



Alberto Sgrò, BSc.

Matrikelnummer: 11839026

# **Möglichkeiten zur Modellierung von Seilbahnen in MKS-Systemen**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Infrastruktur

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

## **Betreuer**

DI Dr. Wolf-Dieter Jussel

Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft

Graz, September 2021

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen / Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Alberto Sgrò, BSc.

## **Statutory Declaration**

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Alberto Sgrò, BSc.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich Herrn DI Dr. Wolf-Dieter Jussel für die Betreuung und die Unterstützung, um ein Thema, die Seilbahnen, das für mich von großem Interesse ist, entwickeln haben zu können, danken.

Ich möchte mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Veit für die Möglichkeit, mich mit der MKS-Software in dem Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft zu beschäftigen bedanken.

Beim Team des Instituts für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft möchte ich mich für die Geduld und die Verfügbarkeit, auf meine Fragen zu antworten und meine Zweifel zu klären, bedanken.

Außerdem möchte ich meinen Freunden Melissa und Florian für das Korrekturlesen meiner Masterarbeit danken.

Ein großer Dank geht an meine Freunde Stefano, Fabian, Philipp und Peter, an meine Studienkollegen Lukas, Dennis, Matthias, Markus, Thomas, Philipp, sowie an meine alten und derzeitigen Mitbewohner, die diese Erfahrung in Österreich und im Zuge des Masterstudiums angenehm ermöglichten.

Natürlich möchte ich auch allen anderen Freunden, mit denen ich im Lauf meines Lebens Erfahrungen geteilt habe und die eine wichtige Rolle in meinem Weg bis jetzt spielten, Dank sagen.

Zum Schluss, aber nicht weniger wichtig, möchte ich meiner Familie für die große Unterstützung, die sie mir im Zuge dieses Studiums angeboten hat, und für die Möglichkeit, diese ausländische Erfahrung zu erleben, bedanken.

Graz, im September 2021

Alberto Sgrò

## Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Kontrollrechenmodells für eine Pendelbahn, während der Schwerpunkt die Untersuchung ist, ob durch die Anwendung von Mehrkörpersimulationsprogrammen die Erstellung von Kontrollrechenmodellen möglich ist, um eine effiziente Nachweismöglichkeit anzubieten. Das Modell basiert sich auf eine reale Anlage auf dem österreichischen Gebiet; das kontinuierliche Seil wurde in zahlreiche Seilelemente diskretisiert, um zu einer Gelenkkette anzunähern. Das Modell wurde mit einer kommerziellen Software für Mehrkörpersimulation, die alle beteiligten Komponenten berechnen sollte, erstellt und wird mittels einer analytischen Berechnung verglichen und verifiziert.

Nach einer Einleitung über die Seilbahnsysteme, ihre Eigenschaften und einige Komponenten, die rechtlichen Rahmen sowie eine Kurzfassung über die Seilstatik und die Erläuterung der Methoden zur Ermittlung der Daten in der analytischen Berechnung, werden vergangene Dissertationsarbeiten, die sich mit demselben Problem von Modellierung und Simulation von Seilbahnsystemen beschäftigten, erläutert.

Im nächsten Kapitel wird das System Pendelbahn, das dem realen Beispiel entspricht, beschrieben, sowie wird ein Exkurs über einen Seilbahnunfall durchgeführt. Anschließend wird das Seil, das ein kontinuierlicher Körper ist, mit einem angenäherten diskretisierten Modell in Bezug auf das reale Beispiel erstellt, und die Aktion von wirkenden Kräften, wie linienverteilte Beanspruchungen (Eigengewicht) und Einzellasten (Wagengewicht), analysiert.

Die Ergebnisse der Simulation und der analytischen Berechnung werden verglichen, um die Güte des Modells zu überprüfen.

Zum Schluss wird eine Untersuchung über den Zusammenhang Seil-Rollen in der Seilbahn und Analogien und Unterschiede zwischen den Seilbahn- und den Eisenbahnsystemen durchgeführt. Man entwickelte ein auf dem Seil bewegendes einfaches Fahrzeugmodell, um den Seil-Rolle-Kontakt ähnlich in der Eisenbahn zu beschreiben. Außerdem wurde ein vergangener Bericht, der sich mit der Analyse des Kontakts Seil-Rollen beschäftigt hat, erläutert.

## Abstract

The objective of this work is the development of a control calculation model for a cable car; the aim is to understand if the creation of control calculation models is possible using multibody simulation programs, in order to offer an efficient proof of the behaviour of a cable transport system. The model is based on a real cable car in the Austrian territory and the continuous cable is divided in many discrete cable elements: the sequence of these elements is similar to a chain. The model is created with a commercial software for multibody simulation and its results are verified through analytic calculations.

After an overview of the different cable transport systems, their features and components as well as the legal basis, a summary about the Statics of the cable and one of the two methods which are used for the analytic calculations are explained. Furthermore, some past doctoral theses, whose authors analysed similar cable transport modelling and simulation problems, are discussed.

The cable car system, the second method for the verification and the real example are explained in the next chapter and a digression reports a recent cable car accident. Then follow the steps of the creation of the model and the discrete cable (chain). This new cable is stressed by distributed loads (dead load) and concentrated loads (cabin weight) and subsequently analysed.

The results of the simulations and the analytic calculations are compared and discussed, in order to determine the goodness of the model.

To conclude, after the report of a past paper about the contact between cable and roller, a simple model of a cable car cabin is developed, in order to describe the relationships between cable and roller with reference to the railway system, too. A final chapter shows the correlation between the two aforementioned elements as well as similarities and differences between the cable car and the railway systems.

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	II
Kurzfassung .....	III
Abstract.....	IV
Inhaltsverzeichnis .....	V
Abbildungsverzeichnis .....	VIII
Tabellenverzeichnis .....	X
Symbolverzeichnis .....	XI
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Die Seilbahn .....</b>	<b>2</b>
2.1. Definition .....	2
2.2. Rechtlicher Rahmen .....	3
2.3. Einige Komponenten einer Seilbahn .....	4
2.3.1. Das Drahtseil .....	4
2.3.2. Die Stationen.....	6
2.3.3. Die Klemme .....	8
<b>3. Seilstatik .....</b>	<b>10</b>
3.1. Das Seildreieck.....	11
3.2. Näherungslösung der Kettelinie .....	12
3.3. Die Methode der Querkräfte.....	14
3.3.1. Herleitung der Seilgleichung.....	14
3.3.2. Näherungsform der Seilgleichung .....	16
3.3.3. Wirkung einer beliebigen vertikalen Belastung: Herleitung der Seilgleichung mit Hilfe der Methode der Querkräfte .....	16
3.3.4. Seil mit schrägen Sehnen .....	18
3.4. Der Fundamentalsatz der Seilstatik.....	20
<b>4. Vergangene Arbeiten.....</b>	<b>22</b>
4.1. Nußbaumers Dissertation .....	22
4.2. Renezeders Dissertation.....	23

---

4.3. Richters Dissertation .....	24
<b>5. Modellbildung .....</b>	<b>26</b>
5.1. Die Pendelbahn .....	26
5.1.1. Exkurs: Der Unfall der Stresa-Mottarone-Seilbahn .....	28
5.2. Das Modell.....	30
5.2.1. Die Seilelemente .....	30
5.2.2. Die Anwendung.....	33
5.2.3. Ermittlung der Länge der Seilelemente .....	33
5.2.4. Voraussetzungen.....	35
5.2.5. Bemerkte Schwierigkeiten .....	36
5.2.6. Ergebnisse .....	37
5.2.6.1. Fall 1: Das Seil unter dem Eigengewicht .....	38
5.2.6.2. Fall 2 und 3: Das Seil unter der Einzellast .....	40
<b>6. Der Vergleich mit den analytischen Ergebnissen .....</b>	<b>44</b>
6.1. Der Vergleich mit der Methode der Querkräfte .....	44
6.1.1. Die Ermittlung des maximalen Durchhangs.....	44
6.1.2. Die Ermittlung der Seilspannkkräfte .....	48
6.2. Der Vergleich mit dem Fundamentalsatz der Seilstatik .....	49
6.2.1. Die Ermittlung des maximalen Durchhangs.....	49
6.2.1.1. Exkurs: Die Ermittlung des minimalen Bodenabstands .....	51
6.2.2. Die Ermittlung der Seilspannkkräfte .....	53
6.3. Berücksichtigungen .....	55
<b>7. Die Seilbahnrollen und die Seilbahn vs. die Eisenbahn .....</b>	<b>56</b>
7.1. Eine Untersuchung im Bereich Seilbahnrollen .....	56
7.2. Das Fahrzeugmodell .....	59
7.2.1. Kontaktkräfte im spurgeführten Verkehr .....	59
7.2.1.1. Berechnung der Rad-Schiene Kräfte im Eisenbahnwesen.....	59
7.2.1.2. Berechnung der Rad-Schiene Kräfte bei Seilbahnlaufwerken.....	61

---

7.2.2. Einfaches Fahrzeugmodell .....	61
7.2.2.1. Körper .....	61
7.2.2.2. Kraftelemente .....	62
7.2.2.3. Geschwindigkeitsprofil.....	62
7.2.2.4. Fahrweg.....	63
7.2.2.5. Rad-Rolle Profile.....	63
7.2.2.6. Modellübersicht.....	64
7.2.2.7. Resultate .....	65
7.3. Das Verhältnis Seil-Rolle in der Seilbahn und Ähnlichkeiten und Unterschiede mit der Eisenbahn .....	66
7.4. Zusammenfassender Vergleich .....	69
<b>8. Zusammenfassung.....</b>	<b>71</b>
<b>9. Künftige Anwendungen .....</b>	<b>73</b>
<b>10. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>74</b>
<b>11. Abbildungsquellen .....</b>	<b>76</b>
<b>12. Anhänge .....</b>	<b>79</b>
12.1. Anhang 1: Der Wert des Integrals $\int_0^l Q^2 dx$ .....	79
12.2. Anhang 2: Dateien im externen Speicher .....	82
12.3. Anhang 3: Die anderen Simulationsdarstellungen .....	83

## Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: PENDELBAHN .....	3
ABBILDUNG 2: STANDSEILBAHN.....	3
ABBILDUNG 3: MATERIALSEILBAHN.....	3
ABBILDUNG 4: SESSELBAHN.....	3
ABBILDUNG 5: BESTANDTEILE EINES SEILES.....	5
ABBILDUNG 6: QUERSCHNITT EINES ZUG-/FÖRDERSEIL (LINKS) UND EINES TRAGSEILS (RECHTS).....	6
ABBILDUNG 7: ANLAGE IM PENDELBETRIEB (LINKS) UND IM UMLAUFBETRIEB (RECHTS).....	7
ABBILDUNG 8: MÖGLICHE ARTEN EINER STANDSEILBAHNSTATION .....	7
ABBILDUNG 9: SCHEMA EINER FIXEN KLEMME (A) UND DARSTELLUNG (B) .....	8
ABBILDUNG 10: KLEMME EINER KUPPELBAREN SEILBAHN .....	9
ABBILDUNG 11: REIFENFÖRDERER .....	9
ABBILDUNG 12: KUPPLUNGSEINRICHTUNG (RECHTS OBEN).....	9
ABBILDUNG 13: SEILSTATIK .....	10
ABBILDUNG 14: GRÖßEN UND WIRKENDE KRÄFTE AUF DEM SEIL .....	11
ABBILDUNG 15: DAS SEILDREIECK.....	12
ABBILDUNG 16: SEIL UNTER DER WIRKUNG DES EIGENGEWICHTS .....	14
ABBILDUNG 17: SEIL UNTER DER WIRKUNG EINER BELIEBIGEN BELASTUNG .....	16
ABBILDUNG 18: GLEICHMÄßIG LINIENVERTEILTE BELASTUNG $Q(x)$ .....	18
ABBILDUNG 19: GLEICHMÄßIG LINIENVERTEILTE BELASTUNG $Q(x)$ .....	18
ABBILDUNG 20: SEILFELD MIT SCHRÄGEN SEHNEN .....	18
ABBILDUNG 21: KRÄFTE IN EINEM SEILFELD.....	20
ABBILDUNG 22: ZWEI ANTRIEBSMÖGLICHKEITEN IN EINER PENDELBAHN .....	26
ABBILDUNG 23: DAS LÄNGSTE SEILFELD.....	27
ABBILDUNG 24: DIE HÖCHSTE STÜTZE .....	27
ABBILDUNG 25: EIN ZUGSEILREITER .....	27
ABBILDUNG 26: SCHEMA EINES PENDELBAHNFahrzeugs .....	28
ABBILDUNG 27: FAHRWEG DER STRESA-MOTTARONE-SEILBAHN.....	29
ABBILDUNG 28: IN ROT OBEN DIE GABEL („FORCHETTONE“); UNTEN DAS TRAGSEIL.....	30
ABBILDUNG 29: SEILELEMENT IN <i>SIMPACK</i> .....	31
ABBILDUNG 30: VERSCHIEBUNG DES KRAFTELEMENTS.....	32
ABBILDUNG 31: BASISMODELL EINER GELENKKETTE .....	32
ABBILDUNG 32: DIE KARRENSEILBAHN (DORNBIRN) .....	33
ABBILDUNG 33: DAS MODELL DES FAHRWEGS (RECHTS OBEN DIE EINZELLAST) .....	36
ABBILDUNG 34: VORGANGSWEISE ZUR ERMITTLUNG DES MAXIMALEN DURCHHANGS IM FALL 1.....	38
ABBILDUNG 35: VORGANGSWEISE ZUR ERMITTLUNG DES MAXIMALEN DURCHHANGS IN DEN FÄLLEN 2 UND 3 .....	40
ABBILDUNG 36: SEILFELDERSTAND IN DEN EG_I- UND EG_II-FÄLLEN .....	41
ABBILDUNG 37: SEILFELDERSTAND IN DEM FM_I-FALL.....	41
ABBILDUNG 38: DETAIL VON DER ABBILDUNG 37 .....	41
ABBILDUNG 39: ERMITTLUNG DER VERSCHOBENEN SEILSEHNE IN BEZUG AUF DAS KRAFTELEMENT .....	45

---

ABBILDUNG 40: MINIMALER BODENABSTAND IM SEILFELD I IM LÄNGENSCHNITT (DETAIL, ÜBERARBEITET) .....	52
ABBILDUNG 41: ERMITTLUNG DES MINIMALEN BODENABSTANDS .....	52
ABBILDUNG 42: EINE SEILBAHNROLLE .....	56
ABBILDUNG 43: DAS MIT FEM DISKRETISIERTES 2D-MODELL MIT RANDBEDINGUNGEN .....	57
ABBILDUNG 44: KONTAKTDRUCKVERTEILUNG ZWISCHEN EINEM SEIL ALS GLATTER ZYLINDER (LINKS) UND EINEM LITZENSEIL (RECHTS).....	58
ABBILDUNG 45: ENTSTEHUNGSMECHANISMEN DER RAD-SCHIENE-KRÄFTE IM EISENBAHNWESEN .....	60
ABBILDUNG 46: AUSZUG AUS DER KALKERS THEORIE .....	60
ABBILDUNG 47: KÖRPER DES FAHRZEUGMODELLS .....	61
ABBILDUNG 48: WIRKENDE KRAFTELEMENTE DES FAHRZEUGMODELL.....	62
ABBILDUNG 49: GESCHWINDIGKEITSPROFIL.....	62
ABBILDUNG 50: VERGLEICH DER PROFILE DES RADES (GRÜN) UND DER ROLLE (BLAU).....	63
ABBILDUNG 51: ÜBERSICHT DES FAHRZEUGMODELLS .....	64
ABBILDUNG 52: ANSICHT DER ROLLEN UND DES SEILS .....	64
ABBILDUNG 53: BEISPIELE FÜR SIMULATIONSERGEBNISSE.....	65
ABBILDUNG 54: HOCHHALTERSTÜTZE (OBEN); NIEDERHALTERSTÜTZE (MITTE); WECHSELLASTSTÜTZE (UNTEN) .....	67
ABBILDUNG 55: HOCHGEZOGENES TRAGSEIL IN EINEM ZWEIFELUMLAUFBAHN .....	68
ABBILDUNG 56: ABT'SCHE AUSWEICHE .....	68
ABBILDUNG 57: SCHLEPPLIFT MIT BOGEN .....	69
ABBILDUNG 58: SEILFELDERSTAND IN DEM 10_I-FALL.....	83
ABBILDUNG 59: SEILFELDERSTAND IN DEM 20_I-FALL.....	83
ABBILDUNG 60: SEILFELDERSTAND IN DEM 39_II-FALL.....	84
ABBILDUNG 61: SEILFELDERSTAND IN DEM 77_II-FALL.....	84

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: GRUNDDATEN DER KARRENSEILBAHN.....	33
TABELLE 2: LÄNGE DES SEILELEMENTS FÜR JEDES SEILFELD.....	34
TABELLE 3: SUBSTRUCTURES DES MODELLS .....	35
TABELLE 4: ABKÜRZUNGEN FÜR DIE ERMITTELTEN FÄLLE .....	37
TABELLE 5: EIN AUSZUG DER ERGEBNISSE (BEZOGEN AUF SEILFELD I) .....	39
TABELLE 6: DAS VERSCHOBENE KRAFTELEMENT ENTSPRECHEND DER STÜTZE IM SEILFELD I .....	39
TABELLE 7: ERMITTLUNG DES MAXIMALEN DURCHHANGS IN DEN ZWEI SEILFELDERN.....	40
TABELLE 8: MAXIMALER DURCHHANG PRO FALL UND SEILFELD .....	42
TABELLE 9: ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE DER MAXIMALEN DURCHHÄNGE JE FALL .....	42
TABELLE 10: DURCHHÄNGE GEMÄß DEM LÄNGENSCHNITT .....	42
TABELLE 11: RECHNERISCHE ABWEICHUNG IN [kN] UND FEHLER IN % DES MAXIMALEN DURCHHANGS (LÄNGENSCHNITT VS. SIMULATION).....	43
TABELLE 12: KONVERGIERENDE FÄLLE ANHAND DES AUFBAUS DES MODELLS.....	43
TABELLE 13: DATEN FÜR DIE ANALYTISCHE ERMITTLUNG .....	46
TABELLE 14: ERGEBNISSE DES MAXIMALEN DURCHHANGS MIT DER ANALYTISCHEN ERMITTLUNG.....	47
TABELLE 15: VERGLEICH ZWISCHEN DEN SIMULATIONSERGEBNISSEN UND DEN ANALYTISCHEN ERGEBNISSEN ...	47
TABELLE 16: RECHNERISCHE ABWEICHUNG IN [kN] UND FEHLER IN % DES MAXIMALEN DURCHHANGS (LÄNGENSCHNITT VS. METHODE DER QUERKRÄFTE) .....	47
TABELLE 17: ERMITTELTE SEILSPANNKRÄFTE MIT DER METHODE DER QUERKRÄFTE .....	48
TABELLE 18: SEILSPANNKRÄFTE GEMÄß DER SEILBAHNTECHNISCHEN BERECHNUNG .....	48
TABELLE 19: RECHNERISCHE ABWEICHUNG IN [kN] UND FEHLER IN % DER SEILSPANNKRÄFTE (SEILBAHNTECHNISCHE BERECHNUNG VS. METHODE DER QUERKRÄFTE) .....	48
TABELLE 20: MAXIMALER DURCHHANG ERMITTELT MIT DEM FUNDAMENTALSATZ DER SEILSTATIK .....	50
TABELLE 21: RECHNERISCHE ABWEICHUNG IN [M] UND %-FEHLER ZWISCHEN DER SEILBAHNTECHNISCHEN BERECHNUNG UND DES FUNDAMENTALSATZES DER SEILSTATIK .....	51
TABELLE 22: RECHNERISCHE ABWEICHUNG IN [M] UND %-FEHLER ZWISCHEN DEN DATEN DER SIMULATION UND DES FUNDAMENTALSATZES DER SEILSTATIK .....	51
TABELLE 23: SEILSPANNKRAFT ERMITTELT MIT DEM FUNDAMENTALSATZ DER SEILSTATIK .....	54
TABELLE 24: RECHNERISCHE ABWEICHUNG IN [kN] UND FEHLER IN % DEN DATEN DER SEILSPANNKRÄFTE .....	54
TABELLE 25: VERGLEICH DER SPURFÜHRUNG ZWISCHEN DER EISEN- UND DER SEILBAHN .....	70

## Symbolverzeichnis

### Anmerkung

Das Kapitel 3, das sich mit der Seilstatik beschäftigt, und weitere folgende Kapitel sind das Ergebnis von unterschiedlichen Literaturquellen, die eigene Symbole verwenden. Deshalb wurden einige Abbildungen und Formeln bearbeitet, um eine fehlerfreie, standardisierte und angenehme Lesbarkeit der Arbeit zu ermöglichen.

Symbol	Beschreibung
<b>Lateinische Buchstaben</b>	
$a$	Seilparameter
$a, b$	Abschnitte der horizontalen Länge $l$ ( $l = a + b$ ); Halbachsen der Berührellipsen nach Hertz (Kapitel 7.2.1.1)
$a', b'$	Abschnitte der schrägen Seilsehne des verschobenen Systems $l'_s$ ( $l'_s = a' + b'$ )
$c$	Beiwerte aus der Elastizitätstheorie
$ds$	infinitesimales Seilelement des Seilabschnittes $s$
$f_m$	Durchhang in Seilfeldmitte
$f_{max}$	Maximaler Durchhang des Seildelds
$f_x$	Durchhang an einem betrachteten Seilort $x$ im Seilfeld
$g$	Schwerkraft
$h$	Senkrechte Höhe zwischen zwei Punkten
$i$	Berücksichtigte Stütze; $i = 0, \dots, n$
$j$	Anzahl der Seilelemente
$l$	Horizontale Länge zwischen zwei Punkten
$l_s$	Schräge Seilsehnenlänge
$\Delta l^*$	Fehler bei Diskretisierung eines kontinuierlichen Körpers
$p$	Linienverteilte Last; entlang dem Seil gleichverteilt
$q$	Linienverteiltes Eigengewicht des Seiles; entlang dem Seil gleichverteilt
$q_{lot}$	Linienverteiltes Eigengewicht des Seiles lotrecht auf der Seilsehne
$q'$	Linienverteiltes Eigengewicht des Seiles

---

$s$	Länge des Seiles im Endzustand
$s'$	Seillänge des Modells
$s_0$	Seillänge
$s'_0$	Abschnitt der Seillänge
$\Delta s$	Elastische Verlängerung des Seiles
$\Delta s_t$	Verlängerung des Seiles infolge der Temperaturänderung
$\Delta t$	Temperaturänderung
$t, u$	Substitutionsvariablen
$x$	Kartesische Koordinate; erste Koordinate des gewählten Systems im Modellraum
$y$	Kartesische Koordinate; dritte Koordinate des gewählten Systems im Modellraum
$z$	Kartesische Koordinate; zweite Koordinate des gewählten Systems im Modellraum
$A$	Metallischer Querschnitt des Seiles
$C$	Konstante(n) infolge der Lösung eines Integrals (Kette- und Parabellinie)
$E$	Elastizitätsmodul
$F_x$	Resultierende der Horizontalkomponenten der Seilspannkraft
$F_y$	Resultierende der Vertikalkomponenten der Seilspannkraft
$H$	Horizontalkomponente der Seilspannkraft
$L$	Länge des Seilelements
$M$	Biegemoment
$M_H$	Moment infolge der horizontalen Lasten
$M_{Res}$	Resultierendes Biegemoment der äußeren Kräfte
$M_S$	Moment infolge der Spannkräfte
$M_V$	Moment infolge der vertikalen Lasten
$P$	Scheitelpunkt
$Q$	Querkraft; Radaufstandskraft (Kapitel 7.2.1.1)
$R$	Auflagerkraft
$S$	Seilspannkraft

---

$S_0$	Grundspannkraft
$S_m$	Seilspannkraft in Seilfeldmitte
$S_x$	Seilspannkraft an einem betrachteten Seilort $x$ im Seilfeld
$T_\xi$	Einzellast an einem betrachteten Seilort $\xi$ im Seilfeld
$V$	Vertikalkomponente der Seilspannkraft
$W$	Einzellast
$W_{lot}$	Einzellast lotrecht auf der Seilsehne
$Y$	Führungskraft
$Ab_{S_{KE}}$	Länge der Verschiebung des Kraftelements (KE)
$Ab_{S_{SE}}$	Abstand des ermittelten Sehnenpunktes von dem Anfang des Seilfelds (SE=Seilelement)
$max M$	maximales Biegemoment

### Griechische Buchstaben

$\alpha_t$	Temperaturausdehnungskoeffizient
$\varepsilon$	Seildehnung
$\varphi$	Tangentenwinkel der Seilkurve
$\gamma$	Neigungswinkel der Seilsehne
$\theta$	Neigungswinkel der Verschiebung des Kraftelements
$\vartheta$	Neigungswinkel zwischen der Seilsehne und $Ab_{S_{SE}}$

## 1. Einleitung

Obwohl die Seilbahn bereits in der Vergangenheit bekannt und meistens für den Materialtransport verwendet wurde, seit der Erfindung des Drahtseils im XIX Jahrhundert erfuhr sie einen ersten Anstieg der Beliebtheit im Personenverkehr. Aber man musste noch auf die Nachkriegszeit warten, in der die Seilbahn dank der technologischen Entwicklung des Sektors und dem Aufstieg des Tourismus vor allem im Bergbereich eines der Symbole des Wintersports wurde.

Wegen ihrer Fähigkeit, steile Gelände und lange Abstände einfach zu überqueren, werden Seilbahnen stark in Skigebieten verwendet, weil sie eine vorteilhafte Transportlösung darstellen.

In den letzten Jahrzehnten konnte die Seilbahn auch auf die steigenden Anforderungen an umweltfreundlichen Verkehrsmitteln und der Suche alternativer Transportlösungen in Großstädten reagieren.

Standseilbahnen sind die ersten entwickelten Anlagen für Personentransport und können große Höhenunterschiede überwinden. In den Siedlungsgebieten werden diese am meisten verwendet (z.B. die Grazer Schloßbergbahn). Dann folgten die Pendelbahnen und die anderen Systeme.

Die Steigerung des Tourismus forderte immer mehr Effizienz, Sicherheit, Förderleistung und Geschwindigkeit ein. Die technische Entwicklung führte dann zu den kuppelbaren Anlagen, die die oben erwähnten Anforderungen wegen der Fähigkeit, die Geschwindigkeit der Anlage konstant zu halten, befriedigten. Heutzutage werden solche Systeme immer größer, schneller und hochkapazitätsfähiger errichtet.

Zur Gewährleistung der Sicherheit und Homogenität in dem Bau und Betrieb sowie zu einer Entwicklung der Planungs- und Steuerungsgeräte wurden standardisierte Vorschriften und Richtlinien auf der europäischen Ebene veröffentlicht.

Obwohl Seilbahnen hoher Sicherheitsanforderungen bedürfen, bedeutet das nicht, dass sie fehlerfrei sind.

Viele Hersteller von Seilbahnen verwenden eigene Softwaretools zur Seilberechnung und -planung, allerdings ist eine Überprüfung wegen der Einzigartigkeit der Berechnungsmethoden und der daraus folgenden Schwierigkeiten von schwieriger Ausführung. Die dynamischen Effekte werden zwar abgebildet, aber die Überprüfbarkeit ist wegen fehlender Modellvalidierung, kaum gegeben.

In dieser Arbeit wird dann untersucht, ob Kontrollrechenmodelle mit den heute verfügbaren Mehrkörpersimulationsprogrammen (MKS) erstellt werden können, um eine effiziente Nachweismöglichkeit anzubieten.

## 2. Die Seilbahn

### 2.1. Definition

Gemäß dem Seilbahngesetz des Jahres 2003 (1) versteht man Seilbahnen als Eisenbahnen, deren Fahrzeuge durch Seile spurgebunden bewegt werden, sowie Schlepplifte.

Sie werden unterteilt in:

1. Standseilbahnen, deren Fahrzeuge durch ein oder mehrere Seile auf einer Fahrbahn gezogen werden, die auf dem Boden aufliegt oder durch feste Bauwerke gestützt ist;
2. Seilschwebbahnen, deren Fahrzeuge von einem oder mehreren Seilen getragen und bewegt werden;
3. Schlepplifte, bei denen die Fahrgäste mit geeigneter Ausrüstung entlang einer vorbereiteten Fahrbahn gezogen werden;
4. Kombilifte: Seilschwebbahnen, die wahlweise als Schlepplifte betrieben werden können.

Die Seilschwebbahnen gliedern sich dann in:

- a. Pendelbahnen, deren Fahrzeuge ohne Wechsel der Fahrbahnseite zwischen den Stationen bewegt werden;
- b. Umlaufbahnen, deren Fahrzeuge auf beiden Fahrbahnseiten umlaufend bewegt werden.

Eine weitere Gliederung der Umlaufbahnen ist wie folgt:

- i. Kabinenbahnen: Umlaufbahnen mit Kabinen;
- ii. Kombibahnen: Umlaufbahnen mit Kabinen und Sesseln;
- iii. Sesselbahnen: Umlaufbahnen, deren Sessel mit dem Seil betrieblich lösbar verbunden sind;
- iv. Sessellifte: Umlaufbahnen, deren Sessel mit dem Seil betrieblich nicht lösbar verbunden sind.

Einige Arten von Seilbahnen, wie bsw. die Materialseilbahnen, die ausschließlich der Materialbeförderung dienen, fallen nicht unter die Bestimmungen des Bundesgesetzes.

Eine Seilbahn muss bestimmte Interessen und Anforderungen befriedigen, weil nicht alle Systeme dazu passen bzw. sie nicht alle gleich sind. Einige Gesichtspunkte, die zu beachten sind, werden im Nachfolgenden erläutert (2).

Ein wichtiger Punkt ist die Wirtschaftlichkeit des Seilbahnsystem, die durch eine Nutzen-Kosten-Analyse, die die gewünschte Förderleistung mit allen anfallenden Kosten (Anlage, Betrieb, Instandhaltung) sowie mit der Nutzungsdauer vergleicht, durchgeführt wird.

Die Wahl des Systems hängt auch von dem Anwendungszweck, von den klimatischen Verhältnissen sowie von den Anlagenverhältnissen ab. Im zweiten Fall, wie z.B. in einem windigen Gebiet, ist es stabiler eine Pendelbahn im Vergleich zu einer Sesselbahn zu

wählen, während im dritten Fall die Geländeverhältnisse und der Geländeverlauf entlang der Trasse oft maßgebend sind.

