.....	32
<b>3 Problemstellung und Zielsetzung .....</b>	<b>33</b>
3.1 Problemstellung .....	33
3.2 Zielsetzung und Vorgehen .....	34

---

<b>4</b>	<b>Versuchsaufbau.....</b>	<b>35</b>
4.1	Fahrbahn, statisch, oval .....	35
4.1.1	Geraden - gleichmäßige Fahrt .....	35
4.1.2	Kurven .....	39
4.1.3	Berg- und Talfahrt .....	40
4.1.4	Übergänge.....	41
4.1.5	Rundkurs - Versuchsstrecke .....	43
4.2	Laufkatze .....	45
4.3	Weitere Fahrbahnkomponenten.....	52
4.3.1	Stützen .....	52
4.3.2	Klemmen-Halterung .....	54
4.3.3	Baukastensystem Schiene.....	55
4.4	Realisierte Weiche .....	56
4.5	Akku-Wechselstation.....	59
4.6	Seilbahn-Versuchsträger .....	63
<b>5</b>	<b>Untersuchung der Reibverhältnisse an der Elektrohängebahn .....</b>	<b>66</b>
5.1	Coulombsche Reibung.....	66
5.2	Seilreibung .....	68
5.3	Schlupf.....	69
5.4	Laufrollen .....	72
5.5	Rundkursversuche.....	74
5.5.1	Versuchsaufbau Rundkursversuche.....	75
5.5.2	Versuchsdurchführung Rundkursversuche.....	76
5.5.3	Versuchsauswertung Rundkursversuche .....	77
5.6	Steigungsversuche am Rechteckrohr .....	83
5.6.1	Versuchsaufbau Rechteckrohr .....	84
5.6.2	Versuchsdurchführung Rechteckrohr .....	85
5.6.3	Versuchsauswertung Rechteckrohr .....	85
5.7	Steigungsversuche am Flachprofil.....	89
5.7.1	Versuchsaufbau Flachprofil.....	90
5.7.2	Versuchsdurchführung Flachprofil.....	91
5.7.3	Versuchsauswertung Flachprofil .....	91
5.8	Steigungsversuche am waagerechten Seil .....	92
5.8.1	Versuchsaufbau waagerechtes Seil.....	93
5.8.2	Versuchsdurchführung waagerechtes Seil.....	95
5.8.3	Versuchsauswertung waagerechtes Seil .....	95
5.9	Zusammenfassung und Fazit Steigungsversuche .....	97

---

<b>6</b>	<b>Untersuchung der Reibverhältnisse am senkrechten Seil.....</b>	<b>103</b>
6.1	Versuchsaufbau senkrechtes Seil.....	103
6.2	Versuchsdurchführung senkrechtes Seil.....	109
6.3	Versuchsauswertung senkrechtes Seil .....	111
6.3.1	Einfluss der Drehzahl und der Zuladung auf den Schlupf.....	111
6.3.2	Einfluss des Umschlingungswinkels auf den Schlupf.....	115
6.3.3	Einfluss der Seilvorspannung auf den Schlupf.....	115
6.4	Zusammenfassung und Fazit Steigungsversuche senkrechtes Seil .....	117
6.5	Auffälligkeiten während der Versuchsdurchführung .....	119
<b>7</b>	<b>Wirtschaftliche Bedeutung.....</b>	<b>124</b>
7.1	Elektrobahn Komponenten .....	124
7.2	Demonstrationsstrecke.....	127
7.3	Zusammenfassung der wirtschaftlichen Betrachtung .....	130
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>134</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>XVII</b>

## Symbolverzeichnis

### Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Definition
$a$	mm	Abstand
$b$	mm	Abstand
$B$	mm	Breite
$D$	mm	Durchmesser
$e$		Eulersche Zahl
$E$	N/mm <sup>2</sup>	E-Modul
$f$	mm	Durchbiegung
$F$	N	Kraft
$F_{GR}$	N	Gleitreibungskraft
$F_N$	N	Normalkraft
$F_{RR}$	N	Rollreibungskraft
$h$	mm	Höhe
$H$	mm	Höhe
$I$	mm <sup>4</sup>	Flächenträgheitsmoment
$K$	€	Kosten
$l$	mm	Länge
$l_{ist}$	mm	Ist-Strecke
$l_{real}$	mm	reale Strecke
$l_{soll}$	mm	Soll-Strecke
$l_{theor}$	mm	theoretische Strecke
$n$	min <sup>-1</sup>	Drehzahl
$\mu_{GR}$		Gleitreibungskoeffizient
$\mu_{HR}$		Haftreibungskoeffizient
$\mu_{RR}$		Rollreibungskoeffizient
$r$	mm	Radius
$r_{dyn}$	mm	dynamischer Reifenradius
$s$		Schlupf
$S_{1/2}$	N	Seilkraft
$U$	mm	Umfang
$\alpha$	°	Winkel
$\beta$	°	Winkel
$\gamma$	°	Winkel
$\delta$	°	Winkel
$v$	m/s	Fahrgeschwindigkeit
$\omega$	1/s	Winkelgeschwindigkeit

**Abkürzungen**

<b>Zeichen</b>	<b>Definition</b>
A	Ampere
Abb.	Abbildung
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
CAD	Computer Aided Design
DC	Direct Current - Gleichstrom
EHB	Elektrohängebahn
g	Gramm
GPS	Global Positioning System
Hz	Hertz
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
kg	Kilogramm
KI	Künstliche Intelligenz
km	Kilometer
LiPo	Lithium-Polymer
m	Meter
m	Masse
Max. / max.	Maximum / maximal
min	Minute
Min. / min.	Minimum / minimal
mm	Millimeter
N	Newton
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
Pos.	Position
RFID	Radio-Frequency Identification
s	Sekunde
Spannweite	Streuungsmaß in der Statistik
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
Tab.	Tabelle
TU	Technische Universität
uEHB	Ultraleichte Elektrohängebahn
UV	Ultraviolett
V	Volt
W	Watt
Wi-Fi	Wireless Local Area Network

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Einordnung der Hängebahnen in die Transportmittel in der Logistik	3
Abb. 2.2	Einteilung der Stetigförderer	4
Abb. 2.3	Einteilung der Unstetigförderer	5
Abb. 2.4	Elektrohängebahn der Firma Eisenmann	7
Abb. 2.5	links: Laufkatze mit Steuereinheit; rechts: Führungsrolle der Laufkatze	8
Abb. 2.6	Netzwerk mit den Stationen 1 - 4 und die seitlich angelegte Ladestation	9
Abb. 2.7	<i>Palmersche</i> Einschienenbahn, Bild aus der Patentschrift	10
Abb. 2.8	<i>Palmersche</i> Bahn 1821	11
Abb. 2.9	<i>Lartigue</i> -Einschienenbahn	12
Abb. 2.10	Wuppertaler Schwebebahn	13
Abb. 2.11	H-Bahn in Dortmund	14
Abb. 2.12	SkyTrain in Düsseldorf	14
Abb. 2.13	Ottobahn: links u. rechts Personen- u. Gütertransport; Mitte: Fahrgestell	15
Abb. 2.14	Doppelmayr Benzin-Monorack	17
Abb. 2.15	Doppelmayr Elektro-Monorack	17
Abb. 2.16	„Roboter“ (Laufkatze) des Systems Magal Security RoboGuard	19
Abb. 2.17	GPI-System Omega	20
Abb. 2.18	Elektrohängebahn mit bis zu 10.000 kg Nutzlast	20
Abb. 2.19	Futurail-System	22
Abb. 2.20	Power & Free Systeme von GPI	23
Abb. 2.21	OCS 150 Hängebahnsystem	24
Abb. 2.22	Wyssen Einseilbahn	26
Abb. 2.23	Seilführung bei der Wyssen Einseilbahn	26
Abb. 2.24	WOODLINER der Firma Konrad Forsttechnik GmbH	27
Abb. 2.25	Dreiseilumlaufbahn der Firma Leitner und Laufwerk	28
Abb. 2.26	Beispiel eines Schleppaufzuges, Skilift der Firma Doppelmayr	29
Abb. 2.27	Drohne am Thyssenkrupp Steel Werk in Duisburg	31
Abb. 4.1	rechteckiges Hohlprofil	36
Abb. 4.2	Stahl Rechteckrohr	36
Abb. 4.3	Durchbiegung der 6 m und 12 m Schiene	36
Abb. 4.4	Seilfahrt der Elektrohängebahn	37
Abb. 4.5	Kräfte am Seil	38
Abb. 4.6	Kurvensegment	40
Abb. 4.7	Schienensegment Berg- und Talfahrt links; rechts vereinfachte Skizze	40
Abb. 4.8	Übergang Geraden- und Kurvensegment	41
Abb. 4.9	Übergang Seil-Schiene	41
Abb. 4.10	Seilspannvorrichtung und -befestigung	41
Abb. 4.11	Neue Seilführung, -spannvorrichtung und -befestigung	42
Abb. 4.12	Seilverlauf an Schienenelement Umlenkung und Gewichte-Halterung	42

Abb. 4.13	Versuchsstand auf der LogiMAT, Länge = 3.200 mm, Breite = 2.200 mm	43
Abb. 4.14	links: Rundkurs EHB an der TU Dortmund; rechts: Skizze Rundkurs	44
Abb. 4.15	Laufkatze Version 1	45
Abb. 4.16	Laufkatze Version 2	45
Abb. 4.17	Laufkatze Version 3.1	45
Abb. 4.18	Laufkatze	46
Abb. 4.19	Antriebsrad Elektrohängebahn	47
Abb. 4.20	Führungsrollen an der Laufkatze	47
Abb. 4.21	Berg- und Talfahrt: Ausgleich Schräglage	48
Abb. 4.22	Akku-Box für das automatische Akku-Wechselsystem	48
Abb. 4.23	Schwenkmechanismus an der Bahn	49
Abb. 4.24	Seilbahn-App - MIT App Inventor 2	50
Abb. 4.25	Funktionsdiagramm Laufkatze-Variante 3.2	51
Abb. 4.26	Nanotec DC-Motor (links) und Apex-Getriebe (rechts)	52
Abb. 4.27	Elektrohängebahn-Stütze an der TU Dortmund	53
Abb. 4.28	Verbindungsstück Schiene	53
Abb. 4.29	Klemm-Lösung für bestehende Hallenstrukturen	54
Abb. 4.30	beispielhafte Transportstrecke	55
Abb. 4.31	Schema Weichendurchfahrt	56
Abb. 4.32	Zwei-Wege-Weiche für das Elektrohängebahn-System	57
Abb. 4.33	Weiche und Weichendurchfahrt der Laufkatze	59
Abb. 4.34	Übersicht Akku-Wechselstation	60
Abb. 4.35	Aufbau Wechselmechanismus	60
Abb. 4.36	Ablauf Akku-Wechsel	62
Abb. 4.37	Seilbahn-Versuchsträger	64
Abb. 4.38	Bosch Gleichstrommotor F006 B20 102	65
Abb. 5.1	Seilkräfte am zylindrischen Körper	69
Abb. 5.2	Kraftschluss-Schlupf-Funktion	70
Abb. 5.3	Schlupf am Beispiel Reifen und Straße	71
Abb. 5.4	Antriebsrad EHB, links mit Beschichtung, rechts Rohteil	73
Abb. 5.5	Rolle AKU, Clarholz und GARANT (v. l. n. r.)	74
Abb. 5.6	Rolle AKU links und Rolle Clarholz rechts	74
Abb. 5.7	Messaufbau mit Winkelscheibe und Markierungslaser	75
Abb. 5.8	Drehzahlverlauf bei 80 % Leistung und 20 kg Nutzlast	77
Abb. 5.9	Drehzahlverlauf bei 50 % Leistung und 0 kg Nutzlast	77
Abb. 5.10	Antriebsrad auf Rechteckrohr links; Führungsrollen rechts	83
Abb. 5.11	Versuchsaufbau Profilschiene	84
Abb. 5.12	Schlupf am Rechteckrohr Rad AKU mit 80 % Leistung	86
Abb. 5.13	Schlupf am Rechteckrohr Rad AKU mit 50 % Leistung	87
Abb. 5.14	Schlupf am Rechteckrohr Rad Clarholz mit 80 % Leistung	87
Abb. 5.15	Schlupf am Rechteckrohr Rad Clarholz mit 50 % Leistung	87
Abb. 5.16	Schlupf am Rechteckrohr Rad GARANT mit 80 % Leistung	88
Abb. 5.17	Schlupf am Rechteckrohr Rad GARANT mit 50 % Leistung	88

Abb. 5.18	Schlupf am Rechteckrohr mit 80 % Leistung und 10 kg Beladung	89
Abb. 5.19	Schlupf am Rechteckrohr mit 50 % Leistung und 10 kg Beladung	89
Abb. 5.20	Versuchsaufbau Steigungsversuche Rechteckrohr und Flachprofil	90
Abb. 5.21	Schlupf am Flachprofil mit 50 % Leistung und 10 kg Beladung	92
Abb. 5.22	Versuchsaufbau Seilfahrt	93
Abb. 5.23	Skizze Versuchsaufbau Seilfahrt	94
Abb. 5.24	Schlupf am Seil, 80 % Leistung, 10 kg Beladung, Seilspannung 2	95
Abb. 5.25	Schlupf am Seil, 50 % Leistung, 10 kg Beladung, Seilspannung 2	96
Abb. 6.1	Seilbahn-Laufräder	103
Abb. 6.2	Versuchsaufbau zur Ermittlung des Schlupfs am senkrechten Seil	104
Abb. 6.3	Abmessungen am Laufrad zur Schlupfbestimmung	105
Abb. 6.4	Zahnmarkierung an der Seilbahn	106
Abb. 6.5	Seilbahn-App2 Bedienungsoberfläche	108
Abb. 6.6	Auswertungstabelle mit relevanten Parametern	109
Abb. 6.7	Umschlingungswinkel 60°, 120° und 180° v.l.n.r.	110
Abb. 6.8	Schlupfermittlung bei 60° und 291,4 N	112
Abb. 6.9	Schlupfermittlung bei 60° und 291,4 N	113
Abb. 6.10	Schlupfermittlung bei 120° und 291,4 N	113
Abb. 6.11	Schlupfermittlung bei 180° und 291,4 N	114
Abb. 6.12	Einfluss Umschlingungswinkel auf Schlupf, 500 Schritte/s und 291,4 N	115
Abb. 6.13	Einfluss Seilvorspannung auf Schlupf, 500 Schritte/s und 120°	116
Abb. 6.14	APEX Winkelgetriebe PAIIR	120
Abb. 6.15	Schräglage der Seilbahn bei zu geringer Seilvorspannung	120
Abb. 6.16	Seilverdrehung (links) und Seil außerhalb der Nut (rechts)	121
Abb. 6.17	Abrieb und Seilverschleiß	122
Abb. 7.1	Kosten der Laufkatze in Abhängigkeit der Stückzahl	125
Abb. 7.2	Kosten der Weiche in Abhängigkeit der Stückzahl	126
Abb. 7.3	Demonstrationsstrecke 1	127
Abb. 7.4	Demonstrationsstrecke 2 Produktionshalle	129
Abb. A4.1	Durchbiegung der Schiene	XVII
Abb. A4.2	Kräfte am Seil	XVIII
Abb. A4.3	Bosch F006 B20 360 Gleichstrommotor	XIX
Abb. A4.4	Schaltplan EHB Variante 3.1	XX
Abb. A5.1	Herleitung Versuchsaufbau Seilfahrt	XXVIII
Abb. A5.2	Schlupf am Seil, 80 % Leistung, 10 kg Beladung, Seilspannung 1	XXXI
Abb. A5.3	Schlupf am Seil, 50 % Leistung, 10 kg Beladung, Seilspannung 1	XXXII
Abb. A5.4	Schlupf am Seil, 80 % Leistung, 10 kg Beladung, Seilspannung 3	XXXII
Abb. A5.5	Schlupf am Seil, 50 % Leistung, 10 kg Beladung, Seilspannung 3	XXXII
Abb. A6.1	Einfluss Umschlingungswinkel auf Schlupf, 1.000 Schritte/s und 291,4 N	XXXV
Abb. A6.2	Einfluss Umschlingungswinkel auf Schlupf, 1.500 Schritte/s und 291,4 N	XXXV
Abb. A6.3	Einfluss Umschlingungswinkel auf Schlupf, 2.000 Schritte/s und 291,4 N	XXXV
Abb. A6.4	Einfluss Seilvorspannung auf Schlupf, 500 Schritte/s und 60°	XXXVI
Abb. A6.5	Einfluss Seilvorspannung auf Schlupf, 2.000 Schritte/s und 120°	XXXVI

## Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1	Gegenüberstellung Durchbiegungen 6 m und 12 m Schiene	36
Tab. 4.2	Seilkräfte in Abhängigkeit des Winkels für Gewichtskraft 392,4 N	38
Tab. 4.3	Seildurchhang in Abhängigkeit des Winkels für Gewichtskraft 392,4 N	38
Tab. 4.4	erweiterte Sensoren für die Laufkatze Variante 3.2	52
Tab. 4.5	Elemente Baukastensystem Elektrohängebahn	55
Tab. 4.6	Ablauf Durchfahrt Weiche	58
Tab. 4.7	Vor- und Nachteile der Akku-Wechselstation	63
Tab. 4.8	Motorenvergleich für den Seilbahn-Versuchsträger	65
Tab. 5.1	Übersicht Anbieter Gummi-Beschichtung	72
Tab. 5.2	Varianten Rundkursversuche	75
Tab. 5.3	Drehzahlauswertung bei 50 % Leistung und 0 kg Nutzlast	78
Tab. 5.4	Drehzahlauswertung bei 80 % Leistung und 20 kg Nutzlast	78
Tab. 5.5	Drehzahlschwankungen Rundkurs bei 50 % Leistung und 0 kg Nutzlast	79
Tab. 5.6	Drehzahlschwankungen Rundkurs bei 80 % Leistung und 20 kg Nutzlast	79
Tab. 5.7	Störung an den Übergängen des Rundkurses	80
Tab. 5.8	Einflussgrößen Steigungsversuche am Rechteckrohr	85
Tab. 5.9	Einflussgrößen Steigungsversuche am Flachstahlprofil	91
Tab. 5.10	Messwerte Seildurchhang 1 (Seilspannung 1)	94
Tab. 5.11	Messwerte Seildurchhang 2 (Seilspannung 2)	94
Tab. 5.12	Messwerte Seildurchhang 3 (Seilspannung 3)	94
Tab. 5.13	Einflussgrößen Steigungsversuche am Seil	95
Tab. 5.14	maximale Steigungswinkel am waagerechten Seil	96
Tab. 5.15	Vergleich der maximalen Schlupfwerte bei 10 kg Beladung	101
Tab. 6.1	Einflussgrößen Schlupf am senkrechten Seil	111
Tab. 6.2	Auswertung Schlupfermittlung mit 60° und 291,4 N	112
Tab. 6.3	Auswertung Schlupfermittlung mit 120° und 291,4 N	114
Tab. 6.4	Auswertung Schlupfermittlung mit 180° und 291,4 N	114
Tab. 6.5	Vergleich Seilvorspannung mit Gewichtskraft	116
Tab. 7.1	Kostenübersicht Laufkatze	125
Tab. 7.2	Kostenübersicht Demonstrationsstrecke 1 Einzelteilmontage	128
Tab. 7.3	Kostenübersicht Demonstrationsstrecke 2 Einzelteilmontage	129
Tab. A4.1	Technische Daten Bosch F006 B20 360 für Laufkatze 3.1	XIX
Tab. A4.2	Technische Daten Akkumulator - LiPo-Pack	XIX
Tab. A4.3	Elektronische Komponenten Laufkatze-Version 3.1	XX
Tab. A4.4	Elektronische Komponenten Laufkatze-Version 3.2	XXI
Tab. A4.5	Technische Daten Nanotec DC-Motor DB59M024035-A für Version 3.2	XXI
Tab. A4.6	Technische Daten Getriebe APEX Dynamics Germany	XXII
Tab. A4.7	Elektronische Komponenten Seilbahn-Versuchsträger	XXII
Tab. A5.1	Drehzahlverlauf bei 50 % Leistung und 0 kg Nutzlast	XXIII

Tab. A5.2	Drehzahlverlauf bei 80 % Leistung und 20 kg Nutzlast	XXIV
Tab. A5.3	Schlupf am Rechteckrohr Rad AKU mit 80 % Leistung	XXV
Tab. A5.4	Schlupf am Rechteckrohr Rad AKU mit 50 % Leistung	XXV
Tab. A5.5	Schlupf am Rechteckrohr Rad Clarholz mit 80 % Leistung	XXV
Tab. A5.6	Schlupf am Rechteckrohr Rad Clarholz mit 50 % Leistung	XXV
Tab. A5.7	Schlupf am Rechteckrohr Rad GARANT mit 80 % Leistung	XXVI
Tab. A5.8	Schlupf am Rechteckrohr Rad GARANT mit 50 % Leistung	XXVI
Tab. A5.9	Schlupf am Flachprofil Rad AKU mit 50 % Leistung	XXVII
Tab. A5.10	Schlupf am Flachprofil Rad Clarholz mit 50 % Leistung	XXVII
Tab. A5.11	Schlupf am Flachprofil Rad GARANT mit 50 % Leistung	XXVII
Tab. A5.12	Schlupf am Seil Rad AKU für Seilspannung 1	XXIX
Tab. A5.13	Schlupf am Seil Rad AKU für Seilspannung 2	XXIX
Tab. A5.14	Schlupf am Seil Rad AKU für Seilspannung 3	XXIX
Tab. A5.15	Schlupf am Seil Rad Clarholz für Seilspannung 1	XXIX
Tab. A5.16	Schlupf am Seil Rad Clarholz für Seilspannung 2	XXX
Tab. A5.17	Schlupf am Seil Rad Clarholz für Seilspannung 3	XXX
Tab. A5.18	Schlupf am Seil Rad GARANT für Seilspannung 1	XXX
Tab. A5.19	Schlupf am Seil Rad GARANT für Seilspannung 2	XXX
Tab. A5.20	Schlupf am Seil Rad GARANT für Seilspannung 3	XXX
Tab. A5.21	maximale Schlupfwerte Laufrad AKU GmbH bei 10 kg Beladung	XXXI
Tab. A5.22	maximale Schlupfwerte Laufrad G. Clarholz GmbH bei 10 kg Beladung	XXXI
Tab. A5.23	maximale Schlupfwerte Laufrad GARANT GmbH bei 10 kg Beladung	XXXI
Tab. A6	Schlupfermittlung am senkrechten Seil	XXXIII
Tab. A7.1	Beispiel Montagezeiten Akkuhalterung	XXXVIII
Tab. A7.2	Kostenübersicht Demonstrationsstrecke 1 Serienfertigung (50 Stück)	XXXVIII
Tab. A7.3	Kostenübersicht Demonstrationsstrecke 2 Serienfertigung (50 Stück)	XXXVIII
Tab. A7.4	Stückliste EHB-System	XXXIX

## 1 Einleitung

Die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie wird in den letzten Jahren stark durch den Begriff Industrie 4.0 geprägt. [Bmw19]

Für die Unternehmen eröffnen sich dadurch ständig neue sowie anspruchsvolle Herausforderungen. Vor allem sollen die Verfügbarkeit, die Variantenvielfalt und die Flexibilität der Fertigung bei zunehmend kleineren und individuellen Stückzahlen hoch sein. Dies ist nur möglich durch weiterentwickelte Transportsysteme, die schnell und flexibel die festgelegten Fertigungs- oder Produktwege verlassen können, um bedarfsgerecht zu reagieren. Gesucht werden flexibel agierende und vor allem kostengünstige, bezahlbare Konzepte.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine kleine und leichte Elektrohängebahn als intralogistisches Fördersystem entwickelt. Der innovative Charakter besteht darin, dass die gesamte Informationsverarbeitung und Aktuatorik in dem Wagen („Laufkatze“) angeordnet wird, wogegen das gesamte Schienensystem rein passiv ausgelegt werden soll. Die Schwerpunkte der Arbeit liegen in der Entwicklung der entsprechenden Komponenten.

An die Elektrohängebahn selbst werden folgende Anforderungen gestellt: Es sollen leichte Lasten im Bereich bis zu 20 kg bei möglichst geringem Eigengewicht transportiert werden. Das modulare Streckensystem soll aus kostengünstigen Stahl-Normprofilen bestehen, im Wesentlichen Flachprofile aus Stahl („Flachstahl“) sowie Rechteckrohre aus Stahl. Um geradverlaufende Streckenprofile besonders rationell aufbauen zu können, soll darüber hinaus die Verwendung von Seilen als Schienenelement möglich sein. Des Weiteren soll die autonom fahrende Laufkatze selbstständig eine Weichenverstellung vornehmen können. Dabei hilft im Fahrwerk ein eingebauter Elektromotor mit Akkumulator, um unabhängig und autark von der externen Stromversorgung zu agieren. Auch sollen alle Aktuatoren und Sensoren sowie die komplette Steuerungstechnik allein in der Laufkatze ihren Platz finden, sodass das Schienensystem und die Kreuzungspunkte kostengünstig sind, weil sie ausschließlich aus Stahlbauprofilen und Seilen bestehen.

Um ein zuverlässiges Betreiben der Elektrohängebahn realisieren zu können, darf der Schlupf zwischen den Antriebselementen der Laufkatze und der Schiene bestimmte Größenordnungen nicht überschreiten. Aus diesem Grunde ist besonderes Gewicht auf die Untersuchung des Schlupfverhaltens von Reibrollenantrieben und Schienenelementen als Flachstahl, als Rechteckrohr aus Stahl und zusätzlich das Schlupfverhalten am Kunststoffseil zu legen. Somit soll die Elektrohängebahn auch exemplarisch als Untersuchungsobjekt zur Ermittlung des Schlupfes zwischen den genannten Reibpartnern dienen.

Die so zu entwickelnde Elektrohängebahn ist besonders geeignet für die Überbrückung von weiten Transportwegen mit Neigungen bis  $20^\circ$ . Das System ist schnell, leicht und flexibel auf- und abzubauen; auch nachträgliche Veränderungen und Anpassungen sind mit wenigem Aufwand möglich. Typische Einsatzorte können dort vorliegen, wo Gefahr für Mensch und Tier besteht, beispielsweise hohe oder niedrige Temperaturen, Strahlung, Staub, Lärm, Dunkelheit oder giftige Gase. Auch sind Einsatzgebiete in der Produktion und Montage für innerbetriebliche Zwecke, zur Ver- und Entsorgung von Arbeitsplätzen mit Werkzeugen, Dokumenten, Ersatzteilen, Proben und Mustern für die Qualitätssicherung, auch mit mehreren Fahrwerken hintereinander, in Betracht zu ziehen. Aber auch Kamerasysteme zur Objektüberwachung, Messinstrumente für Temperatur, Strahlung und Gase sowie Wärmebilder zur Beaufsichtigung von Produktionsabläufen sind denkbar.

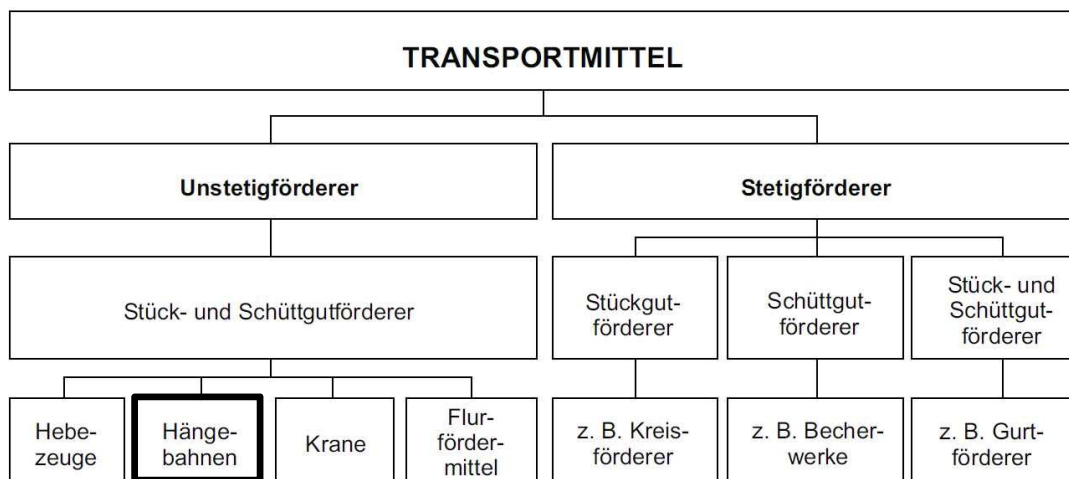
Die vorliegende Arbeit gliedert sich im Wesentlichen wie folgt: Beginnend mit einer Aufbereitung des bekannten Standes der Technik auf dem Gebiet leichter Hängebahnen erfolgt im Anschluss eine Darstellung der Hauptkomponenten des zu entwickelnden Systems. Gegenstand eines weiteren Hauptkapitels sind experimentelle Untersuchungen sowie deren Auswertung zum Schlupf (Abweichung der Raddrehzahl im Verhältnis zur zurückgelegten Strecke) zwischen den Reibpartnern des zu entwickelnden Systems. Im nächsten Schritt werden wirtschaftliche Betrachtungen zum konzipierten System erläutert. Den Abschluss dieser Arbeit bildet eine Zusammenstellung der erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse sowie ein weiterführender Ausblick zur Themenfortführung.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Einordnung des zu entwickelnden Systems

Transportbahnen wie Seilbahnen gehören zu den ältesten technischen Transportmitteln der Menschheit. Bereits um 400 v. Chr. sind in China Seilschwebbahnen zum Transport von Baumaterial und zum Überwinden von Flüssen und Schluchten eingesetzt worden. Die ältesten Hinweise auf Hängebahnen in Europa finden sich um 1411 im Wiener Kodex. Dort wird eine Korbseilbahn über einen Wassergraben zu einer Burg beschrieben. Der Durchbruch und die technische Weiterentwicklung der Seilbahntechnik geschahen jedoch im 19. und 20. Jahrhundert, nachdem unter anderem stabile Drahtseile aus Stahl durch Oberbergat Wilhelm August Julius Albert verfügbar waren, die Hanf- und Kettenseile ablösten. Der immer größer werdende Waren- und Personenverkehr, vor allem in unwegsamem Gelände, machte dies dringend erforderlich. [nach Gün13], [nach Hon90]

Heinrich Martin [Mar14] unterteilt die Transport- und Fördermittel in der Intralogistik in Unstetig- und Stetigförderer, wie in **Abbildung 2.1** dargestellt. Unter Intralogistik werden dabei die logistischen Material- und Warenflüsse innerhalb eines Betriebsgeländes verstanden. Das vorliegende Elektrohängebahnsystem gehört als Hängebahn zu den Unstetigförderern, welche sowohl Stück- als auch Schüttgut transportieren können.

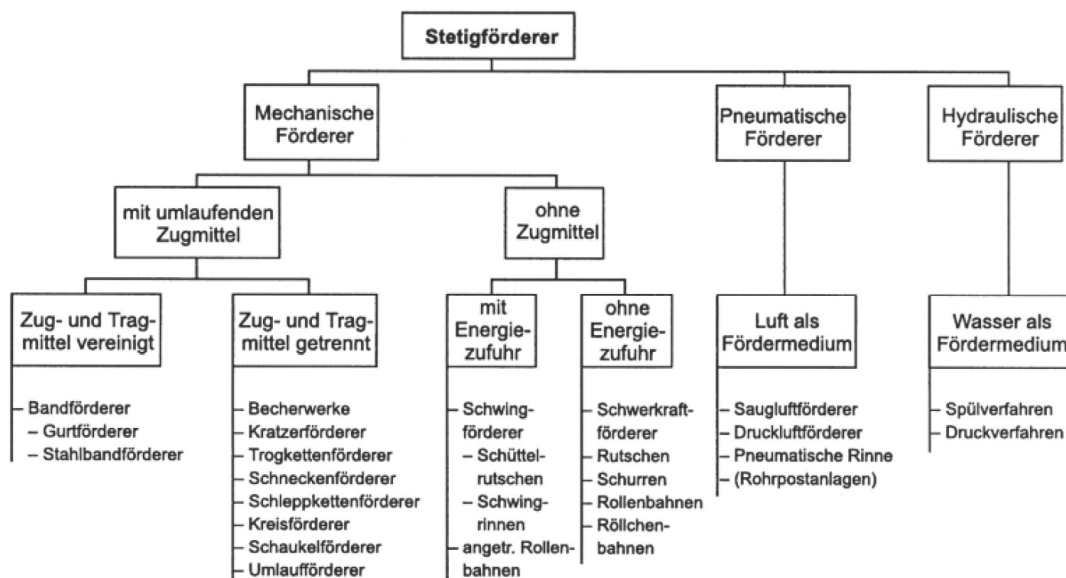


**Abbildung 2.1:** Einordnung der Hängebahnen in die Transportmittel in der Logistik [Mar14]

Zur Abgrenzung werden zunächst die Stetigförderer beschrieben. Stetigförderer zeichnen sich dadurch aus, dass sich die Fördergüter kontinuierlich auf einem gleichbleibenden, festgelegten Förderweg bewegen. Der Antrieb ist auf Dauerbetrieb ausgelegt, da der Stetigförderer über einen längeren Zeitraum ununterbrochen arbeiten soll. Oft wird ein Antrieb mit

nur geringem Energiebedarf, großer Betriebssicherheit und einfachem Aufbau eingesetzt. Flurgebundene Stetigförderer transportieren die Ware waagrecht, senkrecht oder geneigt. Sie besitzen einen festen Transportweg und benötigen daher viel Fläche. Flurfreie Stetigförderer bewegen sich stattdessen oft schienengebunden. Weitere Vorteile sind der geringe Personalbedarf, eine einfache Automatisierbarkeit, permanente Transportbereitschaft und der hohe Warendurchsatz. Nachteile hierbei sind in der geringen Flexibilität aufgrund der ortsfesten Installation, in Problemen bei der Erweiterung, in der erforderlichen Anpassung bei Aufgabenänderungen und in teils hohen Investitionskosten zu finden. Zudem benötigen ortsfeste Anlagen oft sehr viel Bodenfläche. Durch veränderliche Geschwindigkeiten und Taktungen sind Stetigförderer mit Hilfe intelligenter Steuerungen sehr gut zum automatischen Transportablauf im innerbetrieblichen Materialfluss geeignet. Sie können bei Automatisierungsprozessen in der Fertigung sowie im Lagerwesen verwendet werden. Stetigförderer kommen bei festgelegtem Transportweg für Stück- und Schüttgut für kurze, mittlere und auch große Entfernungen in der Massenfertigung oder in der Baustoffindustrie zum Einsatz. [nach Mar14]

Nach [Mar14] lassen sich Stetigförderer nach den folgenden Gesichtspunkten einteilen: Konstruktiver Aufbau, Art der Kraftübertragung, Funktionsprinzip sowie nach der Art des Transportgutes. In **Abbildung 2.2** ist die Einteilung der Stetigförderer nach konstruktiven und funktionalen Gesichtspunkten dargestellt.

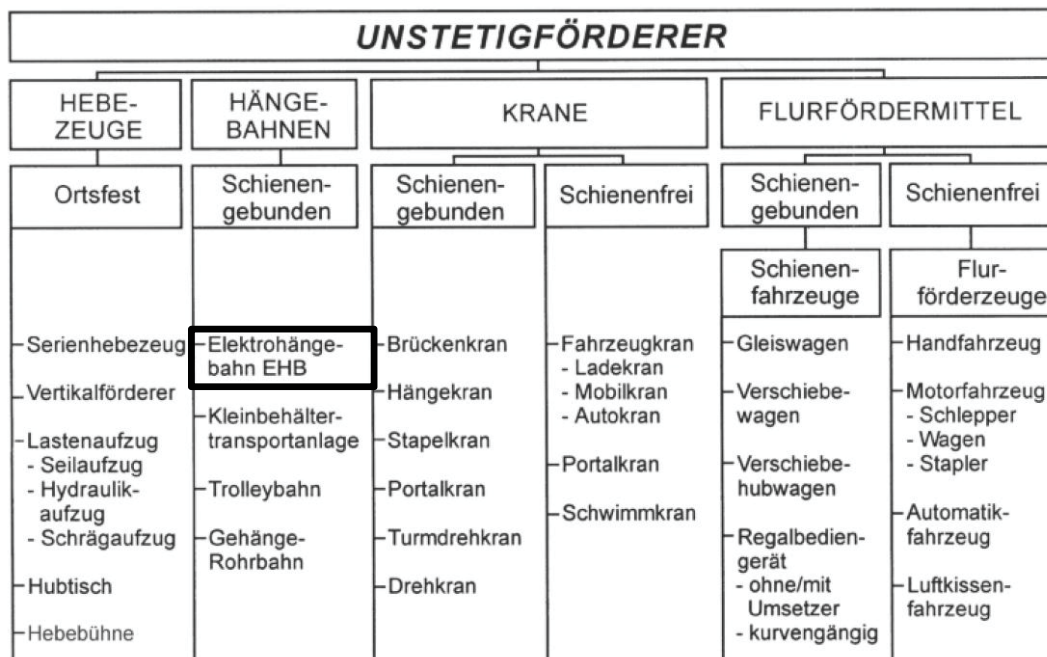


**Abbildung 2.2:** Einteilung der Stetigförderer [Mar14]

Dem gegenüber stehen die Unstetigförderer. Dies sind Transportmittel, die Schütt- und/oder Stückgut diskontinuierlich und bedarfsorientiert transportieren und dabei teilweise selbst die Transportwege wählen können. Der Arbeitsablauf zeichnet sich durch einen Wechsel von

Last- und Leerfahrten, durch Stillstandszeiten und Anschlussfahrten für das Be- und Entladen aus. [nach Mar14]

Elektrohängebahnen (abgekürzt EHB) transportieren Güter flurfrei mit einzeln angetriebenen Fahrzeugen. Sie agieren in der Regel horizontal und bestehen aus an der Hallendecke oder an Stützen befestigten Schienen mit Geraden, Kurven, Weichen, Kreuzungen, Drehscheiben, Hubstationen und Steigungen. Sie weisen ein Fahrwerk mit einem Lastaufnahmemittel auf und werden nach [Mar14] als schienengebundene Hängebahnen zu den Unstetigförderern eingeteilt, siehe **Abbildung 2.3**. Steigungsfahrten können mit bis zu 90° durchgeführt werden. Die Schienen sind in der Regel massive Spezialprofile und werden als Innen- und Außenläuferprofil sowie Obenläufer ausgeführt. Diese werden aus kaltgewalztem Stahl oder stranggepresstem Aluminium hergestellt; dabei können Stahlschienen höhere Gewichte tragen und benötigen somit weniger Abhängevorrichtungen von der Hallendecke bzw. Stützen. Über am Schienenprofil angebrachte Schleifleitungen erfolgt die Energie- und Signalführung innerhalb bzw. außerhalb des Fahrschienenprofils. [nach Mar14], [nach HSD18]



**Abbildung 2.3:** Einteilung der Unstetigförderer [Mar14]

Mit Hilfe der Automobilindustrie und der [VDI3643] wurde ein kompatibles Obenläufersystem mit einem Traglastbereich von 500 kg definiert, welches weit verbreitet und flexibel einsetzbar ist. Es wird von unterschiedlichen Herstellern angeboten und ist durch seine einheitlichen Schienensysteme gekennzeichnet. Die Einzelfahrwerke bestehen aus einem Fahrgestell mit Laufrädern und Führungsrollen, einem Getriebemotor sowie einer Steuerung. In der Regel besteht eine Elektrohängebahn aus einem angetriebenen Fahrwerk und einem nicht

angetriebenen Laufwerk. Es können bei schweren Lasten mehrere miteinander verbundene Fahrzeuge eingesetzt werden. Unterhalb der Bahn befinden sich unterschiedliche Lastaufnahmemittel wie beispielsweise Lasthaken, Greifer, Schaukeln und Plattformen oder elektrische Hubwerke, je nach individueller Anwendung. Nach der [VDI4441] besitzen EHBs folgende Hauptbestandteile: Fahrwerk, Laufwerk, Lasttraverse, Gehänge, elektrische Ausrüstung, Lastaufnahmemittel, evtl. Nutzlast und die Laufschiene.

EHBs lassen sich in der Regel unabhängig voneinander und einzeln steuern. Durch mit Polyurethan beschichtete Lauf- und Führungsrollen können hohe Geschwindigkeiten von bis zu 2 m/s erreicht werden, wobei geringe Geräuschemissionen möglich sind. Elektrohängebahnen sind universelle Fördermittel und werden in den verschiedensten Unternehmensbereichen (Elektro-, Textil- und Lebensmittelindustrie, Krankenhäuser, Automobilindustrie) eingesetzt. Beispielsweise finden sie im Wareneingang, im Lager, im Kommissionierbereich bis hin zu Versand sowie in Montage- und Produktionsbereichen Verwendung. Sie ermöglichen die Ver- und Entsorgung von Produktions- und Lagersystemen oder dienen dem Verbinden von Produktionsbereichen. Fahrstrecken mit geringen bis mittleren Durchsatzleistungen, spezielle Anforderungen an Transportzeiten oder besonders lange einspurige Strecken sind weitere Stärken einer EHB. [nach HSD18], [nach AIK+07]

**Abbildung 2.4** (rechts) zeigt eine derartige EHB der Firma Eisenmann. Die Firma Eisenmann Anlagenbau GmbH & Co. KG (Unternehmen nach Insolvenz aufgelöst) aus Böblingen gab in ihren Prospekten von 2009 [nach Eis09] folgende positive Gründe für den Einsatz einer EHB an:

- schneller, energieeffizienter und schonender Transport,
- hohe Flexibilität, Transport von unterschiedlichen Ladungsträgern,
- platzsparender und flurfreier Transport, zusätzliche Bodennutzung möglich,
- geringe Investitionen bei Erhöhung der Leistung,
- leiser bis lautloser Betrieb,
- zuverlässig und hohe Verfügbarkeit,
- hohe Durchsatzleistung durch stetigen Transport über mehrere Ebenen,
- kostengünstige Fahrten über große Entfernungen.



**Abbildung 2.4:** Elektrohängebahn der Firma Eisenmann [Wik13], [Eis09]

Nachdem die Einordnung des betrachteten Systems erfolgt ist, sollen in den folgenden Kapiteln Elektrohängebahnen betrachtet werden, die nach dem Stand der Technik verfügbar sind. Dabei werden die Aufbauten untersucht, die zumindest teilweise mit dem zu entwickelnden System vergleichbar sind. Prinzipiell wird sich dabei vorwiegend auf Güter-Transportsysteme konzentriert, d. h. auf Bahnen für den Warentransport und nicht für die Personbeförderung. Dennoch werden hier Elektrohängebahnen nicht nur für den Gütertransport, sondern auch solche für den Personentransport betrachtet, um eine hinreichende Abdeckung des Standes der Technik zu gewährleisten. Es soll insbesondere durch Herausarbeiten der Unterschiede gezeigt werden, dass ein vergleichbares System weder am Markt verfügbar, noch die notwendige Technik entwickelt ist. Dabei wird unterschieden zwischen Hängebahnen an Schienen und Seilbahnen.

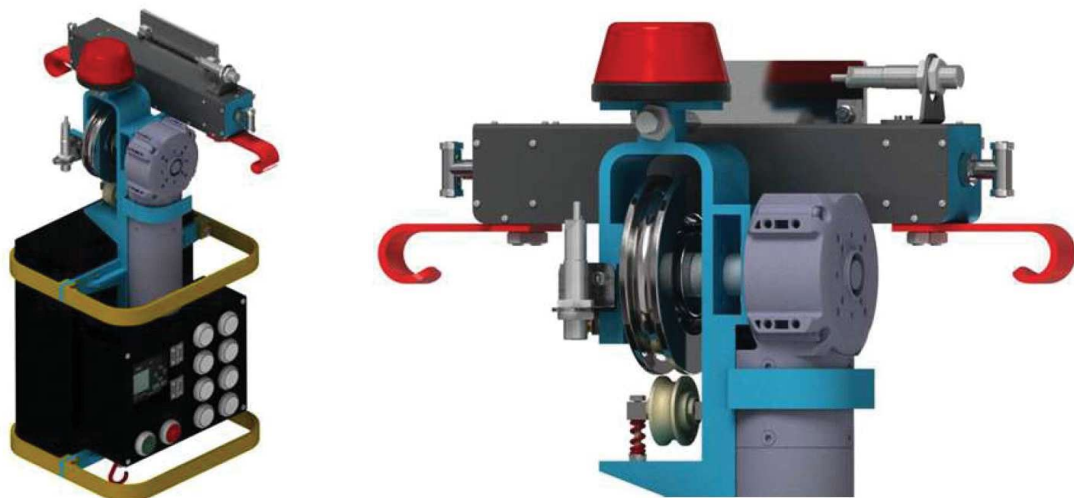
## 2.2 Vorarbeiten im Rahmen der Dissertation von Batic Aylak

Im Rahmen seiner Promotion an der Universität Duisburg-Essen hat Aylak [Ayl15] ein System entwickelt und konzeptioniert, welches eine wichtige Vorarbeit für die vorliegende Arbeit darstellt. Da im Rahmen der Forschungsarbeit eine Projektierung und Simulation vorgenommen wurde, aber eine unmittelbare technische Umsetzung nicht Gegenstand der Arbeit war, bestand hier ein sehr großer Spielraum für Ideen, deren Umsetzung teilweise nur mit erheblichem Aufwand möglich ist. Beispielsweise entstand der Vorschlag, die Fahrbahn an Hallenträgern zu positionieren, was für die Projektierung sehr viele Freiräume lässt. Weiterhin wurden unterschiedliche Stationen zum Be- und Entladen, zum Wechsel bzw. Aufladen der verwendeten Akkumulatoren, Weichenstationen usw. vorgesehen. Ein wesentliches Ergebnis der Forschungsarbeiten von Aylak war eine Simulation, die sehr viele Möglichkeiten eines derartigen Systems vorsieht. Somit kann die Arbeit von Aylak als Vision angesehen

werden, die über das mit vertretbarem Aufwand Umsetzbare zumindest momentan deutlich hinausgeht.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich zuerst darauf, diese Vision auf einen mit vertretbarem technischem Aufwand umzusetzenden Demonstrator zu reduzieren. Dabei sollten grundlegende Funktionen erhalten bleiben. Dieses betraf zunächst die Komponenten, die für die Erstellung eines Demonstrators unabdingbar waren.

Die wichtigste Komponente des Systems stellt die Laufkatze dar. Die komplette Antriebstechnik wie Gleichstrommotor, Getriebe, Führungs- und Antriebsrolle sowie der erforderliche Akkumulator sind in die Laufkatze zu implementieren. Weiterhin muss in die Laufkatze die Steuerung für den Antriebsmotor integriert sein. Die Laufkatze soll in der Lage sein, wechselweise und je nach Bedarf auf massiven Schienen und auf Seilen zu fahren. Bei der Steuerung des Antriebsmotors ist eine zusätzliche Funktion vorzusehen: Neben dem An- und Ausschalten soll die Steuerung in der Lage sein, zwischen einer maximalen Fahrgeschwindigkeit und einer Langsamfahrt umzuschalten. Letzteres ist erforderlich, um beispielsweise bei Kurvenfahrt die Fahrgeschwindigkeit an die Gegebenheiten der Strecke anzupassen. **Abbildung 2.5** zeigt die Laufkatze nach Aylak. [nach Ayl15]



**Abbildung 2.5:** links: Laufkatze mit Steuereinheit; rechts: Führungsrolle der Laufkatze [Ayl15]

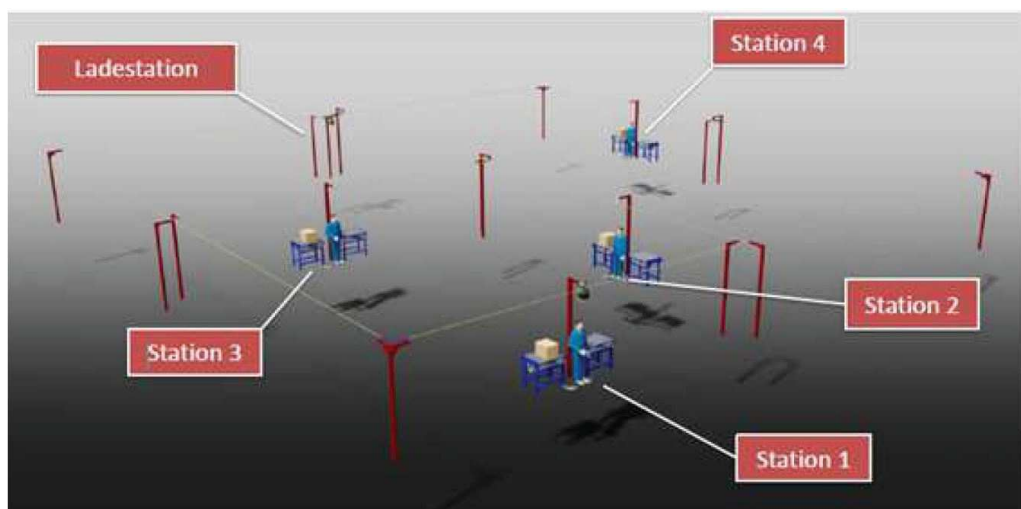
Da das Schienensystem rein passiv gestaltet ist, muss die Laufkatze mit einer Einheit versehen sein, die in der Lage ist, eine Weiche so anzusteuern, dass diese in die gewünschte Fahrtrichtung umgeschaltet werden kann, in dem obigen Modell in **Abbildung 2.5** rot dargestellt. Zu berücksichtigen ist, dass die Weiche auch aufgefahren werden kann, d. h., dass das System nicht nur so gestaltet werden soll, dass die Laufkatze aus der Zufahrt in eine der beiden wählbaren Fahrtstrecken fahren kann, sondern sie muss auch in der Lage sein, aus einer dieser beiden Fahrtstrecken die Weiche überfahren zu können, um in die einzelne Schiene zu gelangen.

Als Demonstrator für eine passive Weiche, die durch eine am Transportwagen angebrachte Stelleinrichtung umgeschaltet werden kann, wird nur eine einzige Variante erarbeitet. In seiner Arbeit hat Aylak hier mehrere Varianten vorgesehen, die jedoch nicht alle realisiert werden können, um den Bearbeitungsaufwand in Grenzen zu halten.

Der Akkumulator muss mit einem Wechselsystem versehen sein, das es gestattet, in einer entsprechenden Station einen entleerten Akku automatisch gegen einen aufgeladenen zu tauschen. Eine hierfür erforderliche Wechselstation wird prinzipiell konzeptioniert, soll aber nicht konstruktiv umgesetzt werden.

Weder zu konzeptionieren noch technisch umzusetzen soll eine Hubeinheit, z. B. ein Kran, sein, die in der Lage ist, eine Ware aufzunehmen. Stattdessen muss die Fahrt der Laufkatze bei Bedarf mit maximaler Belastung ausgeführt werden können, wobei dieser Lastzustand durch angehängte Gewichte simuliert werden wird.

Ein Beispiel für ein Netzwerk der zu entwickelnden Hängebahn zeigt **Abbildung 2.6**.



**Abbildung 2.6:** Netzwerk mit den Stationen 1 - 4 und die seitlich angelegte Ladestation [Ayl15]

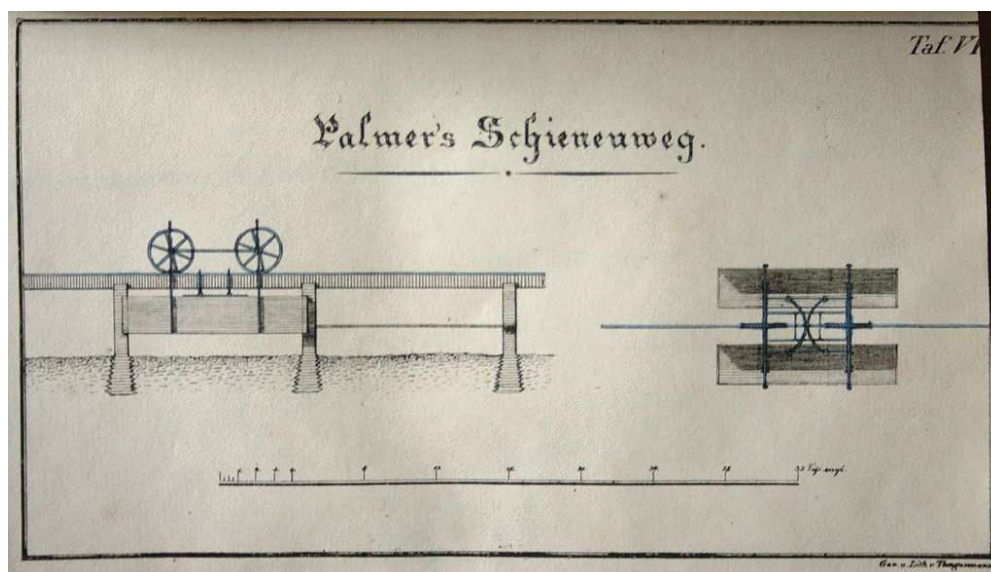
Es ist unschwer erkennbar, dass die Laufkatze einerseits auf Seilen fahren sollte, um eine kostengünstige Streckenführung zu ermöglichen, andererseits aber auch auf massiven Schienen fahren muss, um beispielsweise Weichen und Kurven umzusetzen, bei denen ein Aufbau aus Seilen kaum vorstellbar ist.

Ausgehend von dem in [Ayl15] konzeptionierten System wird im nächsten Kapitel der Stand der Technik untersucht, wobei insbesondere herauszuarbeiten ist, ob bereits vergleichbare komplette Systeme oder zumindest Systeme, von denen Teilfunktionen übernommen werden können, am Markt verfügbar sind. Dabei sollen zunächst auf massiven Schienen geführte Systeme behandelt werden, daran anschließend Seilbahnen.

## 2.3 Schienenbahnen mit mitgeführter Antriebseinheit

### 2.3.1 Palmersche Einschienenbahn

Henry Robinson Palmer, ein englischer Ingenieur, ließ 1821 die erste Hänge-Einschienebahn patentieren, die aus einer festen Schiene und darauf mittels Laufrädern geführten Wagen bestand. Mehrere dieser Wagen konnten zu einem Zug zusammengestellt werden. **Abbildung 2.7** zeigt eine aus der entsprechenden Patentschrift stammende Zeichnung. Die Bahn wurde im Südosten Londons errichtet. [nach Pal23a], [nach Rei23]



**Abbildung 2.7:** Palmersche Einschienenbahn, Bild aus der Patentschrift [Pal23b]

Das Fahrwerk der Hängebahn bestand aus zwei Laufrädern, die über ein Gestell miteinander verbunden waren und auf der Schiene liefen. Die Schiene selbst war auf mehreren Stützen befestigt. Am Gestell wurden in Fahrtrichtung links und rechts zwei Transportboxen mit annähernd gleichem Gewicht befestigt. Die Fahrwerke wurden mit Seilen verbunden, und der Zug wurde von Pferden gezogen [nach Tem18]. In **Abbildung 2.8** ist die gesamte Anordnung gezeigt.

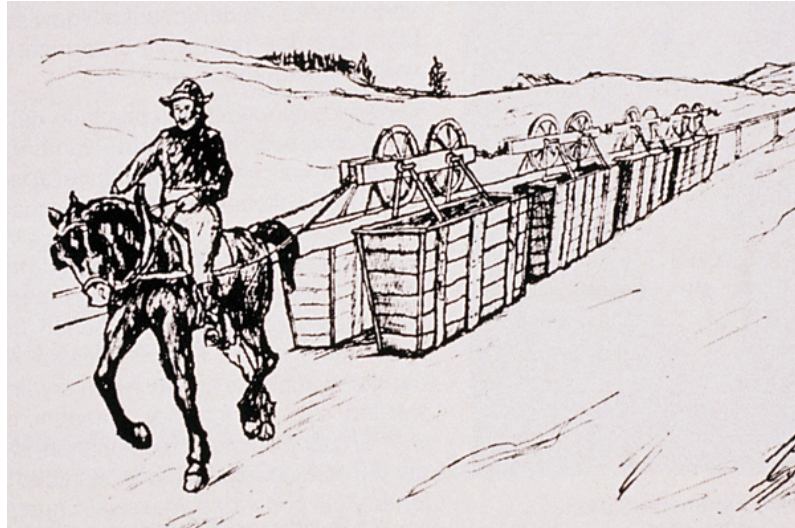


Abbildung 2.8: Palmersche Bahn 1821 [Rei23]

*Friedrich Harkort* stellte diese Entwicklung 1825 in Deutschland vor als „hängenden Schienenweg“ oder die „schwebende Bahn“ zum Transport von Kohle entlang der Ruhr. Versuchsbahnen entstanden in Elberfeld und Wetter, wo er seine Maschinenfabrik hatte. Allerdings setzten sich die Ideen kaum durch, weder im Kohletransport, noch im Bergbau des 19. Jahrhunderts. [nach Rei23]

Die Einschienen-Hängebahn von *Palmer* gilt indessen als Vorgänger und Wegbereiter der Wuppertaler Schwebebahn (siehe Kap. 2.3.3).

Außer dem Prinzip, einen unter einer Schiene aus einem massiven Profil hängenden Wagen mittels Lauf- bzw. Führungsrädern verfahren zu können, ist für die durchzuführende Entwicklung nichts Weiteres zu entnehmen. Es handelt sich darüber hinaus um eine schwerere Anordnung für relativ große Lasten.

### 2.3.2 *Lartigue*-Einschienenbahn

Um 1875 entwickelte der französische Ingenieur *Charles Lartigue* eine Einschienenbahn als Feld- und Grubenbahn. Das Hängebahnsystem hatte wie alle Hängebahnen gegenüber schienegebundenen Systemen auf dem Boden Vorteile im unbefestigten Gelände. Auch hier waren beidseitig Transportboxen an einem Gestell mit Rädern angebracht. Die Schienen waren auf A-förmigen Stützen befestigt, mit zusätzlichen seitlichen Führungsschienen. Die Lokomotive wurde mit Wasserdampf angetrieben, besaß zwei Dampfkessel, zwei Schornsteine und drei Antriebsräder, siehe **Abbildung 2.9**. [nach Lar23a], [nach Dou11]

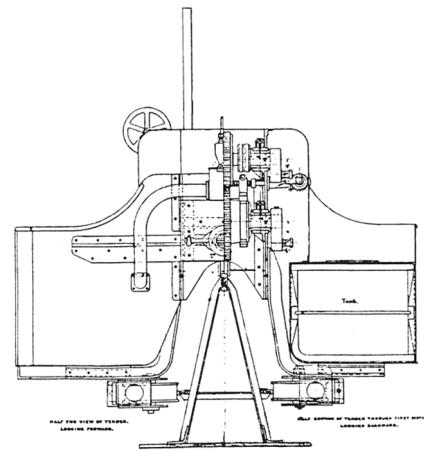
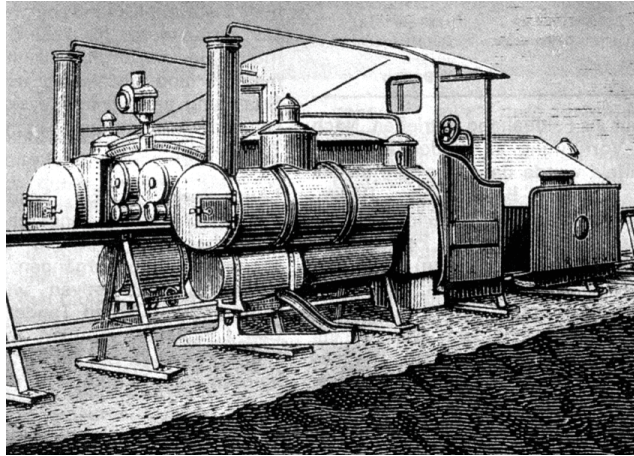


Abbildung 2.9: Lartigue-Einschienenbahn [Lar23b], [Dou11]

Auch hier kann nur das Prinzip des unter einer Schiene aus einem massiven Profil hängenden Wagens für die durchzuführende Entwicklung übernommen werden, weitere Lösungsansätze bieten sich nicht an. Außerdem ist die Bahn erheblich größer und für deutlich größere Lasten ausgelegt.

### 2.3.3 Wuppertaler Schwebebahn

Eine sehr bekannte und auch heutzutage noch als wichtiges Verkehrsmittel verwendete Bahn ist die Wuppertaler Schwebebahn. Dabei handelt es sich – entgegen der gängigen Bezeichnung – nicht um eine Schwebebahn, sondern um eine Einschienen-Hängebahn. Die Größe der Bahn sowie die Anforderungen, die der Personentransport bezüglich Sicherheit usw. stellt, sind mit denen der zu entwickelnden Bahn nicht zu vergleichen. Aufgrund der Bedeutung dieser Einschienen-Hängebahn wird sie dennoch in das vorliegende Kapitel „Stand der Technik“ aufgenommen.

Die Bahn wurde von *Eugen Langen* 1898 bis 1903 für den Transport von Personen im Tal der Wupper gebaut. Trotz erheblicher Anstrengungen gelang es allerdings nicht, die Bahn in weiteren Städten zu etablieren. Die Fahrtstrecke hat eine Länge von 13 km und weist 16 Haltestellen über der Wupper und vier Bahnhöfe über Land auf. Die gesamte Fahrtzeit von einem Endbahnhof zum anderen beträgt 30 Minuten. In den Endstationen wenden die Züge mittels eines 180°-Bogens, so dass sie danach unter der anderen der beiden parallelen Fahr-schienen betrieben werden können. Weichen oder sonstige Abzweigungen befinden sich nicht auf der Fahrtstrecke. Seit 2019 werden Züge einer modernen Generation eingesetzt, siehe **Abbildung 2.10**. [nach Wsw23]



**Abbildung 2.10:** Wuppertaler Schwebebahn [Wsw23]

### 2.3.4 H-Bahn und Skytrain

Die H-Bahn sowie die daraus hervorgegangene Skytrain sind ebenfalls kaum mit der zu entwickelnden Bahn zu vergleichen. Aufgrund ihrer Bedeutung sowie dem Bezug zur TU Dortmund werden sie hier ebenfalls zum relevanten Stand der Technik aufgenommen.

Die H-Bahn, eine fahrerlos betriebene Hängebahn, ist in den siebziger Jahren als ein Lösungsvorschlag für einen verbesserten öffentlichen Nahverkehr entstanden. Entwickler und Hersteller war die Firma Siemens in Erlangen (Siemens Transportation Systems). Bis jetzt gibt es von derartigen Bahnen in Deutschland lediglich die H-Bahn am Campus der TU-Dortmund sowie den SkyTrain am Düsseldorfer Flughafen. Die H-Bahn-Strecke stellt ein modulares Baukastenprinzip dar, bei dem die vorbereiteten, vormontierten Stützen und Träger erst vor Ort zusammengesetzt werden müssen. Der Abstand zwischen den Stützen beträgt ca. 25 bis 30 Meter. [nach Hba23]

Die zwei Fahrwerke einer Kabine, zwei weitestgehend unabhängige und redundante Einheiten, fahren innerhalb einer vorwiegend witterungsgeschützten, offenen Hohlprofilschiene, in der sich auch die Führung, Stromversorgung und Sensorik befindet. Jedes Fahrwerk besitzt mehrere gummi-bandagierte Trag- und Treibräder, welche in der kastenförmigen Schiene laufen. Zur seitlichen Abstützung in Kurven kommen Führungsrollen mit Hartgummi-bandagen zum Einsatz. In der Kabine befinden sich 16 Sitz- und 29 Stehplätze (Dortmund) für die Fahrgäste. Auch die Steuerung und Überwachung der Fahrzeugkomponenten befindet sich in der Hängebahn. Im Notfall kann das Fahrzeug im Handbetrieb gesteuert werden, auch wenn nur noch eine Fahrwerkseinheit funktioniert. [nach Hba23]

Die vier Gleichstrommotoren (vierpolige, fremderregte Gleichstrommaschinen mit Wendepolen) einer Kabine werden aus dem Stromnetz der TU Dortmund gespeist und können die

Bremsenergie wieder in das Versorgungsnetz zurückspeisen. Die Hängebahn wird von einer zentralen Leitstelle aus überwacht und kommt somit ohne Personal in den Kabinen aus. Je nach Auslastung kann die Bahn im Takt- oder im Rufbetrieb eingesetzt werden. Weichen helfen beim Befahren von verschiedenen Strecken. Die H-Bahn ist in **Abbildung 2.11** gezeigt. [nach Hba23]



**Abbildung 2.11:** H-Bahn in Dortmund [Hba23]

Seit dem 1. Juli 2002 wird am Düsseldorfer Flughafen ein sehr ähnliches System betrieben, der SkyTrain. Im Gegensatz zur H-Bahn in Dortmund ist die Beförderungskapazität erheblich höher. **Abbildung 2.12** zeigt den SkyTrain. [nach Hba23]



**Abbildung 2.12:** SkyTrain in Düsseldorf [Hba23]

### 2.3.5 Ottobahn

Das Start-Up Unternehmen ottobahn GmbH, mit Sitz in München, wurde im Juli 2019 gegründet. Es entwickelt und plant seitdem ein neuartiges Transportsystem, siehe **Abbildung 2.13**. Beabsichtigt ist, dass vollautomatische Gondeln entlang einer aufgeständerten Schiene Fahrgäste oder Waren an beliebige Ziele bringen, ohne Zwischenhalte und Umstiege. Eine Software soll den Verkehrsfluss in Echtzeit optimieren und effizient steuern, wobei alle Kabinen ihre Fahrwege KI-gestützt untereinander abstimmen. Jede Gondel ist autonom und entscheidet selbst über die eigene Route und bringt Waren oder Personen ohne Zwischenhalte an das Ziel. Die Ottobahn-Kabinen fahren ca. 5 bis 10 m über dem Erdboden. Mit Hilfe eines Aufzuges kann die Kabine überall zu Boden gelassen werden (keine festen Bahnhöfe). Eingesetzt werden effiziente Elektromotoren, die eine relativ geringe Antriebsleistung von 2,4 kW haben. Solarzellen auf den Fahrschienen und Gondeln dienen zur Stromerzeugung. Auch soll es patentierte passive Weichensysteme ohne bewegliche Teile geben. Die Ottobahn könnte innerorts 60 km/h und außerorts bis zu 250 km/h erreichen. Dabei werden die Gondeln mit einer App gerufen, zur Wunschzeit mit einem individuellen Start- und Zielort. 2022 ist eine 900 m Teststrecke südlich von München geplant, wo die ersten 100.000 Testkilometer anvisiert werden, ab 2023 ist die erste kommerzielle Strecke geplant. Über die Kosten ist nur wenig bekannt, aktuell spricht man von ca. 5 Millionen Euro je Kilometer. [nach Ott23]



**Abbildung 2.13:** Ottobahn: links u. rechts Personen- u. Gütertransport; Mitte: Fahrgestell [Ott23]

### 2.3.6 Doppelmayr Monorack

Das Monorack-System von der Garaventa AG (Doppelmayr Seilbahnen GmbH) aus der Schweiz ist eine Einschienen-Stand-Zahnradbahn. Auf einer Zahnstange, deren Zähne nach unten weisen, fährt ein Antriebsmodul, das mittels eines Verbrennungsmotors oder eines Elektromotors angetrieben wird und ein Zahnrad aufweist, das von unten in die Zahnstange eingreift. Eine Bedienungsperson kann auf diesem Antriebsmodul mitfahren und es bedienen. An das Antriebsmodul können Wagen, die auf der (nichtverzahnten) Oberseite der Zahnstange geführt sind, angehängt werden. Diese können für den Personen- oder Lasten-transport ausgelegt sein.

Das System ist für den Personen- und Materialtransport in unwegsamen Geländen und für steile Hanglagen in den Bergen geeignet. Typische Einsatzgebiete findet man bei Weinbergen, in der Forstwirtschaft, in der Erschließung alpiner Gebiete, bei schwer zugänglichen Baustellen usw. [nach Dop23]

Die flexible Streckenführung wird je nach Projektanforderungen aus beliebig erweiterbaren und schlanken, platzsparenden Fahrschienen und Weichen mit aufgeschweißter Verzahnung individuell zusammengestellt. Die 6 Meter langen feuerverzinkten Fahrschienen werden vor Ort dem Gelände entsprechend angepasst und evtl. gebogen. Die in einer Höhe von 0,45 m bis 3,00 m aufgeständerte Fahrbahn benötigt keine Fundamente. Die Abstützung muss alle drei Meter geschehen. Steigungen von bis zu 45° sowie horizontale und vertikale Kurven mit einem Radius bis zu 4 m sind möglich. [nach Dop23]

Für das Antriebsmodul mit Verbrennungsmotor gibt der Hersteller eine Leistung von 6,3 kW und eine Nutzlast von 500 kg an. Die Fahrgeschwindigkeit beträgt 0,7 m/s. Es ist umfangreiches Zubehör in Form von Palettenwagen, Kisten-Transportwagen, Kippwagen, Wagen für den Personentransport usw. erhältlich. Das System ist bereits seit 1976 im Einsatz und wird als robuste, langlebige und wartungsarme Lösung vermarktet. Weltweit sind über 650 Systeme umgesetzt worden. **Abbildung 2.14** zeigt ein Monorack mit Verbrennungsmotor. [nach Dop23]



**Abbildung 2.14:** Doppelmayr Benzin-Monorack [Dop23]

Das elektrisch betriebene Antriebsmodul hat eine Motorleistung von 6 kW bei einer Betriebsspannung von 48 V. Die Akku-Kapazität beträgt 3,6 kWh. Als Nutzlast können bis zu 160 kg transportiert werden. Die mittlere Fahrgeschwindigkeit beträgt 0,7 m/s. Das System ist in **Abbildung 2.15** dargestellt. [nach Dop23]



**Abbildung 2.15:** Doppelmayr Elektro-Monorack [Dop23]

Vorteilhaft sind beim Monorack die Flexibilität des Schienenverlaufs und die kompakten Antriebsmodule. Gegenüber dem zu entwickelnden System sind die Nutzlasten relativ hoch. Die Bedienung findet durch Personen statt, und es besteht nur die Möglichkeit, auf den Zahnstangen-Schienen zu fahren. Ein kombinierter Betrieb auf massiven Schienen und Seilen ist nicht möglich.

### 2.3.7 Magal Security RoboGuard

Die Firma „Magal Security Systems“ ist eine israelische Sicherheitsfirma, die verschiedene Lösungen anbietet, wie Dienstleistungen und Produkte für physische Sicherheit, Cyber-Sicherheit sowie Standortmanagement. Unter anderem vertreibt Magal Security Systems den RoboGuard, siehe **Abbildung 2.16**. Das System ist eine zum Patent angemeldete autonome Elektrohängebahn mit nur einer Schiene und angebrachten Sensoren, die in gesicherten Bereichen „patrouillieren“ kann. Es handelt sich dabei um eine kleine, kompakte Hängebahn mit der Größe von 850 x 750 x 260 mm, die auf einem geschweißten und verzinkten Stahlrohr mit 60 mm Außendurchmesser fahren und dabei Steigungen bis 6° überwinden kann. Die Hängebahn hat ein Eigengewicht inklusive der Batterie von 37 kg und ist nicht für den Transport von Gegenständen oder Personen gedacht, sondern zum Patrouillieren und Überwachen von Bereichen von bis zum 1.000 m. Sie ist mit einem Laser-Scanner, zwei Kameras, Infrarot-Beleuchtung, Lautsprechern, Mikrofonen und weiteren Sensoren ausgestattet. Zu den automatischen Fahrprogrammen gehören die laserbasierte Überwachung auf Schäden an Zaunanlagen, das Betrachten von verdächtigen Objekten in der Nähe von Zäunen und das Auffinden von Bereichen, an denen ein Alarm ausgelöst wurde. Auch ein manuelles Fahrprogramm existiert. Die Fahreigenschaften des RoboGuard-Systems sind flexibel. So kann die Hängebahn in unterschiedlichen Geschwindigkeiten fahren, von langsamen 5 km/h bis zu 20 km/h im Eilbetrieb. Die Bahn bzw. der Roboter ermöglicht eine Unterhaltung mit Kamera, Lautsprecher und Mikrofon zwischen dem Kontrollraum und einer Person in der Nähe der Bahn. [nach Mag22]

Kurvenfahrten sind ebenfalls möglich, bei einem minimalen Radius von 2,5 m, wobei allerdings ein Neigungsbegrenzer erforderlich ist. Ansonsten ist minimal ein 10 m Radius gestattet. Das RoboGuard-System wurde für den Einsatz im Freien bei hoher Temperatur, Staub, Trockenheit und Nässe ausgelegt und besitzt die Schutzklasse IP66 (staubdicht und geschützt gegen schweres Strahlwasser). Ein Temperaturbereich von -20 °C bis +55 °C wird angegeben, optional sind sogar -40 °C bis +65 °C realisierbar. Der Antrieb hat eine Leistung von 960 W sowie ein Drehmoment von 4,55 Nm. Die Energie kommt aus einem wieder aufladbaren Lithium-Akku mit 48 V, 20 Ah. Der Akku muss in der Regel nach 50 Minuten bei konstanter Fahrt aufgeladen werden. Dies geschieht automatisch in einer Ladestation, in der ein zweiter, geladener Akku gegen den leeren getauscht wird, sodass die Hängebahn nach kurzer Wechselzeit wieder weiterfahren kann. Die verwendete Wi-Fi-Kommunikation gewährleistet eine ständige Verbindung zwischen dem Roboter und dem Kontrollraum. [nach Mag22]



**Abbildung 2.16:** „Roboter“ (Laufkatze) des Systems Magal Security RoboGuard [Mag22]

Das System RoboGuard wird hauptsächlich zur Objektüberwachung eingesetzt und hat deshalb entsprechende Ausstattungen und Zubehör. Das System ist nicht für den Transport von Gütern geeignet und auch nicht in der Lage, Weichen zu stellen. Außerdem können keine unterschiedlichen Fahrbahnen (Massivprofile, Seile) befahren werden.

### 2.3.8 GPI-System Omega

Das GPI-System Omega wird von der GPI GmbH angeboten und ist ein eigenständiges EHB-System mit einem Traglastbereich von 50 – 400 kg, also für leichte bis mittelschwere Fördergüter, siehe **Abbildung 2.17**. Die Bahnkomponenten werden vorkonfektioniert für die Montage geliefert und enthalten bereits alle Energie- und Datenleitungen. Die Inbetriebnahme kann kurzfristig nach einem Zusammenstecken der Bahnteile und dem Anschluss an die Steuerung geschehen. Die Laufwerkeinheiten sind leicht, kompakt und enthalten den Antrieb und die Steuerung. Die Energie- und Datenübertragung geschieht kontaktlos, was den Wartungsaufwand des Systems stark reduziert. Die kastenförmige Fahrschiene, welche an der Decke platzsparend als geschlossenes System mit Energieversorgung montiert wird, gewährleistet durch die Form bereits den Absturzschutz und Personenschutz. Das System soll eine hohe Sicherheit im Betrieb aufweisen. Es ist möglich, mehrere Bahnen hintereinander fahren zu lassen, damit mehr Güter transportiert werden können. Mit Hilfe von Hebern und Weichen ist ein Separieren und Verzweigen der Bahnen gewährleistet. Das GPI-System Omega wird unter anderem in der Montage eingesetzt, beispielsweise als Förderband in der Autoindustrie, um Türen zum Montageort zu transportieren. Die Bahn fährt in der Regel mit geringen Geschwindigkeiten und überwindet kaum Steigungen. Weitere technische Daten gibt die Firma GPI nicht bekannt. [nach Gpi22a]



Abbildung 2.17: GPI-System Omega [Gpi22a]

Bezüglich etwaiger Weichen gibt es keine Informationen. Es ist allerdings davon auszugehen, dass diese aktiv sind und nicht durch die Laufwerkeinheiten betätigt werden.

### 2.3.9 Einschienenbahnen für hohe Belastungen

Um als Gegenstück eine Elektrohängebahn mit einer völlig anderen Größenordnung als die zu entwickelnde Elektrohängebahn zu zeigen, wird im Folgenden eine Elektrohängebahn für sehr hohe Belastungen dargestellt. Es handelt sich dabei um eine Elektrohängebahn mit bis zu 10.000 kg Nutzlast, welche hauptsächlich in der Kfz-Industrie Verwendung findet, siehe **Abbildung 2.18**. Dargestellt ist ein sehr aufwendiges, komplexes Einschienenbahn-System, ausgelegt für hohe Lasten und somit auch aufwendig im Aufbau, der Streckenänderung und daraus resultierend hohe Kosten, alles was das angestrebte System nicht haben soll.



Abbildung 2.18: Elektrohängebahn mit bis zu 10.000 kg Nutzlast [Rof23]

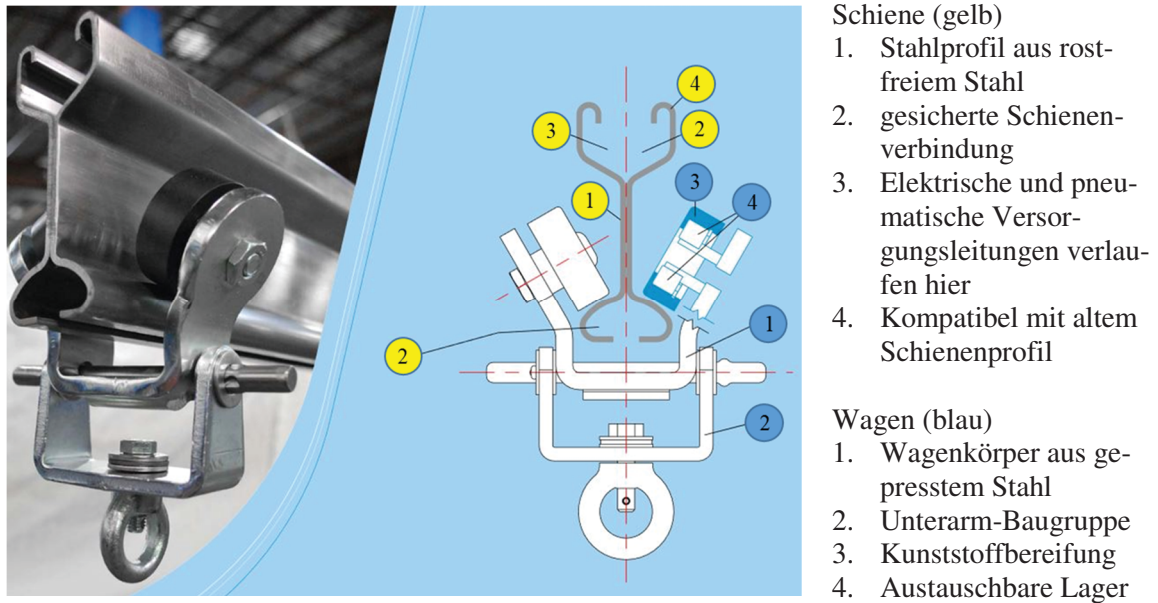
### 2.3.10 Sonstige Einschienenbahnen

Von der ersten Idee bis in die 1950er Jahre sind viele Einschienenbahnvarianten konzipiert und ausprobiert worden, aber nur wenige setzten sich durch, außer als Prototypen. Kreisel-Einschienenbahnen, bei denen die Wagen auf einer Schiene kreiselartig ausbalanciert wurden, waren eine davon, blieben aber leider nur Prototypen. Die Lartigue-Hochgeschwindigkeits-Hängebahn war 1901 für eine Strecke zwischen Liverpool und Manchester vorgesehen. Der Bau kam nie zustande. Die gyroskopische Brennan-Hängebahn wurde 1910 für den Einsatz in einem Kohlebergwerk in Alaska vorgeschlagen, ist aber ebenfalls nie gebaut worden. New York City plante sein Einschienenbahnsystem, gab diese Idee jedoch Anfang der 1930er Jahre auf. Aber nicht alle Einschienenbahn-Ideen blieben nur auf dem Papier stehen. Der Bau der Wuppertaler Schwebebahn in Deutschland erfolgte zwischen 1898 und 1901, und sie funktioniert immer noch. Die Patiala State Monorail Trainways in Punjab, Indien, war zwischen 1907 und 1927 in Betrieb. Ihre Züge hatten eine tragende Einzelschiene und ein externes Rad für die Balance. Weitere historische Beispiele hat der Verein „The Monorail Society“ übersichtlich aufgelistet. [Mon23]

## 2.4 Schienenbahnen ohne mitgeführte Antriebseinheit

### 2.4.1 Futurail Wäschetransport

Das Futurail Wäschetransport-System wird von der Firma Jensen GmbH produziert und ist vorgesehen für den Wäschetransport, beispielsweise für große Reinigungsunternehmen. Hier fährt ein sehr einfaches Fahrgestell mit zwei Kunststoffreifen links und rechts (wie in **Abbildung 2.19** zu sehen) auf einer rostfreien Stahlschiene mit geneigter Fahrbahn. Aufgrund der Anordnung der Räder kann es zu keinem Absturz des Wagens kommen. Der Wagen hat für den Transport an der Unterseite eine Öse zum Einhängen von Fracht. Durch das kaltgewalzte Stahlprofil und die darauf fahrenden Kunststoffreifen entsteht ein geringer Verschleiß bei hoher Laufruhe. Der Wartungsaufwand ist sehr gering, auch durch das einfache Wechseln der Bereifung und durch den simplen Aufbau. [nach Fut23]



**Abbildung 2.19:** Futurail-System [Fut23]

Im oberen Bereich der Schiene werden Versorgungsleitungen verdeckt geführt, sodass eine einfache Installation und ein sauberes Aussehen möglich sind. Das Futurail Wäschetransport-System ist im Wesentlichen für den waagerechten Transport ohne Steigungen ausgelegt. Die Anlage kann entlang der Schiene mit einem Friktionsantrieb automatisch angetrieben werden, wozu aber keine weiteren Erläuterungen zu finden sind. Die Anlage wird über die zentrale SPS ferngesteuert, von zwei 12 V-Batterien mit Strom versorgt und deren Ladezustand kontinuierlich und zentral von einer Wartungsstation auf Bodenniveau überwacht. [nach Fut23]

Für die zu entwickelnde Einschienen-Hängebahn kann man allenfalls die Anordnung der Schiene und der Rollen als Anregung übernehmen. Weitere verwertbare Informationen sind den Unterlagen nicht zu entnehmen.

#### 2.4.2 GPI „Power and Free“-Systeme

Das „Power & Free System“ der GPI GmbH bietet eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten, siehe **Abbildung 2.20**. In der unteren Schiene befinden sich die Laufwagen, welche von einer innenliegenden kontinuierlich angetriebenen Schleppkette bewegt werden. Aufgrund der komplexen, vollautomatischen Steuerung ist es möglich, einen diskontinuierlichen Materialfluss mit veränderten Taktzeiten einzustellen. Die Laufwagenabstände sind individuell festlegbar. Die Laufwagen selbst kann man mit einem Datenträger ausstatten, der diesen im System lokalisiert. Ein zentraler Leitreechner steuert und überwacht die komplette automatische Förderanlage. Die maximale Last ist angegeben für 2-fach-Laufwerke mit 150 kg. Eine Geschwindigkeit ist im Bereich von 0,8 bis 12 m/min frei wählbar, wobei das Power & Free

System wegen der kontinuierlich angetriebenen Schleppkette weniger für den un stetigen Transport geeignet ist, sondern mehr für eine ständige Produktion am Fließband. Die Steigung und das Gefälle sind angegeben mit bis zu 45°. Durch die flexiblen Einsatztemperaturen zwischen 10 °C bis 80 °C kann das System vielerorts verwendet werden. [nach Gpi22b]



**Abbildung 2.20:** Power & Free Systeme von GPI [Gpi22b]

### 2.4.3 OCS System 150

Die OCS Overhead Conveyor System GmbH aus Löhne bietet das OCS 150 System an, das in der **Abbildung 2.21** zu sehen ist. Das System soll Lasten von bis zu 150 kg/m Strecke tragen und bietet flexible Lösungen für die Kommissionierung, Lagerung und Produktion. Der OCS 150 Hängeförderer bewegt sich in einer flexiblen, modular aufgebauten Förderstrecke durch einen Friktionsriemenantrieb mit Schneckengetriebemotor. Die Geschwindigkeit kann zwischen 1 und 80 m/min variieren, sowohl vorwärts als auch rückwärts. Die Trolleys werden mithilfe einer Feder gegen einen Antriebsriemen in der Schiene gedrückt. Auf diese Weise wird die Kraft auf eine Antriebsplatte übertragen und der Trolley bewegt sich. Durch mehrere Trolleys sind höhere Transportmassen zu bewegen. Für das System gibt es verschiedene Weichen in 45°- und 90°-Ausführung sowie angetriebene Kurven von 5° bis 90°. Außerdem sind Steigungs- und Gefälle Strecken möglich bis 30° sowie je nach Nutzlast Vertikalförderer. Die Steuerung übernimmt eine SPS, welche mit Barcodes und RFID-Tags die Identifikation und Nachverfolgung gewährleistet. Frequenzumrichter können ein sanftes Start- und Stopp-Verhalten beim Positionieren garantieren. Zum Einsatz kommt der Hängeförderer unter anderem in der Automobilbranche zum Transport einzelner Teile für die Produktion. [nach Ocs23].



Abbildung 2.21: OCS 150 Hängebahnsystem [Ocs23]

## 2.5 Seilbahnen

### 2.5.1 Voraussetzungen

Das Gebiet der Seilbahnen ist sehr umfangreich, sodass es im Rahmen der vorliegenden Arbeit sinnvoll und erforderlich ist, sich auf einige wenige Beispiele zu beschränken. Seilbahnen können unterteilt und unterschieden werden nach Personen- und Güterbeförderung, aber auch nach ihrer Betriebsweise (Pendelbetrieb, Umlaufbetrieb) sowie nach Anzahl der Seile (Förderseil oder Trag- und Zugseil). Es existieren viele Seilbahn- und Schleppliftarten. Im Folgenden sind einige kurz der Vollständigkeit halber aufgelistet: Seilbahn, Standseilbahn, Schrägaufzug, Seil-Hängebahn, Seilschwebbahn, Einseilbahn, Doppel-Einseilbahn, Zweiseilbahn, Pendelbahn, Umlaufbahn und die Kategorie Schleppaufzug. [nach Gün13]

Für die Entwicklung der leichten Hängebahn ist es sinnvoll, die wichtigsten unterschiedlichen Konzepte kurz vorzustellen. Dies geschieht nach der grundlegenden Beschreibung des Prinzips jeweils anhand eines Ausführungsbeispiels. Es werden hier die folgenden Ausführungsformen kurz vorgestellt:

- Einseilbahn,
- Zweiseilbahn und
- Schleppaufzug.

### 2.5.2 Einseilbahn

Einseilbahnen gehören zu den Seilschwebbahnen mit geringem Bauaufwand. Sie sind geländeunabhängig und besitzen eine hohe Betriebssicherheit bei relativ geringen Anlagen-

und Betriebskosten im Vergleich zu der hohen Beförderungskapazität. Bei der weit verbreiteten Einseilumlaufbahn, z. B. Sesselbahn, wird das Fahrzeug am Seil fest angeklemt, es wird von nur einem Förderseil bewegt, Zug- und Trageil sind hier das Gleiche. Diese robuste und störungsunanfällige Technik mit wenigen Bauteilen hat sich sehr bewährt. Bei kuppelbaren Systemen gibt es zwei unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten. In der Station wird das Fahrzeug von der Stationsumlaufgeschwindigkeit ( $< 0,5$  m/s) mit Hilfe einer Beschleunigungsstrecke auf die Förderseilgeschwindigkeit (bis 6 m/s) beschleunigt und durch Schließen des Klemmmechanismus mit dem Seil verbunden. In umgekehrter Richtung bei Fahrtende findet das Auskoppeln der Bahn vom Seil statt. [nach Gün13]

Die Einseilbahnen MES 200/400/500 der Firma Wyssen Seilbahnen AG aus der Schweiz bieten Lösungen für den Materialtransport in schwer zugänglichem Gelände, beispielsweise für abgelegene Ferienhäuser und Hütten, Baustellen, Weinberge oder zur Wartung von Lawinenverbauungen. Für den Personentransport ist die Seilbahn nicht vorgesehen. Diese Einseilbahn besteht aus einem Tragkorb und einem Fahrgestell. Der Tragkorb in verschiedenen Größen, unterhalb des Fahrgestells, transportiert die Ladung. Das Fahrgestell verfügt über zwei Laufrollen. Diese Bahn ist keine herkömmliche Einseilbahn, vielmehr verfährt die Bahn selbständig auf dem Seil und ist nicht an diesem festgeklammert. Sie besitzt eine Antriebsrolle, welche von einem Benzinmotor am Fahrgestell mit einer Leistung von 9,5 KW angetrieben wird (siehe **Abbildung 2.22**). Die Bahn läuft auf einem 11, 16 oder 20 mm dicken Stahlseil, je nach Nutzlast (MES 200 – Nutzlast 200 kg + Eigengewicht 263 kg / MES 400 – Nutzlast 400 kg + Eigengewicht 575 kg / MES 500HY/2 – Nutzlast 500 kg + Eigengewicht 455 kg). Da ein Benzinmotor als Antrieb dient und auf der Bahn mitfährt, ist nur ein Trageil nötig, ein Zugseil ist überflüssig. Die maximale Höchstgeschwindigkeit beträgt 0,7 m/s, wobei Berg- und Talfahrten automatisch möglich sind. Die Bahn soll einfach zu bedienen sein, lediglich der Motor muss gestartet und eingekuppelt werden, damit die Bahn selbständig zur Gegenstation fährt. Der Motor stoppt am Seilende mit Hilfe eines Puffers, die Bremse wird zeitgleich betätigt. Es sind Steigungen von bis zu 100 % und wechselnde Gefälle mit Zwischenstationen möglich. Durch das direkte Spannen des Trageils mittels Greifzug kann die Einseilbahn der Firma Wyssen Seilbahnen AG schnell und einfach installiert und montiert werden. Sie weist niedrige Betriebskosten auf. [nach Wys23]

Charakteristisch ist bei der Wyssen Einseilbahn die Seilführung an den Rollen: Das Seil umschlingt zwei Tragrollen und wird dazwischen über eine Antriebsrolle geführt (siehe **Abbildung 2.23**). Durch diese Anordnung wird ein großer Umschlingungswinkel erreicht, so dass das Antriebsmoment zuverlässig übertragen werden kann. [nach Wys23]

Diese Anordnung kann nicht für die zu entwickelnde Einschienen-Hängebahn verwendet werden, da bei einem derartigen Antrieb ein Fahren auf einer massiven Schiene nicht möglich ist. Auch können keine Weichen oder Abzweigungen verwendet werden für weitere Streckenabschnitte.



**Abbildung 2.22:** Wyssen Einseilbahn [Wys23]



**Abbildung 2.23:** Seilführung bei der Wyssen Einseilbahn [Wys23]

Für höhere Ansprüche (Nutzlast, Fahrgeschwindigkeit, größere Distanzen und mehrere Zwischenstationen) bietet die Firma Wyssen die Umlaufseilbahn. Der Umlaufantrieb (umlauendes Seil) ist elektrisch oder mit Benzin-/Dieselantrieb ausgeführt und an der Tal- oder Bergstation platziert. [nach Wys23]

Die Firma Konrad Forsttechnik GmbH aus Österreich bietet ebenfalls einen funkferngesteuerten und selbstfahrenden Laufwagen (WOODLINER) an, ohne Zug-, Rückhol- oder Hilfsseile. Dieser fährt mit einer Streckenautomatik auf nur einem Tragseil von 22 mm mit maximal 6 m/s, besitzt ein Gewicht von 1.250 kg und wird von einem Volkswagen 4-Zylinder-

Turbodieselmotor angetrieben (75 KW, 285 Nm). Zum Fahren auf dem Stahlseil werden zwei hydraulisch angetriebene und umschlungene Antriebstrummeln verwendet. Der Laufwagen WOODLINER wurde für die Bergauf-, speziell aber für die Bergab- und Horizontalbewegung konstruiert. Durch das integrierte Hydrauliksystem, bestehend aus Radialkolbenmotoren und einer Axialkolbenpumpe im geschlossenen Ölkreislauf, ist das gleichzeitige Fahren auf dem Tragseil sowie das Heben und Senken von Lasten (Seilwindenzugkraft 30 kN), möglich. Die Abmessungen des Laufwagens sind mit 2.100 x 650 x 1.570 mm (LxBxH) angegeben. In **Abbildung 2.24** ist der WOODLINER der Firma Konrad Forsttechnik abgebildet. [nach Kon23]



**Abbildung 2.24:** WOODLINER der Firma Konrad Forsttechnik GmbH [Kon23]

Auch diese interessante Lösung ist wesentlich größer und auch schwer. Außerdem kann nur ein Tragseil befahren werden, aber keine Schienen oder Abzweigungen, so wie es die angestrebte Lösung beabsichtigt.

### 2.5.3 Zweiseilbahn

Bei Zweiseilbahnen werden ein Tragseil und ein Zugseil verwendet, während bei Einseilbahnen das eine eingesetzte Seil beide Funktionen übernimmt. Das Tragseil ist in einer Station fest verankert und in der anderen mittels Gewichten vorgespannt. Zum Teil kommen auch hydraulische Spannvorrichtungen zum Einsatz. Das Tragseil liegt an den Stützen auf einem Tragseilträger auf. Das Zugseil bewegt sich mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit und fördert so die Gondeln im eingekuppelten Zustand stetig weiter. In den Stationen fahren die Fahrwerke der Gondeln vom Tragseil auf eine massive Tragschiene und werden dann vom Zugseil entkoppelt. Um die Förderung wieder aufzunehmen werden sie erneut mit dem Zugseil gekoppelt und fahren dann in die andere Station. [nach Lei23]

Neben den Zweiseilbahnen existieren auch Dreiseilbahnen mit zwei Tragseilen. Hierdurch ergibt sich eine größere Windstabilität, erhöhte Laufruhe und eine höhere Sicherheit. [nach Lei23]

**Abbildung 2.25** zeigt eine Dreiseilumlaufbahn.



**Abbildung 2.25:** Dreiseilumlaufbahn der Firma Leitner und Laufwerk [Lei24]

Bezogen auf die zu entwickelnde leichte Elektrohängebahn ist die Größenordnung der Zwei- oder Dreiseilbahnen eine erheblich andere. Interessant ist jedoch die Möglichkeit, in den Stationen von dem Tragseil auf eine massive Schiene zu wechseln. Da die zu entwickelnde Hängebahn wesentlich geringere Ansprüche an die Sicherheit stellt, wird hier zunächst eine eigene Lösung angestrebt. Weiterhin besteht der Unterschied, dass die zu entwickelnde Bahn selbsttätig fahren soll, während die Zweiseilbahn das Zugseil als Antriebsvorrichtung benötigt.

#### 2.5.4 Schleppaufzug

Schleppaufzüge, beispielsweise Skilifte, sind Seilbahnen, die in der Regel Personen mit angeschnallten Skiern bergauf ziehen. Die Personen halten sich an entsprechenden Zugvorrichtungen fest, die mit dem Zugseil verbunden sind. Damit entspricht der prinzipielle Aufbau der Einseilbahn. **Abbildung 2.26** zeigt einen Schlepplift der Firma Doppelmayr [nach Dop22].

Ausgehend von Schleppaufzügen ergeben sich wenige auf die Hängebahn übertragbare Technologien.



**Abbildung 2.26:** Beispiel eines Schleppaufzuges, Skilift der Firma Doppelmayr [Dop22]

### 2.5.5 Drohnen als Ersatz für die EHB

Als Ausblick und zum Vergleich soll an dieser Stelle die Drohnentechnologie (beispielsweise Multicopter) aufgeführt werden. Sie gilt als innovative Fördertechnik und bedeutende technologische Innovation der letzten Jahre. Durch die Nutzung des Luftraumes ergeben sich völlig neue Transportwege. Zukünftig könnten immer mehr Drohnenflüge Aufgaben in der Logistik übernehmen. Dabei haben diese nicht nur Vorteile. Die Akku-Kapazität reicht meist nur für wenige Minuten. Sie können oft nur eine Last oder zumindest nur wenige Mengen auf einem Flug mitführen. Vor allem beim Pakettransport wird es voraussichtlich stets kostengünstiger und klimafreundlicher sein, Sendungen zu bündeln in einem vollen Transportfahrzeug mit Elektroantrieb und hunderten Paketen sowie einer gut geplanten Route. Trotz technischer Weiterentwicklung und Machbarkeitsstudien wird es Probleme geben mit der Flugsicherung und der Flughöhe. In der Europäischen Union sind Flüge außer Sicht bisher nur mit Ausnahmegenehmigungen möglich. Die Lieferung an private Endkunden per Flugroboter ist zu teuer. Weiterhin führt Lärmbelastung und fehlende Akzeptanz bei der Bevölkerung zu Ablehnung. Erste Bürgerinitiativen gegen Drohnenflüge in deren Nachbarschaft werden gegründet. Bisher hat aber keine Lieferdrohne den kommerziellen Betrieb aufgenommen. Stattdessen werden immer mehr Projekte beendet. Die Deutsche Post DHL Group hat ihr Paketdrohnen-Projekt "Paketkopter" eingestellt, ebenso wie ein Medikamentenversand-Pilotprojekt in Tansania. Die Drohnenprojekte und Flüge von Medikamenten zur Nordseeinsel Juist und die Paketzustellung an Kunden in Oberbayern per Drohne kamen über den Versuchsstatus nicht hinaus. Die Entscheidung, das Paketdrohnen-Projekt zu beenden, spiegelt die realen Herausforderungen und Begrenzungen wider, denen Lieferdrohnen in der

Praxis gegenüberstehen, insbesondere in Bezug auf regulatorische Hürden, begrenzte Nutzlast und Akzeptanzprobleme. Dies erlebt auch die Firma Amazon mit ihren Drohnen-Paketlieferungen in US-Städten. Es nehmen nur sehr wenige Haushalte an den Pilotprogrammen teil, in manchen Städten weniger als zwei Kunden. Die Zustellung per Drohne ist aufgrund von Einzelerlaubnissen und Einschränkungen auch in den USA stark begrenzt. Die Drohnen dürfen nur mit spezieller Erlaubnis über Menschen und Straßen fliegen, maximal 30 Meter vom Piloten entfernt sein und erfordern bis zu sechs Personen pro Flug. Zusätzlich kommen Bedenken der Anwohner dazu, dass Drohnen abstürzen könnten. [nach FNS+20], [nach Wes21], [nach Fai21], [nach Hei21], [nach Hei23b]

Trotz alledem wächst die Branche. Denn in anderen Bereichen ist die Anwendung von Drohnen vielversprechender, z.B. für Kurierdienste zu abgelegenen Orten wie kleinen Inseln oder Bergdörfern. Solche Gegenden mit wenig Infrastruktur profitieren von der Entwicklung der Drohntechnologie, dort kann die Drohne eine sinnvolle Ergänzung sein. Auch bei der zeitkritischen Versorgung mit Medikamenten ergeben Drohnenflüge Sinn. [nach Wes21], [nach Fai21]

Aber auch bei der Optimierung des innerbetrieblichen Transports sollen Drohnen mehr und mehr zum Einsatz kommen. Sie können als eine wirtschaftliche Alternative zu konventionellen Transportsystemen bei zeitkritischen Transporten dienen. Drohnen haben dabei nur eine geringe Traglast und hohe Betriebskosten. Mit einer Analyse zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von Drohnen gegenüber konventionellen Transportsystemen befasst sich die Quelle [FNS+20]. Diese zeigt, dass der Einsatz von Drohnen für den innerbetrieblichen Materialtransport kosteneffizienter sein kann als der Einsatz herkömmlicher Transportsysteme. Obwohl die Nutzlast gering ist, ermöglicht die deutlich höhere Geschwindigkeit von Drohnen einen schnelleren Transport. Vor allem bei zeitkritischen Transporten und über große Entfernungen können Drohnen wirtschaftlicher sein. Dabei sind die Akkulaufzeiten begrenzt, in manchen Fällen mit hoher Nutzlast auf nur noch 18 Minuten. In bestimmten Szenarien kann der Einsatz von Drohnen wirtschaftlich sinnvoll sein. Eine Universallösung für alle innerbetrieblichen Aufgaben stellt diese allerdings nicht dar. Mit der Erhöhung der Nutzlast und der Leistungsdichte der Batterien werden zukünftig sicher weitere Anwendungsfälle und Aufgaben definiert. [nach FNS+20]

In Forschungsprojekten werden weitere Anwendungsszenarien für den Warentransport durch Drohnen untersucht, wie beispielsweise beim Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen (Logistik in die Luft verlagern) im Rahmen von „Digital in NRW“. In der Demonstrationsfabrik ist der innerbetriebliche Lufttransport von Kleinteilen mit autonomen Flugrobotern bzw. Drohnen gelöst. Mit dieser Möglichkeit lässt sich ein Teil der Logistik vom Boden in die Luft verlagern sowie Material just-in-time an den Montageplatz bringen.

Die Drohne agiert unabhängig von festen Routen, finden den Weg selbstständig und kann Lasten von bis zu 5 kg transportieren. [nach Dig22]

Auch Thyssenkrupp Steel verwendet Drohnentechnik in einer Testphase dazu, Laborproben (Eisenerz und Kokscoke) aus der Luft anzuliefern, siehe **Abbildung 2.27**. Eine Drohne mit einer Flügelbreite von 1,2 m kann dabei eine Masse von ungefähr 4,5 kg transportieren und Höhen von bis zu 80 m auf dem 10 km<sup>2</sup> großen Werksgelände erreichen. Die Drohne holt dabei Rohstoff-Proben und bringt diese zum entfernten Zentrallabor, was vorher ein Mitarbeiter mehrmals täglich mit dem PKW realisierte. Über einen zentralen Leitstand haben Mitarbeiter die Flugbahn der Drohne immer im Blick. Für die Sicherheit stehen 6 Notfalllandeplätze entlang der Strecke jederzeit zur Verfügung. Des Weiteren gibt es Fallschirme, eine Redundanz der Flugsteuerung und eine Kombination aus optischer Navigation und Navigation per GPS sowie verschlüsselte Software. Bis zu 16 Drohnen können parallel betrieben werden. Es gibt viele Vorteile durch die neue Drohnentechnik, allerdings genauso viele Hindernisse und Sicherheitsbedenken. So liegt ein Problem darin, dass Drohnen sich immer in Sichtweite der Piloten befinden müssen und nicht über Personen bzw. Personengruppen fliegen dürfen sowie auch nicht im kontrollierten Luftraum. [nach Gra19], [nach Thy19]



**Abbildung 2.27:** Drohne am Thyssenkrupp Steel Werk in Duisburg [Gra19]

Der derzeitige Stand der Technik auf dem Gebiet der Drohnen zeigt, dass hier noch ein erheblicher Entwicklungsaufwand besteht. Die Drohnentechnik ist voraussichtlich insbesondere unter Sicherheitsaspekten in den nächsten Jahren noch nicht zuverlässig einsetzbar. Auch viele rechtliche Aspekte müssen noch geklärt werden, da in Deutschland und Europa Drohnen bisher keine generelle Flugerlaubnis haben, sondern nur Ausnahmegenehmigungen. Insofern ist die Entwicklung einer leichten Hängebahn auch unter der Berücksichtigung des Standes der Technik auf dem Gebiet der Drohnen durchaus gerechtfertigt.

## 2.6 Wertung des Standes der Technik bei Schienen- und Seilbahnen

Aus dem betrachteten Stand der Technik ergibt sich keine Lösung, die unmittelbar auf die zu entwickelnde leichte Elektro-Hängebahn übertragbar ist. Es sind nur relativ wenige Detaillösungen bekannt und gefunden worden, die aber bezogen auf das Entwicklungsprojekt nur marginale Vorteile bringen. Insofern ist es sinnvoll und erforderlich, im nächsten Schritt die Entwicklung aufzunehmen. Dabei ist insbesondere der in [Ayl15] herausgearbeitete Ansatz (eine leichte Elektrohängebahn für geringe Lasten, robust, Fahrbahn aus Schienen und Seilen, vollautomatisch und autonom fahrende Laufkatze, Akkubetrieb, hohe Flexibilität, passive Weichen, alle Sensorik in der Laufkatze, modulares und günstiges Streckensystem) zu verfolgen, wobei einerseits der Schritt von der Simulation zum realen Objekt getan werden muss, andererseits aber bestimmte dort simulierte Funktionen auszuschließen sind. Unter diesen Voraussetzungen erfolgen im Kapitel 3 die Definition der Problemstellung und der Zielsetzung.

## 3 Problemstellung und Zielsetzung

### 3.1 Problemstellung

Der Stand der Technik hat deutlich gezeigt, dass eine Kombination aus einer autonomen, selbstfahrenden und selbststagiierenden Elektrohängebahn für kleine Lasten und weite Strecken sowie einem akzeptablen Preis für interessierte Kunden am Markt nicht verfügbar ist. Weiterhin lieferten die Recherchen keine Lösung seitens einer Hängebahn für den innerbetrieblichen Transport, welche die Möglichkeit aufweist, dass sowohl massive Schienen als auch Seile und Weichen befahren werden können.

Der Fokus der Arbeit liegt deshalb auf geringen Transportmassen der EHB von bis zu 20 kg, der Realisierung von weiten Strecken, theoretisch unbegrenzter Streckenlänge und akzeptablen Kosten. Für das Gesamtsystem für eine mittelgroße Halle soll eine erste Obergrenze von ca. 50.000 € möglichst nicht überschritten werden. Wie die Recherche offenbarte, sind die meisten Elektrohängebahnen (EHB) für schwere Güter ausgelegt, wie die Beispiele in Kapitel 2 verdeutlichen. Hier kommen Varianten mit einer Traglast von 1.500 kg und 3.000 kg, teilweise bis zu 10.000 kg, zum Einsatz. Wegen der hohen Lasten und der dadurch notwendigen Stabilität ist auch das Eigengewicht der EHBs hoch, was Veränderungen, Umbauten und den Montageaufwand aufwendiger gestaltet und die Kosten erhöht. Die zugehörigen Schienensysteme sind massiv und starr für diesen Einsatz sowie für die hohe und schwere Förderleistung ausgelegt. Oft geschieht die Stromversorgung der Antriebe durch integrierte Stromschienen. Die anschließende Anpassung gestaltet sich oft schwierig und ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Weil diese Systeme für schwere Güter ausgelegt sind, ist der Transport von kleineren Lasten unwirtschaftlich.

Gesucht wird also ein Konzept für ein innerbetriebliches Transportsystem, eine Elektrohängebahn, welche sich durch nachstehende Punkte auszeichnet:

- Eigengewicht der Laufkatze < 20 kg,
- Transport kleiner Lasten, maximale zu transportierende Masse 20 kg,
- bodenfreier Transport von Gütern und optimale Ausnutzung von Hallen- und Produktionsflächen auch über mehrere Etagen,
- Steigung: 6° Festforderung, Wunsch möglichst mehr,
- Geschwindigkeit: ca. 1 m/s freie Fahrt,
- Kurvenradius: 1 m Festforderung, Wunsch 50 cm,
- Fahrtrichtung: vorwärts Festforderung, Wunsch auch rückwärts,
- Realisierung von Transportwegen von mehreren Kilometern möglich,

- ein günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis (der Meter Schiene soll weniger als ca. 50 € kosten, einschließlich Ständer),
- schneller, einfacher und flexibler Aufbau durch ein Baukastensystem,
- autonomes Agieren des Transportsystems mit Hilfe eines eigenen Akkus sowie entsprechender Sensorik und Aktoren an der Laufkatze,
- Schienen wahlweise als massive Elemente und als Seil,
- passives Schienensystem.

### 3.2 Zielsetzung und Vorgehen

Ziel dieser Arbeit ist es, wie in Kapitel 1 bereits erläutert, ein neues Elektrohängebahn-System zu entwickeln und dafür ein neues Gesamtsystem aufzuzeigen. Dabei sollen Reibverhältnisse in der Ebene und an Steigungen zwischen Antriebsrad und Fahrbahn untersucht werden. Es soll ein Streckensystem zum Einsatz kommen, das aus einem flexibel einsetzbaren und leicht anpassungsfähigen Führungssystem aus Seilen und Norm-Stahlprofilen, aus erforderlichen Verzweigungen wie Weichen sowie einer Ladestation für den Akku der Transporteinheit besteht. Das Elektrohängebahn-System muss für den Transport leichter Lasten (bis 20 kg) geeignet, flexibel einsetzbar und nachträglich in bestehende Hallen oder Produktionsstätten integrierbar sein.

Das EHB-System wird in Kapitel 4 ausführlich und mit allen wichtigen Komponenten dargestellt, sodass ein Gesamtüberblick über die neue Elektrohängebahn mit ihren Komponenten für kleine Lasten entsteht. Dabei werden das Laufwerk, das Schienensystem mit Geraden und Kurven, Steigungen und Gefälle, die Weiche und das Akkuwechsel-System dargestellt.

Kapitel 5 und 6 erörtern, wie die Reibverhältnisse zwischen Antriebsrad und Fahrstrecke (Seil und Schiene) bestmöglich gestaltet werden können. Diese Kapitel werden Empfehlungen geben, wie Steigungen und Gefälle bis  $20^\circ$  auf Schienen und sogar  $90^\circ$  auf Seilstrecken überwunden werden können. Dabei werden Versuche mit zwei Prototypen der Elektrohängebahn an verschiedenen Fahrbahnen, Steigungen, mit und ohne Last, durchgeführt. Zu analysieren ist der Schlupf zwischen Antriebsrad und Fahrbahn.

Anschließend wird in Kapitel 7 das System wirtschaftlich betrachtet. Kapitel 8 enthält eine Zusammenfassung und es wird ein Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsarbeiten gegeben.

## 4 Versuchsaufbau

Die Elektrohängebahn bzw. das Gesamtkonzept ist im Rahmen des AiF IGF Projektes 19265 mit dem Titel "Untersuchungen der Umsetzbarkeit in Bezug auf Flexibilität, Anpassungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit von ultraleichten Hängebahnen" entwickelt worden.

Ziel des AiF IGF Gemeinschaftsforschungsprojektes mit der Universität Duisburg-Essen war es, unter anderem ein kompaktes und modulares Schienen- und Seil-System für die Elektrohängebahn bei geringen Kosten zu schaffen. Es besteht die Zielsetzung, dass aufgrund wirtschaftlicher Kriterien die gesamte Elektronik, Sensorik und Aktorik sich nicht in der Fahrbahn befinden, sondern in der Laufkatze selbst. Eine Streckenerweiterung für die Elektrohängebahn soll schnell, mit wenig Aufwand und kostengünstig möglich sein. Des Weiteren wird angestrebt, dass das Streckensystem aus einem hoch flexibel einsetzbaren sowie leicht anpassungsfähigen Führungssystem aus Seilen und Profilen besteht, das für den Transport leichter Waren und Gegenstände ausgelegt ist.

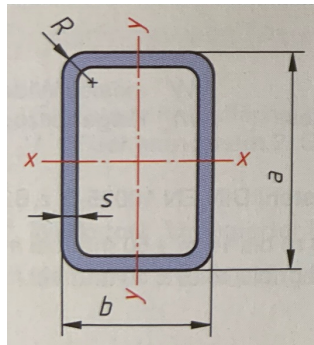
Die folgenden Kapitel stellen die Komponenten der Elektrohängebahn dar, Fahrbahn, Aufbau der Laufkatze bzw. Transporteinheit, Klemmen und Stützen, Weiche sowie die Akku-Wechselstation.

### 4.1 Fahrbahn, statisch, oval

#### 4.1.1 Geraden - gleichmäßige Fahrt

##### Gerade Stahlschiene

Lange Strecken sollen möglichst mit Geraden realisiert werden. Hier hat sich nach einigen Vorversuchen das Rechteckrohr aus Stahl als gute Lösung herausgestellt. Diese Profile sind günstige Halbzeuge und werden als übliche 6 Meter Stangenware geliefert, was die Kosten senkt. Im Laufe des Projektes wurde sich für das Stahl-Profil (EN 10305–5, DIN 2395) mit den Abmessungen 80 x 20 x 2 mm entschieden, siehe **Abbildung 4.1** und **4.2**. Dieses Material ist im Stahlbau üblich und lässt sich gut schweißen, spanend bearbeiten, kalt sowie warm umformen und hat eine gute Festigkeit für einfache Maschinenteile und Schweißkonstruktionen. [nach GHK+17]



**Abbildung 4.1:** rechteckiges Hohlprofil  
[GHK+17]



**Abbildung 4.2:** Stahl Rechteckrohr

Durch die standardmäßige Profillänge von 6 Metern werden die Abstände zwischen den Stützen bzw. den Abstützungen (Haltevorrichtung) bereits vorgegeben. Versuche mit 12 Meter langen Rechteckrohr haben gezeigt, dass die Laufkatze beim Überfahren mit voller Beladung Schwierigkeiten bekommt, da die Profile ausknicken und sich aufgrund der zu hohen Belastung tordieren, siehe dazu die praktischen Versuche in **Abbildung 4.3** mit der Tabelle für die gemessenen Höhen. Bei der 6 Meter langen Schiene treten diese Probleme nicht auf. Der Durchhang der Schiene fällt minimal aus und die Laufkatze droht nicht von der Schiene zu kippen. Die Werte wurden in einem Experiment grob mit einem Gliedermaßstab ermittelt. Dabei war die 6 Meter bzw. 12 Meter lange Schiene an zwei Stützen angeschraubt und mit der beladenen Elektrohängebahn befahren, siehe folgende Abbildung. [nach BM19]

Belastung	Höhe der 12 m Schiene	Höhe der 6 m Schiene
Ideal (ohne Durchhang)	1.950 mm	1.950 mm
Unbelastet (nur Eigengewicht)	1.805 mm	1.950 mm
Fahrwerk	1.755 mm	1.935 mm
Fahrwerk + 10 kg	1.705 mm	1.930 mm
Fahrwerk + 20 kg	1.645 mm	1.925 mm

	<p>Schwarz: ideal  Violett: unbelastet  Orange: Fahrwerk  Blau: Fahrwerk + 10 kg  Grün: Fahrwerk + 20 kg</p>
--	--

**Abbildung 4.3:** Durchbiegung der 6 m und 12 m Schiene (Berechnung s. Anhang)

**Tabelle 4.1:** Gegenüberstellung Durchbiegungen 6 m und 12 m Schiene (Berechnung s. Anhang)

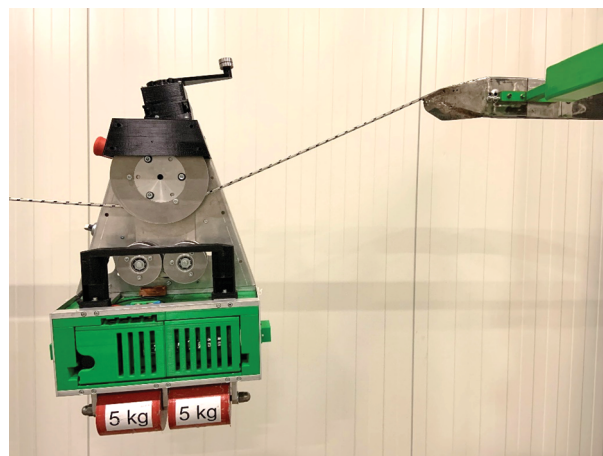
Stahl Rechteckrohr	Durchbiegung Einzellast (Fahrgestell)	Durchbiegung Streckenlast (Schiene)	Durchbiegung gesamt
6 m Schiene	31,37 mm	8,87 mm	<b>40,24 mm</b>
12 m Schiene	250,97 mm	141,85 mm	<b>392,82 mm</b>

Wie in der Tabelle in **Abbildung 4.3** und **Tabelle 4.1** deutlich ersichtlich ist, wurde aufgrund der Ergebnisse zunächst das 6 m Schienen-Teilstück gewählt, was die Abstände zwischen den Stützen/Ständern oder Haltern vorgibt. Eine wirtschaftliche Betrachtung wird im Kapitel 7 durchgeführt.

### Seil als Alternative

Als günstige Alternative zu Schienen ist die Idee der Verwendung von Kunststoff-Seilen im Projekt entstanden, siehe **Abbildung 4.4**. Vor allem moderne Kunststoffseile haben ein geringes Gewicht, eine hohe Zugfestigkeit, sind dehnungsarm, korrosionsbeständig, waschbar und haben als großen Vorteil gegenüber Stahlseilen die hohe Flexibilität und den viel geringeren Biegeradius. Die Seile könnten Schienen als Gerade ersetzen und wären wesentlich kostengünstiger. Ein Seil kann über eine fast beliebig lange Distanz gespannt werden. Aufgrund des geringeren Gewichts werden die Stützpfiler weniger belastet, wobei jedoch die Seilspannung, Seilspannvorrichtungen und die auftretenden Kräfte dringend mit zu berücksichtigen sind. Die entstehenden Seilkräfte sind stark davon abhängig, wie hoch die Seilvorspannung ist. Diese Seilvorspannung hat wiederum einen Einfluss auf den Seildurchhang. Ist der Seildurchhang zu groß, könnte die Hängebahn oder die zu transportierende Last den Boden berühren. Außerdem darf der Seilwinkel nicht zu groß sein, damit das Fahrwerk die Steigung vom Seil zur Schiene überwinden kann.

Mit Vorsicht sollte allerdings die UV- bzw. Witterungsbeständigkeit von Kunststoff-Seilen geprüft werden, da UV-Licht bzw. Sonnenlicht zu einer frühzeitigen und schnellen Alterung des Werkstoffs führt.



**Abbildung 4.4:** Seilfahrt der Elektrohängebahn

In **Abbildung 4.5** ist vereinfacht die Hängebahn als Masse dargestellt, wenn diese sich in der Mitte eines gespannten Seiles befindet. Für die vereinfachte Bestimmung der Seilkräfte ( $S_1$ ,  $S_2$ ) wird von einem masselosen sowie dehnstarrem Seil ausgegangen.

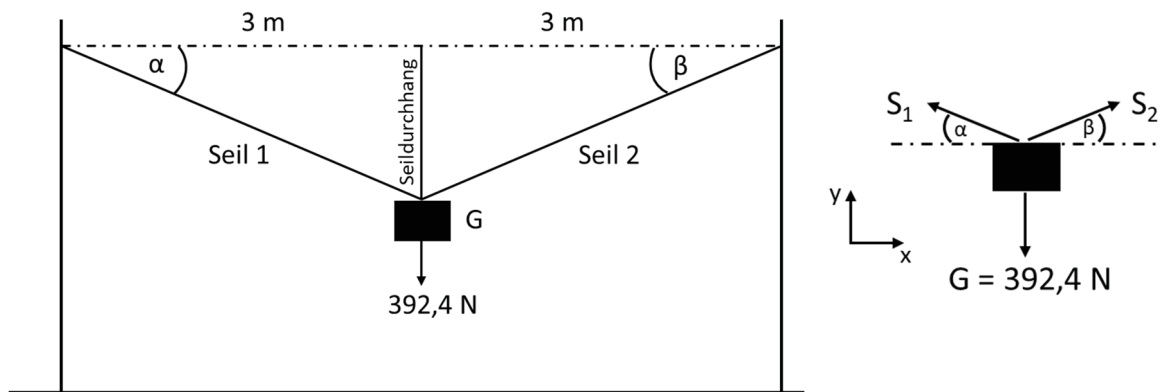


Abbildung 4.5: Kräfte am Seil

Wenn die Hängebahn sich in der Mitte des Seiles befindet, sind die Seilkräfte  $S_1$  und  $S_2$  und die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  gleich groß. In **Tabelle 4.2** sind die Seilkräfte für mehrere Winkel zum Vergleich aufgelistet.

**Tabelle 4.2:** Seilkräfte in Abhängigkeit des Winkels für Gewichtskraft 392,4 N (Berechnung s. Anhang)

Winkel $\alpha$ und $\beta$	Seilkraft $S_1$ und $S_2$
1 °	11.242,00 N
5 °	2.251,14 N
10 °	1.129,87 N
15 °	758,06 N
20 °	573,65 N
25 °	464,25 N

Zur Berechnung des Seildurchhanges soll die **Abbildung 4.5** helfen. Dabei befindet sich die Hängebahn (dargestellt als eine Masse) in der Mitte des Seiles, da dort der größte Durchhang erwartet wird. Die Berechnung dazu ist in (1) angegeben. Auch hier wird nur die maximale Masse der Laufkatze betrachtet, nicht das Gewicht des Kunststoffseils. Aufgrund der Gewichtskraft von 392,4 N und einem masselosen Seil ergibt sich ein rechtwinkliges Dreieck. In **Tabelle 4.3** ist der Seildurchhang für verschiedene Seilwinkel und für zwei Abstände zwischen den Seilbefestigungen gegenübergestellt.

$$\tan \alpha = \frac{\text{Seildurchhang}}{3 \text{ m}} \rightarrow \text{Seildurchhang} = \tan(\alpha) \cdot 3 \text{ m} \quad (1)$$

**Tabelle 4.3:** Seildurchhang in Abhängigkeit des Winkels für Gewichtskraft 392,4 N

Winkel $\alpha$ und $\beta$	Seildurchhang 6 m Abstand	Seildurchhang 12 m Abstand
1 °	52,4 mm	104,7 mm
5 °	262,5 mm	524,9 mm
10 °	529,0 mm	1.058,0 mm
15 °	803,8 mm	1.607,7 mm
20 °	1.091,9 mm	2.183,8 mm
25 °	1.398,9 mm	2.797,8 mm

Die Werte zeigen deutlich, dass bei einem Seilwinkel von  $25^\circ$  bereits ein Seildurchhang von 1.399 mm bei der Hälfte eines über einen Abstand von 6 Meter gespannten Seiles entsteht, auf dem sich die Hängebahn mit Transportlast befindet. Wenn der Seilwinkel auf  $1^\circ$  reduziert wird, ist ein Seildurchhang von 52,4 mm vorhanden. Gleichzeitig steigen die Seilkräfte auf je 11.242 N für Seil 1 und Seil 2 an (siehe **Tabelle 4.2**), welche wiederum von der Seilbefestigung, den Verankerungen und den Fundamenten aufgenommen werden müssen und nicht zu vernachlässigen sind. Je länger das Seil, also der Abstand zwischen zwei Befestigungspunkten, umso größer fällt der Seildurchhang aus (siehe **Tabelle 4.3**) und umso höher müsste die Hängebahn fahren, um nicht den Boden zu berühren.

Da Seile nur Zugkräfte aufnehmen können, könnten diese lediglich die Geraden ersetzen, Kurven mit Radien im Streckenverlauf und Kreuzungen, die von der Elektrohängebahn befahren werden, sind damit nicht möglich. Hierfür wären wieder Stahlschienen mit einer Seilaufnahme und Seilspannvorrichtungen nötig, siehe dazu die nachfolgenden Kapitel.

Je nachdem wie hoch die Seilkräfte sind, muss die Bruchlast der verwendeten Seile dringend beachtet werden. Während Stahlseile eine Bruchlast von ca. 33,50 kN (für ein Seil aus Stahl C7 feuerverzinkt, 19 Einzeldrähte in zwei Lagen) haben, wird die Bruchlast für ein einfaches Kunststoffseil aus Polyester mit nur ca. 5-7 kN angegeben (geflochten). Hochwertige Tau-seile aus Aramid können eine Bruchlast von ca. 20 kN aufweisen, Hochleistungsseile aus speziellem „Dyneema“ (z.B. 12-fach geflochten) können sogar Bruchlasten aufweisen von 40 kN. Die Werte schwanken stark, je nach Hersteller und Produkt, und gelten für einen 6 mm Seildurchmesser. [nach Kan23], [nach Koe23]

#### 4.1.2 Kurven

Für Kurvenfahrten sind Segmente aus Stahlschienen für die Elektrohängebahn vorgesehen. Um diese problemlos befahren zu können, wird Flachstahl (Werkstoff S235JR) mit den Abmessungen 80 x 6 mm verwendet. Durch die Materialstärke von 6 mm kann mit Hilfe einer Biegevorrichtung ein Kurvenradius ohne Einsatz größerer Maschinen gut hergestellt werden. Auch wäre das Biegen eines Hohlprofils wesentlich komplizierter und das Verschweißen von zugesägten Hohlprofil-Einzelstücken viel zu aufwendig in der Fertigung. Der Flachstahl ist durch seine große Kippneigung für längere Strecken und Längen nicht geeignet, eignet sich aber für Kurven aufgrund der räumlichen Krümmung sehr gut, wie in **Abbildung 4.6** zu sehen ist. Kleine Kurvenfahrten und somit ein geringer Platzbedarf für die Elektrohängebahn können durch einen maximalen Radius von 500 mm realisiert werden. Die Höhe des Kurvensegmentes ist angepasst an das 80 x 20 x 2 mm Rechteckrohr aus Stahl für einen sauberen Übergang zwischen den Schienenabschnitten.



Abbildung 4.6: Kurvensegment

### 4.1.3 Berg- und Talfahrt

Die Hängbahn soll nicht nur in einer Ebene fahren, sondern auch Höhenunterschiede bewältigen können, um beispielsweise in einer Produktionshalle Transportgut in Montage- und Tischhöhe aufzunehmen und dann wieder oberhalb der Fertigungsmaschinen weiterzufahren. Ein weiteres Ziel ist das Überwinden von Etagen und Stockwerken in Häusern oder Hallen sowie dem Betriebsgelände. Dabei wurde eine Steigung bzw. ein Gefälle von mindestens  $16^\circ$  festgelegt, was die Elektrohängbahn mit maximaler Beladung von 20 kg bewältigen soll. Um die Machbarkeit am Demonstrator zu zeigen, ist ein Teilstück in der Versuchsstrecke an der TU Dortmund mit einer maximalen Steigung und Gefälle von  $18^\circ$  eingebaut, welches aus geschweißten und zugeschnittenen Rechteckrohren  $80 \times 20 \times 2$  mm besteht. Ziel war es, Brems- und Startversuche an der Steigung bzw. dem Gefälle mit und ohne Testgewichten aufzuzeigen. Dabei sind die Auswirkungen auf den Motor, die Gummirung der Laufrollen sowie auf den Akku sichtbar zu machen. In **Abbildung 4.7** ist das Berg- und Tal-Schienensegment dargestellt.

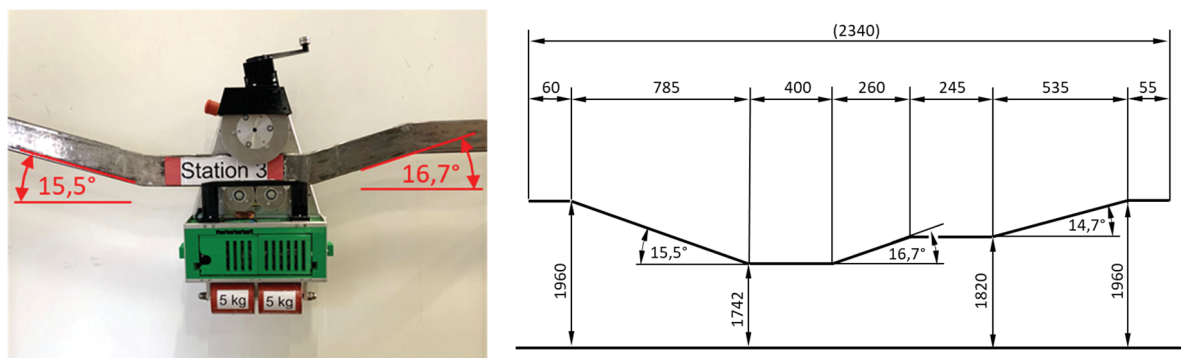
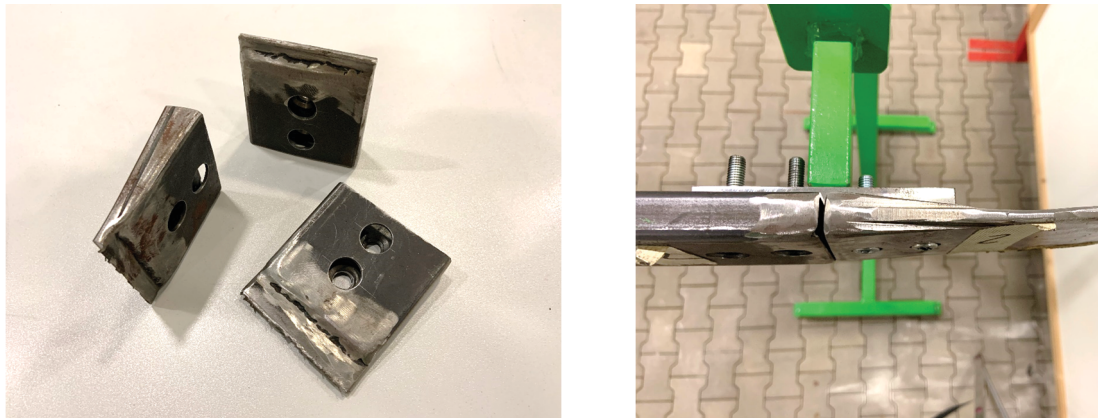


Abbildung 4.7: Schienensegment Berg- und Talfahrt links; rechts vereinfachte Skizze

#### 4.1.4 Übergänge

##### Schienen-Übergang

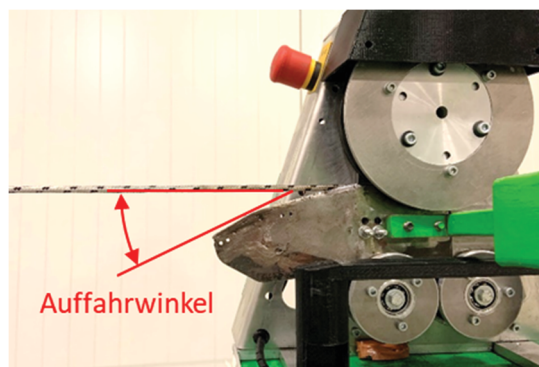
Der Übergang zwischen zwei Stahl Rechteckrohren (Gerade und Gerade) ist problemlos, da diese die gleichen Abmessungen haben. Der Übergang zwischen Kurven- und Geraden-Segmenten muss allerdings für eine ruhigere Überfahrt der Hängebahn gewährleistet sein, da das Geraden-Segment 20 mm breit ist (Rechteckprofil) und das Kurven-Segment aus einem 6 mm dicken Flachstahl besteht. Um ein sanftes Überfahren zwischen den Kurven und den Geraden zu ermöglichen, haben die Adapter eine Keilform. Dadurch wird der Querschnitt des Flachstahls kontinuierlich an den Querschnitt des Hohlprofils angepasst und die Bahn auf ihrer Spur zentriert bzw. stabilisiert, siehe **Abbildung 4.8**.