Weitere Punkten zu berücksichtigen sind der saisonale Betrieb der Anlage, d.h. ob die Seilbahn entweder ausschließlich im Sommer oder im Winter oder während des ganzen Jahres betrieben werden muss, und die Normativen und Vorschriften, die abhängig von dem Staat sind.

Die nächsten Abbildungen zeigen einige Beispiele von Seilbahnen.



Abbildung 1: Pendelbahn



Abbildung 2: Standseilbahn



Abbildung 3: Materialeilbahn



Abbildung 4: Sesselbahn

## 2.2. Rechtlicher Rahmen

Das im Kapitel 2.1 erwähnte Gesetz war die Umsetzung der europäischen Richtlinie 2000/9/EG über Seilbahnen für Personenverkehr (und das ist, warum die Materialeilbahnen nicht berücksichtigt werden). Vor dem Inkrafttreten des Seilbahngesetzes 2003 waren die gesetzlichen Grundlagen der Seilbahnen noch unter dem Eisenbahngesetz 1957.

2018 wurde die EU-Verordnung 2016/424 veröffentlicht und hob die frühere Richtlinie auf. Das österreichische entsprechende Gesetz, das das SeilbG 2003 geändert hat, ist das BGBl I Nr. 79/2018 (3).

Der Hauptgrund solcher neuen Verordnung war laut der Verordnung die Notwendigkeit konforme Regeln für alle Mitgliedstaaten zu schließen. Dank der erhaltenen Erfahrung im Bereich Seilbahnen sowie ihrem Einsatz sollte man technische Harmonisierung gewährleisten.

Eine Konzession ist notwendig für den Bau und den Betrieb einer Seilbahn für die Personenbeförderung mit der Ausnahme von Schleppliften (und Materialseilbahnen, die natürlich kein Personentransportsystem darstellen). Bau und Betrieb sowie die Verpflichtung der Beförderung, d.h. die Gestaltung des Fahrplans und der Betriebszeiten, werden von dem Seilbahnunternehmen übernommen.

Mit der Konzession erwirbt das Seilbahnunternehmen das Recht auf eine gewisse Zeit (zwischen 30 und 50 Jahren) ohne Konkurrenz die Seilbahn auf der Strecke von A nach B bauen und betreiben zu dürfen (2).

In Österreich sind Seilbahnsysteme zwischen dem Bund und den Bundesländern als zuständige Behörden geteilt: Unter den landesspezifischen Kompetenzen befinden sich Schlepplifte, fixgeklemmte Sesselbahnen und Materialseilbahnen; bei kuppelbaren Sesselbahnen werden die Zuständigkeiten zwischen den zwei Behörden geteilt; zum Schluss werden alle anderen Seilbahnsystemen von dem Bund aufgenommen.

Der Bund hat Konzessions- und Baugenehmigungskompetenzen; die Betriebsbewilligungs- und die Aufsichtskompetenz im Betrieb der Seilbahn liegt beim jeweiligen Bundesland bzw. Landeshauptmann (2).

Für jeden Neu- aber auch Umbau einer Seilbahn für Personenverkehr ist eine Baugenehmigung, die anhand eines Bauentwurfes erfolgt, erforderlich. Außerdem ist eine Betriebsbewilligung nötig. Seit Inkrafttreten des SeilbG 2003 ist erstmals in Österreich die Erstellung einer Sicherheitsanalyse erforderlich, in der alle Gefährdungen von der Seilbahn selbst (Absturz, Kollision, Entgleisen usw.) als auch die von außen auf die Seilbahn wirkenden möglichen Gefährdungen (Lawinen, Brand, Erdbeben usw.) sicherheitstechnisch zu betrachten sind (2).

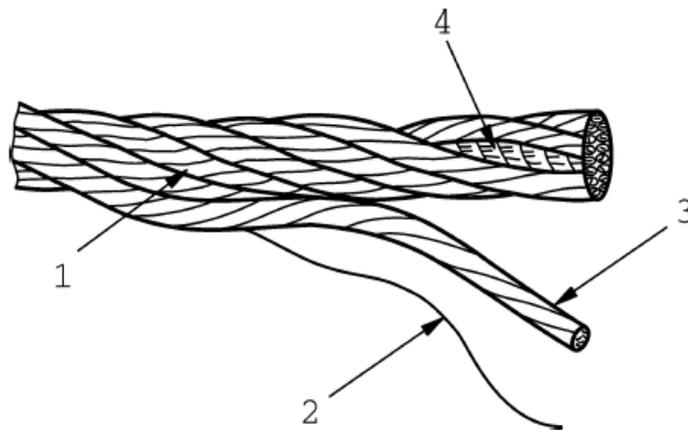
## **2.3. Einige Komponenten einer Seilbahn**

### **2.3.1. Das Drahtseil**

Das Stahldrahtseil ist die wichtigste Komponente einer Seilbahn: Es verbindet die Stationen der Anlage, trägt das Gewicht der Fahrzeuge und deren Bewegung erfolgt durch seinen Zug.

Nicht nur dem oben erwähnten Zug muss das Drahtseil widerstehen, sondern auch weiteren Beanspruchungen wie Biegung, Torsion sowie Verschleiß, Korrosion, Witterung, usw.

Ein Drahtseil besteht aus Drähten, die zu Litzen verseilt werden und aus einer Einlage, um die die Litzen verseilt sind (2).



1. Drahtseil

2. Draht

3. Litze

4. Einlage

Abbildung 5: Bestandteile eines Seiles

Die Seilbahnseile weisen einen Kerndraht und mindestens zwei Drahtlagen auf.

Der Draht ist der grundlegende Bestandteil des Seiles. Die Herstellung erfolgt durch Kaltverformung von Stahl: Diese bewirkt eine Verminderung des Verformungsvermögens und damit eine Versprödung, die zur Verminderung der Bruchdehnung und der Brucheinschnürung des Werkstoffes im Zugversuch dient. Vor dem Ziehen ist eine Wärmebehandlung bei dem Draht erforderlich, um die metallographische Ziehgefüge zu erreichen. Beim Ziehen vergrößert das Gefüge sich und daher versprödet es sich. Die Bruchfestigkeit des fertigen Stahldrahtes beträgt bis zu  $2200 \text{ N/mm}^2$  (für Seilbahnseile) und darüber (2).

Die Drähte können rundförmig sein oder nach beliebigen Querschnitten geformt werden. Solche beliebigen Querschnitte sind im Normalfall als Außenlage über das durch Runddrähte gebildete innere Seil angebracht und haben den Zweck die Oberfläche des Seiles zu formen (2). Ein Beispiel von diesen beliebigen Querschnitten befindet sich in der Abbildung 6: Das Tragseil besteht aus einem kreisförmigen Kerndraht, der von Z-Drähten umschlossen ist.

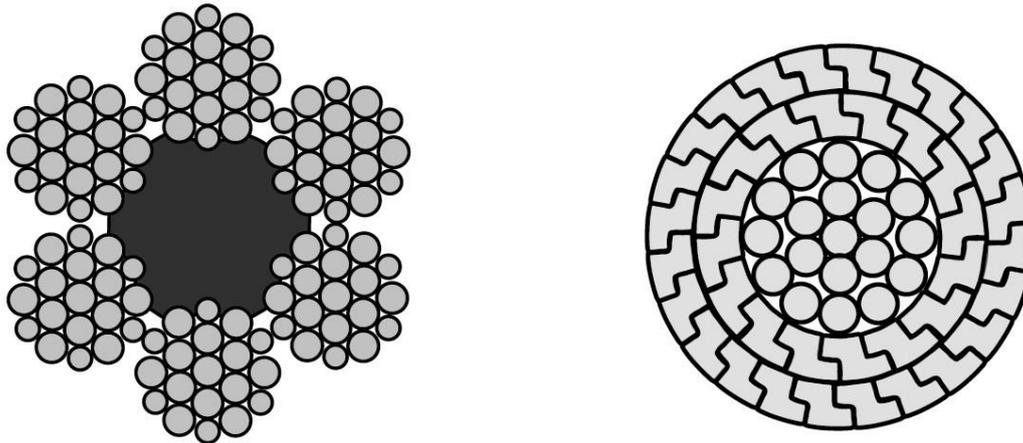


Abbildung 6: Querschnitt eines Zug-/Förderseil (links) und eines Trageils (rechts)

Wenn Drähte um einen gemeinsamen Kerndraht verseilt werden, entsteht eine Litze. Ein Litzenseil besteht aus geschlagenen Litzen um eine Einlage.

Wenn die Zug- und Gewichtskraft von einem Seil (oder von zwei Seilen bei Doppelumlaufbahnen wie z.B. die DMC- oder Funitel-Systeme), auf dem das Fahrzeug gekuppelt ist, übertragen werden, spricht man von Förderseil. Wenn zwei oder mehrere Seile die Beanspruchungen teilen, versteht man als Zugseil das Seil, an das die Kabine gekoppelt ist und die Zugkraft übernimmt, während das Trageil der Gewichtskraft widersteht und von dem Laufwerk der Kabine befahren wird. Das Förderseil wird beispielweise in den Sesselbahnen eingesetzt, das Trageil und das Zugseil in den Pendelbahnen.

### 2.3.2. Die Stationen

Die Stationen stellen die Knoten der Seilbahninfrastruktur dar. Die Talstation ist der Anfangspunkt, in dem die Fahrgäste einsteigen, und die Bergstation ist das Ziel. Sogenannte Mittelstationen können vorhanden auf dem Weg sein, i.d.R. um einen Bogen zu erlauben.

Die Art der Stationen hängt von der Betriebsart der Anlage ab: Bei Seilbahnen im Pendelbetrieb, z.B. Pendelbahnen, Standseilbahnen oder Funifor, ist es notwendig, die Anfahrt des Fahrzeugs in die Station vor dem Einstieg abzuwarten; bei Seilbahnen im Umlaufbetrieb fahren die Wagen in die Station kontinuierlich ein.

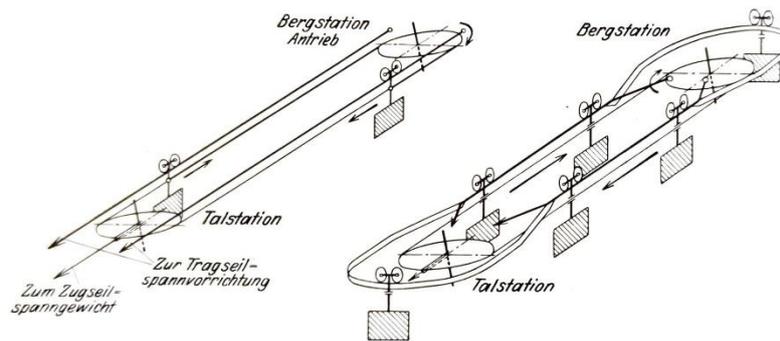


Abbildung 7: Anlage im Pendelbetrieb (links) und im Umlaufbetrieb (rechts)

Im ersten Fall beträgt die Geschwindigkeit der Anlage bis 12,5 m/s bei Pendelbahnen und 14 m/s bei Standseilbahnen, die ersten haben eine Förderleistung bis zu 2000, die zweiten bis zu 8000 P/h (2). Die Spannung des Trag- und Zugseiles wird konstant von Spanngewichten, die sich i.d.R. in der Talstation befinden, während der Antrieb in der Bergstation ist.

Die Pendelbahn wird weiter im Kapitel 5.1 beschrieben. Das Fahrzeug einer Standseilbahn kann von einer Winde gezogen werden und in diesem Fall handelt es sich bei der Anlage nur um einen Wagen, oder kann mit einer in der Bergstation Antriebs Scheibe ein Fahrzeug ziehen, während das andere als Gegengewicht wirkt. Zum Schluss ist eine weitere Möglichkeit das Seil in einem geschlossenen Zugseilschleifen, d.h. das Zugseil wird talseitig mit einem Gegenseil, dessen Aufgabe das Schließen der Seilschleife und die Verteilung der Zugspannung in der Seilschleife ist, verbunden.

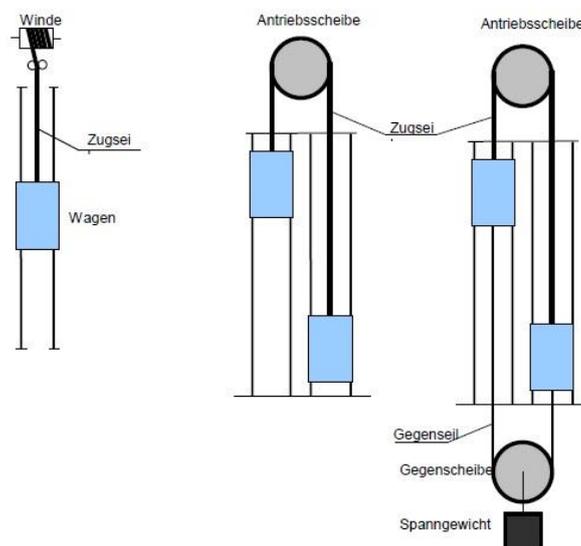


Abbildung 8: Mögliche Arten einer Standseilbahnstation

Die Seilbahnen im Umlaufbetrieb umfassen eine Vielzahl an Systemen, aber man unterscheidet zuerst zwischen den festgeklemmten und den kuppelbaren Seilbahnen. In beiden Fällen befindet sich der Antrieb und das Spanngewicht des Förderseils in der gleichen Station oder die zwei Komponenten sind getrennt.

In einem festgeklemmten System wie der Sessellift, fährt die Anlage ziemlich langsam, um den Fahrgästen zu erlauben, Platz zu nehmen.

In einer kuppelbaren Anlage fährt der Wagen in der Station ein, kuppelt sich ab (siehe Kapitel 2.3.3) und wird von Reifenfördern bis 0,3 m/s verzögert, um den Ein-/Ausstieg zu erlauben. Anschließend wird er wieder bis zur Geschwindigkeit des Seils beschleunigt, kuppelt sich an und fährt aus der Station.

### 2.3.3. Die Klemme

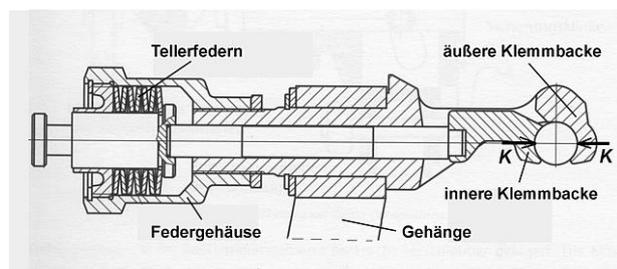
Die Klemme ist das Gerät, das dem Wagen die Festsetzung des Zug- oder Förderseiles erlaubt.

In den Pendelbahnen ist falsch von Klemmen zu sprechen, weil solche Anlagen mit Seilmuffen i.A. mit Zugseil verbunden sind. In dieser Arbeit werden die Seilmuffen nicht behandelt.

Außerdem spricht man in diesem Kapitel nur von den Klemmen der Einseil-Umlaufbahnen, weil sie die verbreitetsten sind.

Im Allgemeinen ist die Klemme trapezförmig mit dem zentralen Körper aus Stahl und zwei Klemmrücken aus Kunststoff (4), die den Übergang der Niederhalterstütze (siehe Kapitel 7.3) erlauben.

Die fixe Klemme ist von einfachem Verständnis.



a)



b)

Abbildung 9: Schema einer fixen Klemme (a) und Darstellung (b)

Die Klemme besteht aus zwei Klemmbacken, die das Förderseil umfassen; die innere Klemmbacke ist mit der Tellerfedersäule auf der anderen Seite des Körpers (siehe

Abbildung 9a) mittels eines Verbindungsstücks verbunden. Drückt die innere Klemmbacke gegen das Förderseil, bleibt die Klemme und das Fahrzeug fest am Seil.

Die Klemme einer kuppelbaren Seilbahn besteht aus mehreren Elementen.



Abbildung 10: Klemme einer kuppelbaren Seilbahn

Die in der obenan Abbildung weißen Rollen und die braune Rolle um recht dienen zur Unterstützung des Fahrzeugs in der Station sowie und gewährleisten, dass es den richtigen Weg in der Station folgt (siehe auch Abbildung 12). Die kleinere Rolle darunter hat nicht mit der Klemme zu tun; in einer Kabinenbahn macht sie die Türe auf und zu oder in einer Sesselbahn lässt die Schranke herunter und zieht sie hoch. Über den weißen Rollen befindet sich der Transportschuh (4), dessen Kontakt von den Reifenförderern (siehe Abbildung 11) in den Stationen die Beschleunigung und die Verzögerung des Fahrzeugs erlaubt.

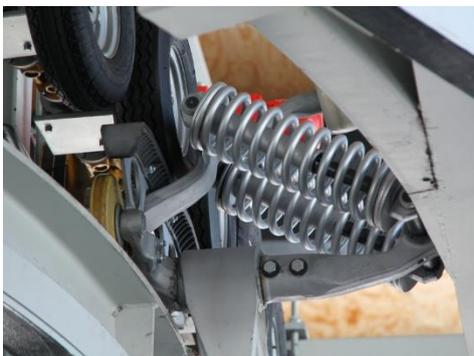


Abbildung 11: Reifenförderer



Abbildung 12: Kupplungseinrichtung (rechts oben)

Zum Schluss kommt die schwarze Rolle, die durch die Federn die Klemme steuert: Ähnlich wie in der fixen Klemme ist die Rolle mit der äußeren Klemmbacke durch einen Stahlbalken verbunden. Sinkt die Rolle wegen der Wirkung der Kupplungseinrichtung (die Fahrbahn rechts oben in der Abbildung 12), macht die Klemmbacke auf und im Fall bspw. einer Einfahrt wird das Seil nach unten umgeleitet.

### 3. Seilstatik

Grundlage für die Seilstatik ist, dass die gespannten Drahtseile grundsätzlich als biegefreie Tragelemente betrachtet werden (2). Deshalb beträgt das Biegemoment Null und so auch die Querkraft, deren die erste Ableitung des Biegemoments ist. Damit das Befahren eines Fahrzeugs möglich ist, wird eine Vorspannung durch die Grundspannkraft  $S_0$  angewendet; außerdem wirkt auf das Seil das linienverteilte Eigengewicht  $q$ .

Man betrachtet ein infinitesimales Seilelement  $ds$  eines Seiles  $s$ . Das Seilelement ist mit einem Winkel  $\varphi$  geneigt. Die Grundspannkraft  $S_0$  wird in ihre Komponenten nach den Achsen geteilt.

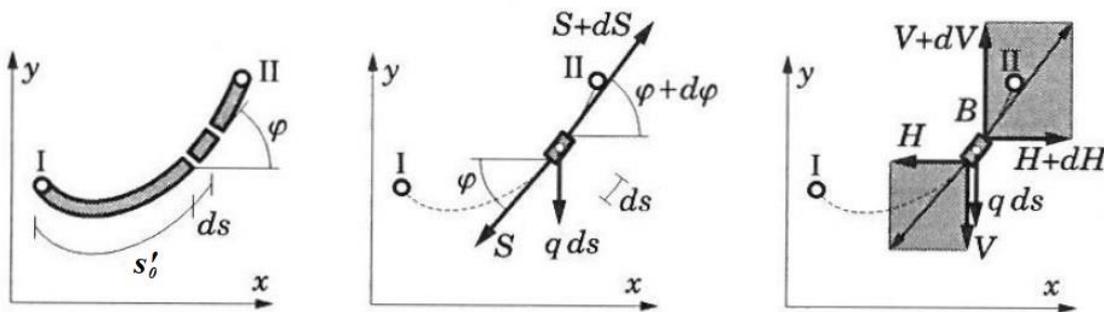


Abbildung 13: Seilstatik

Anhand der Gleichgewichtsbedingungen am Seilelement gilt:

$$\sum F_x = 0 \quad -H + (H + dH) = 0 \quad dH = H' = 0 \quad \rightarrow \quad H = \text{konst.} \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0 \quad -V + (V + dV) - q ds = 0 \quad dV = q ds \quad (2)$$

$$V = H \cdot \tan \varphi \quad (3) \quad \tan \varphi = \frac{dy}{dx} = y' = \frac{V}{H} \quad (4)$$

Die Gleichung (3) wird differenziert und in (2) eingefügt:

$$dV = Hd(\tan \varphi) \quad \rightarrow \quad Hd(\tan \varphi) = q ds$$

Durch die Anwendung der Gleichung  $ds^2 = dx^2 + dy^2$  bzw.  $ds = dx\sqrt{1 + y'^2}$  ergibt sich:

$$Hd(\tan \varphi) = q dx \sqrt{1 + y'^2} \quad \rightarrow \quad \frac{d(\tan \varphi)}{dx} = \frac{q}{H} \sqrt{1 + y'^2}$$

Und in Bezug auf die Gleichung (4):

$$\frac{d(\tan \varphi)}{dx} = \frac{d}{dx} d(\tan \varphi) = y'' = \frac{1}{a} \sqrt{1 + y'^2} \quad (5)$$

Wobei  $a = \frac{H}{q}$  heißt der Seilparameter.

Zur Lösung der oben geschriebenen Differentialgleichung, wird substituiert und die Variablen  $y' = \sinh u$ ,  $y'' = \cosh u du$  werden getrennt. Es ergibt sich

$$\frac{\cosh u \, du}{\sqrt{1 + \sinh^2 u}} = \frac{dx}{a} \quad (6)$$

Die Lösung von (6) führt zu

$$u = \frac{x}{a} + C \quad \text{und daher} \quad y' = \sinh\left(\frac{x}{a} + C_1\right)$$

In Bezug auf die Abbildung 14 legt man die y-Achse durch den Scheitelpunkt P der Kettelinie, dann gilt

$$y'(x=0) = 0 = \sinh\left(\frac{0}{a} + C_1\right) \rightarrow C_1 = 0$$

und dann durch die Integration von  $y'$  erhält man

$$y = a \cosh \frac{x}{a} + C_2$$

Legt man die x-Achse um ein Maß  $a$  unterhalb dem Scheitelpunkt P

$$y(x=0) = a = a \cosh \frac{0}{a} + C_2 = a + C_2 \rightarrow C_2 = 0$$

Und damit

$$y(x) = a \cosh \frac{x}{a} \quad (7)$$

Für die vom Scheitelpunkt P aus gezählte Bogenlänge  $s$  erhält man dann aus

$$ds = dx \sqrt{1 + y'^2} \quad \rightarrow \quad s = \int_0^x \sqrt{1 + \sinh^2\left(\frac{x}{a}\right)} dx = \int_0^x \cosh \frac{x}{a} dx = a \sinh \frac{x}{a} \quad (8)$$

Aus  $\cosh^2 \frac{x}{a} - \sinh^2 \frac{x}{a} = 1$  folgt  $y^2 = a^2 + s^2$ .

Bei  $x = 0$  folgt noch  $V(x=0) = 0 \rightarrow V = q \cdot s$

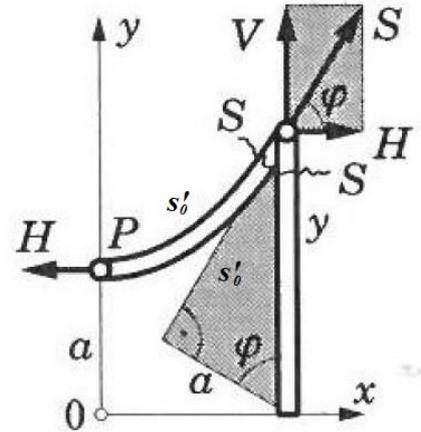


Abbildung 14: Größen und wirkende Kräfte auf dem Seil

### 3.1. Das Seildreieck

Die Bestimmung des Seilparameters  $a$ , wenn die Länge  $L$  des Seiles, die Horizontaldistanz  $b$  und die Vertikaldistanz  $h$  des Anfangs- und des Endpunktes gegeben ist, ist offensichtlich ein wichtiger Schritt zur Ermittlung der anderen Daten, wie z.B. die Spannkraft  $S$ .

Prof. Wohlhart (5) schlägt eine Lösung für ein solches Problem vor. Aus der Abbildung 14 stammen Abbildung 15 a) und b)).

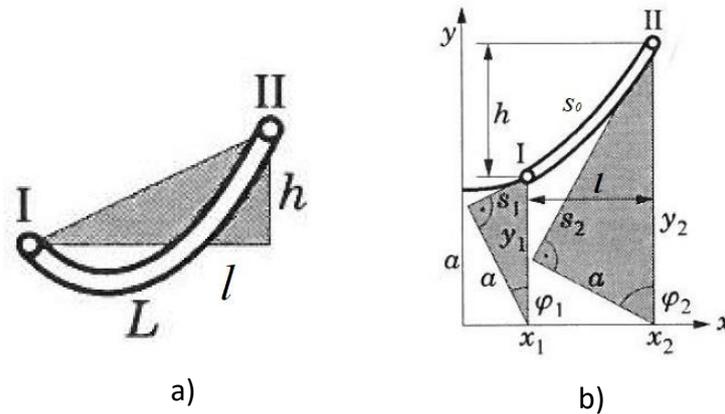


Abbildung 15: Das Seildreieck

Indem man die graphische Darstellung von Abbildung 15 b) beobachtet, ergibt sich aus

$$h = y_2 - y_1 = a \cosh \frac{x_2}{a} - a \cosh \frac{x_1}{a} \quad (9)$$

$$s_0 = s_2 - s_1 = a \sinh \frac{x_2}{a} - a \sinh \frac{x_1}{a} \quad (10)$$

$$l = x_2 - x_1 \quad (11)$$

Daraus folgt

$$\left(\frac{h}{a}\right)^2 = \cosh^2 \frac{x_2}{a} - 2 \cosh \frac{x_2}{a} \cosh \frac{x_1}{a} + \cosh^2 \frac{x_1}{a}$$

$$\left(\frac{l}{a}\right)^2 = \sinh^2 \frac{x_2}{a} - 2 \sinh \frac{x_2}{a} \sinh \frac{x_1}{a} + \sinh^2 \frac{x_1}{a}$$

Durch die Subtraktion von den oben geschriebenen Gleichungen und mit  $\cosh(\alpha \pm \beta) = \cosh \alpha \cdot \cosh \beta \pm \sinh \alpha \cdot \sinh \beta$ , aus dem  $\cosh(0) = 1 = \cosh^2 \alpha - \sinh^2 \beta$  und  $\cosh(2\alpha) = \cosh^2 \alpha + \sinh^2 \beta = 1 + \sinh^2 \alpha$  folgen, erhält man eine neue Gleichung, die Ermittlung von dem Seilparameter  $a$  erlaubt.

$$\left(\frac{l}{a}\right)^2 - \left(\frac{h}{a}\right)^2 = -1 + 2 \cosh \left(\frac{x_2}{a} - \frac{x_1}{a}\right) - 1 = 2 \left(\cosh \frac{l}{a} - 1\right) = 4 \sinh^2 \frac{l}{2 \cdot a}$$

$$\sqrt{s_0^2 - h^2} = 2a \sinh \frac{l}{2 \cdot a} \quad (12)$$

### 3.2. Näherungslösung der Kettelinie

Die Kettelinie des Seiles, die mit den hyperbolischen Funktionen ausgedrückt wird, kann mit einer Parabel angenähert werden. Da im Seilbahnbau die Seile straff gespannt sind, geringe Durchhänge aufweisen und sehr große Krümmungsradien haben, ändert der Tangentialwinkel der Seilkurve  $\varphi$  nur wenig in einem Feld (6). Es wird angenommen, dass das Eigengewicht des

Seiles entlang der Seilsehne gleichmäßig verteilt ist. Dadurch kann der Winkel  $\varphi$  mit dem Sehneneigungswinkel  $\gamma$  ersetzt werden und es ergibt sich

$$\frac{q}{\cos \varphi} \approx \frac{q}{\cos \gamma} = q' \quad (13)$$

Die Gleichung (2) wird daher wie folgt ausgedrückt

$$dV = q ds = q \frac{dx}{\cos \varphi} \approx q' dx$$

Mit ähnlichen Schritten wird die Gleichung (5)

$$y'' = \frac{q'}{H} = \frac{1}{a}$$

Und aus zwei Integrationen der y-Koordinate

$$y = \frac{x^2}{2a} + k_1 x + k_2$$

ergibt sich eine quadratische Parabel, wobei  $a = \frac{H}{q'} = \frac{H}{q} \cos \gamma$  heißt der Parameter der Seilparabel.

Durch die Anwendung von einem Paar bestimmter Randbedingungen ist es möglich die oben geschriebene Gleichung besser auszudrücken.

Die erste Randbedingung ist, dass der Ursprung des Koordinatensystems in der Seilhöhe der Stütze ist, d.h.

$$x = 0, y = 0 \rightarrow k_2 = 0$$

Für die zweite Randbedingung wird  $x = l$  gewählt, wobei  $l$  die Feldlänge darstellt. Bei  $x = l$  entspricht die y-Koordinate der Feldhöhe  $h$ .

$$x = l \rightarrow y = h = \frac{l^2 q}{2H \cos \gamma} + k_1 l \rightarrow k_1 = \frac{h}{l} - \frac{l q'}{2H} = \tan \gamma - \frac{l}{2a}$$

Daraus ergibt sich die Gleichung der Seilparabel

$$y = \frac{x^2}{2a} + x \left( \tan \gamma - \frac{l}{2a} \right) = x \tan \gamma - \frac{x(l-x)}{2a}$$

Die erste Komponente stellt die Höhe der Stützenschne und die zweite Komponente den Durchhang nach der Variable  $x$ . Von maßgebender Bedeutung ist der Durchhang in Feldmitte, d.h. bei  $x = l/2$ :

$$f_m = \frac{l^2}{8a} \quad (14)$$

Aus der Abbildung 15 ist der Wert der Seilspannkraft  $S$  leicht ermittelbar:



$$s = \frac{2H}{q} \sinh \frac{lq}{2H} \quad (19)$$

Zwischen den Längen des Seiles im Ausgangs- und Endzustand besteht die Beziehung:

$$s = s_0 + \Delta s + \Delta s_t \quad (20)$$

Wobei

$s$  Länge des Seiles im Endzustand nach (19);

$s_0$  Länge des Seiles im Ausgangszustand (bei  $q = 0$ );

$\Delta s$  elastische Verlängerung des Seiles;

$\Delta s_t$  Verlängerung des Seiles infolge der Temperaturänderung.