**Abbildung 4.8:** Übergang Geraden- und Kurvensegment

##### Seil-Schiene-Übergang

Wenn Seil und Schiene kombiniert werden sollen, ist ein Seilübergang und eine Seilspanvorrichtung nötig, damit die Hängebahn problemlos vom Seil auf die Schiene fahren kann. **Abbildung 4.9** zeigt die Lösung am Versuchsstand.



**Abbildung 4.9:** Übergang Seil-Schiene

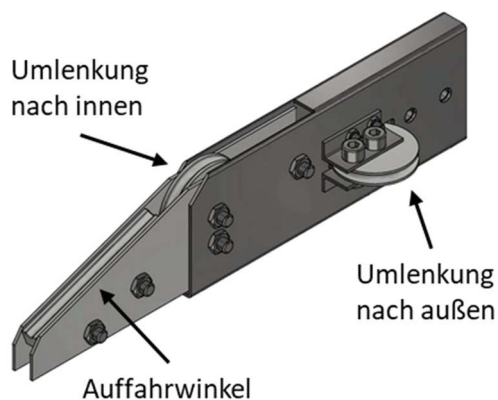


**Abbildung 4.10:** Seilspanvorrichtung und -befestigung

Dieses Übergangsstück hat mehrere Aufgaben: Zum einen die Führung, Zentrierung und Stabilisierung des Seils, zum anderen die Spannung des Seils, damit die Hängebahn mit Last den Boden nicht berührt. Das Seil muss befestigt und von der Schiene weggeführt werden. Ein Auffahrwinkel bzw. eine Auffahrhilfe gestattet ein besseres Überwinden und Auffahren der Elektrohängebahn vom Seil auf die Schiene.

Das Seil wird an einem Seilende verknotet und somit in dem Hohlprofil befestigt, an dem anderen Ende manuell gespannt und anschließend mit Drahtseilklemmen befestigt, siehe **Abbildung 4.10**. Hierbei besteht ein Problem darin, dass Seildehnungen durch unterschiedliche Lasten oder Seilalterung nicht korrigiert werden, das Seil also durchhängen kann und die Seilspannung abnimmt.

Eine Möglichkeit, dieses zu verbessern, zeigen die **Abbildungen 4.11** und **4.12**. Bei der „automatischen“ Seilspannvorrichtung erfolgt eine konstante Seilspannung mit Hilfe von Gewichten. Dabei wird das zu spannende Seil auf der einen Seite von dem Profil aufgenommen, nach innen geleitet und seitlich herausgeführt, damit die Hängebahn weiterhin über das Seil und das Profil fahren kann. Das seitlich herausgeführte Seil wird über drei Umlenkrollen am Ständer entlanggeführt (**Abbildung 4.12**) und mit Gewichten gespannt. Der Vorteil dieser Lösung ist die gleichmäßige Seilspannung durch die Gewichtskraft im Gegensatz zu Federn (Federkennlinie) oder sogar aufwendigen Pneumatik- und Hydrauliklösungen.



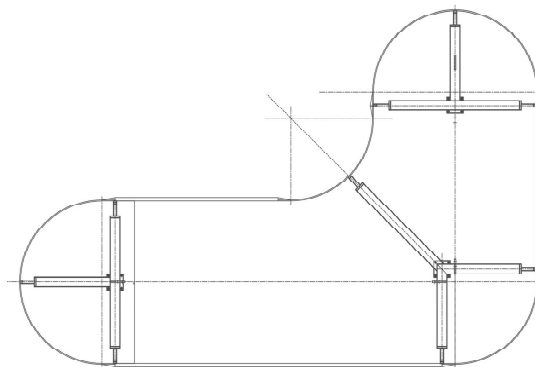
**Abbildung 4.11:** Neue Seilführung, -spannvorrichtung und -befestigung [Woh20]



**Abbildung 4.12:** Seilverlauf an Schienelement Umlenkung und Gewichte-Halterung [Woh20]

#### 4.1.5 Rundkurs - Versuchsstrecke

Für ausgiebige Tests wurden am Fachgebiet Maschinenelemente der TU Dortmund mehrere Versuchsstände gebaut, auf welchen die Elektrohängebahn ausgiebig getestet werden konnte. Diese Rundkurse bildeten die Grundlage für Versuche auf Geraden, Kurven, Schienen und einem Seilabschnitt. Eine erste Variante des Versuchsstandes hatte die Form eines L-förmigen Rundkurses, wie in **Abbildung 4.13** zu sehen ist. Dieser Versuchsstand mit einer Fahrbahnlänge von ca. 9,4 Metern wurde als Gemeinschaftsprojekt mit der Universität Duisburg-Essen 2018 auf der LogiMAT (Internationale Fachmesse für Intralogistik-Lösungen und Prozessmanagement) in Stuttgart verwendet und besteht aus 6 Kurvensegmenten, Geraden und einem kleinen Seilteilstück.



**Abbildung 4.13:** Versuchsstand auf der LogiMAT, *Länge* = 3.200 mm, *Breite* = 2.200 mm

Ein weiterer, größerer Versuchsstand, wurde auf der Logistics & Distribution in Dortmund 2019 (Fachmesse für die Intralogistik und Materialfluss) ausgestellt und stand anschließend an der TU Dortmund für weitere Versuche zur Verfügung. Dieser hat die Abmessungen von ca. 7.200 mm x 3.400 mm, siehe **Abbildung 4.14** links. Die Oberkanten der einzelnen Schienenelemente, welche aus den besagten rechteckigen Stahlhohlprofilen (20 x 80 x 2 mm) bestehen, befinden sich auf einer Höhe von ca. 1.950 mm. Lediglich die Berg- und Talfahrt (in **Abbildung 4.14** links hinten im Bild) weicht von dieser Höhe ab. Getragen werden die Schienenelemente durch vier Stützpfeiler. An diesen Stützpfeilern befinden sich außerdem

die Kurvensegmente. Diese ermöglichen es dem Fahrwerk, eine 90°-Kurve zu fahren. Um die Kurvensegmente problemlos befahren zu können, sind diese aus einem Flachstahl mit den Maßen 80 x 6 mm gefertigt.



**Abbildung 4.14:** links: Rundkurs EHB an der TU Dortmund; rechts: Skizze Rundkurs

In **Abbildung 4.14** rechts ist der Versuchsstand skizzenhaft dargestellt. Streckenabschnitt 1 ist die Berg- und Talfahrt, Abschnitt 2 die 6 m-Gerade (Schiene), im Abschnitt 3 befindet sich die Weiche (blauer Rahmen) und Abschnitt 4 ist das lange Seilstück. Die zwei längsten Streckenabschnitte erstrecken sich über eine Länge von 6.000 mm und 5.710 mm (Seil). Der kürzere Abschnitt im Bereich 3 sowie die Berg- und Talfahrt sind je 2.365 mm lang.

Der Rundkurs hat eine Gesamtlänge von fast 20 m. Um die Fahrzeit für diese Strecke zu ermitteln, werden mehrere Runden mit verschiedenen Einstellungen gefahren. Es wird eine Runde mit halber Geschwindigkeit (2:04 min) und eine Runde mit voller Geschwindigkeit (1:00 min) absolviert. Volle Geschwindigkeit kann dabei nicht immer gefahren werden, da die Pendelbewegungen der Elektrohängebahn in den Kurven zu groß wären, der Wert gilt also nur als Referenzwert ohne Transportgut. Des Weiteren wird eine Runde absolviert, bei der die Elektrohängebahn auf den geraden Strecken mit voller Geschwindigkeit und in den Kurven mit halber Geschwindigkeit fährt (1:26 min). Dazu wird die Geschwindigkeit 200 mm vor der Kurve halbiert und 200 mm nach der Kurve wieder erhöht. Die Berg- und Talfahrt wird in dieser Runde ebenfalls nur mit halber Geschwindigkeit befahren. Die Unterscheidung ist nötig, da die Elektrohängebahn in Kurven oder beim Befahren des Berg- und Talabschnittes bei hoher Geschwindigkeit ins Pendeln gerät. [nach BM19]

Die Elektrohängebahn erreicht eine maximale Geschwindigkeit von 0,35 m/s bei voller Geschwindigkeit und 0,17 m/s bei halber Geschwindigkeit.

## 4.2 Laufkatze

Die Laufkatze ist der Hauptbestandteil des Elektrohängebahn-Konzeptes. Sie soll alle wichtigen Funktionen und Komponenten beinhalten:

- autonomes Fahren,
- Sensoren und Aktoren,
- unabhängiges Agieren auf Schienen sowie Seilen,
- einen eingebauten Akkumulator aufweisen.

Am Fachgebiet Maschinenelemente der TU Dortmund wurden zu Versuchszwecken drei Versionen der Laufkatze gebaut, um Vorversuche durchzuführen und die Machbarkeit zu überprüfen. In den folgenden **Abbildungen 4.15 bis 4.17** sind die drei Versionen dargestellt, um die Entwicklung deutlich zu machen. Von der Variante 3 wurden zwei Exemplare am Fachgebiet Maschinenelemente konstruiert und gebaut.

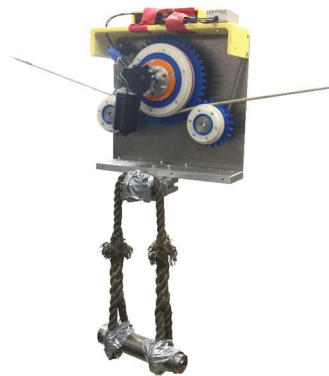


Abbildung 4.15: Laufkatze Version 1

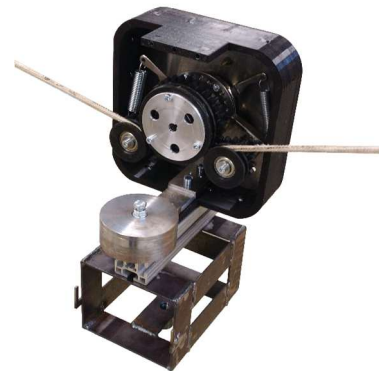


Abbildung 4.16: Laufkatze Version 2

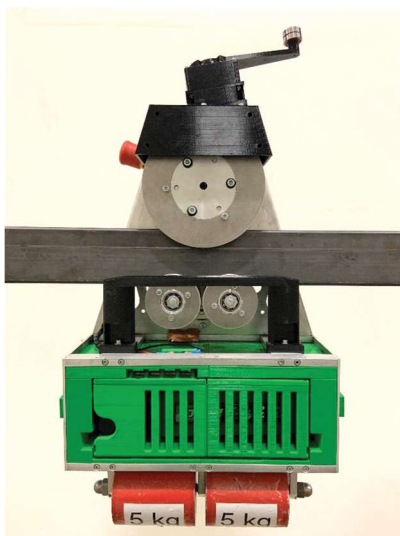
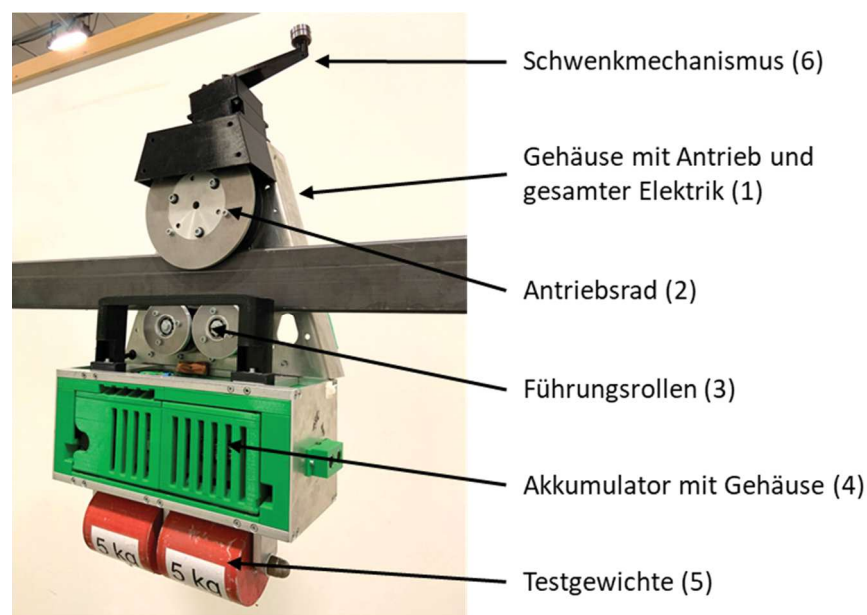


Abbildung 4.17: Laufkatze Version 3.1

Im Weiteren soll nun die letzte Version, Variante 3, im Detail betrachtet werden, da diese den vorerst letzten Entwicklungsschritt darstellt.

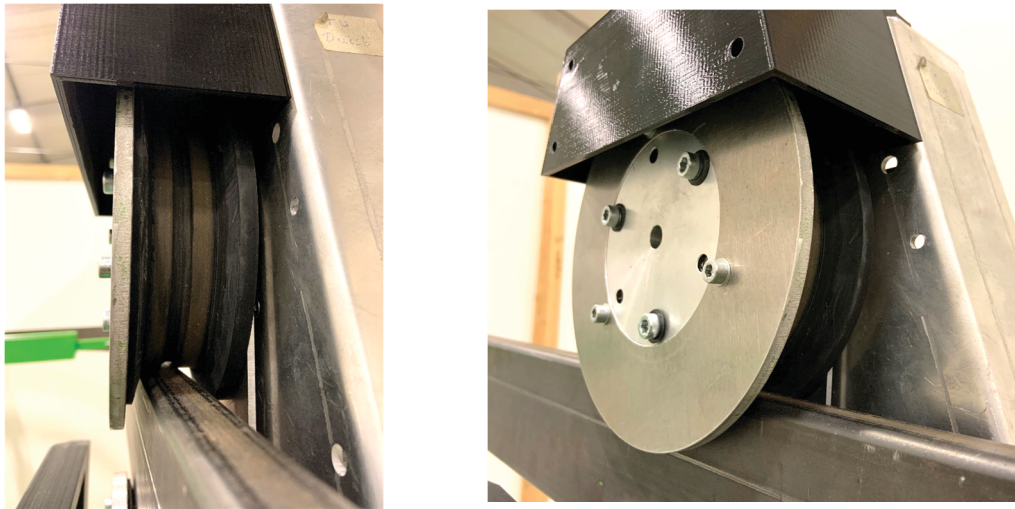
Die Elektrohängebahn besteht aus einem kompakten **Aluminiumgehäuse (Pos. 1, Abb. 4.18)**. Das komplette Gehäuse der Laufkatze, das auch die Grundplatte darstellt, ist aus einem 3 mm Aluminiumblech (Werkstoff AlMg3) ausgeschnitten (mittels Laser) und anschließend für mehr Stabilität gekantet. Ein zentrales Bauteil ist der Antrieb der Bahn. Dieser besteht aus einem Antriebsmotor und **Antriebsrad (Pos. 2)**. Den Antrieb der Laufkatze, Version 3.1, übernimmt ein 24 V-Gleichstrommotor mit integriertem Schneckenradgetriebe (Übersetzung 63:1) der Firma Bosch (Modell F006 B20 360, Datenblatt und Bild siehe Anhang), der das obere Antriebsrad in eine Drehbewegung versetzt. Motor und Laufrad sind über eine Welle-Nabe-Verbindung miteinander verbunden. Dabei ist der Gleichstrommotor mit dem Gehäuse verschraubt und das Laufrad stützt sich separat über zwei Kugellager auf einem Flansch ab. Eine Kraftübertragung erfolgt so auf das Gehäuse der Bahn und nicht auf die Motorwelle. Das aktuelle Gewicht der Laufkatze liegt bei ungefähr 13,5 kg inklusive Akkumulator.



**Abbildung 4.18:** Laufkatze (Technische Daten s. Anhang)

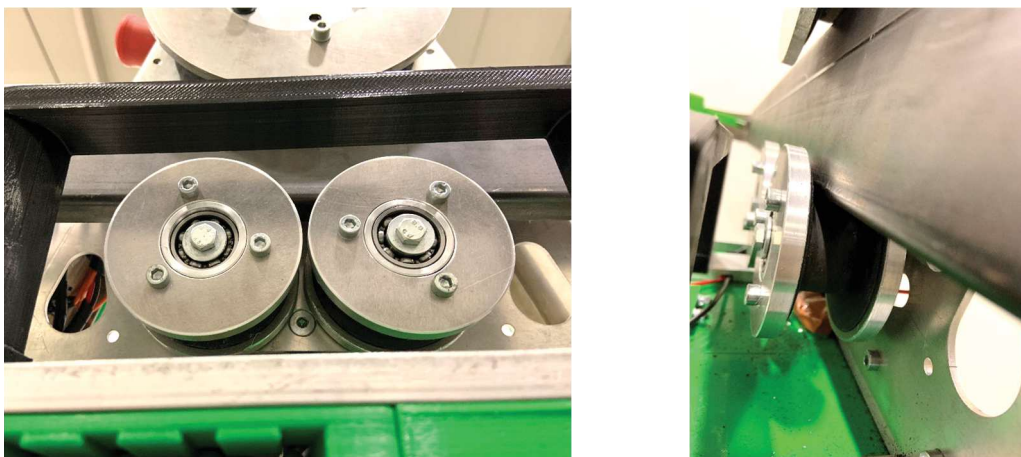
Die Lauffläche des **Aluminium-Antriebsrades (Pos. 2)** ist für eine möglichst schlupffreie Bewegung auf Schienen sowie Seilen gummiert. Die Gummi-Beschichtung erhöht den Reibkoeffizienten zwischen dem Antriebsrad und der Schiene stark, was bei Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen sowie bei den Berg- und Talfahrten vorteilhaft ist. Seitlich sind Borde angebracht, um die Bahn auf Geraden und in Kurven in der Spur zu halten. Weiterhin dienen sie als Entgleisungsschutz. Mittig ist eine 6 mm Nut in die Antriebsradlauffläche eingebracht, sie soll ein Befahren der 6 mm dicken Flachstahl-Elemente in Kurven und Weichen erleichtern. Die Nut zentriert die Bahn mittig. Ebenfalls soll das 6 mm Seil für die

Seilabschnitte in der Nut geführt werden. In **Abbildung 4.19** ist das Aluminium-Laufrad mit der Gummi-Beschichtung dargestellt.



**Abbildung 4.19:** Antriebsrad Elektrohängebahn

Unterhalb der Antriebsrolle sitzen die zwei nicht angetriebenen **Führungsrollen** (**Abbildung 4.18 Pos. 3** und **Abbildung 4.20**) aus Aluminium. Sie sind ebenfalls mit gummierten Laufflächen versehen, um die Fahrgeräusche zu minimieren. Diese führen die Elektrohängebahn seitlich vor allem in den Kurven. Die zwei Führungsrollen sind mit Kugellagern beweglich auf einem weiteren Blech gelagert, welches sich um das Antriebsrad auf einer Kreisbahn bewegen kann und mit einem Stift in einem Langloch in der Grundplatte (Gehäuse) geführt wird. Durch Schraubenfedern an dem Stift wird das Blech in die mittige Stellung gebracht, wenn keine weitere Last es daran hindert. Das drehbare Blech mit den Führungsrollen ermöglicht der Bahn das Befahren von Steigungen, wobei das Gehäuse und die darunter angebrachte Nutzlast in ihrer Ausrichtung waagrecht bleiben, siehe **Abbildung 4.21**.



**Abbildung 4.20:** Führungsrollen an der Laufkatze

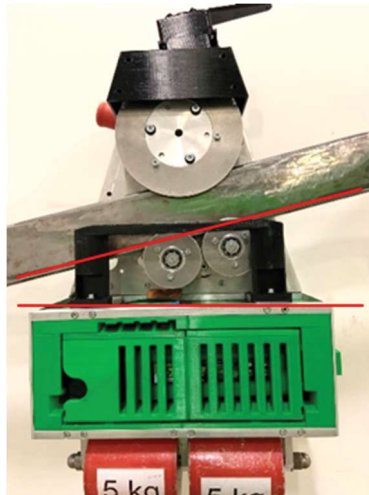


Abbildung 4.21: Berg- und Talfahrt: Ausgleich Schräglage

Unterhalb der Führungsrollen befindet sich der **Akkumulator** in einem Gehäuse (**Abbildung 4.18 Pos. 4**) mit zwei Befestigungs-Schnappverschlüssen links und rechts (siehe **Abbildung 4.22** Bild unten rechts). Dieses Gehäuse besteht außen aus verschraubten Aluminiumplatten und innen aus 3D-gedruckten Kunststoffteilen. Der Akkumulator befindet sich in einer separaten Kunststoff-Box (Gewicht 3,35 kg) zusammen mit dem für das Laden erforderlichen Balancer. Dies ist ein Laderegler, welcher den Ladevorgang steuert und überwacht. Außerdem ist eine Sicherung vorhanden. Diese Akku-Box (**Abbildung 4.22**) lässt sich für das Aufladen komplett aus der Bahn entnehmen und ist bereits vorbereitet für ein automatisches Akku-Wechselsystem (Kapitel 4.5). Die Energieübertragung geschieht über die Schleifkontakte auf der Oberseite der Box.

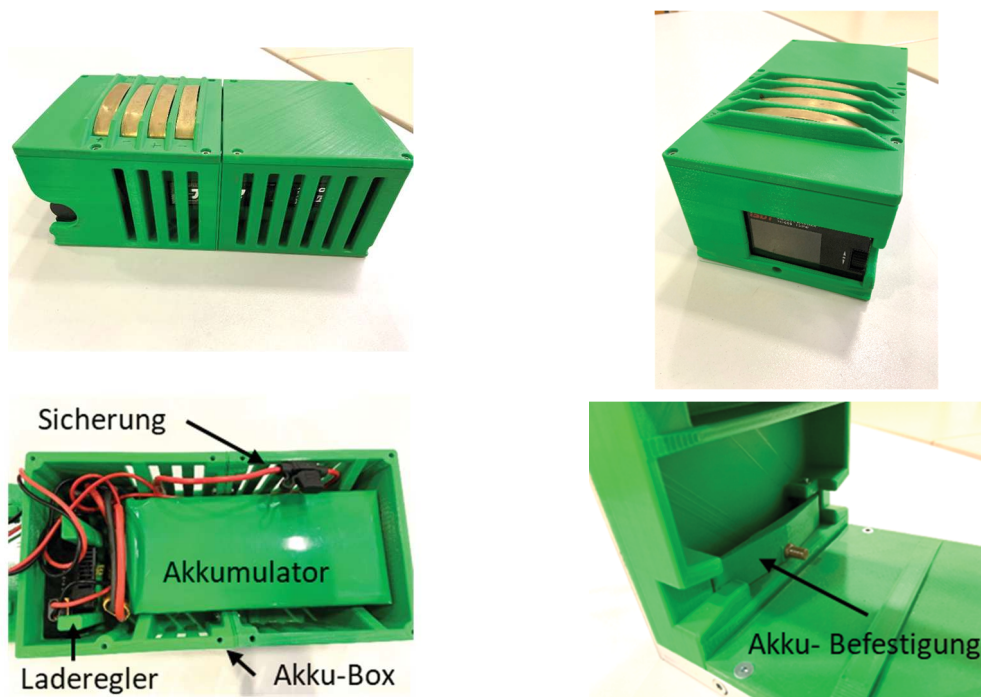
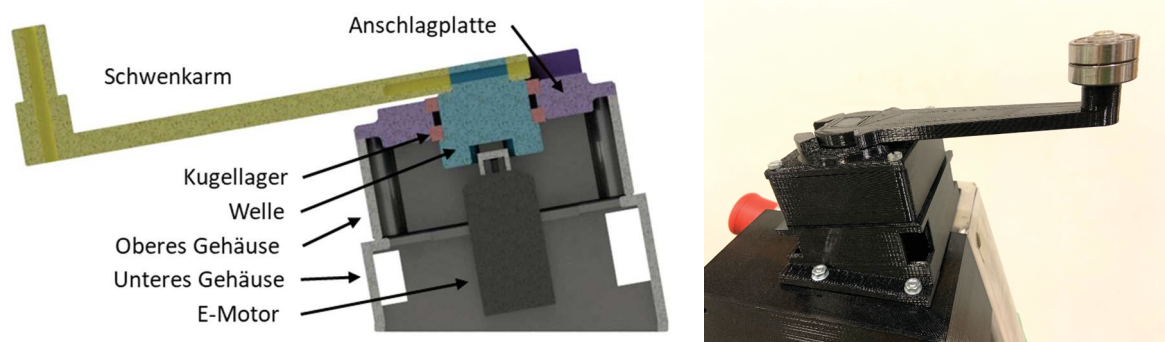


Abbildung 4.22: Akku-Box für das automatische Akku-Wechselsystem (Technische Daten s. Anhang)

Die Elektrohängebahn ist auf der LogiMAT-Messe 2018 in Stuttgart an mehreren Tagen 8 h ohne Akkuwechsel durchgefahren und hat somit bewiesen, dass der verbaute Akkumulator mit 20.000 mAh für einen Dauerbetrieb von 8 h groß genug ausgelegt und somit geeignet ist.

Um Lasten zu transportieren bzw. maximale Beladung zu simulieren, sind unter dem Akku-Gehäuse Aufhängungen für **Testgewichte** angebracht. Für die Versuche werden vier zylindrische Gewichte mit jeweils 5 kg mit Hilfe einer Gewindestange befestigt. Aktuell können bis zu 20 kg transportiert werden (siehe **Abbildung 4.18 Pos. 5**).

Oberhalb des Gehäuses ist der **Schwenkmechanismus** zum Schalten der Weiche montiert (**Abbildung 4.18 Pos. 6**). Der Schwenkmechanismus ist neben dem Antrieb der zweite Akteur in der Elektrohängebahn und soll die Auffahrbügel (Rampen) an der Weiche betätigen und aufdrücken. Somit kann die Bahn die Weiche selbst steuern und die Weiche bleibt rein mechanisch, also ohne Aktoren, Elektrik oder Sensoren.



**Abbildung 4.23:** Schwenkmechanismus an der Bahn

Der Schwenkmechanismus besteht aus sieben Elementen, dem unteren Gehäuse (schräg), dem oberen Gehäuse, der Anschlagplatte, Welle, E-Motor, zwei Kugellager und dem Schwenkarm mit vorderer Betätigung (siehe **Abbildung 4.23**). Im unteren Kasten sind Elektromotor und Verkabelung untergebracht. Der Elektromotor ist über einen Motorflansch mit der drehbaren Welle darüber verbunden, die wiederum formschlüssig mit dem Hebelarm oben verbunden ist.

Zum Durchfahren der Weiche (siehe Kapitel 4.4) muss der Hebelarm (Betätigungsmechanismus für die Weiche) verdreht werden. Steht der Hebel in Fahrtrichtung links, durchfährt die Bahn die Weiche auf der rechten Spur. Wird der Hebelarm nach rechts gedreht, fährt die Laufkatze links aus der Weiche hinaus. Mit Hilfe der Anschlagplatte am Hebelarm wird der Motor entlastet, sodass dieser nicht mit seinem Haltemoment der Verstellkraft der Weiche entgegenwirken muss. Die Kraft zum Verstellen der Weiche wird über die Anschläge und die Lagerung aufgenommen und an das Gehäuse der Elektrohängebahn weitergeleitet. Am

oberen Ende des Hebelarms befindet sich ein Wellenabsatz für zwei Kugellager, die dafür sorgen, dass der Schwenkarm nicht an der Weichenverstellung schleift, sondern die Außenringe der Lager abrollen, was zu einer gleichmäßigeren Durchfahrt ohne Rucken führt. Für die Funktionsweise des Schwenkmechanismus ist es wichtig, dass dieser in Fahrtrichtung geneigt ist. Der Schwenkarm muss beim Durchfahren der Weiche unter der Weichenbetätigung hindurchgeführt werden. Ein gerader Schwenkmechanismus würde zu einer Kollision zwischen Laufkatze und Weiche führen. Aus diesem Grund ist die Ruheposition (Mitte) flacher und die Positionen zum Schalten der Weiche rechts und links höher, was durch die Schräge des unteren Kastens realisiert wird. Der Schwenkarm ist in der Lage, eine 180°-Drehung zu realisieren.

Die Weiche ist in einem nachfolgenden Kapitel beschrieben.

Für die Steuerung der Laufkatze, Version 3.1, sind neben dem Elektromotor mit Schneckenradgetriebe, Akkumulator und Laderegler mehrere **elektrische Komponenten** im Gehäuse verbaut, s. Anhang. Ebenfalls ist im Anhang der Schaltplan zu finden.

Die Steuerung der Laufkatze erfolgt über eine selbst programmierte Smartphone-App (MIT App Inventor 2 vom Massachusetts Institute of Technology) [Ric19]. Diese koppelt sich per Bluetooth an die Steuereinheit, einen Arduino. Damit lassen sich die Geschwindigkeit der Bahn, die Fahrtrichtung und der Schwenkwinkel sowie die Richtung des Schwenkmechanismus einstellen. Die Steuerungsoberfläche ist in **Abbildung 4.24** zu sehen. Mit diesen Steuerungs-Funktionen können alle Testfahrten und Versuche am Versuchsstand durchgeführt werden, zum Beispiel Weichendurchfahrt, Richtungsänderung, langsames und schnelles Fahren, Anfahren, Abbremsen mit und ohne Gewichte.

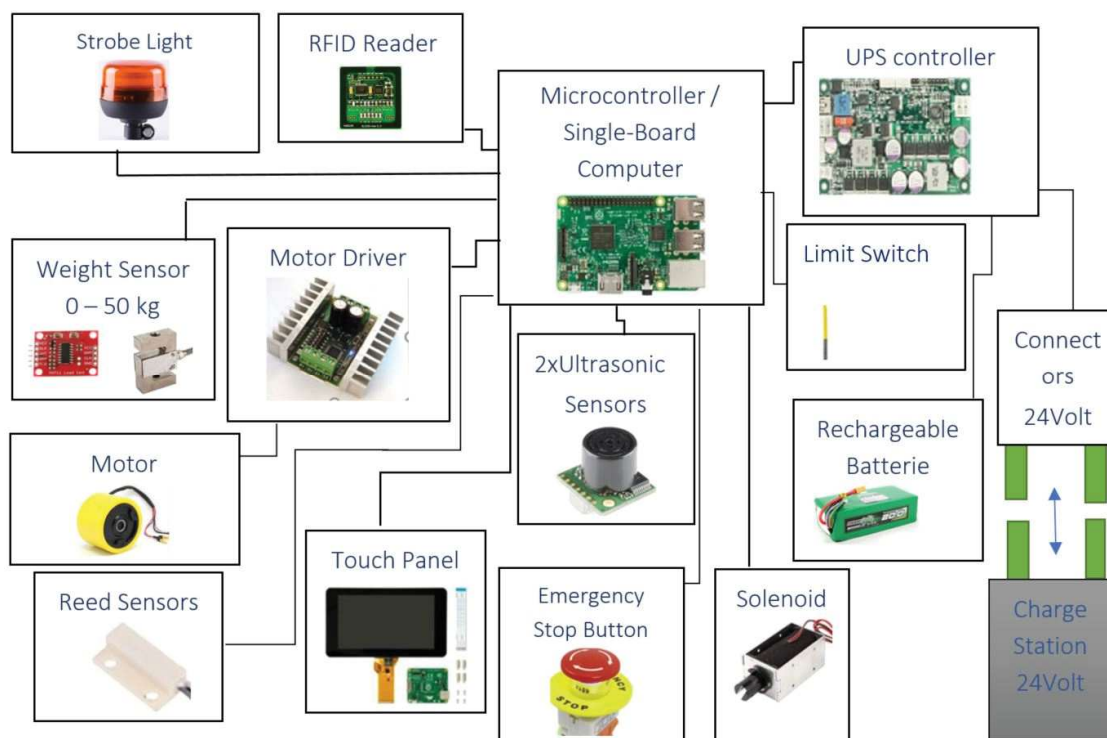


**Abbildung 4.24:** Seilbahn-App - MIT App Inventor 2

Aufgabe des am Projekt mitwirkenden Lehrstuhl für Transportsysteme und -logistik (TuL) der Universität Duisburg-Essen war es, eine komplexe Steuerung für einen automatischen Betrieb des Elektrohängebahn-Systems zu realisieren. Die Laufkatze soll zum Beispiel zu einzelnen Stationen gerufen werden, selbstständig den kürzesten Weg suchen und bei niedrigem Batterie-Ladezustand einen automatischen Akku-Wechsel durchführen. Des Weiteren soll das System anzeigen, wo sich welche Bahn befindet, damit es in einem System mit mehreren Laufkatzen zu keiner Kollision kommt.

Für diese Fälle muss eine komplexere Steuerung in die Elektrohängebahn, Variante 3.2, installiert werden mit einem zusätzlichen zentralen Steuerungs-System und W-LAN-Kommunikation. Dies geschah im späteren Projektverlauf in der Laufkatzen-Version 3.2, s. Anhang.

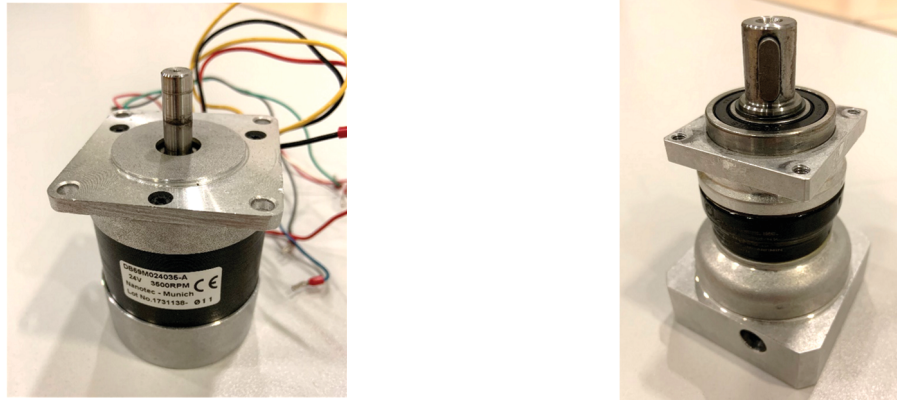
In **Abbildung 4.25** ist das Funktionsdiagramm dargestellt, das die Beziehungen zwischen den Systemelementen der Elektrohängebahn-Steuerung Varianten 3.2 aufzeigt. Da die Steuerung komplett vom Lehrstuhl für Transportsysteme und -logistik entwickelt wurde, wird hier nicht näher darauf eingegangen.



**Abbildung 4.25:** Funktionsdiagramm Laufkatze-Variante 3.2 [NKB17]

Unter anderem wurde für die Variante 3.2 ein neuer Bürstenloser DC-Motor von der Firma Nanotec (DB59M024035-A, Technische Daten siehe Anhang) sowie ein Winkelplanetenge triebe der Firma Apex (PAIR 042-010, Technische Daten siehe Anhang) mit einem Übersetzungsverhältnis von 10 ausgewählt. Diese Motor-Getriebe-Kombination läuft effizienter,

leichtgängiger und hat eine höhere Drehzahl als der Gleichstrommotor mit Schneckenradgetriebe aus Variante 3.1. Der Nanotec-Motor ist in **Abbildung 4.26** mit dem Apex-Getriebe zu sehen. Aus Kostengründen wurde im Demonstrator allerdings nicht das Winkelgetriebe PAIR 042 verbaut, sondern das Planeten-Getriebe PAII 042 mit ähnlichen technischen Daten.



**Abbildung 4.26:** Nanotec DC-Motor (links) und Apex-Getriebe (rechts)

Die neue und erweiterte Steuerung für die Laufkatze Variante 3.2 wurde auch mit weiteren Sensoren versehen, um die Bahn für den Automatik-Betrieb vorzubereiten, siehe nachstehende Auflistung (**Tabelle 4.4**).

**Tabelle 4.4:** erweiterte Sensoren für die Laufkatze Variante 3.2

Komponenten	Funktion
Ultraschall Abstandssensor	zur Kollisionserkennung
Positionsschalter	zur physischen Kollisionsvermeidung, Not-Aus
RFID-Reader	Identifizierung & Selbstplatzierung an Station
Reed-Sensors	zum präzisen Platzieren +/-10 mm
Gewichtssensor	zum Messen der Transportmasse

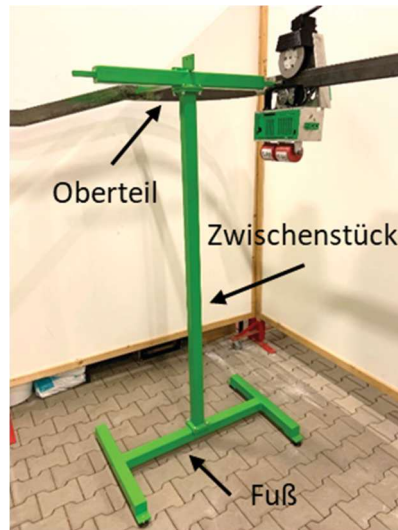
Mit der neuen Steuerung und den erweiterten Sensoren konnten erste Versuche im Automatik-Modus gefahren werden. Für die nachfolgenden Versuchsreihen im Kapitel 5 und 6 wurde die einfachere Steuerung aus Variante 3.1 verwendet, da diese sehr stabil lief, einfach zu bedienen ist und für grundlegende Funktionstests ausreicht.

## 4.3 Weitere Fahrbahnkomponenten

### 4.3.1 Stützen

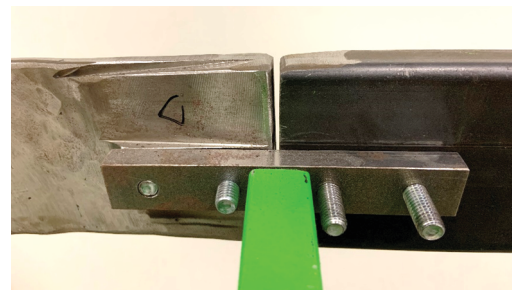
Der Rundkurs mit Schienen und Seilstück der Elektrohängebahn ist auf eigenen Stützen montiert, damit die Laufkatze in einer Höhe von ca. 1.950 mm fahren kann. Diese Stützen

sind aus mehreren Stahl Rechteckrohren zusammenschweißt und bestehen aus den drei Teilen Fuß, Zwischenstück und Oberteil. Zum Versuchsstand gehören fünf identische Stützen, eine davon ist in **Abbildung 4.27** dargestellt.



**Abbildung 4.27:** Elektrohängebahn-Stütze an der TU Dortmund

Das Fußteil ist wie ein „H-Profil“ aufgebaut und besteht aus zwei seitlichen Streben mit jeweils zwei einstellbaren Maschinenfüßen an den Enden und einer Zwischenstrebe. Diese sind aus 60 x 60 x 2 mm Stahl Rechteckrohren zusammenschweißt. Die Abmessungen des Fuß-Elementes betragen ca. 1.000 x 685 mm. Darauf wird über eine Flanschplatte die Zwischenstrebe montiert und verschraubt, ebenfalls aus dem beschriebenen Profilrohr. Mit diesem Zwischenstück kann die Höhe der Fahrbahn individuell bestimmt werden. Wiederum über einen Flansch wird das Oberteil am Ende verschraubt. Dieses soll die Schienen aufnehmen, das Seil, Kurvenstücke, die Weiche und alle anderen Fahrbahnelemente. Dabei wird beispielsweise die Schiene an den seitlich abstehenden Kragträger mit einem Verbindungsstück montiert, siehe **Abbildung 4.28**.

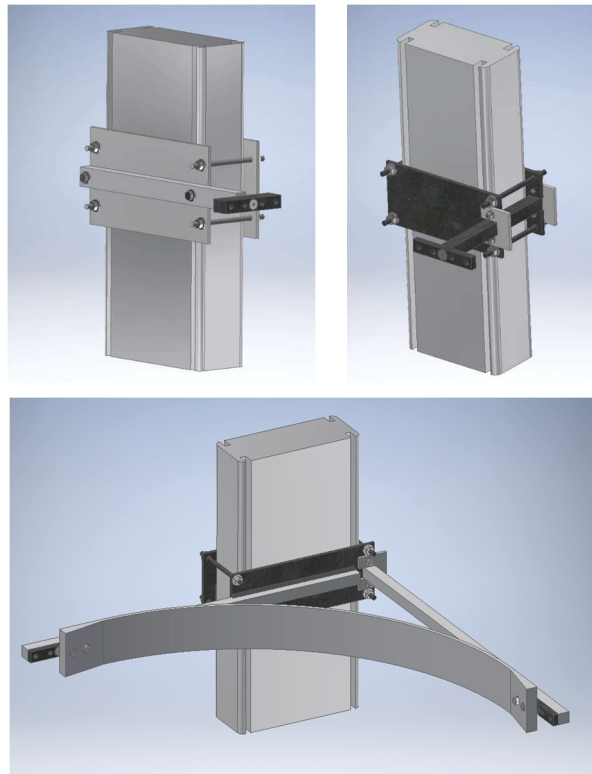


**Abbildung 4.28:** Verbindungsstück Schiene

Das Oberteil kann dabei einen oder mehrere seitliche Kragträger besitzen, zum Beispiel in Form eines „T“s, um Kurvensegmente aufzunehmen, 90°- oder 180°-Kurven, wie in **Abbildung 4.13** (Kapitel 4.1.5) zu erkennen ist.

### 4.3.2 Klemmen-Halterung

Als Alternative zu den Stützen können bestehende Hallenstrukturen verwendet werden, wenn diese stabil genug sind. Dafür bieten sich Klemm-Lösungen an, die an den seitlichen Hallenstreben befestigt werden. Somit vermeidet man Stützen, die wiederum Platz zum Aufstellen benötigen sowie zusätzliche Kosten erzeugen. In **Abbildung 4.29** sind drei Klemm-Varianten zu erkennen, woran die Schienen verschraubt werden.



**Abbildung 4.29:** Klemm-Lösung für bestehende Hallenstrukturen

Die Klemmen bestehen aus zwei Stahl- oder Aluminium-Platten, die mit Hilfe von Gewindestangen verspannt werden und sich dadurch an den Hallenträgern arretieren. Alternativ lassen sich die Platten auch mit den Hallenträgern verschrauben. Da die gegebenen Hallenstrukturen für diese Lösungen nicht geeignet sind, wurde mit Stützen gearbeitet. Das hatte den Vorteil, dass man bereits vorhandene Stützen nutzen und diverse Streckenverläufe abbilden kann.

### 4.3.3 Baukastensystem Schiene

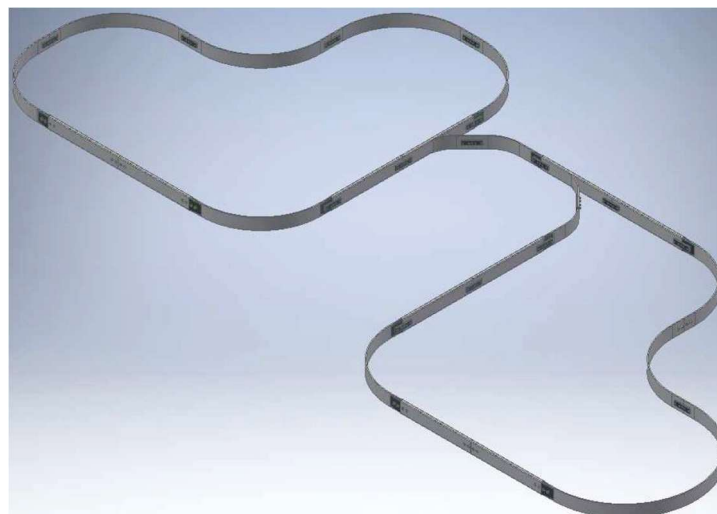
Im Projektverlauf sollte ein variables und einfaches sowie erweiterbares Schienensystem entstehen, vorzugsweise ein Baukastensystem, das die Möglichkeit eröffnet, einerseits die Anzahl der Schienenelemente zu reduzieren und andererseits beliebige Änderungen sowie Erweiterungen durchzuführen.

Hierfür wurden verschiedene Schienenkombinationen aus den vorgegebenen Bauelementen des Elektrohängebahnsystems zusammengestellt. Zum Beispiel ist es möglich, einen 180°-Bogen durch zwei 90°-Bögen auszutauschen. Mit folgenden aufgelisteten Baukastenelementen ist eine ganze Versuchsstrecke mit nur wenigen festgelegten Bauteilen umsetzbar (siehe **Tabelle 4.5**).

**Tabelle 4.5:** Elemente Baukastensystem Elektrohängebahn

Element	Bemerkung
Schiene (gerade)	Stahl Rechteckrohr 80 x 20 x 2 – 6 m Schiene
Schiene (gebogen, 180°)	Flachstahl 80 x 6 mm
Schiene (gebogen, 90°)	Flachstahl 80 x 6 mm
Schiene (gebogen, 45°)	Flachstahl 80 x 6 mm
Übergangsstück (innen)	
Übergangsstück (außen)	
Verbindungsstück	
Weiche	

Die Stützen aus Kapitel 4.3.1 können weiterhin verwendet werden und die Adapterplatten sind austauschbar. Die Linksbögen und Rechtsbögen können beliebig gewechselt werden, auch im Übergang zum Stahl Rechteckrohr. Die geraden Schienen sollen ein Rastermaß in ganzen und halben Metern besitzen und die Weichen beliebig gegen Geraden und Kurven austauschbar sein. In **Abbildung 4.30** ist ein möglicher Verlauf von einer Transportstrecke dargestellt.



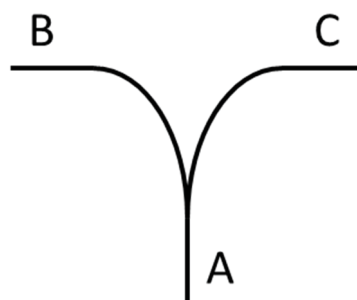
**Abbildung 4.30:** beispielhafte Transportstrecke [Alt18]

#### 4.4 Realisierte Weiche

Ein weiteres Ziel des genannten IGF-Forschungsprojektes war es, neben den Schienen- und Seil-Streckenabschnitten Kreuzungen bzw. Weichen zu konstruieren und in den Versuchsbetrieb mit aufzunehmen. Es konnte gezeigt werden, dass die Umsetzung folgender Ideen möglich ist:

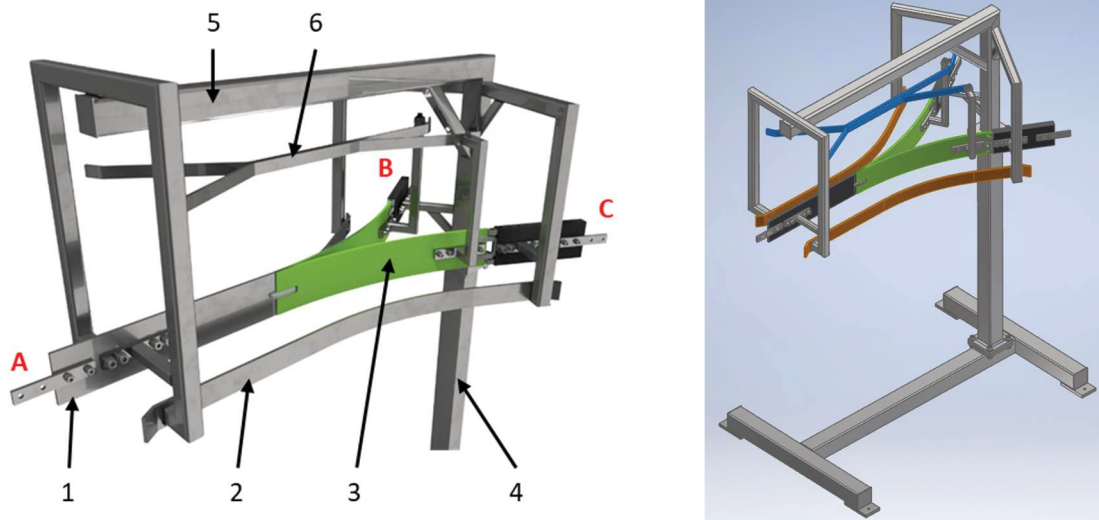
- Die Laufkatze betätigt die Weiche selbstständig über einen eigenen Stellmechanismus.
- Die Fahrt durch die Weiche ist in alle Richtungen ohne aktive Komponenten in der Weiche möglich.
- Die Weiche verstellt sich passiv, während die Elektrohängebahn diese öffnet.
- Die Weiche verfügt ausschließlich über Führungs- und Betätigungsschienen, keine Sensorik, keine Aktoren, keine Elektrik und keine eigenen aktiven Stelleinrichtungen.
- Der komplette Stellmechanismus der Weiche befindet sich an der Laufkatze selbst.
- Während der Durchfahrt durch die Weiche wird die Weiche von der Laufkatze selbst in eine gewünschte Schaltstellung gebracht.

Des Weiteren sind alle Fahrrichtungen zu realisieren. Bezogen auf die **Abbildung 4.31** soll die Laufkatze von A nach B, von B nach A, von A nach C, von C nach A, von B nach C und von C nach B die Zwei-Wege-Weiche durchfahren können, also alle sechs Möglichkeiten.



**Abbildung 4.31:** Schema Weichendurchfahrt

In **Abbildung 4.32** ist die funktionsfähige Weiche mit einem Weichenwinkel von  $2 \times 30^\circ$  für das Elektrohängebahn-System mit den einzelnen Elementen dargestellt.

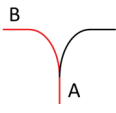
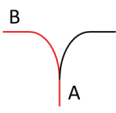
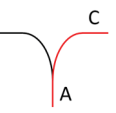
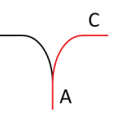
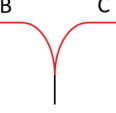
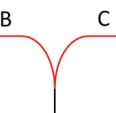


**Abbildung 4.32:** Zwei-Wege-Weiche für das Elektrohängebahn-System [Kni18]

Zu sehen ist der Weichenkopf, der auf einer Stütze (4), wie in Abbildung 4.30, über eine Flanschplatte montiert wird. Die Abmessungen der Schweißkonstruktion, des Rahmens (5), betragen ca. 1.035 x 600 x 480 mm bei einem Gewicht von ca. 30 kg. In der Mitte des Rahmens, bestehend aus Stahl Rechteckrohren 50 x 50 x 4, 30 x 30 x 3 und 20 x 20 x 2 mm, befindet sich die Fahrschiene (1) für die Elektrohängebahn, ein Flachstahl 80 x 6 mm. Die beiden beweglichen Weichenzungen (3), hier grün dargestellt, schaffen die Verbindung von der Schiene links im Bild (A) (**Abbildung 4.32**), zu den beiden Schienen rechts im Bild (B und C). Dabei darf nur eine der beiden Weichenzungen anliegen, da sonst eine Fahrt durch die Weiche nicht möglich ist. Liegt also in Fahrtrichtung rechts (Bahn startet bei (A), **Abbildung 4.32**) die Weichenzunge an, fährt die Laufkatze eine Rechts-Kurve zu Punkt (C), liegt die linke Weichenzunge an, wird eine Links-Kurve gefahren zu Punkt (B). Die beiden Weichenzungen sind mit Federn verbunden, sodass diese zusammengezogen werden. Zum Aufdrücken der Weichenzungen muss der Verstell- bzw. Schwenkmechanismus der Bahn das Rampenelement (6) zur Seite drücken. Dieses ist jeweils mit der rechten bzw. linken Weichenzunge verbunden und bewegt diese. Das bedeutet, dass für Fahrtrichtung rechts (Rechts-Kurve) die linke Weichenzunge aus der Mittelposition nach links außen weggedrückt werden muss, sodass das Antriebsrad der Elektrohängebahn auf der Schiene über die Weichenzunge nach rechts fährt. Durch die Stellkraft der Weiche entsteht ein Biegemoment an der Laufkatze, welches abgestützt werden muss, da sonst die Bahn schräg steht. Dazu dienen die beiden Führungsschienen (2) links und rechts. Diese verlaufen auf beiden Seiten der Schiene und Weichenzungen entlang. An denen stützt sich die Bahn durch Kunststoff-Gleitleisten und einen Führungssteg ab.

Zur besseren Verdeutlichung der Schaltvorgänge sind hier die einzelnen Schritte erläutert (**Tabelle 4.6**), welche zum Durchfahren der Weiche nötig sind, siehe dazu auch die **Abbildung 4.31** und **4.32**.

Tabelle 4.6: Ablauf Durchfahrt Weiche

Fahrtrichtung	Schalt Schritte
	von <b>A</b> nach <b>B</b> - Linkskurve: Bahn fährt bei A ein; Schwenkarm auf Bahn dreht nach <u>rechts</u> ; der Schwenkarm drückt das <u>rechte</u> Rampenblech von der Mitte nach rechts außen, dadurch öffnet sich die Weichenzunge nach <u>rechts</u> auf; die Bahn kann von A nach B (Links-Kurve) fahren, muss allerdings auf der Hälfte der Strecke den Schwenkmechanismus wieder in die Ausgangsposition bringen
	von <b>B</b> nach <b>A</b> : Bahn fährt bei B ein; der Schwenkarm muss nicht betätigt werden; die Bahn kann einfach von B nach A fahren, geführt von der seitlichen Führungsschiene, da die Führungselemente an der Bahn die <u>linke</u> Weichenzunge (in Fahrtrichtung) selbstständig aufdrückt für eine Rechtskurve
	von <b>A</b> nach <b>C</b> - Rechtskurve: Bahn fährt bei A ein; Schwenkarm auf Bahn dreht nach <u>links</u> ; der Schwenkarm drückt das <u>linke</u> Rampenblech von der Mitte nach links außen, dadurch öffnet sich die Weichenzunge nach <u>links</u> auf; die Bahn kann von A nach C (Rechtskurve) fahren, muss auf der Hälfte der Strecke allerdings den Schwenkmechanismus wieder in die Ausgangsposition bringen
	von <b>C</b> nach <b>A</b> : Bahn fährt bei C ein; der Schwenkarm muss nicht betätigt werden; die Bahn kann von B nach A fahren, geführt von der seitlichen Führungsschiene, da die Führungselemente an der Bahn die <u>rechte</u> Weichenzunge (in Fahrtrichtung) selbstständig aufdrücken für eine Linkskurve
	von <b>B</b> nach <b>C</b> : Bahn fährt bei B ein und fährt die Rechtskurve nach A, wie bei B–A beschrieben vorwärts; anschließend muss die Bahn die Linkskurve von A nach C rückwärts fahren, wie von A nach C beschrieben
	Von <b>C</b> nach <b>B</b> : Bahn fährt bei C ein und fährt die Linkskurve nach A, wie bei C–A beschrieben, vorwärts; anschließend muss die Bahn die Rechtskurve von A nach B rückwärts fahren, wie von A nach B beschrieben

Die neu entwickelte Zwei-Wege-Weiche für das Elektrohängebahnsystem konnte alle Anforderungen erfüllen und hat sich im Testbetrieb sehr gut bewiesen. Auftretende Probleme wurden am realen Demonstrator analysiert und anschließend durch Anpassungen der Konstruktion behoben. Ein besonderes Problem zeigt sich im aufwendigen konstruktiven Aufbau, der sich dadurch ergeben hat, dass Kollisionen der einzelnen Elemente, insbesondere zwischen dem Schwenkarm und den Weichenelementen, vermieden werden müssen. In **Abbildung 4.33** ist die Laufkatze bei der Durchfahrt durch die Weiche zu sehen.



**Abbildung 4.33:** Weiche und Weichendurchfahrt der Laufkatze

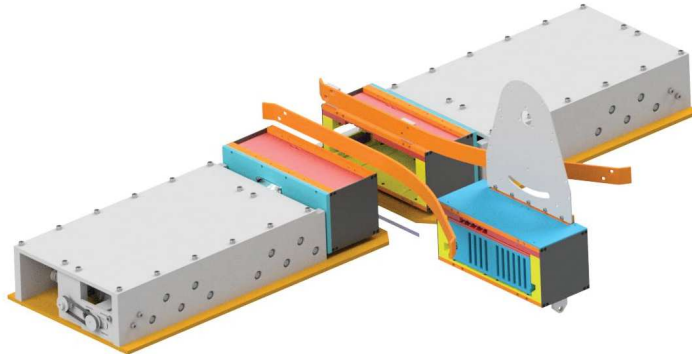
## 4.5 Akku-Wechselstation

Die Elektrohängebahn kann Unternehmen beim Bewältigen von längeren Transport- und Laufwegen behilflich sein. Die Stromversorgung übernimmt ein mitgeführter Akkumulator. Dieser soll die Steuerungselektronik und -mechanik, die Sensoren sowie die Aktuatoren in der Transporteinheit mit Strom versorgen. Es existieren verschiedene Möglichkeiten, die Energieversorgung von akkubetriebenen Fahrzeugen sicherzustellen. Die eine Variante besteht darin, den leeren Akkumulator in der Transporteinheit zu belassen und darin aufzuladen. Dabei ist kontaktloses Induktionsladen und kabelgebundenes Laden zu unterscheiden. Im zweiten Fall wird der Akku aus dem Fahrzeug entnommen und durch einen aufgeladenen Akku ersetzt. Eine weitere Möglichkeit wäre es, Solarzellen an der Transporteinheit zu befestigen, was aber aufgrund von Gewichts- und Platzproblemen sowie dem Betrieb in Räumen ohne Sonnenlicht, wie Produktionshallen, nicht ohne weiteres möglich ist.

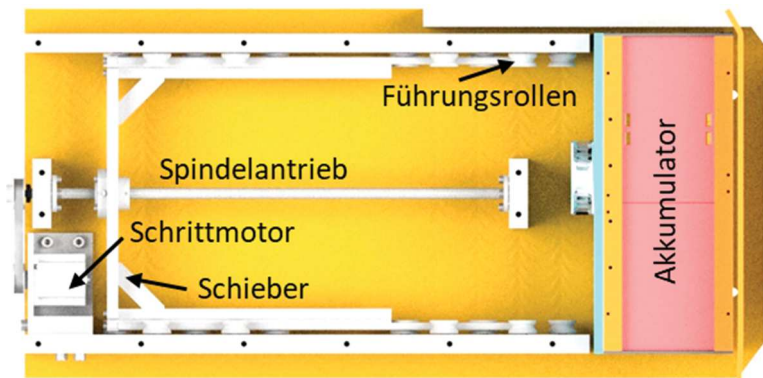
Aus Zeitgründen bietet sich der Akkuwechsel, der Austausch direkt am Einsatzort, an. Somit kann in wenigen Minuten die Elektrohängebahn mit einem vollen Akkumulator weiterbetrieben werden. Im Projekt fährt die Transporteinheit selbstständig zur Akkuwechselstation, wenn der Ladezustand des Akkus niedrig ist. An der Station wird der leere Akkumulator automatisch gegen einen vollen Akkumulator ersetzt. Anschließend kann die Bahn im normalen Betrieb weiterfahren. In der Station erfolgt das Laden des leeren Akkus. Er steht anschließend für einen weiteren Wechsel bereit. Dieses Konzept gewährleistet eine nahezu unterbrechungsfreie Nutzung der Bahn und verhindert längere Standzeiten von etwa einer bis hin zu mehreren Stunden (Akku-Kapazität von 20.000 mAh). [nach HW19]

In **Abbildung 4.34** und **4.35** ist das Konzept der Akku-Wechselstation dargestellt. Die Elektrohängebahn fährt dabei zwischen beide Stationen, sodass der volle Akkumulator von einer

Station (links oder rechts) in die Transporteinheit geschoben werden kann. Gleichzeitig wird der leere Akku, welcher sich in der Elektrohängebahn befindet, in die jeweils gegenüberliegende leere Station befördert.



**Abbildung 4.34:** Übersicht Akku-Wechselstation [nach HW19]



**Abbildung 4.35:** Aufbau Wechselmechanismus [nach HW19]

Die für die Wechselstation benötigte elektrische Energie wird von außen zum Laden des Akkumulators und für die Stellbewegungen der Schieber zugeführt. Die Schieber werden von jeweils einem Schrittmotor angetrieben, dessen Drehmoment und Drehzahl über einen Riemenantrieb auf die Spindel übertragen wird. Auf dem Gewinde der Spindel sitzt eine Kugelumlaufmutter. Diese wandelt die Rotationsbewegung in eine lineare Bewegung entlang der Rotationsachse der Spindel um. Da der Schieber mit der Kugelumlaufmutter befestigt ist, wird Kraft von der Spindel auf den Schieber übertragen und dieser verfährt quer zur Fahrtrichtung der Bahn. Der Schieber wird mit Hilfe von kleinen Führungsrollen seitlich stabilisiert (siehe auch **Abbildung 4.35**).

In **Abbildung 4.36** ist der Wechselvorgang noch einmal als Schaubild von oben dargestellt. Während das blaue Rechteck den geladenen Akku darstellt, stellt das rote Rechteck den leeren Akkumulator dar. Aufgrund des symmetrischen Aufbaus der Station kann ein Akkuwechsellvorgang sowohl von links als auch von rechts in gleicher Weise erfolgen.

Nachfolgend soll beispielhaft der Fall beschrieben werden, in dem sich ein geladenes Akkupaket in Fahrtrichtung auf der rechten Station befindet, während in der linken Station kein Akku vorhanden ist.

**Schritt 1:**

Die Elektrohängebahn fährt mit geringer Geschwindigkeit in die Wechselstation ein, bis sie einen Kontakt mit der vorderen Begrenzung (grün) hat. Durch diesen Anschlag ist die Bahn in Fahrtrichtung fixiert. Eine seitliche Führung erfolgt durch die beiden Stationen links und rechts. Der Akkuwechsel kann beginnen, nachdem die Bahn eingefahren und zentriert ist.

**Schritt 2:**

Nun fahren die beiden Schieber von links und rechts Richtung Elektrohängebahn. Die Schieber haben ebenfalls die Aufgabe, die Akku-Arretierungen in der Bahn und in der Station zu lösen sowie die Bahn zu arretieren.

**Schritt 3:**

Der rechte Schieber löst die beiden Arretierungen in der rechten Station und in der Bahn. Dafür ist ein Schiebeweg von mindestens der zweieinhalbfachen Breite eines Akkupakets erforderlich. Der Schieber auf der linken Seite löst die Arretierung in der linken Station. Nachdem der rechte Schieber die Arretierungen gelöst hat, schiebt dieser das Akkupaket in Richtung der Bahn. Somit wird gleichzeitig das entladene Akkupaket aus der Bahn heraus und der aufgeladene Akku von der Station in die Bahn geschoben.

**Schritt 4:**

Kurz bevor die Stirnflächen beider Schieber aufeinandertreffen, fährt der linke Schieber wieder zurück.

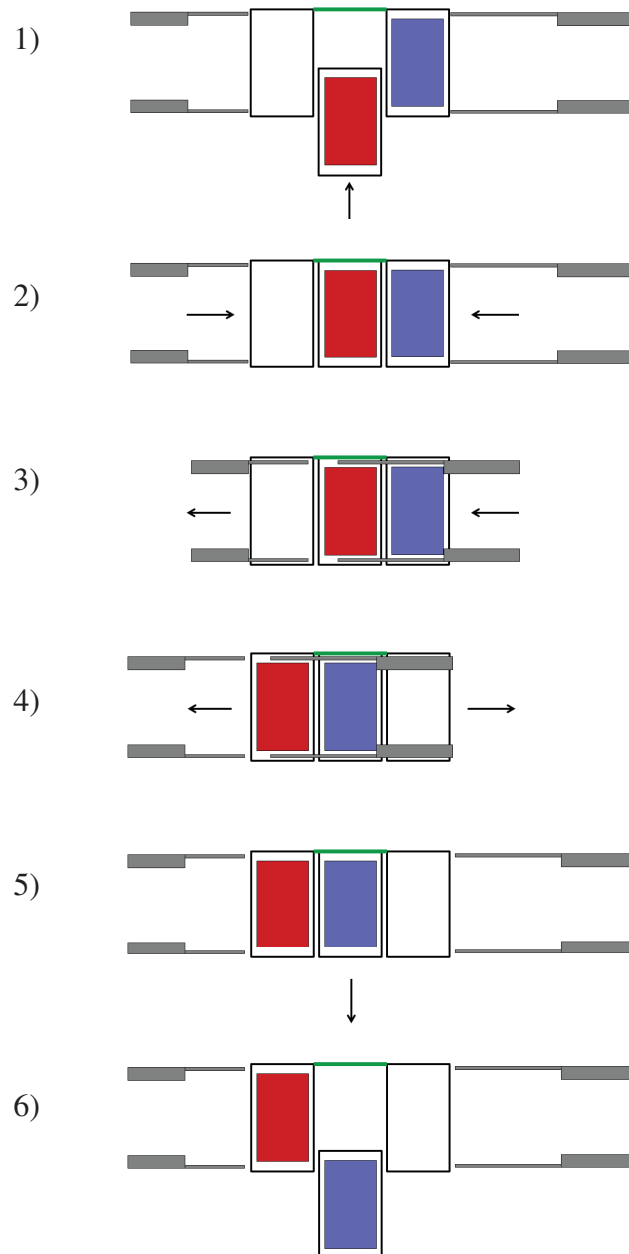
**Schritt 5:**

Sobald das leere Akkupaket in der Ladestation und das geladene Akkupaket in der Bahn ist, bewegt sich der rechte Schieber zurück in die rechte Station. Beim Herausfahren der Schieber werden die Akkupakete durch die Rastelemente wieder arretiert und die Elektrohängebahn freigegeben.