Die elastische Verlängerung des Seiles beträgt

$$\Delta s = \int_0^s \varepsilon ds = \frac{H}{EA} \int_0^l (1 + y'^2) dx$$

Nach einigen Umformungen ergibt sich

$$\Delta s = \frac{H^2}{EA} \left( \frac{lq}{2H} + \frac{1}{4} \sinh \frac{2lq}{H} \right) \quad (21)$$

Wobei  $E$  das Elastizitätsmodul des Seiles und  $A$  den Querschnitt des Seiles darstellen.

Die Verlängerung des Seiles infolge der Temperaturänderung beträgt

$$\Delta s_t = \alpha_t \Delta t s_0 \quad (22)$$

Wobei:

$\alpha_t$  Temperatureausdehnungskoeffizient (für Stahlseile  $\alpha_t = 0,000012$ );

$\Delta t$  Temperaturänderung.

Indem man die Gleichung (20) mittels der Gleichungen (19), (21) und (22) ausdrückt, ergibt sich

$$\frac{2H}{q} \sinh \frac{lq}{2H} = s_0 (1 + \alpha_t \Delta t) + \frac{H^2}{EAq} \left( \frac{lq}{2H} + \frac{1}{4} \sinh \frac{2lq}{H} \right) \quad (23)$$

Die Gleichung (23) stellt die exakte Lösung dar und kann für beliebige Seildurchhänge angewendet werden.

### 3.3.2. Näherungsform der Seilgleichung

Die Annahme, die die Grundlage für die Annäherung der exakten Seilgleichung mit einer Parabel 2. Ordnung ist, ist die Notwendigkeit in der Baupraxis das Eigengewicht gleichmäßig verteilt.

Daraus ergibt sich die Länge der Parabel

$$s \approx l \left[ 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{f_{\max}}{l} \right)^2 \right] = l \left( 1 + \frac{q^2 l^2}{24H^2} \right) \quad (24)$$

Die elastische Verlängerung des Seiles kann in einer leichteren Form dargestellt werden:

$$\Delta s \approx \frac{Hs_0}{EA} \quad (25)$$

Deshalb wird die Seilgleichung (23) in einer neuen Form ausgedrückt:

$$l \left( 1 + \frac{q^2 l^2}{24H^2} \right) = s_0 (1 + \alpha_t \Delta t) + \frac{Hs_0}{EA} \quad (26)$$

Nach einigen Umformungen erhält man die Annäherungsgleichung

$$H^3 + H^2 EA \left[ 1 - \frac{1}{s_0} (l - \alpha_t \Delta t s_0) \right] = \frac{EAq^2 l^3}{24s_0} \quad (27)$$

### 3.3.3. Wirkung einer beliebigen vertikalen Belastung: Herleitung der Seilgleichung mit Hilfe der Methode der Querkräfte

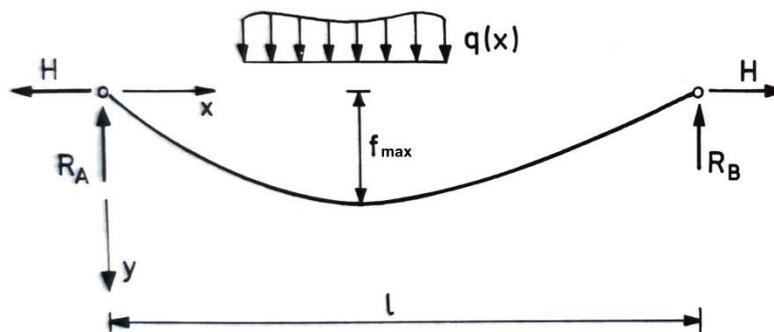


Abbildung 17: Seil unter der Wirkung einer beliebigen Belastung

Nach der Abbildung 17 unter der Wirkung einer beliebigen Belastung  $q(x)$  liefert die Annahme, dass das Biegemoment in jedem Punkt des Seiles Null ist,

$$M - H \cdot y = 0 \rightarrow y = \frac{M}{H} \quad (28)$$

Wie bereits oben erwähnt beträgt die Länge des Seiles

$$s = \int_0^l \sqrt{1 + y'^2} dx \quad (29)$$

In diesem Fall ist die erste Ableitung der Funktion y nach (28)

$$y' = \frac{1}{H} \frac{dM}{dx} = \frac{Q}{H} \quad (30)$$

wobei Q die Querkraft infolge der Belastung q(x) ist.

Die Gleichung (29) wird dann

$$s = \int_0^l \sqrt{1 + \frac{Q^2}{H^2}} dx \quad (31)$$

Die elastische Verlängerung des Seiles setzt sich auch um:

$$\Delta s = \frac{H}{EA} \int_0^l \left(1 + \frac{Q^2}{H^2}\right) dx \quad (32)$$

Setzt man die Gleichungen (22), (31) und (32) in (20)

$$\int_0^l \sqrt{1 + \frac{Q^2}{H^2}} dx = s_0(1 + \alpha_t \Delta t) + \frac{H}{EA} \int_0^l \left(1 + \frac{Q^2}{H^2}\right) dx \quad (33)$$

Wie früher wird auch diese Gleichung zu einer Parabel angenähert.

(29) wird in eine Taylor-Reihe und erhält man

$$s = \int_0^l \left(1 + \frac{1}{2}y'^2 - \frac{1}{8}y'^4 + \frac{1}{16}y'^6\right) dx \quad (34)$$

Und indem man bis der 2. Ordnung hält

$$s \approx \int_0^l \left(1 + \frac{1}{2}y'^2\right) dx \quad (35)$$

Setzt man (30) in (35) ein, erhält man

$$s = \int_0^l \left(1 + \frac{1}{2} \frac{Q^2}{H^2}\right) dx = l + \frac{1}{2H} \int_0^l Q^2 dx \quad (36)$$

Die Annäherungsgleichung wird durch das Einsetzen von (22), (25), (36) in (20):

$$l + \frac{1}{2H} \int_0^l Q^2 dx = s_0(1 + \alpha_t \Delta t) + \frac{Hs_0}{EA} \quad (37)$$

$$\rightarrow H^3 + H^2 EA \left[1 - \frac{1}{s_0}(l - \alpha_t \Delta t s_0)\right] = \frac{EA}{2s_0} \int_0^l Q^2 dx \quad (38)$$

Das Integral  $\int_0^l Q^2 dx$  nimmt unterschiedliche Werte nach den auf dem Seil angewendeten Lasten ein. Ein Verzeichnis solcher Werte ist im Anhang 1 (siehe Seite 79) einsehbar. Nachfolgend werden zwei übliche Fälle dargestellt.

- Fall A: gleichmäßig linienverteilte Belastung  $q(x)$

$$\int_0^l Q^2 dx = \frac{q^2 l^3}{12}$$

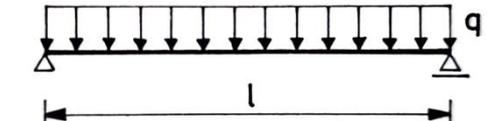


Abbildung 18: gleichmäßig linienverteilte Belastung  $q(x)$

- Fall B: gleichmäßig linienverteilte Belastung  $q(x)$  und Einzellast P

$$\int_0^l Q^2 dx = \frac{q^2 l^3}{12} + \frac{P^2 ab}{l} + Pqab$$

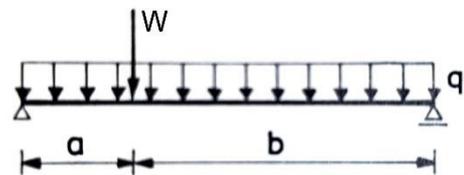


Abbildung 19: gleichmäßig linienverteilte Belastung  $q(x)$

### 3.3.4. Seil mit schrägen Sehnen

Der Fall von Seilen mit schrägen Sehnen (Abbildung 20) ist ähnlich wie der oben erwähnte waagrechte Fall.

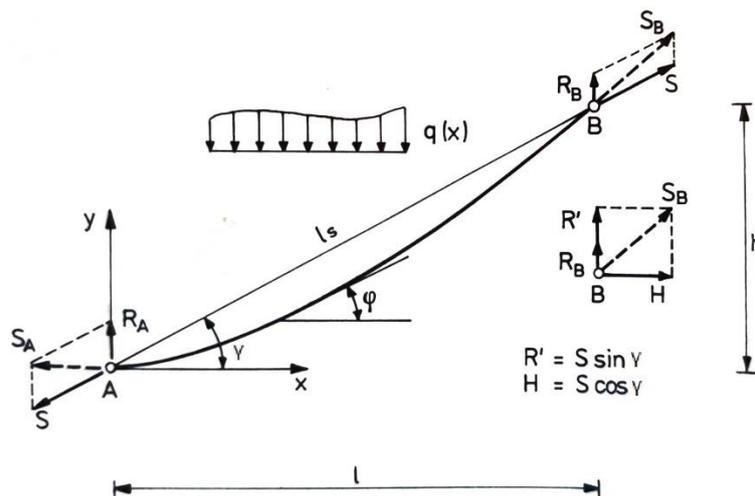


Abbildung 20: Seilfeld mit schrägen Sehnen

Nämlich nach der Bedingung, dass das Biegemoment Null sein muss

$$M - \sin \gamma x + S \cos \gamma y = 0 \rightarrow y = \tan \gamma x - \frac{M}{S \cos \gamma} \quad (39)$$

Setzt man (39) in (30) ein

$$y' = \tan\gamma - \frac{1}{S \cos\gamma} \cdot \frac{dM}{dx} = \tan\gamma - \frac{Q}{S \cos\gamma} \quad (40)$$

Deshalb wird die Länge  $s$  des Seiles nach der Gleichung (29)

$$s = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\tan\gamma - \frac{Q}{S \cos\gamma}\right)^2} dx \quad (41)$$

Die elastische Verlängerung des Seiles (32) wird

$$\Delta s = \frac{S \cos\alpha}{EA} \int_0^l \left[1 + \left(\tan\gamma - \frac{Q}{S \cos\gamma}\right)^2\right] dx \quad (42)$$

Dann wird (20) nach Berücksichtigung von (22), (41) und (42)

$$\int_0^l \sqrt{1 + \left(\tan\gamma - \frac{Q}{S \cos\gamma}\right)^2} dx = s_0(1 + \alpha_t \Delta t) + \frac{S \cos\gamma}{EA} \int_0^l \left[1 + \left(\tan\gamma - \frac{Q}{S \cos\gamma}\right)^2\right] dx \quad (43)$$

Gleichung (43) stellt die exakte Seilgleichung. Trotzdem wie bereits erwähnt ist diese Lösung von schwieriger Anwendung. Die Näherungsformel basiert sich auf die Länge der Seilsehne  $l_s$  (siehe Abbildung 20), die nach experimentellen Untersuchungen bestimmt wurde:

$$s = l_s + \frac{\cos\gamma}{2S^2} \int_0^l Q^2 dx \quad (44)$$

Die elastische Verlängerung beträgt

$$\Delta s = \frac{S \cdot s_0}{EA} \quad (45)$$

Deshalb wird (43)

$$l_s + \frac{\cos\gamma}{2S^2} \int_0^l Q^2 dx = s_0(1 + \alpha_t \Delta t) + \frac{S \cdot s_0}{EA} \quad (46)$$

Nach einigen Umformungen wird (46)

$$S^3 + S^2 EA \left[1 - \frac{1}{s_0} (l_s - \alpha_t \Delta t s_0)\right] = \frac{EA \cos\gamma}{2s_0} \int_0^l Q^2 dx \quad (47)$$

Beträgt der Winkel  $\alpha$  Null, setzt (47) sich in die Gleichung (38) um.



Daraus ergibt sich

$$f_x = \frac{\sum M_{V(x)} + \sum M_{N(x)}}{S_0 \cos \gamma} = \frac{\sum M_{V(x)} + \sum M_{N(x)}}{H}$$

Wobei  $f_x$  den Seildurchhang bei einem bestimmten zu untersuchenden Abstand darstellt.

## 4. Vergangene Arbeiten

Die Seilbahn ist ein besonderer Bereich, der oft nicht so vertieft behandelt wird. Dieses Kapitel bietet einen Überblick über von Doktoranden durchgeführte vergangene Dissertationen auf das Thema an.

### 4.1. Nußbaumers Dissertation

2013 schrieb Herr Dr. Nußbaumer seine Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften „*Modellbildung und Simulation der Dynamik von seilbetriebenen, automatischen Personentransportsystemen*“. In seiner Arbeit versucht er ein Antriebsstrangmodell für die dynamische Simulation von seilbetriebenen, automatischen Personentransportsystemen (auch als APM, d.h., *Automated People Mover*, gekannt) zu entwickeln (8). Das Modell wurde in Bezug auf die Systemdynamik und die physikalischen Eigenschaften eines seilbetriebenen APM durch die Differentialberechnung und die Finite-Elemente-Methode ermittelt. Daraus hat ein Differentialgleichungssystem sich ergeben, das in eine Software für Mehrkörpersimulation (MKS), d.h. *SIMPACK*, implementiert wurde und anschließend mittels des Vergleiches von Daten und Messungen mit einer realen Anlage verifiziert.

Im ersten Schritt wurde anhand der Eigenschaften des Verkehrssystems eine Seilbewegungsgleichung, die von Faktoren wie die Seilverschiebung, die Systembeschleunigung, die linienverteilten Kräften sowie die Longitudinalwellengeschwindigkeit abhängig sind, ermittelt. Aber solche Gleichung ist eine partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung: Für die MKS-Software Implementierung erfolgte eine Transformation der Gleichung in ein ODE-System.

Die Implementierung des Modells in die MKS-Software war möglich dank den sog. „User-Functions“, die den Usern ermöglichen, personalisierte Funktionen zu schreiben und daher das ODE-System anzuwenden. In dieser Phase wurden auch andere Aspekte berücksichtigt: Die dreidimensionale Fahrzeugbewegung, die Interaktion mit der Spannrichtung und die Seilrollen und ihren Rollwiderstand.

Die Verifikation des Modells und der Methode erfolgte durch den Vergleich mit dem APM *MGM CityCenter Shuttle* (Las Vegas, USA) der Fa. Doppelmayr. Das Anlagemodell besteht aus drei Submodellen, die die Komponenten und die Informationen der Anlage enthalten: Der Fahrweg, der Antriebsstrang und der Zug. Anschließend wurde das Simulationsmodell mit den Messdaten verglichen. Die Fälle, die berücksichtigt wurden, waren der Standardbetrieb und die Notbremsensituationen, beide mit beladenem oder unbeladenem Zug. Es ist einsichtbar, dass die Ergebnisse des Vergleichs miteinander übereinstimmen, und daher ist das Modell anhand der oben erwähnten Anlage gültig.

Im letzten Kapitel stellt man die Frage, inwieweit die Methodik angewendet werden kann. Man erläutert anhand von unterschiedlichen Anwendungsbeispielen, die unter den bereits genannten Fällen stehen. Solche Beispiele sind in Bezug auf den Standardbetrieb die Reduktion von Fahrzeuglängsschwingungen und die Lateralodynamik und Betriebslasten der Fahrzeuge bezogen; aus der Seite der Notbremsungssituationen stellen die Fahrzeuglängsbeschleunigung und maximaler Bremsweg und die Spitzenlasten und Hub der Spanneinrichtung interessante zu entwickelnden Beispiele dar.

Herrn Dr. Nußbaumers Dissertation hätte den Schwerpunkt dieser Masterarbeit sein sollen: Das Ziel war die Implementierung seines Modells in eine Standseilbahn auf einem schrägen Gelände, wie zum Beispiel im Bergbereich. Allerdings wegen keiner getroffenen Vereinbarung zwischen den damaligen Teilnehmern, war nicht mehr möglich, auf diesem Weg fortzugehen, und deshalb veränderte sich der Zweck der Arbeit.

#### **4.2. Renezeders Dissertation**

Herr Dr. Renezeders Dissertation „*On the Dynamics of Axially Moving Cable with Application to Ropeways*“ (9) hat als Schwerpunkt das Problem des Seilfeld- bzw. der Pumpschwingungen<sup>1</sup>, die nicht nur auf den Fahrkomfort, sondern auch auf die Sicherheit eine maßgebende Einwirkung haben. Die Analyse untersucht die axialen Seilschwingungen erstens im Schwerfeld und anschließend in Bezug auf die Dynamik einer Seilbahn durch die Anwendung einer numerischen Simulation mit den Finiten Elementen.

Der erste Schritt ist die Bestimmung der Bewegungsgleichung: Man berücksichtigt ein modelliertes Seil als starre, homogene, eindimensionale Struktur ohne Biegesteifigkeit oder Torsionfestigkeit. Das Seil bewegt sich in einem dreidimensionalen Raum unter der Wirkung eines Schwerkraftfelds. Zwei Ösen, durch die das Seil fährt, vermindern die Seilbewegung auf eine eindimensionale Richtung. Mit der Einführung sonstiger Größen, wie Geschwindigkeit und Zeit, und der Bestimmung eines Bezugssystems, sowie indem man sonstige physikalische Eigenschaften des Systems berücksichtigt, ist die Bewegungsgleichung bestimmt.

Anschließend wird das Verhalten des Seiles in einem konstanten Schwerkraftfeld untersucht. In Details werden zwei Konfigurationen berücksichtigt: Die zeitunabhängige Konfiguration und die linearisierte Konfiguration, die unter quasi-zeitunabhängiger Bedingung untersucht wird und auf ein Problem mit komplexen Variablen führt.

Um das Verhalten des Seiles, wenn dieses auf die Rollen fährt, zu untersuchen, werden die Ösen mit den Rollen, die als Randbedingungen dienen, ersetzt. Neben der Umsetzung der zwei Konfigurationen nach der neuen Randbedingung wird eine andere Konfiguration, die analysiert, wie die zeitunabhängige Lösung sich ändert, wenn das Seil nicht vollkommen

---

<sup>1</sup> Auf Englisch: *sag-oscillation*

biegsam ist, untersucht. In diesem Fall ist mittels einer Simulation ersichtlich, dass der Punkt auf der Rolle, wo das Seil Kontakt verliert, sich mit zunehmender Biegefestigkeit ändert.

Mittels einer Simulationssoftware werden die Ergebnisse der zeitunabhängigen Lösung zwischen zwei Rollen überprüft. Laut dem Autor beeinflusst die hohe Anzahl an Rahmenbedingungen die Dauer der Simulation, die lang wird. Deshalb wurden unterschiedliche Modelle erzeugt, um das Beste zur Anwendung zu finden. Das Endergebnis ist eine asymmetrische Konfiguration, deren Asymmetrie die Ursache nicht bekannt ist.

In diesem Abschnitt wird in Bezug auf die Bewegung des Seiles in einem Seilfeld untersucht, wie die Seilspannung am Ende des Seilfelds die Pumpschwingungen beeinflusst. Durch mathematische Berechnungen werden Kurven, die anhand bestimmter Parameter zu stabilen oder instabilen Konfigurationen führen, ermittelt.

Anschließend wird die Seildynamik mit einer Simulation mit den finiten Elementen im Fall einer Umlaufbahn untersucht: Das Modell ist so gestaltet, dass das Seil durch Ösen, die die Rollenbatterien simulieren, fährt und die Kabinen entweder konzentrierte Massenelemente oder auf dem Seil gehängte starre zylindrische Körper sind.

Unterschiedliche Simulationen mit den bezogenen Randbedingungen wurden durchgeführt und daraus ergab sich, dass die Pumpschwingungen ein Resonanzphänomen wegen externer Anregungen sind. Zur Vorhersage solcher wegen Anregungen Pumpschwingungen wurde ein Programm, das *input files* für eine direkte dynamische Analyse erzeugt, entwickelt, trotzdem war die Simulation einer ganzen Umlaufbahn sehr hoch zeitaufwändig (sieben Tage, in denen eine Kabine weniger als 49,5 m fuhr (9)). Das Programm kann auch reale Fälle darstellen: Man simulierte den Unfall im Sommer 2008 in Sölden, in dem ein Helikopter einen Propeller verlor. Der Propeller schlug auf das Seil einer Seilbahn und die starken Schwingungen verursachten das Aufmachen einer Kabinenkopplung und den anschließenden Fall; die nebenan Fahrzeuge erlitten starke Stöße.

### **4.3. Richters Dissertation**

Im Jahr 1989 schrieb Herr Dr. Richter seine Dissertation „*Schwingungsverhalten von Einseil-Umlaufbahnen beim Anfahren und Bremsen*“. Mittels der Arbeit konnte das Schwingungsverhalten einer Anlage bereits in der Projektphase untersucht werden. Schwingungen sind einsehbar beim Anfahren und Abbremsen; ein besonderer Fall ist bei einem Nothalt, in dem große Kraftänderung im Seil auftritt und die anderen Komponenten der Seilbahn beeinflussen. Außerdem stellt das voll beladene Fahrzeug 60 bis 80 % der auf dem Seil bewegten Massen: Daher bei der Verzögerung bis zum Halt schwingt noch ein Teil des Fahrzeugs bzw. das Fahrzeug wird nur teilweise mitverzögert (10).

Eine Einleitung bietet einen Überblick auf das Thema und erläutert das Ziel der Arbeit, d.h. die Aufstellung eines Rechenmodells für die Ermittlung der auftretenden Feldschwingungen und Spannungsbewegungen bei einem Nothalt. Anschließend wird die vorhandene Theorie

der Schwingungen beschrieben, wie zum Beispiel Lineare Systeme mit einem Freiheitsgrad, lineare und Nicht-lineare Systeme mit vielen Freiheitsgraden und Schwingungen in Kontinua. Zum Schluss wird eine Vorbereitung in Bezug auf die Modellierung durchgeführt: Annahmen und Vereinfachungen, die anschließend jedenfalls überprüft werden, werden festgesetzt.

Das zweite Kapitel beschäftigt sich mit der Seilstatik und beschreibt deshalb die notwendigen Größen zur Seilberechnung. Außerdem werden bestimmte Abschnitte, in denen Schwingungen auftreten, in der Seilbahn festgestellt. Was für den Autor wichtig ist, ist, die Freiheitsgrade des Systems auf ein absolutes Minimum zu halten: Nämlich finden Schwingungen in bestimmten Abschnitten statt und sie werden durch einen einzigen Freiheitsgrad gekennzeichnet. Die beschriebenen Abschnitte sind der Feldabschnitt (in dem Seilfeld), in dem Grundschrägungen bei Bremsung vor allem auftreten und Durchgangsänderungen verursachen; der Stützenabschnitt, d.h. zwischen zwei oder mehreren Stützen, wo Konsequenz von den Schwingungen longitudinale Seilverschiebung auf den Stützen ist. Zum Schluss kommt der Pendelabschnitt, in dem eine bestimmte Anzahl an pendelnden Massen bzw. Fahrzeugen Schwingungen verursachen. Für jeden Abschnitt werden die entsprechenden auftretenden Schwingungen mittels der Anwendung mathematischer Formel erläutert.

In dem folgenden Kapitel wird das Modell in einer Beispiel-Anlage, die *4er-Gondelbahn Bettmeralp-Bettmergrat*<sup>2</sup> (Schweiz), angewendet. Ein Programmpaket wurde für die Simulation der Schwingungen entwickelt: Das ist in drei Programmen, die die Anlagedaten einlesen, die Schwingungen berechnen und die Ergebnisse in einem Zeitdiagramm plotten, unterteilt. Anschließend beschreibt der Autor alle Schritte zum Aufbau des Modells: Hier werden die erforderlichen Daten (Felder, Antrieb, Stütze, usw.) der Anlage eingegeben; daraus ergibt sich die statische Berechnung und anschließend wird das Programm zur Schwingungsberechnung gestartet. Die resultierenden Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung in allen drei oben erwähnten Abschnitten.

Das letzte Kapitel stellt einen Vergleich mittels der Handrechnung dar. Voraussetzungen sind die Quasi-statische Berechnung zur Ermittlung der spielenden Spannungen und des Gleichgewichtszustands der Umlaufbahn und die Wellentheorie, die eine gute Erklärung von Vorgängen bei raschen Zustandsänderungen, wie z.B. der Nothalt erlaubt. Das eingesetzte Rechenmodell stellt ein mit konstanter Geschwindigkeit  $v$  laufendes leeres unendlich langes Seil, das schlagartig auf Null gebremst werden soll, dar (10) und die Spannungsänderung im Seil wird untersucht. Anschließend werden die unterschiedlichen Schwingungen ermittelt. Ein Beispiel einer extremen Bremsung und einige Berücksichtigungen des Autors über die Seilschwingungen schließen die Arbeit. Das Beispiel hat das Ziel die Grenze des Programms zu zeigen: Die Anlage wurde mit Gondeln bergauf und Leerseil bergab beladen und dies hat sehr hohe Transversalschwingungen erzeugt.

---

<sup>2</sup> 1995 wurde die Anlage mit einer neuen 8er-Gondelbahn ersetzt (27) (28).

## 5. Modellbildung

Um die Vorgangsweise zum Modellaufbau und zur Modellverifizierung besser zu verstehen, wird folgend das System Pendelbahn beschrieben, um einen Überblick über das System, das als reales Beispiel angewendet wird, zu geben.

### 5.1. Die Pendelbahn

Mit einer Fahrgeschwindigkeit bis zu 12,5 m/s (in Österreich 12 m/s) und einer Förderleistung bis 2000 Pers/h ist die Pendelbahn ein sehr einfaches und verbreitetes System, das unwegsames oder schwieriges Gelände mit großen Seilfeldlängen überfahren kann. Die Pendelbahn ist die klassische Seilschwebbahn; „Pendelbahn“ ist ein umgangssprachlicher Begriff wegen der wiederkehrenden Fahrt der Fahrzeuge zwischen den Stationen der Anlage und wird auch technisch genutzt (2).

Eine Pendelbahn besteht aus einem Ursprung, die Talstation, und einem Ziel, die Bergstation. Ein oder mehrere Tragseile stellen die Fahrbahn dar und diese letzte ist von Stützen entlang der Linie auf einer bestimmten Höhe gehalten. Die Bewegung der Fahrzeuge wird von dem Zugseil erfüllt. Pendelbahnen, die im Personenverkehr verwendet werden, haben geschlossene Zugseilschleifen, d.h. das Zugseil ist in einem Ring zwischen den Stationen geschlossen. Eine Kombination von Zug- und Gegenseil darf aber genutzt werden: Das Gegenseil ist i.d.R. ein Seil, dessen Durchmesser kleiner als jener des Zugseils ist und dessen Aufgabe grundsätzlich nur das Schließen der Seilschleife ist. Nämlich befindet sich dies talseitig, während das Zugseil, das die höhere Zugkraft übertragen muss, bergseitig die zwei Fahrzeuge zusammenbindet. Der Antrieb und die Spannungsvorrichtung, die eine bestimmte Spannung entlang des Seils gewährleisten muss, können in einer einzigen Station sein oder geteilt werden. In dem Fall einer Pendelbahn mit Zug- und Gegenseil ist es logisch, dass mindestens der Antrieb sich in der Bergstation befindet. Abbildung 22 fasst die oben erwähnten Konzepte zusammen.

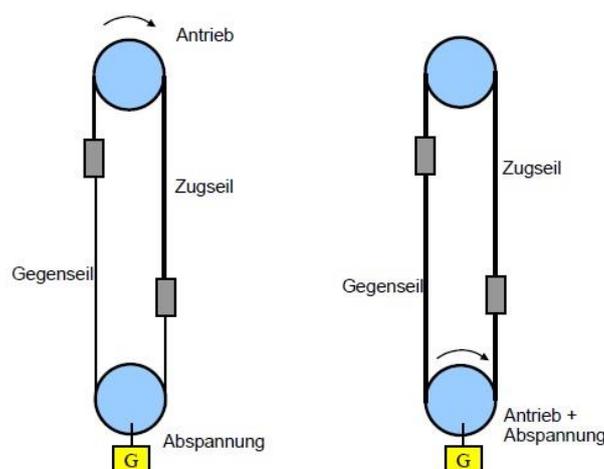


Abbildung 22: Zwei Antriebsmöglichkeiten in einer Pendelbahn

Die Pendelbahn kann einfach steiles Gelände und sehr lange Abstände mit einem Seilfeld überfahren. Das längste Seilfeld ist bei der Pendelbahn „Aiguille du Midi“ in Chamonix mit 3100 m vorhanden (Abbildung 23). Die höchste Seilbahnstütze der Welt befindet sich in Kaprun bei der „Gletscherbahn I“ mit 114 m (Abbildung 24) (2).



Abbildung 23: Das längste Seilfeld



Abbildung 24: Die höchste Stütze

Wenn ein Fahrzeug auf eine Stütze fährt, tritt das Tragseil (oder die Tragseile) in einen Tragschuh, dessen Umfassungswinkel zwar bis zu 180° für eine höhere Lagersicherheit beträgt, jedoch auf 120° bei Ausführung von des Wagenlaufwerkes mit einer Tragseilbremse beschränkt wird, ein.

Bei Dreiseilpendelbahnen (und deshalb auch bei Dreiseilumlaufbahnen) wird eine weitere Komponente, die gegen sowohl den Zugseilüberschlag als auch die horizontale und vertikale Auslenkung des Zugseiles vermindert, angewendet: Das ist der Zugseilreiter. Es handelt sich um ein i.d.R. V-förmig Element, das die Tragseile von unten greift und in dem sich zwischen seinen Armen eine Zugseilrolle sich befindet. Eine weitere Aufgabe des Zugseilreiters ist die seitliche Stabilisierung der beiden Tragseile.



Abbildung 25: Ein Zugseilreiter

Ein Fahrzeug besteht grundsätzlich aus vier Elementen: Die Rollenbatterie, die mit dem Laufwerk verbunden ist; die Verbindung zwischen dem Laufwerk und der Kabine erfolgt durch die Gehänge. Als Sicherheitsmaßnahme befinden sich auf das Laufwerk gekoppelte Notbremsen, die im Fall einer Störung das Tragseil fangen und das Halten des Fahrzeugs erlauben.

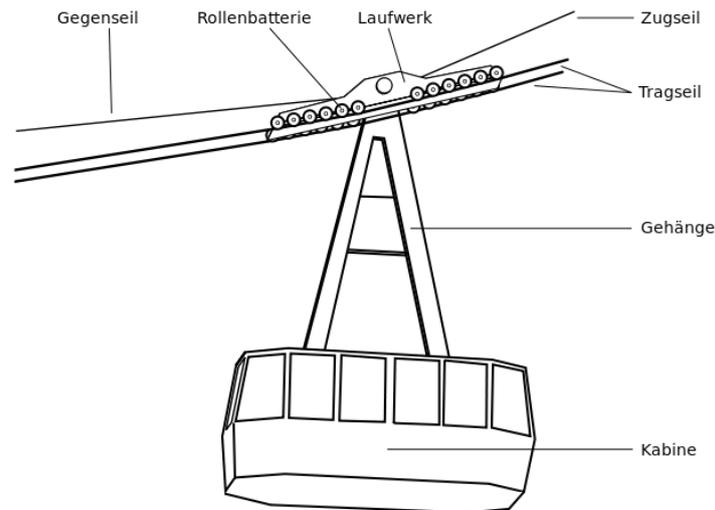


Abbildung 26: Schema eines Pendelbahnfahrzeugs

Jeder Wagen muss mit Tragseilbremsen ausgerüstet sein: Diese befinden sich in dem Laufwerk zwischen den Laufrollen, und werden bei Zugseilriss manuell oder automatisch aktiviert, indem sie das Tragseil fangen.

### 5.1.1. Exkurs: Der Unfall der Stresa-Mottarone-Seilbahn

Am 23. Mai 2021 fand auf dem Berg Mottarone, über dem Lago Maggiore in Piemont, Italien, ein tragisches Seilbahnunglück mit 14 Opfern statt. Das Zugseil der Zweiseilpendelbahn riss 5 Meter vor der Anfahrt der Kabine in die Bergstation; der Wagen stürzte nach unten, entgleiste an der Stütze und fiel etwa 20 Meter, dann kippte er noch für einige zehn Meter bis zum Halt um (11). Ein von der italienischen Zeitung *Corriere della Sera* veröffentlichter Videoclip zeigt den dramatischen Moment, in dem der sich fast in der Bergstation befindliche Wagen plötzlich wegen des Zugseilrisses nach unten fällt (12).

Die Pendelbahn wurde in den 70er-Jahren als Ersatz der bestehenden, aber alten und langsamen Zahnradbahn errichtet; sie weist zwei Abschnitte auf, den Stresa-Alpino-Abschnitt und den Alpino-Mottarone-Abschnitt, die unabhängig voneinander bzw. zwei separate Anlagen sind, auf. Die Wagen haben eine Kapazität in der Höhe von 35 Personen.



Abbildung 27: Fahrweg der Stresa-Mottarone-Seilbahn

2014 wurde eine Generalsanierung durchgeführt und die gesperrte Anlage wurde 2016 wiedereröffnet. Anschließend wurden alle Komponenten der Seilbahn auf einer jährlichen Basis positiv überprüft (13). Außerdem wurde c.ca ein Monat vor dem Unfall, am Ende April, eine Überprüfung der Hydraulikzentrale der Fahrzeugbremsen durchgeführt und daraus ergaben sich keine Auffälligkeiten. Der Seilbahnbetreiber meldete sich seitdem für weitere Probleme nicht mehr (14).

Bereits 1998 fand ein Unfall mit Zugseilriss statt, allerdings wurden die Ursachen nie geklärt. Die Beweise von dem letzten Unglück sind noch vorhanden, und daher führen von den Parteien gewählte Experten Ermittlungen durch. Trotzdem wurde bereits bestätigt, dass der Nicht-Betrieb des Bremssystems kein technisches Problem, sondern ein menschliches Versagen war: Nämlich wurden die „Gabeln“ (auf Italienisch „Forchettoni“) in den Bremsanlagen des Laufwerks im Einsatz gelassen (15). Die Gabel (Abbildung 28) verhindert den Schluss bzw. den Fang der Bremsen um das Tragseil und wird nur bei Probenfahrten mit leeren Kabinen verwendet, sodass die Notbremsen im Fall einer Störung nicht in Betrieb gesetzt werden, andernfalls kann man nur mit großem Zeitaufwand den Wagen erreichen und die Bremsen manuell lösen. Der Chef sowie Angestellte der Betriebsfirma wurden als Verantwortliche des Unfalls gehaftet.

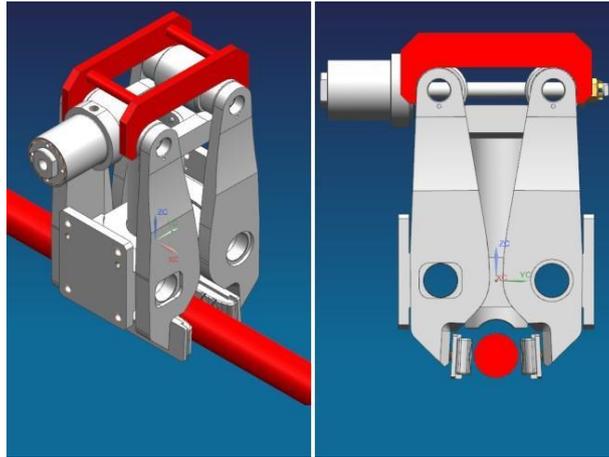


Abbildung 28: In rot oben die Gabel („Forchettone“); unten das Tragseil

Es sieht aber aus, dass der Einsatz der Gabel nichts Neues war, sondern sie wurden schon Jahre vor dem Unfall verwendet. Nämlich hat ein Schweizer Hobbyfilmer mit dem ZDF Videoaufnahmen aus den Jahren 2014 und 2018 geteilt (16).

Die Situation ist noch zum Großteil zu klären, weil der Unfall vor drei Monaten im Vergleich zu dieser Arbeit vorkam, und deshalb muss man noch auf die Untersuchungen sowie auf das definitive Urteil warten.

## 5.2. Das Modell

Das Kontrollrechenmodell wurde mit dem kommerziellen Software *SIMPACK* für die Mehrkörpersimulation erstellt. Einige Stände des realen Beispiels werden simuliert und anschließend in dem nächsten Kapitel mit den analytischen Ermittlungen verglichen, um zu zeigen, ob Unterschiede bestehen.

### 5.2.1. Die Seilelemente

Das Seil wurde diskretisiert bzw. in eine Vielzahl an starren Körpern, d.h. Seilelemente, unterteilt. Solche Seilelemente sind von Zylindern mit bestimmter Größe und Masse dargestellt und sind in der XZ-Ebene frei zu bewegen (Abbildung 29). Man setzt voraus, ausreichende Elemente von gleichmäßiger Länge, die eine gute Darstellung der Seillinie gewährleisten können, ohne das Programm zu viel zu beschweren, zu erzeugen.

Neben dem oben erwähnten Zylinder ist eine Kugel vorhanden: Ihre Mitte befindet sich am Ende des Stabs und stellt das Gelenk dar sowie dient zur Ermittlung des Durchhangs, weil die Software die Positionen der Körper in dem Raum in dem entsprechenden Schwerpunkt berechnet.

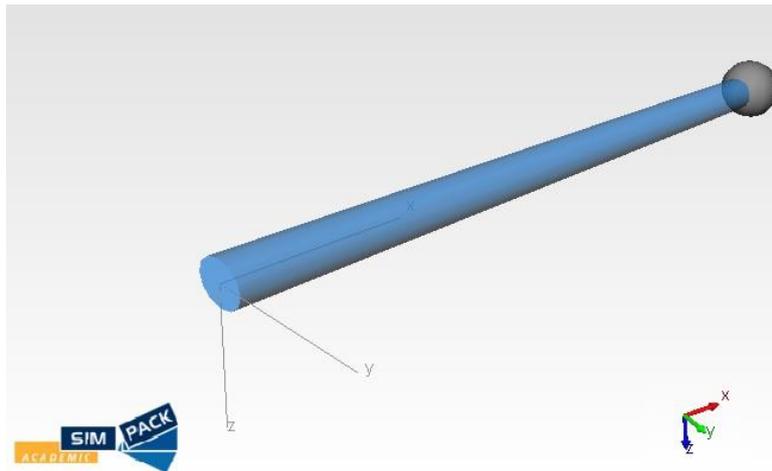


Abbildung 29: Seilelement in SIMPACK

Die Elemente stehen in Wechselwirkung dank den Markierungen<sup>3</sup>, die von der Software mit dem Buchstaben „M“ in der Form „\$M\_Ergänzung-vom-User-gegeben“ erzeugt werden. Die Markierung muss immer auf eine andere bezogen sein und der User kann weitere Eigenschaften, wie den Abstand von dem Bezug oder den Neigungswinkel entscheiden. Der Arbeitsraum der Software besitzt einen eigenen Ursprung des Bezugssystems, dessen Markierung „\$M\_Isys“ ist. Das gleiche gilt für jeden Körper, der ein sog. „Body Reference Frame“ oder „\$M\_Name-des-Körpers\_BRF“, das dem Schwerpunkt des Körpers entspricht, vorgegeben hat.

Die notwendigen Markierungen für die Verbindung der Körper befinden sich am Anfang und am Ende jedes Elements, sind auf die Schwerpunkt-Markierung bezogen, werden mit dem Buchstaben „v“ (vorne) oder „h“ (hinten) bezeichnet und sind in der Form „\$M\_Name-des-Körpers\_v“ (oder -\_h). Für den Namen des Körpers siehe Kapitel 5.2.3.

Die Verbindung jedes Element mit dem anschließenden findet durch ein Gelenk<sup>4</sup>, das nur (in dieser Arbeit) die Umdrehung um die Y-Achse erlaubt, statt.

Ein Gelenk ist von der Software bei einem erzeugten Körper, d.h. während der Anfang der Kette festgesetzt ist, ist das Ende der Kette frei zu bewegen. Die meistverwendeten Möglichkeiten, die Körper dem System festzusetzen, sind von Auflagern<sup>5</sup> oder Kräftelementen<sup>6</sup> dargestellt: Die ersten begrenzen die Freiheitsgrade des Mehrkörpersystems, die zweiten sind ein Oberbegriff für eine Vielzahl an möglichen einzusetzenden Arten, deren verbreitetste vielleicht die un- oder gedämpfte Feder ist. Da die Auflager von schwieriger Anwendung sind, wurden die Kräftelemente eingesetzt: Das sog. „Spring-Damper Parallel Component“ bzw. „Parallele Feder-Dämpfer Komponente“ wurde verwendet.

<sup>3</sup> Marker auf Englisch.

<sup>4</sup> Joint auf Englisch.

<sup>5</sup> Constraints auf Englisch.

<sup>6</sup> Force Element auf Englisch.

Die Kette wurde deshalb mit einem Kraftelement festgesetzt: Dies wurde mit einer so hohen Steifigkeit und Dämpfung definiert, dass die Verschiebung des Seiles vermieden oder mindestens abgemindert werden sollte. Am Ende der Simulation ist eine Verschiebung vorhanden und das bedeutet, dass das Seilende nicht in der bestimmten Lage bleibt. Dieser Fehler wurde in Rahmen der Ermittlungen und des Vergleichs berücksichtigt. Auf diese Weise nähert das Modell sich im Zuge der Simulation und unter der Schwerkraft der Seillinie und anschließend der Einzellast einem kontinuierlichen Körper an. Abbildung 30 zeigt ein Beispiel des im nächsten Kapiteln aufgebauten Modells. Das ist der Ort, in dem die Stütze der Pendelbahn sich befindet. Die Linie mit dem orangen Viereck ist das Kraftelement, das theoretisch nicht verschoben sein sollte, die blauen Körper sind das letzte Element des ersten Seilfelds (links) und das erste Element des zweiten Seilfelds (rechts). Zum Schluss die roten und die grünen Linien sind die Markierungen, auf die das Kraftelement bezogen ist, und entsprechen einem fixen Punkt in dem Modellraum und das Ende des letzten Elements des ersten Seilfelds.

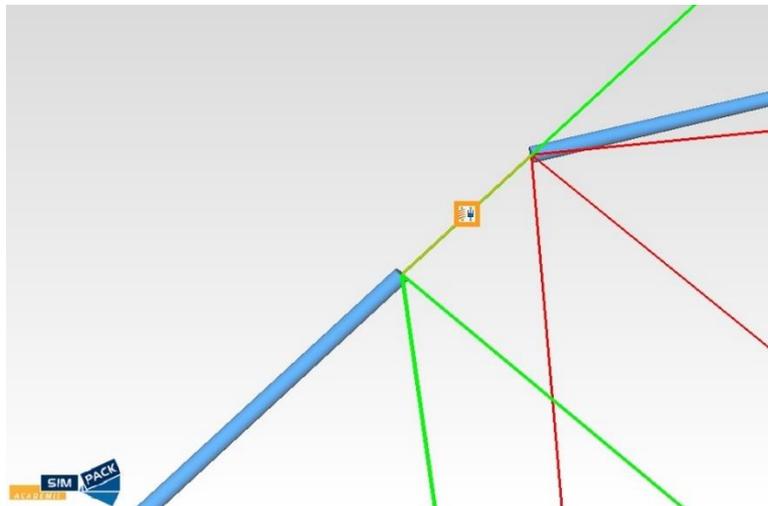


Abbildung 30: Verschiebung des Kraftelements

Die Wiederholung von Elementen erhält die Gelenkkette in der Abbildung 31.

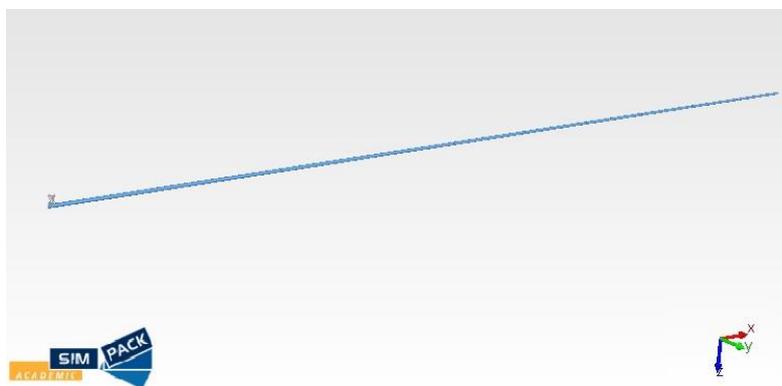


Abbildung 31: Basismodell einer Gelenkkette

### 5.2.2. Die Anwendung

Für den Modellaufbau wurde ein reales Beispiel angewendet: Es handelt sich um die Karrenseilbahn in Dornbirn (Vorarlberg, Österreich), eine Doppeltragseilpendelbahn, die die Vorarlberger Stadt auf 464 m mit der Hausberg Karren auf 971 m verbindet und von der Firma Ludwig Steurer gebaut wurde.



Abbildung 32: Die Karrenseilbahn (Dornbirn)

Auf dem Fahrweg ist eine Stütze vorhanden, die die Neigungsänderung zwischen den Seilsehn darstellt.

Die technischen Daten der Pendelbahn sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Einheit	Feld 1	Feld 2
Horizontale Länge	282,41 m	1097,19 m
Senkrechte Höhe	134,36 m	377,27 m
Schräge Länge	312,74 m	1160,24 m
Neigungswinkel der Seilsehne	0,33 rad	0,44 rad
Durchmesser des Tragseiles	32 mm	
Durchmesser des Zugseiles	24 mm	
Masse des Tragseiles	5,95 kg/m	
Masse des Zugseiles	2,12 kg/m	

Tabelle 1: Grunddaten der Karrenseilbahn

### 5.2.3. Ermittlung der Länge der Seilelemente

Wie bereits im Kapitel 5.2.1 erwähnt sind die Seilelemente mit bestimmter Länge gestaltet. In diesem Kapitel erläutert man die Schritte zur Ermittlung solcher Länge.

Da die Bogen- und die Sehnenlänge bereits gegeben sind, ist eine beliebige Länge des Seilelements nicht zulässig. Nämlich verursacht der Übergang von einem kontinuierlichen zu einem diskreten Körper unvermeidlich einen Fehler ( $\Delta l^*$ ), weil eine Kurve von  $n$ -Segmenten  $L$  dargestellt wird, und deshalb ist die Summe der Längen der Segmente ( $s'$ ) nicht genau gleich der Seillänge ( $s$ ; siehe Kapitel 3). Das heißt:

$$s = \int_0^l \sqrt{1 + y'^2} dx \rightarrow s' = \sum_{j=1}^n L_j \pm \Delta l^*$$

Um den Fehler zu minimieren, wurde eine angemessene Elementlänge für jedes Seilfeld gewählt; als Bogenlänge wurde jene vom Eigengewichtsstand gewählt:

Einheit	Seilfeld I	Seilfeld II
Elementlänge	10,09 m	10,02 m
Rechn. Anzahl der Elemente <sup>7</sup>	31	116,008982
Anzahl der Elemente	31	116
Gesamtlänge	312,79 m	1162,32 m
Bogenlänge	312,79 m	1162,42 m
Fehler	0 m	0,009 m

Tabelle 2: Länge des Seilelements für jedes Seilfeld

Eine wie in Abbildung 31 Gelenkkette besteht i.d.R. aus zehn Elementen und wird ins Modell als „Substructure“ hochgeladen, d.h. man kann eine Reihe von zehn-Elemente-Gelenkketten statt jedes einzelnen Elements erzeugen. Der Name jeder Gelenkkette und jedes dazugehörigen Elements ist von der Art:

- Substructure: \$S\_SE\_x\_y;
- Einzelnes Element: \$S\_SE\_x\_y.\$B\_SE\_z.

Wobei:

S: Substructure

B: Body bzw. Körper

SE: Seilelement

x: Substructure-Nummer

y: Seilfeld-Nummer (I oder II)

<sup>7</sup> Rechn. Anzahl der Elemente =  $\frac{\text{Bogenlänge}}{\text{Elementlänge}}$

z: Body- bzw. Körpermitte in dem *Substructure*.

Die ersten zwei Parameter sind von der Software automatisch angegeben; der Rest ist ein von dem User Umbenannter.

Zum Beispiel wird das sechste Element des dritte *Substructures* im Seilfeld II beschrieben, wie folgt:  $\$S\_SE\_3\_II.\$B\_SE\_6$ .

Die Angaben und die Anzahl der Elemente jedes *Substructure* sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

<u>Seilfeld I</u>			<u>Seilfeld II</u>		
<i>Substructure</i>	Anzahl der Elemente	Seilelementen-Reihenfolge	<i>Substructure</i>	Anzahl der Elemente	Seilelementen-Reihenfolge
$\$S\_SE\_1\_I$	10	1-10	$\$S\_SE\_1\_II$	10	1-10 (32-41)
$\$S\_SE\_2\_I$	10	11-20	$\$S\_SE\_2\_II$	10	11-20 (42-51)
$\$S\_SE\_3\_I$	10	21-30	$\$S\_SE\_3\_II$	10	21-30 (52-61)
$\$S\_SE\_4\_I$	1	31	$\$S\_SE\_4\_II$	10	31-40 (62-71)
<i>insgesamt</i>	<u>31</u>		$\$S\_SE\_5\_II$	10	41-50 (72-81)
			$\$S\_SE\_6\_II$	10	51-60 (82-91)
			$\$S\_SE\_7\_II$	10	61-70 (91-101)
			$\$S\_SE\_8\_II$	10	71-80 (102-111)
			$\$S\_SE\_9\_II$	10	81-90 (112-121)
			$\$S\_SE\_10\_II$	10	91-100 (122-131)
			$\$S\_SE\_11\_II$	10	101-110 (132-141)
			$\$S\_SE\_12\_II$	6	110-116 (142-147)
			<i>insgesamt</i>	<u>116</u>	

Tabelle 3: Substructures des Modells

Das so aufgebaute Modell besteht aus einer Gelenkkette aus 147 Seilelementen. Man erinnert, dass in einem Gelenk kein Biegemoment übertragen werden kann. D.h. das Biegemoment ist gleich Null sowie seine Ableitung, die Querkraft. Die Normalkraft ist die einzige gebliebene Schnittgröße und stimmt mit der Spannkraft in einem Seil überein (5).

#### 5.2.4. Voraussetzungen

Im Zuge des Aufbaus des Modells wurden einige Voraussetzungen angenommen:

- Ein Tragseil statt zwei wurde aufgebaut und eine gleichmäßige Verteilung der Lasten ist vorhanden bzw. das simulierte Seil nimmt das Halbe der Lasten auf (z.B. das Halbgewicht eines Wagens);
- Die zwei Seilfelder sind unabhängig voneinander und deshalb weisen die in der Tabelle 2 angegebenen Elementlängen einen obwohl leicht Unterschied auf;
- Die Seilfelder sind in der Anfangskonfiguration geneigt, um ein statisches Gleichgewicht zu erlauben.

Die Anfangskonfiguration ist in der Abbildung 33 dargestellt. Nur aus Einsehbarkeitsgründen wurde der Tragseildurchmesser geändert.

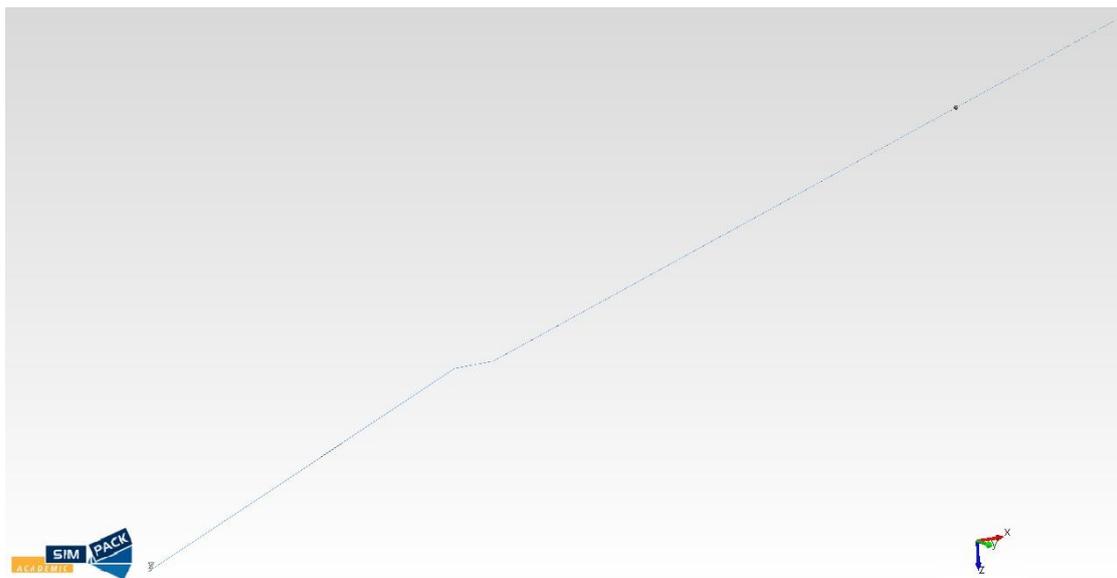


Abbildung 33: Das Modell des Fahrwegs (rechts oben die Einzellast)

### 5.2.5. Bemerkte Schwierigkeiten

Die Festsetzung der Seilfelder war der schwierigste Schritt: Nämlich durch die Angabe hoher Werte von Steifigkeit und Dämpfung (zehn oder auch hundert Tausend Größenordnung) konvergiert die Simulation nicht bzw. kriegte man kein statisches Gleichgewicht<sup>8</sup>, das für die Ermittlung der Ergebnisse notwendig ist. Man könnte denken, dass die zahlreichen beteiligten Komponenten des Modells die Ursache sind, weil die Simulationszeit deutlich langsamer wird, trotzdem ist die Simulation schnell bei bestimmten Paaren Steifigkeit-Dämpfung, die Konvergenz bringen.

Während des Modellaufbaus wurden unterschiedliche Versuche untersucht: Zum Schluss wurde ein Paar Steifigkeit-Dämpfung gleich (20.000 N/m; 2.000 Ns/m) gewählt, obwohl das statische Gleichgewicht nicht in allen untersuchten Fällen bestimmt wurde.

Wegen der hohen Anzahl an in der Simulation beteiligten Elementen ist eine Darstellung des Pendelbahnfahrzeugs von schwieriger Anwendbarkeit. Deshalb wurde entschieden, als Kabine

<sup>8</sup> *Static Equilibrium* auf Englisch.

eine kugelförmige Einzellast mit bestimmtem Gewicht auch für eine deutlichere Einsehbarkeit anzuwenden.

### 5.2.6. Ergebnisse

Drei Fälle wurden simuliert:

1. Das Seil unter dem Eigengewicht;
2. Das Seil unter der Einzellast des vollen Wagens der Pendelbahn in der Seilfeldmitte der beiden Seilfelder;
3. Das Seil unter der Einzellast des vollen Wagens der Pendelbahn entsprechend ein Drittel und zwei Drittel des jeweiligen Seilfelds.

Diese drei Fälle werden auf das jeweilige Seilfeld bezogen und von den folgenden Abkürzungen beschrieben.

Fall	Abkürzung	Bedeutung
<u>Seilfeld I</u>		
1	EG_I	Eigengewichtsstand
3	10_I	Die Einzellast wirkt entsprechend dem 10. Seilelement (1/3 der Seilsehne)
2	FM_I	Feldmitte
3	20_I	Die Einzellast wirkt entsprechend dem 10. Seilelement (2/3 der Seilsehne)
<u>Seilfeld II</u>		
1	EG_II	Eigengewichtsstand
3	39_II	Die Einzellast wirkt entsprechend dem 39. Seilelement des zweiten Seilfelds (1/3 der Seilsehne des zweiten Seilfelds)
2	FM_II	Feldmitte
3	77_II	Die Einzellast wirkt entsprechend dem 77. Seilelement des zweiten Seilfelds (2/3 der Seilsehne des zweiten Seilfelds)

Tabelle 4: Abkürzungen für die ermittelten Fälle

Der maximale Durchhang und die Seilspannkraft wurden anhand des im statischen Gleichgewicht (wenn möglich) Systems ermittelt. Die Vorgangsweise, obwohl sie ein wenig verschieden zwischen dem ersten Fall und den zweiten und dritten Fällen ist, setzt die Berechnung des Abstands zwischen dem niedrigsten Punkt des Seiles und dem entlang der z-

Achse entsprechenden Punkt auf der Seilsehne bzw. auf der Gerade, die eine Station mit der Stütze verbindet, voraus.

### 5.2.6.1. Fall 1: Das Seil unter dem Eigengewicht

Abbildung 34 fasst die im Fall 1 festgesetzte Vorgangsweise zusammen.

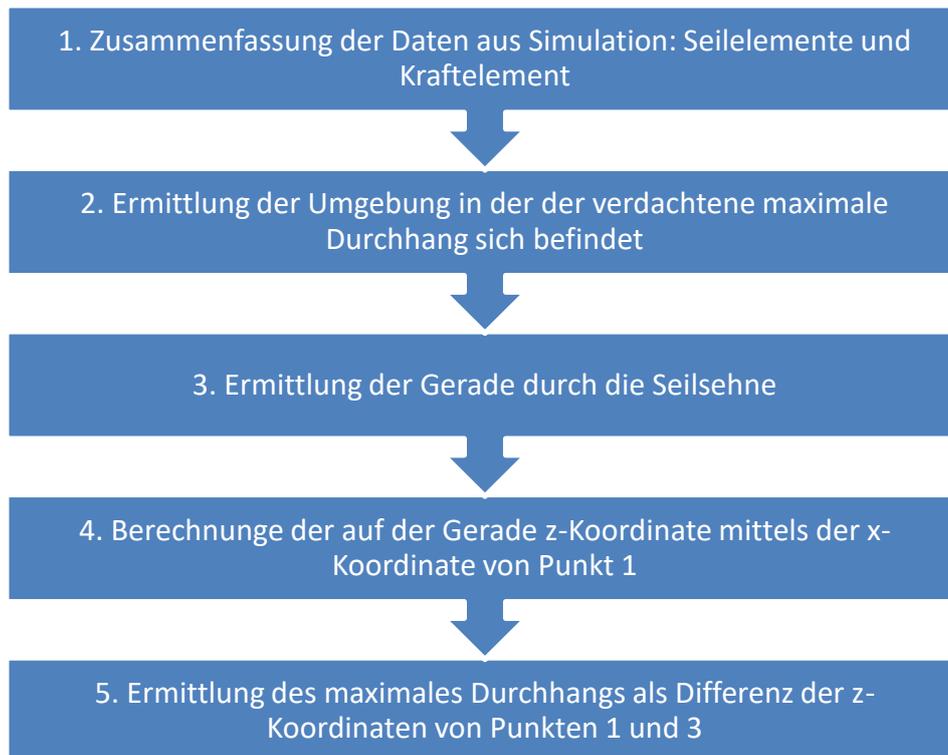


Abbildung 34: Vorgangsweise zur Ermittlung des maximalen Durchhangs im Fall 1

Man erfasse die Daten der Markierungen (\$M) bezogen auf den Ursprung des Bezugssystems (*Isys*).

Name	x [m]	z [m]	Neigung [rad]
\$M_Isys	0	0	0
\$M_Isys_Stuetze	282.41	-134.36	0
\$M_Isys_Bergstation	1379.6	-511.63	0
\$S_SE_1_I.\$M_Isys	0	0	0
\$S_SE_1_I.\$M_SE_1_BRF	4.911121	-1.15452	0.2308904
\$S_SE_1_I.\$M_SE_1_h	0	0	0.2308904
\$S_SE_1_I.\$M_SE_1_v	9.822242	-2.30904	0.2308904
\$S_SE_1_I.\$M_SE_2_BRF	14.7148	-3.539852	0.2464539
\$S_SE_1_I.\$M_SE_2_h	9.822242	-2.30904	0.2464539

Name	x [m]	z [m]	Neigung [rad]
\$\$SE_1_I.\$M_SE_2_v	19.60736	-4.770663	0.2464539
\$\$SE_1_I.\$M_SE_3_BRF	24.48033	-6.076878	0.2618965
\$\$SE_1_I.\$M_SE_3_h	19.60736	-4.770663	0.2618965
\$\$SE_1_I.\$M_SE_3_v	29.3533	-7.383094	0.2618965

Tabelle 5: Ein Auszug der Ergebnisse (bezogen auf Seilfeld I)

Außerdem wurde die Verschiebung des Kraftelements eingetragen, wobei „Abs“ die Länge der Verschiebung darstellt.

Force Element Stütze			
x	z	Abs <sub>KE</sub>	Neigung
1.786289 m	-1.318072 m	2.219942 m	-0.630343 rad

Tabelle 6: Das verschobene Kraftelement entsprechend der Stütze im Seilfeld I

Man will angeben, dass die Werte nach der z-Achse negativ sind, weil das gewählte Bezugssystem nach unten positiv ist (siehe bspw. Abbildung 31).

Wie oben erwähnt sind die Daten auf den Ursprung des Bezugssystems bezogen aber das bedeutet, dass die Daten der Seilelemente im Seilfeld II die horizontalen und waagrechen Abstände vom Seilfeld I enthalten: Deshalb wurden diese letzten abgezogen.