**Schritt 6:**

Die Bahn kann jetzt mit geladenem Akku rückwärts aus der Wechselstation fahren.

Beim nächsten Wechselvorgang wird der inzwischen vollgeladene Akku aus der linken Station in die Bahn und der leere Akku in den freien Platz der rechten Station geschoben. In diesem Fall funktioniert der Akkuwechsel ebenfalls wie in den Schritten 1 bis 6 aufgezeigt.



**Abbildung 4.36:** Ablauf Akku-Wechsel [nach HW19]

### Ausblick und Alternative zum aufwendigen Akku-Wechsel

Diese vorgestellte Lösung (Wechselsystem) für das Laden eines Akkumulators hat den Vorteil, dass der Wechselvorgang in kurzer Zeit durchgeführt werden kann. Ein Schnellladungsvorgang, welcher die Batteriealterung beschleunigt, erübrigt sich. Weiterhin treten kaum Stillstandszeiten auf. Nachteilig (siehe auch siehe **Tabelle 4.7**) ist der hohe Aufwand, der große Platzbedarf sowie bewegte Teile und Kosten für zwei gegenüberliegende Stationen. Stattdessen könnten alternativ Schleifkontakte an der Bahn und an den Be- und Entladestationen (für Transportgut) installiert werden. Diese benötigen kaum Platz, die Kosten sind verhältnismäßig gering und die Elektrohängebahn könnte an den Haltestellen elektrisch aufgeladen werden. Vorausgesetzt sind dabei allerdings entsprechende Pausenzeiten zum Laden

der Akkus an den Haltestellen. Lange Fahrten und/oder Dauerbetrieb wären ungeeignet. Auch wäre das berührungslose induktive Laden statt mit Schleifkontakten (hier entsteht immer Verschleiß) denkbar.

Aufgrund des erhöhten Aufwandes mit dadurch entstehenden Kosten für ein Akku-Wechselsystem und wegen der langen Laufzeit mit einer Akkuladung wurde sich im Laufe des Projektes dagegen entschieden. Somit kann auch das Akkumulator-Gehäuse an der Elektrohängebahn kompakter und einfacher aufgebaut werden, da kein Wechselmechanismus nötig ist, sondern zukünftig induktiv oder über Schleifkontakte in den Haltestellen die Laufkatze geladen wird.

**Tabelle 4.7:** Vor- und Nachteile der Akku-Wechselstation

Vorteile	Nachteile
Schneller Akku-Wechsel	Konstruktiv aufwendig
Geringe Stillstandszeiten der Bahn	Hohe Kosten
Langsames, aber schonendes Akku-Laden	Hohe Steuerungslogik
	Hoher Platzbedarf

#### 4.6 Seilbahn-Versuchsträger

Die Elektrohängebahn Variante 3.1 und 3.2 kann Steigungsfahrten und Gefällestrecken auf dem Seil bis ca. 20° realisieren, was in vielen Versuchsfahrten auch nachgewiesen wurde. Für größere Steigungen, Transporte am senkrechten Seil und zum Heben von Lasten ist eine höhere Seilreibung nötig. Dies kann nur mit einem größeren Seil-Umschlingungswinkel gelöst werden. Um dies praktisch in Fahrversuchen darzustellen, ist ein weiterer Versuchsträger konstruiert worden, bei welchem verschiedene Seilumschlingungswinkel eingestellt werden können. Durch den veränderten Umschlingungswinkel werden die Reibflächen zwischen Seil und Rollen erhöht oder verringert. Das Ergebnis ist eine Seilbahn zum Heben und Transportieren von Lasten am senkrechten Seil.

Der Seilbahn-Versuchsträger besteht aus einer 3 mm Aluminium Grundplatte der Größe 320 x 400 mm, siehe **Abbildung 4.37**. Darauf sind drei Laufrollen befestigt. Die Antriebsrolle befindet sich fest in der Mitte verbaut auf der Grundplatte, zwei weitere Führungsrollen sind im Radius von 138 mm angeordnet und verschiebbar. Jede dieser beiden Führungsrollen kann fünf verschiedene Umschlingungswinkel von 60° bis 180° einnehmen, was in 30°-Schritten möglich ist. Somit lassen sich verschiedene Umschlingungswinkel einstellen durch das Verstellen der beiden äußeren Führungsrollen. Erste Versuche haben gezeigt, dass es sinnvoll ist, die beiden äußeren Führungsrollen ebenfalls anzutreiben. Dies konnte durch Zahnräder realisiert werden. Das mittlere Antriebsrad mit Elektromotor gibt über ein fest

verbautes Zahnrad sein Drehmoment und die Drehzahl im Verhältnis 1:1 direkt an die beiden äußeren Laufrollen weiter, sodass diese nun ebenfalls angetrieben werden.

Zwischen den Laufrollen verläuft das 6 mm Kunststoff-Seil tangential an den Rollen. Durch das Verstellen der beiden äußeren Laufrollen zum mittleren Laufrad umschließt das Seil die Antriebsrolle in der Mitte um einen größeren oder kleineren Winkel.

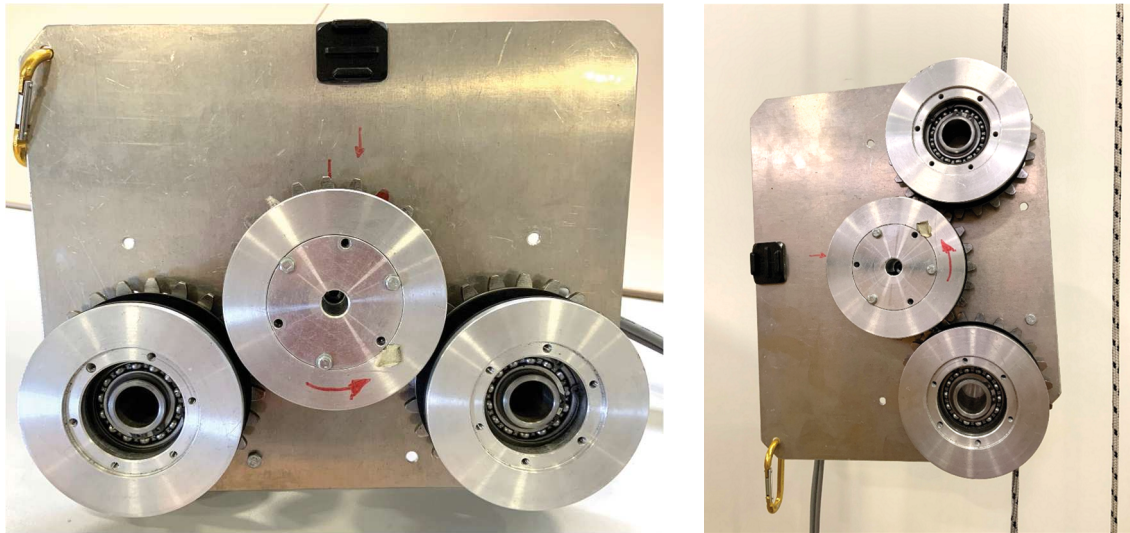
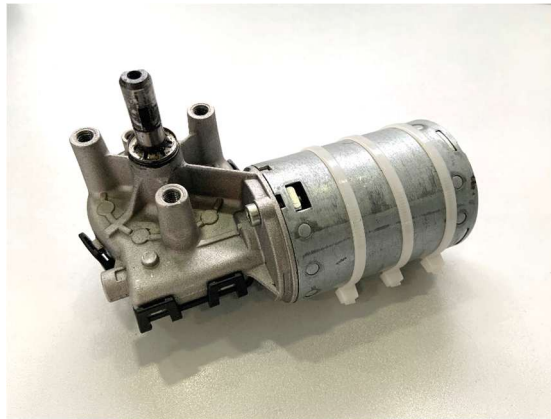


Abbildung 4.37: Seilbahn-Versuchsträger

Auch bei dieser Elektrohängebahn wurde zu Beginn der 24 V-Gleichstromgetriebemotor der Firma Bosch (siehe **Abbildung 4.38**) verwendet. Dieser Motor (Modell F006 B20 102) ist sehr kompakt, besitzt ein geringes Gewicht von nur ca. 1 kg und hat bereits ein eingebautes Schneckenrad-Getriebe. Nachteilig sind der schlechtere Wirkungsgrad, die geringe Leistung und das lastabhängige Beschleunigungsverhalten, da kein Regelkreis und keine Drehzahl-detektierung vorhanden ist. Der Motor befindet sich auf der Rückseite der Aluminium-Grundplatte. Um möglichst viele Teile der Laufkatze Version 3.1 wiederzuverwenden, ist an der Grundplatte nur der Motor mit Getriebe auf der einen Seite und die drei Laufrollen mit Lagerung auf der anderen Seite montiert. Vom Motor geht ein langes Kabel zur Steuerung und zum Motor-Controller. Die Steuerung wird vom Akkumulator der Laufkatze 3.1 gespeist, da dadurch die Komponenten Akku, Sicherungen und Notausschalter wiederverwendet werden.



**Abbildung 4.38:** Bosch Gleichstrommotor F006 B20 102

Da es möglich sein soll, bestimmte Motorschritte bzw. eine Umdrehungsanzahl dem Motor für eine einheitliche Teststreckenlänge vorzugeben, wurde im nächsten Schritt von der Firma Nanotec ein stärkerer bürstenloser Gleichstrommotor (Nanotec DB59C024035-A) verbaut, siehe auch Kapitel 6. Hinter dem Motor ist nachgestellt ein zweistufiges Planetengetriebe der Firma Apex (APEX PAII 042-050, Übersetzung 50:1, Technische Daten siehe Anhang). Motor und Getriebe sind nicht zu verwechseln mit der Kombination und den Modellen der Laufkatze Variante 3.1 und 3.2 aus Kapitel 4.2, da hier größere Leistungen und Drehmomente für die senkrechte Seilfahrt nötig sind. Die neue Motor-Getriebe-Kombination erreicht jetzt ein Drehmoment von ca. 30 Nm bei einem sehr guten Wirkungsgrad. In **Tabelle 4.8** sind die beiden Motoren mit ihren Technischen Daten gegenübergestellt.

**Tabelle 4.8:** Motorenvergleich für den Seilbahn-Versuchsträger

	<b>Bosch Motor F006 B20 102</b>	<b>Nanotec DB59C024035-A</b>
Nennspannung	24 V	24 V
Nennleistung	41,9 W	220 W
Nennstrom	5,5 A	13,6 A
Spitzenstrom	20 A	40 A
Nennmoment	2,5 Nm	0,6 Nm
Spitzenmoment	12 Nm	1,8 Nm
Nenndrehzahl	160 min <sup>-1</sup>	3.500 min <sup>-1</sup>
Gewicht	1,1 kg	0,95 kg
Bauart	Gleichstromgetriebemotor, sehr kompakt	Bürstenloser Gleichstrom- motor NEMA 23
Übersetzung	52:2 (Schneckengetriebe)	Ohne Getriebe

Ein weiterer Vorteil des Nanotec-Motors ist der integrierte Hall-Sensor und Regelkreis, welcher eine bestimmte Anzahl an Schritten ermöglicht. Die Schrittzahl wird dem Motor vorgegeben durch die Nanotec-Steuerung und exakt ausgeführt. Im Anhang sind die Komponenten der Seilbahn in einer Tabelle zusammengestellt.

## 5 Untersuchung der Reibverhältnisse an der Elektrohängebahn

Nachdem in Kapitel 4 das gesamte Elektrohängebahn-Konzept mit seinen Komponenten vorgestellt wurde, wird nun der Schlupf zwischen dem Antriebsrad der Elektrohängebahn sowie der Fahrbahn bestimmt. Dabei sollen mehrere Fahrbahnen betrachtet werden. Konkret handelt es sich dabei um ein Rechteckrohr aus Stahl sowie ein Flachprofil aus Stahl für Geraden und Kurven. Des Weiteren soll die Nutzung eines Seiles als Fahrbahn untersucht werden, um gerade Strecken evtl. günstiger zu überwinden. Außerdem sind drei Laufradbesehichtungen, welche am Demonstrator zum Einsatz kamen, zu bewerten. Nach der Erläuterung der jeweiligen Versuchsaufbauten werden Versuche durchgeführt und ausgewertet, um ein besseres Verständnis für den Vorgang zwischen Fahrbahn und Elektrohängebahn zu erhalten. Die ermittelten Messwerte beruhen teilweise auf der studentischen Arbeit [Söh20].

Zu Beginn werden die Begriffe Reibung und Schlupf eingeordnet bzw. definiert.

### 5.1 Coulombsche Reibung

Reibung ist eine Widerstandskraft zwischen Körpern, Flüssigkeiten und Gasen und wirkt stets der Bewegung entgegen. Sie richtet sich gegen die Einleitung einer Relativbewegung (statische Reibung, Haftreibung) oder entgegen der Aufrechterhaltung dieser Bewegung (dynamische Reibung, Gleitreibung). Neben der äußeren Reibung gibt es die innere Reibung, die die Relativbewegungen von Fluidmolekülen beschreibt. Nachfolgend soll nur die äußere Reibung betrachtet werden, die Festkörperreibung. Die bei der Reibung entstehenden Reibungskräfte erzeugen Wärme, welche meist nicht erwünscht ist. Reibungskräfte sind so gerichtet, dass Bewegungen gehemmt und der Wirkungsgrad einer beliebigen Anwendung herabgesetzt werden. Andererseits ist Reibung für viele Bewegungsabläufe sehr wichtig. Ohne Reibung könnte man nicht laufen, mit dem Auto fahren, kuppeln oder bremsen, auch zerspanende Fertigungsverfahren wären nicht möglich. [nach CH20], [nach WH18]

In dieser Arbeit sollen hauptsächlich die Gleitreibung und die Rollreibung für Festkörper betrachtet werden, da dieses dem Abrollen eines Laufrades auf der Schiene weitestgehend entspricht.

### 5.1.1 Gleitreibung

Wenn ein Körper gleitet und sich auf einer horizontalen Ebene mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, benötigt er eine Kraft, um diese Geschwindigkeit beizubehalten. Die Kraft in der entgegengesetzten Richtung, die durch Reibung verursacht wird, wird als Gleitreibungskraft bezeichnet. Sie ist proportional (Gleitreibungskoeffizient) zur Normalkraft und annähernd unabhängig von der Geschwindigkeit des Körpers. Die Gleitreibungskraft ist kleiner als die Haftreibungskraft ( $\mu_{GR} < \mu_{HR}$ ). Die Gleitreibung  $F_{GR}$  ist eine Widerstandskraft und wirkt nach Überwindung der Haftreibung. [nach Pau02]

Bereits *Leonardo da Vinci* (1452-1519), *Guillaume Amontons* (1663-1705) und *Charles Augustin de Coulomb* (1736 bis 1806) führten experimentelle Untersuchungen zur Reibung mit folgenden Schlussfolgerungen durch: [nach Pop15], [nach WH18]

- Die Reibungskraft  $F_{GR}$  wirkt stets der Bewegung zweier in Kontakt stehender Körper entgegen.
- „*Coulombsche Reibungsgesetz*“: Die Gleitreibungskraft  $F_{GR}$  (in N) ist proportional zur Normalkraft  $F_N$  (in N).

$$F_{GR} = \mu_{GR} \cdot F_N \quad (2)$$

Das Verhältnis der beiden Kräfte wird durch den Gleitreibungskoeffizienten ausgedrückt und ergibt sich zu:

$$\mu_{GR} = \frac{F_{GR}}{F_N} \quad (3)$$

- Der Gleitreibungskoeffizient ist kleiner als der Haftreibungskoeffizient.
- Der Reibungskoeffizient ist unabhängig von der geometrischen Auflagefläche.
- Der Reibungskoeffizient ist abhängig von der Oberflächenrauheit und dem Zwischenmedium.
- Der Reibungskoeffizient ist abhängig von der Temperatur.
- Der Reibungskoeffizient ist näherungsweise unabhängig von der Gleitgeschwindigkeit.

### 5.1.2 Rollreibung

Ohne Haftreibung könnte ein Rad auf einer Oberfläche nicht rollen. Die Rollreibung wird durch die Verformung des Rades und der Oberfläche verursacht, die beide keine idealen starren Körper sind. Auch hier verhält sich die Reibungskraft (gegen die Rollbewegung) proportional zur Normalkraft. Der Proportionalitätsfaktor wird als Rollreibungskoeffizient bezeichnet und ist viel kleiner als der Gleitreibungskoeffizient ( $\mu_{RR} < \mu_{GR} < \mu_{HR}$ ). Nach [CH20] tritt Rollreibung beim Rollen oder Wälzen auf und wirkt der Bewegung stets entgegen. Bei der Rollbewegung findet eine Relativbewegung zwischen den Kontaktpartnern auf Rollkurven statt. Die Drehachse verschiebt sich parallel dazu. Die Formel für die Rollreibungskraft definiert sich wie folgt. [nach Pau02]

$$F_{RR} = \mu_{RR} \cdot F_N \quad (4)$$

Der Rollreibungskoeffizient kann nicht nur von der Beschaffenheit der Oberfläche, sondern auch vom Radius des Rades abhängen. Kleinere Räder drücken sich bei gleicher Normalkraft tiefer in die Oberfläche als große Räder. Die Reibungskraft ist daher größer. Dieser Zusammenhang lässt sich näherungsweise mit der nachfolgenden Formel wiedergeben. Hierbei wird die charakteristische Rollreibungslänge  $l$  (in mm) und der Radius  $r$  (in mm) des Rades eingesetzt. [nach Pau02]

$$F_{RR} = \frac{l}{r} \cdot F_N \quad (5)$$

### 5.2 Seilreibung

Die Seilreibungsformel, auch Euler-Eytelwein-Formel genannt, wurde von Leonhard Euler (1707–1783) und Johann Albert Eytelwein (1764–1848) entwickelt, um das Poller-Seil-Problem zu lösen. Die Formel wird aber auch in technischen Anwendungen verwendet, beispielsweise bei Seilen und Riemengetrieben zur Übertragung von Drehmomenten.

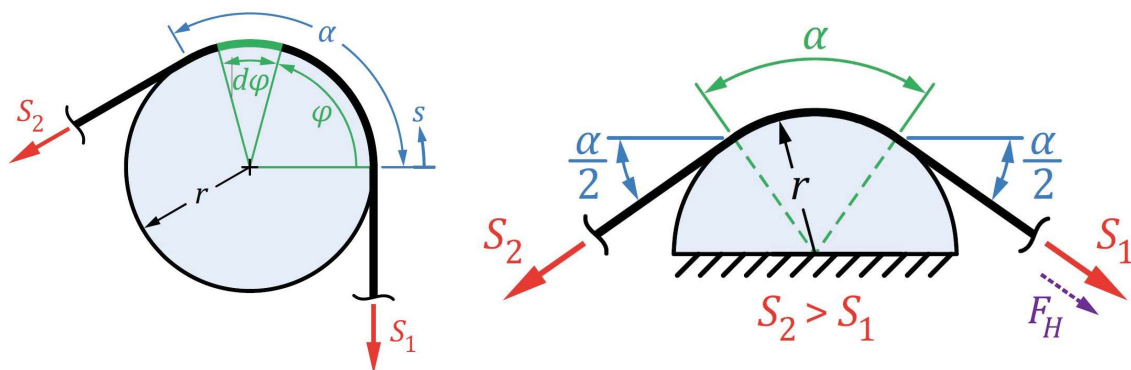
$$S_2 = S_1 \cdot e^{\mu_{HR} \cdot \alpha} \quad (\text{wenn } S_2 > S_1) \quad (6)$$

$$S_2 = S_1 \cdot e^{-\mu_{HR} \cdot \alpha} \quad (\text{wenn } S_2 < S_1) \quad (7)$$

$S_1, S_2$  – Seilkraft [N],  $e$  – Eulersche Zahl,  $\mu_{HR}$  – Haftreibungskoeffizient,  $\alpha$  – Umschlingungswinkel [in rad]

Wenn ein Seil um eine gelagerte Rolle umgelenkt wird, sind die Seilkräfte auf beiden Seiten der Rolle gleich groß. Wenn ein Seil um einen starren zylindrischen Körper umgelenkt wird,

können die Seilkräfte unterschiedlich groß ausfallen, ohne dass es zum Seilrutschen kommt, siehe **Abbildung 5.1**. Der Grund dafür sind die tangentialen Haftreibungskräfte zwischen Seil und dem zylindrischen Körper. Die Haftreibungskräfte unterstützen dabei die kleineren Seilkräfte. Die kleinere Seilkraft  $S_1$  kann also die größere Seilkraft  $S_2$  halten, zum Beispiel das Schiff, das am Hafenspinner befestigt ist und von einer Person gehalten wird. Die Seilreibung gilt nur für den Grenzzustand, d.h. wenn das Seil gerade noch nicht rutscht (bei Seilhaftung). Wenn das Seil auf dem zylindrischen Körper gleitet (bei Seilreibung), muss der Haftreibungskoeffizient durch den Gleitreibungskoeffizienten ersetzt werden. Der Umschlingungswinkel  $\alpha$  muss in Radiant (Bogenmaß) angegeben werden. Die Seilkraft ist unabhängig vom zylindrischen Körper. Je größer der Reibungskoeffizient und der Umschlingungswinkel sind, desto größer ist die Reibung und desto größer ist die maximale Zugkraft. [Sko18], [Spu16]

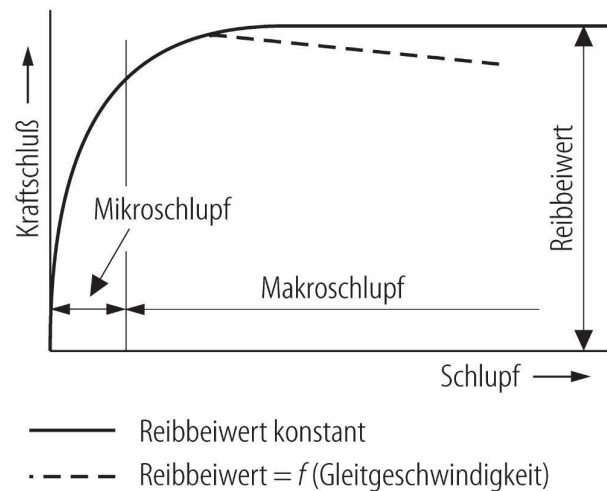


**Abbildung 5.1:** Seilkräfte am zylindrischen Körper [Spu16]

### 5.3 Schlupf

Nach [CH20] kennzeichnet sich der Schlupf durch die Translations- und Rotationsanteile zweier sich bewegender Körper, die in Kontakt stehen.

Schlupf ist eine Relativbewegung von Körpern, die in vielen Bereichen eine wichtige Rolle spielen, oft bezogen auf Fahrgeschwindigkeiten. Dabei wird der Schlupf meist als dimensionslose Größe angegeben. Der Schlupf lässt sich je nach Anwendungsgebiet vielfältig in verschiedene Mechanismen unterteilen. Man unterscheidet zwischen dem Mikro- und dem Makroschlupfbereich (siehe **Abbildung 5.2**), da die Schlupfverhältnisse in beiden Bereichen deutlich unterschiedlich sind. [nach HPK20]



**Abbildung 5.2:** Kraftschluss-Schlupf-Funktion [HPK20]

Im Mikroschlupfbereich entstehen die Tangentialkräfte hauptsächlich durch die Dehnung des Materials. In diesem Bereich erreichen die Schlupfwerte meist nur wenige Promille. Dieser Schlupfmechanismus ist vor allem bei Rollkontakten von Bedeutung. Im Makroschlupfbereich tritt ein höherer Schlupf auf. Hier werden die Kräfte überwiegend durch Reibung übertragen, da bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ein vollständiges Gleiten einer Oberfläche über einer anderen auftritt. **Abbildung 5.2** zeigt eine qualitative Unterscheidung zwischen dem Makro- und Mikroschlupfbereich. Der Verlauf der Kraft im Mikroschlupfbereich ist deutlich vom Schlupf abhängig. Im Makroschlupfbereich stellt sich dagegen eine konstante Kraft unabhängig vom Schlupf bei konstantem Reibungskoeffizienten ein. Die gestrichelte Linie zeigt, wann der Reibungskoeffizient mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit abnimmt. [nach HPK20], [nach CH20]

Nach [Pop15] spielen Rollkontakte in zahlreichen technischen Anwendungen eine entscheidende Rolle. Beispiele sind die Wechselwirkungen zwischen Rad und Schiene und zwischen Reifen und Straße, aber auch bei Kugellagern in vielen Maschinen. Bereits *Reynolds* [Rey76] beschäftigte sich intensiv mit Untersuchungen zur Mechanik von Rollkontakten. Dabei entdeckte er, dass in der Kontaktfläche Haft- und Gleitgebiete auftreten können. Mit zunehmendem Antriebs- oder Bremsmoment wird der Gleitbereich in der Kontaktfläche größer. Dies hat zur Folge, dass die Geschwindigkeit, mit der sich das Rad vorwärts bewegt, nicht mit der Umfangsgeschwindigkeit des Rades übereinstimmt. Es besteht ein Unterschied zwischen der Fahrgeschwindigkeit und der Rotationsgeschwindigkeit des Rades. Die Differenz zwischen der Fahr- und der Umfangsgeschwindigkeit ist proportional zum Antriebsmoment. Das im Kontaktgebiet auftretende Gleiten führt zum Verschleiß der Oberflächen. [nach Pop15]

Der Makroschlupf eines Rades definiert sich durch die Differenz zwischen der Umfangsgeschwindigkeit und der Translationsgeschwindigkeit (Radmitte) im Verhältnis zu einer Be-



## 5.4 Laufrollen

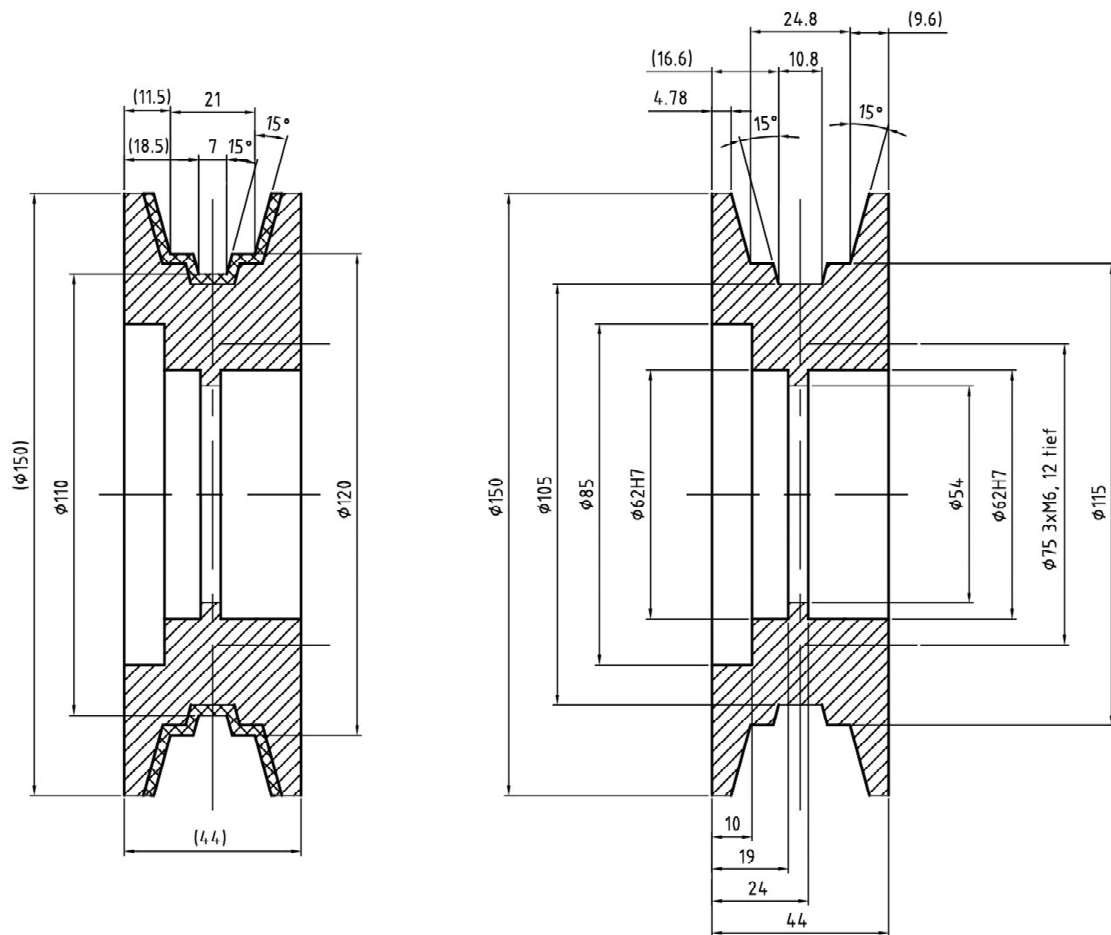
Im Rahmen der Versuche werden drei unterschiedliche Antriebsrollenbeschichtungen untersucht. Die drei Laufrollen unterscheiden sich in ihren Beschichtungsverfahren, der Beschichtungsdicke sowie der Gummihärte, siehe **Tabelle 5.1**. Dazu werden am Fachgebiet Maschinenelemente Grundkörper aus Aluminium hergestellt und von externen Firmen mit einer Gummi-Beschichtung versehen. In **Abbildung 5.4** ist das Antriebsrad der Elektrohängebahn als CAD-Zeichnung dargestellt (links mit Gummi-Beschichtung und nachbearbeitet, rechts nur der Aluminium-Grundkörper). Die Lauffläche mit 21 mm ist für das Befahren des Rechteckrohrs vorgesehen, die schmale mittlere Nut mit 7 mm Breite zum Befahren des Flachprofils und des Seils.

In der folgenden **Tabelle 5.1** sind die Abmessungen und einige Eigenschaften der einzelnen Laurollen der drei Anbieter aufgeführt.

**Tabelle 5.1:** Übersicht Anbieter Gummi-Beschichtung [nach Söh20]

Hersteller	AKU GmbH	Gummiwaren Clarholz GmbH	GARANT GmbH
<b>Beschichtungsverfahren</b>	Tauchgummierung (3 Schichten)	Gegossen	Vulkanisiert
<b>Material</b>	Naturkautschuk	Polyurethan	Nitrilkautschuk
<b>Beschichtungsstärke</b>	2-3 mm	4 mm	8 mm
<b>Umfang Lauffläche</b>	380 mm	378 mm	378 mm
<b>Umfang mittlere Nut</b>	370 mm	365 mm	350 mm
<b>Nachbearbeitung</b>	ja	ja	nein
<b>Gummihärte</b>	75 Shore A	80 Shore A	80 Shore A
<b>Farbe</b>	Schwarz	Gelb	schwarz
<b>Kosten (von 2017)</b>	75 €	109 €	246,36 €

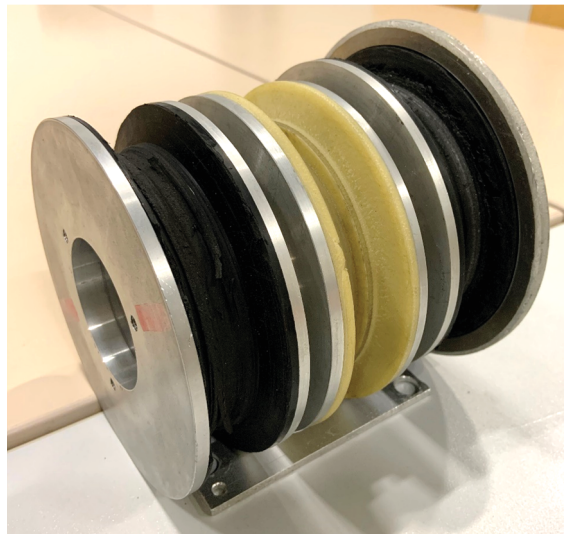
Weitere Laufrollenbeschichtungen wurden angefragt bei den Firmen Greiner Gummitechnik GmbH, Gummi-Technik GmbH, Herbert Brandt GmbH, Hoffmann GmbH und KACO GmbH. Leider konnten diese keine Beschichtungen anbieten, da bei Anfrage keine Fertigungsmöglichkeiten bestanden oder eine Einzelteillfertigung für vertretbare Kosten nicht möglich war. Somit werden die Versuche zum Schlupf in dieser Arbeit mit den drei Beschichtungen der Firmen AKU, Clarholz und GARANT durchgeführt.



**Abbildung 5.4:** Antriebsrad EHB, links mit Beschichtung, rechts Rohteil

Die äußeren Abmessungen der drei getesteten Antriebsrollen (**Abbildung 5.5**) unterscheiden sich bedingt durch die Herstellverfahren geringfügig, der Umfang der Lauffläche beträgt zwischen 378 bis 380 mm, der Umfang der mittleren Nut von 350 bis 370 mm. Im Laufe der Versuchsdurchführungen sind die Rollen unterschiedlich stark verschlissen, was zum Teil erhebliche Auswirkungen auf das mittige Nutprofil der einzelnen Rollen (für das Seil sowie das Flachstahlprofil) hat (mehr dazu im Kapitel 5.9).

Die folgenden Bilder zeigen die drei Antriebsräder während der Versuche sowie die Rollen AKU und Clarholz vor der Nachbearbeitung (**Abbildung 5.6**). Die Rolle GARANT wurde im endbearbeiteten Zustand angeliefert.



**Abbildung 5.5:** Rolle AKU, Clarholz und GARANT (v. l. n. r.)



**Abbildung 5.6:** Rolle AKU links und Rolle Clarholz rechts (vor und nach der Nachbearbeitung)

## 5.5 Rundkursversuche

Zu Beginn der Testreihen werden Vorversuche auf der Versuchsstrecke an der TU Dortmund gefahren, um dort die drei zu untersuchenden Laufrollen miteinander zu vergleichen. Kriterien sind der Schlupf und der Verschleiß sowie kritische Stellen am Versuchsstand. Nach dem Versuchsaufbau und der Versuchsdurchführung folgt die Auswertung der ermittelten Messwerte.

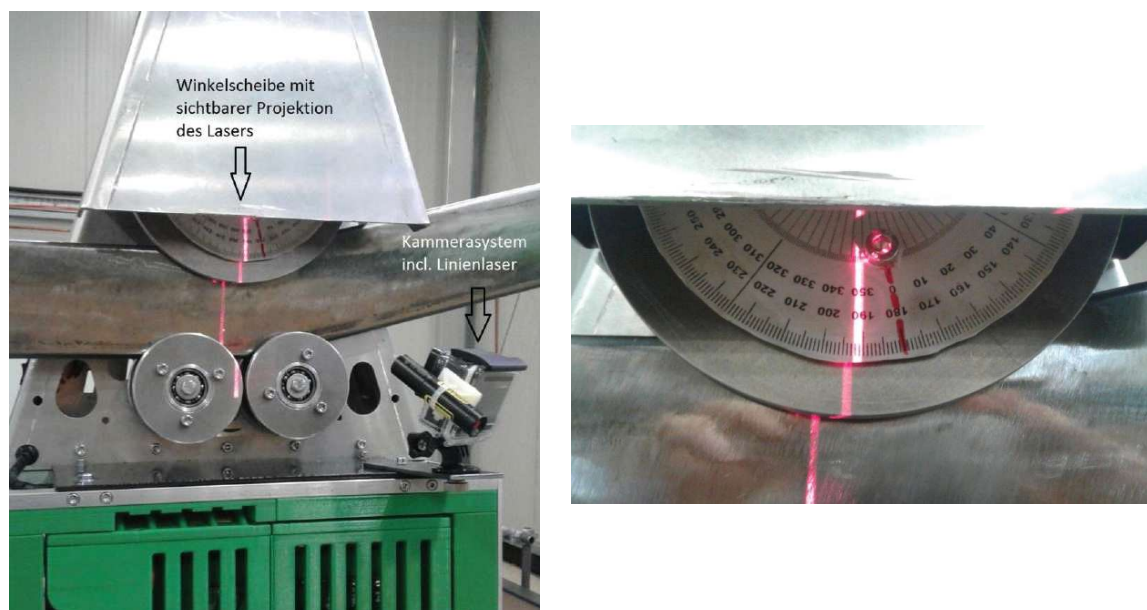
### 5.5.1 Versuchsaufbau Rundkursversuche

Für die Rundkursversuche wird der im Kapitel 4.1.5 beschriebene Versuchsaufbau mit den Abmessungen Länge 3.200 mm und Breite 2.200 mm verwendet, siehe **Abbildung 4.13**. Insgesamt stehen so rund 9,4 Meter Teststrecke für die ersten Versuchsfahrten zur Verfügung. Der Versuchsstand besteht aus Stahl Rechteckrohren für die Geraden, Stahl Flachprofile werden für Kurven verwendet sowie ein kleiner Seilabschnitt. Diese Rundstrecke wird mit der Laufkatze Version 3.1 (siehe Kapitel 4.2) in 18 verschiedenen Konfigurationen befahren, wobei die drei unterschiedlichen Antriebsrollen bei zwei verschiedenen Motorleistungen und mit jeweils drei Beladungsstufen getestet werden sollen, wie in der nachfolgenden **Tabelle 5.2** dargestellt.

**Tabelle 5.2:** Varianten Rundkursversuche

Varianten	Laufрад	Motorleistung	Beladung
	AKU GmbH	50 %	0 kg
	Gummiwaren Clarholz GmbH	80 %	10 kg
	GARANT GmbH	---	20 kg

Die Drehzahl des Antriebsrades der Elektrohängebahn wird mit Hilfe eines Kamerasystems aufgenommen, um die verschiedenen Drehzahlen der drei Antriebsrollen bestimmen zu können. Dazu findet eine direkt an der Bahn montierte Action-Kamera (Modell GoPro Hero 3+) Verwendung, die auf eine an der Antriebsrolle aufgeklebte Winkelscheibe gerichtet ist. Um den Winkel in den Videoaufnahmen besser ablesen zu können, soll zusätzlich ein nicht rotierender roter Linienlaser auf die Winkelscheibe projiziert werden, siehe **Abbildung 5.7**.



**Abbildung 5.7:** Messaufbau mit Winkelscheibe und Markierungslaser [Söh20]

Die Kamera zeichnet die Bilder mit einer Frequenz von 120 Hz auf, sodass eine sehr genaue zeitliche Auflösung gegeben ist. Die Bestimmung der Winkel und die ganzen Umdrehungen auf der Winkelscheibe sind dagegen ungenauer. Durch die Bewegungen und Vibrationen der Elektrohängebahn während der Fahrt entsteht eine gewisse Unschärfe der Bilder. Diese Unschärfe zeigt sich an der roten Projektionslinie des Linienlasers auf der Winkelscheibe sowie den unscharfen Markierungen auf der Winkelscheibe selbst. Dies führt zu einer Ablesegenauigkeit von ungefähr  $\pm 2,5^\circ$  (entspricht 5,28 mm Strecke). Die Drehzahl des Antriebsrades der Laufkatze wird anhand der Videobilder manuell durch die Zeit ermittelt, welche die Laufrolle mit der angebrachten Messscheibe für eine halbe Umdrehung benötigt. Durch das Bestimmen der zwei Werte (Start- und End-Wert) ergibt sich eine Messungenauigkeit von ca. 2,78 %. Das Ergebnis dieser 18 Testreihen ist ein Drehzahlprofil für jeden Testlauf über die Länge der Versuchsstrecke. In Kombination mit der Lage der Kurven, Geraden, Seilelement, Steigungs- und Gefällestrecken kann ein Zusammenhang zwischen der aktuellen Drehzahl/ Geschwindigkeit der Laufkatze und dem Verlauf der Strecke hergestellt werden. Es ist zu beachten, dass die angegebene Drehzahl einen Durchschnitt über die letzte halbe Laufrollenumdrehung darstellt. Da jede halbe Umdrehung der Antriebsrolle ausgewertet wird, beträgt die Länge der gefahrenen Strecke ca. 190 mm. Diese Auflösung ist ausreichend für eine eindeutige Zuordnung zum Streckenpunkt, da die Entfernungen zwischen diesen wesentlich größer sind.

### 5.5.2 Versuchsdurchführung Rundkursversuche

Zur Durchführung der Messreihen wird die Bahn mit den verschiedenen Rollen und Lasten an einem markierten Startpunkt auf der Teststrecke gestartet und fährt jeweils eine Runde. Die insgesamt 18 Fahrten werden ohne Komplikationen absolviert. Die ermittelten Drehzahlen zum entsprechenden Streckenverlauf sind in den nachfolgenden Abbildungen und Diagrammen dargestellt, siehe **Abbildung 5.8** und **5.9**. Dabei sind die Streckenpunkte wie z.B. Kurven, Seil und Geraden im Diagramm eingetragen. Zum Vergleich werden jeweils die Kurven für alle drei Rollen mit ansonsten identischen Prüfparametern dargestellt. Da die einzelnen Messungen nicht immer mit der exakt gleichen Position der Antriebsrolle der Elektrohängebahn starten, sind die einzelnen Graphen teilweise in X-Richtung leicht versetzt. Zur Verdeutlichung werden hier exemplarisch für die Rundkursversuche zwei Drehzahlverläufe dargestellt, die Fahrten mit 80 % Antriebsleistung und 20 kg Nutzlast sowie Fahrten mit 50 % Antriebsleistung und ohne Last.

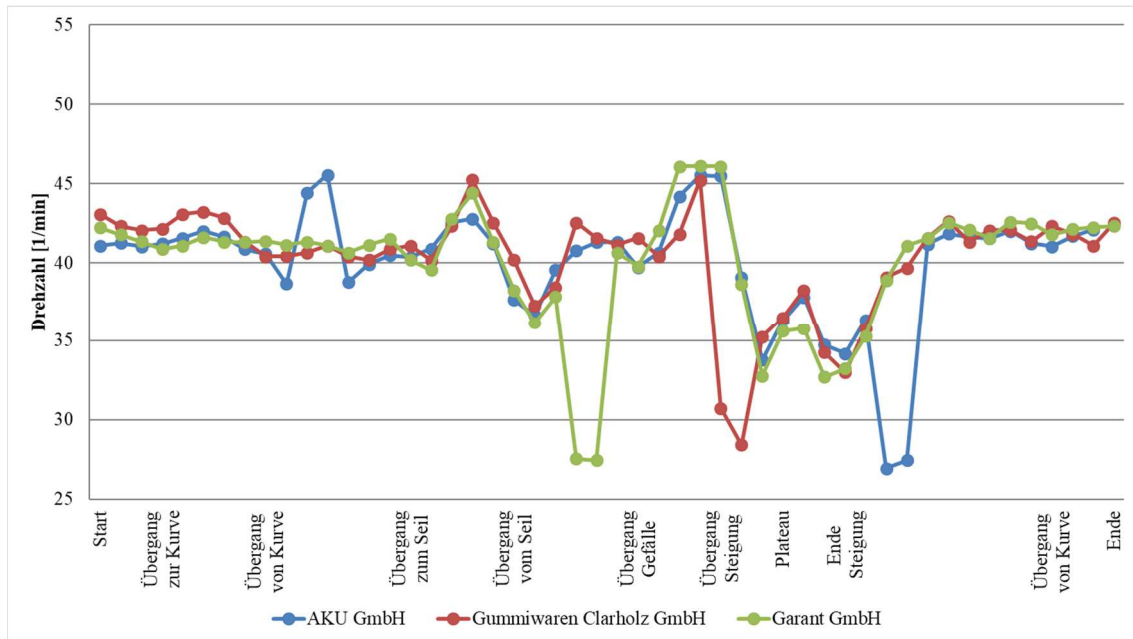


Abbildung 5.8: Drehzahlverlauf bei 80 % Leistung und 20 kg Nutzlast [nach Söh20]

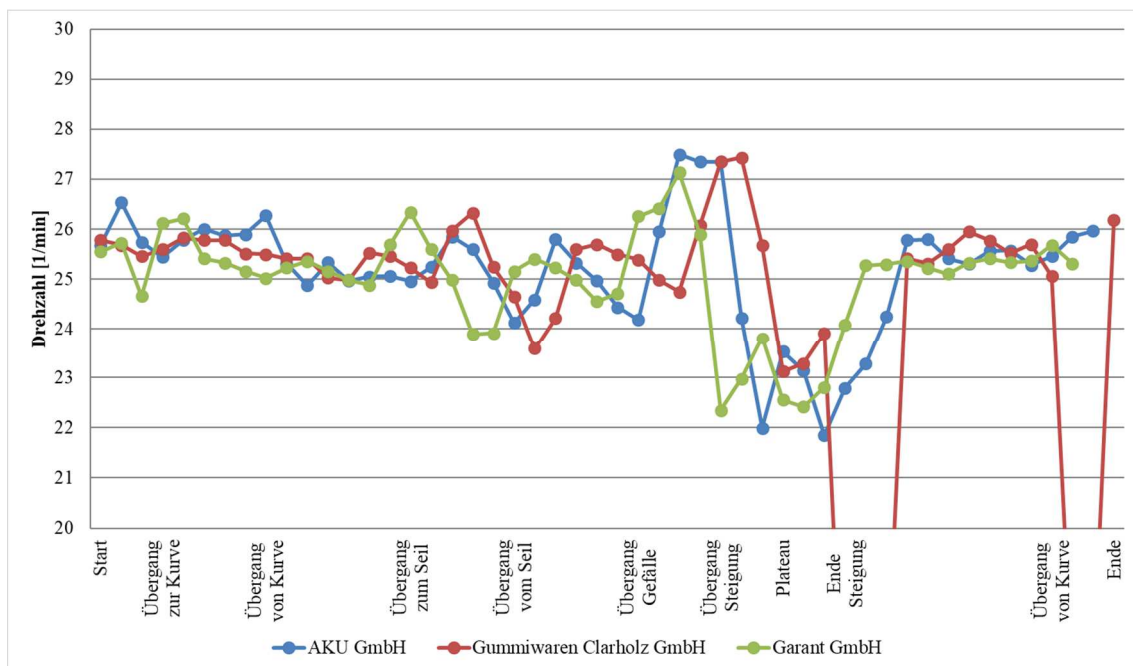


Abbildung 5.9: Drehzahlverlauf bei 50 % Leistung und 0 kg Nutzlast [nach Söh20]

### 5.5.3 Versuchsauswertung Rundkursversuche

Die Fahrversuche zeigen die Drehzahlunterschiede der einzelnen Antriebsrollen im realen Einsatz. Die Unterschiede in der Drehzahl sind nur sehr gering. Bei 50 % Antriebsleistung liegt die Durchschnittsdrehzahl der drei Laufrollen auf dem Rundkurs bei ca.  $25 \text{ min}^{-1}$  ( $25,16 / 24,39 / 25,01 \text{ min}^{-1}$ ), wobei der Unterschied zwischen den einzelnen Antriebsrollen weniger als  $\pm 1 \text{ min}^{-1}$  beträgt und damit im Wesentlichen innerhalb der Messtoleranz von

2,78 % liegt (24,31 bis 25,69  $\text{min}^{-1}$ ). In **Tabelle 5.3** sind statistische Werte zur besseren Vergleichbarkeit dargestellt. Das Laufrad 2 der Firma Gummiwaren Clarholz GmbH weicht von den beiden anderen Laufrädern etwas ab, da fünf Werte stärker nach unten abweichen, siehe Peak in **Abbildung 5.8** sowie die Spannweite (Differenz zwischen maximaler und minimaler Drehzahl) von 15,66  $\text{min}^{-1}$  in **Tabelle 5.3**. Grund der Drehzahlreduzierung bzw. der Abbremsung war vermutlich ein „Verhaken“ der Laufkatze im Bereich der Berg- und Tal-fahrt an einem Übergang zwischen zwei Streckenelementen. Nimmt man diese fünf Werte heraus, ähneln die Werte denen der beiden anderen Laufrollen.

Bei den Versuchen mit 80 % Leistung (höhere Drehzahl = höhere Geschwindigkeit der Bahn) und 20 kg Nutzlast ergibt sich ein ähnliches Bild, siehe **Tabelle 5.4**. Hier beträgt die Durchschnittsdrehzahl ca. 40  $\text{min}^{-1}$ . Bei diesen Versuchsfahrten sind die Schwankungen zwischen maximaler und minimaler Laufraddrehzahl allerdings deutlich größer, was an der höheren Geschwindigkeit liegt und der dadurch höheren Anfälligkeit für Unebenheiten auf dem Rundkurs. Außerdem wird das Antriebsrad durch die höhere Nutzlast mehr an die Fahr-bahn gepresst; kleine Hindernisse wie überstehende Schweißnähte besitzen einen höheren Einfluss auf das Pendeln und das Schwingen der Laufkatze.

**Tabelle 5.3:** Drehzahlauswertung bei 50 % Leistung und 0 kg Nutzlast

	<b>Laufrad AKU</b>	<b>Laufrad Clarholz</b>	<b>Laufrad GARANT</b>
Mittelwert Drehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	25,16	24,40	25,01
Max. Drehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	27,50	27,43	27,14
Min. Drehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	21,85	11,77	22,35
Spannweite [ $\text{min}^{-1}$ ]	5,65	15,66	4,79
Standardabw. [ $\text{min}^{-1}$ ]	1,18	3,16	1,04

**Tabelle 5.4:** Drehzahlauswertung bei 80 % Leistung und 20 kg Nutzlast

	<b>Laufrad AKU</b>	<b>Laufrad Clarholz</b>	<b>Laufrad GARANT</b>
Mittelwert Drehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	40,02	40,31	40,03
Max. Drehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	45,56	45,25	46,12
Min. Drehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	26,95	28,44	27,45
Spannweite [ $\text{min}^{-1}$ ]	18,60	16,81	18,67
Standardabw. [ $\text{min}^{-1}$ ]	3,74	3,32	3,96

Aus den Drehzahlkurven ist zu erkennen, dass die Bahnbewegung in der Ebene, sowohl auf Geraden als auch in Kurven, mit einer konstanten Drehzahl erfolgt. Bei Steigungen und Gefällestrecken ist deutlich eine Drehzahländerung ersichtlich, da die Steuerung bzw. der Bosch Gleichstrommotor der Laufkatze Version 3.1 keinen Regelkreis besitzt, die Drehzahl und Geschwindigkeit also nicht automatisch anpasst. Eine Anpassung der Drehzahl und somit der Stromstärke findet bei einer Steigung oder höheren Belastung nicht statt. Die Bahn fährt bei gleicher Einstellung also langsamer bzw. schneller. Die maximale Drehzahl wird meistens bei Talfahrten gemessen. Die minimalen Drehzahlen entstehen bei Steigungen auf einer Schiene bzw. dem Seil. Dies ist auch der Grund, warum man sich zu einem späteren

Zeitpunkt für eine neue Motor-Getriebekombination aus Nanotec-Motor mit Apex-Planetenradgetriebe (Laufkatzen Version 3.2, siehe Kapitel 4.2 und Kapitel 6) entschied, obwohl sich dadurch die ganze Antriebseinheit aufwendiger gestaltet. Dieser Motor besitzt einen Regelkreis mit Drehzahlaufnahme. Egal welche Störung oder Steigung vorkommt, der Regelkreis versucht die Drehzahl des Laufrades immer auf dem vorgegebenen Wert zu halten. Der Motor hält seine Geschwindigkeit durch Leistungsregelung bei steigender und fallender Belastung konstant, ohne einen Eingriff von außen.

Auch das Verhalten der Bahn an den Übergängen zwischen den Schienenteilstücken (Gerade, Kurve, Steigung, Gefälle und Seil) fällt in den Drehzahlverläufen durch Schwankungen auf. An allen Übergängen sind Drehzahlabweichungen zu erkennen. Bei den Übergängen zu und von den Kurvelementen sind diese zum Teil so gering, dass sie meist innerhalb der Messungenauigkeiten (2,77 %) liegen. Etwas ausgeprägter ist der Effekt bei den Übergängen zum Seil und zur Berg- bzw. Talfahrt. In den Diagrammen ist erkennbar, wenn die Laufkatze das Seil bzw. die Steigungsstrecke hinunterfährt (Gefälle = Drehzahl steigt) und wieder hochfährt (Steigung = Drehzahl sinkt). Die Drehzahlschwankungen am Seil bei 50 % Antriebsleistung und ohne Last liegen bei maximal ca.  $1,42 \text{ min}^{-1}$  (Schiene ca.  $3,15 \text{ min}^{-1}$ ), bei 80 % Antriebsleistung und 20 kg Nutzlast entstehen Schwankungen bis maximal  $5,25 \text{ min}^{-1}$  (Schiene ca.  $7,3 \text{ min}^{-1}$ ). Die Werte sind bezogen auf die jeweilige Durchschnittsdrehzahl. Mit zunehmender Last und Geschwindigkeit ist der negative Effekt der Übergänge also größer, siehe auch **Tabelle 5.5** und **5.6**. Hier sind die Drehzahlschwankungen, bezogen auf die Durchschnittsdrehzahl 25 und  $40 \text{ min}^{-1}$  für den Seilabschnitt und das Schienenelement Berg- und Talfahrt, für 50 % und 80 % Motorleistung, dargestellt.

**Tabelle 5.5:** Drehzahlschwankungen Rundkurs bei 50 % Leistung und 0 kg Nutzlast

		AKU GmbH	Gummiwaren Clarholz GmbH	GARANT GmbH
<b>Gefälle Seilfahrt</b>	Drehzahlsteigerung	$0,85 \text{ min}^{-1}$	$1,33 \text{ min}^{-1}$	$1,34 \text{ min}^{-1}$
<b>Steigung Seilfahrt</b>	Drehzahlsenkung	$0,87 \text{ min}^{-1}$	$1,42 \text{ min}^{-1}$	$1,11 \text{ min}^{-1}$
<b>Gefälle Schiene</b>	Drehzahlsteigerung	$2,50 \text{ min}^{-1}$	$2,43 \text{ min}^{-1}$	$2,14 \text{ min}^{-1}$
<b>Steigung Schiene</b>	Drehzahlsenkung	$3,15 \text{ min}^{-1}$	$1,88 \text{ min}^{-1}$	$2,65 \text{ min}^{-1}$

**Tabelle 5.6:** Drehzahlschwankungen Rundkurs bei 80 % Leistung und 20 kg Nutzlast

		AKU GmbH	Gummiwaren Clarholz GmbH	GARANT GmbH
<b>Gefälle Seilfahrt</b>	Drehzahlsteigerung	$2,80 \text{ min}^{-1}$	$5,25 \text{ min}^{-1}$	$4,41 \text{ min}^{-1}$
<b>Steigung Seilfahrt</b>	Drehzahlsenkung	$3,30 \text{ min}^{-1}$	$2,73 \text{ min}^{-1}$	$3,81 \text{ min}^{-1}$
<b>Gefälle Schiene</b>	Drehzahlsteigerung	$5,52 \text{ min}^{-1}$	$5,21 \text{ min}^{-1}$	$6,12 \text{ min}^{-1}$
<b>Steigung Schiene</b>	Drehzahlsenkung	$6,24 \text{ min}^{-1}$	$7,00 \text{ min}^{-1}$	$7,30 \text{ min}^{-1}$

Der Grund für die größeren Drehzahlschwankungen liegt an den aktuellen Schienenübergängen, z.B. vom Rechteckrohr (Gerade) zum Kurvenelement aus Flachstahlprofil oder beim Übergang zum Seil. Da die Elemente aus Stahl-Halbzeugen hergestellt wurden und miteinander verschraubt oder verschweißt sind, gibt es teilweise an den Übergängen noch ungeglättete, abstehende Ecken und Kanten, an denen die Bahn evtl. hakt bzw. abbremst und dadurch Geschwindigkeit verliert. In der nachfolgenden **Tabelle 5.7** sind einige solcher Auffälligkeiten aufgelistet, die in den Versuchen beobachtet wurden. Dazu werden Verbesserungen dieser Übergänge von Streckenelement zu Streckenelement vorgeschlagen, um die Drehzahlschwankungen, das Pendeln und evtl. Taumeln der Laufkatze für eine ruhigere Fahrt zu reduzieren.

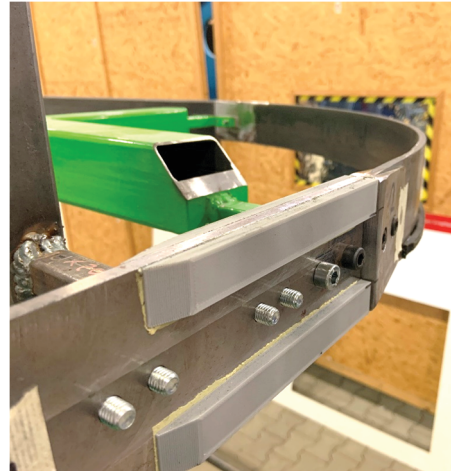
**Tabelle 5.7:** Störung an den Übergängen des Rundkurses

### Übergang Gerade zu Kurve

**Störung:** Fahrbahnbreite ändert sich vom 20 mm Rechteckrohr aus Stahl zum 6 mm Flachstahl mit Hilfe eines geschweißten keilförmigen Adapters (siehe Kapitel 4.1.4); Pendeln und Taumeln können auftreten.



**Verbesserung:** Ecken, Kanten und Lücken glätten und füllen; sauberer verarbeiten; weichere und rundere Übergänge; evtl. mit Kunststoffteilen und flacheren Winkeln am Adapter arbeiten.



## Übergang Schiene zu Seil

**Störung:** Fahrbahnbreite ändert sich vom 20 mm Rechteckrohr zum 6 mm Kunststoffseil mit Hilfe einer Auffahrrampe (siehe Kapitel 4.1.4); Laufkatze verhakt sich teilweise beim Auf- und Abfahren der Rampe; außerdem entsteht bei zu geringer Seilspannung ein zu großer Auffahrwinkel, das Antriebsrad der Laufkatze beginnt zu rutschen, die Laufkatze steht auf der Stelle; Pendeln und Taumeln können auftreten.



**Verbesserung:** Geschweißte Auffahrrampe muss weiter optimiert werden (Ecken, Kanten und Radien glätten, flacherer Auffahrwinkel, Seilführung und Seilspannung optimieren) für einen besseren Übergang; eine verbesserte Variante ist im Bild dargestellt.



## Übergang Gerade zu Steigung- und Gefällestrecke

**Störung:** Beim Befahren vom Übergang gerade auf schräge Schiene (siehe Kapitel 4.1.3) kann es zum Verklemmen der Bahn kommen; der Abstand zwischen Antriebsrad und Führungsrollen wird nicht mehr eingehalten; des Weiteren können Pendeln und Taumeln auftreten.



**Verbesserung:** Die geschweißten Übergänge sauberer verarbeiten; Ecken und Kanten glätten; kleinere Auffahrwinkel; evtl. mit Radien arbeiten; Übergänge gleichmäßiger gestalten, siehe Bild.

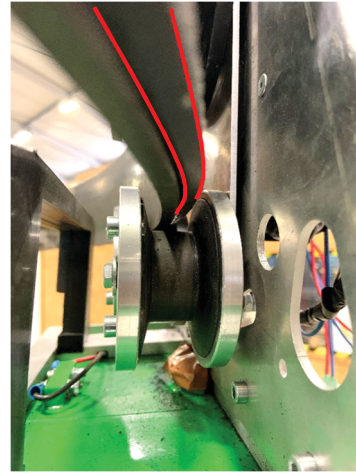


### Übergang Kurvenfahrt auf Flachprofil

**Störung:** Durch das schmalere Flachprofil als Kurvenelement (6 statt 20 mm) kippt die Bahn leicht beim Durchfahren der Kurve, Pendeln und Taumeln können auftreten.



**Verbesserung:** Durch das Befestigen von flexiblen und dämpfenden Gummistreifen (im Bild rot markiert), an der Ober- und Unterseite des Flachprofils (Außenseite), stützen die Führungsrollen und das Antriebsrad die Bahn bei höheren Geschwindigkeiten besser ab.



### Seilfahrt

**Störung:** Beim Befahren des Seiles kann es zum Pendeln und Taumeln kommen, da die Elektrohängebahn nur von dem 6 mm-Seil getragen wird, die Führung und Stabilisierung durch die Führungsrollen jedoch fehlt.



**Verbesserung:** Ein zweites Seil könnte helfen, die Laufkatze bei der Seilfahrt zu stabilisieren.

(Verbesserung nicht umgesetzt)

Eine weitere Maßnahme ist die Verbesserung der Antriebsrad-Innengeometrie. Dadurch könnte die Reibung zwischen der inneren Seitenflanke und der Schiene minimiert werden. Auf dem Rechteckrohr würde ein geringeres Seitenspiel zwischen Antriebsrad und Stahlprofil sowie Führungsrollen und Rechteckprofil helfen, siehe **Abbildung 5.10**. Auch beim

Durchfahren der Kurven berührt die innere Seitenflanke des Antriebsrades das Flachprofil in unregelmäßigen Abständen, sodass es dadurch zu Schwingungen und Pendelbewegungen der Bahn kommen kann.

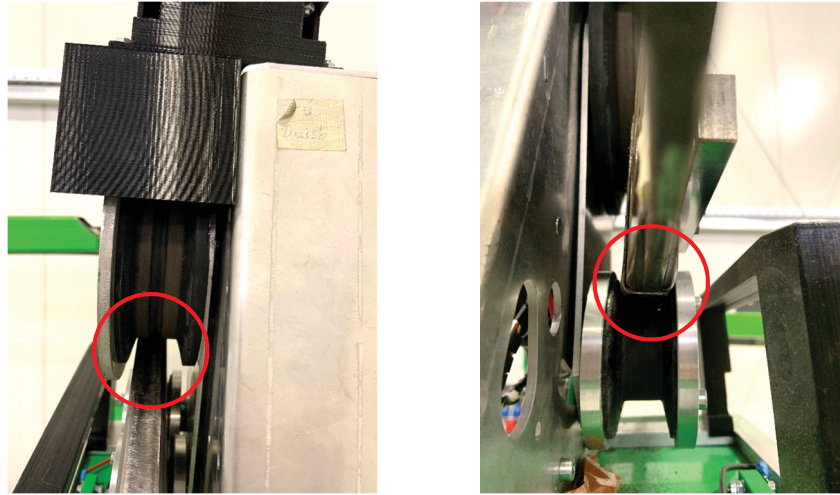


Abbildung 5.10: Antriebsrad auf Rechteckrohr links; Führungsrollen rechts

## 5.6 Steigungsversuche am Rechteckrohr

Zu den durchgeführten Rundkursversuchen im vorangegangenen Kapitel sollen in Kapitel 5.6, 5.7 und 5.8 zusätzliche Steigungsversuche durchgeführt werden. Dabei wird die Elektrohängebahn an verschiedenen Steigungen mit unterschiedlicher Beladung, Antriebsleistung und auf verschiedenen Untergründen, wie Rechteckrohr aus Stahl, Flachstahlprofil und Kunststoffseil, fahren. Die drei Laufrollenbeschichtungen (Kapitel 5.4) werden dabei auf Verschleiß und hinsichtlich des Schlupfverhaltes untersucht. Im nachfolgenden Kapitel wird mit dem Rechteckrohr begonnen.

Das Stahl Rechteckrohr (Rechteckprofil) ist ein standardisiertes Halbzeug aus dem Werkstoff S235JR mit einer Länge von 6 Metern. Der hier gewählte Querschnitt von 80 x 20 x 2 mm hat ein Gewicht von ca. 3,16 kg/Meter und kostet derzeit 3,91 € netto/Meter [Heu23]. Das Rechteckprofil eignet sich sehr gut als gerade Schiene. Es lässt sich zwar biegen, allerdings sehr aufwendig mit speziellen Biegemaschinen, wenn die Querschnittsabmessungen konstant bleiben sollen. Auch sind die Biegeradien im Vergleich zum Flachstahl beim Rechteckrohr stärker begrenzt. Bei der Befestigung der Schiene an Stützen oder Haltenstrukturen muss beachtet werden, dass Schraubenverbindungen den Querschnitt der Schiene nicht verformen. Die Durchbiegung der Schiene gegenüber dem Flachprofil ist vergleichbar, da die gleiche Höhe von 80 mm verwendet wird. Dagegen ist die Verwindung des Profils oder die Kipp-Gefahr beim Rechteckrohr mit seiner Breite von 20 mm gegenüber den 6 mm bei Flachprofil wesentlich geringer.