Anschließend wurde der Bereich mit dem größten Durchhang ermittelt: Um der Feldmitte wurden 22 Daten der vorderen Markierungen gewählt.

Die Gerade durch die Seilsehne wurde leicht ermittelt und ist:

$$y = -0,47576219 x \quad \text{Für Seilfeld I}$$

$$y = -0,34385111 x \quad \text{Für Seilfeld II}$$

Die ermittelten Werte nach der x-Achse wurden in der Gleichung der Gerade eingesetzt, um die z-Koordinate auf der Seilsehne zu finden. Der Differenz zwischen der berechneten z-Koordinate und jener von der Simulation gibt den maximalen Durchhang. Nach den Ermittlungen sowie der Tabelle 7 wäre dies entsprechend dem Seilelement 9 (rot markiert). Allerdings ist dieses Ergebnis zu nah dem Seilanfang; außerdem weisen die Elemente von 7 bis 9 eine starke und plötzliche Erhöhung, deren Ursprung nicht deutlich ist, und wurden deshalb nicht berücksichtigt. Daher befindet der maximale Durchhang sich entsprechend dem Seilelement Nr. 15 bzw. bei seinem Ende. Analog im Seilfeld II ist der maximale Durchhang zwischen dem Element 6 und 7 des sechsten *Substructure* bzw. Element 57 des Seilfelds II.

Element im Seilfeld I	$f_{\max}$ [m]	Element im Seilfeld II	$f_{\max}$ [m]
\$\$SE_1_I.\$M_SE_6_v	11,648	\$\$SE_6_II.\$M_SE_2_v	68,375
\$\$SE_1_I.\$M_SE_7_v	27,537	\$\$SE_6_II.\$M_SE_3_v	68,544
\$\$SE_1_I.\$M_SE_8_v	29,455	\$\$SE_6_II.\$M_SE_4_v	68,673
<b>\$\$SE_1_I.\$M_SE_9_v</b>	<b>31,2</b>	\$\$SE_6_II.\$M_SE_5_v	68,759
\$\$SE_1_I.\$M_SE_10_v	16,098	\$\$SE_6_II.\$M_SE_6_v	68,804
\$\$SE_2_I.\$M_SE_1_v	16,808	<b>\$\$SE_6_II.\$M_SE_7_v</b>	<b>68,807</b>
\$\$SE_2_I.\$M_SE_2_v	17,361	\$\$SE_6_II.\$M_SE_8_v	68,77
\$\$SE_2_I.\$M_SE_3_v	17,758	\$\$SE_6_II.\$M_SE_9_v	68,690
\$\$SE_2_I.\$M_SE_4_v	18,001	\$\$SE_6_II.\$M_SE_10_v	68,570
<b>\$\$SE_2_I.\$M_SE_5_v</b>	<b>18,091</b>	\$\$SE_7_II.\$M_SE_1_v	68,409
\$\$SE_2_I.\$M_SE_6_v	18,031	\$\$SE_7_II.\$M_SE_2_v	68,207

Tabelle 7: Ermittlung des maximalen Durchhangs in den zwei Seilfeldern

### 5.2.6.2. Fall 2 und 3: Das Seil unter der Einzellast

Fall 2 und Fall 3 wurden ähnlich zum Fall 1 ermittelt, aber die Ermittlung des maximalen Durchhangs ist leichter, weil die Lage der Einzellast den tiefsten Punkt des Seiles darstellt.

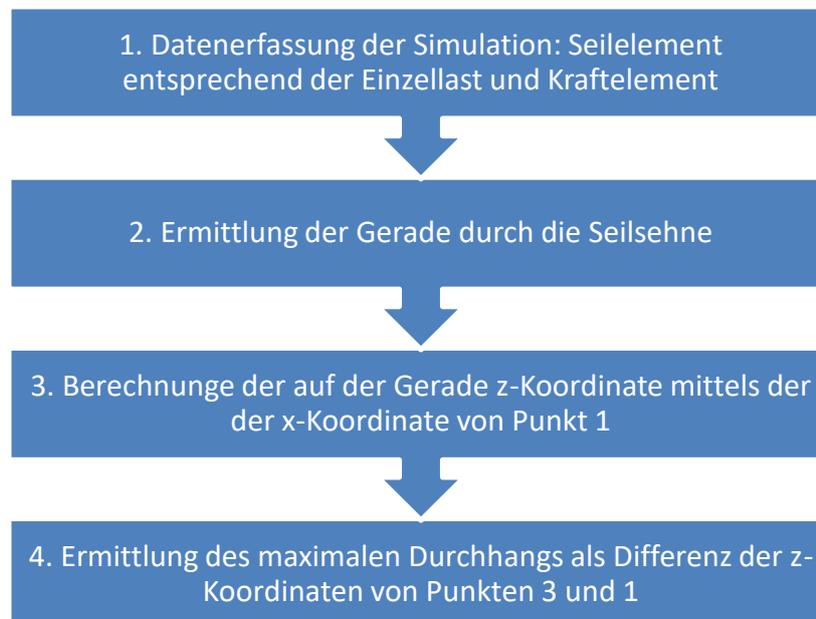


Abbildung 35: Vorgangsweise zur Ermittlung des maximalen Durchhangs in den Fällen 2 und 3

Die folgenden Abbildungen zeigen das Modell nach der Simulation in dem Eigengewichtsstand und in dem Feldmittenstand bezogen auf Seilfeld I. Die Abbildungen der anderen Fälle sind im Anhang 3 (siehe Seite 83) einsehbar.

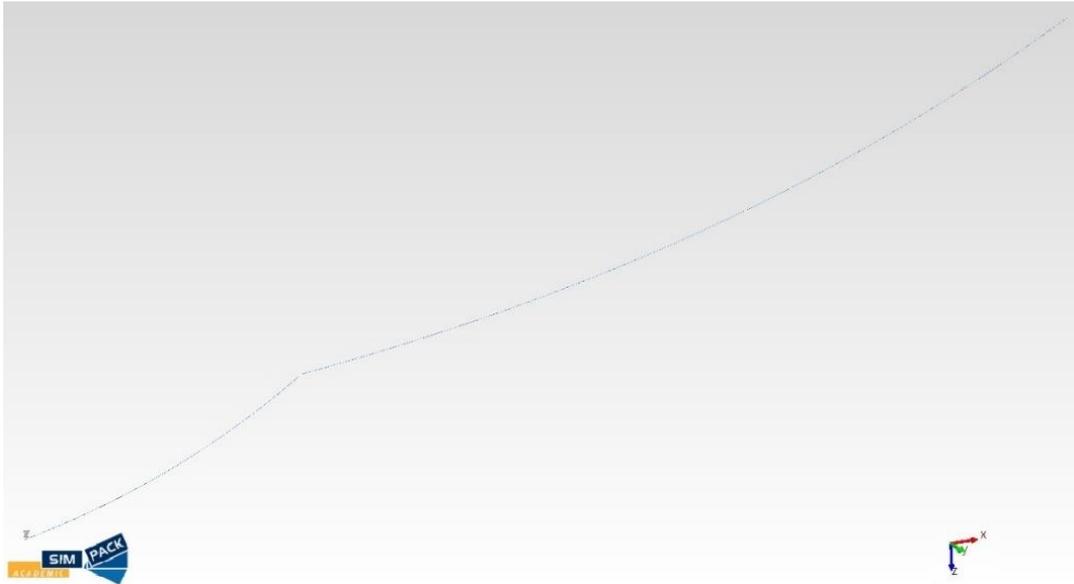


Abbildung 36: Seilfelderstand in den EG\_I- und EG\_II-Fällen

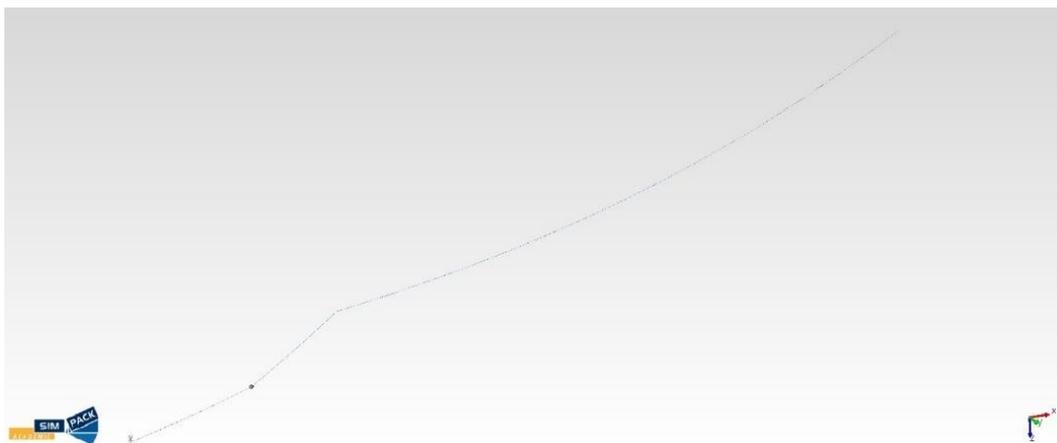


Abbildung 37: Seilfelderstand in dem FM\_I-Fall

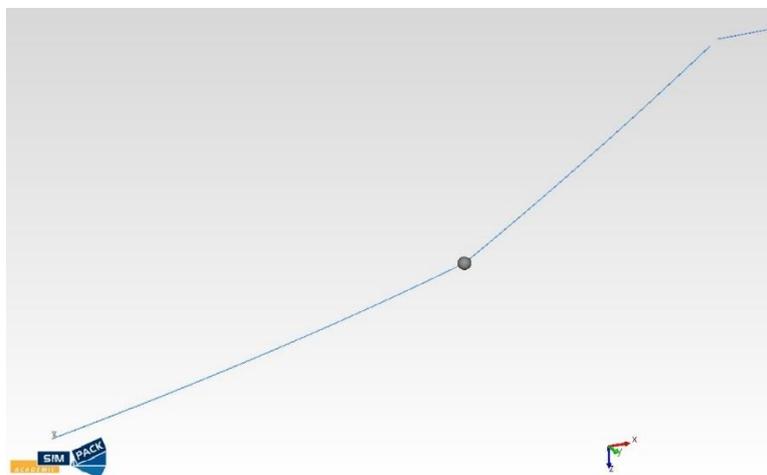


Abbildung 38: Detail von der Abbildung 37

Hier ist die Untersuchung ab sofort auf einen Punkt beschränkt und die Ergebnisse sind so zusammengefasst:

Fall	Entspr. Seilelement	fmax [m]
10_I	\$\$SE_1_I.\$M_SE_10_v	28,257
FM_I	\$\$SE_2_I.\$M_SE_5_v	30,914
20_I	\$\$SE_2_I.\$M_SE_10_v	29,023
39_II	\$\$SE_4_II.\$M_SE_9_v	82,542
FM_II	\$\$SE_6_II.\$M_SE_7_v	89,511
77_II	\$\$SE_8_II.\$M_SE_7_v	81,445

Tabelle 8: Maximaler Durchhang pro Fall und Seilfeld

Die folgende Tabelle fasst die Ergebnisse aller Fälle zusammen.

Fall	Entspr. Seilelement	fmax [m]
EG_I	\$\$SE_2_I.\$M_SE_5_v	18,091
10_I	\$\$SE_1_I.\$M_SE_10_v	28,257
FM_I	\$\$SE_2_I.\$M_SE_5_v	30,914
20_I	\$\$SE_2_I.\$M_SE_10_v	29,023
EG_II	\$\$SE_6_II.\$M_SE_7_v	68,807
39_II	\$\$SE_4_II.\$M_SE_9_v	82,542
FM_II	\$\$SE_6_II.\$M_SE_7_v	89,511
77_II	\$\$SE_8_II.\$M_SE_7_v	81,445

Tabelle 9: Zusammenfassung der Ergebnisse der maximalen Durchhänge je Fall

Die Ergebnisse sind leider sehr von der Wirklichkeit sehr abweichend. Nämlich ist der Durchhang nach dem Längenschnitt wie folgt:

Durchhang	Seilfeld I [m]	Seilfeld II [m]
$f_{\min}$	2,56	33,56
$f_{\max}$	8,73	55,75

Tabelle 10: Durchhänge gemäß dem Längenschnitt

Durch die Berechnung der Abweichung der Datensätze und des %-Fehler wurde ein Vergleich für die entsprechenden Fälle durchgeführt:

Fall	$f_{\max}$ nach Tabelle 10	$f_{\max}$ nach Tabelle 9	Rechn. Abweichung und %-Fehler
EG_I	2,56	18,091	15,531 (606,68 %)
EG_II	8,73	68,807	60,077 (688,167 %)
FM_I	33,56	30,914	2,646 (7,884 %)
FM_II	55,75	89,511	33,761 (60,558 %)

Tabelle 11: Rechnerische Abweichung in [kN] und Fehler in % des maximalen Durchhangs (Längenschnitt vs. Simulation)

Die Tabelle 11 zeigt eine starke Abweichung der Simulationsergebnisse von der Wirklichkeit und daher stellt das Modell kein gutes Beispiel des realen Beispiels dar.

Die Ursache liegt hauptsächlich in der Verschiebung des Kraftelements, da, wie bereits gesagt, das Seilfeld sinkt und daher der maximale Seildurchhang sich verlängert.

Ein weiterer zu berücksichtigender Punkt ist das Paar Steifigkeit-Dämpfung, das gewählt wurde, um eine bessere Simulation sowie mehr konvergente Fälle zu vergünstigen. Im Zuge der Versuche, um das beste Paar zu finden, bemerkte man, dass je höher die Steifigkeit war, desto starrer wurde die Seillinie bzw. wurde sie ähnlicher einer Geraden. Das Interesse war ein angemessenes Paar für die Konvergenz des statischen Gleichgewichts zu finden. Außerdem nicht alle Stände wiesen eine Konvergenz auf, sondern:

Fall	Seilfeld	Art	Konvergenz?
EG_I	I	Eigengewicht	Ja
10_I	I	$\frac{1}{3}$ Seilsehne	Ja
FM_I	I	Feldmitte	Nein
20_I	I	$\frac{2}{3}$ Seilsehne	Ja
EG_II	II	Eigengewicht	Ja
39_II	II	$\frac{1}{3}$ Seilsehne	Nein
FM_II	II	Feldmitte	Nein
77_II	II	$\frac{2}{3}$ Seilsehne	Ja

Tabelle 12: Konvergierende Fälle anhand des Aufbaus des Modells

## 6. Der Vergleich mit den analytischen Ergebnissen

Die analytischen Ergebnisse wurden mittels der im Kapitel 3.3.4 erwähnten Methode der Querkräfte sowie des Fundamentalsatzes der Seilstatik, der im Kapitel 3.4 beschrieben wurde, ermittelt.

### 6.1. Der Vergleich mit der Methode der Querkräfte

#### 6.1.1. Die Ermittlung des maximalen Durchhangs

Aus Kapitel 3.3.4 erinnert man die Gleichung bei schrägen Sehnen:

$$S^3 + S^2 EA \left[ 1 - \frac{1}{s_0} (l_s - \alpha_t \Delta t s_0) \right] = \frac{EA \cos \gamma}{2s_0} \int_0^l Q^2 dx$$

Die Temperaturänderung wurde nicht im Zuge dieser Arbeit berücksichtigt, deshalb ist der Teil  $\alpha_t \Delta t s_0 = 0$  und zwar:

$$S^3 + S^2 EA \left( 1 - \frac{l_s}{s_0} \right) = \frac{EA \cos \gamma}{2s_0} \int_0^l Q^2 dx$$

Außerdem ist das Integral abhängig von den Lasten und der Länge der Seilsehne. Aus dem Kapitel 3.3.3 bzw. dem Anhang 1 (siehe Seite 79) beträgt bspw. bei linienverteilten Lasten (Seil unter dem Eigengewicht):

$$\int_0^l Q^2 dx = \frac{q^2 l^3}{12}$$

Da die Seilsehne schräg ist und da die wirkenden Lasten lotrecht der Seilsehne sein müssen, setzt das Eigengewicht  $q$  um:

$$q_{lot} = q \cos^2 \gamma$$

Deshalb ändert auch das Integral sich, da es entlang der schrägen Seilsehne  $l_s$  wirkt:

$$\int_0^{l_s} Q^2 dt = \frac{q_{lot}^2 l_s^3}{12}$$

Die Verschiebung des Kraftelements verursacht eine Verkürzung der schrägen Seilsehne, deshalb muss die Seilsehne und die jeweiligen Komponenten geändert werden. Da die Verschiebung des Kraftelements um einen nicht gleich dem Sehnen- Neigungswinkel geneigt ist, beträgt die tatsächliche Seilsehne des verschobenen Systems

$$l'_s = l_s - Abs_{KE} \cos(\gamma - \theta)$$

Wobei

$l'_s$  ist die Seilsehne des verschobenen Systems

$l_s$  ist die ursprüngliche Seilsehne

$Abs_{KE}$  ist die Länge der Verschiebung und entspricht dem Wert in der dritten Spalte des Beispiels in der Tabelle 6

$\gamma$  ist der Sehnenneigungswinkel

$\theta$  ist der Neigungswinkel des Kraftelements.

Mit anderen Worten ist  $Abs_{KE} \cos(\theta - \gamma)$  die Projizierung der Verschiebung des Kraftelements auf die Seilsehne.

Die nächste Abbildung bietet ein besseres Verständnis an.

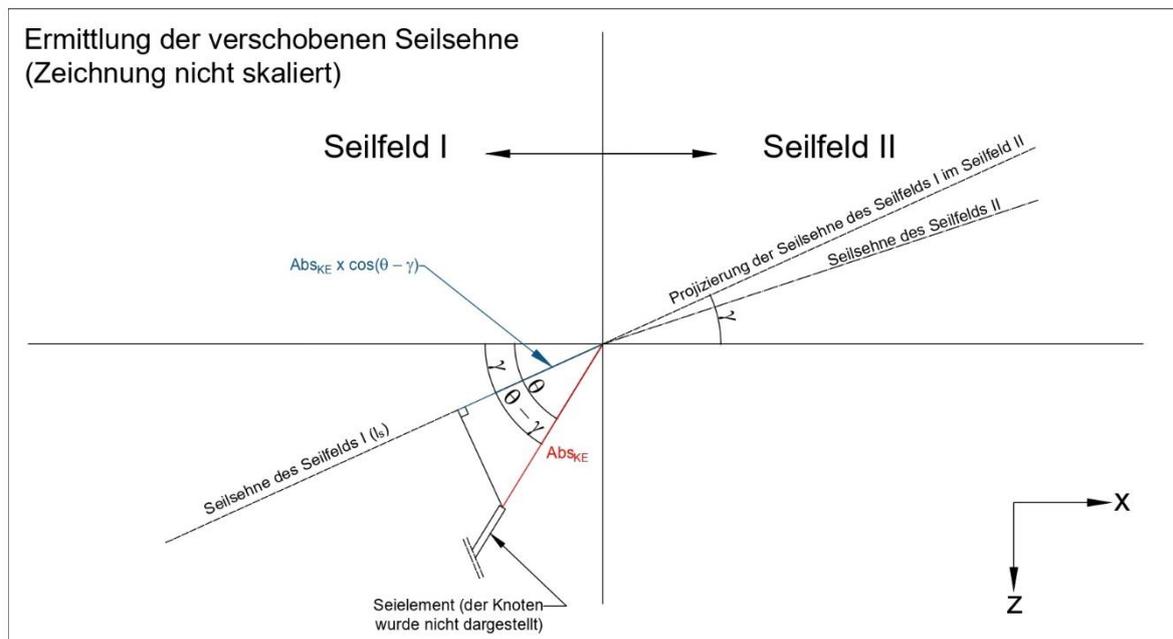


Abbildung 39: Ermittlung der verschobenen Seilsehne in Bezug auf das Kraftelement

Das Elastizitätsmodul  $E$  wurde  $170.000 \text{ N/mm}^2$  gewählt; der Querschnitt  $A$  des Tragseils wurde nach der seilbahntechnischen Berechnung gegeben und beträgt  $712 \text{ mm}^2$ . Dieser Wert stellt den metallischen Querschnitt dar.

Wie bereits diskutiert im Kapitel 3.2 und indem man erinnert, dass  $a = \frac{H}{q}$ , ist der Durchhang in der Feldmitte:

$$f_m = \frac{l^2}{8a} = \frac{q l^2}{8 H} = \frac{q l^2}{8 S \cos \gamma}$$

Diese Formel ist nicht mehr gültig bei der Wirkung der Einzellast bzw. des vollen Wagens  $P$  und deshalb wurde die allgemeine Form verwendet, d.h.

$$f_{max} = \frac{\max M}{H}$$

Wobei  $\max M$  das maximale Biegemoment in dem Seilfeld bzw. in dem Punkt, wo die Einzellast wirkt, und  $H$  die horizontale Komponente der Seilspannkraft sind.

Zusammenfassend wurde zuerst die Seilspannkraft  $S$  ermittelt, anschließend wurden die Horizontalkraft  $H$  oder das Biegemoment  $max M$  (nur in den Fällen 2 und 3) berechnet und zum Schluss der maximale Durchhang ermittelt.

Die Daten für die Berechnung sind in der Tabelle 13 zusammengefasst.

Einheit	Wert		Anmerkungen
	Seilfeld I	Seilfeld II	
$q_{lot}$	47,59877054 N/m	52,19518521 N/m	$q \cos^2 \gamma g$
$W_{lot}$	228556,5092 N	239337,6091 N	$\cos \gamma \frac{W}{2} g^9$
$l_s$	312,74 m	1160,24 m	
$l'_s$	Ändert sich weil abhängig von der Verschiebung des Kraftelements		$l'_s = l_s - Abs_{KE} \cos(\varphi - \theta)$
$a'$	Abhängig von dem Ort von $W_{lot}$		$a' = Abs_{SE} \cos(\gamma - \vartheta)^{10}$
$b'$			$b' = l'_s - a'$
$s_0$	312,79 m	1162,41 m	
$s_0'$	312,79 m	1162,41 m	Die Bogenlänge hier ist eine Reihenfolge von starren Elementen, deshalb kann nicht ihre Länge ändern.
$\gamma$	0,444011762 rad	0,331263492 rad	Sehnenwinkel
$E$	170.000 N/mm <sup>2</sup>		
$A$	712 mm <sup>2</sup>		

Tabelle 13: Daten für die analytische Ermittlung

In Bezug auf die Parameter  $a'$  und  $b'$  stellt  $Ab_{SE}$  der Abstand zwischen dem Anfang des Seilfelds und dem Seilort, wo die Einzellast  $W_{lot}$  wirkt, und wird durch den Satz des Pythagoras ermittelt. Die Neigung  $\vartheta$  solcher Länge ist nicht gleich jener der Seilsehne und deshalb wird dieser Fall auf die gleiche Weise des Kraftelements behandelt.

Die Ergebnisse aller Fälle sind in der nächsten Tabelle dargestellt.

<sup>9</sup> Siehe die erste Voraussetzung im Kapitel 5.2.4.

<sup>10</sup>  $\vartheta$  ist der Neigungswinkel von  $Ab_{SE}$  und wird so ermittelt:  $\vartheta = \tan^{-1}(z/x)$ , wobei  $(x,z)$  die Koordinaten des berücksichtigten Seilelements sind.

Fall	Entspr. Seilelement	$f_{\max}$ [m]
EG_I	\$\$SE_2_I.\$M_SE_5_v	22,152
10_I	\$\$SE_1_I.\$M_SE_10_v	29,046
FM_I	\$\$SE_2_I.\$M_SE_5_v	41,525
20_I	\$\$SE_2_I.\$M_SE_10_v	29,023
EG_II	\$\$SE_6_II.\$M_SE_7_v	81,064
39_II	\$\$SE_4_II.\$M_SE_9_v	56,847
FM_II	\$\$SE_6_II.\$M_SE_7_v	145,682
77_II	\$\$SE_8_II.\$M_SE_7_v	199,401

Tabelle 14: Ergebnisse des maximalen Durchhangs mit der analytischen Ermittlung

Eine rechnerische Abweichung zwischen den Daten (im absoluten Wert) mit dem Fehler im Prozentsatz (in Klammern) wurde als Vergleich zwischen den analytischen Ergebnissen und den Ergebnissen von der Simulation (Tabelle 9) und den analytischen Ergebnissen und den Daten aus der seilbahntechnischen Berechnung (Tabelle 16) durchgeführt.

Fall	$f_{\max}$ nach Tabelle 9	$f_{\max}$ nach Tabelle 14	Rechn. Abweichung und %-Fehler
EG_I	18,091	22,152	4,061 (22,448 %)
EG_II	68,807	81,064	12,257 (17,814 %)
FM_I	30,914	41,525	11,331 (36,653 %)
FM_II	89,511	145,682	56,171 (62,753 %)

Tabelle 15: Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und den analytischen Ergebnissen

Fall	$f_{\max}$ nach Tabelle 10	$f_{\max}$ nach Tabelle 14	Rechn. Abweichung und %-Fehler
EG_I	2,56	22,152	19,592 (765,313 %)
EG_II	8,73	81,064	72,334 (828,568 %)
FM_I	33,56	41,525	7,965 (23,734 %)
FM_II	55,75	145,682	89,932 (161,313 %)

Tabelle 16: Rechnerische Abweichung in [kN] und Fehler in % des maximalen Durchhangs (Längenschnitt vs. Methode der Querkräfte)

Alle Fälle deutlich stimmen weder mit der Simulation überein (Tabelle 9) noch mit den Daten der seilbahntechnischen Berechnung (Tabelle 10) (das gilt nur für Fall 2-Feldmitte). Außerdem weichen auch die Kräfte sich von den Standarddaten ab.

### 6.1.2. Die Ermittlung der Seilspannkraft

Die Ermittlung der Seilspannkraft ist Voraussetzung für die Berechnung des maximalen Seildurchhangs, weil die Horizontalkraft  $H$  Projektion der Spannkraft  $S$  ist. Die Ergebnisse, woraus die Durchhänge abstammen, sind:

Fall	Entspr. Seilelement	Seilspannkraft $S$ [kN]
EG_I	$\$S_{SE\_2\_I}.\$M_{SE\_5\_v}$	35,186
10_I	$\$S_{SE\_1\_I}.\$M_{SE\_10\_v}$	520,774
FM_I	$\$S_{SE\_2\_I}.\$M_{SE\_5\_v}$	550,009
20_I	$\$S_{SE\_2\_I}.\$M_{SE\_10\_v}$	534,752
EG_II	$\$S_{SE\_6\_II}.\$M_{SE\_7\_v}$	126,479
39_II	$\$S_{SE\_4\_II}.\$M_{SE\_9\_v}$	678,817
FM_II	$\$S_{SE\_6\_II}.\$M_{SE\_7\_v}$	709,141
77_II	$\$S_{SE\_8\_II}.\$M_{SE\_7\_v}$	679,168

Tabelle 17: Ermittelte Seilspannkraft mit der Methode der Querkräfte

Im Gegensatz betragen die Seilspannkraft gemäß der seilbahntechnischen Berechnung anders. Die folgenden Daten sind auf die gesamte Anlage bzw. auf beide Seile bezogen und sind nur für den Eigengewichts- und Feldmittenfall vorhanden.

Fall	Seilspannkraft $S$ [kN]
EG_I	596,97
EG_II	641,58
FM_I	594,48
FM_II	645,94

Tabelle 18: Seilspannkraft gemäß der seilbahntechnischen Berechnung

Fall	$S$ nach Tabelle 18	$(S$ nach Tabelle 17) $\times 2$	Rechn. Abweichung und %-Fehler
EG_I	596,97	76,372	520,598 (87,207 %)
EG_II	641,58	1100,018	458,438 (71,455 %)
FM_I	594,48	252,958	341,522 (57,449 %)
FM_II	645,94	1418,282	772,342 (119,569 %)

Tabelle 19: Rechnerische Abweichung in [kN] und Fehler in % der Seilspannkraft (seilbahntechnische Berechnung vs. Methode der Querkräfte)

Die Abweichung und der Fehler im Prozentsatz zeigen eine starke Inkongruenz zwischen den zwei Datensätzen.

Zusammenfassend stellt die Methode der Querkräfte nicht eine gute Lösung für die Überprüfung der Ergebnisse der Simulationen dar: Die Daten sind zu abweichend von dem Modell und deswegen ist ein Vergleich nicht möglich. Eine mögliche Erklärung liegt in den Komponenten der Gleichung der Methode: Nämlich werden viele Parameter, die die Eigenschaften des Seiles und des Seilfelds umfassen, berücksichtigt, wie das Elastizitätsmodul  $E$ , der Seilquerschnitt, die Bogenlänge  $s_0$ .

In vielen Literaturquellen kommen keine oder einige von diesen Parametern zur Anwendung in der Ermittlung der Seilspannkraft und des maximalen Durchhangs, sondern die linienverteilte Last und der Höhenunterschied sind die maßgeblichen Daten für die Berechnung der Seilspannkraft. Der Fundamentalsatz der Seilstatik arbeitet auf diese Weise.

## 6.2. Der Vergleich mit dem Fundamentalsatz der Seilstatik

### 6.2.1. Die Ermittlung des maximalen Durchhangs

Der im Kapitel beschriebene Fundamentalsatz der Seilstatik fasst die ganzen wirkenden Lasten und Kräfte auf einem Seilfeld in einer einzigen Gleichung zur Ermittlung des maximalen Durchhangs  $f_x$  in jedem beliebigen Punkt  $x$ , in dem i.d.R. die Einzellast wirkt, zusammen.

In dieser Arbeit sind die wirkenden Kräfte:

- Die Grundspannkraft  $S_0$ , die i.d.R. konstant ist und einen Gleichgewichtsstand in den Seilfelder gewährleistet;
- Das Eigengewicht des Tragseils  $q'$ ;
- Die Einzellast  $W$  bzw. der volle Wagen.

Das einzelne Biegemoment jeder Kraft beträgt:

$$M_{S_0} = -S_0 f_x \cos\gamma \quad M_q = \frac{q'x(l-x)}{2} = \frac{qx(l-x)}{2 \cos\gamma} \quad M_p = \frac{Wx(l-x)}{l}$$

Wobei:

$x$  ist der Abstand von dem Anfang des Seilfeld bis dem Punkt, in dem die Einzellast wirkt;

$l$  ist die Länge der Seilsehne;

$q'$  ist das linienverteilte Eigengewicht des Seiles;

$q$  ist das auf der Seilsehne linienverteilte Eigengewicht des Seiles.

Da das resultierende Biegemoment gleich Null sein muss, dann

$$M_{S_0} + M_q + M_p = 0$$

$$-S_0 f_x \cos\gamma + \frac{qx(l-x)}{2 \cos\gamma} + \frac{Wx(l-x)}{l} = 0$$

$$f_x = \left[ \frac{qx(l-x)}{2 \cos\gamma} + \frac{Wx(l-x)}{l} \right] \frac{1}{S_0 \cos\gamma}$$

Mit der ermittelten Gleichung kann der maximale Durchhang ermittelt werden. Wegen der Voraussetzungen vom Kapitel 5.2.4 wurde das Halbe von der Grundspannkraft verwendet. Außerdem in der seilbahntechnischen Berechnung wurde die Spannkraft von dem Spangewicht bis zur Ausfahrt von der Talstation berechnet: Die ursprüngliche Grundspannkraft beträgt insgesamt 585 kN bei dem Spangewicht; bei der Talstation beträgt es 585,89 kN. Man nutzte den zweiten Wert.

Außerdem wurde als  $x$  die x-Koordinate aus der Simulation aufgenommen.

Die Ergebnisse sind daher:

Fall	entspr. Seilelement	$f_{\max}$ [m]
EG_I	\$\$S_{SE_2_I}.\$M_{SE_5_v}	2,405
10_I	\$\$S_{SE_1_I}.\$M_{SE_{10}_v}	8,396
FM_I	\$\$S_{SE_2_I}.\$M_{SE_5_v}	9,133
20_I	\$\$S_{SE_2_I}.\$M_{SE_{10}_v}	7,869
EG_II	\$\$S_{SE_6_{II}}.\$M_{SE_7_v}	33,077
39_II	\$\$S_{SE_4_{II}}.\$M_{SE_9_v}	53,404
FM_II	\$\$S_{SE_6_{II}}.\$M_{SE_7_v}	58,191
77_II	\$\$S_{SE_8_{II}}.\$M_{SE_7_v}	50,024

Tabelle 20: Maximaler Durchhang ermittelt mit dem Fundamentalsatz der Seilstatik

Diese Ergebnisse weisen eine bessere und vergleichbare Annäherung der Daten aus dem Längenschnitt auf. Die Tabelle 10 wird wieder dargestellt.

Durchhang	Seilfeld I [m]	Seilfeld II [m]
$f_{\min}$	2,56	33,56
$f_{\max}$	8,73	55,75

Tabelle 10: Durchhänge gemäß dem Längenschnitt

Trotz des Mangels einer genauen Übereinstimmung zwischen den zwei Tabellen ist eine Annäherung der Ergebnisse zu den Daten viel mehr ersichtlich im Vergleich zu den mit der Methode der Querkräfte erhaltenen Daten.

Die rechnerische Abweichung zwischen den Daten (im absoluten Wert) und der Fehler im Prozentsatz (in Klammern) betragen:

Fall	$f_{\max}$ nach Tabelle 10	$f_{\max}$ nach Tabelle 20	Rechn. Abweichung und %-Fehler
EG_I	2,56	2,405	0,155 (6,055 %)
EG_II	33,56	33,077	0,483 (1,439 %)
FM_I	8,73	9,133	0,403 (4,616 %)
FM_II	55,75	58,191	2,441 (4,348 %)

Tabelle 21: Rechnerische Abweichung in [m] und %-Fehler zwischen der seilbahntechnischen Berechnung und des Fundamentalsatzes der Seilstatik

Fall	$f_{\max}$ nach Tabelle 9	$f_{\max}$ nach Tabelle 20	Rechn. Abweichung und %-Fehler
EG_I	18,091	2,405	0,155 (6,055 %)
EG_II	68,807	33,077	0,483 (1,439 %)
FM_I	30,914	9,133	0,403 (4,616 %)
FM_II	89,511	58,191	2,441 (4,348 %)

Tabelle 22: Rechnerische Abweichung in [m] und %-Fehler zwischen den Daten der Simulation und des Fundamentalsatzes der Seilstatik

Diese letzte Ermittlung ist tatsächlich unnötig, weil es bereits bestätigt wurde, dass die Simulationsergebnisse nicht mit dem realen Beispiel (Tabelle 11) übereinstimmen, aber jene des Fundamentalsatzes (Tabelle 21) stimmen relativ gut mit der Wirklichkeit überein, indem sie einen %-Fehler unter dem 10% aufweisen. Der durchschnittliche Fehler liegt um 4,115%.

*Simulation  $\neq$  reales Beispiel  $\approx$  Fundamentalsatz der Seilstatik*

### 6.2.1.1. Exkurs: Die Ermittlung des minimalen Bodenabstands

Die gute Übereinstimmung des Vergleichs „Fundamentalsatz vs. reales Beispiel“ führte zum Interesse, den minimalen Bodenabstand im Seilfeld I zu ermitteln und die Ergebnisse zwischen den zwei Fällen zu vergleichen.

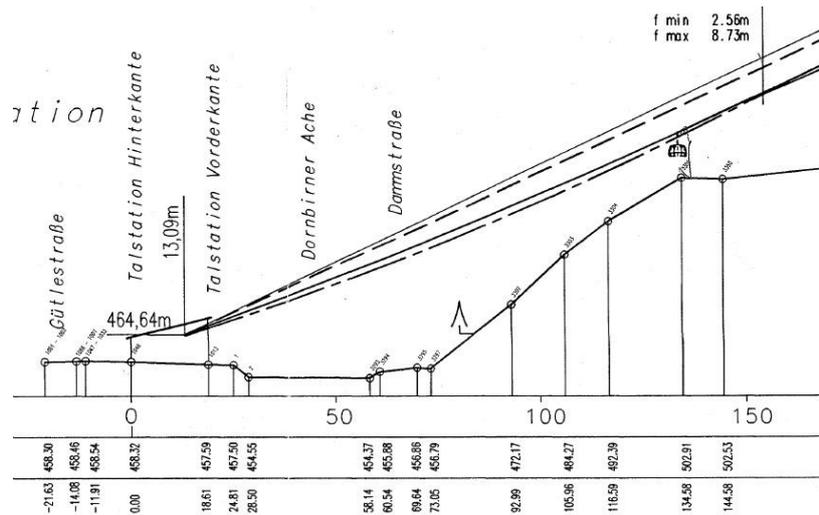


Abbildung 40: Minimaler Bodenabstand im Seilfeld I im Längenschnitt (Detail, überarbeitet)

Um dies nachzuweisen, wurde der minimale Bodenabstand anhand der Daten des Längenschnitts sowie der seilbahntechnischen Beschreibung, die die äußere Länge der Kabine, 4,27 m, angibt, ermittelt. Man muss berücksichtigen, dass nicht der Boden, sondern die vordere Kante der Kabine in solchen Anlagen die Bodenerde berühren würde. Deshalb erfolgte die Berechnung nicht in Abhängigkeit der Mitte der Kabine, sondern der vorderen Kante.

Da der Ort sich nah dem maximalen Seildurchhang befindet, wurde auch als Nachteil der Wert des maximalen Durchhangs verwendet.

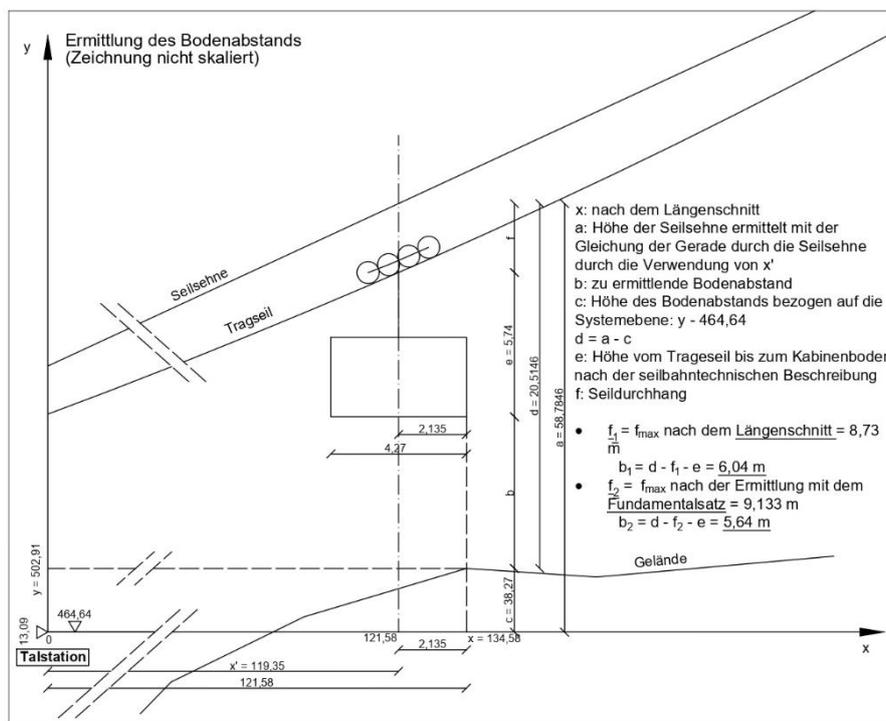


Abbildung 41: Ermittlung des minimalen Bodenabstands

Aus der Abbildung 40 beträgt der Bodenabstand mit der Datei aus dem Längenschnitt 6,04 m, während mit dem Ergebnis aus dem Fundamentalsatz 5,94 m.

### 6.2.2. Die Ermittlung der Seilspannkraft

Die Überprüfung der Seilspannkraft erfolgt mit der Ermittlung einer Gleichung ähnlich der vorigen für die Ermittlung des maximalen Durchhangs, aber in Abhängigkeit von der Seilspannkraft: Dafür wurde auch die der Gleichung (15) vom Kapitel 3.2 verwendet:

$$M_{S_0} + M_q + M_P = 0$$

$$-S_0 f_x \cos\gamma + \frac{qx(l-x)}{2 \cos\gamma} + \frac{Wx(l-x)}{l} = 0$$

$$S = qy \quad (15)$$

$$q = \frac{S}{y}$$

wobei  $y$  der Höhenunterschied zwischen dem berücksichtigten Punkt auf der Seilsehne und dem Anfang der Seilsehne bzw. des Seilfelds ist und entspricht der mit der Gleichung der Gerade ermittelten  $z$ -Koordinate. Deshalb wurde er so unbenannt:

$$q = \frac{S}{z}$$

$$-S_0 f_x \cos\gamma + \frac{Sx(l-x)}{2z \cos\gamma} + \frac{Wx(l-x)}{l} = 0$$

$$S = \left[ S_0 f_x \cos\gamma - \frac{Wx(l-x)}{l} \right] \frac{2z \cos\gamma}{x(l-x)}$$

Man muss aber erinnern, dass die Grundspannkraft  $S_0$  bei einem fixgespannten Seil maßgeblich ist. Daher setzt die Gleichung (15) um:

$$S = S_0 + qy$$

Und deshalb:

$$q = \frac{S - S_0}{z}$$

$$S = \left[ S_0 f_x \cos\gamma - \frac{Px(l-x)}{l} \right] \frac{2z \cos\gamma}{x(l-x)} + S_0$$

Mit dieser neuen Gleichung wurden die Seilspannkraft ermittelt. Nach der Tabelle 23 folgen die Daten, die bereits im Kapitel 6.1.2 dargestellt wurden, der seilbahntechnischen Berechnung.

Fall	Entspr. Seilelement	Seilspannkraft S [kN]
EG_I	\$\$SE_2_I.\$M_SE_5_v	310,628
10_I	\$\$SE_1_I.\$M_SE_10_v	320,37
FM_I	\$\$SE_2_I.\$M_SE_5_v	332,55
20_I	\$\$SE_2_I.\$M_SE_10_v	350,128
EG_II	\$\$SE_6_II.\$M_SE_7_v	315,704
39_II	\$\$SE_4_II.\$M_SE_9_v	307,731
FM_II	\$\$SE_6_II.\$M_SE_7_v	313,958
77_II	\$\$SE_8_II.\$M_SE_7_v	323,14

Tabelle 23: Seilspannkraft ermittelt mit dem Fundamentalsatz der Seilstatik

Fall	Seilspannkraft S [kN]
EG_I	596,97
EG_II	641,58
FM_I	594,48
FM_II	645,94

Tabelle 18: Seilspannkraft gemäß der seilbahntechnischen Berechnung

Man muss erinnern, dass die Daten in der Tabelle 23 nur auf ein Tragseil bezogen sind, deswegen, damit ein Vergleich möglich ist:

Fall	S nach Tabelle 18	(S nach Tabelle 23)x2	Rechn. Abweichung und %-Fehler
EG_I	596,97	621,256	24,286 (4,068 %)
EG_II	641,58	665,1	23,52 (3,667 %)
FM_I	594,48	631,408	36,928 (6,212 %)
FM_II	645,94	627,916	18,024 (2,79 %)

Tabelle 24: Rechnerische Abweichung in [kN] und Fehler in % den Daten der Seilspannkraft

Obwohl auch hier eine Abweichung klein ist, darf man nicht vergessen, dass die Maßeinheit in [kN] ausgedrückt ist, deswegen würde man diese Ergebnisse nicht als so gut schätzen.

### 6.3. Berücksichtigungen

Die Ergebnisse der Methode der Querkräfte weisen starke Abweichungen mit dem realen Beispiel und mit der Simulation bzw. mit dem Modell. Die Grenzen solcher Methode lassen nicht eine gute Überprüfung durchführen.

Der Fall des Fundamentalsatzes der Seilstatik ist interessanter, weil er eine gute Übereinstimmung mit dem realen Beispiel in dem Fall des maximalen Durchhangs und ein bisschen schlimmer bei den Seilspannkräften aufweist. Leider hat man nicht vergessen, dass das Ziel dieser Arbeit der Vergleich zwischen der analytischen Ermittlung und dem Modell und nicht dem realen Beispiel ist, weil die Voraussetzung ist, dass das Modell eine gute Darstellung der Wirklichkeit anbieten würde. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen leider das genaue Gegenteil und deshalb ist es ersichtlich, dass die Qualität des Modells nicht ausreichend ist. Die Erschwernisse im Zuge des Aufbaus des Modells wurden bereits im Kapitel 5.2.5 und in den anschließenden Kapiteln diskutiert. Die Hoffnung ist, ein besseres Modell aufzubauen, wenn es möglich sein wird, auf eine angemessene Weise das Seil in dem Arbeitsraum festzusetzen und ein angemessenes Paar von Steifigkeit-Dämpfung zu ermitteln.

## 7. Die Seilbahnrollen und die Seilbahn vs. die Eisenbahn

Für fast 50 Jahre blieben die Seilbahnen mit der Eisenbahn gesetzlich verbunden. Nämlich vor dem Seilbahngesetz 2003 waren die Rechtsvorschriften der Seilbahnen in dem Eisenbahngesetz 1957 enthalten. Nur der stärkere Einsatz solcher Anlage sowie das Inkrafttreten der Europäischen Richtlinie 2000/9/EG *über Seilbahnen für Personenverkehr* (17) verursachten eine Trennung der Gesetze. Die Seilbahn weist viele Ähnlichkeiten mit der Eisenbahn auf, erstens die Tatsache, dass sie beide spurgebundene Systeme sind.

Seil und Seilbahnrollen sind Teile der Fahrbahn in den Seilbahnen und daher sind ihre Aufgaben von maßgeblicher Bedeutung. Nach der Beschreibung einer Untersuchung über die Seilbahnrollen und einer Simulation von einem Fahrzeugmodell, das den Rad-Rolle-Kontakt beschreibt und Anregungen für künftige Entwicklungen anbietet, werden Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen den zwei Systemen, Seil- und Eisenbahn, erläutert.

### 7.1. Eine Untersuchung im Bereich Seilbahnrollen

2006 wurde in der Fachzeitschrift *KGK – Kautschuk Gummi Kunststoffe* – eine Untersuchung über die Beanspruchung von Seilbahneinlagerungen veröffentlicht. Die Autoren entwickelten und verifizierten ein Simulationsmodell von einem Seilbahneinlagerung und im Detail das Innere des Seilbahneinlagerunges mit dem Einsatz der Finite Elemente, weil daraus wichtige Informationen gewonnen werden können, eine Abschätzung der Lebensdauer möglich ist und nach der Ermittlung der wirkenden Kräfte eine genaue Dimensionierung des Rollenkörpers ausführbar ist (18).



Abbildung 42: Eine Seilbahnrolle

In einer Seilbahnrolle wird der Gummieinlagerung mit einer Seitenscheibe über einen Konus auf die Nabe aufgeschoben und gegen die gegenüber liegende Seitenscheibe gepresst (18).

Wegen der starken Aufdehnung des Ringes stellt das Aufschieben eine maßgebliche Belastung für den Einlagerung dar und die Aufdehnung erzeugt eine Vorspannung wegen der Festsetzung des Ringes auf die Rolle. Eine Belastung ergibt sich aus dem Eigengewicht der Rolle in einer Seilbahn, dem Klemmenstoß, der als dynamische Beanspruchung berücksichtigt wurde, sowie

der Windeinwirkung. Für die letzten zwei Belastungskomponenten wurden angemessene Parameter gewählt.

Die Gummieinlageringe werden aus einer marktüblichen rußgefüllten Elastomermischung hergestellt; außerdem werden sie an der Innenseite durch ein Gewebe verstärkt, das aus Polyesterfäden in Umfangsrichtung (PEC Einlagen) und Baumwollfäden besteht (18). Als Beschreibung des Materialverhaltens wurde das Materialmodell von Mooney-Rivlin, in dem die Verzerrungsenergiedichte Funktion von zwei Invarianten des Cauchy- Green'schen Verzerrungstensors (19) und von Materialparametern beschrieben wird, gewählt. Die Seitenscheiben, die ein linear elastisches Materialverhalten aufweisen, sind aus Stahl eingebaut; ihr Elastizitätsmodul wird mit  $210\,000\text{ N/mm}^2$  angenommen und die Querdehnungszahl mit  $\nu = 0,3$ . Die Nabe der Seilbahnrolle sowie das Seil (trotz dieses letzte mit variierenden geometrischen Abmessungen) werden als starre Körper modelliert.

Das Coulomb'schen Reibungsgesetz wurde als Reibungsverhalten zwischen dem Gummieinlagering und dem Rollenkörper gewählt. Die Bestimmung der Reibungskoeffizienten wurde am zuständigen Prüfstand der TU Wien durchgeführt.

Das Modell wurde in ein 2D- und 3D-Modell diskretisiert und daraus ergab sich ein Finite-Elemente-Netz. Dies ist in der Innenkante und in den Seitenscheiben verfeinert, um die zu erwartenden Spannungs- und Verzerrungsgradienten in den Kontaktbereichen realistisch abbilden zu können (18).

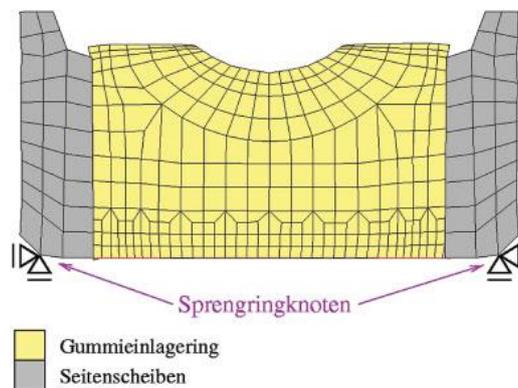


Abbildung 43: Das mit FEM diskretisierte 2D-Modell mit Randbedingungen

Das Seil, dessen Durchmesser 45 mm ist, besteht aus sechs miteinander verdrehten Litzen, die von Zylindern dargestellt sind. Außerdem wurde eine Vereinfachung eingeleitet, d.h. die Zylinder sind glatt bzw. wurde die Form der Drähte nicht berücksichtigt.

Dem Modell wurden Randbedingungen zum Festhalten angewendet: Im 2D-Modell ist jede Seitenscheibe im inneren Bereich an einem Knoten in allen Koordinatenrichtungen festgehalten; ähnlich im 3D-Modell sind die Knoten bei jeweiligem Endquerschnitt festgehalten.

Die Simulation erfolgte mit dem kommerziellen FE-Programm *MARC* von *MSC*. Die Kontaktdruckverteilung wurde unter der Wirkung des Seils, das sowohl als glatter Zylinder als

auch als litzenstrukturiertes Seil genutzt wurde, analysiert. In dem Fall des Litzenseils ist die Auflagefläche kleiner und daher entstehen lokale erhöhte Kontaktdrücke.

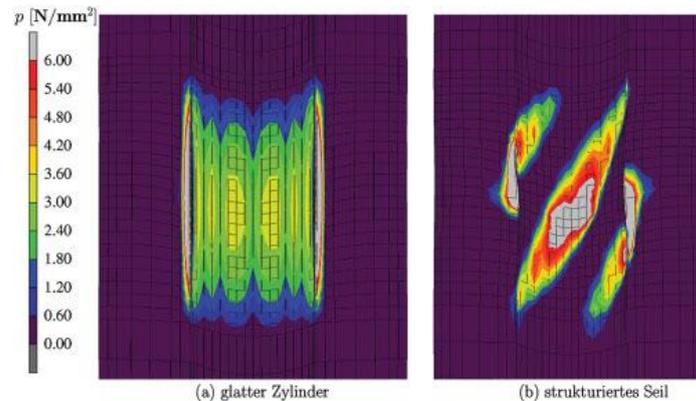


Abbildung 44: Kontaktdruckverteilung zwischen einem Seil als glatter Zylinder (links) und einem Litzenseil (rechts)

Der Seildurchmesser beeinflusst wesentlich den Maximalwert des Kontaktdruckes in der Laufrille, nämlich je kleiner der Durchmesser ist, desto höher ist der Kontaktdruck. Daraus ergibt sich eine höhere Beanspruchung im Inneren des Gummiringes, die die Beschädigung des Gummiringes beschleunigt und schließlich den Ring zerstört.

Anschließend wurde der Einfluss sowohl des Klemmenstoßes als auch dieses in Kombination mit einer Windlast dargestellt. Die Belastung durch Klemmenstoß bewirkt eine Vergrößerung der Kontaktfläche gegenüber der Belastung durch den Eigengewichtsanteil, da das Seil tiefer in die Rolle einsinkt. Wegen der Windlast verliert die Laufrille die Symmetrie bezüglich der Mittellinie (18).

Die Untersuchung ermöglichte auch die Beanspruchungsanalyse in dem Gummieinlagering. Diese Beanspruchung ist von wesentlicher Bedeutung für die Abschätzung der maximal zulässigen Nutzlast der Ringe.

Die Beanspruchungsanalyse auf der Seitenscheiben wurde für eine Belastung durch Klemmenstoß und Wind durchgeführt: Die Druckverteilung ist symmetrisch zur Mittelebene, der Kontaktdruck nimmt mit zunehmender Entfernung von der Auflagefläche des Seils sehr schnell auf den Wert für den Einbauzustand ab (18).

Mit der Einführung der Rahmenbedingungen wurden auch die Auflagerkräfte untersucht. Die resultierenden Kräfte ergeben sich aus der Aufsummierung aller der normal zur Laufrichtung der Rolle wirkenden Auflagerkräfte in den entsprechenden Knoten jeder Seitenscheibe. Die Kräfte, die auf die beiden Sprengringe an der linken und rechten Seitenscheibe einwirken, sind mit der Ausnahme einer Belastung durch Wind nahezu gleich groß. Der Vergleich der Reaktionskräfte zeigt, dass Spitzenwerte unter Windlast nur 5% höher als ohne Berücksichtigung der Windlast (18).

Das FE-Modell wurde anhand eines Vergleichs von experimentell bestimmten Kenngrößen des Deformationszustandes der Seilbahnrolle mit den entsprechenden numerisch ermittelten Werten überprüft.

Erstens wurde die Kontur des Gummieinlagerings vor und nach der Montage an mehreren Stellen vermessen: Die Werte im Einbauzustand übereinstimmen ziemlich gut und lediglich relative Abweichungen von unter 10% sind vorhanden.

Zweitens wurde der Kraft-Verschiebungsverlauf bei statischem Aufdrücken des Seils auf den Gummieinlagering untersucht und er weist gute Ergebnisse auf.

Drittens wurde die Kontaktfläche des Seils bestimmt: Der Gummiring wurde mit Talkumpulver eingerieben, welches vom Seil beim Aufdrücken auf die Rolle an den Kontaktflächen aufgenommen wird. Der Abdruck wurde vermessen und mit den Ergebnissen der Simulation verglichen, indem er eine gute Übereinstimmung zeigt.

Letztens wurde die Verformung der äußeren Punkte am oberen Ende der Seitenscheiben untersucht: Ein Zylinder mit einem Durchmesser von 45 mm wurde auf die Seilbahnrolle aufgedrückt; die Seilschleife ist trotzdem steifer als der Gummiring, die Bewegung ist eingeschränkt und daher ergeben sich nur sehr kleine Verschiebungen.

Zusammenfassend schließt der Bericht ab, dass die stets hervorragende Übereinstimmung zwischen den Versuchsergebnissen und den entsprechenden Simulationsergebnissen die Eignung und Qualität des FE-Modells belegt und die numerischen Simulationen eine detaillierte Analyse des Beanspruchungszustandes im Inneren des Gummieinlagerings erlauben. Zusätzlich dank der Prüfung auf sichtbare äußere Beschädigungen kann man die Lebensdauer von Einlagerungen sowie die Reaktionskräfte auf dem Rollenkörper für eine Dimensionierung abschätzen. Das Rechenmodell ermöglicht eine Optimierung der Seilbahnrollen, auch wegen der Möglichkeit unterschiedliche Seildurchmesser zu nutzen.

## **7.2. Das Fahrzeugmodell**

### **7.2.1. Kontaktkräfte im spurgeführten Verkehr**

#### **7.2.1.1. Berechnung der Rad-Schiene Kräfte im Eisenbahnwesen**

Die Art und Weise wie sich die Kräfte einstellen, hängt wesentlich vom Ort der Berührung ab. In flacheren Profilbereichen bestimmen die Reibkräfte das Kräftespiel. In stärker geneigten Zonen sind die Kräfte, die sich aus der Kraftaufteilung aufgrund der Form der Profile ergeben, wichtiger.

Das folgende Bild zeigt die grundsätzlichen Mechanismen, die daran beteiligt sind.

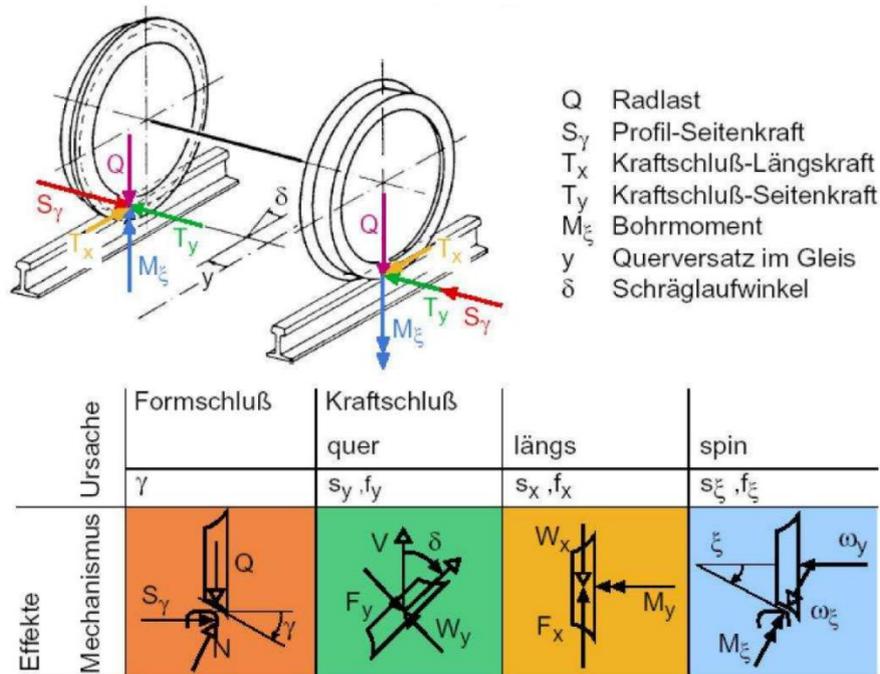


Abbildung 45: Entstehungsmechanismen der Rad-Schiene-Kräfte im Eisenbahnwesen

Bei der Berechnung der Kräfte Y und Q wird heute oft die Theorie nach Kalker, die die Reibkräfte in Anwesenheit von Schlupf berechnet angewendet. Der Einfluss der Profilneigung wird durch die Berührgeometriefunktionen zwischen Rad und Schiene berücksichtigt

Nach Kalkers [1] linearer Theorie lassen sich die Schlupfkräfte wie folgt berechnen:

$$T_x = +k_{11} \cdot \sigma_x \quad (7)$$

$$T_y = +k_{22} \cdot \sigma_y + k_{23} \cdot \sigma_z \quad (8)$$

$$M_z = -k_{23} \cdot \sigma_y + k_{33} \cdot \sigma_z \quad (9)$$

Die Gleichungen nach Kalker haben etwas anderes Aussehen als nach Coulomb.  $k_{23}$  berücksichtigt die Wechselwirkung zwischen  $T_y$  und  $M_z$  durch unsymmetrische Kraftübertragung in der Druckellipse (wegen Gleiten hinten und Nichtgleiten vorne).

Die Schlupfkoeffizienten  $k_{ij}$  sind nach Kalker definiert durch:

$$k_{11} = E \cdot (a \cdot b) \cdot c_{11} \quad (7)$$

$$k_{22} = E \cdot (a \cdot b) \cdot c_{22} \quad (8)$$

$$k_{23} = E \cdot (a \cdot b)^{3/2} \cdot c_{23} \quad (9)$$

$$k_{33} = E \cdot (a \cdot b)^2 \cdot c_{33} \quad (10)$$

Abbildung 46: Auszug aus der Kalkers Theorie

Dabei sind  $a$  und  $b$  die Halbachsen der Berührellipsen nach Hertz und  $c_{ij}$  sind Beiwerte aus der Elastizitätstheorie.

### 7.2.1.2. Berechnung der Rad-Schiene Kräfte bei Seilbahnlaufwerken

Grundsätzlich unterscheidet sich die Kontaktmechanik zwischen Rad und Seil bei einem Seilbahnlaufwerk nicht wesentlich von jener bei einem Eisenbahnlaufwerk. Auch hier bestimmen einerseits die Reibverhältnisse und andererseits der Ort der Berührung über den Kraftanteil, der jeweils durch Reibung oder Formschluss entsteht.