### 5.6.1 Versuchsaufbau Rechteckrohr

Der Versuchsstand besteht aus einem sechs Meter langen Stahl Rechteckrohr mit den Abmessungen 80 x 20 x 2 mm. Für die Bestimmung des Schlupfs muss eine definierte Messstrecke auf der Schiene gegeben sowie die Steigung veränderlich sein. Zur Bestimmung des Schlupfes wird eine definierte Messstrecke von 2.000 mm auf der Schiene festgelegt. Die Längsskala ist auf der Schiene angebracht, **Abbildung 5.11** zeigt den Versuchsaufbau. Die Schiene aus Rechteckrohr ist dabei auf einem Blechrahmen befestigt (im Bild rechts) und das andere Ende an eine Höhenverstellung geklemmt. Durch die Wahl dieser kann schnell und einfach der Steigungswinkel der Fahrbahn mit der Wahl einer höheren oder niedrigeren Sprosse variiert werden. Für die gefahrene Strecke der Laufkatze ist auf der Schiene eine Längsskala in Millimeterschritten befestigt.



**Abbildung 5.11:** Versuchsaufbau Profilschiene [Söh20]

Der Schlupf wird auch hier wieder wie in Kapitel 5.5.1 mithilfe einer Kamera mit Linienlaser und Winkelscheibe auf dem Antriebsrad bestimmt. Zusätzlich zur Winkelscheibe zeichnet die Kamera die Längsskala auf der Schiene mit auf. Dadurch lassen sich gleichzeitig der Drehwinkel des Antriebsrades und die zurückgelegte tatsächliche Strecke auf dem Profil bestimmen.

### 5.6.2 Versuchsdurchführung Rechteckrohr

Es werden Testreihen mit je drei Antriebsrollen, drei Steigungen, zwei Motorleistungen und drei Beladungen am Stahl Rechteckrohr durchgeführt. Alle Versuchsreihen werden zunächst mit ein und demselben Antriebsrad durchgeführt, bevor das Rad getauscht wird. Die Steigung der Schiene wird über die Höhenverstellung eingestellt. Die Steuerung der Motorleistung erfolgt mit der Seilbahn-App und die Beladung kann durch 5 kg Gewichte an dem Gehäuse der Laufkatze bis maximal 20 kg Nutzlast erhöht werden. Somit sind für jedes Antriebsrad 18 Messreihen nötig, wobei die Steigungs- und die Talfahrten getrennt betrachtet werden. Mit Hilfe der Kamerabilder müssen die Radumdrehungen manuell abgelesen werden. Über den Durchmesser der Antriebsrolle wird der Umfang berechnet und somit die gefahrene Strecke über die gemessenen Umdrehungen. Diese Soll-Strecke wird mit der tatsächlichen Strecke der Laufkatze verglichen, abzulesen über die aufgeklebte Längsskala an der Schiene. Die Differenz ist der gesuchte Schlupf. In **Tabelle 5.8** sind alle zu variierenden Werte aufgelistet.

**Tabelle 5.8:** Einflussgrößen Steigungsversuche am Rechteckrohr

Varianten	Lauftrad	Steigung	Motorleistung	Beladung
	AKU GmbH	ca. 5°	50 %	0 kg
	Gummiwaren Clarholz GmbH	ca. 8°	80 %	10 kg
	GARANT GmbH	ca. 11°	---	20 kg

### 5.6.3 Versuchsauswertung Rechteckrohr

Jede einzelne Fahrt wird mit Hilfe der Kamerabilder ausgewertet. Dabei kann mit dem Linienlaser auf der Winkelscheibe des Antriebsrades der Bahn der Winkel beim Überqueren des Start- und End-Punktes der Teststrecke abgelesen werden. Somit lassen sich die Umdrehungen der Antriebsrolle für eine definierte theoretische Streckenlänge zählen. Durch das manuelle Ablesen der Winkelscheibe mit ihrer festen Einteilung müssen 5° (+/- 2,5°) Ablesegenauigkeit, siehe Kapitel 5.5.1) Messtoleranz berücksichtigt werden. Messungenauigkeiten können auch durch unterschiedliche Streckenlängen auftreten, je nach Versuchsaufbau und abhängig von der gefahrenen Strecke der Bahn. Des Weiteren variiert der Durchmesser der drei Antriebsräder leicht voneinander, was Auswirkung auf den Umfang und somit auf die gefahrene Strecke pro Umdrehung hat. Bei den Flachstahlschienen und dem Seil muss unbedingt der Nut-Durchmesser verwendet werden, welcher geringer ist als der Durchmesser der Lauflfläche des Antriebsrades, siehe dazu auch **Tabelle 5.1** in Kapitel 5.4. Die Umfänge der Laufräder liegen zwischen 350 und 380 mm, je nachdem welches Lauftrad und ob Seilnut oder Lauftradlauflfläche gewählt wird. Beim Umfang muss eine Messtoleranz von ca. 0,5 mm berücksichtigt werden, was sich bei einer Messstrecke von 2.000 mm auf 2,5 mm addiert.

Der Schlupf soll in Prozent angegeben werden für eine bessere Vergleichbarkeit. In der folgenden Berechnung ist die Messwerttoleranz der Messstrecke angegeben.

$$\frac{5^\circ}{360^\circ} \cdot 380 \text{ mm} + (0,5 \text{ mm} \cdot 5) = 7,78 \text{ mm} \approx 0,39 \% \quad (9)$$

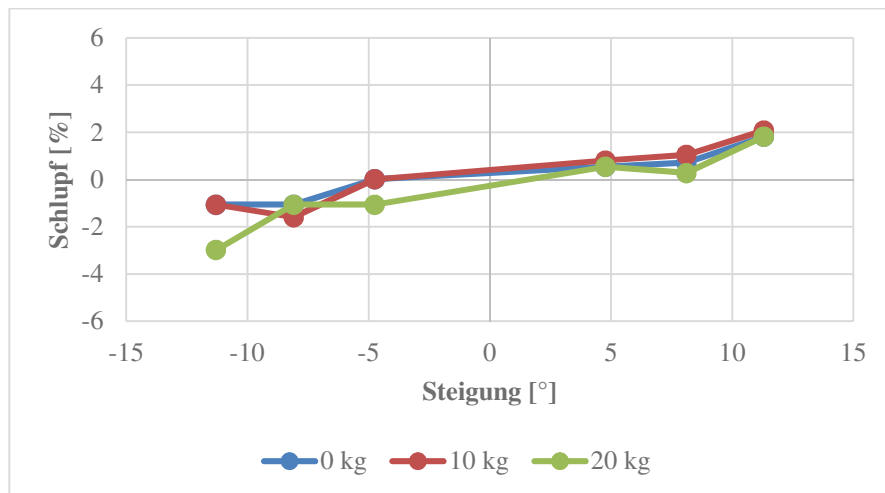
Des Weiteren ist der Schlupf zu ermitteln. Dieser soll über die folgende Formel berechnet werden, siehe **Abbildung 5.3**:

$$s = \frac{l_{\text{theor}} - l_{\text{real}}}{l_{\text{theor}}} \cdot 100 = \frac{l_{\text{soll}} - l_{\text{ist}}}{l_{\text{soll}}} \cdot 100 = \frac{(n \cdot U) - l_{\text{ist}}}{(n \cdot U)} \cdot 100 \quad (10)$$

$s$  – Schlupf [%],  $l_{\text{theor}}$  – theoretische Strecke [mm],  $l_{\text{real}}$  – reale Strecke [mm],  
 $l_{\text{soll}}$  – Soll-Strecke [mm],  $l_{\text{ist}}$  – Ist-Strecke/ Messstrecke [mm],  $n$  – Laufradumdrehungen,  
 $U$  – Umfang der Antriebsrolle [mm]

Damit können die Messwerte ausgewertet werden, wie in den folgenden Diagrammen zum Rechteckrohr.

Die **Abbildungen 5.12 bis 5.19** stellen die Schlupf-Werte für die drei Antriebsräder aus Kapitel 5.4 am Rechteckrohr aus Stahl grafisch dar. Dabei sind die Steigungen für die Bergfahrt mit positiven und für die Talfahrt mit negativen Werten dargestellt. Die Messwerte befinden sich im Anhang.



**Abbildung 5.12:** Schlupf am Rechteckrohr Rad AKU mit 80 % Leistung

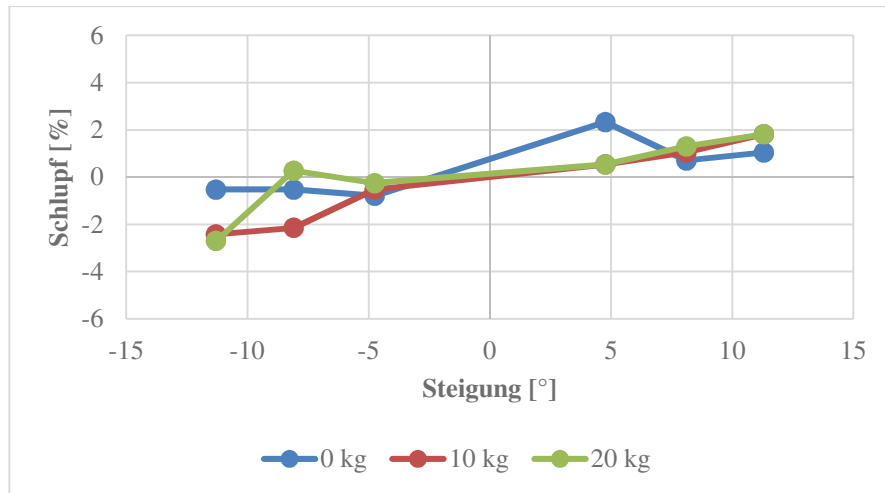


Abbildung 5.13: Schlupf am Rechteckrohr Rad AKU mit 50 % Leistung

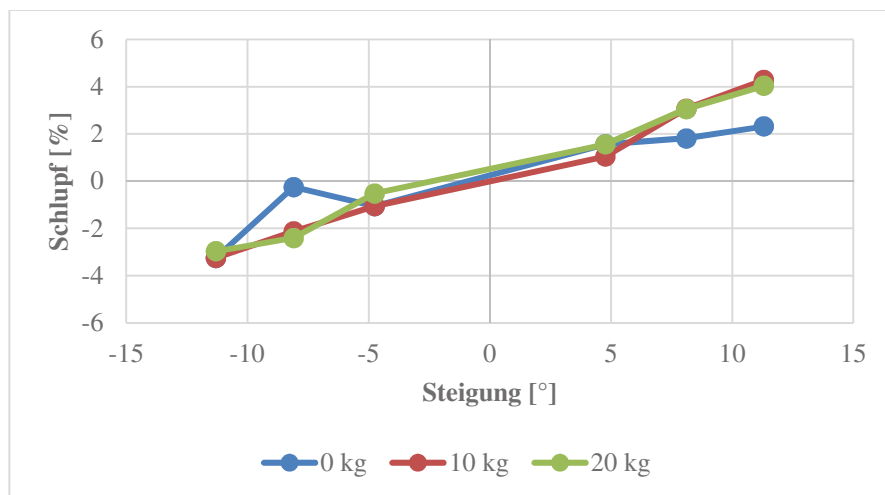


Abbildung 5.14: Schlupf am Rechteckrohr Rad Clarholz mit 80 % Leistung

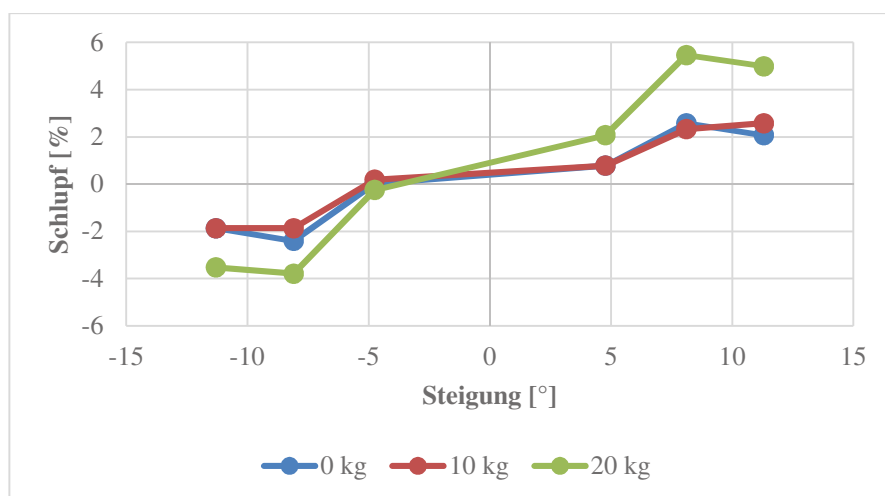
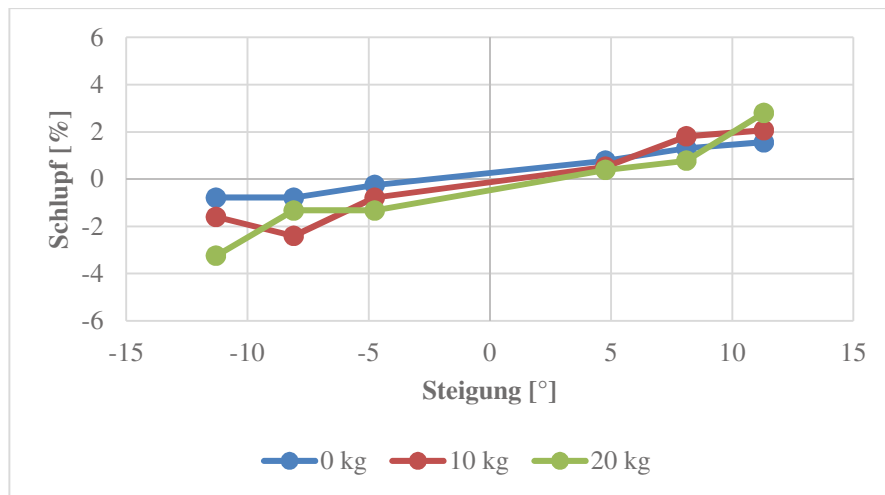
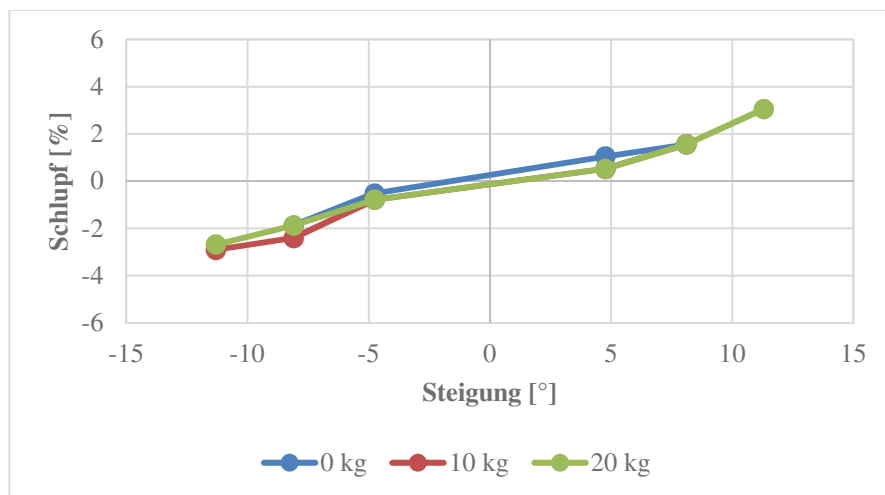


Abbildung 5.15: Schlupf am Rechteckrohr Rad Clarholz mit 50 % Leistung



**Abbildung 5.16:** Schlupf am Rechteckrohr Rad GARANT mit 80 % Leistung

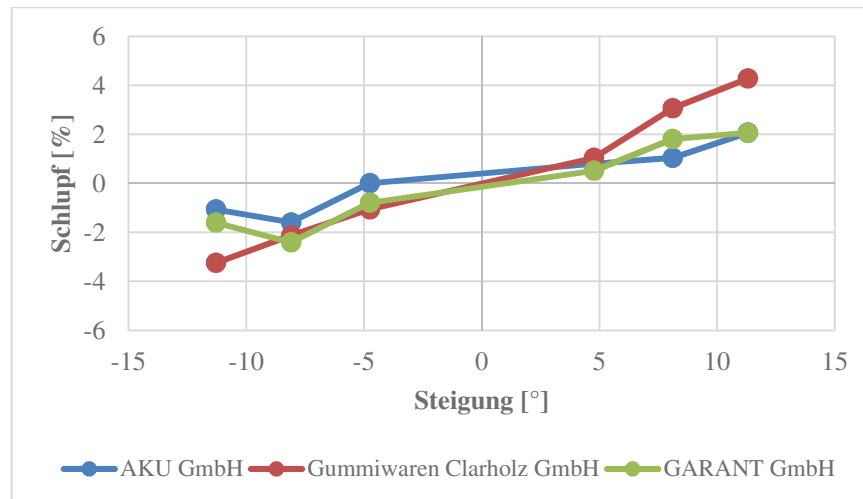


**Abbildung 5.17:** Schlupf am Rechteckrohr Rad GARANT mit 50 % Leistung

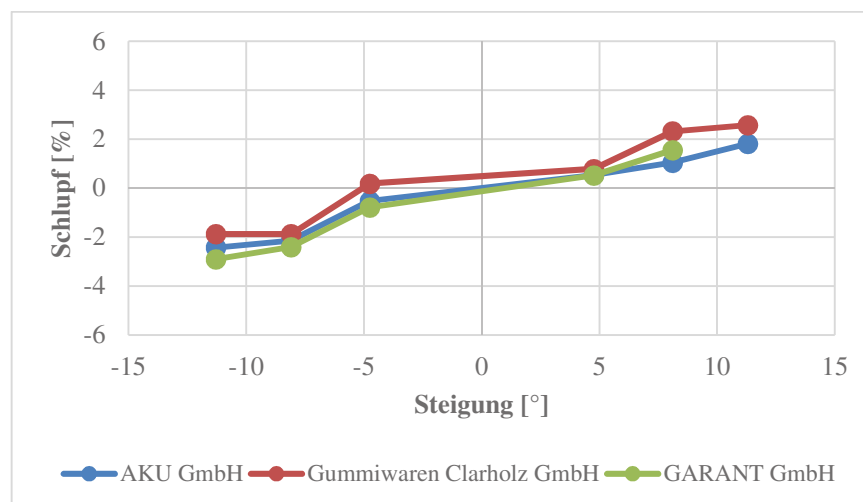
Die Diagramme zeigen die Messwerte der drei Antriebsrollen mit einer Beladung von 0, 10 kg und 20 kg und einer Motorleistung von 50 % bzw. 80 %. Mit zunehmender Steigung steigt der Schlupf und wird negativ bei Gefällefahrten. Die maximalen Schlupf-Werte ergeben sich bei dem Laufrad der Firma Gummiwaren Clarholz GmbH. Der Schlupf beträgt bei der Bergfahrt 4,29 % und bei der Talfahrt -3,24 %, gemessen über die gesamte Messstrecke. Die beiden anderen Antriebsrollen der Firmen AKU GmbH und GARANT GmbH liegen dichter beieinander mit geringeren Schlupf-Werten. Aufgrund von instabilem Fahrverhalten bei dem Laufrad der Firma GARANT GmbH mit 50 % Motorleistung konnten einige Messwerte bei 11° Steigung nicht aufgenommen werden.

Beim Betrachten der Graphen fällt auf, dass die Nutzlast teilweise nur wenig Einfluss auf die Werte des Schlupfs hat (vor allem beim Laufrad der Firma GARANT GmbH), was ausgenommen von einzelnen Messwerten und Peaks nicht unbedingt zu erwarten war. Um den hohen Aufwand der Video-Auswertung zu reduzieren (jedes Video jeder einzelnen Fahrt ist

Bild für Bild durchzusehen) sollen die nachfolgenden Versuche nur noch mit 10 kg Nutzlast durchgeführt werden. Dazu sind in den beiden Graphen in **Abbildungen 5.18** und **5.19** alle drei Laufräder in einem vergleichenden Diagramm dargestellt. Die Beladung beträgt bei allen Fahrten 10 kg, wobei die 80 % Motorleistung und die 50 % Motorleistung veranschaulicht sind.



**Abbildung 5.18:** Schlupf am Rechteckrohr mit 80 % Leistung und 10 kg Beladung



**Abbildung 5.19:** Schlupf am Rechteckrohr mit 50 % Leistung und 10 kg Beladung

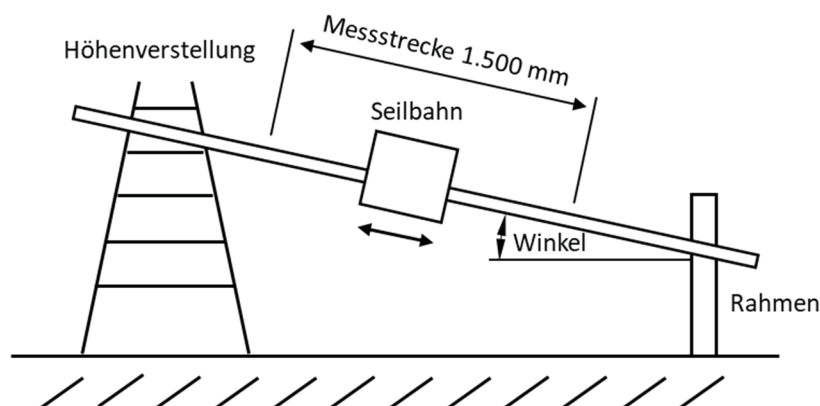
## 5.7 Steigungsversuche am Flachprofil

Nachdem die Fahrten auf dem Rechteckrohr durchgeführt wurden, ist als nächstes das Flachprofil zu untersuchen. Zunächst wird der Versuchsaufbau erklärt, bevor die Versuchsdurchführung und die Auswertung stattfinden.

Flachstähle sind zu langen Stangen gewalzte Stahlstücke, genormte Halbzeuge, günstig und schnell verfügbar und meist in sechs Meter Länge erhältlich. Am Versuchsstand wurden Schienen aus Flachstahl aus dem Werkstoff S235JR verbaut. Der hier gewählte Profilquerschnitt von 80 x 6 mm hat ein Gewicht von ca. 3,8 kg/Meter und kostet 4,79 € netto/Meter [Heu23]. Das Profil weist gute Eigenschaften bei der spangebenden Bearbeitung und beim Fügen durch Schweißen auf. Auch eignet sich das Flachprofil gut für Kurven im Schienenverlauf, da sich leicht kleine Biegeradien umsetzen lassen. Im Elektrohängebahn-Projekt sind Radien von mindestens 1.000 mm gefordert, besser und gewünscht sind 500 mm. Die Profildicke von 6 mm lässt ein Verschrauben ohne Verformung der Schiene zu. Biegeprozesse lassen sich mit moderaten Kräften realisieren. Aufgrund der geringen Profildicke im Gegensatz zur Profilhöhe neigt dieses Profil allerdings zum Verdrehen um die eigene Längsachse, wodurch das Verwinden bzw. eine Kipp-Gefahr besteht.

### 5.7.1 Versuchsaufbau Flachprofil

Der Versuchsaufbau für die Flachprofilschiene ist im Wesentlichen identisch mit dem Aufbau für das Rechteckrohr. Auch hier wird eine sechs Meter lange Profilstange, diesmal als Flachprofil, mit den Abmessungen 80 x 6 mm als Schiene verwendet. Wegen der geringeren Stabilität des Flachstahlprofils, was sich durch die Kipp-Gefahr bei großen Längen zeigt, muss die Messstrecke für das Flachprofil auf 1.500 Millimeter verkürzt werden. Ansonsten wird das eine Ende auf dem Blechrahmen befestigt und das andere Ende an den Sprossen der Höhenverstellung festgeklemmt, siehe **Abbildung 5.20**. Das Kamerasystem zeichnet den Verdrehwinkel und die zurückgelegte Strecke sowie die aufgeklebte Längenskala auf dem Profil auf.



**Abbildung 5.20:** Versuchsaufbau Steigungsversuche Rechteckrohr und Flachprofil

### 5.7.2 Versuchsdurchführung Flachprofil

Die Schwierigkeit bei den Flachprofilversuchen besteht darin, die Winkel aus dem vorherigen Versuch mit dem Rechteckrohr aus Stahl möglichst genau zu wiederholen. Wegen der Kippgefahr beim Flachstahl und der daraus resultierenden kürzeren Messstrecke im Versuchsaufbau sind Anpassungen in der Durchführung nötig. Der Aufwand für die Ausrichtung der Schiene ist höher, wodurch die Reihenfolge der Versuche verändert wird. Jede Steigung soll mit den drei Antriebsrädern durchfahren werden und nicht wie bisher mit einem Laufrad je Steigung. Außerdem wird die Belastung nicht mehr variiert, da sich nach den Versuchen auf dem Rechteckrohr herausgestellt hat, dass die Beladung nur einen geringen Einfluss auf das Fahrverhalten der Bahn hat, auch bei maximaler Beladung von 20 kg. Aus diesem Grund werden alle Flachprofilversuche mit 10 kg Beladung absolviert. Bei den zwei unterschiedlichen Motorleistungen zeigt sich, dass es bei 80 Prozent der Motorleistung zu einem „Aufschaukeln“ der Laufkatze kommt und die Schiene aus der mittleren Führungsnut des Antriebsrades springt. Dabei tritt ein größer werdendes Aufschwingen der Elektrohängebahn auf, weil das Antriebsrad aus der Spur gerät. Das dünne Flachprofil bietet keinen seitlichen Halt mehr. Die Messreihen mit höherer Motorleistung können deshalb nicht ausgewertet werden. Nur bei dem Laufrad der Firma Gummiwaren Clarholz trat dieses Phänomen schwächer auf. Ansonsten werden auch hier Versuche mit drei Steigungen, drei Antriebsrollen, 50 % Motorleistung sowie 10 kg Beladungen durchgeführt, wie in **Tabelle 5.9** aufgezeigt.

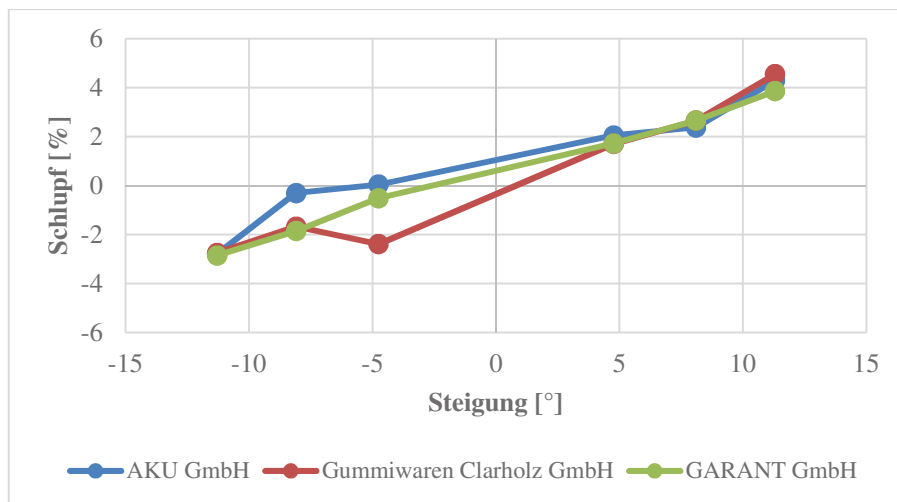
**Tabelle 5.9:** Einflussgrößen Steigungsversuche am Flachstahlprofil

Varianten	Laufrad	Steigung	Motorleistung	Beladung
	AKU GmbH	ca. 5°	50 %	10 kg
	Gummiwaren Clarholz GmbH	ca. 8 °	---	---
	GARANT GmbH	ca. 11 °	---	---

### 5.7.3 Versuchsauswertung Flachprofil

In **Abbildung 5.21** sind die Messwerte für den Schlupf für die drei Laufradrollen auf dem Flachstahlprofil dargestellt. Jede einzelne Fahrt wird wieder mit Hilfe der Kamerabilder ausgewertet und somit die Laufradumdrehungen der Hängebahn für die Messstrecke exakt bestimmt. Auf der x-Achse ist die Steigung in Grad aufgetragen und auf der y-Achse der Schlupf in Prozent. Bedingt durch das instabile Fahrverhalten und die dadurch fehlenden Messwerte bei 80 % Motorleistung sowie zur besseren Vergleichbarkeit mit den Werten des Rechteckrohrs sind nur die Graphen mit 50 % Antriebsleistung und 10 kg Beladung dargestellt. Mit zunehmender Steigung steigt wieder der Schlupf an und kehrt sein Vorzeichen um auf der Talfahrt. Die Werte der drei Laufräder sind nah beieinander, lediglich bei der Gefällestrecke gibt es Abweichungen. Die maximalen Schlupf-Werte liegen bei der Bergfahrt bei

4,56 % und -2,85 % bei der Talfahrt. Auch hier erweist sich das Laufrad der Firma Gummiwaren Clarholz GmbH als etwas schlechter als die beiden anderen. Ansonsten bewegen sich die Werte im Bereich des gemessenen Schlupfs am Rechteckrohr (Messwerte siehe Anhang).



**Abbildung 5.21:** Schlupf am Flachprofil mit 50 % Leistung und 10 kg Beladung

## 5.8 Steigungsversuche am waagerechten Seil

Nachdem die beiden Stahlprofile untersucht wurden, soll nun das Seil als Alternative zum Überbrücken von Geraden betrachtet werden.

Seile sind wesentlich günstiger als Stahlprofile (0,56 € pro Meter für ein Polyesterseil 6 mm 3-litzig gedreht in Weiß, 220 m für 82 € [Kan23]), dies ist ein großer Vorteil gegenüber der Schiene. Auch ist die lieferbare maximale Seillänge mit oft mehreren hundert Metern sehr groß und kaum beschränkt. Eine Gefahr des Kippens oder das Verdrehen des Schienenprofils ist nicht möglich. Kurven können mit Seilen nicht umgesetzt werden, außer man verwendet wieder Zwischenstationen, Eckpunkte und Schienen. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass Seile in Abhängigkeit von der Seillänge, der Belastung und schließlich der Vorspannung einen Seildurchhang haben. Im ungünstigsten Fall berührt dabei die Laufkatze den Boden oder Gegenstände am Boden. Des Weiteren kann der Steigungswinkel zu groß ausfallen, sodass die Elektrohängebahn das Seil nicht mehr befahren kann, und es kommt zum Durchdrehen und Rutschen der Laufrolle auf dem Seil. Der Durchhang muss also begrenzt werden und auch die Seilkräfte, welche beim Spannen des Seils entstehen, müssen berücksichtigt und aufgefangen werden, siehe dazu auch Kapitel 4.1.1. Die Befestigung des Seils und der Spannmechanismus sind wesentlich aufwendiger als zwei Stahlschienen miteinander

der zu verbinden, sei es durch Verschrauben oder Fügen durch Verschweißen. In den folgenden Versuchen soll ein sechs Millimeter Polyester-Kunststoff-Seil Anwendung finden, siehe auch Kapitel 4.1.1.

### 5.8.1 Versuchsaufbau waagerechtes Seil

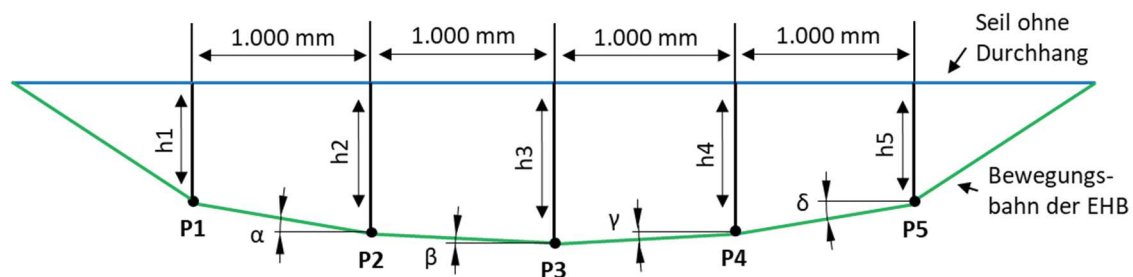
Für die Schlupfermittlung am Seil müssen auch, wie in den Versuchen zuvor, konstante Steigungswinkel geschaffen werden, was nicht leicht zu realisieren ist, da das Seil sich unter keinem definierten und konstanten Winkel spannen lässt. Durch die punktuelle Belastung der Laufkatze mit den Belastungsgewichten weist das Seil in Abhängigkeit der Seilvorspannung stets einen Seildurchhang aus. Nur mit einer hohen Seilvorspannung lassen sich ein geringer Seildurchhang und somit kleinere Seilsteigungen realisieren. Die hohen Vorspannkraft müssen allerdings erst einmal aufgebracht werden, was zu Steifigkeitsproblemen an Stützen und Haltern führen kann, sollte die Elektrohängebahn in eine bestehende Halle installiert werden, oder es können Probleme mit der Hallenstruktur hervorgerufen werden. Der Aufwand, diese hohen Kräfte aufzunehmen und abzustützen, ist groß. Im Versuch wird das ca. sechs Meter lange Seil lediglich manuell mit der Hand vorgespannt, siehe **Abbildung 5.22**. Das Seil ist an zwei Stützen befestigt, die auf dem Boden stehen und sich über ein sechs Meter langes Stahlprofil gegenseitig abstützen.



**Abbildung 5.22:** Versuchsaufbau Seilfahrt [Söh20]

Für die Bestimmung der Seilsteigung (der Seilsteigungswinkel variiert immer, je nachdem wo sich die Laufkatze auf dem Seil befindet) wird das Seil zur Vereinfachung in vier jeweils

ein Meter lange Messbereiche aufgeteilt. An den Messpunkten wird die Seilauslenkung gemessen, die sich ergibt, wenn sich die Elektrohängebahn an dieser Stelle auf dem Seil befindet. Aus diesen fünf Messpunkten und den bekannten Abschnittslängen kann die durchschnittliche Seilsteigung für jeden Bereich ermittelt werden. **Abbildung 5.23** verdeutlicht diesen Zusammenhang bildlich (siehe dazu auch die Abbildungen im Anhang). Mit Grün ist die Bewegung der Laufkatze beim Überfahren des Seils zu sehen. Der Versuchsaufbau für die drei zu untersuchenden Antriebsrollen ist identisch. Die Vergleichbarkeit der Antriebsräder untereinander ist also gegeben. Durch das manuelle Spannen des Seils kann der Seildurchhang variiert und somit ein Seilwinkel vorgegeben werden (gemessene Seilwinkel von ca.  $+9^\circ$  bis  $-14^\circ$ ), wobei die Vorzeichen lediglich die Richtung angeben (negativ = Talfahrt, positiv = Bergfahrt). Auch hier zeichnet die Kamera die Umdrehungen der Laufrolle mit Winkelscheibe kontinuierlich für die spätere Auswertung des Schlupfs auf.



**Abbildung 5.23:** Skizze Versuchsaufbau Seilfahrt

In den folgenden drei **Tabellen 5.10 bis 5.12** sind der Seildurchhang und der Seilwinkel für drei verschiedene Seilspannungen am Versuchsaufbau Seilfahrt angegeben.

**Tabelle 5.10:** Messwerte Seildurchhang 1 (Seilspannung 1)

Position	P1	P2	P3	P4	P5
Seildurchhang h [mm]	230	285	302,5	285	225
Seilwinkel [°]		-3,15	-1	1	3,43

**Tabelle 5.11:** Messwerte Seildurchhang 2 (Seilspannung 2)

Position	P1	P2	P3	P4	P5
Seildurchhang h [mm]	580	750	805	772	635
Seilwinkel [°]		-9,65	-3,15	1,89	7,8

**Tabelle 5.12:** Messwerte Seildurchhang 3 (Seilspannung 3)

Position	P1	P2	P3	P4	P5
Seildurchhang h [mm]	770	1.015	1.100	1.060	895
Seilwinkel [°]		-13,77	-4,86	2,29	9,37

### 5.8.2 Versuchsdurchführung waagerechtes Seil

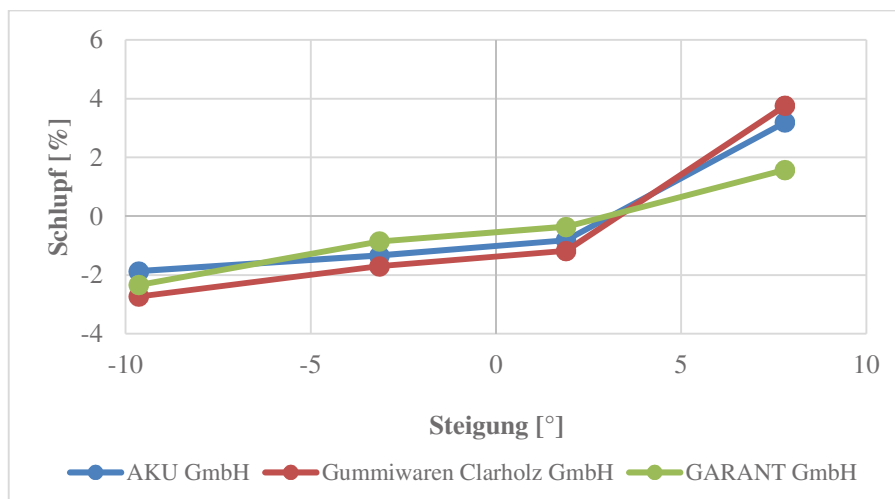
Die Versuche am Seil sind weitgehend identisch mit denen am Rechteckrohr und am Flachstahl. Auch hier werden die gummierten Antriebsrollen für jede der drei Seilspannungen ausgetauscht, bevor die Seilspannung geändert wird, um einen identischen Seilwinkel für alle drei Laufräder zu gewährleisten. Die Belastung der Laufkatze mit Zusatzgewichten wird auf 10 kg festgelegt (siehe Kapitel 5.6.3). Durch die Beweglichkeit des Seils im Raum neigt die Bahn aber stärker zum Pendeln und Schwingen als bei festen Schienen, was die Auswertung der Videobilder erschwert. Im Gegensatz zum Flachstahlprofil kann beim Seil kein Herausspringen des Seils aus der mittleren Führungsnut des Antriebsrades beobachtet werden, und zwar unabhängig von der Motorleistung. Zusätzlich zu den Schlupfmessungen soll für alle drei Laufräder der maximale Steigungswinkel am Seil ermittelt werden. **Tabelle 5.13** zeigt alle zu variierenden Werte für die Seilversuche auf.

**Tabelle 5.13:** Einflussgrößen Steigungsversuche am Seil

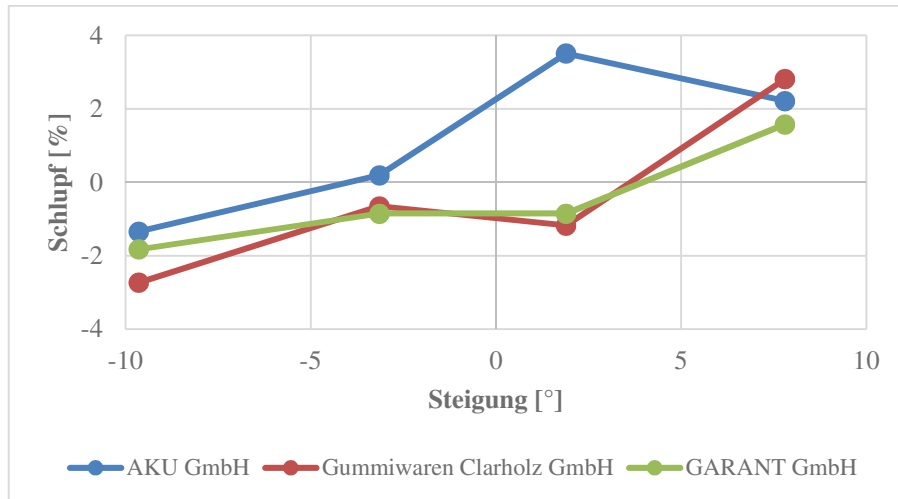
Varianten	Laufrad	Steigung	Motorleistung	Beladung
	AKU GmbH	-3,2° bis 3,4° (Seilspannung 1)	50 %	10 kg
	Gummiwaren Clarholz GmbH	-9,7° bis 7,8° (Seilspannung 2)	80 %	---
	GARANT GmbH	-13,8° bis 9,4° (Seilspannung 3)	---	---

### 5.8.3 Versuchsauswertung waagerechtes Seil

In den **Abbildungen 5.24** und **5.25** sind die Ergebnisse für die drei Laufrollen am Seil für die Seilspannung 2 dargestellt. Dabei sind die Messwerte für die Berg- und Talfahrt in einem Diagramm zusammengefasst, für 80 % Leistung und für 50 % Motorleistung bei 10 kg Beladung (Messwerte und die Diagramme für die Seilspannung 1 und 3 siehe Anhang).



**Abbildung 5.24:** Schlupf am Seil, 80 % Leistung, 10 kg Beladung, Seilspannung 2



**Abbildung 5.25:** Schlupf am Seil, 50 % Leistung, 10 kg Beladung, Seilspannung 2

Positive Schlupfwerte bedeuten Bergfahrt, negative Werte Talfahrt. Auf der x-Achse ist die Seilsteigung in Grad angetragen, die y-Achse gibt den Schlupf in Prozent an. Dabei treten maximale Schlupfwerte von 3,8 % bei der Bergfahrt und -2,7 % bei der Talfahrt auf (bei 80 % Motorleistung). Vergleicht man die Seilversuche mit den Versuchen am Flachstahlprofil und der Profilschiene, so schwanken die Messwerte bei den Seilversuchen teilweise wesentlich stärker. Ein Grund könnte die kürzere Messstrecke sein, was die Messwertabweichungen vergrößert (1 m statt 2 m). Allein aufgrund der halb so langen Messstrecke verdoppelt sich die Abweichung auf ca. 0,8 %. Auch die Bestimmung des Seilwinkels und die Festlegung der vier Streckenabschnitte ist nur eine Annäherung, da sich das Seil unter keinem fest definierten Winkel spannen lässt. Je nach Position der Laufkatze auf dem Seil verändern sich der Seilwinkel und die Steigung. Des Weiteren pendelt und schwingt die Laufkatze aufgrund der fehlenden zusätzlichen Abstützung durch die Führungsrollen wesentlich stärker als bei den Schienen.

Zusätzlich sollen die maximalen Steigungswinkel bestimmt werden. Dabei wird die Steigung des Seils notiert, an der das Laufrad die Haftung zum Seil verliert. Es ergeben sich folgende maximale Steigungswinkel, siehe **Tabelle 5.14**. Die drei beschichteten Laufrollen liegen wieder dicht bei einander und erreichen maximale Seilsteigungswinkel von 18° bis 20°.

**Tabelle 5.14:** maximale Steigungswinkel am waagerechten Seil

	AKU GmbH	Gummiwaren Clarholz GmbH	GARANT GmbH
Max. Steigungswinkel	18°	20°	19°

## 5.9 Zusammenfassung und Fazit Steigungsversuche

Im Rahmen der Versuchsreihen wurden zunächst erste Testreihen und Vorversuche an der Versuchsstrecke durchgeführt (Rundkursversuche), um die drei beschichteten Laufrollen der Firmen AKU GmbH, Gummiwaren Clarholz GmbH und GARANT GmbH miteinander vergleichen zu können. Anschließend wurden die Auswirkungen von Drehzahlschwankungen bei Rundkursfahrten untersucht, wobei der Fokus auf den verschiedenen Streckenelementen und deren Übergängen lag. Die Ergebnisse wurden in einer Auflistung der Auffälligkeiten und Verbesserungen zusammengefasst.

Im nächsten Schritt wurden die eigentlichen Steigungsversuche mit den drei Laufradbeschichtungen durchgeführt. Dabei wurden die Steigung, die Beladung und die Antriebsleistung variiert. Der optische Verschleiß und der Radschlupf waren die Zielgrößen der Versuche. Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse sollen im Folgenden in komprimierter Form dargelegt werden.

**Laufrad:** Im Rahmen der Untersuchung wurden drei Laufräder mit unterschiedlichen Gummi-Beschichtungen getestet, siehe Kapitel 5.4. Weitere Hersteller konnten zum Zeitpunkt der Untersuchung keine Lieferung anbieten. Die Gummi-Beschichtung dient der Erhöhung des Reibungskoeffizienten zwischen Antriebsrad und Schiene. Der Verschleiß der beiden Laufradbeschichtungen der Firmen AKU GmbH und Gummiwaren Clarholz GmbH ist deutlicher sichtbar durch Abrieb und Staub am Seil oder an der Schiene als bei der Laufrolle der Firma GARANT GmbH. Die Beschichtung der Firma AKU erscheint nur bedingt abriebfest. Die Gummi-Schichten lösen sich nach und nach ab. Der Gummi-Belag der Rolle der Firma Gummiwaren Clarholz ist nicht abriebfest, dieser wird schnell zu Pulver und rieselt zu Boden. Die dritte Beschichtung der Firma GARANT GmbH bietet hier die beste Lösung. Trotzdem konnten alle untersuchten Laufräder die Testfahrten mit den Gewichten, Steigungen und den beiden Motorleistungen absolvieren. Aus technischer Sicht und auf Grundlage der Vielzahl der Versuche und der Dauerversuche auf den beiden erwähnten Messen in Stuttgart und Dortmund empfiehlt sich hier die Laufradbeschichtung der Firma GARANT GmbH. Im Schlupfverhalten der drei Laufrollen sind bei den Steigungsversuchen nur geringe Leistungsunterschiede nachzuweisen. Der für die Empfehlung des Laufrades ausschlaggebende Punkt ist damit die Verschleißfestigkeit. Einzig der Nachteil, die geringere Stabilität auf dem Flachstahlprofil bei den Steigungsversuchen, muss kritisch betrachtet werden. Dies ist bei den Kurvenfahrten der Rundkursversuche allerdings nicht aufgefallen. Um diese Schwäche zu minimieren, sollte die Profilgeometrie der Antriebsrolle hinsichtlich der Führungsnut weiterentwickelt werden. Auch sollten die seitlichen Bordscheiben am Laufrad und den beiden Führungsrollen noch besser angepasst werden. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht sind die Kosten für die Beschichtung des Antriebsrades mit 250 € zu hoch. Es sollte

die Möglichkeit in Erwägung gezogen werden, weitere Hersteller zu suchen, um bereits existierende Laufräder von Schwerlastrollenherstellern einzusetzen. Weitere Langzeitversuche sind erforderlich, um den Verschleiß des Laufrades und der Gummi-Beschichtung besser zu erfassen.

**Rechteckrohr:** Das gewählte Rechteckrohr aus Stahl kann für die meisten Strecken verwendet werden. Es eignet sich hervorragend für die Steigungsstrecken. Hier treten meistens geringere Schlupfwerte auf als beim Flachprofil oder Seil (siehe Kapitel 5.6.3) und liegt stets unter 5 % Schlupf. Alle Tests können auf ihm durchgeführt werden. Es ist nur ein geringes Pendeln und Schwingen der Laufkatze zu beobachten. Neben den Steigungsstrecken ist das Profil auch für gerade Strecken sehr gut geeignet. Radien für Kurven sind nur mit großem Aufwand und mit speziellen Biegemaschinen für einen konstanten Querschnitt herzustellen. Es wird empfohlen, das Rechteckrohr für gerade Streckenabschnitte mit oder ohne Steigung zu verwenden.

**Flachprofil:** Das Flachprofil aus Stahl eignet sich insbesondere für Kurvenelemente ohne Steigung, da es bei der Laufkatze bei höheren Leistungen zu einem „Aufschaukeln“ bzw. Aufschwingen kommt. Das Flachprofil bietet zu wenig Seitenhalt und das Antriebsrad springt mit der mittleren Führungsnut aus der Schiene heraus (siehe Kapitel 5.7.2). Der Radius beträgt 500 mm bis 1.000 mm. Die Schlupfwerte sind geringfügig höher als beim Rechteckrohr. Aufgrund seiner leichteren Verformbarkeit eignet sich das Flachprofil besonders für Kurvenabschnitte, da diese mit reduzierter Leistung und Geschwindigkeit befahren werden und keine Steigungen enthalten. Allerdings ist der Verschleiß am Flachprofil höher, da die Auflagefläche schmaler ist, was zu einem erhöhten Risiko des Einschneidens führt.

**Waagerechtes Seil:** Das Seil ist für längere Strecken und den aktuellen Laufkatzenaufbau nur eingeschränkt zu empfehlen. Hier treten die höchsten Schlupfwerte auf (bis -6,65 %), gleichzeitig konnten aber alle Steigungsversuche damit durchgeführt werden. Bei den Versuchsfahrten kommt es durch die Beweglichkeit des Seils im Raum sowie die fehlende zusätzliche Abstützung der Laufkatze auf dem Seil durch die Führungsrollen zu einem verstärkten Schwingen und Pendeln der Elektrohängebahn (siehe Kapitel 5.8.3). Hier schwanken die Schlupfwerte am stärksten. Um zu verhindern, dass die Laufkatze vom Seil herabstürzt, sollte diese mit geringerer Leistung und Geschwindigkeit betrieben werden, um Störungen im Betrieb zu vermeiden. Ein weiteres Problem stellte das fehlende automatische Seilspannsystem dar, da die Seilspannung manuell für die Versuche eingestellt werden musste. Eine Weiterentwicklung mit Gewichten ist in den Kapiteln 4.1.4 und 6 beschrieben. Das Seil eignet sich nicht für den Einsatz in Kurven, sondern lediglich für gerade Streckenelemente. Des Weiteren können die Steigungen als schwierig erachtet werden, da diese an jedem Punkt des Seils unterschiedlich sind. Es stellt sich die Frage, ob das Seil für Geraden

und längere Strecken verwendet werden kann. Kurze Strecken sind möglich, längere Strecken hingegen sind kritisch zu betrachten, da Pendeln und Schwingen auftreten sowie das Absturzrisiko zunimmt. Des Weiteren ist die Seilspannmechanik aufwändig und erfordert teilweise hohe Seilspannkräfte, die zusätzlich im Hallenboden oder an der Hallenwand abgestützt werden müssen.

**Beladung:** Im Rahmen der Untersuchung wurden Zuladungen von 0, 10 und 20 kg analysiert, wobei 20 kg die maximal zulässige Beladung darstellen. Das Eigengewicht der Laufkatze der Elektrohängebahn beträgt in der Version 3.1 ungefähr 13,5 kg inklusive Akkumulator. Bei einer Zunahme der Zuladung zeigt sich lediglich eine geringe bis gar keine Veränderung des Schlupfwertes, was im Widerspruch zu den Erwartungen steht. Infolgedessen wurden nur noch Versuche mit einer Beladung von 10 kg (Flachprofil und waagerechtes Seil) durchgeführt, da der Schlupfwert unter 5 % blieb. Die durchgeführten Tests beschränkten sich auf kleine, zentrierte und unbewegliche Gewichte. Bei Objekten mit großem Volumen oder in sich beweglichen Gütern wie Kugeln oder Flüssigkeiten sind neue Tests erforderlich, um die Eignung des Systems für diese Anwendungsfälle zu verifizieren.

**Steigungen:** Die Versuchsfahrten auf den beiden Stahlprofilen umfasste Steigungen von 5°, 8° und 11°. Insbesondere auf dem Rechteckrohr aus Stahl können mit den beiden Laufrädern von AKU und GARANT sehr gute Schlupfwerte von weniger als 3 % ermittelt werden. Damit kann eine klare Empfehlung zur Überwindung von Steigungen auf dem Rechteckprofil mit der Elektrohängebahn ausgesprochen werden. Die Steigungswinkel sind durch den vereinfachten Versuchsaufbau bedingt. Der Versuchsaufbau stellte sich als schwierig zu realisieren dar, da eine schnelle Wiederholbarkeit gefordert war, die mit vier veränderlichen Parametern einhergeht. Dies beinhaltete größere Umbauarbeiten. Der Schlupf steigt mit der Steigung an, was im Vorfeld erwartet wurde. Als Handlungsempfehlung kann festgehalten werden, dass alle drei Steigungen mit den drei Gewichten befahren werden können. Der Schlupf bleibt dabei in den meisten Fällen unter den geforderten 5 %. Es wird gewünscht, höhere Steigungen zu realisieren. Allerdings liegt der Schlupf bei einer Beladung von 20 kg und einer Steigung von 11° teilweise nur knapp unter 5 %, bei dem Laufrad der Firma Gummiwaren Clarholz GmbH sogar bei 5,7 %. Bei identischem Aufbau erübrigen sich Tests für höhere Steigungen, da die 5 %-Grenze teilweise bereits erreicht ist. Am Seil konnte die Laufkatze Steigungen von -13,77° bis 9,37° überwinden. Auch hier gilt, je höher die Steigung (positiv wie negativ), umso größer wird der Schlupfwert. Die maximalen Seilsteigungen am waagerechten Seil betragen 18° bis 20°, wobei dies die maximale Steigung darstellt, bei der das Laufrad die Haftung verliert.

**Motorleistung:** Die Motorleistung und somit die Drehzahl hat einen Einfluss auf den Schlupfwert. Je höher die Motorleistung ist, umso größer fallen auch die Schlupfwerte aus, deutlich zu erkennen bei den Seilfahrten (siehe **Abbildung 5.24 und 5.25**). Es sei darauf

hingewiesen, dass die Werte die Beschleunigungs- und Abbremsphasen beinhalten, welche einen größeren Einfluss ausüben können als bei einer gleichmäßigen Fahrt, da dort mehr Schlupf auftreten kann. Im Rahmen der Untersuchung wurden zwei Motorleistungen, 50 % und 80 %, getestet. Die Empfehlung lautet, dass eine Motorleistung von 80 % gut gefahren werden kann, da sich die Drehzahl und somit die Geschwindigkeit des Antriebsrades gegenüber der 50 %-Leistung erhöht, gleichzeitig bleibt der Schlupfwert unter 5 %. Auf ebener Strecke, auf dem Rechteckrohr, mit 80 % Motorleistung und dem Laufrad der Firma AKU GmbH entspricht dies einer Drehzahl von ca.  $41,3 \text{ min}^{-1}$  ( $0,26 \text{ m/s}$ ). Bei 50 % Leistung sind es ca.  $25,9 \text{ min}^{-1}$  ( $0,16 \text{ m/s}$ ). Als Ausblick sollten höhere Drehzahlen für höhere Geschwindigkeiten getestet werden. Dazu ist allerdings ein neuer und stärkerer Motor erforderlich, wie bei der Laufkatzenvariante 3.2 mit Nanotec-Motor und neuem Winkelplanetengetriebe.

Für eine 1.000 m lange Strecke benötigt die Laufkatze bei einer Geschwindigkeit von maximal  $0,35 \text{ m/s}$  eine Zeit von 2.857 s, das entspricht 47,6 min. Hat diese Strecke eine konstante Steigung bzw. ein konstantes Gefälle von ca.  $11^\circ$  und damit einen Schlupf von 3 %, so legt die Laufkatze in der gleichen Zeit 970 m statt 1.000 m zurück. Die Fahrzeit der Laufkatze erhöht sich nur um 85,7 s, also 1,43 min. Dieser Wert ist für den innerbetrieblichen Transport akzeptabel, muss aber für die Planung der Fahrten bekannt sein. Dieses Beispiel soll zeigen, welchen Einfluss der Schlupf auf die Transportzeit haben kann. Es wird empfohlen, Steigungen nur kurz zu befahren, um Höhenunterschiede auszugleichen, da ein erhöhter Schlupf zu einem erhöhten Verschleiß der Gummierung der Laufräder führt.

**Schlupf:** Die vorausgegangenen Steigungsversuche in Kapitel 5.6, 5.7 und 5.8 haben gezeigt, dass alle drei Laufrollen die Anforderungen erfüllt haben. Sie konnten auf den Schienen aus Stahl Rechteckrohr, Flachstahlprofil und Seil die gestellten Steigungen überwinden. Der maximale gemessene Schlupf liegt in einem Bereich zwischen 4,56 % für positive Steigungen (Bergfahrt auf Flachstahlprofil) und -6,65 % für Gefällestrecken (Talfahrt auf Seil), siehe **Tabelle 5.15**. Für das Flachstahlprofil waren keine Schlupfmessungen möglich bei 80 % Leistung, weil die Laufkatze sich „aufschaukelt“, aufschwingt und das Antriebsrad dabei aus der Spur gerät. Die Laufrollen der Firmen AKU GmbH und GARANT GmbH liegen bei den Schlupfmessungen am Rechteckrohr dicht beieinander (siehe **Abbildung 5.18** und **5.19**). Der Unterschied der Messwerte beträgt weniger als 1 % Schlupf. Dagegen sind die Schlupfmesswerte der Laufrollenbeschichtung der Firma Gummiwaren Clarholz GmbH zu den beiden anderen Beschichtungen am Stahl Rechteckrohr teilweise bis zu 2,2 % höher, siehe **Abbildung 5.18**.

In **Tabelle 5.15** sind die maximal ermittelten Schlupfwerte für die beiden Stahlprofile und das Seil bei 10 kg Beladung zur besseren Vergleichbarkeit zusammengestellt.

**Tabelle 5.15:** Vergleich der maximalen Schlupfwerte bei 10 kg Beladung

Profil / Seil	Schlupf Bergfahrt		Schlupf Talfahrt	
	50 % Leistung	80 % Leistung	50 % Leistung	80 % Leistung
Rechteckprofil	2,58 %	4,29 %	-2,90 %	-3,24 %
Flachprofil	<b>4,56 %</b>	---	-2,85 %	---
Seil	3,51 %	3,77 %	-3,82 %	<b>-6,65 %</b>

### Laufruhe

Bei der Laufruhe (erschütterungsfreie Bewegung der Laufkatze, Bewegung ohne starkes Pendeln oder Schwingen) und Stabilität fällt die Laufrolle der Firma Gummiwaren Clarholz GmbH positiv auf. Im Gegensatz zu den beiden anderen Laufrollen fährt diese auch bei höherer Motorleistung (80 %) auf dem Flachstahlprofil in der mittleren Führungsnut, während die anderen Laufrollen sich aufschaukeln und die Nut verlassen. Dieses Verhalten kann nur beim Flachstahlprofil beobachtet werden, nicht beim Rechteckrohr oder beim Seil.

### Dauerversuch

Den guten Eindruck der Laufrolle Firma GARANT GmbH konnten auch die beiden Messeauftritte 2018 (LogiMAT) und 2019 (Logistics & Distribution) in Stuttgart und Dortmund bekräftigen, da dort ein und dieselbe Laufrolle an der Laufkatze jeden Messetag (9 - 17 Uhr) zeitweise ununterbrochen mit nur wenig Verschleiß und voller Beladung fuhr. Bei ca. 26 Sekunden für eine Runde auf dem Rundkurs der Logistikmesse in Stuttgart hat die Bahn im Dauerversuch über drei Tage (je ca. 7 Stunden pro Tag) ca. 2.907 Runden absolviert. Dies entspricht einer Strecke von ungefähr 27,4 km bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 0,36 m/s. Sowohl die breite Laufrad-Laufläche als auch die Laufrad-Flanke (Seitenwand) innen aus Gummi zeigten keine optisch erfassbaren Veränderungen oder Abnutzungserscheinungen. Ausschließlich der Übergang der breiten Lauflächen zur Seilführungsnut in der Mitte scheint etwas abgenutzt. Allerdings ist die Differenz zwischen Seilführungsnutgrund und breiter Laufläche mit 3,3 mm fast identisch zur unbenutzten Rolle. Lediglich die Nutkanten haben sich abgerundet. Die aufgesetzte seitliche Aluminium-Bordscheibe am Laufrad (Absturzsicherung) ist sehr gleichmäßig in einem festen Winkel verschliffen. In jeder Kurvenfahrt hat die Bordscheibe am Flachstahl geringfügig geschliffen, sodass eine Fase entstanden ist.

Auch der Akkumulator hat sich für die Dauerbeanspruchung auf der Messe in Stuttgart als gut geeignet erwiesen. In ca. 21 Stunden Betriebsdauer der Laufkatze über die drei Tage ist die Akku-Kapazität um lediglich 22 bis 25 % pro Tag gesunken. Dieses ist ein sehr guter Wert, da die Bahn für 8 Stunden Betriebszeit ausgelegt ist. Somit gibt es genügend Reserven für einen 3-Schicht-Betrieb. Alternativ könnte der Akkumulator verkleinert und somit die Baugröße und das Gewicht reduziert werden.

Die beiden Führungsrollen der Laufkatze sind an den seitlichen Borden stark verschlissen (weiterhin fahrbar). Es haben sich im Versuchsverlauf einzelne Schichten der Gummierung gelöst. Die Lauffläche wiederum zeigt kaum Verschleißspuren, der Durchmesser hat sich nicht verändert. Die innenliegenden Kanten der seitlichen Bordscheiben (Führungsrollen) sind auf den Fahrten stark beansprucht worden. Hierbei sind unregelmäßige kleine Beschädigungen erkennbar durch mehrere Späne. Grund könnte das Einfädeln nach der Seilfahrt auf das Führungsprofil sein. In den Vorversuchen hatte sich gezeigt, dass die Bordscheiben auf beiden Seiten der gummierten Führungsrollen zwingend notwendig sind, weil andernfalls die horizontalen Außenkanten der Gummierung zu einem Festklemmen im unteren Bereich des Vierkantprofils führen können. Damit nehmen die Bordscheiben mit einem größeren Durchmesser als die Gummierung eine Führungsfunktion ein.

**Sicherheit:** Aus Gründen der Sicherheit ist das Tragen eines Helms unter der Bahn unerlässlich, um das Verletzungsrisiko durch herabfallende Gegenstände zu minimieren. Darüber hinaus ist es empfehlenswert, die Elektrohängebahn an der Hallenwand zu betreiben, um eine wandnahe Nutzung zu gewährleisten, fern von anderen Transportwegen oder Orten, an denen sich Menschen aufhalten. Zudem sollten Bahnuntergänge installiert werden.

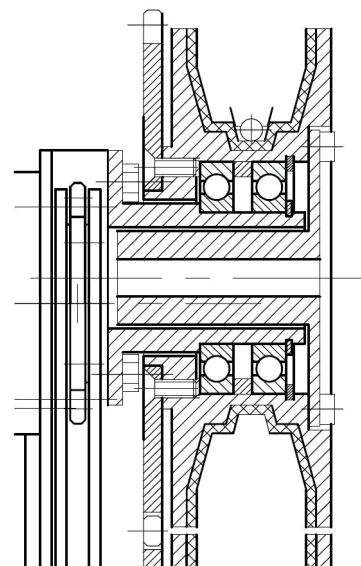
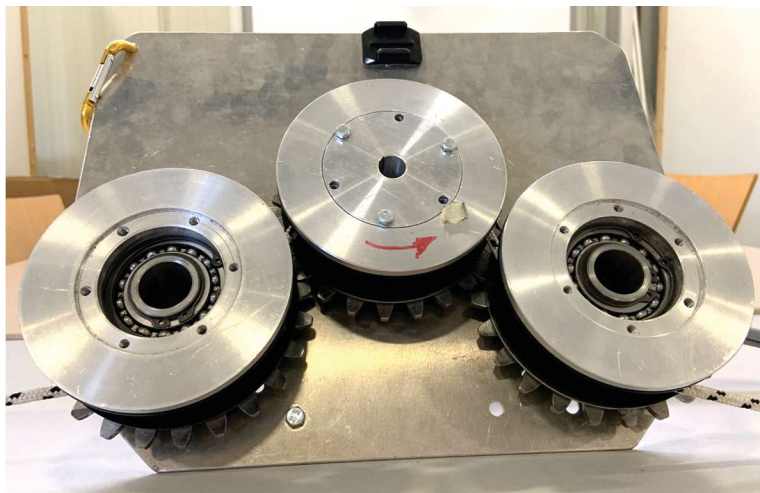
**Empfehlung:** In der Zusammenfassung kann eine Empfehlung für den Einsatz einer autonomen Elektrohängebahn auf Rechteckrohr aus Stahl für Geraden mit oder ohne Steigung bis ca.  $11^\circ$  gegeben werden (Schlupf unter 5 %). Die Kurven werden durch Flachprofile (ohne Steigung) abgebildet. Die Laufkatze ist für eine Transportmasse bis 20 kg ausgelegt und erreicht in der Version 3.1 eine Geschwindigkeit von ungefähr 0,35 m/s. Als Laufradbeschichtung kann die Gummi-Beschichtung der Firma GARANT GmbH empfohlen werden, da diese sich in den ersten Dauerversuchen als haltbar erwiesen hat. Die Konstruktion der Bahn erfolgte unter Berücksichtigung folgender Kriterien: Es wurde eine leichte und kompakte Bahn für ein großes bzw. langes Streckennetz bei geringen Kosten entwickelt.

## 6 Untersuchung der Reibverhältnisse am senkrechten Seil

Nachdem Steigungsversuche am Rechteck- und Flachprofil sowie erste Versuche am Seil durchgeführt wurden, befasst sich Kapitel 6 mit der Variante Antriebsrad am senkrechten Seil. Dazu gibt es einen ersten Seilbahn-Versuchsträger, bei welchem der Seilumschlingungswinkel schnell geändert werden kann. Diese Seilbahn wurde bereits in Kapitel 4.6 erklärt. Der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung werden in den nachfolgenden Kapiteln näher vorgestellt. Die ermittelten Messwerte am senkrechten Seil beruhen auf der studentischen Arbeit [Höl20].