Anders als bei der Eisenbahn, wo die wirksamen Einflussgrößen sehr gut erforscht sind, ist das im Seilbahnwesen anders. Es gibt zwar hoch entwickelte Methoden, die mit FE-Rechnungen versuchen, die Kontaktspannungen zu ermitteln, aber für MKS-Anwendungen, ähnlich den Fragestellungen bei der Eisenbahn, gibt es keine Parametersätze, die im MKS-Programm verwendet werden können.

Bei Seilbahnlaufwerken werden heute nach wie vor sehr einfache Modelle zur Kontaktkraftberechnung verwendet.

### 7.2.2. Einfaches Fahrzeugmodell

Das Programmpaket *SIMPACK* ist für Berechnungen von spurgeführten Fahrzeugen sehr weit verbreitet, weil es relativ weit entwickelte Elemente zur Berechnung der Kontaktkräfte zwischen Rad und Fahrweg im Eisenbahnbereich bereitstellt.

Daher wurde für diese Arbeit ein einfaches Fahrzeugmodell einer Pendelbahn erstellt, das die grundsätzlichen Merkmale einer Pendelbahnkabine auf einem Fahrweg und mit einem Ersatzmodell der Rolle – Seilkontakts, enthält.

Das Modell besteht aus den folgenden Komponenten

#### 7.2.2.1. Körper

- ▼ Bodies
  - > \$B\_Kabine
  - > \$B\_Rolle1
  - > \$B\_Rolle2
  - > \$B\_Traeger
  - > \$B\_dummy

Abbildung 47: Körper des Fahrzeugmodells

Die Körper sind reine Starrkörper, die Rollen sind drehbar auf dem Körperträger gelagert. Der Körper Dummy dient als fiktiver Körper, an dem ein Zugseil befestigt ist, das Kräfte auf die Kabine ausübt.

### 7.2.2.2. Kraftelemente

Die Körper sind mit Kraftelementen verbunden so, dass deren Reaktionen bei der Zeititeration des Modells ausgegeben werden können.



Abbildung 48: Wirkende Kraftelemente des Fahrzeugmodell

Das Zugseil besteht in diesem einfachen Modell lediglich aus einem Kraftelement mit einer Steifigkeit, die annähernd einer Ersatzsteifigkeit eines kurzen Zugseilstücks entsprechen könnte.

### 7.2.2.3. Geschwindigkeitsprofil

Dem Körper Dummy kann ein beliebiges Geschwindigkeitsprofil zugeordnet werden, das beispielsweise die Ausfahrt aus einer Station beschreibt. Zuerst fährt die Bahn in Schleichfahrt und beschleunigt dann auf 2 m/s. Diese Geschwindigkeit wird gehalten und dann wieder auf Schleichfahrtgeschwindigkeit verzögert.

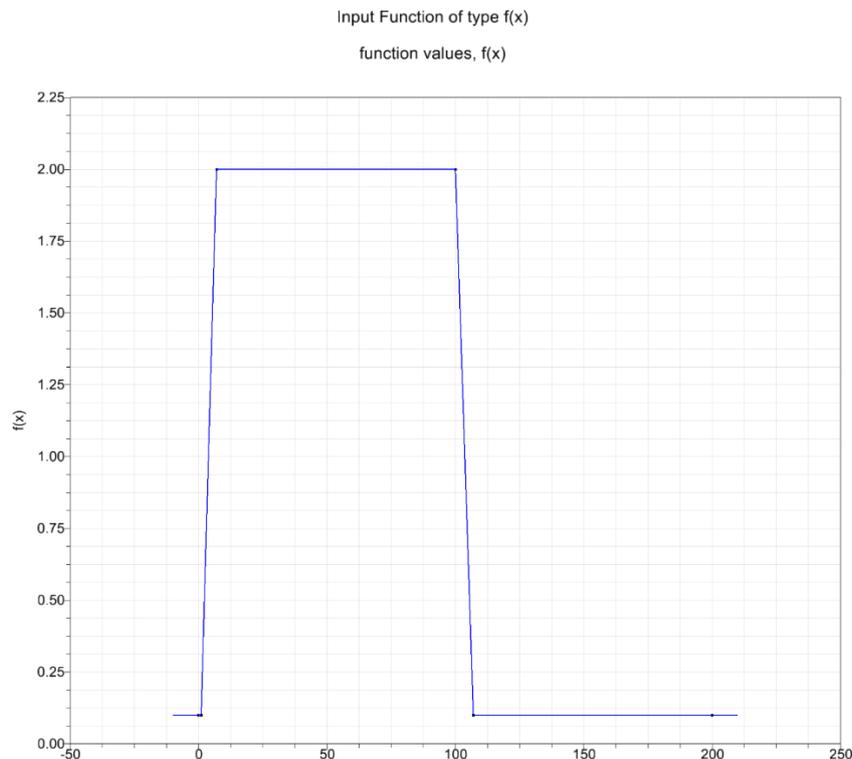


Abbildung 49: Geschwindigkeitsprofil

Grundsätzlich sind im MKS-System vollkommen beliebige Fahrspiele programmierbar.

#### 7.2.2.4. Fahrweg

Da es noch weiterer Forschungen bedarf, die Marker des Rolle-Seil-Kontakts mit dem Modell des Tragseils und es Zugseile zu koppeln, wurde hier nur ein sehr einfaches Fahrwegmodell verwendet, um zu zeigen, dass es gelingt die Modellierung des Rad-Schienenkontakts aus dem Eisenbahnwesen ins Seilbahnmodell zu übertragen.

Der Fahrweg besteht daher nur aus einem geraden Stück Fahrbahn, das nicht mit einem Seil – und dessen speziellen Eigenschaften, verbunden ist. Es dient nur zur Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeiten. Im MKS Modell können prinzipiell beliebige gestaltete Fahrwege mit Unregelmäßigkeiten aufgebaut werden.

#### 7.2.2.5. Rad-Rolle Profile

Die Profile von Rad und Rolle bestehen aus Kreisprofilen. Der Radius des Kreisprofils der Rolle ist größer als jener des Rades.

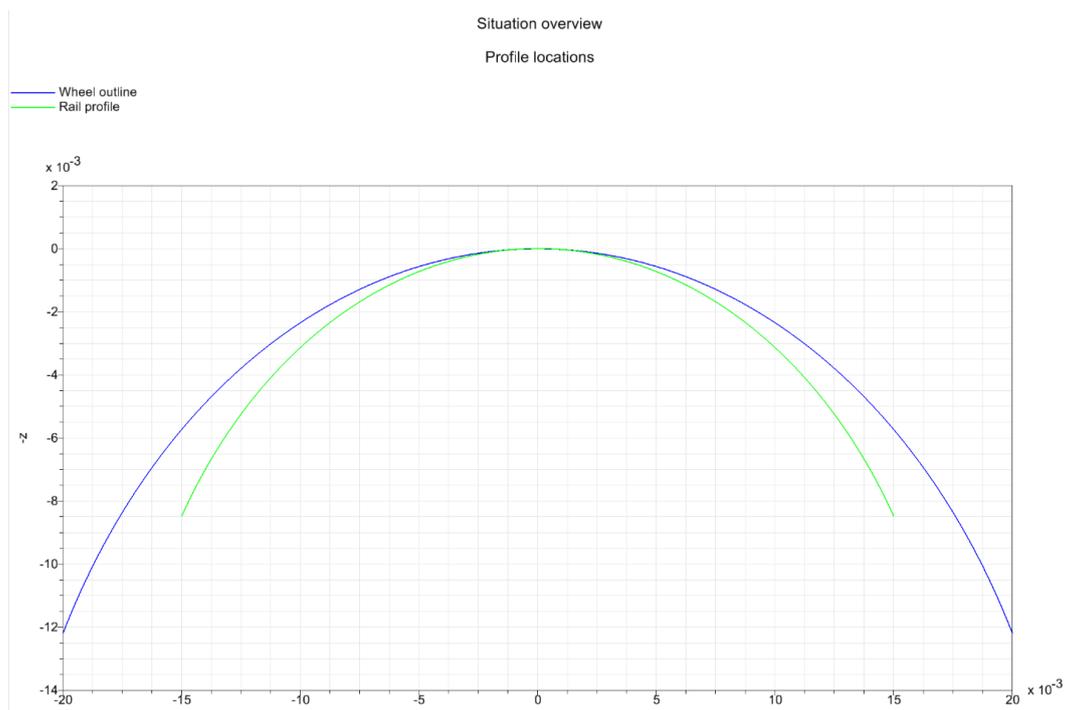


Abbildung 50: Vergleich der Profile des Rades (grün) und der Rolle (blau)

Dargestellt wurden im Modell Verhältnisse wie sie bei einer Seil- Rolle Paarung mit einem Seil vom 35 mm Durchmesser üblich sind. Auch an dieser Stelle können im MKS-Modell völlig beliebige Kontouren – insbesondere auch Verschleißprofile – als Profile verwendet werden.

### 7.2.2.6. Modellübersicht

Die folgenden Bilder zeigen eine Übersicht über das Rechenmodell.

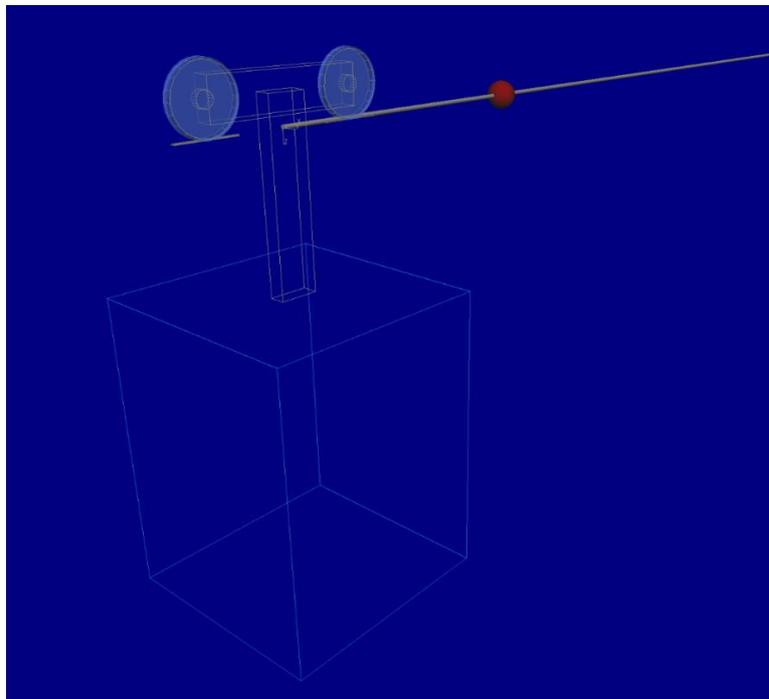


Abbildung 51: Übersicht des Fahrzeugmodells

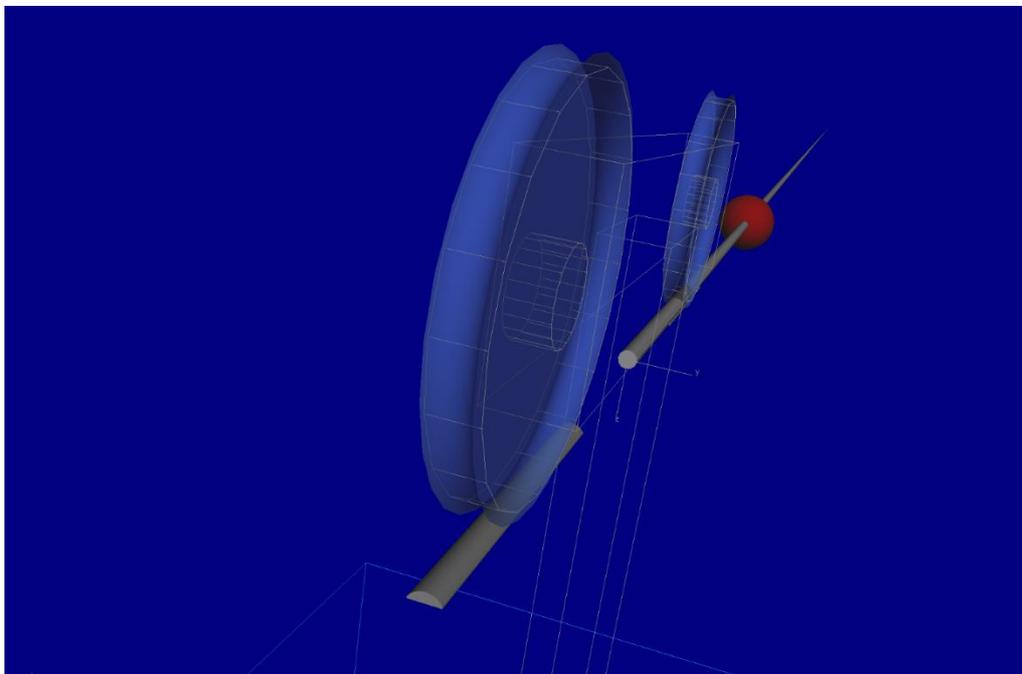


Abbildung 52: Ansicht der Rollen und des Seils

### 7.2.2.7. Resultate

Das folgende Bild zeigt beispielhaft einige Resultate, die mit diesem sehr einfachen Modell erzeugt werden können. Es zeigt die Reaktionen des Kraftelemente in diesem sehr vereinfachten Modell. Es ist ohne weiteres möglich, daraus Lastkollektive, Beanspruchungsspitzen oder ähnliches zu berechnen.

Die Grundvoraussetzung ist aber, dass für die sehr seilbahnspezifischen Eingangsgrößen in die Simulation noch weitere Forschungen durchgeführt werden.

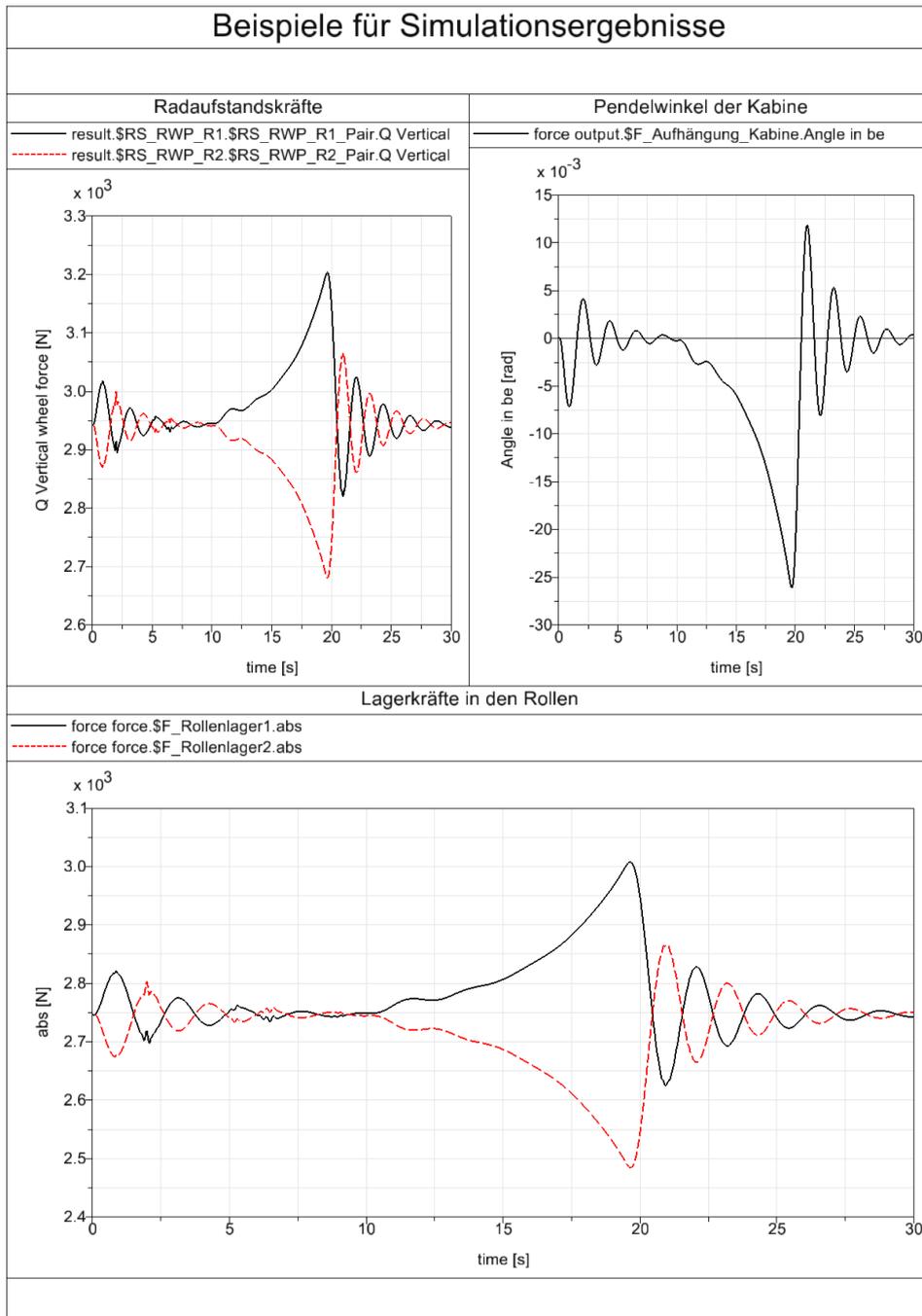


Abbildung 53: Beispiele für Simulationsergebnisse

### **7.3. Das Verhältnis Seil-Rolle in der Seilbahn und Ähnlichkeiten und Unterschiede mit der Eisenbahn**

Das Seil stellt zuerst die Infrastruktur der Seilbahnanlage dar: Nämlich in einigen Anlagen, wie die Pendelbahnen, kann die Bergstation nur mit einem Seilfeld erreicht werden. In meisten Fällen ist dies aber von schwieriger Realisierung und daher kommt zum Einsatz eine oder mehrere Stützen, auf denen die Seilbahnrollen ausgerüstet sind. Zusammenfassend besteht die Fahrbahn einer Seilbahn aus einem oder mehreren Seilen und den Seilbahnrollen.

Die Seilbahnrollen sind mit Gummi eingelagert, sodass eine gute Reibung beim Kontakt mit dem Seil erzeugt werden kann und die Bewegung ohne Schlupf möglich ist. Im Gegenteil ist der Schlupf des Rades auf der Schiene in der Eisenbahn ein häufigeres Risiko.

Es gibt grundsätzlich drei Arten Stützen, die in den Seilbahnen eingesetzt werden, d.h.:

- Die Niederhaltestütze
- Die Hochhaltestütze
- Die Wechsellaststütze.

Bei den Niederhaltestützen fährt das Seil unter der Rollenbatterie, sodass es nach oben geleitet werden kann. Diese Stütze befindet sich i.d.R. in der Talstation und außerdem entlang dem Weg, wenn ein Höhenunterschied überschritten werden muss.

Die Hochhaltestütze stellt die Stütze im engeren Sinn dar. Hier fährt das Seil auf der Rollenbatterie und wird von dieser entlang dem Weg unterstützt.

Die Wechsellaststütze weist beide Effekte der oben erwähnten Stützen auf: Anhand unterschiedlicher Lastfälle auf der Linie sollte es notwendig sein, eine Lenkung nach oben (Niederhaltestütze) oder eine Unterstützung (Hochhaltestütze).

Die nächste Abbildung zeigt die drei Rollenbatterien.



Abbildung 54: Hochhalterstütze (oben); Niederhalterstütze (Mitte); Wechselaststütze (unten)

Die Rollen befinden sich nicht nur auf den Stützen: Sie werden auch in dem Laufwerk eines Fahrzeugs, z.B. in einem Pendelbahnwagen, oder in der Form von größeren Scheiben, wie die Antriebsscheiben, eingesetzt.

Stützenseilbahnrollen werden von dem Förderseil sowie von der Klemme des Fahrzeugs in den Einseil-Umlaufbahnen stark und regelmäßig beansprucht. Um die Kapazität der Anlage zu erhöhen, werden mehr Kabinen mit einer niedrigeren Folgezeit verkehrt. Ähnlich den Eisenbahnschienen, die unter der Beanspruchung des Radsatzes beschädigt werden, sind Beschädigungen auf den Seilbahnrollen vorzusehen.

In dem Fall der 2- und 3S-Systeme wird diese Beanspruchung nur auf das Durchfahren des Zugseiles beschränkt. Nämlich bei der Anfahrt eines Fahrzeugs auf der Stütze zieht die Klemme das Zugseil von der Rollenbatterie von wenigen Centimetern wegen des fixen Abstands zwischen dem Tragseil und dem Zugseil bzw. des Abstands zwischen dem Tragseilschuh und der Rollenbatterie hoch und fährt über die Rollenbatterie durch. Ein Einzelbild aus einem Werbungsvideo über das 2S-System von der Fa. Leitner zeigt deutlich die Fahrt auf der Stütze und das aufgehobene Tragseil (20).



Abbildung 55: Hochgezogenes Tragseil in einem Zweiseilumlaufbahn

Alle Räder in einer Seilbahn sind Spurräder mit doppeltem Spurkranz (siehe Abbildung 42): Sie nehmen das Seil auf und erlauben ein fließendes und sicheres Durchfahren von diesem entlang der ganzen Anlage. Ein Spurkranzrad wie jenes der Eisenbahn wäre von sinnlosem Einsatz. Auch in der Standseilbahn weist der Radsatz keine Spurkranzräder, sondern Spurräder befinden sich auf der Außenseite der Fahrzeuge, während die Innenseite mit Walzenrädern ausgerüstet ist. Solche Ausrüstung ist erforderlich wegen der besonderen Weiche mit fixen Komponenten: die Abt'sche Ausweiche.



Abbildung 56: Abt'sche Ausweiche

Bei solcher Weiche fährt immer ein Wagen auf der rechten Seite und der andere auf der linken Seite.

Außer der Standseilbahn, die grundsätzlich eine seilbetriebene Eisenbahn ist, sind Bögen in den anderen Seilbahnsystemen nicht möglich. Trotzdem gibt es Ausnahmen: Zum Beispiel einige Schleppliften weisen einen oder mehreren Bögen dank einer Scheibe, die den Weg ändert, auf.



Abbildung 57: Schleplift mit Bogen

Trotzdem heutzutage werden die Seilbahnanlage gerade gebaut und können nur mit dem Einbau einer Mittelstation abgebogen werden.

Systeme wie die Umlaufseilbahnen haben großen Einsatz vor allem in Südamerika gefunden: In Medellín (Kolumbien) wurde das *Metrocable* realisiert: Es handelt sich um ein Verkehrsnetz mit 6 Linien und insgesamt 14,62 km lang (21). Dies weist nach, dass ein Seilbahnnetz für den öffentlichen Personenverkehr realisierbar ist, aber muss man nicht nur die Kosten solcher Anlagen, sondern auch die Konkurrenzunfähigkeit auf langen Abständen gegen das Kfz oder die Eisenbahn berücksichtigen. Im Vergleich ist das Eisenbahnnetz viel mehr verbreitet und theoretisch unendlich (grenzüberschreitend) entwickelbar. Außerdem ist die Seilbahn noch ein Symbol des Berg- und vor allem des Wintertourismus und deswegen fand nur in den letzten Jahren mehr Einsatz als ÖV.

Bei der Aufstiegsfahrt weist die Eisenbahn Erschwernisse auf und daher stellt der Tunnelbau die beste Lösung dar. Analog bei Flüssen oder Straßenkreuzungen ist der Bau der entsprechenden Überquerungen kosten- und zeitaufwändig. Im ersten Fall ist es offensichtlich, dass die Seilbahn große Höhenunterschiede am besten und leichtesten überqueren kann. Dasselbe gilt für weitere Hindernisse: Sie fährt einfach über sie.

#### 7.4. Zusammenfassender Vergleich

Die folgende Tabelle stellt eine Zusammenfassung der im letzten Kapitel erläuterten Aspekten der Seilbahn im Vergleich zur Eisenbahn.

Eisenbahn	Seilbahn
Kontakt Stahl-Stahl	Kontakt Stahl-Gummi
Schlupf bei Anfahrt möglich wegen zu hoch Geschwindigkeit	Schlupf i.d.R. findet nicht (ev. Antriebsscheibe) statt
Spurkranzrad	Doppelspurkranzrad

<b>Eisenbahn</b>	<b>Seilbahn</b>
Rad ist Teil des Fahrzeugs	Rolle ist i.A. Teil der Infrastruktur, auch Teil des Fahrzeugs und der Station
Trasse mit Geraden und Bögen	Gerade Trasse (außer Mittelstationen und Ausnahmen)
Theoretisch unendliches Netz wegen grenzüberschreitender und ähnlicher Systeme weltweit	Theoretisch unendliches Netz, aber hohe Kosten, konkurrenzunfähige Geschwindigkeit; max. auf städtischer Ebene oder in beschränkten Gebieten (z.B. Skigebieten)
Eine der am verbreitetsten Verkehrslösungen der Welt	Verwendungszweck noch hauptsächlich ist (Winter-)Tourismus; in der Stadt als Teil des ÖVs; nicht vorhanden als unabhängige Lösung
Hohe Gelände nicht erreichbar und große Überquerungen (z.B. Fluss) nicht in kurzer Zeit realisierbar	Erreichbarkeit steiler Gelände und große Überquerungen (z.B. Fluss) leicht durchfahrbar

Tabelle 25: Vergleich der Spurführung zwischen der Eisen- und der Seilbahn

## 8. Zusammenfassung

Dieser Arbeit stellte eine Beschreibung des Systems Seilbahn und den Versuch, ein Kontrollrechenmodell zu erstellen, dar.

Erstens wurden die unterschiedlichen Arten von Seilbahnen, die rechtlichen Rahmen sowie einige Komponenten der Anlage beschrieben: Diese gaben einen Überblick über die Eigenschaften und die Bedürfnisse des Systems und seine möglichen Einsätze.

Anschließend wurde die Seilstatik, die die mathematischen Grundlagen darstellt, erläutert. Die Näherungslösung der Kettelinie ist ein wichtiger Schritt für die praktische Anwendung. Nachfolgend wurde eine zusätzliche und besondere Lösung mittels der Methode der Querkräfte herleitet. Trotzdem stellte diese einen Misserfolg in dem Vergleich der Ergebnisse dar.

Das vierte Kapitel bot einen Überblick über vergangene Arbeiten von damaligen Doktoranden an. Dr. Nußbaumers Dissertation hat als Ziel die Entwicklung eines Antriebsmodells einer APM-Anlage. Mit jenem konnte er ein reales Beispiel verifizieren und ein gutes Modell für solche Anlagenart anbieten.

Der Schwerpunkt von Dr. Renezeders Dissertation sind die Seilschwingungen in dem Seilfeld. Er analysierte vor allem die axialen Schwingungen und leitete ein finite Elemente-Modell zur Überprüfung ein.

Dr. Richters Dissertation hat noch die Schwingungen untersucht, aber es handelt sich um Fahrzeugschwingungen beim Anfahren und Bremsen. Ein Modell wurde aufgebaut, um solche Schwingungen in einem realen Beispiel zu überprüfen.

Im Kapitel 5 wurde die Modellbildung behandelt: Erstens wurde der Fundamentalsatz der Seilstatik, der eine wichtige und einfache Lösung zur Ermittlung des maximalen Durchhangs stellt und als zweite Methode zur Verifizierung der Ergebnisse der Simulation verwendet wurde, beschrieben. Anschließend sprach man von dem System Pendelbahn, das die Systemart des verwendeten realen Beispiels ist. Ein Exkurs über den tragischen Unfall der Mottarone-Seilbahn (Italien) am 23. Mai 2021 wurde durchgeführt.

Die Schritte zum Modellaufbau wurden daher beschrieben: Die Seilelemente, die die Grundelemente des Modells darstellen, die Anpassungen auf das reale Beispiel und die Voraussetzungen sowie das Problem der Festsetzung des Endes des Seilmodells im Modellraum und die fehlende genaue Feststellung von geeigneten Eigenschaften des Kraftelements. Diese Erschwernisse waren möglich die Ursache der falschen Ergebnisse und der anschließenden Nicht-Übereinstimmung des Modells mit dem realen Beispiel.

Das sechste Kapitel führte den Vergleich der Ergebnisse mittels der Methode der Querkräfte und des Fundamentalsatzes der Seilstatik durch: Wie bereits erwähnt und gesehen stellte die erste Methode einen schlechten Vergleich mit den Ergebnissen der Simulation dar. Die

Ursache liegt in der Tatsache, dass diese Methode Nachdruck auf Eigenschaften des Seiles und der Anlage, die i.d.R. nicht berücksichtigt werden, legt.

Auch der Fundamentalsatz der Seilstatik leider führte zu unterschiedlichen Ergebnissen von der Simulation. Trotzdem waren die analytischen Ergebnisse sehr ähnlich mit jenen des realen Beispiels: Das ist ein weiterer Nachweis der fehlenden Güte des Modells.

Zusammenfassend weist der Vergleich zwischen der Simulation und der analytischen Ermittlung keine Übereinstimmung auf: Die Schwierigkeiten stellen den Grund, für den man kein passendes Modell aufbauen konnte, dar. Deshalb waren die Ergebnisse der Simulation ab sofort nicht geeignet.

Ein letztes Kapitel bietet einen Überblick auf den Zusammenhang Seil-Rollen sowie einen kurzen Vergleich zwischen der Seilbahn und der Eisenbahn an. Erstens wurde eine Untersuchung über die Beanspruchung der Seilbahnrollen beschrieben, zweitens erläuterte man ein einfaches Modell, das ähnlich einem Zug auf den Schienen anhand einer bestimmten einfachen Bewegungsgleichung auf dem Seil fährt. Zum Schluss wurden die Merkmale der Rollen in der Seilbahn sowie die Ähnlichkeiten des Systems Seilbahn mit der Eisenbahn erzählt.

## 9. Künftige Anwendungen

Obwohl das Modell einen Misserfolg darstellte, ist eine künftige Entwicklung nicht auszuschließen: Nämlich könnte es verbessert werden und eine Weise finden, um das Seil geeignet festzusetzen bzw. die Krafterelementen anzupassen, sodass keine Verschiebung stattfindet. Ist auch diese Möglichkeit nicht durchführbar, kann man versuchen, auf eine kontinuierliche Modellierung zu wenden, und den Vergleich durchzuführen.

Unter der Voraussetzung, dass das Kontrollrechenmodell, so wie es ausgeplant wurde, aufgebaut werden kann, ist eine Vielzahl an Anwendung möglich.