### 6.1 Versuchsaufbau senkrechtes Seil

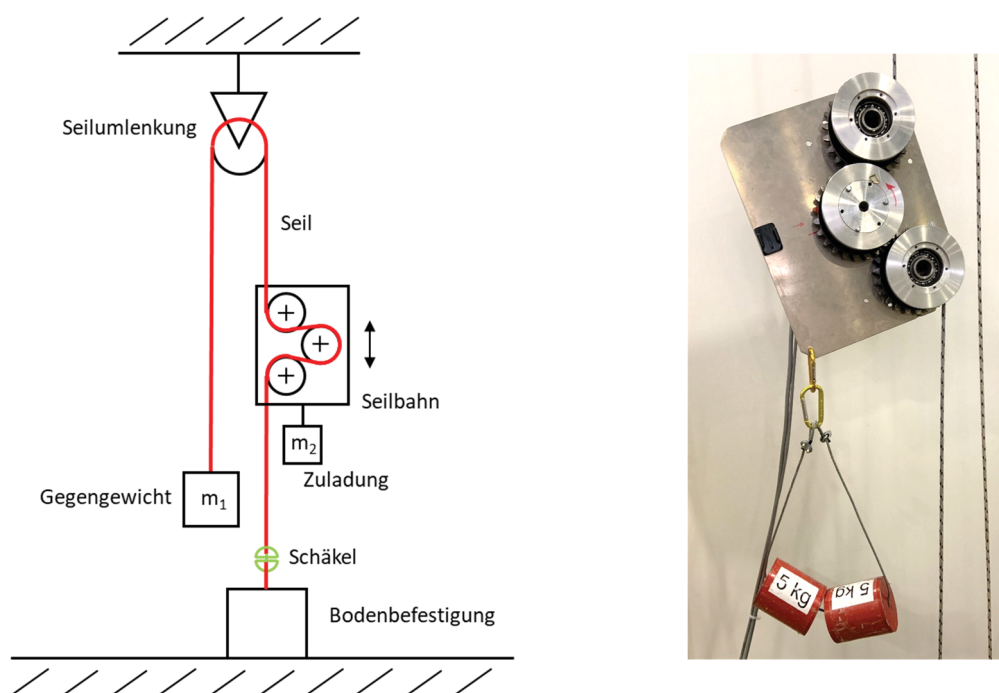
Die drei Laufräder der Seilbahn bestehen aus einem Aluminium-Grundkörper mit 8 mm Gummi-Beschichtung der Firma GARANT GmbH. Aufgrund der guten Erfahrungen aus Kapitel 5 ist die gleiche Beschichtung für die neuen und kleineren Laufräder verwendet worden. Der Außendurchmesser der Laufräder beträgt 133 mm, die äußere Breite 45,5 mm und der Innendurchmesser der mittleren Nut ca. 76 mm, in welcher das Seil läuft und geführt wird. Das aufvulkanisierte Gummi wurde nach der Beschichtung auf Endmaß geschliffen. In **Abbildung 6.1** sind links die drei Laufräder und rechts die mittlere Laufrolle im Schnitt dargestellt.



**Abbildung 6.1:** Seilbahn-Laufräder

In **Abbildung 6.2** ist der Versuchsaufbau für die Seilfahrten dargestellt. Die Bahn fährt dabei senkrecht am Seil (rot) entlang. Auch hier soll wieder das 6 mm Polyester-Kunststoff-Seil

zum Einsatz kommen (siehe Kapitel 5.8). Die Idee, auch Stahlseile zu testen, wurde relativ schnell verworfen, da Stahlseile wesentlich größere Biegeradien als Kunststoffseile benötigen. Im Elektrohängebahnsystem werden aktuell kleine Radien verwendet (teilweise für die Seilbefestigung unter 20 mm). Außerdem ist der Verschleiß der Laufrolle bei nicht ummantelten Stahlseilen höher und das Gesamtgewicht wesentlich größer. Das Seil ist auf der einen Seite mit Hilfe eines drehbaren Schäkels (grün) an einer großen Masse am Boden befestigt. Auf der anderen Seite wird es über eine Umlenkrolle (an der Hallendecke) zurück in Richtung Boden geführt und dort mit einem variablen Gewicht (Stahlscheiben) am Seilende belastet. Dieses frei schwebende Gewicht erzeugt aufgrund der Gewichtskraft die konstante Seilspannung. Der Vorteil des Aufbaus ist, dass die Seildehnung automatisch ausgeglichen wird. Die Seilspannung bleibt also konstant, auch wenn das Seil sich dehnt. Wenn keine Seilspannung vorhanden wäre oder diese stark nachließ, würde die Bahn zu Boden fallen. Deshalb muss darauf geachtet werden, dass das Seil stets gespannt ist. Der verbaute drehbare Schäkel soll einer Verdrehung des Seils entgegenwirken und diese ausgleichen. Bei Vorversuchen ist aufgefallen, dass sich das Seil beim Auf- und Abfahren der Seilbahn verdreht. Die Zuladung wird auch hier mit Stahlgewichten realisiert. Diese haben ein Gewicht von je 5 kg, sodass eine Nutzlast von 5 kg, 10 kg oder 15 kg an der Seilbahn befestigt werden kann. Die Seilbahn selbst wird oberhalb des Schäkels in das Seil eingehängt.



**Abbildung 6.2:** Versuchsaufbau zur Ermittlung des Schlupfs am senkrechten Seil

Um den Schlupf berechnen zu können, muss die tatsächlich gefahrene Ist-Strecke  $l_{\text{ist}}$  mit der Soll-Strecke  $l_{\text{soll}}$  verglichen werden. Die Soll-Strecke wird über den Umfang und die Drehzahl des Laufrades bestimmt. Der Umfang des Laufrades bestimmt sich über seinen Durch-

messer. Da das 6 mm-Kunststoffseil an beiden Seiten des Laufrades anliegen soll, siehe **Abbildung 6.3**, ergibt sich ein anderer Durchmesser als der der Laufrolle. Das Seil wird beim Anliegen am Laufrad außen gestreckt (Zugzone) und innen gestaucht (Druckzone). Aufgrund des großen Umschlingungswinkels ist dieser Effekt nicht zu vernachlässigen. Die neutrale Zone (Spannung = 0) liegt in der Mitte des Seils (Radius 3 mm). Somit berechnet sich die relevante Seillänge (Soll-Strecke) für den Schlupf anhand der neutralen Zone im Seil wie folgt:

$$l_{soll} = U \cdot n \quad (11)$$

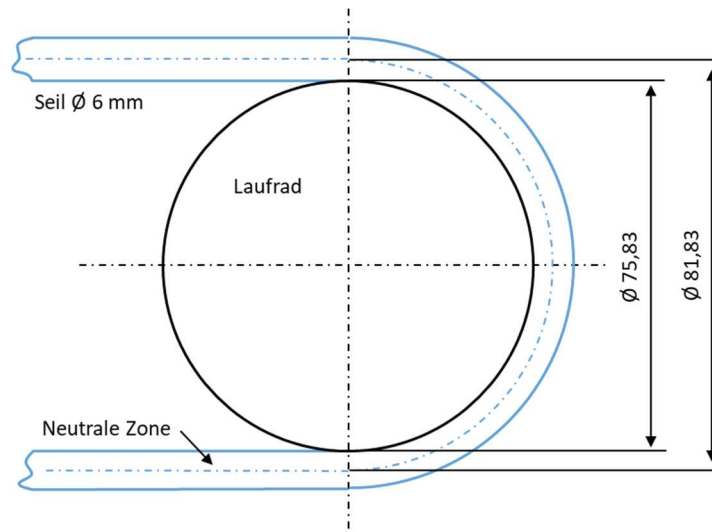
$$l_{soll} = (D_{Laufrad} + 2 \cdot 3 \text{ mm}) \cdot \pi \cdot n$$

$$l_{soll} = (75,83 \text{ mm} + 2 \cdot 3 \text{ mm}) \cdot \pi \cdot n$$

$$l_{soll} = (81,83 \text{ mm}) \cdot \pi \cdot n$$

$$l_{soll} = 257,08 \text{ mm} \cdot n$$

$l_{soll}$  – Soll-Strecke [mm],  $U$  – Umfang [mm],  $n$  – Laufraddrehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ],  
 $D_{Laufrad}$  – Laufraddurchmesser [mm]



**Abbildung 6.3:** Abmessungen am Laufrad zur Schlupfbestimmung

Die Seilbahn fährt theoretisch mit jeder Laufradumdrehung eine Soll-Strecke von 257,08 mm.

Die Ist-Strecke, der tatsächlich gefahrene Weg, wird händisch mit Hilfe eines Maßbandes (Ablesegenauigkeit von ca. 1 mm) nach jeder Fahrt gemessen und so mit der berechneten Soll-Strecke verglichen.

Die Formel für den Schlupf berechnet sich nach (10), siehe Kapitel 5.6.3.

Um die Drehzahl des Laufrades zu bestimmen, sollte zu Beginn der Versuchsreihen wieder eine Kamera zum Einsatz kommen. Dies ist technisch einfach zu realisieren, allerdings aufwendig bei der Auswertung. Das mittlere Antriebsrad besitzt 23 durchnummerierte und beschriftete Zähne am Zahnrad, siehe **Abbildung 6.4**. Mit Hilfe einer angebrachten Kamera an der Seilbahn wird die Fahrt jedes Mal aufgenommen, und anschließend können mit den einzelnen Bildern der Start- und End-Zahn an der roten Markierung sowie die Anzahl der Umdrehungen (ganze Umdrehungen) genau bestimmt werden. Dabei können zum Beispiel 11 Umdrehungen und 10 Zähne gezählt werden, woraus wiederum die Soll-Strecke, also der theoretische Weg, ermittelt werden kann. Da diese Messmethode sehr zeitintensiv und aufwendig ist (für jede einzelne Fahrt muss das Video im Zeitraffer angesehen werden) und die Gefahr des Verzählens bei Laufradumdrehungen besteht, wird sich für ein anderes Zählsystem entschieden.



**Abbildung 6.4:** Zahnmarkierung an der Seilbahn

Etwas besser bewährt hat sich ein Zählsystem mit dem induktiven Sensor (NBN4-12 GM50-E2-V1) der Firma Pepperl+Fuchs. Dieser ist an der Seilbahn mit einem Halter befestigt und detektiert die vorbeilaufenden einzelnen Metallzähne des Zahnrades. Zum Zählsystem gehören der Sensor, eine Anzeige, ein Arduino und eine Spannungsversorgung, alles ist an der Seilbahn befestigt. Fährt die Bahn ihre Messstrecke ab, detektiert das Messsystem beispielsweise 242 Zähne. Über die Anzahl für eine Laufradumdrehung (23 Zähne) lässt sich mit Hilfe des Laufradumfangs wiederum der gefahrene Soll-Weg bestimmen. Die 242 ermittelten Zähne, eine Laufradumdrehung sind 23 Zähne, ergeben bei einem Radumfang von 257,08 mm einen theoretisch gefahrenen Weg von 2.704,9 mm. Diese Art zum Erfassen der detektierten Zähnezahl und somit des Weges bringt eine deutliche Vereinfachung der Aus-

wertung gegenüber dem Kamera-System. Die Ungenauigkeit beträgt hier allerdings aufgrund der 23 Zähne bei einem Umfang von 257,08 mm ca. 11,18 mm, was ca. 4,3 % entspricht. Dies ist noch nicht zufriedenstellend.

Da für eine höhere Geschwindigkeit (lastunabhängig) sowie für mehr Leistung und Drehmoment ein anderer Motor (Nanotec DB59C024035-A) eingebaut werden soll, ergibt sich eine weitere Möglichkeit, den theoretischen Soll-Weg der Seilbahn zu bestimmen. Dieser eingebaute Motor verfügt über ein eigenes Regelsystem mit Motorschritterkennung, was hier einen entscheidenden Vorteil bringt.

Der verbaute bürstenlose DC-Motor wird von der Steuerung im Takt-Richtungs-Modus wie ein Schrittmotor behandelt. Dabei wird der Nanotec Motor über zwei Eingänge und eine Positioniersteuerung mit einem Takt- und einem Richtungssignal betrieben. Bei jedem Takt fährt der Motor einen Schritt in die entsprechende Richtung. Die Schrittweite ist auf einen Viertelschritt pro Puls eingestellt. Das bedeutet, dass bei den vorhandenen 3 Polpaaren 12 Vollschritte einer Motorumdrehung entsprechen. Bei dem eingestellten Viertelschritt entspricht dies 48 Schritten für eine Umdrehung. Dies ermöglicht es, Motorschritte und somit eine Anzahl an Laufradumdrehungen vorzugeben. Dadurch wird die Auswertung nochmals deutlich erleichtert und gleichzeitig die Genauigkeit erhöht, da nur noch der tatsächlich gefahrene Weg gemessen werden muss. Über die Steuerungs-App kann nun dem Motor eine Anzahl an Schritten vorgegeben werden. 48 Schritte sind eine Motorumdrehung; in Kombination mit dem Apex-Planetengetriebe und einer Untersetzung von 50:1 sind 2.400 Schritte eine ganze Laufradumdrehung der Seilbahn. Für eine Messstrecke von beispielsweise 10 Laufradumdrehungen müssen der Motorsteuerung 24.000 Schritte vorgegeben werden. Dies entspricht bei einem Laufradumfang von 257,08 mm einer theoretisch gefahrenen Strecke von 2.570,8 mm.

Diese Methode zur Schlupfermittlung ist wegen der höheren Genauigkeit die technisch bessere Lösung und wird hier gewählt. Der Zeitaufwand und die Fehleranfälligkeit beim Ausmessen der Strecke sind somit deutlich geringer. In **Abbildung 6.5** ist die aktualisierte Seilbahn-App2 (Änderung zur Seilbahn-App Kapitel 4.2) mit ihrem Bedienfeld dargestellt. Hier können Werte für die „Position min“ (Start-Punkt), „Position max“ (Ende-Punkt) und die Drehzahl bzw. Geschwindigkeit eingetragen werden. Alle Werte sind in Motor-Schritte einzutragen. „0“ Motorschritte liegen an, wenn der Motorcontroller neu gestartet wird. Im Feld „Position max“ können beispielsweise 24.000 Schritte angegeben werden, was den 10 Laufradumdrehungen entspricht. Somit kann zwischen „Position min“ und „Position max“ hin- und hergefahren werden. Die Drehzahl des Motors wird in Motor-Schritte pro Sekunde eingetragen und von der Steuerung konstant gehalten. Über den Button „Stop“ kann die Seilbahn jederzeit gestoppt werden. Der Motor bleibt dabei bestromt und hält seine Position am Seil. Ein Not-Aus-Schalter in Reichweite am Boden dient dazu, die komplette Seilbahn und

Steuerung vom Strom zu trennen. Die Seilbahn würde dann aufgrund der Schwerkraft Richtung Boden fahren, was aufgrund der hohen Getriebeübersetzung recht langsam geschieht. Die Seilbahn könnte auch über das mitgelieferte Programm der Firma Nanotec (Plug & Drive Studio) betrieben werden. Dort können alle Einstellungen in der Motorsteuerung (Nanotec C5-E Motorcontroller für bürstenlose DC-Motoren) vorgenommen werden, auch die Werte für die komplette Motorregelung. Hier steuert ein Arduino mit Bluetooth-Empfänger die Seilbahn und den Motor über ein Programm. Da die selbst programmierte Seilbahn-App2 nur die relevanten Einstellungen verwendet, ist sie wesentlich übersichtlicher. Das Risiko für das Verstellen der Motoreinstellungen besteht dadurch nicht. Statt nur vom stationären PC aus ist auch eine Bedienung mit einem mobilen Endgerät aus größerer Entfernung möglich.

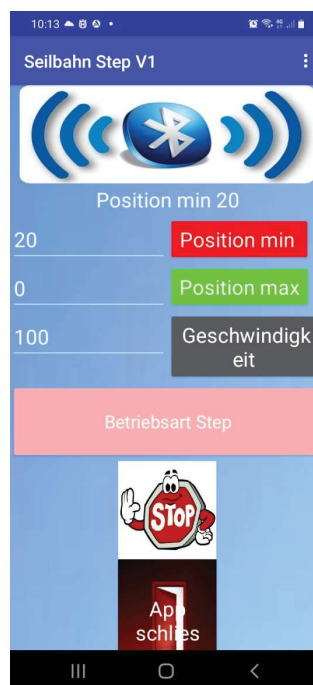


Abbildung 6.5: Seilbahn-App2 Bedienungsoberfläche

Der Messfehler für die Soll-Strecke kann bei diesem Aufbau nahezu vernachlässigt werden. Der bürstenlose DC-Motor hält seine Schritte mit Hilfe des eingebauten Hall-Sensors ein, solange er diese nicht verliert, was bei den Versuchen bemerkt worden wäre. Der Motor hat drei eingebaute Hall-Sensoren mit 18 Impulsen pro Umdrehung. Einen positiven Einfluss hat das nachgeschaltete Apex-Getriebe mit einer Untersetzung von 50:1, was den Winkelfehler des Motors nochmals stark reduziert. Dies ergibt eine Genauigkeit von 900 Schritten pro Umdrehung ( $18 \times 50$ ), also  $0,4^\circ$ . Das verbaute Planetengetriebe besitzt ein Verdrehspiel (möglicher Verdrehwinkel der Abtriebswelle bei blockiertem Getriebeeingang) von ca. 8 Winkelminuten. Dies entspricht einem Winkel in Grad von  $0,1333$ . Bei einem Laufradumfang von 257,08 mm für eine Umdrehung entspricht dies ca. 0,38 mm ( $0,4^\circ + 0,1333^\circ$ ) gefahrener Strecke.

Das Bandmaß zum Messen des gefahrenen Ist-Weges hat eine Ablesegenauigkeit von ca. 1 mm (Genauigkeitsklasse II =  $0,3 + (0,2 \times 3 \text{ m}) = 0,9 \text{ mm}$ ). Für das Messen der Seilstrecke, korrektes Anlegen des Maßbandes an der Seilbahn und der Startmarkierung können zu den 1 mm ungefähr 5 mm dazu addiert werden. Die gefahrene Ist-Strecke der Seilbahn bei einem durchschnittlichen Schlupfwert von z.B. 5 % beträgt ca. 2.440 mm. Es ergibt sich eine Messungenauigkeit für den Schlupf aufgrund des Bandmaßes und der Ablesegenauigkeit (6 mm) von ca. 0,3 %.

## 6.2 Versuchsdurchführung senkrecht Seil

Um mögliche Fehler und Zufälle bei einzelnen Messfahrten zu minimieren, sollen mehrere Versuche pro Versuchsreihe für eine bessere Aussagekraft der Ergebnisse gefahren werden. Die Versuchsanzahl schwankt zwischen drei und fünf Versuchen für jede Einflussgröße. Fehler bei der Streckenbestimmung werden dadurch reduziert und der Aufwand ist dabei noch überschaubar. Sind die ersten Messergebnisse nah beieinander, werden nur drei Wiederholungen durchgeführt. Bei größerer Streuung erfolgen fünf Wiederholungen. In **Abbildung 6.6** ist beispielhaft ein Versuchsprotokoll dargestellt. Hier müssen für jeden Versuch die Seilvorspannung, die Motordrehzahl, die Zuladung und der Umschlingungswinkel eingetragen werden. Die theoretisch gefahrene Strecke (Soll-Strecke) ist für den Laufradumfang und die Anzahl der Motorschritte festgelegt, die tatsächliche Strecke (Ist-Strecke) wird ausgemessen und hier eingetragen. Der Schlupf ist nach **(10)** zu berechnen und über die zusätzliche gemessene Zeit lässt sich die Durchschnittsgeschwindigkeit ermitteln.

### Versuchsreihe 1:

Rollenumfang [mm]: 257,087

Einflussgrößen					
Steigung	Seilvorspannung	Drehzahl	Motor	Zuladung	Umschlingung
90°	196,2 N	500	DB59C024035-A	0 kg	60°
Versuchswerte					
Versuch Nr.:	Soll-Strecke [mm]	Ist-Strecke [mm]	Schlupf [%]	benötigte Zeit [s]	Geschwindigkeit [m/s]
1	2570,8	2480	3,53	48,64	0,051
2	2570,8	2486	3,30	48,56	0,051
3	2570,8	2493	3,03	48,56	0,051
4	2570,8	2494	2,99	48,46	0,051
5	2570,8	2497	2,87	48,70	0,051
<b>Auswertung:</b>	<b>2570,80</b>	<b>2490</b>	<b>3,14</b>	<b>48,58</b>	<b>0,05</b>

**Abbildung 6.6:** Auswertungstabelle mit relevanten Parametern

### Seilvorspannung

Die Fahrversuche nach [HH18] haben gezeigt, dass die Seilvorspannung ein bedeutsamer Parameter bei den Steigungsfahrten am Seil ist. Deshalb war es wichtig, einen Versuchsstand zu konzipieren, der eine ausreichende Seilspannung gewährleistet. Der Versuchsstand in **Abbildung 6.2** stellt dies mithilfe eines Gegengewichtes bzw. einer Gewichtskraft sicher. Dadurch wird eine konstante Seilvorspannung erzeugt. Um den Einfluss der Seilvorspannung auf den Schlupf zu untersuchen, wird das Gegengewicht am Versuchsstand in drei Schritten variiert.

### Zuladung

Des Weiteren kann die Zuladung variiert werden. Es sollen Versuche mit einer Leerfahrt, mit 5 kg und 10 kg sowie einer maximalen Beladung von 15 kg durchgeführt werden. Zu erwarten ist, dass die Zuladung das Schlupfverhalten zwischen Seil und Antriebsrad stark beeinflusst.

### Umschlingungswinkel

Auch der Umschlingungswinkel der mittleren Laufrolle soll veränderbar sein. Die Versuchsbahn gewährleistet über die Aluminium-Grundplatte, dass sich die Laufrollen zueinander verschieden ausrichten. Dabei sind in 30°-Schritten fünf Umschlingungswinkel von 60° bis 180° möglich. Der Umschlingungswinkel wird das Reibverhalten der Laufräder verändern. Erwartet wird, dass ein größerer Umschlingungswinkel den Schlupf positiv beeinflusst. In den Versuchsfahrten sollen die folgenden drei Umschlingungswinkel 60°, 120° und 180° untersucht werden, siehe **Abbildung 6.7**. Zum Verstellen des Umschlingungswinkels müssen die beiden äußeren Laufräder abmontiert und auf die entsprechende Position verschoben werden.



**Abbildung 6.7:** Umschlingungswinkel 60°, 120° und 180° v.l.n.r. [Höl20]

### Drehzahl

Mit Hilfe der weiterentwickelten Seilbahn-App2 stellt man die Drehzahl des Nanotec-Motors und somit der Laufrollen an der Seilbahn ein. In der Steuerung werden die Motorschritte pro Sekunde festgelegt; sie sollen in 500 Schritten von 0 bis 2.000 Schritten variiert

werden. Umgerechnet ergeben 500 Motor-Schritte pro Sekunde eine Seilbahngeschwindigkeit von ca. 0,05 m/s.

**Tabelle 6.1** zeigt alle Einflussgrößen dieser Versuchsfahrten mit der Seilbahn am senkrechten Seil und die entsprechenden Variationen noch einmal auf einen Blick.

**Tabelle 6.1:** Einflussgrößen Schlupf am senkrechten Seil [nach Höl20]

Varianten	Seilvorspannung [N]	Zu-/Beladung [kg]	Umschlingungswinkel [°]	Drehzahl [Schritte/s] = Geschwindigkeit [m/s]
	196,2 (ca. 20 kg)	0	60	500 (ca. 0,05)
	291,4 (ca. 30 kg)	5	120	1.000 (ca. 0,1)
	389 (ca. 40 kg)	10	180	1.500 (ca. 0,15)
	---	15	---	2.000 (ca. 0,2)

Für alle Versuchsfahrten ist die theoretische Soll-Strecke auf 2.570,87 mm festgelegt. Dies entspricht 24.000 Motorschritten bzw. genau 10 Laufradumdrehungen.

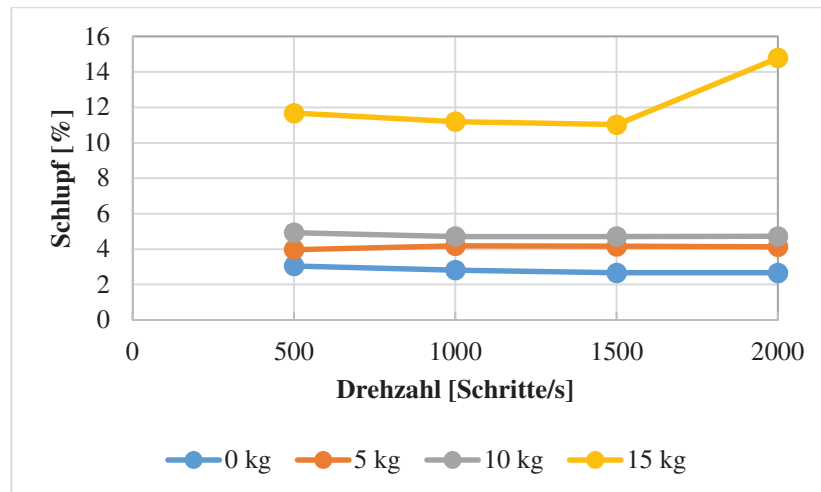
### 6.3 Versuchsauswertung senkrecht Seil

In Anhang der Arbeit befinden sich alle Versuchsreihen mit dem berechneten Schlupf in einer Tabelle zusammengefasst. 75 Versuche wurden dabei zu je drei bis fünf Wiederholungen gefahren, um Messfehler und Ungenauigkeiten möglichst gering zu halten. Nachfolgend sind die Auswertungen der Messwerte in Diagrammform dargestellt.

#### 6.3.1 Einfluss der Drehzahl und der Zuladung auf den Schlupf

**Abbildung 6.8** zeigt die Messwerte für einen Umschlingungswinkel von 60° und die mittlere Seilvorspannung von 291,4 N. Auf der x-Achse ist die Drehzahl in Motorschritten pro Sekunde aufgetragen, die y-Achse zeigt den Schlupf in Prozent. Im Diagramm und in der Legende darunter sind in unterschiedlichen Farben die vier Zuladungen dargestellt, um neben dem Einfluss der Drehzahl auch den Einfluss der Zuladung graphisch aufzuzeigen. Der Schlupf steigt mit zunehmender Zuladung an. Der kleinste Schlupfwert ist hier 2,66 % ohne jegliche Zuladung und der größte Wert ist 14,79 % bei 15 kg Zuladung. Die Schlupfwerte bleiben über die vier Drehzahlen annähernd konstant. Lediglich der gelbe Graph besitzt einen überdurchschnittlichen Anstieg am Ende. Hier steigt der Schlupf bei höchster Drehzahl überproportional an. Der Sprung zwischen 10 kg Zuladung und 15 kg Zuladung ist relativ groß im Gegensatz zu den anderen Beladungen. Ob der Schlupf beim Start bzw. Losfahren entsteht oder während der gesamten Fahrt auftritt, ist mit dem aktuellen Versuchsstand nicht zu detektieren. Da die höchste Belastung allerdings beim Start herrscht (Überwindung des

Losbrechwiderstandes) wird der höhere Schlupf dort vermutet. Der Wert für die höchste Drehzahl bei dem Graphen für die 15 kg Zuladung steigt nochmals an, im Gegensatz zu den anderen Kennlinien. **Tabelle 6.2** zeigt die Zusammenfassung von Mittelwert, minimalem Wert, maximalem Wert, der Spannweite (Differenz zwischen minimaler und maximaler Drehzahl) und der Standardabweichung, jeweils für die vier Kennlinien.



**Abbildung 6.8:** Schlupfermittlung bei 60° und 291,4 N

**Tabelle 6.2:** Auswertung Schlupfermittlung mit 60° und 291,4 N

Kennlinie	Mittelwert [%]	Max. [%]	Min. [%]	Spannweite [%]	Standardabw. [%]
0 kg	2,80	3,05	2,66	0,39	0,18
5 kg	4,11	4,19	3,97	0,22	0,10
10 kg	4,77	4,93	4,71	0,22	0,11
15 kg	12,18	14,79	11,03	3,76	1,76

Die Kennlinien aus **Abbildung 6.9** entsprechen denen in **Abbildung 6.8**, allerdings ohne den 15 kg Messwert. Dadurch ändert sich das Achsenintervall der y-Achse, die leichten Schwankungen im Schlupf sind dadurch deutlicher zu erkennen und vergleichbar mit den nachfolgenden Diagrammen.

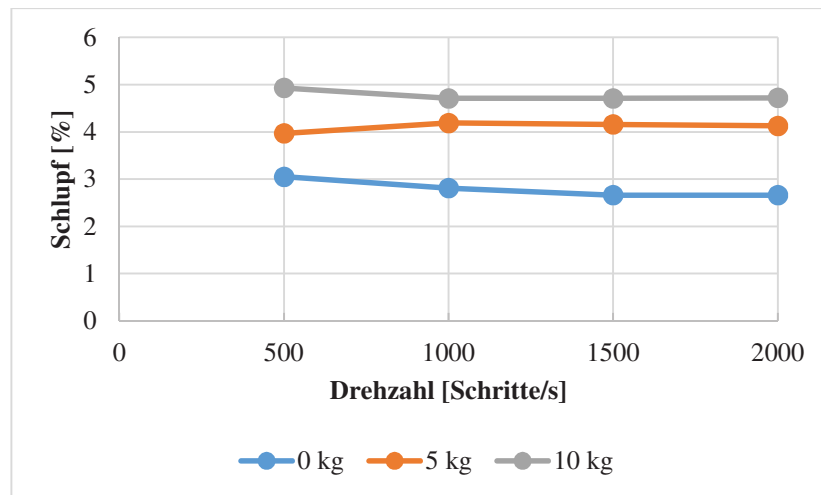


Abbildung 6.9: Schlupfermittlung bei 60° und 291,4 N

In der folgenden **Abbildung 6.10** ist der Schlupf über der Drehzahl des Antriebsrades aufgetragen. Variiert wird die Zuladung von 0 kg bis 15 kg. Geändert wird zu den Graphen in **Abbildung 6.8** und **6.9** lediglich der Umschlingungswinkel, welcher sich von 60° auf 120° verdoppelt. Die Seilvorspannung bleibt bei 291,4 N. Die Kennlinien in **Abbildung 6.10** zeigen nur wenige Schwankungen im Schlupf. Alle Graphen liegen im unteren einstelligen Schlupfbereich, minimal werden 1,57 % Schlupf ermittelt, maximal liegen hier 2,64 % vor. Hier ist ein deutlicher Unterschied zu **Abbildung 6.8** mit höheren Schlupfwerten - vor allem zum Graph für die 15 kg Zuladung - erkennbar. Die Differenz zwischen maximaler und minimaler Drehzahl für die dargestellten Kennlinien liegen bei nur 0,15 bis 0,22 %. Auffällig ist, dass die 5 kg und 10 kg-Kennlinien sehr dicht beieinanderliegen. **Tabelle 6.3** zeigt die Auswertung der Messwerte für die Kennlinien mit 120° Umschlingungswinkel.

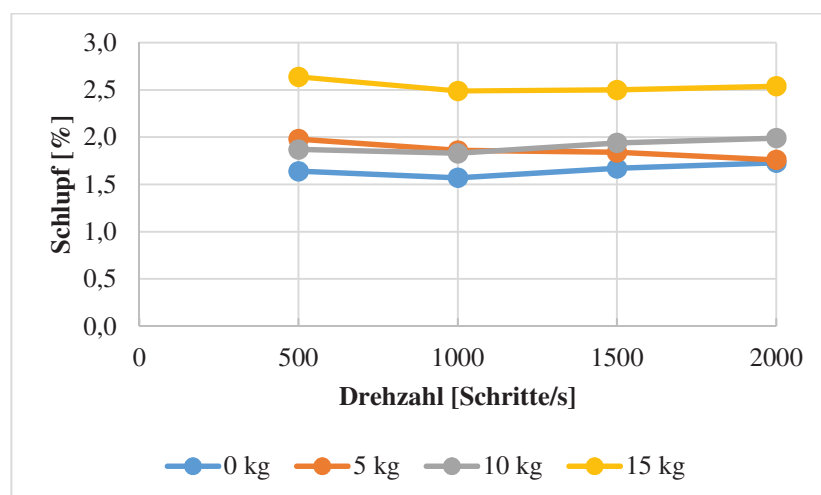
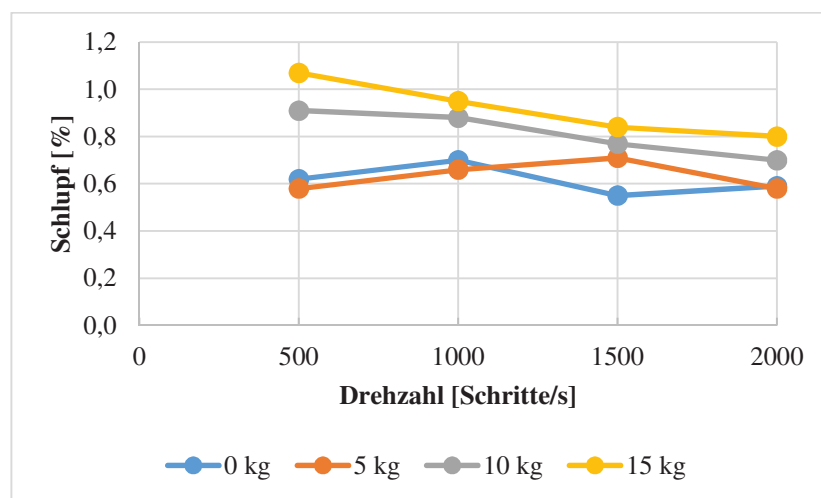


Abbildung 6.10: Schlupfermittlung bei 120° und 291,4 N

**Tabelle 6.3:** Auswertung Schlupfermittlung mit 120° und 291,4 N

Kennlinie	Mittelwert [%]	Max. [%]	Min. [%]	Spannweite [%]	Standardabw. [%]
0 kg	1,65	1,73	1,57	0,16	0,07
5 kg	1,86	1,98	1,76	0,22	0,09
10 kg	1,91	1,99	1,83	0,16	0,07
15 kg	2,54	2,64	2,49	0,15	0,07

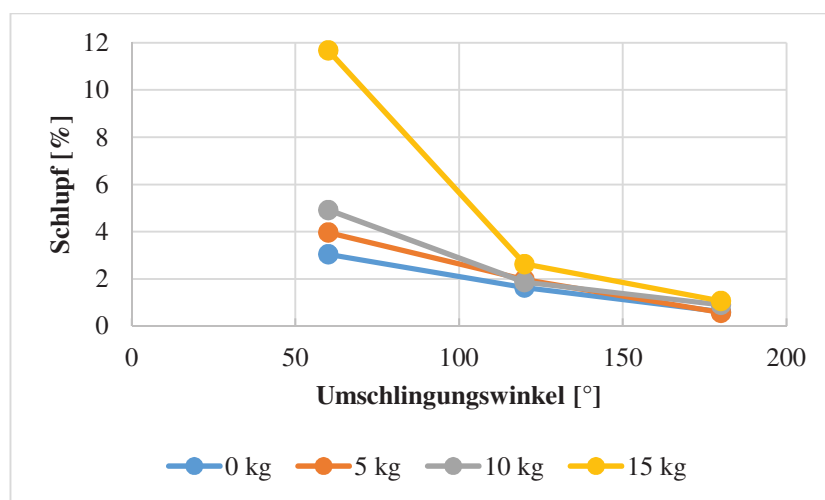
In **Abbildung 6.11** ist das Diagramm der Versuche mit einem Umschlingungswinkel von 180° dargestellt. Die ermittelten Schlupfwerte steigen mit steigender Beladung. Sie sind aber im Vergleich zum Umschlingungswinkel 60° bzw. 120° wesentlich kleiner. Der kleinste Schlupfwert beträgt hier 0,55 %, der größte Wert liegt bei 1,07 %. Zwei der vier Kennlinien zeigen einen Abwärtstrend mit steigender Drehzahl. Die beiden anderen steigen und fallen. Die 0 kg-Kennlinie steigt zunächst bis 1.000 Schritte pro Sekunde an, fällt dann bei weiterer Erhöhung der Drehzahl, bevor die Kurve zum Schluss wieder ansteigt. Da die Schlupfwerte dicht beieinanderliegen, erscheinen die Abweichungen zwischen minimalem und maximalem Wert größer als sie in der Realität sind. Dies ist gut in **Tabelle 6.4** zu erkennen. Die Spannweiten liegen zwischen 0,15 % und 0,27 %. Die Standardabweichungen (Streuung der Werte um den Mittelwert) betragen zwischen 0,06 % und 0,12 %. Die Drehzahl hat also einen sehr geringen bis keinen Einfluss auf den Schlupf.

**Abbildung 6.11:** Schlupfermittlung bei 180° und 291,4 N**Tabelle 6.4:** Auswertung Schlupfermittlung mit 180° und 291,4 N

Kennlinie	Mittelwert [%]	Max. [%]	Min. [%]	Spannweite [%]	Standardabw. [%]
0 kg	0,62	0,70	0,55	0,15	0,06
5 kg	0,63	0,71	0,58	0,13	0,06
10 kg	0,82	0,91	0,70	0,21	0,10
15 kg	0,92	1,07	0,80	0,27	0,12

### 6.3.2 Einfluss des Umschlingungswinkels auf den Schlupf

Im folgenden Diagramm (**Abbildung 6.12**) ist der Einfluss des Umschlingungswinkels auf den Schlupf dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass mit steigendem Umschlingungswinkel der Schlupf sinkt. Zum Beispiel sinkt dieser bei der grauen 10 kg-Kennlinie von 4,9 % (bei Umschlingungswinkel 60°) auf 0,9 % (bei Umschlingungswinkel 180°). Bei der gelben 15 kg-Kennlinie verringert sich der Schlupf sogar von 11,7 % auf 1,1 %. Der hohe Anfangswert liegt begründet in der zu geringen Reibkraft zwischen Seil und Laufrad (Umschlingungswinkel zu klein). Die Diagramme für die Drehzahlen 1.000, 1.500 und 2.000 Schritte pro Sekunde sehen ähnlich aus, siehe Anhang.

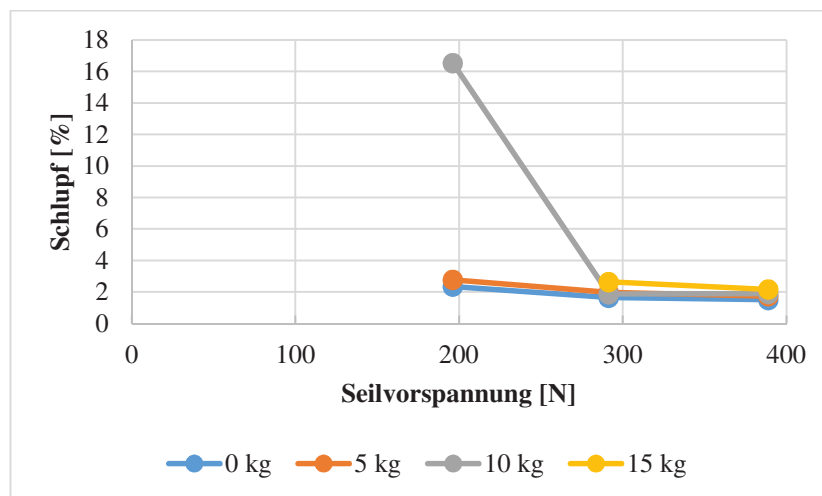


**Abbildung 6.12:** Einfluss Umschlingungswinkel auf Schlupf, 500 Schritte/s und 291,4 N

### 6.3.3 Einfluss der Seilvorspannung auf den Schlupf

Nachdem der Einfluss des Umschlingungswinkels betrachtet wurde, soll nunmehr der Einfluss der Seilvorspannung auf den Schlupf näher analysiert werden. **Abbildung 6.13** zeigt die Entwicklung des Schlupfes über der Seilvorspannung bei einer Drehzahl von 500 Schritten/s und einem Umschlingungswinkel von 120°. Bei allen Kennlinien sinkt der Schlupf mit zunehmender Seilvorspannung. Ganz deutlich ist dies bei der 15 kg (Zuladung) Kennlinie zu sehen. Bei einer Seilvorspannung von 196,2 N kann die Seilbahn keine 15 kg Last am senkrechten Seil aufwärtsbewegen, das Laufrad hat keine Haftung am Seil. Das Eigengewicht der Seilbahn und die Zuladung wirken dem Gegengewicht im Versuchsaufbau entgegen, sodass die Seilspannung nicht mehr ausreicht, siehe **Tabelle 6.5**. Mit einer Beladung von 10 kg schafft die Seilbahn die Messstrecke, allerdings mit einem zweistelligen Schlupfwert von 16,53 % (bei einer Seilvorspannung von 196,2 N); also ist auch hier nicht genügend Haftung zwischen Laufrad und Seil gegeben, die Seilvorspannung ist noch zu gering. Bei geringeren Lasten und bei höherer Seilspannung (= höhere Reibkraft) kommt es zu diesen

Haftungsproblemen nicht, der Schlupf beträgt für die Messwerte unter 3 %. Mit zunehmender Last steigt der Schlupf leicht an.



**Abbildung 6.13:** Einfluss Seilvorspannung auf Schlupf, 500 Schritte/s und 120°

**Tabelle 6.5:** Vergleich Seilvorspannung mit Gewichtskraft

Gewichtskraft Seilbahn [N]	81,91 (= 8,35 kg)			
Beladung [N]	0	49,05 (= 5kg)	98,1 (= 10 kg)	147,15 (= 15 kg)
Gewichtskraft Seilbahn gesamt [N]	81,91	130,96	180,01	229,06
Seilvorspannung [N]	196,2 / 291,4 / 389			

**Tabelle 6.5** verdeutlicht, warum bei einer Zuladung von 15 kg die Seilbahn keinen Halt bei einer Seilvorspannung von 196,2 N am Seil hat. Die Gewichtskraft von Bahn und Zuladung übersteigt die Seilvorspannung deutlich. Auch bei einer Zuladung von 10 kg beträgt die Summe der Seilkräfte gerade einmal 16,18 N, welches den hohen Schlupf von 16,53 % erklärt. Bei einer Seilvorspannung von 389 N und der Seilbahn mit 15 kg Beladung ist die Summe der Seilkräfte immerhin noch 159 N, also groß genug, um das Antriebsmoment vom Antriebsrad auf das Seil zu übertragen.

Ganz ähnlich wie der Graph in **Abbildung 6.13** sieht das Diagramm für eine Drehzahl von 2.000 Schritten/s und einem Umschlingungswinkel von 120° aus. Auch hier fällt der Schlupf wieder mit steigender Seilvorspannung. Die Schlupfwerte sind ähnlich denen mit geringerer Drehzahl (500 Schritte/s). Haftungsprobleme treten ebenfalls bei den 10 kg und 15 kg Kennlinien auf, siehe Anhang.

## 6.4 Zusammenfassung und Fazit Steigungsversuche senkrechtes Seil

Die folgenden zusammengefassten Erkenntnisse und Empfehlungen basieren auf den Testläufen, die am senkrechten Seil mit dem bewährten Laufrad der GARANT GmbH durchgeführt wurden. Verändert wurden die Beladung, die Motorleistung, die Seilspannung und der Umschlingungswinkel. Die Zielgröße war auch hier der Schlupf am Antriebsrad.

**Beladung:** Die Zuladung bzw. Beladung hat einen negativen Einfluss auf den Schlupf. In allen Graphen nehmen die Schlupfwerte mit der Beladung zu. Der höchste Schlupfwert wird mit der höchsten Last von 15 kg erreicht. Höhere Lasten werden nicht getestet. Wenn die Seilvorspannung und der Umschlingungswinkel groß genug sind ( $120^\circ$  und  $180^\circ$ ), kann die Seilbahn die Transportgewichte von 5, 10 oder 15 kg am senkrechten Seil nach oben transportieren. Das maximale Gesamtgewicht der Seilbahn beträgt etwa 23 kg bei einer Beladung von 15 kg.

**Drehzahl:** Die Drehzahl hat nur einen geringen bis keinen Einfluss auf den Schlupf, ausgenommen ist der 15 kg-Graph in **Abbildung 6.8**. Die geringen Schwankungen der übrigen Kennlinien sind auf die Messwerttoleranzen und -abweichungen zurückzuführen. Die kritischen Bereiche sind die Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen, da in diesen der Schlupf am größten ist. In den durchgeführten Versuchen wurden die Drehzahlen 500, 1.000, 1.500 und 2.000 Motorschritte pro Sekunde ohne Probleme getestet, was einer maximalen Geschwindigkeit von ca. 0,2 m/s entspricht. Für Werte über 2.000 Schritte/s liegen keine Ergebnisse vor. Für höhere Geschwindigkeiten wäre eine Vergrößerung der Seilbahn erforderlich, da größere Motoren zum Einsatz kämen (höherer Stromverbrauch) und der Grundrahmen vergrößert werden müsste. Es sei darauf hingewiesen, dass die Seilbahn aufgrund der Absturzgefahr und möglicher Arbeitsunfälle (Transport von Lasten über Kopf) nicht für hohe Geschwindigkeiten und hohe Gewichte ausgelegt ist. Zur Veranschaulichung sei ein kleines Rechenbeispiel angegeben: Bei einer Drehzahl von 2.000 Motorschritten pro Sekunde erreicht die Seilbahn eine Hallenhöhe von sechs Metern in 30 Sekunden und eine Höhe von 10 Metern in 50 Sekunden.

**Umschlingungswinkel:** Der Schlupf zwischen Antriebsrad und Seil nimmt mit steigendem Umschlingungswinkel ab. Ein hoher Umschlingungswinkel wirkt sich positiv auf einen geringen Schlupf aus. Allerdings ist die Anordnung der Laufrollen für den Umschlingungswinkel von Relevanz. Ein Umschlingungswinkel von  $60^\circ$  sollte vermieden werden, da das Antriebsrad bei einer Beladung von 15 kg auf dem Seil rutscht und der Schlupf auf bis zu 15 % ansteigt. Dies ist nicht empfehlenswert. Bei einem Umschlingungswinkel von  $180^\circ$  ist ein geringer Schlupf von 0,6 bis 1,1 % zu sehen. Gleichzeitig ist allerdings eine größere Seilverdrehung erkennbar, die zu einem erhöhten Verschleiß des Seils, einer Verformung

des Seils in ovaler Form sowie einer Drehung der Seilbahn führt, siehe unten. Der empfohlene Umschlingungswinkel von  $120^\circ$  gewährleistet, dass die Schlupfwerte niedrig bleiben (1,6 bis 2,6 %), während gleichzeitig eine geringere Seilverdrehung erkennbar ist. Der Wirkungsgrad kann bei zunehmendem Umschlingungswinkel leicht sinken. Als Ausblick sollten weitere Untersuchungen der Umschlingungswinkel erfolgen, um ein Näherungsverfahren zu entwickeln, das eine Reduzierung der Schlupfwerte auf unter 5 % gewährleistet. Des Weiteren sollte die Seilverdrehung bei Stahlseilen untersucht werden, um festzustellen, ob diese ähnlich stark ist. Dies erfordert jedoch eine Neukonstruktion sowie die Verwendung größerer Laufräder. Es wäre empfehlenswert, die Seilverdrehung messbar zu machen.

**Seilvorspannung:** Bei einer Seilspannung von 196 N (ca. 20 kg) kann eine Last von 15 kg nicht transportiert werden, was zum Absturz führt. Der Schlupfwert bei der Messung mit einer Beladung von 10 kg beträgt über 16 %. Infolge einer Zunahme der Seilspannung nimmt die Reibkraft am Antriebsrad zu. Bei einer Erhöhung der Seilspannung verringert sich der Schlupf. Bei einer Seilspannung von 291 N (ca. 30 kg) können alle Testgewichte angehoben werden. Der Schlupf beträgt 1,6 bis 2,6 %. Diese Vorspannung wird deshalb empfohlen. Bei einer weiteren Erhöhung der Seilspannung auf 389 N (ca. 40 kg) sind alle Beladungen möglich und der Schlupf sinkt weiter auf 1,5 bis 2,2 %. Die weitere Erhöhung der Seilspannung ist jedoch nicht erforderlich, da dies zu einer Zunahme des Verschleißes an den Antriebsrädern und Lagern führen könnte und eine höhere Seilspannung einen höheren konstruktiven Aufwand bedeutet. Es wird empfohlen, die Seilvorspannung größer zu wählen als das Gewicht der Seilbahn mit der Beladung. Idealerweise sollte die Seilvorspannung mindestens 27 % größer sein. Im Rahmen der Versuche wurde festgestellt, dass die Seilspannung bei zunehmender Beladung erhöht oder angepasst werden muss.

Die folgenden **Sicherheitsempfehlungen sollten** gelten: Unter der Bahn muss immer Helm getragen werden (Helmpflicht). Des Weiteren ist bei Bahnunterführungen die Einrichtung eines „Tunnels“ erforderlich. Die Strecke sollte zudem dicht an den Hallenwänden verlaufen, um Unfälle mit Personen, Maschinen oder Transportgut zu vermeiden.

**Transportgüter:** Die durchgeführten Messreihen beschränken sich auf den Transport von kleinen und zentrierten Ladungskörpern. Für den Transport von sperrigen Gütern mit großem Volumen sowie von Gütern, die sich in sich selbst bewegen (Flüssigkeiten oder Kugeln), sind neue Tests erforderlich.

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um eine eingeschränkte Umsetzung handelt, da sich sowohl der Akku als auch die Steuerung der Seilbahn im Versuchsaufbau auf dem Boden befinden und über ein Kabel mit der Seilbahn verbunden sind. Infolgedessen beträgt das Gewicht der Seilbahn lediglich 8,35 kg. Sofern die Seilbahn über ein Kabel betrieben werden kann, ist ein Akku nicht länger erforderlich, was zu einer weiteren Reduktion der

Kosten und Komponenten führt. Soll die Seilbahn autonom fahren, sind weitere Tests mit vollem Gewicht (inklusive Akku, Steuerung und Elektronik) erforderlich. Möglicherweise muss die Leichtbauweise mit einem kleinen Lithium-Ionen-Akku und kleinen Laufrädern neu überdacht werden. Dennoch kann mit dem Seilbahn-Versuchsträger deutlich gezeigt werden, dass das Prinzip der Lastenbeförderung am senkrechten Seil in effizienter und kostengünstiger Weise realisiert werden kann.

Weitere Einflussgrößen sind verschiedene Motor-Getriebekombinationen, diverse Laufradbeschichtungen und Laufradgeometrien, unterschiedliche Steigungen, Seiltemperaturen, evtl. Seilfeuchtigkeiten und sogar Verschmutzungen am Seil. Diese Einflussgrößen wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt, könnten jedoch Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

## 6.5 Auffälligkeiten während der Versuchsdurchführung

Im folgenden Abschnitt sollen Besonderheiten und Beobachtungen während der Versuchsdurchführung beleuchtet werden.

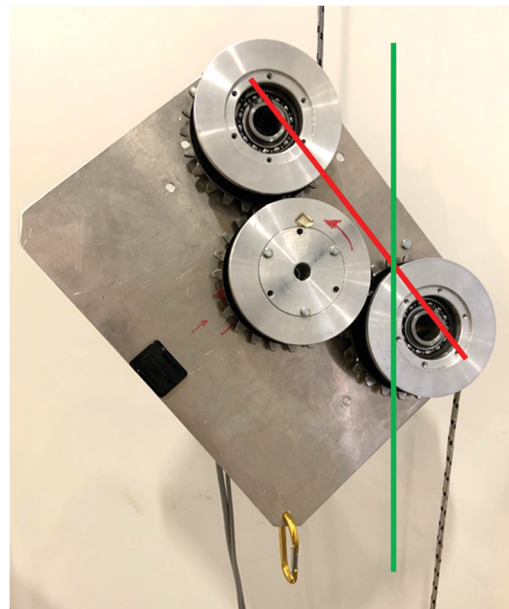
### Schräglage

Die Motor-Getriebe-Kombination aus Nanotec DC-Motor und Apex-Planetengetriebe PAII 042-050 steht weit ab von der Grundplatte der Seilbahn. Dadurch verändert sich der Schwerpunkt der Bahn, der nicht mehr optimal zum Seil steht. Die Seilbahn neigt sich aufgrund der ungleichmäßigen Gewichtsverteilung in Richtung des Motors. Durch die Wahl eines Winkelgetriebes verändert sich diese Schräglage (z.B. APEX PAIIR). Das rechtwinklige Getriebe liegt dabei mit seinem Gewicht näher an der Grundplatte als das hier eingesetzte Planetengetriebe, weil die Hebelwirkung geringer ist (**Abbildung 6.14**). Zusätzlich müsste die Balance der Seilbahn noch mit Ausgleichsgewichten erreicht werden, sodass sich der Schwerpunkt und die Lage der Bahn zum Seil verbessern.



**Abbildung 6.14:** APEX Winkelgetriebe PAIR [Ape23]

Auch die Seilvorspannung hat einen großen Einfluss auf die Schräglage und Position der Seilbahn. Als Beispiel soll hier **Abbildung 6.15** dienen. Die Schräglage ist dabei so groß, dass eine sichere Fahrt nicht mehr möglich ist. Die grüne Linie entspricht dem senkrechten Seil, rot stellt die Lage der Seilbahn dar. Optimal sollte die Seilbahn der grünen Seillinie folgen. Dieser Effekt wird noch beeinflusst von der Beladung. Diese führt zu instabilem Fahrverhalten, das Seil kann aus der mittleren Nut oder sogar aus dem Laufrad herauspringen, es besteht Absturzgefahr.

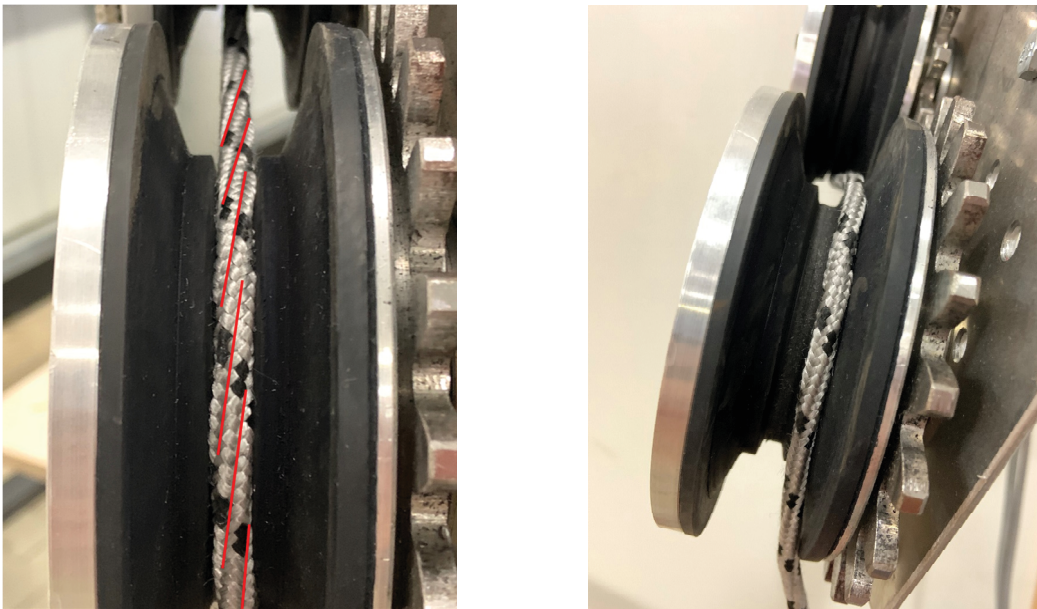


**Abbildung 6.15:** Schräglage der Seilbahn bei zu geringer Seilvorspannung

### Seilverdrehung und Seilführung

Bei den Versuchsfahrten kann beobachtet werden, dass sich das Seil während der Fahrt unterhalb und oberhalb der Seilbahn stark verdreht. Auch der drehbare Schäkel hat dies nur wenig verbessert. Die Kraft reicht nicht aus, den Schäkel unter Belastung zu drehen. Das

Verdrehen des Seils ist zunächst bei kleinen Umschlingungswinkeln ( $60^\circ$ ) und geringer Zuladung (5 kg) klein bis vernachlässigbar. Mit zunehmendem Umschlingungswinkel ( $120^\circ$  und  $180^\circ$ ), höherer Last (10 kg und 15 kg) und häufigem Aufwärts- und Abwärtsfahren wird die Seilverdrehung immer deutlicher, siehe auch **Abbildung 6.16** links. Rot deutet dabei die Seilverdrehung an. Auch hat die Seilverdrehung eine negative Auswirkung auf die Seilform und den Seildurchmesser. Es findet eine Verformung (Verdrehung) hin zu einem ovalen Seil in Spiralforn statt. Das Seil liegt nicht mehr hinreichend am Laufrad an, Haftungsprobleme könnten entstehen. Auch die Belastung der äußeren Seilfasern steigt durch die Verdrehung. Ein weiteres Problem kann die Drehung der Seilbahn um das Seil aufgrund der Spannungen im Seil sein. Je stärker das Seil sich verdreht beim Auf- und Abfahren der Seilbahn, umso stärker dreht sich die Seilbahn selbst um das Seil, da keine seitliche Abstützung vorhanden ist.



**Abbildung 6.16:** Seilverdrehung (links) und Seil außerhalb der Nut (rechts)

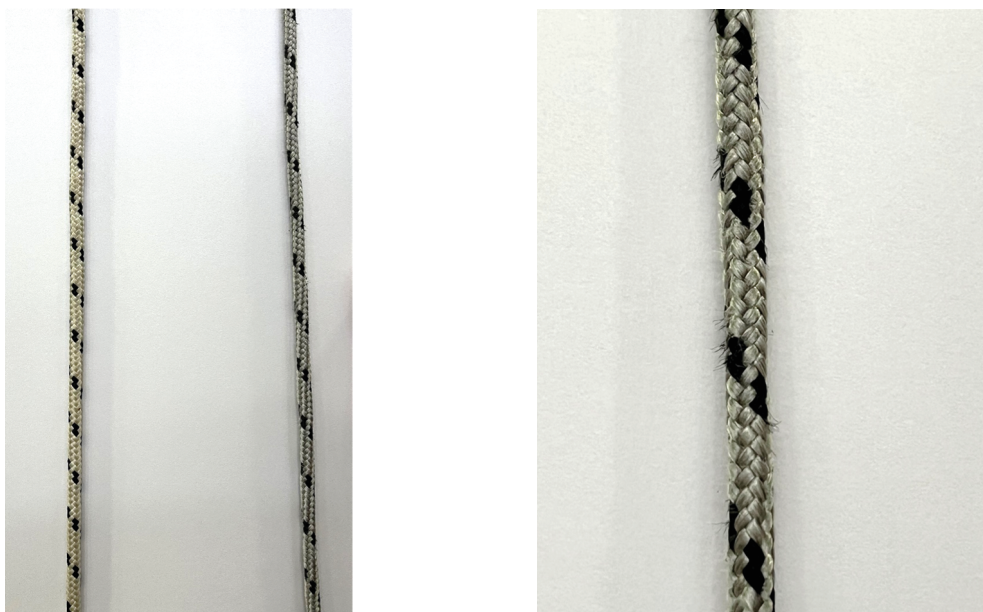
Die Seilverdrehung in Kombination mit einer Schiefelage der Seilbahn kann das Seil bei einer Abwärtsfahrt der Bahn aus der dafür vorgesehenen inneren Nut des Laufrades springen lassen (**Abbildung 6.16** rechts). Dieses Verhalten tritt umso häufiger auf, je höher die Zuladung und die Geschwindigkeit sind. Auch begünstigt eine geringe Seilvorspannung diesen Effekt. Das Seil kann zunächst noch an der inneren Flanke des Laufrades entlang gleiten und reiben. Ist diese Reibung jedoch zu groß, besteht die Möglichkeit, dass das Seil über die Innenseite des Laufrades rutscht und außerhalb des Laufrades gelangt. Dies führt zum abrupten Abstürzen der Seilbahn, das Seil rutscht ungehindert zwischen den Laufrädern hindurch.

Für mehr Sicherheit empfiehlt es sich, mit einer Absturzsicherung zu arbeiten. Dabei sollten die Laufräder beispielsweise dichter aneinander positioniert werden, damit das Seil nicht zwischen zwei Rollen seitlich durchrutschen kann. Problematisch erweist sich dann aber das

Seileinführen beim Einhängen der Seilbahn in das Seil zwischen den drei Antriebsrädern. Die Seilverdrehung kann evtl. mit weniger Schrägstellung der Seilbahn verringert werden. Die dadurch entstehende Schräglage der Laufräder bewirkt ein Reiben des Seils an den Seitenflanken der inneren Nut im Laufrad. Somit wird eine Art Drall in das Seil gegeben. Auch könnte eine breitere Nut helfen. Ein leichtgängiger, kugelgelagerter und drehbarer Schäkel könnte ebenfalls helfen, die Seilverdrehung auszugleichen. Dabei ist darauf zu achten, ob die Seilbahn sich um die Seilachse dreht. Das Ausbalancieren der Seilbahn wird auf jeden Fall eine Verbesserung hinsichtlich der Schrägstellung bringen.

### Verschleiß an Seil und Laufrollen

Mit zunehmender Anzahl der Fahrten am Seil verfärbt sich das Seil durch Gummiabrieb. In **Abbildung 6.17** ist links der Vergleich zwischen neuem, hellerem Seil (links) und gebrauchtem, dunklerem Seil (rechts) erkennbar. Auch am Boden sammelt sich minimaler Gummiabrieb von den Laufrädern, was zeigt, dass eine entsprechende Belastung der Räder durch die Seilkräfte und Gewichte während der Aufwärts- und Abwärtsbewegung eintritt. Die Abnutzung des Seils ist rechts in **Abbildung 6.17** gut sichtbar. Kleine Fäden und Fransen stehen vom Seil ab und es entstehen evtl. kleine Oberflächenbeschädigungen. Für einen Dauerbetrieb bedeutet dies, dass die Laufradbeschichtung und das Seil regelmäßig auf Verschleiß kontrolliert werden müssen. An den Laufrollen selbst sind aktuell noch keine Verschleißmerkmale mit dem bloßen Auge erkennbar. Das Nachmessen des Laufraddurchmessers hat keine Änderung ergeben. Der Verschleiß tritt wahrscheinlich vorwiegend an den Seitenflächen der kleinen mittleren Nut aufgrund der starken Seilverdrehung auf. Inwieweit durch Gummiabrieb am Seil die Reibung zwischen Seil und Laufrad beeinflusst wird, ist bisher nicht messbar.



**Abbildung 6.17:** Abrieb und Seilverschleiß

Dem Verschleiß könnte mit einem ummantelten oder beschichteten Stahlseil (z.B. polyamidummantelt, innen 5 mm verzinktes Stahlseil, außen 6 mm, Mindestbruchkraft 13 kN, 11 kg/100 m) begegnet werden. Die Ummantelung müsste dabei widerstandsfähig sein und einen hohen Reibungskoeffizienten für eine gute Haftung zwischen Seil und Laufrad haben. Gegebenenfalls würde auch die Seilverdrehung bei einem Stahlseil, bedingt durch eine größere Stabilität (geringere Beweglichkeit), geringer ausfallen als beim Kunststoffseil. Stahlseile haben aber wiederum den Nachteil gegenüber Kunststoffseilen, dass die Biegeradien wesentlich größer sein müssen. Dies würde zur Veränderung der Konstruktion führen, hin zu größeren Radien. Auch ist das höhere Gewicht von Stahlseilen zu berücksichtigen.

## 7      **Wirtschaftliche Bedeutung**

Es wurden im Rahmen des Projektes ausführliche Kostenkalkulationen zum Elektrohängebahnsystem durchgeführt. Dabei wurden die verschiedenen Baugruppen bezüglich zweier Fragestellungen betrachtet bzw. evaluiert: Inwiefern lässt sich das Elektrohängesystem kostengünstig umsetzen? Wie sieht eine wirtschaftliche Perspektive aus? Die Beschreibungen beruhen zum Teil auf der studentischen Arbeit [KSW21].

Das im Projekt realisierte Elektrohängebahnsystem ist klein, kompakt und besitzt einen einfachen Aufbau im Gegensatz zu aufwendigen Großindustrieanlagen wie zum Beispiel Kettenförderern oder ganzen Produktionsstraßen. Anwendungsschwerpunkte können beispielsweise gezielte Verbindungen einzelner relevanter Positionen innerhalb eines Produktionsgeländes sein, um kleine Baugruppen zwischen verschiedenen Montageschritten zu übergeben. Der Transfer von Werkstücken zwischen Produktionshallen, wie zum Beispiel die Ver- und Entsorgung an Arbeitsplätzen, ist genauso möglich.