Das im Kapitel 7.2 beschriebene Fahrzeugmodell bietet eine einfache und gute Darstellung der wirkenden Kräfte und des Verhaltens eines Wagens auf dem Seil an. Mit der Zusammensetzung von Seil- und Fahrzeugmodell könnte man nicht nur die vertikalen Lasten infolge des Gewichts der Seilbahnkomponenten, sondern auf die horizontalen Lasten infolge der Bewegung des von dem Zugseil gezogenen Wagens berechnen und nachfolgend überprüfen.

Der Exkurs des Kapitels 5.1.1 lässt über die Wichtigkeit der Bremsanlagen in einer Seilschwebbahn überlegen. Unabhängig von den Ursachen des Unfalls bietet der Einsatz des Bremssystems interessante Anregungen zum Modellaufbau an. Nach einer erfolgreichen Modellierung der Trasse mit einem kommerziellen Programm könnte man die Auswirkungen der Fangbremsen auf die Gesamtanlage untersuchen. Auf diese Weise könnten die dynamischen Lasten auf die Bauteile und insbesondere auf die Seilbefestigungen besser berechnet werden.

Die von den Doktoranden in den jeweiligen Dissertationen eingesetzten Programme behandeln relativ besondere Probleme und erlauben keine weitgehende Untersuchung. Außerdem ist die Validierung der Ergebnisse solcher Programme durch Kontrollstellen kaum möglich. Im Gegensatz erfordern die Seilnormen in Bezug auf Seilüberprüfungen deutlich die Validierung der Rechenergebnisse. Während die Autoren die Bewegungsgleichungen in ihren Dissertationen untersuchen und lösen sollten, erfolgt die Lösung solcher Gleichungen durch den Solver und wird durch Qualitätsmanagement-Systeme überwacht. Anschließend treten Programme, wie bspw. *SIMPACK*, auf, die nur die Modellierung überprüfen müssen und daher mit einem viel mehr erleichterten Prüfungsvorgang eine gute vertretbare Wahl für die Prüfstellen darstellen.

## 10. Literaturverzeichnis

1. *BGBI I Nr. 103/2003.*
2. Sedivy, P. *Vorlesungsunterlagen Seilbahnbau.* Technische Universität Graz : s.n., Wintersemester 2019/20.
3. *BGBI I Nr. 79/2018.*
4. LEITNER AG. YouTube. [Online] 13. November 2013. [Zitat vom: 27. August 2021.] [www.youtube.com/watch?v=O-fpeFLr55g](http://www.youtube.com/watch?v=O-fpeFLr55g).
5. Wohlhart, K. *Kettenlinie, Seilstatik.* In: *Statik.* s.l. : Springer, 1998. S. S. 58-67.
6. Nejez, J. *Vorlesung aus Seilbahnbau.* Technische Universität Graz : s.n., 1993.
7. Pałkowski, S. *Statik der Seilkonstruktionen - Theorie und Zahlenbeispiele.* s.l. : Springer-Verlag, 1990.
8. Nußbaumer, C. *Modellbildung und Simulation der Dynamik von seilbetriebenen, automatischen Personentransportsystemen.* Technische Universität Graz. 2013. Dissertation.
9. Renezeder, H. C. *On the dynamics of axially moving cable with application to ropeways.* Technische Universität Wien. 2006. Dissertation.
10. Richter, T. *Schwingungsverhalten von Einseilumlaufbahnen beim Anfahren und Bremsen.* Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. 1989. Dissertation.
11. Guastella, G. *Corriere della Sera.* [Online] 25. Mai 2021. [Zitat vom: 21. August 2021.] [www.corriere.it/cronache/21\\_maggio\\_25/funivia-stresa-mottarone-video-2aa8f942-bcd3-11eb-abb7-46b8b952d96c.shtml](http://www.corriere.it/cronache/21_maggio_25/funivia-stresa-mottarone-video-2aa8f942-bcd3-11eb-abb7-46b8b952d96c.shtml).
12. *Corriere della Sera.* YouTube. [Online] 16. Juni 2021. [Zitat vom: 21. August 2021.] [www.youtube.com/watch?v=8FnT3x52QTM](http://www.youtube.com/watch?v=8FnT3x52QTM).
13. Longhin, D. *la Repubblica.* [Online] 23. Mai 2021. [Zitat vom: 21. August 2021.] [www.torino.repubblica.it/cronaca/2021/05/23/news/riaperta\\_dopo\\_l\\_ammmodernamento\\_d\\_el\\_2016\\_era\\_stata\\_inaugurata\\_nel\\_1970-302385295/](http://www.torino.repubblica.it/cronaca/2021/05/23/news/riaperta_dopo_l_ammmodernamento_d_el_2016_era_stata_inaugurata_nel_1970-302385295/).
14. LEITNER AG. *Leitner.* [Online] 27. Mai 2021. [Zitat vom: 21. August 2021.] [www.leitner.com/unternehmen/aktuelles/detail/seilbahnunglueck-stresa-mottarone/](http://www.leitner.com/unternehmen/aktuelles/detail/seilbahnunglueck-stresa-mottarone/).
15. Cravero, F. *la Repubblica.* [Online] 3. August 2021. [Zitat vom: 21. August 2021.] [www.torino.repubblica.it/cronaca/2021/08/03/news/sopralluogo\\_consulenti\\_mottarone-312749709/](http://www.torino.repubblica.it/cronaca/2021/08/03/news/sopralluogo_consulenti_mottarone-312749709/).
16. Destairel, C. *ZDF.* [Online] 1. Juni 2021. [Zitat vom: 27. August 2021.] [www.zdf.de/nachrichten/panorama/gondel-stresa-manipuliert-100.html](http://www.zdf.de/nachrichten/panorama/gondel-stresa-manipuliert-100.html).

17. Richtlinie 2000/9/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. März 2000 über Seilbahnen für Personenverkehr.
18. *Numerische Analyse der Beanspruchung von Seilbahneinlagerungen*. Hofstetter, K. und et al. Wimpassing (Österreich) : Hühlig, September 2006, KGK.
19. Wikipedia, the free encyclopedia. [Online] [Zitat vom: 22. August 2021.] [www.en.wikipedia.org/wiki/Mooney%E2%80%93Rivlin\\_solid](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Mooney%E2%80%93Rivlin_solid).
20. LEITNER. YouTube. [Online] 8. Mai 2019. [Zitat vom: 27. August 2021.] [www.youtube.com/watch?v=AARm7-vAHuk](http://www.youtube.com/watch?v=AARm7-vAHuk).
21. Wikipedia, the free encyclopedia. [Online] [Zitat vom: 27. August 2021.] [www.en.wikipedia.org/wiki/Metrocable\\_\(Medell%C3%ADn\)](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Metrocable_(Medell%C3%ADn)).
22. Amman, O. und Grünewaldt, C.v. *Handbibliothek für Bauingenieure - Bergbahnen, II Teil, 9. Band*. s.l. : Springer-Verlag, 1930.
23. Nejez, J. ISR Internationale Seilbahnen-Rundschau. [Online] 1. Juli 2021. [Zitat vom: 27. August 2021.] [www.de.isr.at/singleview/article/konstruktionselemente-von-einseilumlaufbahnen](http://www.de.isr.at/singleview/article/konstruktionselemente-von-einseilumlaufbahnen).
24. Jussel, D. *Vorlesungsskriptum Spurführung*. Technische Universität Graz : s.n., Sommersemester 2019.
25. Tschaiker, A. *Entwicklung und Messtechnik für Dynamikuntersuchungen an Seilbahnen*. Technische Universität Wien. 2014. Diplomarbeit.
26. Verordnung (EU) 2016/424 des europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2016 über Seilbahnen und zur Aufhebung der Richtlinie 2000/9/EG. 2016.
27. Bergbahnen.org. [Online] 16. April 2011. [Zitat vom: 17. August 2021.] [www.bergbahnen.org/seilbahn/1732/de/daten.php](http://www.bergbahnen.org/seilbahn/1732/de/daten.php).
28. Bergbahnen.org. [Online] 2. September 2008. [Zitat vom: 17. August 2021.] [www.bergbahnen.org/forum/viewtopic.php?t=975](http://www.bergbahnen.org/forum/viewtopic.php?t=975).

## 11. Abbildungsquellen

- Abbildung 1 <https://www.doppelmayr.com/de/systeme/pendelbahnen/>
- Abbildung 2 [www.graztourismus.at/de/sehen-und-erleben/sightseeing/sehenswuerdigkeiten/schlossbergbahn-graz\\_sh-1238](http://www.graztourismus.at/de/sehen-und-erleben/sightseeing/sehenswuerdigkeiten/schlossbergbahn-graz_sh-1238)
- Abbildung 3 [www.leitner.com/it/azienda/referenze/dettagli/materialropeway-savona/](http://www.leitner.com/it/azienda/referenze/dettagli/materialropeway-savona/)
- Abbildung 4 [www.doppelmayr.com/de/systeme/kuppelbare-sesselbahnen/](http://www.doppelmayr.com/de/systeme/kuppelbare-sesselbahnen/)
- Abbildung 5 aus der Literaturquelle (2)
- Abbildung 6 Aus der Literaturquelle (2)
- Abbildung 7 Aus der Literaturquelle (22)
- Abbildung 8 Aus der Literaturquelle (2)
- Abbildung 9a Aus der Literaturquelle (23)
- Abbildung 9b [www.leitner.com/produkte/seilbahnsysteme/detail/fixgeklemmte-sessellifte/](http://www.leitner.com/produkte/seilbahnsysteme/detail/fixgeklemmte-sessellifte/)
- Abbildung 10 [www.leitner.com/unternehmen/wissenswertes/elemente-von-seilbahnen/](http://www.leitner.com/unternehmen/wissenswertes/elemente-von-seilbahnen/)
- Abbildung 11 [www.bergbahnen.org/forum/viewtopic.php?t=1698](http://www.bergbahnen.org/forum/viewtopic.php?t=1698)
- Abbildung 12 [www.wpk-austria.at/seilbahnen.html](http://www.wpk-austria.at/seilbahnen.html)
- Abbildung 13 Aus der Literaturquelle (5)
- Abbildung 14 Aus der Literaturquelle (5)
- Abbildung 15 Aus der Literaturquelle (5)
- Abbildung 16 Aus der Literaturquelle (7)
- Abbildung 17 Aus der Literaturquelle (7)
- Abbildung 18 Aus der Literaturquelle (7)
- Abbildung 19 Aus der Literaturquelle (7)
- Abbildung 20 Aus der Literaturquelle (7)
- Abbildung 21 Aus der Literaturquelle (2)
- Abbildung 22 Aus der Literaturquelle (2)
- Abbildung 23 [www.enviadi.com/blog/aiguille-du-midi-chamonix/](http://www.enviadi.com/blog/aiguille-du-midi-chamonix/)
- Abbildung 24 [www.skiresort.info/ski-resort/kitzsteinhornmaiskogel-kaprun/ski-lifts/l89042/](http://www.skiresort.info/ski-resort/kitzsteinhornmaiskogel-kaprun/ski-lifts/l89042/)

- Abbildung 25 Aus der Literaturquelle (2)
- Abbildung 26 [www.de.wikipedia.org/wiki/Pendelbahn](http://www.de.wikipedia.org/wiki/Pendelbahn)
- Abbildung 27 Aus der Literaturquelle (11)
- Abbildung 28 Aus der Literaturquelle (11)
- Abbildung 29 Entwickeltes Modell in der Software *SIMPACK*
- Abbildung 30 Entwickeltes Modell in der Software *SIMPACK*
- Abbildung 31 Entwickeltes Modell in der Software *SIMPACK*
- Abbildung 32 [www.mamilade.at/vbg/dornbirn/ausflugstipps/natur-abenteuer/karrensesselbahn-dornbirn](http://www.mamilade.at/vbg/dornbirn/ausflugstipps/natur-abenteuer/karrensesselbahn-dornbirn)
- Abbildung 33 Entwickeltes Modell in der Software *SIMPACK*
- Abbildung 34 Eigene Entwicklung in *MS-Word*
- Abbildung 35 Eigene Entwicklung in *MS-Word*
- Abbildung 36 Entwickeltes Modell in der Software *SIMPACK*
- Abbildung 37 Entwickeltes Modell in der Software *SIMPACK*
- Abbildung 38 Entwickeltes Modell in der Software *SIMPACK*
- Abbildung 39 Eigene Entwicklung in der Software *AutoCAD 2019*
- Abbildung 40 Längenschnitt der Karrensesselbahn (siehe Anhang2 bzw. Seite 82)
- Abbildung 41 Eigene Entwicklung in der Software *AutoCAD 2019*
- Abbildung 42 Aus der Literaturquelle (18)
- Abbildung 43 Aus der Literaturquelle (18)
- Abbildung 44 Aus der Literaturquelle (18)
- Abbildung 54 Aus der Literaturquelle (24)
- Abbildung 55 Aus der Literaturquelle (24)
- Abbildung 56 Auszug aus der Software *SIMPACK*
- Abbildung 57 Auszug aus der Software *SIMPACK*
- Abbildung 58 Auszug aus der Software *SIMPACK*
- Abbildung 59 Auszug aus der Software *SIMPACK*
- Abbildung 60 Entwickeltes Modell in der Software *SIMPACK*
- Abbildung 61 Entwickeltes Modell in der Software *SIMPACK*
- Abbildung 53 Auszug aus der Software *SIMPACK*
- Abbildung 54 Aus der Literaturquelle (23)

Abbildung 55 Aus der Literaturquelle (20)

<https://hellertal.startbilder.de>

Abbildung 56 [/bild/Deutschland~Seilbahnen~Kurwaldbahn+Bad+Ems/344562/die-abtsche-weiche-auch-abt180sche-weiche.html](https://hellertal.startbilder.de/bild/Deutschland~Seilbahnen~Kurwaldbahn+Bad+Ems/344562/die-abtsche-weiche-auch-abt180sche-weiche.html)

Abbildung 57 <https://www.seilbahninventar.ch/objekt.php?objid=41732&lang=it>

Abbildung 58 Entwickeltes Modell in der Software *SIMPACK*

Abbildung 59 Entwickeltes Modell in der Software *SIMPACK*

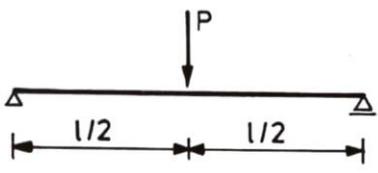
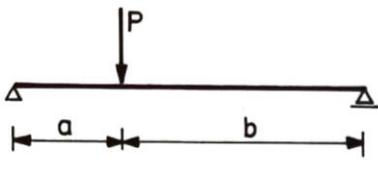
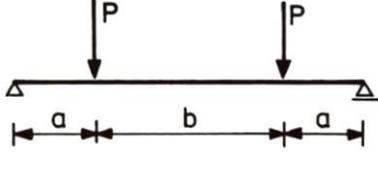
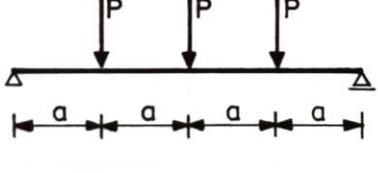
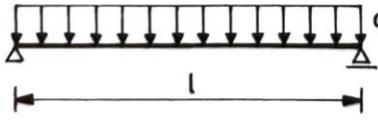
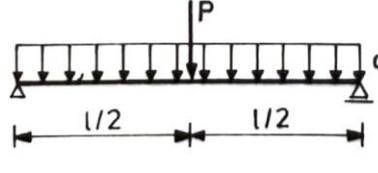
Abbildung 60 Entwickeltes Modell in der Software *SIMPACK*

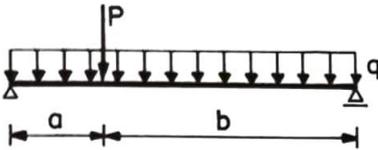
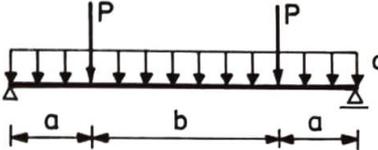
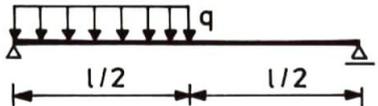
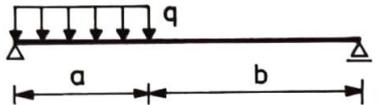
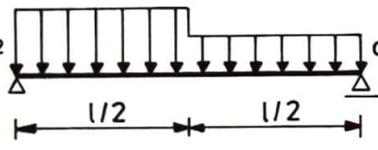
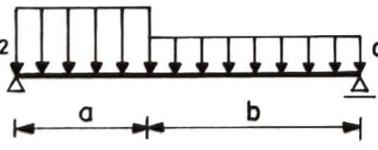
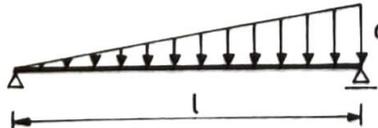
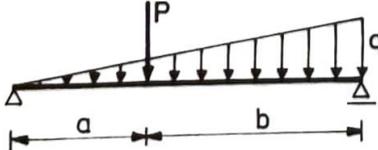
Abbildung 61 Entwickeltes Modell in der Software *SIMPACK*

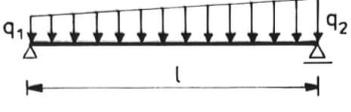
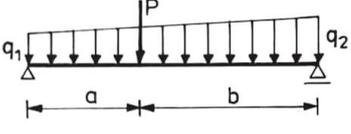
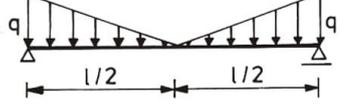
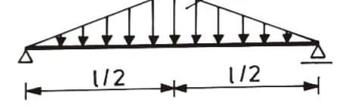
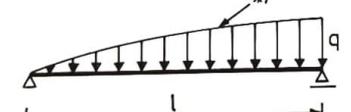
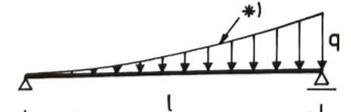
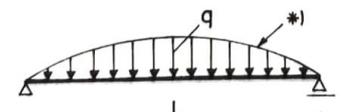
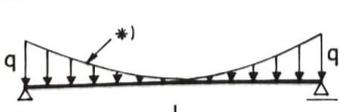
## 12. Anhänge

### 12.1. Anhang 1: Der Wert des Integrals $\int_0^l Q^2 dx$

Die folgenden Abbildungen entsprechen den Seiten 104-106 aus dem Buch *Statik der Seilkonstruktionen* von Dr. Pałkowski.  $P$  stellt die Einzellast, die in der Arbeit mit  $W$  bezeichnet wurde, dar.

Nr	Art der Belastung	$\int_0^l Q^2 dx$
1		$\frac{P^2 l}{4}$
2		$\frac{P^2 ab}{l}$
3		$2 P^2 a$
4		$5 P^2 a$
5		$\frac{q^2 l^3}{12}$
6		$\frac{q^2 l^3}{12} + \frac{P^2 l}{4} + \frac{P q l^2}{4}$

Nr	Art der Belastung	$\int_0^l Q^2 dx$
7		$\frac{q^2 l^3}{12} + \frac{P^2 ab}{l} + Pqab$
8		$\frac{q^2 l^3}{12} + 2P^2 a + 2Pqa(l-a)$
9		$\frac{q^2 l^3}{38,4}$
10		$\frac{q^2 a^3}{12l} (4l - 3a)$
11		$\frac{q_1^2 l^3}{12} + \frac{(q_2 - q_1)^2}{38,4} l^3 + \frac{q_2 - q_1}{12} \cdot q_1 l^3$
12		$\frac{q_1^2 l^3}{12} + \frac{(q_2 - q_1)^2}{12l} a^3 (4l - 3a) + (q_2 - q_1) q_1 a^2 \left( \frac{l}{2} - \frac{a}{3} \right)$
13		$\frac{q^2 l^3}{45}$
14		$\frac{q^2 l^3}{45} + \frac{P^2 ab}{l} + \frac{Pqa}{3} \left( 1 - \frac{a^2}{l^2} \right)$

Nr	Art der Belastung	$\int_0^l Q^2 dx$
15		$\frac{q_1^2 l^3}{45} + \frac{q_2^2 l^3}{45} + \frac{q_1 q_2 l^3}{25.71}$
16		$\frac{P^2 ab}{l} + \frac{q_1^2 l^3}{45} + \frac{q_2^2 l^3}{45} + \frac{q_1 q_2 l^3}{25.71} + 2q_1 P ab \left( \frac{1}{2} - \frac{a}{3l} - \frac{b}{6l} \right) + 2q_2 P ab \left( \frac{1}{2} - \frac{b}{3l} - \frac{a}{6l} \right)$
17		$\frac{q^2 l^3}{80}$
18		$\frac{q^2 l^3}{30}$
19		$\frac{q^2 l^3}{23.66}$
20		$\frac{q^2 l^3}{112}$
21		$\frac{q^2 l^3}{18.53}$
22		$\frac{q^2 l^3}{252}$
	*) Parabel 2. Grades	

## **12.2. Anhang 2: Dateien im externen Speicher**

Die Modelle, die Dateien der Karrenseilbahn, die Simulationsergebnisse und die Ergebnisse der analytischen Ermittlung sind in dem mit dieser Arbeit gebundenen externen Speicher (CD) einsehbar:

1. Modell:
  - 1.1. Seilmodell
  - 1.2. Fahrzeugmodell
2. Karrenseilbahn:
  - 2.1. Längenschnitt
  - 2.2. Seilbahntechnische Berechnung
  - 2.3. Seilbahntechnische Beschreibung
3. Ergebnisse:
  - 3.1. Ermittlungen mit dem Fundamentalsatz der Seilstatik: „Fundamentalsatz.xlsx“
  - 3.2. Ergebnisse der Simulation; Ermittlungen mit der Methode der Querkräfte und Ergebnisse insgesamt: „Simulation\_analytisch\_FS\_Ergebnisse.xlsx“

### 12.3. Anhang 3: Die anderen Simulationsdarstellungen

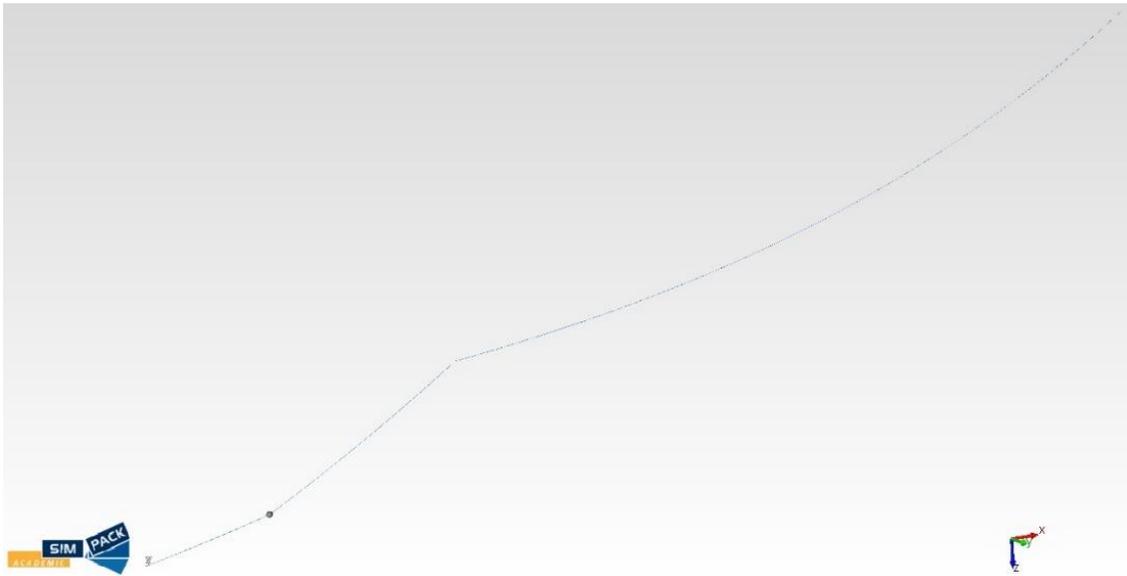


Abbildung 58: Seilfelderstand in dem 10\_I-Fall

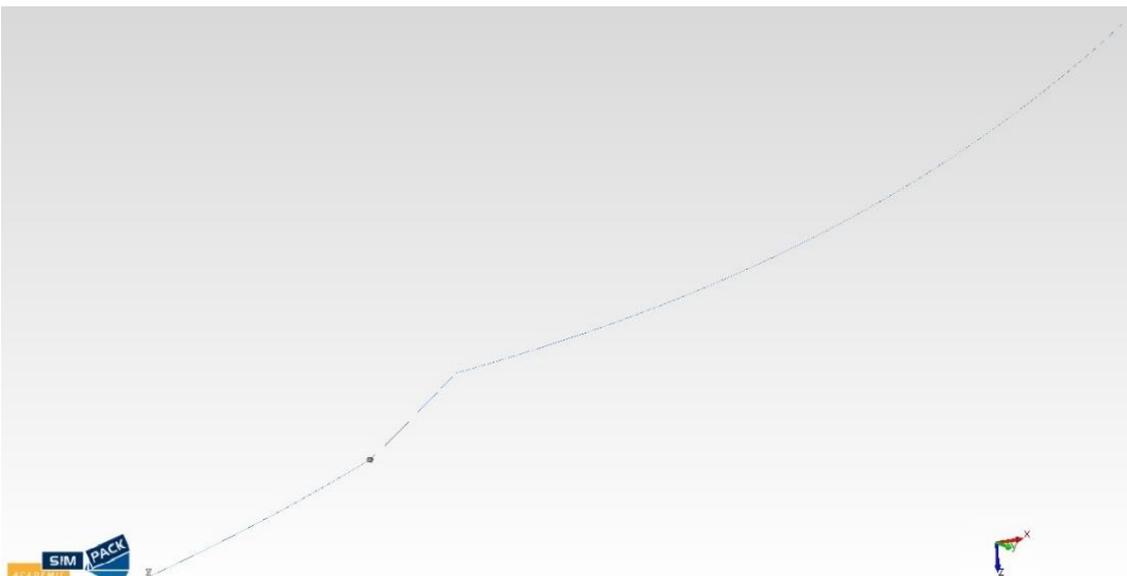


Abbildung 59: Seilfelderstand in dem 20\_I-Fall

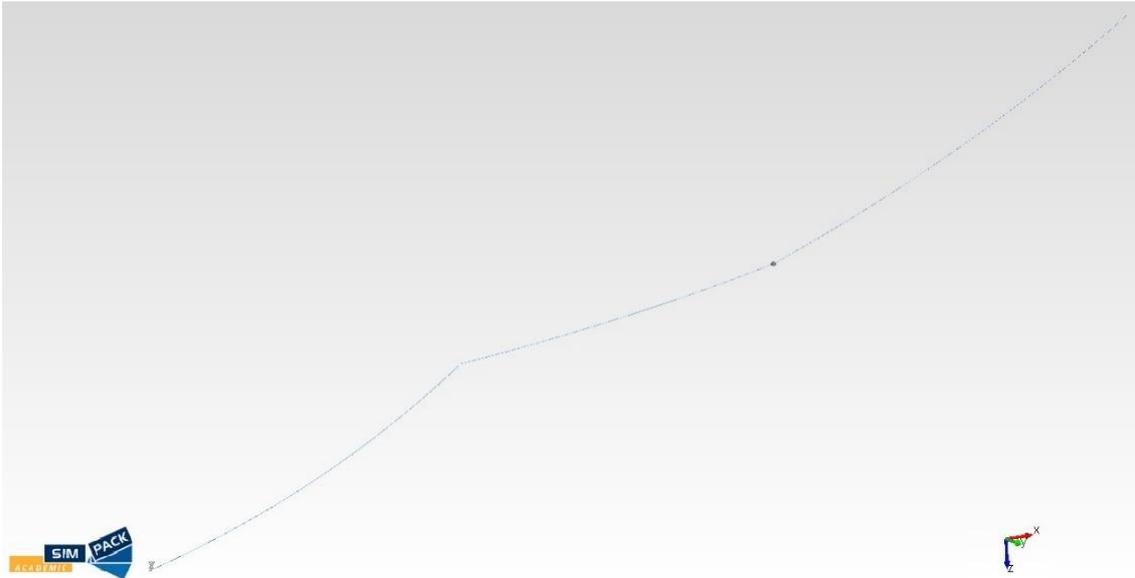


Abbildung 60: Seilfelderstand in dem 39\_II-Fall

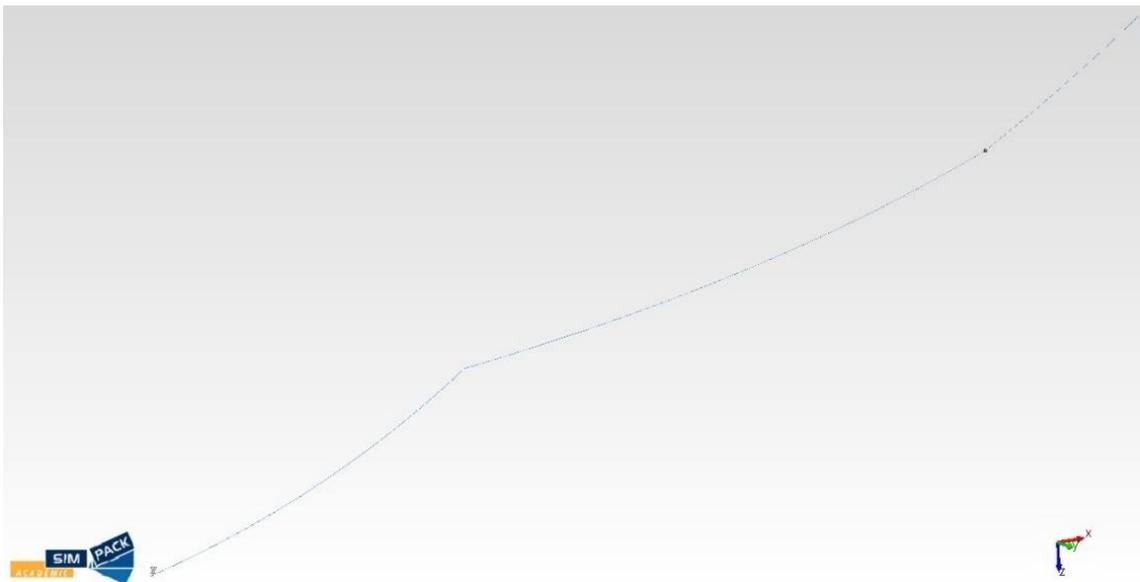


Abbildung 61: Seilfelderstand in dem 77\_II-Fall