Das neue Elektrohängebahnsystem hat aufgrund der kleinen zu bewegenden Massen und eines Baukastensystems mit beliebig kombinierbaren Elementen geringe Anschaffungs- und Betriebskosten. Eine hohe Anpassungsmöglichkeit ist, beispielsweise für den Einsatz bei der Produktion von Kleinserien, gegeben. Auch ist eine vielfältige Nutzung des Systems möglich. Das breite Einsatzspektrum reicht von einfachen Transportaufgaben oder Überwachungsmöglichkeiten bis zu Sensorträgern für Sicherheitseinrichtungen (Temperatur, Konzentration von Gasen usw.). Durch die hohe Flexibilität, z.B. beim Auf- und Abbau, ist auch ein Vermieten des Systems denkbar. Im Folgenden sollen nun die wichtigsten Punkte der wirtschaftlichen Betrachtung erläutert und aufgeführt werden. Dabei werden die Komponenten einzeln betrachtet sowie anschließend zwei mögliche Versuchsstrecken vorgestellt.

### 7.1    **Elektrobahn Komponenten**

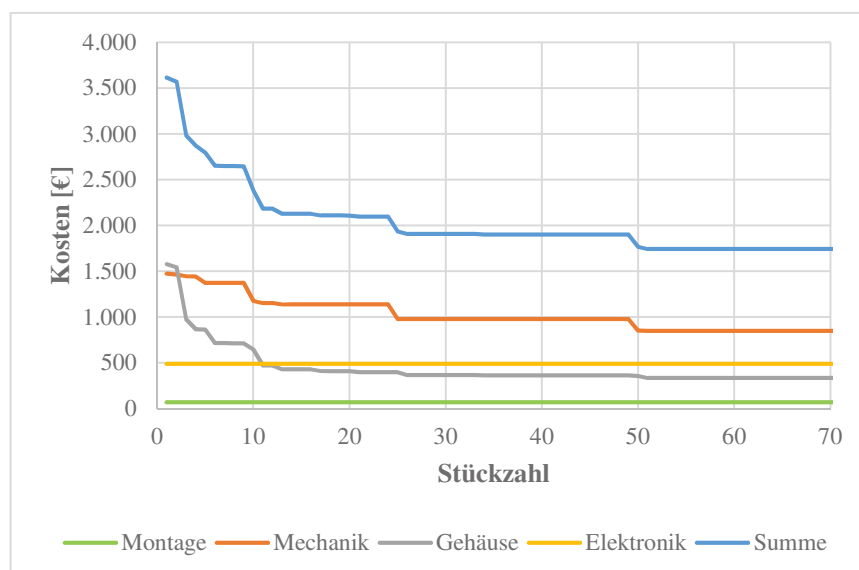
#### **Laufkatze**

Die Laufkatze des Elektrohängebahnsystems stellt die aufwendigste und teuerste Komponente dar. Minimale Kosten für eine einzelne Laufkatze liegen bei ca. 1.770 € und können ab einer Anzahl von ca. 50 Stück realisiert werden. Die Bahn, als Einzelstück angefertigt, verdoppelt die Kosten auf 3.616 €. Die elektronischen Komponenten wie Motor und Steuerungselemente sind weitestgehend losgelöst von der Produktionsmenge und belaufen sich auf Kosten von ca. 490 €. Mit dem Laufkatzengehäuse lassen sich größere Skaleneffekte erzielen. Bei geringen Stückzahlen entfallen je ca. 1.500 € auf Gehäuse und Mechanik. Bei größeren Stückzahlen können die Kosten für das Gehäuse auf ca. 356 € und ca. 852 € für die

Mechanik sinken. Für die Endmontage fallen nochmals 70,50 €, unabhängig von der Menge, an. Das Gehäuse des Akkumulators mit seinen zahlreichen Einzelteilen ist aufwendig und teuer, es liegt bei 50 € bis 100 € für eine Laufkatze. Das Antriebsrad und die beiden beschichteten Führungsrollen haben einen großen Anteil an den Gesamtkosten, welcher hier bei 800 € liegt. Dieser Preis ergibt sich durch die Fertigung und zusätzlich die sehr kostenintensive Gummierung. Für eine einzelne Führungsrolle müssen Kosten von 163,27 € für die Fertigung sowie 224,10 € für die Gummi-Beschichtung eingeplant werden. Der Weichenverstellmechanismus mit Gehäuse, Motor, Hebelarm, Lager und Welle veranschlagt 150 €. Der zu erwartende Kostenverlauf für die Fertigung der Laufkatzen ist in **Tabelle 7.1** tabellarisch und **Abbildung 7.1** graphisch dargestellt.

**Tabelle 7.1:** Kostenübersicht Laufkatze

Laufkatzen Komponente	Stückzahl 1	Stückzahl 50
Elektronik (Motor & Steuerung)	490 €	490 €
Gehäuse	1.579 €	356 €
Mechanik	1.476 €	852 €
Montage	71 €	71 €
<b>Kosten Laufkatze gesamt</b>	<b>3.616 €</b>	<b>1.769 €</b>



**Abbildung 7.1:** Kosten der Laufkatze in Abhängigkeit der Stückzahl [nach KSW21]

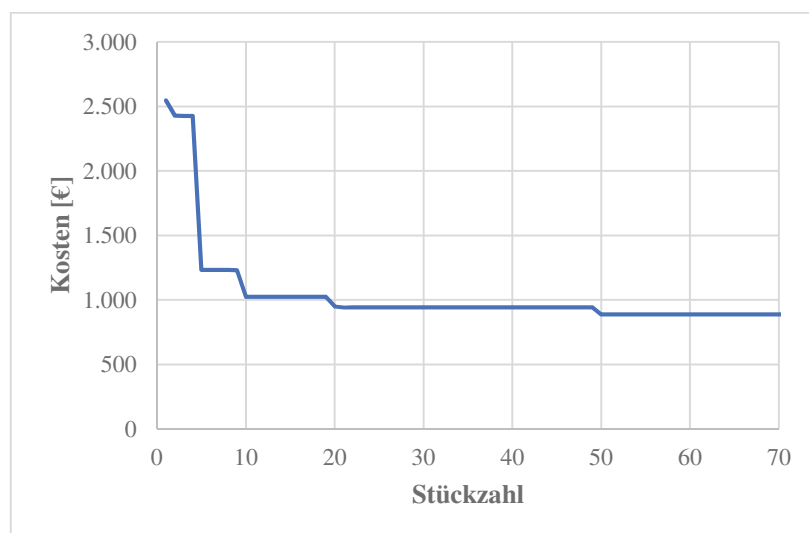
## Stützen

Die Stützen werden aus Halbzeugen durch Ablängen (Sägen) und anschließendes Fügen (Schweißen) hergestellt. Somit lassen sich nur sehr begrenzt Kosteneinsparungen durch höhere Stückzahlen erreichen. Eventuell können die Beschaffung und die Arbeitsabläufe von vorgefertigten Stahlprofilen geringfügig kostenoptimierter gestaltet werden. Befragte kleine und mittelständige Unternehmen unterscheiden hier zwischen Einzelstück und Großauftrag. Die Stütze als Einzelstück kostet ca. 360 €, ab 10 Stück kann mit einem Preis von 325 €

kalkuliert werden. Höhere Mengen können nur mit Hilfe von Automatisierungsvorgängen eine größere Kostensenkung realisieren.

### Weiche

Die Weiche ist die fertigungstechnisch komplexeste Baugruppe der Elektrohängebahn. Sie besteht aus vielen Einzelteilen und Metallbearbeitungsschritten, die eine komplexe Geometrie erfordern. Die Kosten sind hoch, da viele Einzelteile in Handarbeit gefertigt werden müssen. Eine Erhöhung der Stückzahl auf 10 kann die Kosten stark reduzieren, ab 20 Stück findet nur noch eine geringe Reduzierung der Kosten statt. Aufgrund der vielen Einzelteile und Fertigungsschritte werden die Kosten für geringe Stückzahlen von den angefragten Lieferanten als sehr hoch eingeschätzt. Die Kosten für eine Weiche ohne die benötigte Stütze liegen bei ca. 2.550 €, für hohe Losgrößen (Anzahl 50) sind 890 € möglich. Die Baugruppen besitzen keine eindeutige kostentreibende Einzelkomponente, hier gibt es eine große Anzahl an komplexen Bauteilen. Die Endmontage der Weiche wird mit geschätzten 25 € angenommen. **Abbildung 7.2** stellt die Kosten über die Stückzahl graphisch dar.



**Abbildung 7.2:** Kosten der Weiche in Abhängigkeit der Stückzahl [KSW21]

### Gerade und Kurve

Auf eine komplexe Schienengeometrie wird bei der Auslegung des Elektrohängebahnsystems bewusst verzichtet. Somit kann ohne großen Fertigungsaufwand kostengünstig und flexibel das Streckensystem aus standardisierten Teilen erstellt werden. Die Schienen für gerade Streckenabschnitte bestehen aus Stahlprofilen, einem Rechteckrohr mit den Abmessungen 80 x 20 x 2 mm. Die Kosten sind im Vergleich zu den anderen Komponenten fast vernachlässigbar klein und bestehen aus dem Materialpreis und den Versandkosten. Profilschnitte sind bei langen Geraden nicht nötig. Dadurch können Kosten pro Meter Schiene von 4 € entstehen. Bei sehr kurzen Strecken ergeben sich aufgrund von Transport und Zuschnitt-

kosten deutlich höherer Meterpreise von bis zu 32 €. Bei einer größeren Stückzahl an Rechteckrohren müssen die Kosten kaum berücksichtigt werden. Die Stützen sind allerdings nicht mit einberechnet und müssen bei der Kostenkalkulation für die geraden Streckenabschnitte alle sechs Meter mit ca. 325 € (ab Anzahl 10) berücksichtigt werden. Für eine beispielsweise 100 m Elektrohängebahn-Gerade ergeben sich Kosten von 5.918 €. Dabei belaufen sich die Kosten für die 17 Schienenelemente auf 68 € und für die 18 Stützen auf 5.850 €.

Kurvenelemente werden aus einem gebogenen Flachstahl 80 x 6 mm hergestellt. Die Kosten belaufen sich auf ca. 70 € für jeden Kurvenbogen. Der erhöhte Herstellungsaufwand beeinflusst dabei vorwiegend die Kosten. Der Radius der Kurven spielt keine Rolle, die Kosten für 30°, 60° oder 90° Kurven bleiben gleich. Dagegen ist für jede Kurve eine Stütze nötig, was die Kosten steigen lässt. Des Weiteren sind für jeden Kurvenbogen zwei Adapterplatten nötig, welche das Flachprofil (Kurve) mit dem Rechteckrohr (Gerade) verbinden. Kosten von bis zu 50 € sind hierbei zu berücksichtigen, da aktuell Frästeile verwendet werden. Für das Kurvenelement ohne Stütze ergeben sich Kosten von ca. 175 bis 270 €.

## 7.2 Demonstrationstrecke

Um einen besseren Kostenvergleich zu erhalten, sollen zwei Streckenverläufe („klein“ und „groß“) exemplarisch vorgestellt werden. Im ersten Beispiel werden für eine Laufkatze lediglich zwei Stationen durch ein Schienensystem verbunden. Ein Nebengleis mit Akku-Ladestation bzw. Akku-Wechselsystem ist zusätzlich vorhanden. **Abbildung 7.3** zeigt den Aufbau dieser Strecke. Es sind zwei 45° Kurven, eine Weiche, 56 Meter gerade Schiene und 14 Stützen verbaut.

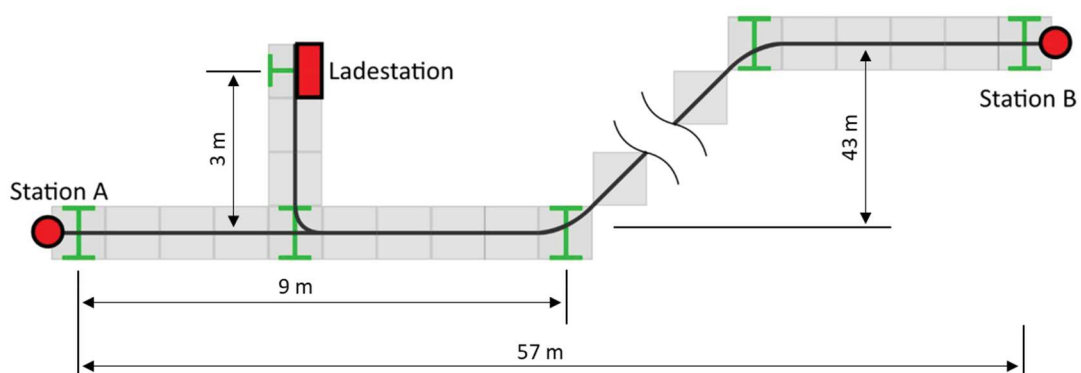


Abbildung 7.3: Demonstrationstrecke 1 [nach KSW21]

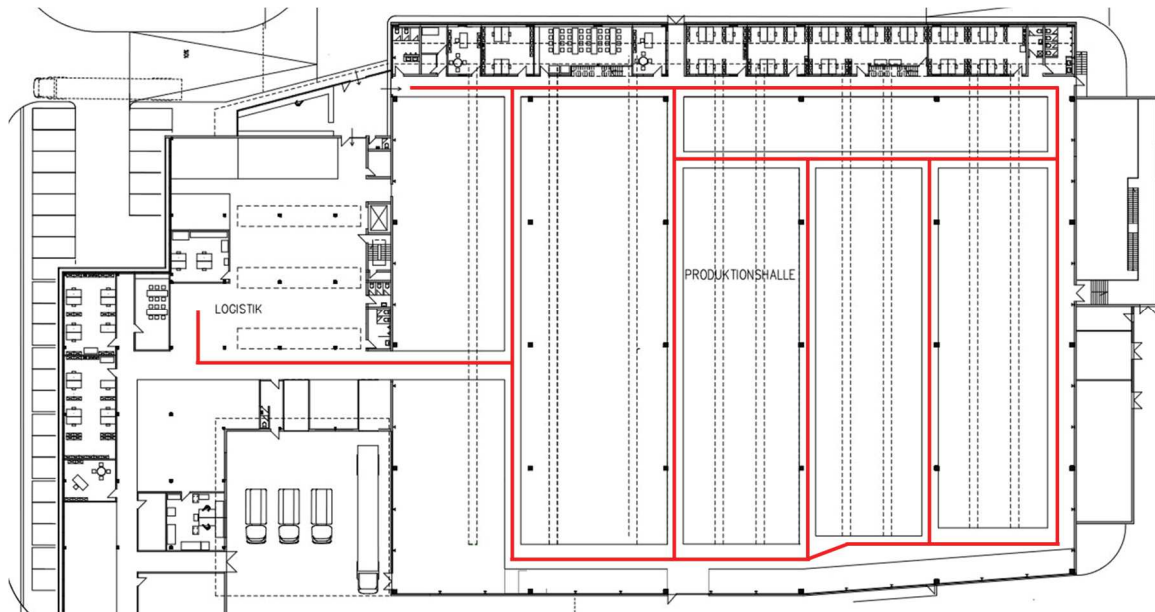
In der **Tabellen 7.2** sind die Einzelkomponenten des Hängebahnsystems dieser Variante aufgelistet. Die Gesamtkosten belaufen sich auf ungefähr 11.781 €.

**Tabelle 7.2:** Kostenübersicht Demonstrationsstrecke 1 Einzelteillfertigung

Komponente	Menge	Einzelkosten	Gesamtkosten
Laufkatze	1	3.615,15 €	3.615,15 €
Kurve 45°	2	268,50 €	537,00 €
Weiche	1	2.548,02 €	2.548,02 €
Schienelement Gerade (500 mm)	112	3,53 €	395,36 €
Übergangsstück	7	22,50 €	157,50 €
Stütze	14	323,43 €	4.528,02 €
		<b>Summe:</b>	<b>11.781,05 €</b>

Wenn die gleiche Anlage in größerer Stückzahl (z.B. Anzahl mindestens 50, siehe Anhang) gefertigt wird, kann bereits von einer Serienfertigung gesprochen werden. Damit fallen die Einzelkosten für die Komponenten. Es ergeben sich für den gleichen Streckenaufbau Kosten in Höhe von ca. 8.035 € pro Strecke. Durch die Serienfertigung und die dadurch entstehenden Skaleneffekte lassen sich also die Kosten um 3.746 € senken, was einer Reduzierung von 32 % entspricht.

Im zweiten Beispiel soll das Elektrohängebahnsystem in einem großen Gebäude (10.500 m<sup>2</sup>) exemplarisch eingesetzt werden. Bei der Halle handelt es sich um ein Produktionsgebäude (Neubau 2007) des Architekturbüros Isin +Co. GmbH & Co. KG in Aalen, von welchem die Grundrisse öffentlich einzusehen sind (siehe **Abbildung 7.4**). Das Gebäude soll hier nur als Beispiel für eine große Produktionshalle stehen. Diese hat eine Größe von ca. 60 x 80 Metern. Daneben befinden sich ein Logistikzentrum, Schulungsräume, Aufenthaltsbereiche und Sozialräume. In dem Grundriss sind in Rot beispielhaft Transportwege der Elektrohängebahn eingezeichnet. Der Streckenverlauf ist einspurig für den Transport kleiner Mengen ausgelegt, für eine geringe Nutzung mit langen Wegen und wenigen Laufkatzen. Auch sollen nur zwei Ladestationen im Beispiel zum Einsatz kommen. Die Elektrohängebahn ist nicht als primäre Produkt- und Werkstücktransporteinheit vorgesehen, da ansonsten separate mehrspurige Fahrstrecken, Ausweichgleise und eine größere Ladeinfrastruktur erforderlich wären. In diesem Anwendungsfall könnten Werkzeuge und Betriebsmittel an den Maschinen oder Testwerkstücke für die Qualitätssicherung bereitgestellt werden. [nach Isi23], [nach Hei23a]



**Abbildung 7.4:** Demonstrationsstrecke 2 Produktionshalle [nach Hei23a]

Das Bahnsystem basiert wieder auf dem Baukastensystem aus Kapitel 4.3.3 und soll durch aufgestellte Stützen in der Halle getragen werden. In **Tabelle 7.3** sind die Gesamtkosten für diesen Streckenverlauf (Produktionshalle) aufgeführt.

Zum Vergleich kostet der gleiche Streckenaufbau in der Serienfertigung (Stückzahl mindestens 50, siehe Anhang) ca. 47.441 € pro Anlage, ist also 5.827 € günstiger als eine Einzelfertigung. Dies entspricht ca. 11 % Kosteneinsparung.

**Tabelle 7.3:** Kostenübersicht Demonstrationsstrecke 2 Einzelteilerfertigung

Komponente	Menge	Einzelkosten	Gesamtkosten
Laufkatze	3	2.983,06 €	8.949,18 €
Kurve 45°	2	268,50 €	537,00 €
Kurve 90°	4	268,50 €	1.074,00 €
Weiche	10	1.024,40 €	10.244,00 €
Schienelement Gerade (500 mm)	962	3,34 €	3.213,08 €
Übergangsstück	42	18,80 €	789,60 €
Stütze	88	323,43 €	28.461,84 €
		<b>Summe:</b>	<b>53.268,70 €</b>

### Weitere Kosten durch erweiterte Steuerung

Die Kosten der Laufkatzen in den beiden **Tabellen 7.1 bis 7.3** enthalten die Steuerungs- und Antriebskomponenten der Laufkatze Version 3.1 (Komponenten siehe auch Anhang). Im weiteren Projektverlauf sollten die Bahnen auf die Version 3.2 für einen autonomen Fahrbetrieb umgerüstet werden. Hierfür sind weitere Komponenten wie ein zusätzlicher Raspberry Pi für die Fahrtsteuerung notwendig. Des Weiteren werden Sensoren für die Positionierung und die Sicherheitsfunktionen (Ultraschallsensoren, Reed-Sensoren, RFID-Reader) benötigt. Da die genaue Auswahl und Befestigung der zusätzlichen Komponenten am Prototyp

noch nicht ganz abgeschlossen ist, sind weitere Änderungen möglich. Die Zusatzkosten für den Umbau auf die Steuerung Version 3.2 belaufen sich auf ca. 260 bis 300 € für eine Laufkatze. Dabei fehlt noch das Server- und Software-System im Hintergrund, das die Planung der einzelnen Laufkatzenfahrten durchführt.

Auch die Umrüstung vom Bosch Gleichstrommotor (Bosch F 006 B20 360) auf den Bürstenlosen DC-Motor (Nanotec DB59M024035) mit Planeten- oder sogar Winkelgetriebe (PAII / PAIIR 042-010) und Motor-Controller für die Version 3.2 werden die Kosten einer Laufkatze um weitere ca. 400 € bis 600 € erhöhen. Die höheren Laufkatzen-Kosten sind jedoch sinnvoll, da sich die gesamte Steuerung, die Antriebe und Sensorik der Elektrohängebahn in den Laufkatzen befindet. Dadurch ist es möglich, die Kosten für einen Meter Elektrohängebahn-Strecke gering zu halten.

### **7.3 Zusammenfassung der wirtschaftlichen Betrachtung**

Die größten Kosten im Elektrohängebahnsystem entstehen durch die aufwendige und manuelle Bearbeitung, wie beispielsweise Schweißen, Biegen, Sonderlösungen und Schraubverbindungen. Hier kann eine Automatisierung weitere Kosten senken, aber nur bei sehr hohen Stückzahlen. Andere Bauteile, die weniger bearbeitet werden müssen, sind bereits jetzt bei mittleren Stückzahlen kostengünstig zu beschaffen. Wo immer möglich, sollte auf selbst konstruierte Komponenten verzichtet werden. Normteile und Zukaufteile können die Kosten deutlich senken.

#### **Laufkatze**

Bei der Elektronik ist der Akkumulator das teuerste Bauteil (Steuerung Version 3.1). Einsparpotential liegt evtl. in der Verwendung eines kleineren Akkumulators, was aber gut überdacht werden muss hinsichtlich der Reichweite und der Sicherheit. Was die Akkumulatorbox und -halterung für das Wechselsystem betrifft, besteht ein großes Potential, Kosten zu senken. Die zahlreichen Einzelteile aus Kunststoff und Aluminium verursachen hohe Kosten. Für eine Produktion in größeren Maßstäben eignet sich das aktuelle Design nicht. Dafür müsste das Konzept für die Fertigung durch weniger Frästeile und mehr Kunststoff-Spritzgussteile optimiert werden. Das Konzept des automatischen Akkuwechselsystems sollte auf seine Wirtschaftlichkeit überprüft werden. Eine höhere Anzahl an Laufkatzen mit fest verbautem Akku könnte wirtschaftlicher sein, da die Konstruktion stark vereinfacht wird, was die Kosten wiederum deutlich senkt. Auch würde die gesamte Akku-Wechselstation mit der notwendigen und aufwendigen Mechanik entfallen und dadurch Störungen und Wartung vermieden. Im Gegensatz zu einem schnellen Austausch des Akkumulators in der Wechselstation könnte die Laufkatze in Ruhephasen in den Stationen mit Schleifkontakten geladen

werden und ein intelligentes Steuerungssystem die Fahraufträge an die Laufkatzen in Abhängigkeit des Akku-Ladestandes vergeben. Für den Dauerbetrieb müssten mehrere Laufkatzen zusätzlich beschafft werden, sodass abwechselnd geladen werden kann.

Das gummibeschichtete Antriebsrad der Laufkatze sowie die beschichteten Führungsrollen stellen ebenfalls einen Hauptteil der Gesamtkosten mit ca. 530 € dar. Hier ist dringend eine Alternative zu suchen. Erste positive Versuche wurden mit Kunststoff-Führungsrollen an Stelle von gummierten Aluminium-Rollen durchgeführt, wodurch eine Kostenreduzierung eintritt, da allein durch das Weglassen der Gummierung 235 € für die vier Führungsrollen der zwei Laufkatzen gespart werden. Die Haltbarkeit der Bauteile könnte allerdings darunter leiden. Bei dem Antriebsrad ist dagegen die Gummibeschichtung für die Steigungs- und Gefällestrecken sowie Abbremsvorgänge wichtig. Es sollte geprüft werden, ob existierende Laufräder von Schwerlastrollenherstellern, wie der Firmen Tente, Räder Vogel, Blickle, Wicke usw., einsetzbar sind. Mit kleinen Änderungen könnten diese Laufräder evtl. den aufwendigen Gummierungsprozess überflüssig machen. Voraussetzung ist ein guter Kontakt zwischen Stahlschiene und Antriebsrad.

Die zahlreichen mechanischen Komponenten der Laufkatze sind mit ca. 852 € (Stückzahl 50) ebenfalls kostenaufwendig, wobei hier nur wenig Potential für eine Kostensenkung gegeben ist. Die Verwendung von mehr Norm- und Zukaufteilen kann helfen, die Kosten weiter zu senken. Dies könnte auch bei der aktuell verbauten Weichenverstellereinrichtung aus Kunststoff gelten. Für eine haltbare Aluminium- und Stahl-Vorrichtung fallen höhere Kosten an als bei der Kunststofflösung, die momentan im Einsatz ist. Das System der Passivweiche (alle Sensorik und Aktorik in der Laufkatze) sollte aber unbedingt weiterverwendet werden, da oft mehr Weichen im System zum Einsatz kommen als Laufkatzen.

### **Schienensystem**

Da die Laufkatzen die gesamte Technik enthalten (Sensoren, Antriebe und Stellmechanismen) kann das gesamte Schienensystem passiv ausgelegt werden, also reiner Stahlbau. Die Kosten für das Rechteck- (Gerade) und Flachprofil (Kurve) sind bei großen Mengen gering, im Gegensatz zu den Stützen sogar vernachlässigbar. Die Stützen tragen die Schienen und Weichen aktuell alle 6 Meter. Kosten für die Stützen können gespart werden, wenn die vorhandene Hallenstruktur verwendet werden kann. Halterungen oder Klemmen werden dazu an den Trägern der Halle befestigt, um die Schienen zu montieren. Auch der Einsatz von mehr Kunststoffteilen (hochfeste technische Kunststoffe mit Gleiteigenschaften) am Schienensystem, z.B. die Übergänge von Rechteck- zu Flachprofil, kann weitere Kosten einsparen, weil Frästeile ersetzt werden.

Die Wirtschaftlichkeit des Seilbahnsystems muss auch hinsichtlich seiner Anwendungsszenarien evaluiert werden. Dazu gehören vor allem die längeren Streckenabschnitte, bei denen

der Abstand zwischen den Stützen von 6 m nicht eingehalten werden kann. Da die Kosten der Stahlprofile fast vernachlässigbar gering sind und nur die Kosten für die Stützen beachtet werden müssen, ist das Seilbahnkonzept in den meisten Fällen keine kostengünstigere Alternative. Die Aufwände für die Seilspannvorrichtung und das Abstützen der Seilkräfte sind hoch.

### **Weichen**

Der hohe Fertigungsaufwand und die vielen Bearbeitungsschritte der Passivweiche lassen die Kosten stark steigen. Das Konzept der Passivweiche erzeugt zusätzliche einzelne Halter und Führungsschienen, die montiert werden müssen. Die Kosten könnten nur durch eine automatisierte Fertigung stark verringert werden, was eine hohe Stückzahl und somit mehr Kunden voraussetzt. Sollten keine weiteren Vereinfachungen am Konzept der Passivweiche möglich sein, muss geprüft werden, ob ein aktives Weichenkonzept evtl. günstiger zu realisieren ist. Standard-Elektronikkomponenten sind kostengünstige Bauteile. Die Stromversorgung und Steuerung der elektrischen Verstell-Motoren könnte durch innenliegende Kabel im Schienenprofil geschehen und auch die Laufkatze selbst könnte über Schleifkontakte am Schienenprofil die Weiche mit Strom zum Verstellen versorgen.

Die wirtschaftliche Betrachtung hat gezeigt, dass kleine Elektrohängebahnen mit Kosten im vierstelligen Bereich realisiert werden können. Skaleneffekte in der Produktion (höhere Stückzahlen) haben einen großen Einfluss auf die Kosten. Die Herstellung von einzelnen Prototypen ist dagegen teuer. Größere Kostensenkungen sind bereits bei zweistelligen Losgrößen möglich.

Mit dieser wirtschaftlichen Betrachtung können erste Entscheidungen für die Weiterentwicklung des Elektrohängebahnsystems getroffen werden. Die Kosten stehen im Mittelpunkt des Systems. Erste Skaleneffekte bei größeren Stückzahlen sind wichtig und wurden hier bereits aufgezeigt. Es ist nun möglich, zwei Beispielstrecken mit realen Kosten zu kalkulieren, kleine Anlagen können bereits für ca. 8.035 € in Serien realisiert werden. Größere Einsparungen sind, wie oben beschrieben, bei der Mechanik und dem Laufrollenmaterial der Laufkatze möglich. Auch das kostenintensive Konzept der Wechselbatterie muss überdacht und eventuell angepasst werden. Auch die derzeitige Passivweiche mit ihren vielen komplexen Einzelteilen und Fertigungsschritten erhöht die Kosten und sollte nochmals überprüft werden. Mit diesen Anpassungen könnten die Kosten für ein wirtschaftlich gutes intralogistisches Transportmittel weiter gesenkt werden.

Über die wirtschaftlichen Aspekte der Gummi-Beschichtungen auf den Elektrobahn-Laufrädern lässt sich derzeit noch zu wenig sagen. Beim Vergleich der drei Laufradbeschichtungen konnte ein Hersteller überzeugen. Es sind jedoch noch weitere Langzeittests notwendig, um den Verschleiß des Materials zu erörtern. Der aktuell sehr hohe Anteil der Kosten für

Beschichtung und Laufradherstellung an den Gesamtkosten der Laufkatze empfiehlt eine alternative Lösung. Die Konstruktion sollte dringend an die am Markt verfügbaren Produkte angepasst werden, solange kein Bedarf an großen Stückzahlen besteht.

Diese wirtschaftliche Betrachtung kann nur der erste Schritt gewesen sein. Der nächste Schritt wäre, eine Firma zu finden, die das Elektrohängebahnsystem übernimmt und alle Komponenten und Kosten nochmals kalkuliert.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### Zusammenstellung der erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse

Das im Rahmen des AiF IGF-Projektes 19265 entwickelte Elektrohängebahnsystem hat deutlich gezeigt, dass das Konzept der autonom fahrenden Elektrohängebahn mit passiven Weichen und Schienensystem möglich ist. Alle gestellten Anforderungen konnten durch das Hängebahnsystem erfüllt werden. Beispielsweise gelingt es der Laufkatze mit Hilfe von gummibeschichteten Laufrädern, Steigungen und Gefällestrrecken bis ca.  $20^\circ$  zu überwinden. Des Weiteren ist die Möglichkeit gegeben, Seile und Schienen mit derselben Bahn zu befahren.

Kapitel 4 stellt in dieser Arbeit das gesamte Elektrohängebahnsystem ausführlich mit allen wichtigen Einzelkomponenten für einen Gesamtüberblick vor. Dabei wird auf den Aufbau und die Funktionen des Schienensystems mit den Geraden, Kurven, Steigungs- und Gefällestrrecken, dem Seilabschnitt, der Seilspannvorrichtung, Stützen und Klemmen zum Halten und Befestigen der Schienen eingegangen. Neben dem modularen Elektrohängebahn-Baukastensystem wird die passive Weiche erklärt. Auch werden der kleine und große Versuchstand an der TU Dortmund vorgestellt, an dem die Versuchsfahrten stattfanden. Die Laufkatzen gibt es in den beiden aktuellen Versionen 3.1 und 3.2. Zum Steuern der Seilbahn mit Hilfe eines Mobilgerätes ist eine App vorgesehen, welche die wichtigsten Funktionen der Bahn realisiert. Neben dem Weichenverstellmechanismus sind erste Konzepte für die Akku-Wechselstation beschrieben worden.

In den Kapiteln 5 und 6 steht das Reibverhältnis zwischen Antriebsrad und Fahrbahn in der Ebene, an Steigungen und am Seil in Mittelpunkt. Dabei wurde das Schlupfverhalten am Stahl Rechteckrohr, Flachstahlprofil und am Seil bei den unterschiedlichen Versuchsfahrten und Variationen der Einflussgrößen (Laufradbesehichtung, Nutzlast, Steigungswinkel, Drehzahl der Antriebsrolle, Umschlingungswinkel und Seilvorspannung am senkrechten Seil) näher betrachtet. Zuvor mussten Versuchspläne erstellt und verschiedene Versuchstrrecken und Messtechniken getestet werden. Mit Hilfe der Ergebnisse aus den Versuchsfahrten können erste Empfehlungen gegeben werden, wie Steigungen und Gefälle bis  $20^\circ$  auf Schienen und sogar  $90^\circ$  Seilfahrten möglich sind. Die Versuche werden dabei mit zwei Prototypen der Elektrohängebahn an den verschiedenen Fahrbahnen (Schiene und Seil) durchgeführt. Zielgröße ist immer der Schlupf zwischen Antriebsrad und Fahrbahn. Auch konnten mit den verschiedenen Seilfahrten die Vor- und Nachteile dieses Aufbaus erörtert werden. Die Teststrrecken mit den modularen Schienenverbindungen schaffen eine gute Grundlage. Zum einen ermöglicht sie die weitere Erprobung des Elektrohängebahnprototyps, wodurch wichtige Erkenntnisse gewonnen werden können. Zum anderen stellen sie

den Ausgangspunkt für künftige Entwicklungen dar, beispielsweise für Weichen, Kreuzungen, Be- und Entladestationen sowie Stromladestationen.

Kapitel 7 beinhaltet eine wirtschaftliche Betrachtung des Elektrohängebahnsystems. Hiermit ist es erstmals möglich, reale Zahlen aufzuzeigen, wie viel eine derartige Anlage kosten könnte. Dabei wird unterschieden zwischen Einzel- und Kleinserienfertigungen sowie kleiner und großer Demonstrationsstrecke. Diese Kostenkalkulation kann zur Entscheidungsgrundlage für eine weitere Entwicklung und Vermarktung genutzt werden. Kleine Anlagen sind bereits unter 10.000 € realisierbar, was die Erwartungen an das Elektrohängebahnsystem sogar übertrifft. Auch werden Komponenten für die größten Einsparpotenziale aufgezeigt.

Das neuartige kleine, leichte und günstige Elektrohängebahnsystem, welches flexibel und modular aufgebaut werden kann und geeignet ist für den Transport von geringen Lasten in der innerbetrieblichen Logistik, konnte mit dieser Arbeit verifiziert und evaluiert werden. Weiterführende Versuche wurden durchgeführt, um den Kontakt zwischen Laufrad und Seil bzw. Stahlprofil mit allen Einflussparametern zu analysieren. Gleichzeitig konnte aufgezeigt werden, dass auf diesem Gebiet noch weiterer Forschungsbedarf besteht. Diese Arbeit stellt einen Anfang dar, um weitere Untersuchungen durchzuführen.

Die Konzeption eines kostengünstigen Elektrohängebahnsystems, welches lediglich aus Seilen besteht, wie ursprünglich im AiF IGF-Forschungsprojekt angedacht, erwies sich als sehr schwierig umzusetzen. Die Kosten für einen Meter Seil sind zwar vergleichsweise gering. Demgegenüber steht aber das teils starke Schwingen und Pendeln der Laufkatze, welches ein erhöhtes Absturzrisiko zur Folge hat. Die Seilspannung ist von entscheidender Bedeutung, da bei einem großen Seildurchhang die Gefahr eines Kontakts besteht, bei dem die Laufkatze mit dem Transportgut den Boden berührt. Der Seilspannmechanismus für jeden Streckenabschnitt ist mit einem hohen Aufwand und Kosten verbunden und die hohen Seilkräfte müssen durch bauliche Maßnahmen abgestützt und aufgefangen werden. Die Realisierung von Kurven und Weichen mittels Seilen ist nicht möglich, sodass eine Konstruktion aus Schienen erforderlich ist. Dies führte schließlich zum hier erwähnten Elektrohängebahnsystem, bestehend aus Schienen, Weichen und zum Teil aus kurzen Seilabschnitten. Allerdings muss das Sicherheitskonzept noch dringend geklärt werden, inwiefern ein solches System Lasten über den Köpfen von Personen in Produktions- oder Logistikhallen befördern darf.

### **Ausblick zur Themenfortführung**

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf den Laufrädern sowie der Kontaktfläche zwischen Gummi-Beschichtung und Fahrbahn (Stahl-Profil oder Seil). Allein hier sollten weitere Untersuchungen mit verschiedenen Laufradbeschichtungen, Materialien und Härtegraden durchgeführt werden. Weitere Optimierungen betreffen die Laufradgeometrie hinsichtlich Seil- und Weichendurchfahrt, zum Beispiel Breite, Seitenflanke und Winkel.

Derzeit stellen die Kosten für die Gummierung und das hohe Laufradgewicht ein Problem dar. Die Überlegung, den Laufradkörper aus Kunststoff zu fertigen, wirft Fragen nach der Haltbarkeit auf, insbesondere bei den hohen Belastungen beim Anfahren (Passfeder als Welle-Nabe-Verbindung), abruptes Abbremsen und Bergauffahren. Die Führungsrollen, derzeit ebenfalls bestehend aus gummibeschichtetem Aluminium, können problemlos durch Kunststoffrollen ersetzt werden. Dies würde nicht nur die Kosten senken, sondern auch die Fertigung vereinfachen. Für eine mögliche Serienfertigung müssten die Kosten dringend optimiert werden. Eine mögliche Lösung wäre es, Standardrollen oder Laufräder von Schwelradherstellern zu verwenden und nachzubearbeiten (Kontur der Lauffläche), was erhebliche Kosteneinsparungen ermöglichen könnte. Auch wären bei größeren Abnahmemengen Sonderwünsche möglich. Weiteres Bandagenmaterial sollte untersucht und berücksichtigt werden. Als Alternative zu der Gummierung könnten auch Vollgummi, Polyurethan, Vulkanollan, Polyamid oder Polypropylen zum Einsatz kommen. Es stellt sich dann allerdings die Frage, wie sich dieses Material im Dauerbetrieb und bei den gegebenen Belastungen und Steigungen verhalten würde.

Darüber hinaus wären weitere Tests am Seil unter verschiedenen Bedingungen (trocken, feucht, nass, eisig) interessant. Dabei ist es wichtig, eine klare Definition für „nass“ und „feucht“ festzulegen. Diese gezielten Tests zur Ermittlung der Haftung, des Verschleißverhaltens und der Lebensdauer der Laufradbeschichtung sind von großer Bedeutung, um die Langlebigkeit zu gewährleisten.

Insbesondere die Kanten der mittleren Führungsnut in den Laufrädern, die als Führungsrille dient, beeinflussen maßgeblich die Laufstabilität der Bahn und unterliegen einem hohen Verschleiß. Die Auswirkungen unterschiedlicher Rillenprofile auf die Stabilität sollten daher genauer untersucht werden, um die Fahreigenschaften der Bahn auf dem Seil weiter zu optimieren.

Für weitere wissenschaftliche Untersuchungen bieten sich beispielsweise auch Experten im Bereich Systemdynamik und Reibungsphysik als mögliche Projektpartner an. Sie beschäftigen sich mit der Kontaktmechanik und Reibung (Tribologie-Systeme) und könnten für weitere tiefgreifende Untersuchungen und Forschungen im Bereich Reibung und Schlupf helfen.

---

Abschließend lässt sich auch feststellen, dass Seilbahnen nicht nur in Gebirgsregionen für sportliche Aktivitäten gefragt sind, sondern beispielsweise auch in Großstädten, wie zum Beispiel Köln und Bonn, als zukünftige Mobilitätslösung immer mehr an Bedeutung gewinnen. Lifthersteller sind weltweit in den großen Städten unterwegs, um durch neue Seilbahnkonzepte die Verkehrsprobleme zu lösen. Dabei können Seilbahnen auch für den innerbetrieblichen Materialtransport zum Einsatz kommen. Für diesen Einsatzzweck konnte diese Arbeit erste Impulse und Ergebnisse liefern. [nach Bon23], [nach Fai22]

## Literaturverzeichnis

- [AIK+07] Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel; Tempelmeier, Host; Furmans, Kai: Handbuch Logistik, 3. Auflage, Berlin, Springer-Verlag 2007 (VDI-Buch)
- [Alt18] Altland, Laura: Konstruktion eines Schienensystems für eine Hängebahn, Entwicklungsprojekt der Hochschule Bochum Studiengang Maschinenbau, 2018 (unveröffentlicht)
- [Ape23] Firma APEX Dynamics Germany GmbH: <https://www.apexdynamicsgermany.de>, zuletzt eingesehen am 17.10.2023
- [Ayl15] Aylak, Batin Latif: Konzeptentwicklung ultraleichter Elektrohängebahnsysteme und deren Bewertung für Logistik-Applikationen, Dissertation an der Universität Duisburg-Essen 2015
- [BM19] Bilek, Markus; Mahnke, Lukas: Erprobung und Optimierung einer neuartigen Elektrohängebahn, Projektarbeit am Fachgebiet Maschinenelemente, TU Dortmund 2019 (unveröffentlicht)
- [Bmw19] BMWK Industrie 4.0: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>, zuletzt eingesehen am 16.10.2023
- [Bon23] Bundesstadt Bonn - Seilbahn-Planung: <https://www.bonn.de/themen-entdecken/verkehr-mobilitaet/seilbahn/inhaltsseiten/seilbahn-planung.php>, zuletzt eingesehen am 14.10.2023
- [BWK+19] Belsky, Marina; Wißuwa, Manuel; Koc, Emre; Künne, Bernd; Noche, Bernd; Belsky, Dennis: The ultralight electro monorail system (uEMS) as the solution for transfer of light-weighting loads in large industrial areas, Logistics Journal, Proceed-ings, <https://www.logistics-journal.de/proceedings/2019/4984>, 2019
- [CH20] Czichos, Horst; Habig, Karl-Heinz, Hrsg.: Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, 5. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2020
- [Dig22] <https://www.digital-in-nrw.de/de/erfolgsgeschichten/supply-chain-management-und-interne-logistik/pilotierung-autonome-transportdrohne-fuer-flexible-logistik>, zuletzt eingesehen am 08.05.2022
- [Dop22] Doppelmayr Schlepplift: <https://www.doppelmayr.com/systeme/schlepplifte/>, zuletzt eingesehen am 24.09.2022
- [Dop23] Doppelmayr Seilbahn GmbH - Monorack: <https://www.doppelmayr.com/systeme/monorack/>, zuletzt eingesehen am 17.10.2023
- [Dou11] Lartigue Monorail Locomotives: <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/LOCOLOCO/lartigue/lartigue.htm>, zuletzt eingesehen am 16.10.2023

- [Eis09]      Prospekt EISENMANN Anlagenbau GmbH & Co. KG, EISENMANN Service GmbH & Co. KG: Kommissionierung mit Elektrobahnssystemen, Böblingen, September 2009
- [Fai21]      fairkehr Das VCD-Magazin 5/2021, Artikel: Das unbekannte Flugobjekt, VCD e.V., Berlin
- [Fai22]      fairkehr Das VCD-Magazin 1/2022, Artikel: Seilbahnen sollen Autos ersetzen, VCD e.V., Berlin
- [FNS+20]     Fritzsch, Benjamin; Namneck, Antonia; Schwab, Alexander; Kirchner, Lena; Stonis, Malte: Wirtschaftlichkeitsbewertung von Drohnen zum innerbetrieblichen Materialtransport, Logistics Journal, nicht referierte Veröffentlichungen, Vol. 2020, <https://www.logistics-journal.de/not-reviewed/2020/11/5129>, zuletzt eingesehen am 17.10.2023
- [Fut23]      Jensen Holding AG: <https://www.jensen-group.com/de/produkte/produkt-detail/futurail.html>, zuletzt eingesehen am 16.10.2023
- [GHK+17]     Gomeringer, R.; Heinzler, M.; Kilgus, R.; Menges, V.; Oesterle, S.; Rapp, T.; Scholer, C.; Stenzel, A.; Stephan, A.; Wieneke, F.: Tabellenbuch Metall, 47. Auflage, Haan-Gruiten, Europa Lehrmittel 2017
- [Gpi22a]     GPI Günther Projekte Industrieanlagen GmbH: <https://www.gpigmbh.de/de/produkte/elektro-haengebahn-systeme/de-system-omega.html>, zuletzt eingesehen am 08.02.2022 (2023 Liquidation des Unternehmens)
- [Gpi22b]     GPI Günther Projekte Industrieanlagen GmbH: <https://www.gpigmbh.de/de/produkte/elektro-haengebahn-systeme/power-free-system.html>, zuletzt eingesehen am 08.02.2022 (2023 Liquidation des Unternehmens)
- [Gra19]      Granzow, Axel: Thyssenkrupp Steel startet Transportdrohne, DVZ – Deutsch Verkehrs-Zeitung, 2019, <https://www.dvz.de/unternehmen/logistik/detail/news/thyssenkrupp-steel-startet-transportdrohne.html>, zuletzt eingesehen am 17.10.2023
- [Gün13]      Günthner, Willibald A.: Skript zur Vorlesung Seilbahntechnik, fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik, Technische Universität München 2013
- [Hba23]      H-Bahn-Gesellschaft Dortmund: <https://h-bahn.info>, zuletzt eingesehen am 15.10.2023
- [Hei21]      Wittenhorst, Tilman: DHL hat Entwicklung der Zustelldrohne "Paketkopter" eingestellt, 2021, heise online, <https://www.heise.de/news/DHL-hat-Entwicklung-der-Zustelldrohne-Paketkopter-eingestellt-6158103.html>, zuletzt eingesehen am 16.10.2023
- [Hei23a]     Heinze Architektur Portal: <https://www.heinze.de/architekturobjekt/produktionshalle-mit-logistik/11727339/#images>, zuletzt eingesehen am 14.10.2023

- [Hei23b] Holland, Martin: Amazon Prime Air: Drohnen beliefern in Pilotprogramm weniger als 10 Haushalte, 2023, heise online, <https://www.heise.de/news/Amazon-Prime-Air-Drohnen-beliefern-in-Pilotprogramm-weniger-als-10-Haushalte-7482917.html>, zuletzt eingesehen am 14.10.2023
- [Heu23] schriftliches Angebot Firma Wilh. Heunert GmbH & Co. KG, Soest, 03.07.2023
- [HH18] Henn, Enno; Höller, Tobias: Erprobung eines Seilbahn-Prototypen, Projektarbeit am Fachgebiet Maschinenelemente, TU Dortmund 2018 (unveröffentlicht)
- [Höl20] Höller, Tobias: Auslegung und Schlupfermittlung einer selbstfahrenden Seilbahn, Bachelorarbeit am Fachgebiet Maschinenelemente, TU Dortmund 2020 (unveröffentlicht)
- [Hon90] Hons, Josef: Bergbahnen der Welt - Zahnradbahnen, Schienen – und Standseilbahnen, Schwebbahnen und Skilifts, 1. Auflage, Berlin, transpress Verlagsgesellschaft mbH 1990
- [HPK20] Hecht, Markus; Polach, Oldrich; Kleemann, Ulrich: „Schienenfahrzeuge,“ in Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 3: Maschinen und Systeme, 26. Aufl., Beate Bender und Dietmar Göhlich Hrsg., Berlin, Springer Vieweg 2020
- [HSD18] ten Hompel, Michael; Schmidt, Thorsten; Dregger, Johannes: Materialflusssysteme, Förder- und Lagertechnik, 4. Auflage, Berlin, Springer-Verlag 2018 (VDI-Buch)
- [HW19] Hüdepohl, Nick; Wohler, Benjamin: Konzeption eines automatischen Akku-Wechselmechanismus, Projektarbeit am Fachgebiet Maschinenelemente, TU Dortmund 2019 (unveröffentlicht)
- [Isi23] isin+co Planungs- und Projektentwicklungsunternehmen: <https://isin.de/gewerbe-industrie-produktion/produktionshalle-mit-verwaltung-aalen>, zuletzt eingesehen am 15.10.2023
- [Kan23] Kanirope GmbH: <https://www.kanirope.de>, zuletzt eingesehen am 15.10.2023
- [Kni18] Knipschild, Lars: Systematische Entwicklung einer Weiche für eine Einschienen-Hängebahn, Masterarbeit am Fachgebiet Maschinenelemente, TU Dortmund 2018 (unveröffentlicht)
- [Koe23] Drahtspleißerei Köppen GmbH: <https://www.seil-koepfen.de/din-seile.html>, zuletzt eingesehen am 15.10.2023
- [Kon23] Konrad Forsttechnik GmbH: <https://www.forsttechnik.at/de/downloads>, zuletzt eingesehen am 14.10.2023

- [KSW21] Kammerer, Simon; Schmied, Alexander; Wenzlok, Paul: Kostenkalkulation des Demonstrators für ein „Ultraleichtes Elektrohängebahn“-System im Zuge des IGF Vorhabens „Untersuchungen der Umsetzbarkeit in Bezug auf Flexibilität, Anpassungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit von ultraleichten Hängebahnen“, Projektarbeit am Fachgebiet Maschinenelemente, TU Dortmund 2021 (unveröffentlicht)
- [Lar23a] Lartigue Monorail: <https://www.lartiguemonorail.com/>, zuletzt eingesehen am 16.10.2023
- [Lar23b] Lartigue-Einschienenbahn: [https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Lartigue\\_Monorail?uselang=de#/media/File:Lartigue\\_Lokomotive.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Lartigue_Monorail?uselang=de#/media/File:Lartigue_Lokomotive.png), zuletzt eingesehen am 16.10.2023
- [Lei24] LEITNER AG: <https://www.leitner.com/unternehmen/wissenswertes/arten-von-seilbahnen>, zuletzt eingesehen am 18.07.2024
- [Mag22] Magal Solutions: <https://magalsecurity.com/solutions/unmanned-surveillance>, zuletzt eingesehen am 08.02.2022
- [Mar14] Martin, Heinrich: Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik, 9. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg 2014
- [Mon23] The Monorail Society: <https://www.monorails.org>, zuletzt eingesehen am 15.10.2023
- [Nan23] Nanotec Electronic GmbH & Co. KG: <https://de.nanotec.com/produkte/2265-brushless-dc-motors-rpm-w-watt>, zuletzt eingesehen am 15.10.2023
- [NKB17] Noche, Bernd; Koc, Emre; Belsky, Marina; Belsky, Dennis: Entwicklung der Steuerungskonzepte für uEHB, Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben am Lehrstuhl Transportsysteme und-logistik, Universität Duisburg-Essen 2017 (unveröffentlicht)
- [Ocs23] OCS Overhead Conveyor System GmbH: <https://ocssysteme.de/conveyors/haengefoerderer/ocs-150/>, zuletzt eingesehen am 15.10.2023
- [Ott23] Ottobahn GmbH: <https://ottobahn.de/>, zuletzt eingesehen am 15.10.2023
- [Pal23a] Palmer, Henry Robinson: Description of a Railway on a New Principle..., Printed for J. Taylor, London, 1823, gefunden über google books, zuletzt eingesehen am 15.10.2023
- [Pal23b] Palmers Einschienenbahn: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Palmers-Schienenweg.JPG>, zuletzt eingesehen am 16.10.2023
- [Pau02] Paus, Hans J.: Physik in Experimenten und Beispielen, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München 2002

- [Pop15] Popov, Valentin L.: Kontaktmechanik und Reibung, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 2015
- [Rei23] Rheinische Industriekultur e.V.: <https://www.rheinische-industriekultur.com/seiten/objekte/orte/wuppertal/objekte/schwebebahn.html>, zuletzt eingesehen am 15.10.2023
- [Rey76] Reynolds, Osborne: „VI. On rolling-friction“, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 166, S. 155–174, Jan. 1876, DOI: 10.1098/rstl.1876.0006
- [Ric19] Richert, Stefan: uEHB-Projekt, Seilbahn-App am Fachgebiet Maschinenelemente, TU Dortmund 2019 (unveröffentlicht)
- [Rof23] ROFA INDUSTRIAL AUTOMATION AG: <https://www.rofa-group.com/hanengefoerdertechnik/elektrohaengebahnen/>, zuletzt eingesehen am 15.10.2023
- [Sko18] Skolaut, Werner: Maschinenbau – Ein Lehrbuch für das ganze Bachelor-Studium, 2. Auflage, Springer Vieweg Wiesbaden 2018
- [SM20] Schindler, V.; Müller, S.: Kraftfahrzeugtechnik in Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 3: Maschinen und Systeme, 26. Aufl., B. Bender und D. Göhlich, Hrsg. Berlin: Springer Vieweg 2020
- [Söh20] Söhngen, Robin: Erprobung und Bewertung von unterschiedlichen Fahrbahnen und Antriebsrollen für ein Elektrohängebahnsystem, Bachelorarbeit am Fachgebiet Maschinenelemente, TU Dortmund 2020 (unveröffentlicht)
- [Spu16] Spura, Christian: Technische Mechanik 1. Stereostatik, Springer Vieweg Wiesbaden 2016
- [Tem18] Temiz, Tarik: Recherche zum Stand der Technik von Einschienen-Hängebahnen kleiner Baugröße, Bachelorarbeit am Fachgebiet Maschinenelemente, TU Dortmund 2018 (unveröffentlicht)
- [Thy19] thyssenkrupp Steel Europe AG: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/newsroom/pressemitteilungen/erfolgreicher-demonstrationsflug-der-autonomen-transportdrohne.html>, zuletzt eingesehen am 15.10.2023
- [VDI3643] VDI 3643 - Elektro-Hängebahn, Obenläufer, Traglastbereich 500 kg, Anforderungsprofil an ein kompatibles System. Herausgeber: VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik; Erscheinungsdatum: 1998-11
- [VDI4441] VDI 4441 - Hängefördertechnik, Elektrohängebahnen (EHB), Eigenschaften und Anwendungsgebiete. Herausgeber: VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik; Erscheinungsdatum: 2012-09
- [WBB+19] Wißuwa, Manuel; Belsky, Marina; Belsky, Dennis; Künne, Bernd; Noche, Bernd: Abschlussbericht des Forschungsprojekts uEHB - Untersuchungen der Umsetzbarkeit in Bezug auf Flexibilität, Anpassungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit von ultraleichten Hängebahnen, 2019

- [Wes21] Westerheide, Carla: Lieferdrohnen sind klare Grenzen gesetzt, DVZ – Deutsch Verkehrs-Zeitung, 2021, <https://www.dvz.de/unternehmen/detail/news/lieferdrohnen-sind-klare-grenzen-gesetzt.html>, zuletzt eingesehen am 17.10.2023
- [WH18] Wen, Shizhu; Huang, Ping: Principles of tribology, 2. Aufl. Hoboken, USA, John Wiley & Sons Inc. 2018
- [Wik13] Elektrohängebahn (EHB) Eisenmann: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elektroh%C3%A4ngebahn\\_\(EHB\),\\_Eisenmann\\_AG.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elektroh%C3%A4ngebahn_(EHB),_Eisenmann_AG.JPG), zuletzt eingesehen am 14.10.2023
- [Woh20] Wohler, Elena: Optimierung der Seilspannvorrichtung für ein ultraleichtes Elektrohängebahnsystem, Bachelorarbeit am Fachgebiet Maschinenelemente, TU Dortmund 2020 (unveröffentlicht)
- [Wsw23] WSW mobil GmbH: <https://Schwebebahn.de>, zuletzt eingesehen am 15.10.2023
- [Wys23] Wyssen Seilbahnen AG: [https://www.wyssenseilbahnen.com/plantagen\\_seilbahn\\_kleinseilbahn/die-einseilbahn-fuer-zu-heimwesen](https://www.wyssenseilbahnen.com/plantagen_seilbahn_kleinseilbahn/die-einseilbahn-fuer-zu-heimwesen), zuletzt eingesehen am 14.10.2023

## Anhang

### Zu Kapitel 4.1 Fahrbahn, statisch, oval

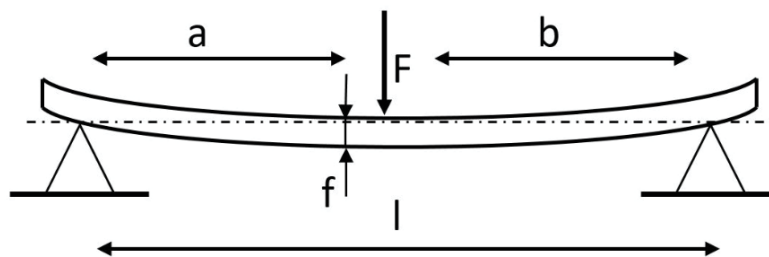
#### Zu Bild 4.3: Berechnung der Durchbiegung der Schiene

Die Durchbiegung der Schiene lässt sich auch näherungsweise rechnerisch ermitteln. Dabei soll die Schiene zur Vereinfachung als statisch bestimmt gelagerter Balken mit einem idealen Rechteckrohr aus Stahl und als gleichmäßige Flächenlast aufgefasst werden. Weiterhin wird für ein Worst-Case-Szenario die Laufkatze mit ihrer Nutzlast als Punktlast in der Mitte der Schiene angenommen.

Für den Biegebelastungsfall eines Trägers auf zwei Stützen mit Einzellast gilt folgende Formel mit der dazugehörigen **Abbildung A4.1**.

$$f = \frac{F \cdot a^2 \cdot b^2}{3 \cdot E \cdot I \cdot l} \quad (\text{A1})$$

$f$  – Durchbiegung [mm],  $F$  – Kraft [N],  $a$  – Abstand [mm],  $b$  – Abstand [mm],  $E$  – E-Modul [N/mm<sup>2</sup>],  $I$  – Flächenträgheitsmoment [mm<sup>4</sup>],  $l$  – Länge [mm]



**Abbildung A4.1:** Durchbiegung der Schiene

Das nötige Flächenträgheitsmoment berechnet sich nach der folgenden Formel:

$$I_x = \frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^3}{12} \quad (\text{A2})$$

$I_x$  - Flächenträgheitsmoment [mm<sup>4</sup>],  $B$  – Breite Rechteckrohr [mm],  $H$  – Höhe Rechteckrohr [mm],  
 $b$  – innere Breite Rechteckrohr [mm],  
 $h$  – innere Höhe Rechteckrohr [mm]

Für das verwendete Rechteckrohr mit den Abmessungen 80 x 20 x 2 mm ergibt sich ein Flächenträgheitsmoment von:

$$I_x = \frac{20 \text{ mm} \cdot (80 \text{ mm})^3 - 16 \text{ mm} \cdot (76 \text{ mm})^3}{12} = 268.032 \text{ mm}^4 \quad (\text{A3})$$

Für das 6 Meter Rechteckrohr aus Stahl ergibt sich demnach gemäß Formel A1 nachstehende Durchbiegung. Das Gewicht der Laufkatze ist mit 20 kg angenommen und die maximale Transportmasse ebenfalls mit 20 kg, dies entspricht einer Gewichtskraft von 392,4 N.

$$f = \frac{392,4 \text{ N} \cdot (3.000 \text{ mm})^2 \cdot (3.000 \text{ mm})^2}{3 \cdot 210.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 268.032 \text{ mm}^4 \cdot 6.000 \text{ mm}} = 31,37 \text{ mm} \quad (\text{A4})$$

Für den Biegebelastungsfall „Ein Träger auf zwei Stützen mit einer Streckenlast“ gilt folgende Formel A5 für die Durchbiegung:

$$f = \frac{5 \cdot F \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I} \quad (\text{A5})$$

$f$  – Durchbiegung [mm],  $F$  – resultierende Kraft der Streckenlast [N],  $l$  – Länge [mm],  $E$  – E-Modul [N/mm<sup>2</sup>],  $I$  – Flächenträgheitsmoment [mm<sup>4</sup>]

Werden die Werte für das 6 Meter Rechteckrohr in die Formel A5 eingesetzt, folgt für eine Streckenlast von 177,43 N (18,09 kg Gewicht 6 Meter Rechteckrohr multipliziert mit der Erdbeschleunigung 9,81 m/s<sup>2</sup>) die folgende Durchbiegung:

$$f = \frac{5 \cdot 177,43 \text{ N} \cdot (6.000 \text{ mm})^3}{384 \cdot 210.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 268.032 \text{ mm}^4} = 8,87 \text{ mm} \quad (\text{A6})$$

Die Berechnung für das 12 Meter Stahlprofil erfolgt analog. Diese Werte sind noch einmal mit denen der 6 Meter Schiene in **Tabelle 4.1** in Kapitel 4.1.1 gegenübergestellt.

#### Zu Bild 4.5 und Tabelle 4.2: Berechnung der Seilkräfte

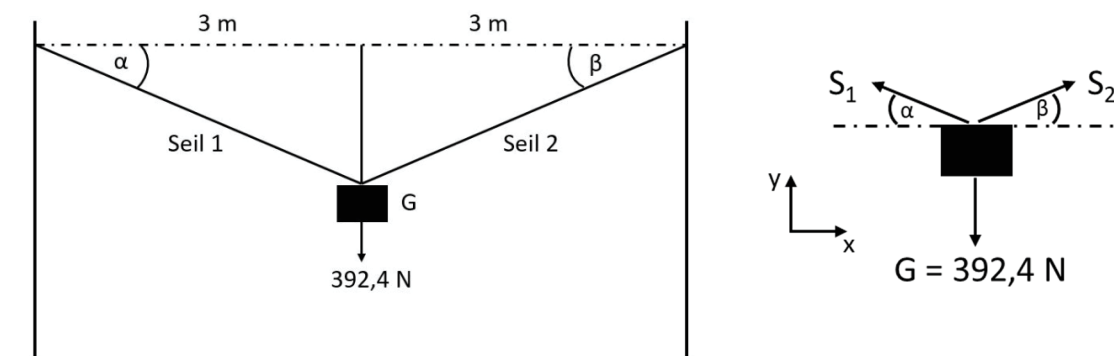


Abbildung A4.2: Kräfte am Seil

$$\rightarrow: -S_1 \cdot \cos \alpha + S_2 \cdot \cos \beta = 0 \quad (\text{A7})$$

$$\uparrow: S_1 \cdot \sin \alpha + S_2 \cdot \sin \beta - G = 0 \quad (\text{A8})$$

$S_1$  – Seilkraft [N],  $S_2$  – Seilkraft [N],  $G$  – Gewichtskraft [N]

Unter Voraussetzung eines Eigengewichts der Hängbahn von 20 kg und einer Nutzlast von ebenfalls 20 kg – diese entspricht einer Gesamtkraft von 392,4 N – ergeben sich die Seilkräfte  $S_1$  und  $S_2$  wie folgt.

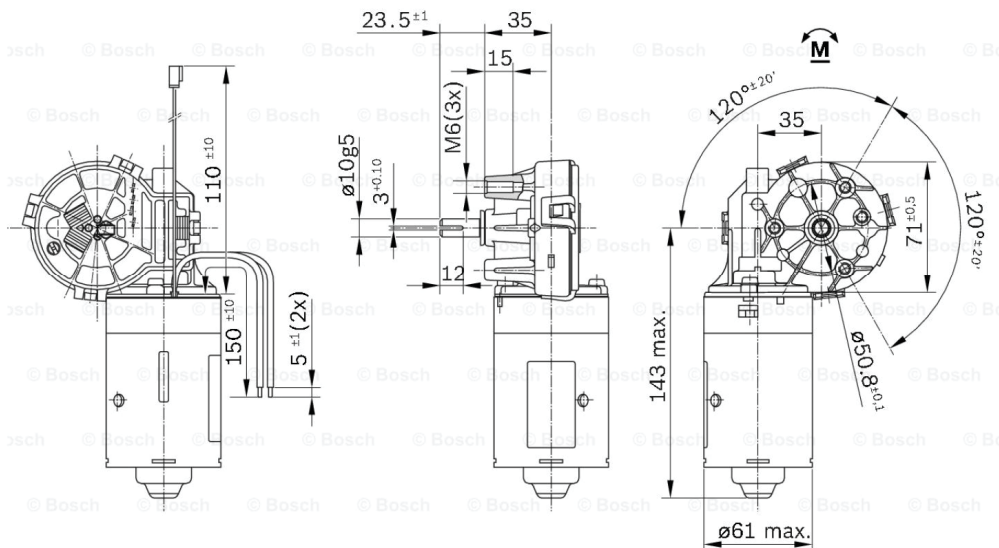
$$S_2 = \frac{G}{\cos \beta \cdot \tan \alpha + \sin \beta} = \frac{392,4 \text{ N}}{\cos \beta \cdot \tan \alpha + \sin \beta}$$

$$S_1 = S_2 \cdot \frac{\cos \beta}{\cos \alpha}$$
(A9)

### Zu Bild 4.18: Technische Daten der Laufkatze

**Tabelle A4.1:** Technische Daten Bosch F006 B20 360 für Laufkatze 3.1

Nennspannung	24 V
Nennleistung	16 W
Nennstrom	2,4 A
Nenndrehzahl	51 1/min
Nenndrehmoment	3 – max. 35 Nm
Untersetzung	63:1
Gewicht	ca. 1,1 kg
Schutzart	IP23



**Abbildung A4.3:** Bosch F006 B20 360 Gleichstrommotor [aus Datenblatt Bosch F006 B20 360]

### Zu Bild 4.22: Technische Daten des Akkus

Die wichtigsten Technischen Daten zum verbauten Akkumulator sind in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet.

**Tabelle A4.2:** Technische Daten Akkumulator - LiPo-Pack

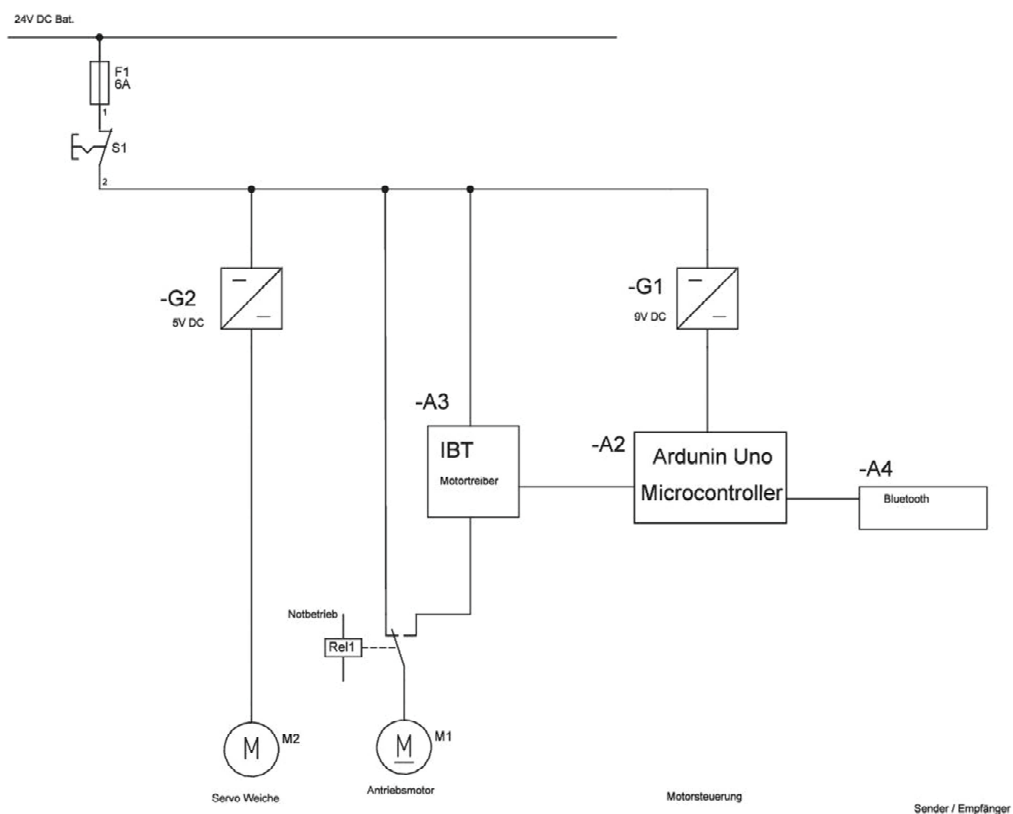
Akkumulator	Ultrahochleistungs-Lithium-Polymer
Energiespeichervermögen	20.000 mAh
Spannung	22,2 V
Zellenanzahl	6
Gewicht	2.405 g
Abmessungen	200 x 90 x 60 mm

## Zu Kapitel 4.2: Elektrische Komponenten der Laufkatze

**Tabelle A4.3:** Elektronische Komponenten Laufkatze-Version 3.1

1)	Motortreiber für Antriebsmotor	Marotronics BTS 7960 (half bridge)
2)	Bluetooth Sender und Empfänger	HC-05 Wireless Bluetooth RF Transceiver Module Serial RS232
3)	Not-Aus-Schalter	
4)	Ein-Aus-Schalter	
5)	Motorsicherung Gleichstrom-Motor	30 A
6)	Motorsicherung Servo-Motor	T 1,6 A
7)	Arduino für die Kommunikation, Bluetooth, Motoransteuerung, Weichenverstellung	Uno R3 MEGA328P ATMEGA16U2 CH340G
8)	Schalter Dauerbetrieb	
9)	Relais für Dauerbetrieb	
10)	DC DC Wandler einstellbar 9 V (22,2 V auf 9 V für Spannungsversorgung Arduino)	Step Up DC-DC Spannungsregler XL6009 Modul
11)	DC DC Wandler 5V (22,2 V auf 5 V für Spannungsversorgung Servo-Motor)	CPT 0240505 25W DC/DC
12)	Joy-it PWM-Servo-Verstellmotor für Weichenverstellung	
13)	Bosch Gleichstrommotor	F 006 B20 360
14)	Akkumulator	Turnigy multistar 20000 mAh 6S 22,2 V Lipo Pack
15)	Diverse Kabel und Stecker	

Die elektrischen Komponenten der Laufkatze-Variante 3.1 sind verschaltet wie im folgenden Schaltplan, **Abbildung A4.4**.



**Abbildung A4.4:** Schaltplan EHB Variante 3.1 [Ric19]

In der nachstehenden **Tabelle A4.4** sind die Komponenten der erweiterten Version 3.2 aufgelistet, neu sind die Positionen 14 bis 17.

**Tabelle A4.4:** Elektronische Komponenten Laufkatze-Version 3.2

1)	Motortreiber für Antriebsmotor	Marotronics BTS 7960 (half bridge)
2)	Bluetooth Sender und Empfänger	HC-05 Wireless Bluetooth RF Transceiver Module Serial RS232
3)	Not-Aus-Schalter	
4)	Ein-Aus-Schalter	
5)	Motorsicherung Gleichstrom-Motor	30 A
6)	Motorsicherung Servo-Motor	T 1,6 A
7)	Arduino für die Kommunikation, Bluetooth, Motoransteuerung, Weichenverstellung	Uno R3 MEGA328P AT-MEGA16U2 CH340G
8)	Schalter Dauerbetrieb	
9)	Relais für Dauerbetrieb	
10)	DC DC Wandler einstellbar 9 V (22,2 V auf 9 V für Spannungsversorgung Arduino)	Step Up DC-DC Spannungsregler XL6009 Modul
11)	DC DC Wandler 5V (22,2 V auf 5 V für Spannungsversorgung Servo-Motor)	CPT 0240505 25W DC/DC
12)	Joy-it PWM-Servo-Verstellmotor für Weichenverstellung	
13)	Akkumulator	Turnigy multistar 20000 mAh 6S 22,2 V Lipo Pack
14)	Bürstenloser DC-Motor	Nanotec DB59M024035-A
15)	Winkelplanetengetriebe	Apex PAIR 042-010
16)	Schrittmotorsteuerung	Nanotec C5-E-2-09
17)	Raspberry Pi zur Kommunikation und Steuerung	Raspberry Pi 3 Modell B+
18)	Diverse Kabel und Stecker	

**Tabelle A4.5:** Technische Daten Nanotec DC-Motor DB59M024035-A für Version 3.2 [Nan23]

<b>Bürstenloser DC-Motor</b>	NEMA 23
Nennspannung	24 V
Nennleistung	135 W
Nennstrom	8 – max. 24 A
Nenndrehzahl	3.500 1/min
Anzugsdrehmoment	0,37 – max. 1,11 Nm
Gewicht	0,65 kg

## Zu Kapitel 4.6: Seilbahn-Versuchsträger

**Tabelle A4.6:** Technische Daten Getriebe APEX Dynamics Germany [Ape23]

<b>Planetengetriebe</b>	<b>PAII / PAIIR 042-010</b>	<b>PAII 042-050</b>
Untersetzung	10:1	50:1
Übersetzungsstufen	1	2
Nom. Ausgangsdrehmoment	10 Nm	15 Nm
Nom. Eingangsdrehzahl	4.500 U/min	4.500 U/min
Max. Eingangsdrehzahl	8.000 U/min	8.000 U/min
Max. Radiallast	810 N	810 N
Max. Axiallast	405 N	405 N
Schmierung	Lebensdauerschmierung	Lebensdauerschmierung
Schutzklasse	IP65	IP65
Wirkungsgrad	> 97 % / > 93 % (PAIIR)	> 94 %
Ausführung	<b>PAIIR - Winkelgetriebe</b> Abtriebswelle mit Passfeder	Abtriebswelle mit Passfeder

**Tabelle A4.7:** Elektronische Komponenten Seilbahn-Versuchsträger

1)	Bluetooth Sender und Empfänger	HC-05 Wireless Bluetooth RF Transceiver Module Serial RS232
2)	Not-Aus-Schalter	
3)	Ein-Aus-Schalter	
4)	Motorsicherung Gleichstrom-Motor	30 A
5)	Nanotec Motor Controller	C5-E-2-09
6)	Arduino für die Kommunikation, Bluetooth, Motoransteuerung	Uno R3 MEGA328P ATMEGA16U2 CH340G
7)	Nanotec DC-Motor	DB59C024035-A
8)	Apex Planetengetriebe	PAII 042-050
9)	Akkumulator	Turnigy multistar 20000 mAh 6S 22,2 V Lipo Pack
10)	Diverse Kabel und Stecker	

## Zu Kapitel 5.5.2: Messwerte Rundkursversuche

**Tabelle A5.1:** Drehzahlverlauf bei 50 % Leistung und 0 kg Nutzlast [nach Söh20]

Drehzahl [1/min]	AKU GmbH	Gummiwaren Clarholz GmbH	GARANT GmbH
Start	25,68	25,78	
	26,54	25,68	
	25,74	25,46	25,55
Übergang zur Kurve	25,45	25,60	25,73
	25,78	25,83	24,66
	26,01	25,78	26,12
	25,87	25,78	26,21
	25,90	25,51	25,41
	26,27	25,50	25,33
Übergang von Kurve	25,32	25,41	25,16
	24,88	25,41	25,02
	25,34	25,03	25,23
	24,97	24,98	25,36
	25,05	25,53	25,16
	25,06	25,46	24,98
Übergang zum Seil	24,96	25,23	24,89
	25,24	24,94	25,70
	25,85	25,97	26,34
	25,60	26,33	25,60
	24,93	25,24	24,98
	24,13	24,65	23,89
Übergang vom Seil	24,59	23,58	23,91
	25,80	24,21	25,16
	25,33	25,60	25,40
	24,97	25,70	25,23
	24,44	25,50	24,98
	24,18	25,39	24,55
Übergang Gefälle	25,95	24,98	24,71
	27,50	24,74	26,26
	27,35	26,08	26,42
Übergang Steigung	27,35	27,35	27,14
	24,22	27,43	25,90
	21,99	25,67	22,35
Plateau	23,52	23,12	22,98
	23,14	23,28	23,81
	21,85	23,90	22,56
Ende Steigung	22,80	15,11	22,41
	23,27	11,77	22,81
	24,24	16,69	24,09
	25,78	25,41	25,27
	25,80	25,32	25,30
	25,41	25,60	25,36
	25,31	25,95	25,22
	25,56	25,77	25,10
	25,58	25,52	25,33
	25,28	25,70	25,41
	25,46	25,06	25,34
	25,85	16,93	25,37
	25,96	17,09	25,68
	Ende	26,18	25,32

Tabelle A5.2: Drehzahlverlauf bei 80 % Leistung und 20 kg Nutzlast [nach Söh20]

Drehzahl [1/min]	AKU GmbH	Gummiwaren Clarholz GmbH	GARANT GmbH
Start	41,10	43,07	42,22
	41,27	42,31	41,78
	41,04	42,05	41,35
Übergang zur Kurve	41,21	42,16	40,87
	41,58	43,07	41,10
	42,02	43,23	41,61
	41,64	42,83	41,32
	40,87	41,32	41,29
	40,57	40,40	41,38
Übergang von Kurve	38,68	40,43	41,12
	44,44	40,65	41,32
	45,56	41,10	41,10
	38,78	40,40	40,65
	39,92	40,19	41,12
	40,49	40,87	41,52
Übergang zum Seil	40,35	41,10	40,19
	40,90	40,16	39,55
	42,55	42,31	42,80
	42,80	45,25	44,41
	41,24	42,55	41,29
	37,66	40,19	38,27
Übergang vom Seil	36,70	37,27	36,19
	39,55	38,46	37,85
	40,76	42,55	27,55
	41,29	41,58	27,45
	41,32	41,12	40,65
	39,74	41,58	39,76
Übergang Gefälle	40,65	40,40	42,05
	44,18	41,81	46,08
	45,52	45,21	46,12
Übergang Steigung	45,49	30,74	46,08
	39,09	28,44	38,66
	33,76	35,25	32,77
Plateau	36,32	36,52	35,61
	37,83	38,27	35,78
	34,74	34,25	32,70
Ende Steigung	34,19	33,00	33,24
	36,34	35,78	35,27
	26,95	39,09	38,89
	27,45	39,68	41,10
	41,18	41,58	41,55
	41,84	42,64	42,55
	41,64	41,32	42,08
	41,55	42,05	41,58
	42,02	42,08	42,58
	41,24	41,35	42,49
	41,04	42,31	41,78
	41,70	41,81	42,13
	42,11	41,10	42,25
		42,55	42,31
Ende			

### Zu Kapitel 5.6.3: Messwerte Steigungsversuche am Rechteckrohr

**Tabelle A5.3:** Schlupf am Rechteckrohr Rad AKU mit 80 % Leistung [nach Söh20]

	Umdrehungen	Schlupf [%]	Umdrehungen	Schlupf [%]	Umdrehungen	Schlupf [%]
Steigung [°]	für 0 kg	für 0 kg	für 10 kg	für 10 kg	für 20 kg	für 20 kg
-16,6					5,111	-2,98
-11,3	5,208	-1,06	5,208	-1,06	5,111	-2,98
-8,1	5,208	-1,06	5,181	-1,59	5,208	-1,06
-4,76	5,264	0,02	5,264	0,02	5,208	-1,06
4,76	5,292	0,55	5,306	0,81	5,292	0,55
8,1	5,301	0,71	5,319	1,05	5,278	0,28
11,3	5,361	1,83	5,375	2,08	5,361	1,83
16,6					5,389	2,34

**Tabelle A5.4:** Schlupf am Rechteckrohr Rad AKU mit 50 % Leistung [nach Söh20]

	Umdrehungen	Schlupf [%]	Umdrehungen	Schlupf [%]	Umdrehungen	Schlupf [%]
Steigung [°]	für 0 kg	für 0 kg	für 10 kg	für 10 kg	für 20 kg	für 20 kg
-16,6					5,097	-3,26
-11,3	5,236	-0,52	5,139	-2,42	5,125	-2,70
-8,10	5,236	-0,52	5,153	-2,14	5,278	0,28
-4,76	5,222	-0,79	5,236	-0,52	5,25	-0,25
4,76	5,389	2,34	5,292	0,55	5,292	0,55
8,10	5,301	0,71	5,319	1,05	5,333	1,31
11,3	5,319	1,05	5,361	1,83	5,361	1,83
16,6					5,375	2,08

**Tabelle A5.5:** Schlupf am Rechteckrohr Rad Clarholz mit 80 % Leistung [nach Söh20]

	Umdrehungen	Schlupf [%]	Umdrehungen	Schlupf [%]	Umdrehungen	Schlupf [%]
Steigung [°]	für 0 kg	für 0 kg	für 10 kg	für 10 kg	für 20 kg	für 20 kg
-11,3	5,125	-3,24	5,125	-3,24	5,139	-2,96
-8,10	5,278	-0,25	5,181	-2,12	5,167	-2,40
-4,76	5,236	-1,05	5,236	-1,05	5,264	-0,51
4,76	5,375	1,56	5,347	1,05	5,375	1,56
8,10	5,389	1,82	5,459	3,08	5,458	3,06
11,3	5,417	2,33	5,528	4,29	5,514	4,04

**Tabelle A5.6:** Schlupf am Rechteckrohr Rad Clarholz mit 50 % Leistung [nach Söh20]

	Umdrehungen	Schlupf [%]	Umdrehungen	Schlupf [%]	Umdrehungen	Schlupf [%]
Steigung [°]	für 0 kg	für 0 kg	für 10 kg	für 10 kg	für 20 kg	für 20 kg
-11,3	5,194	-1,87	5,194	-1,87	5,111	-3,52
-8,10	5,167	-2,40	5,194	-1,87	5,098	-3,79
-4,76	5,292	0,02	5,301	0,19	5,278	-0,25
4,76	5,333	0,79	5,333	0,79	5,403	2,07
8,10	5,431	2,58	5,417	2,33	5,597	5,47
11,3	5,403	2,07	5,431	2,58	5,569	4,99

**Tabelle A5.7:** Schlupf am Rechteckrohr Rad GARANT mit 80 % Leistung [nach Söh20]

	<b>Umdrehungen</b>	<b>Schlupf [%]</b>	<b>Umdrehungen</b>	<b>Schlupf [%]</b>	<b>Umdrehungen</b>	<b>Schlupf [%]</b>
<b>Steigung [°]</b>	<b>für 0 kg</b>	<b>für 0 kg</b>	<b>für 10 kg</b>	<b>für 10 kg</b>	<b>für 20 kg</b>	<b>für 20 kg</b>
-11,3	5,25	-0,78	5,208	-1,59	5,125	-3,24
-8,10	5,25	-0,78	5,167	-2,40	5,222	-1,32
-4,76	5,278	-0,25	5,25	-0,78	5,222	-1,32
4,76	5,333	0,79	5,319	0,53	5,312	0,40
8,10	5,361	1,31	5,389	1,82	5,333	0,79
11,3	5,375	1,56	5,403	2,07	5,444	2,81

**Tabelle A5.8:** Schlupf am Rechteckrohr Rad GARANT mit 50 % Leistung [nach Söh20]

	<b>Umdrehungen</b>	<b>Schlupf [%]</b>	<b>Umdrehungen</b>	<b>Schlupf [%]</b>	<b>Umdrehungen</b>	<b>Schlupf [%]</b>
<b>Steigung [°]</b>	<b>für 0 kg</b>	<b>für 0 kg</b>	<b>für 10 kg</b>	<b>für 10 kg</b>	<b>für 20 kg</b>	<b>für 20 kg</b>
-11,3			5,142	-2,90	5,153	-2,68
-8,10	5,194	-1,87	5,167	-2,40	5,194	-1,87
-4,76	5,264	-0,51	5,25	-0,78	5,25	-0,78
4,76	5,347	1,05	5,319	0,53	5,319	0,53
8,10	5,375	1,56	5,375	1,56	5,375	1,56
11,3			5,181	-2,12	5,458	3,06

### Zu Kapitel 5.7.3: Messwerte Steigungsversuche am Flachprofil

**Tabelle A5.9:** Schlupf am Flachprofil Rad AKU mit 50 % Leistung [nach Söh20]

	<b>Umdrehungen</b>	<b>Schlupf [%]</b>
<b>Steigung [°]</b>	<b>für 10 kg</b>	<b>für 10 kg</b>
-11,3	3,944	-2,79
-8,10	4,042	-0,30
-4,76	4,056	0,05
4,76	4,139	2,05
8,10	4,153	2,38
11,3	4,236	4,30

**Tabelle A5.10:** Schlupf am Flachprofil Rad Clarholz mit 50 % Leistung [nach Söh20]

	<b>Umdrehungen</b>	<b>Schlupf [%]</b>
<b>Steigung [°]</b>	<b>für 10 kg</b>	<b>für 10 kg</b>
-11,3	4,000	-2,74
-8,10	4,042	-1,67
-4,76	4,014	-2,38
4,76	4,181	1,71
8,10	4,222	2,66
11,3	4,306	4,56

**Tabelle A5.11:** Schlupf am Flachprofil Rad GARANT mit 50 % Leistung [nach Söh20]

	<b>Umdrehungen</b>	<b>Schlupf [%]</b>
<b>Steigung [°]</b>	<b>für 10 kg</b>	<b>für 10 kg</b>
-11,3	4,167	-2,85
-8,10	4,208	-1,85
-4,76	4,264	-0,51
4,76	4,361	1,73
8,10	4,403	2,66
11,3	4,458	3,86

## Zu Kapitel 5.8.1: Versuchsaufbau Steigungsversuche am waagerechten Seil

### Zu Abbildung 5.23: Ermittlung Seillinie

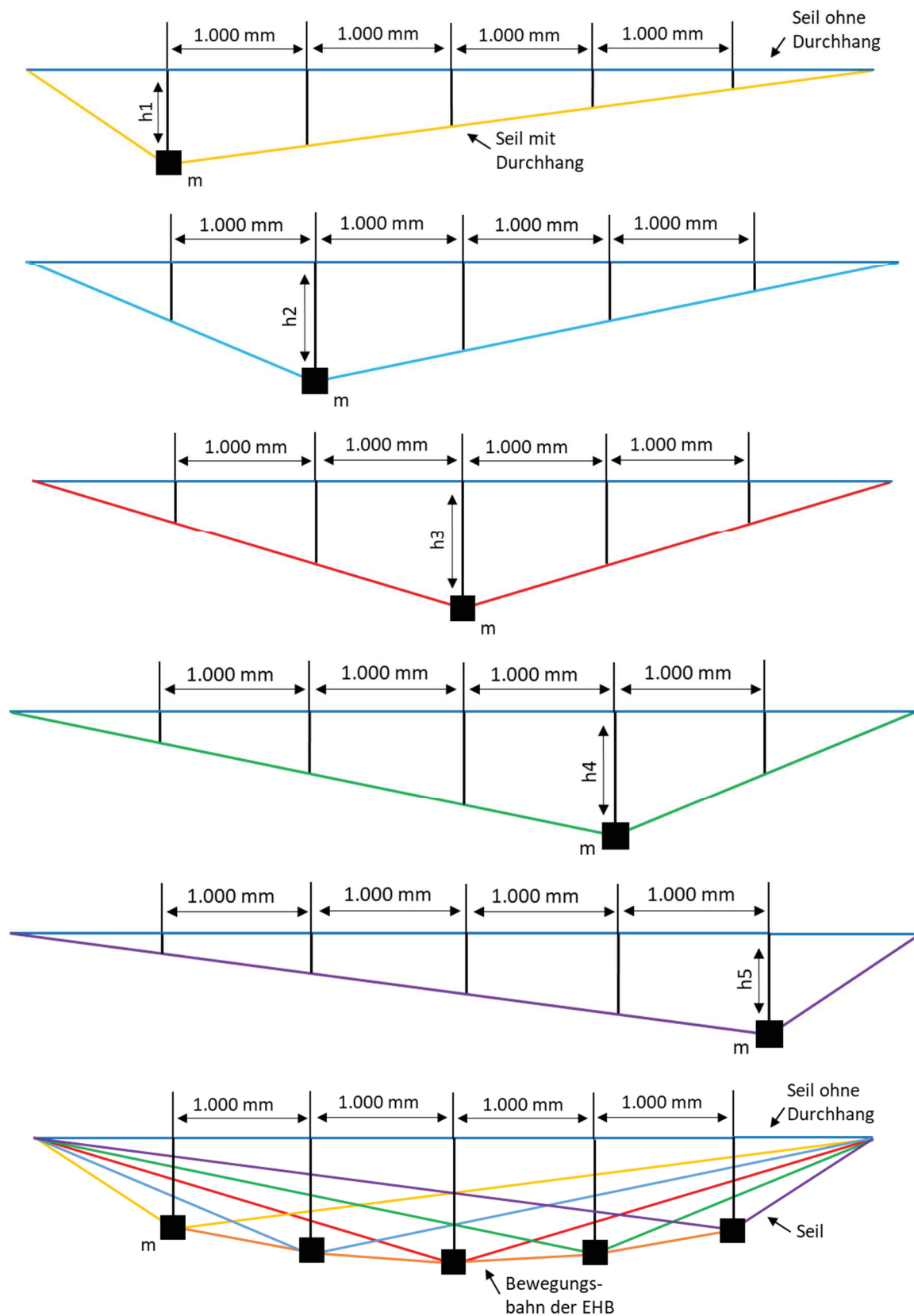


Abbildung A5.1: Herleitung Versuchsaufbau Seilfahrt

### Zu Kapitel 5.8.3: Messwerte Steigungsversuche am waagerechten Seil

**Tabelle A5.12:** Schlupf am Seil Rad AKU für Seilspannung 1 [nach Söh20]

Steigung [°]	50 % Leistung	50 % Leistung	80 % Leistung	80 % Leistung
	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg
-3,15	2,722	0,709	2,722	0,709
-1,00	2,722	0,709	2,750	1,720
1,00	2,778	2,710	2,736	1,217
3,43	2,750	1,720	2,750	1,720

**Tabelle A5.13:** Schlupf am Seil Rad AKU für Seilspannung 2 [nach Söh20]

Steigung [°]	50 % Leistung	50 % Leistung	80 % Leistung	80 % Leistung
	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg
-9,65	2,667	-1,339	2,653	-1,873
-3,15	2,708	0,196	2,667	-1,339
1,89	2,801	3,509	2,681	-0,810
7,80	2,764	2,218	2,792	3,198

**Tabelle A5.14:** Schlupf am Seil Rad AKU für Seilspannung 3 [nach Söh20]

Steigung [°]	50 % Leistung	50 % Leistung	80 % Leistung	80 % Leistung
	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg
-13,77	2,639	-2,414	2,597	-4,070
-4,86	2,667	-1,339	2,681	-0,810
2,29	2,694	-0,323	2,708	0,196
9,37	2,736	1,217	2,736	1,217

**Tabelle A5.15:** Schlupf am Seil Rad Clarholz für Seilspannung 1 [nach Söh20]

Steigung [°]	50 % Leistung	50 % Leistung	80 % Leistung	80 % Leistung
	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg
-3,15	2,750	0,374	2,764	0,878
-1,00	2,778	1,378	2,694	-1,697
1,00	2,778	1,378	2,792	1,872
3,43	2,833	3,292	2,806	2,362

**Tabelle A5.16:** Schlupf am Seil Rad Clarholz für Seilspannung 2 [nach Söh20]

Steigung [°]	50 % Leistung	50 % Leistung	80 % Leistung	80 % Leistung
	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg
-9,65	2,667	-2,727	2,667	-2,727
-3,15	2,722	-0,651	2,694	-1,697
1,89	2,708	-1,172	2,708	-1,172
7,80	2,819	2,812	2,847	3,768

**Tabelle A5.17:** Schlupf am Seil Rad Clarholz für Seilspannung 3 [nach Söh20]

Steigung [°]	50 % Leistung	50 % Leistung	80 % Leistung	80 % Leistung
	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg
-13,77	2,639	-3,817	2,569	-6,646
-4,86	2,681	-2,190	2,694	-1,697
2,29	2,694	-1,697	2,708	-1,172
9,37	2,778	1,378	2,764	0,878

**Tabelle A5.18:** Schlupf am Seil Rad GARANT für Seilspannung 1 [nach Söh20]

Steigung [°]	50 % Leistung	50 % Leistung	80 % Leistung	80 % Leistung
	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg
-3,15	2,875	0,621	2,861	0,135
-1,00	2,875	0,621	2,847	-0,356
1,00	2,875	0,621	2,875	0,621
3,43	2,889	1,103	2,917	2,052

**Tabelle A5.19:** Schlupf am Seil Rad GARANT für Seilspannung 2 [nach Söh20]

Steigung [°]	50 % Leistung	50 % Leistung	80 % Leistung	80 % Leistung
	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg
-9,65	2,806	-1,823	2,792	-2,333
-3,15	2,833	-0,852	2,833	-0,852
1,89	2,833	-0,852	2,847	-0,356
7,80	2,903	1,580	2,903	1,580

**Tabelle A5.20:** Schlupf am Seil Rad GARANT für Seilspannung 3 [nach Söh20]

Steigung [°]	50 % Leistung	50 % Leistung	80 % Leistung	80 % Leistung
	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg	Umdrehungen für 10 kg	Schlupf [%] für 10 kg
-13,77	2,778	-2,849	2,736	-4,428
-4,86	2,819	-1,353	2,847	-0,356
2,29	2,819	-1,353	2,819	-1,353
9,37	2,903	1,580	2,903	1,580

**Tabelle A5.21:** maximale Schlupfwerte Laufrad AKU GmbH bei 10 kg Beladung

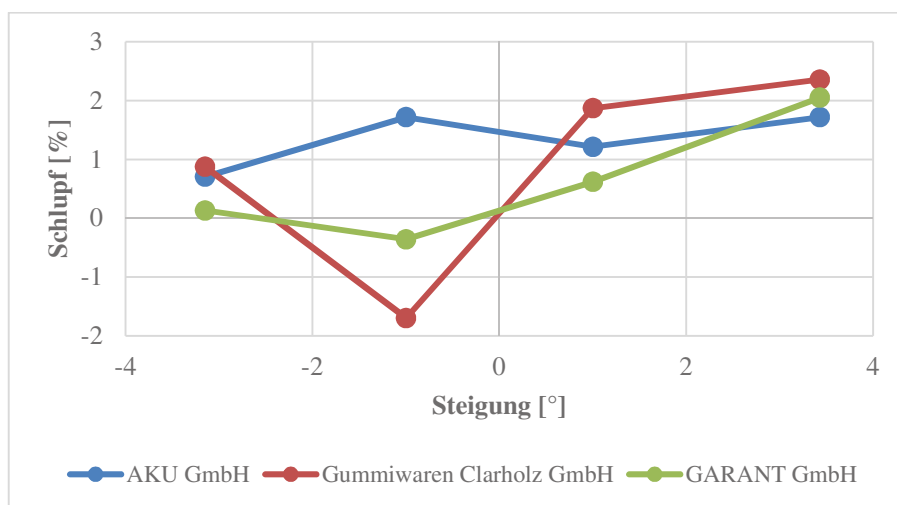
Profil / Seil	Schlupf Bergfahrt		Schlupf Talfahrt	
	50 % Leistung	80 % Leistung	50 % Leistung	80 % Leistung
Rechteckprofil	1,83 %	2,08 %	2,42 %	1,59 %
Flachprofil	4,30 %	---	2,79 %	---
Seil	3,51 %	3,20 %	2,41 %	4,07 %

**Tabelle A5.22:** maximale Schlupfwerte Laufrad G. Clarholz GmbH bei 10 kg Beladung

Profil / Seil	Schlupf Bergfahrt		Schlupf Talfahrt	
	50 % Leistung	80 % Leistung	50 % Leistung	80 % Leistung
Rechteckprofil	2,58 %	4,29 %	1,87 %	3,24 %
Flachprofil	4,56 %	---	2,74 %	---
Seil	3,29 %	3,77 %	3,82 %	6,65 %

**Tabelle A5.23:** maximale Schlupfwerte Laufrad GARANT GmbH bei 10 kg Beladung

Profil / Seil	Schlupf Bergfahrt		Schlupf Talfahrt	
	50 % Leistung	80 % Leistung	50 % Leistung	80 % Leistung
Rechteckprofil	1,56 %	2,07 %	2,90 %	2,40 %
Flachprofil	3,86 %	---	2,85 %	---
Seil	1,58 %	2,05 %	2,85 %	4,43 %

**Abbildung A5.2:** Schlupf am Seil, 80 % Leistung, 10 kg Beladung, Seilspannung 1

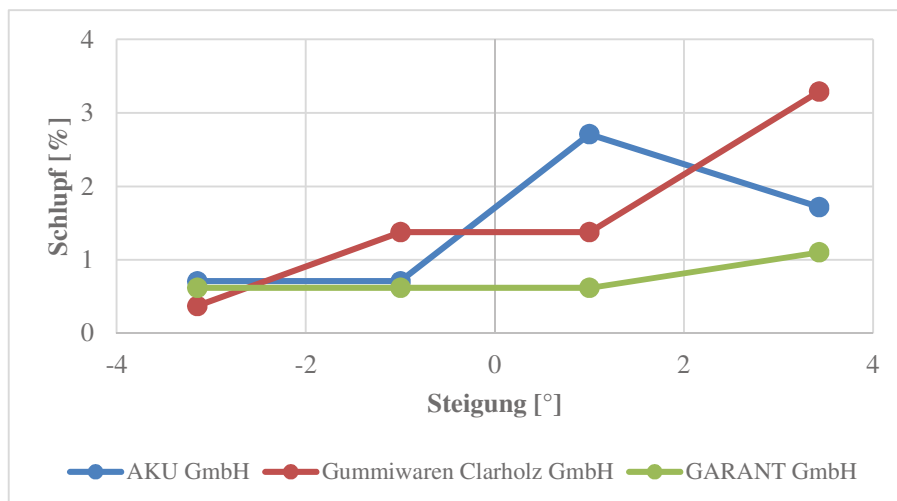


Abbildung A5.3: Schlupf am Seil, 50 % Leistung, 10 kg Beladung, Seilspannung 1

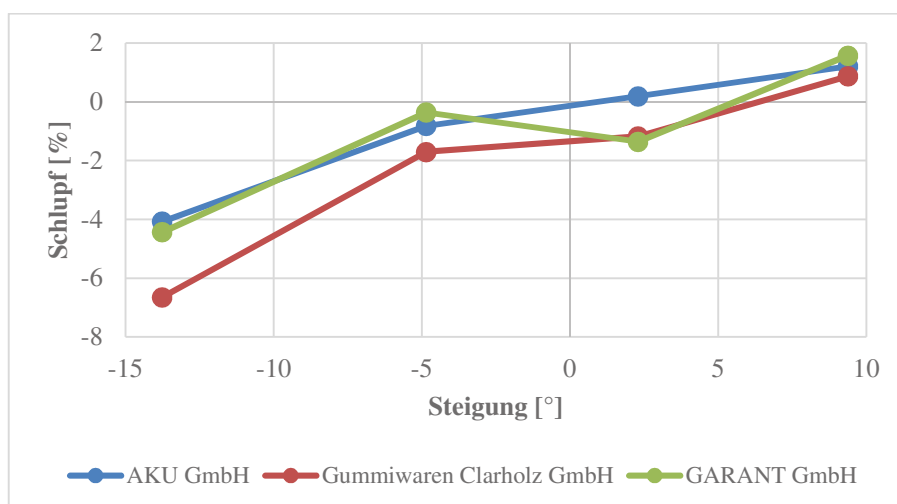


Abbildung A5.4: Schlupf am Seil, 80 % Leistung, 10 kg Beladung, Seilspannung 3

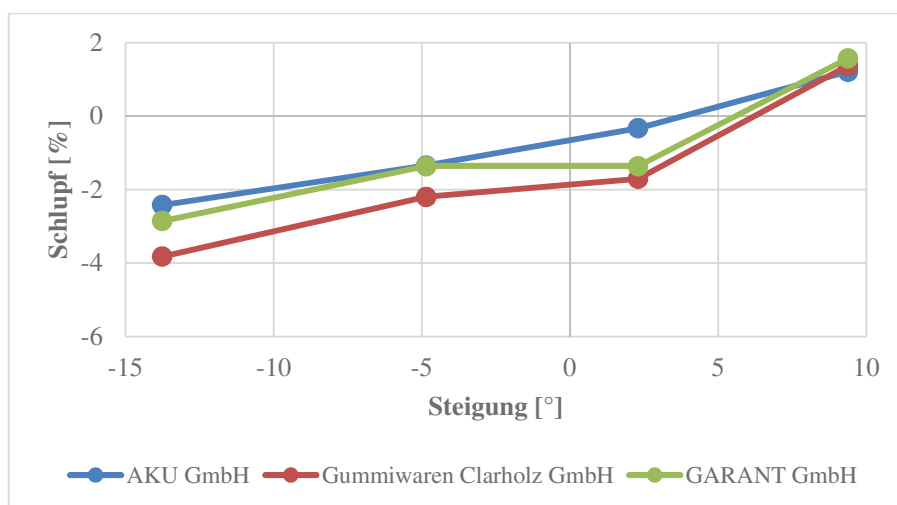


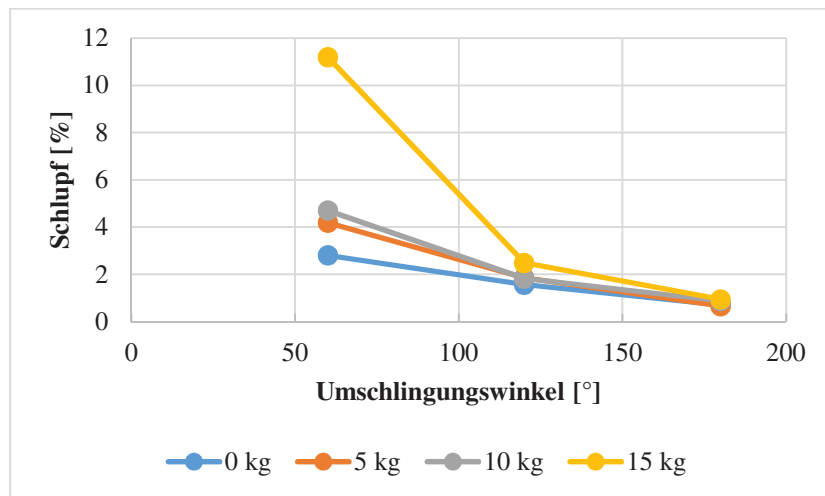
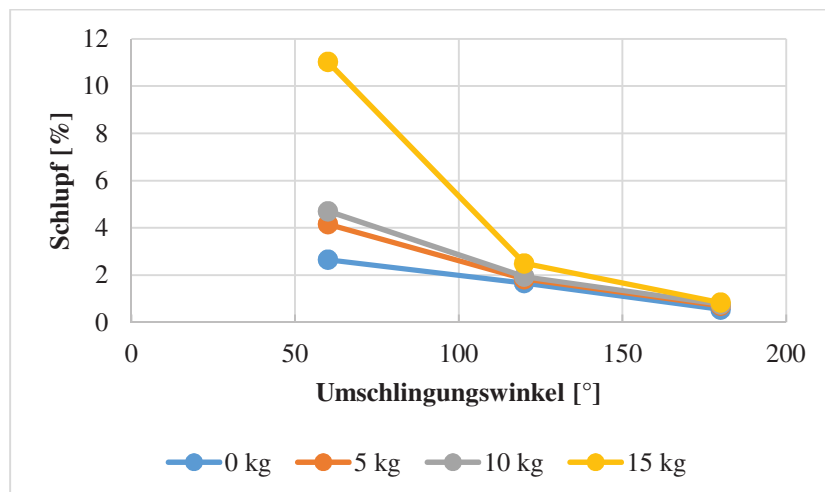
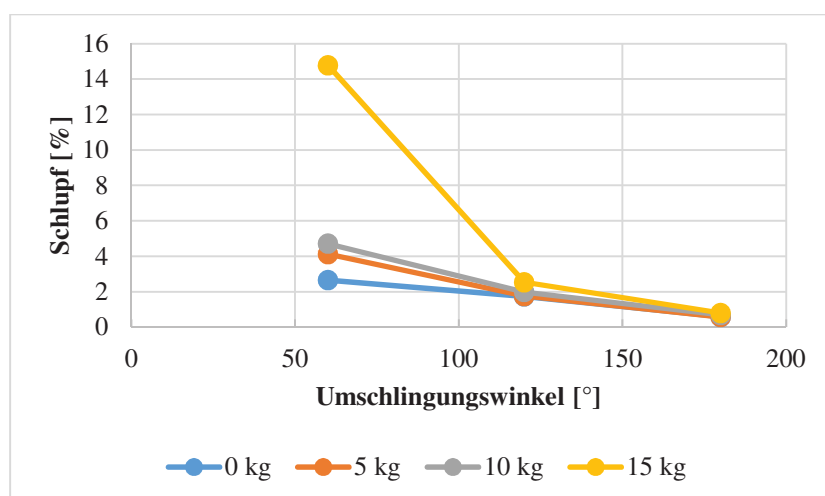
Abbildung A5.5: Schlupf am Seil, 50 % Leistung, 10 kg Beladung, Seilspannung 3

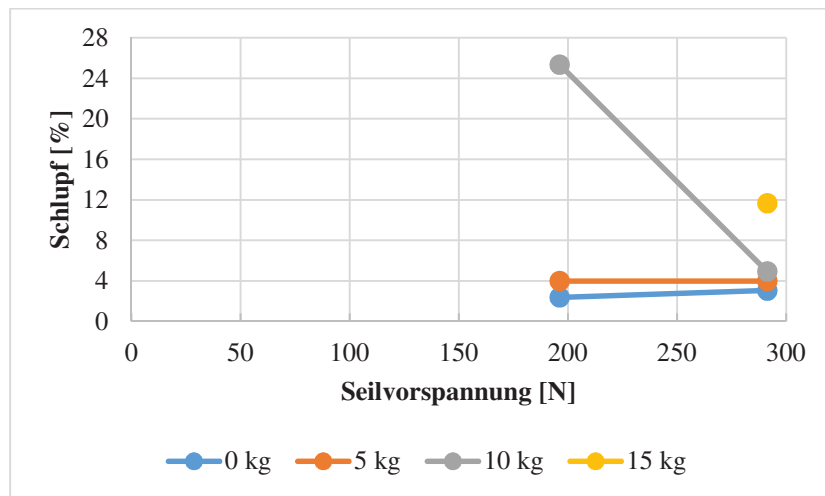
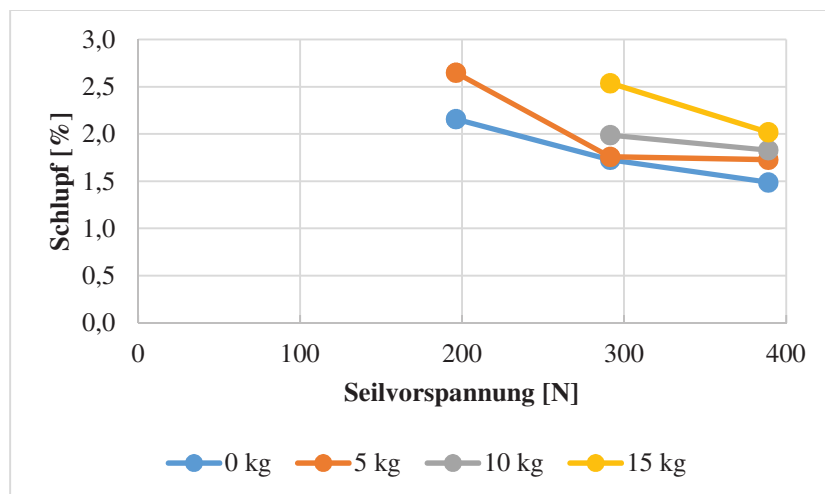
### Zu Kapitel 6.3: Messwerte Reibverhältnisse am senkrechten Seil

**Tabelle A6:** Schlupfermittlung am senkrechten Seil [nach Höl20]

<b>Zusammenfassung der Versuchsergebnisse am senkrechten Seil</b>					
Versuch	Seilvorspannung [N]	Umschlingungswinkel [°]	Zuladung [kg]	Drehzahl [Schritte/sek]	Schlupf [%]
1	196,2	60	0	500	2,37
2	196,2	60	0	1.000	2,81
3	196,2	60	0	1.500	2,66
4	196,2	60	0	2.000	2,65
5	196,2	60	5	500	3,97
6	196,2	60	5	1.000	4,20
7	196,2	60	5	1.500	4,16
8	196,2	60	5	2.000	4,13
9	196,2	60	10	500	25,36
10	196,2	120	0	500	2,34
11	196,2	120	0	1.000	2,20
12	196,2	120	0	1.500	2,17
13	196,2	120	0	2.000	2,16
14	196,2	120	5	500	2,77
15	196,2	120	5	1.000	2,71
16	196,2	120	5	1.500	2,61
17	196,2	120	5	2.000	2,65
18	196,2	120	10	500	16,53
19	291,4	120	0	500	1,64
20	291,4	120	0	1.000	1,57
21	291,4	120	0	1.500	1,67
22	291,4	120	0	2.000	1,73
23	291,4	120	5	500	1,98
24	291,4	120	5	1.000	1,86
25	291,4	120	5	1.500	1,84
26	291,4	120	5	2.000	1,76
27	291,4	120	10	500	1,87
28	291,4	120	10	1.000	1,83
29	291,4	120	10	1.500	1,94
30	291,4	120	10	2.000	1,99
31	291,4	120	15	500	2,64
32	291,4	120	15	1.000	2,49
33	291,4	120	15	1.500	2,5
34	291,4	120	15	2.000	2,54
35	291,4	180	0	500	0,62
36	291,4	180	0	1.000	0,70
37	291,4	180	0	1.500	0,55
38	291,4	180	0	2.000	0,59
39	291,4	180	5	500	0,58
40	291,4	180	5	1.000	0,66
41	291,4	180	5	1.500	0,71
42	291,4	180	5	2.000	0,58
43	291,4	180	10	500	0,91
44	291,4	180	10	1.000	0,88
45	291,4	180	10	1.500	0,77
46	291,4	180	10	2.000	0,70
47	291,4	180	15	500	1,07
48	291,4	180	15	1.000	0,95
49	291,4	180	15	1.500	0,84
50	291,4	180	15	2.000	0,80

<b>Zusammenfassung der Versuchsergebnisse am senkrechten Seil</b>					
Versuch	Seilvorspannung [N]	Umschlingungswinkel [°]	Zuladung [kg]	Drehzahl [Schritte/sek]	Schlupf [%]
51	291,4	60	0	500	3,05
52	291,4	60	0	1.000	2,81
53	291,4	60	0	1.500	2,66
54	291,4	60	0	2.000	2,66
55	291,4	60	5	500	3,97
56	291,4	60	5	1.000	4,19
57	291,4	60	5	1.500	4,16
58	291,4	60	5	2.000	4,13
59	291,4	60	10	500	4,93
60	291,4	60	10	1.000	4,71
61	291,4	60	10	1.500	4,71
62	291,4	60	10	2.000	4,72
63	291,4	60	15	500	11,68
64	291,4	60	15	1.000	11,20
65	291,4	60	15	1.500	11,03
66	291,4	60	15	2.000	14,79
67	389	120	0	500	1,50
68	389	120	0	2.000	1,49
69	389	120	5	500	1,73
70	389	120	5	2.000	1,73
71	389	120	10	500	1,89
72	389	120	10	2.000	1,83
73	389	120	15	500	2,16
74	389	120	15	2.000	2,02
75	389	120	20	500	2,46
76	389	120	20	2.000	2,45

**Zu Kapitel 6.3.2: Einfluss des Umschlingungswinkels auf den Schlupf****Abbildung A6.1:** Einfluss Umschlingungswinkel auf Schlupf, 1.000 Schritte/s und 291,4 N**Abbildung A6.2:** Einfluss Umschlingungswinkel auf Schlupf, 1.500 Schritte/s und 291,4 N**Abbildung A6.3:** Einfluss Umschlingungswinkel auf Schlupf, 2.000 Schritte/s und 291,4 N

**Zu Kapitel 6.3.3: Einfluss der Seilvorspannung auf den Schlupf****Abbildung A6.4:** Einfluss Seilvorspannung auf Schlupf, 500 Schritte/s und 60°**Abbildung A6.5:** Einfluss Seilvorspannung auf Schlupf, 2.000 Schritte/s und 120°

## Zu Kapitel 7 - Ermittlung der Kosten

Die Kosten für das Elektrohängebahn-System werden durch Angebote von verschiedenen Firmen ermittelt, welche ausreichende Erfahrungen in der Fertigung besitzen. Dadurch sind die Preise meistens günstiger als bei Fertigung in Eigenproduktion, auch wenn die einzelnen Kostenbestandteile dadurch nicht erkennbar sind.

### Bauteilkosten - Metallteile

Die Bauteilkosten werden auf Grundlage der Angebote zu den einzelnen Komponenten recherchiert.

### Bauteilkosten - Kunststoffteile

Für die Preisrecherche zur Herstellung von Teilen aus additiver Fertigung werden Angebote von Herstellern genutzt, welche eine Preisermittlung durch ein geeignetes Webportal ermöglichen (Hochladen von 3D-Modellen). Die Herstellung durch das Verfahren Spritzguss lohnt sich erst ab höheren Stückzahlen, wobei die meisten Kunststoffbauteile dazu noch angepasst werden müssten.

### Bauteilkosten - Elektronik

Die Kosten werden ermittelt für die Laufkatzen Variante 3.1. Es wird davon ausgegangen, dass alle Elektronikkomponenten von einem größeren Händler bezogen werden und somit durch das große Auftragsvolumen keine Versandkosten entstehen.

### Bauteilkosten - Sonderfälle

Das Antriebsrad und die Führungsrollen bestehen jeweils aus einem Aluminium-Grundkörper (spangebende Bearbeitung) und der aufvulkanisierten Gummibeschichtung. Das Antriebsrad ist aktuell noch der größte Kostenpunkt. Die Weichensteuerung ist am Demonstrator aus Kunststoff additiv gefertigt. In Zukunft soll der Mechanismus komplett aus Aluminium gefertigt werden für eine höhere Haltbarkeit, was den Mechanismus um ein Vielfaches verteuert. Hier wird mit der Kunststofflösung gerechnet.

### Montagezeiten

Das System wird in Baugruppen unterteilt: Akkuhalterung, Akkugehäuse, Weichensteuerung, Hauptgehäuse und Mechanik, Laufkatze Elektronik, Weiche und Schienensystem. Die Montagezeiten werden ermittelt durch Messungen an der TU Dortmund. Die Baugruppen werden dabei demontiert und für die Montage dokumentiert. Es finden 3 Messungen statt pro Baugruppe, die kürzeste Zeit wird verwendet. Die Montagezeit der Elektronik (Konfektionieren, Ablängen, Konfektionieren, Anklebmen) wird geschätzt. Zu den gemessenen Montagezeiten werden noch störungsbedingte- und persönlichkeitsbedingte Unterbrechungen aufaddiert, um der Realität näher zu sein.

### Lohnkosten

Zum Ermitteln der Lohnkosten werden Werte vom Verband der Metall- und Elektroindustrie Nordrhein-Westfalen e.V. 2020 verwendet. Dabei wird unterschieden zwischen einem höher qualifizierten Elektromonteur (20,47 € Stundenlohn) und einem weniger qualifizierten mechanischen Monteur (16,41 € Stundenlohn), welcher die Bauteile lediglich zusammenbaut.

### Berechnung Kosten pro Werkstück

$$K(x) = \frac{\text{Kaufpreis} + \text{Versandkosten}}{\text{Losgröße } x} + \text{individuelle Versandkosten} \quad (\text{A10})$$

## Berechnung Montagekosten

$$K_{Montage} = Montagezeit \cdot Stundenlohn \quad (A11)$$

**Tabelle A7.1:** Beispiel Montagezeiten Akkuhalterung [nach KSW21]

Bauteil	Arbeitsschritt	Montagezeit [min:s]		
		1. Messung	2. Messung	3. Messung
<b>Akuhalterung</b>	Gehäuse montieren	08:03	05:23	05:18
	Leisten verschrauben	31:25	23:35	24:47
	Kontakte anschrauben	04:50	03:53	04:06
	Bügel + Sensoren montieren	07:53	05:15	04:50
	<b>Gesamtzeit</b>	<b>52:11</b>	<b>38:06</b>	<b>39:01</b>

## Zu Kapitel 7.2: Demonstrationsstrecke

**Tabelle A7.2:** Kostenübersicht Demonstrationsstrecke 1 Serienfertigung (50 Stück) [nach KSW21]

Komponente	Menge	Einzelkosten	Gesamtkosten
Laufkatze	1	1.767,72 €	1.767,72 €
Kurve 45°	2	174,60 €	349,20 €
Weiche	1	888,08 €	888,08 €
Schienelement Gerade (500 mm)	112	3,31 €	370,72 €
Übergangsstück	7	18,80 €	131,60 €
Stütze	14	323,43 €	4.528,02 €
		<b>Summe:</b>	<b>8.035,34 €</b>

**Tabelle A7.3:** Kostenübersicht Demonstrationsstrecke 2 Serienfertigung (50 Stück) [nach KSW21]

Komponente	Menge	Einzelkosten	Gesamtkosten
Laufkatze	3	1.692,41 €	5.077,23 €
Kurve 45°	2	174,60 €	349,20 €
Kurve 90°	4	174,60 €	698,40 €
Weiche	10	888,08 €	8.880,80 €
Schienelement Gerade (500 mm)	962	3,31 €	3.184,22 €
Übergangsstück	42	18,80 €	789,60 €
Stütze	88	323,43 €	28.461,84 €
		<b>Summe:</b>	<b>47.441,29 €</b>

## Stückliste Elektrohängebahn-System

**Tabelle A7.4:** Stückliste EHB-System [nach KSW21]

Bauteil-Nr.	Bauteilbezeichnung	Anzahl	Bemerkung
0	Laufkatze		
0-0	Laufkatze Elektronik	1	
0-0-0	Akku	1	
0-0-0-0	Akku	1	Multistar High Capacity 6S 20000mAh Multi-Rotor Lipo-Pack
0-0-0-1	Akkubalancer	1	Smart Charger SC-608 150W (HBF2104045)
0-0-0-2	Akkusicherung	1	phoenix contact UK5-HESI
0-0-0-6	Stecker + Kabel	12	AMAXX XT190
0-0-1	Sensorik	1	
0-0-1-0	Ultraschallsensoren	2	z.B.: Elegoo 5er HC-SR04
0-0-1-1	UHF-RFID-Leser	1	
0-0-1-2	Reed-Sensor	1	
0-0-1-3	Limit Switch	2	Sicherheitsmaßnahme - entfällt
0-0-1-4	UHF-RFID-Transponder	1	Gehört zu Stationen, nicht zur Laufkatze
0-0-2	Leistungselektronik & Motorsteuerung	1	
0-0-2-0	Tiefsetzsteller Einstellbar 9V	1	
0-0-2-1	Arduino	1	Arduino Uno V3
0-0-2-2	Motortreiber	1	BTS7960 H-Bridge
0-0-2-4	Bluetooth-Shield	1	DC-DC Wandler 24V auf USB
0-0-2-5	Raspberry Pi	1	Raspberry Pi 3 B
0-0-2-6	- Entfällt -		
0-0-2-8	Feinsicherung	1	6,3A; Sockel UK5HSI
0-0-2-9	Not-Aus-Schalter	1	
0-0-2-10	Spannungswandler 5V	1	
0-0-2-11	- Entfällt -	1	
0-0-2-12	Relais	1	
0-0-2-13	Kabelverbindung Steuerung	16	
0-0-3	Motoren	1	
0-0-3-0	Servomotor Weichensteuerung	1	GRABIT SERVO; SIMAC electronics; <a href="http://www.joy-it.net">www.joy-it.net</a>
0-0-3-1	Antriebsmotor	1	Bosch F006 B20 360
0-0-3-2	Kabelverbindung Motoren	13	
0-1	Laufkatze Gehäuse	1	
0-1-0	Akkualterung	1	
0-1-0-0-0	Platte Oben R	1	
0-1-0-0-1	Platte Oben L	1	
0-1-0-1-0	Platte Unten R	1	
0-1-0-1-1	Platte Unten L	1	
0-1-0-2-0	Seitenelement L	1	
0-1-0-2-1	Seitenelement R	1	
0-1-0-3	Aluminium Hauptleiste	1	

0-1-0-4	Seitenblende	2	
0-1-0-5	Aluleiste Längs	4	
0-1-0-6	Halterung Fracht	3	
0-1-0-11	Aluleiste Quer	5	
0-1-0-7	Kupferkontakte	2	
0-1-0-8	Akkuverriegelung	2	
0-1-0-9	Bolzen	2	
0-1-0-10	Feder/Schrauben/Klein- hardware	70	
0-1-0-12	Gehäuse Abstandssensor	2	
0-1-1	Akkugehäuse	1	
0-1-1-0	Akkugehäuse Deckel L	1	
0-1-1-1	Akkugehäuse Deckel R	1	
0-1-1-2	Ladekontakte + Federn	4	
0-1-1-3	Akkugehäuse Basis R	1	
0-1-1-4	Akkugehäuse Basis L	1	
0-1-1-5	Schraube	20	
0-1-1-6	Mutter	12	
0-1-2	Hauptgehäuse	1	
0-1-2-0	Gehäuse Body	1	
0-1-2-1	Gehäuse Deckel	1	
0-1-2-2	Aufhängungsschutzhaube	1	
0-1-3	Weichensteuerungsge- häuse	1	
0-1-3-0	Oberer Kasten	1	
0-1-3-1	Unterer Kasten	1	
0-1-3-2	Deckel	1	
0-1-3-3	Schrauben	12	
0-1-3-4	Muttern	10	
0-2	Laufkatze Mechanik	1	
0-2-0	Aufhängung	1	
0-2-0-0	Lager Antriebsrad	2	16007
0-2-0-1	Lager Führungsrolle	4	6001
0-2-0-2	Antriebsrad	1	
0-2-0-2	Antriebsrad Kunststoff	1	
0-2-0-3	Führungsrollen	2	
0-2-0-4	Adapter Welle/Hauptträd	1	
0-2-0-5	Sicherungsring Hauptträd	1	
0-2-0-8	Blech für Räder	1	
0-2-0-9	Blende Antriebsrad	1	
0-2-0-10	Halterung Antriebsrad	1	
0-2-0-11	Unterlegscheibe Halterung Antriebsrad	1	
0-2-0-12	Halterung Führungsrolle	2	
0-2-0-13	Blende Führungsrolle	4	
0-2-0-14	seitliche Führung Unter- legscheibe	2	

0-2-0-15	seitliche Führung Bolzen/ Schrauben	8	
0-2-0-16	Schutzbügel	1	
0-2-1	Weichensteuerung	1	
0-2-1-0	Welle Weichenhebelarm	1	
0-2-1-1	Weichenhebelarm	1	
0-2-1-2	Lager Weichensteuerung	2	
0-2-1-3	Lager Welle Weichensteuerung	2	
1	Bahnsystem		
1-0	Schienen		
1-0-0	Geraden		
1-0-0-0	Gerade	1	80 x 20 x 2 mm Rechteckrohr aus Stahl
1-0-0-1	Verbindungsstück Gerade - Gerade	1	
1-0-1	Kurven		
1-0-1-0	-Entfällt-		6 x 80 mm Flachstahl
1-0-1-1	Kurve Radius 90°	1	6 x 80 mm Flachstahl
1-0-1-2	Kurve Radius 45°	1	6 x 80 mm Flachstahl
1-0-1-3	Übergangsstück Innen	2	Konstruktion geändert! geschweißt
1-0-1-4	Übergangsstück Außen	2	
1-1-1801-0	Weiche		
1-1-1801-0-0	Kleinteile		
1-1-1801-0-3	Schrauben/Muttern	58	DIN EN 24032 -10
1-1-1801-0-4	Scheibe	16	DIN 125-B -10
1-1-1801-0-6	Scheibe	14	DIN 125-B -6
1-1-1801-0-8	Scheibe	12	DIN 125-B - 8
1-1-1801-0-10	Feder	1	
1-1-1801-1-2	Zwischenstück - Weiche	1	
1-1-1801-1-2-1	Rechteckrohr 800 mm	1	DIN EN 10219-2 - 60 x 60 x 2 - 800
1-1-1801-1-3	Kopf - Weiche	1	
1-1-1801-1-3-1	Rahmen vorne	1	
1-1-1801-1-3-1-1	Rechteckrohr 354 mm	1	DIN EN 10219-2 - 30 x 30 x 3 - 354
1-1-1801-1-3-1-2	Rechteckrohr 470 mm	1	DIN EN 10219-2 - 30 x 30 x 3 - 470
1-1-1801-1-3-1-3	Rechteckrohr 83 mm	1	DIN EN 10219-2 - 30 x 30 x 3 - 83
1-1-1801-1-3-1-4	Rechteckrohr 100 mm	1	DIN EN 10219-2 - 20 x 20 x 2 - 100
1-1-1801-1-3-1-5	Rechteckrohr 53 mm	1	DIN EN 10219-2 - 30 x 30 x 3 - 53
1-1-1801-1-3-2	Träger -Weiche	1	
1-1-1801-1-3-2-1	Rechteckrohr 913 mm	1	DIN EN 10219-2 - 50 x 50 x 4 -913
1-1-1801-1-3-2-2	Rechteckrohr 465 mm	1	DIN EN 10219-2 - 50 x 50 x 4 - 465
1-1-1801-1-3-2-3	Rechteckrohr 242 mm	1	DIN EN 10219-2 - 30 x 30 x 3 - 242
1-1-1801-1-3-2-4	Blech	1	DIN EN 10121 - 50 x 50 x 2
1-1-1801-1-3-3	Rahmen Rechts		
1-1-1801-1-3-3-1	Rechteckrohr 317 mm	1	DIN EN 10219-2 - 30 x 30 x 3 - 317
1-1-1801-1-3-3-2	Rechteckrohr 385 mm	1	DIN EN 10219-2 - 30 x 30 x 3 - 385
1-1-1801-1-3-3-3	Rechteckrohr 69,5 mm	1	DIN EN 10219-2 - 20 x 20 x 2 - 69,5
1-1-1801-1-3-3	Rahmen Links		

1-1-1801-1-3-3-1	Rechteckrohr 316 mm	1	DIN EN 10219-2 – 30 x 30 x 3 - 316
1-1-1801-1-3-3-2	Rechteckrohr 385 mm	1	DIN EN 10219-2 – 30 x 30 x 3 - 385
1-1-1801-1-3-3-3	Blech	1	DIN EN 10131 – 30 x 30 x 2
1-1-1801-1-3-5	Rahmen Links unten	1	
1-1-1801-1-3-5-1	Rechteckrohr 136 mm	1	DIN EN 10219-2 – 20 x 20 x 2 - 136
1-1-1801-1-3-5-2	Rechteckrohr 118 mm	1	DIN EN 10219-2 – 20 x 20 x 2 - 118
1-1-1801-1-3-6	Anschlussplatte	2	
1-1-1801-1-3-7	Platte -Weiche	4	
1-1-1801-2-1	Rampe rechts	1	
1-1-1801-2-2-	Rampe Links	1	
1-1-1801-2-3	Bolzen Feder	1	
1-1-1801-2-4	Halter rechts		
1-1-1801-2-4-1	Platte2 -Weiche	2	
1-1-1801-2-4-2	Blech gebogen R	1	
1-1-1801-2-4-3	Platte 3	2	
1-1-1801-2-4-4	Rechteckrohr 242 mm	1	DIN EN 10219-2 – 20 x 20 x 2 - 242
1-1-1801-2-4-5	Rechteckrohr 57 mm	1	DIN EN 10219-2 – 20 x 20 x 2 - 57
1-1-1801-2-4-6	Rechteckrohr 50 mm	1	DIN EN 10219-2 – 20 x 20 x 2 - 50
1-1-1801-2-5	Halter links		
1-1-1801-2-5-1	Blech gebogen L	1	
1-1-1801-2-5-2	Rechteckrohr 242 mm	1	DIN EN 10219-2 – 20 x 20 x 2 - 242
1-1-1801-2-5-3	Rechteckrohr 64 mm	1	DIN EN 10219-2 – 20 x 20 x 2 - 64
1-1-1801-2-6	Schiene Rechts	1	
1-1-1801-2-7	Schiene Links	1	
1-1-1801-3-1	Weichenzunge links		
1-1-1801-3-1-1	WZ links	1	
1-1-1801-3-1-2	Halterung WZ	4	
1-1-1801-3-1-3	Stift	4	
1-1-1801-3-2	Weichenzunge rechts		
1-1-1801-3-2-1	WZ rechts	1	
1-1-1801-3-3	Startstück		
1-1-1801-3-3-1	Fahrbahn	1	
1-1-1801-3-3-2	Auflage	1	
1-1-1801-3-4	Endstück links		
1-1-1801-3-4-1	Endstück Links	1	Halbzeug: Rechteckrohr 80 x 20 x 3 x 200
1-1-1801-3-4-2	Aufhängung Endstück	4	
1-1-1801-3-4-3	Platte Links	1	
1-1-1801-3-4-4	Gleitlager	4	Norelem 2371 - 01001212
1-1-1801-3-4-5	Senkschraube	12	M6 x 16
1-1-1801-3-5	Endstück Rechts		
1-1-1801-3-5-1	Endstück Rechts	1	Halbzeug: Rechteckrohr 80 x 20 x 3 x 200
1-1-1801-3-5-2	Platte Rechts	1	
1-1-1801-3-6	Anschlussblech	1	
1-2	Stützen		
1-2-0	Stütze Basis		
1-2-0-0	Maschinenfüße	4	

1-2-0-1	Bodenprofil 1	2	
1-2-0-2	Bodenprofil 2	1	
1-2-0-3	Hochkantprofil	1	
1-2-0-4	Flanschplatte	3	
1-2-0-5	Profilverschlussplatte	4	
1-2-0-6	Flanschplatte Fuß	4	
1-2-0-7	Verschraubung Stütze Basis	8	
1-2-1	Stützenaufbau (Gerade)		
1-2-1-0	Querprofil	1	
1-2-1-1	Flanschplatte	1	
1-2-1-2	Flanschplatte oben	1	
1-2-1-3	Profilverschlussplatte	2	
1-2-1-4	Endstück Vollprofil	1	
1-2-1-5	Endstück Platte	1	
1-2-2	Stützenaufbau (Kurve)		
1-2-2-0	Querprofil 1	1	
1-2-2-1	Flanschplatte	1	
1-2-2-2	Flanschplatte oben	1	
1-2-2-3	Profilverschlussplatte	3	
1-2-2-4	Endstück Vollprofil	2	
1-2-2-5	Endstück Platte	2	
1-2-2-6	Querprofil 2	1	
2	Kleinteile		
2-1	Kabel/Konfektionierung	41	
2-2	Schrauben/Kleinhardware	243	