

TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Vienna University of Technology

## Diplomarbeit

# Entwicklung und Inbetriebnahme eines Modellprüfstands für Seilbahnen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

## Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Kartnig**

(E307 Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik: Forschungsbereich  
Konstruktionslehre und Fördertechnik)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Julian Spieler**

e1228100 (066 445)

Heldendankstraße 1a

6900 Bregenz

Wien, im Februar 2018

---

Julian Spieler



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Februar 2018

---

Julian Spieler

---

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich während meiner Masterarbeit begleitet und unterstützt haben.

Besonderen dankt gebührt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Kartnig, der mich während der Masterarbeit unterstützt hat.

Ein großer Dank gebührt Herrn Dipl.-Ing Thomas Lässer, der mich während der ganzen Zeit in allen Belangen unterstützt hat und ohne seine Hilfe wäre diese Masterarbeit nicht zustande gekommen.

Des Weiteren möchte ich meiner Familie, im besonderen meinen Eltern Petra und Gert bedanken, die mir mein Studium ermöglicht und moralisch unterstützt haben.

Ein weiteren Dank gilt meinem Bruder, Simon, der mich immer wieder aufheitert hat.

Meiner Freundin Belinda danke ich besonders für den emotionalen Rückhalt über die Dauer meines gesamten Studiums.

Danken möchte ich außerdem meinen Freunden, die mich während meines Studiums begleitet und unterstützt haben. Besonderen Dank gilt Beni, Flo, Arnold und Bernd.

---

## Kurzfassung

Schneller, komfortabler und leistungsfähiger, dies sind die Anforderungen für neue Seilbahnen. Bei älteren Seilbahnsystemen wie z.B. beim 4er Sessellift war noch ein annähernd konstanter Beladungszustand vorhanden. Aufgrund des Trends hin zu immer noch schwereren Sesseln und Kabinen, die aufgrund der höheren Fahrgeschwindigkeit aber auch einen größeren Abstand zueinander haben, projiziert sich der Beladungszustand auf lokale Lastspitzen. Diese lokalen Lastspitzen können unangenehme Schwingungsphänomene verursachen, die den Fahrkomfort deutlich verschlechtern.

In dieser Arbeit wird ein Prüfstand basierend auf der linearen Saitentheorie entwickelt, konstruiert und gefertigt, für die Evaluierung der Seilmodelle.

Zu Beginn dieser Arbeit wird eine Anforderungsliste erarbeitet, von der die Funktionsstruktur abgeleitet wird. Die Untergruppen der Funktionsstruktur Seilmodell, Antrieb und Messtechnik werden dabei genauer betrachtet. Als nächstes werden mit Hilfe von Wirkprinzipien für die Funktionen mehrere Varianten entwickelt. Anschließend werden die unterschiedlichen Lösungskonzepte miteinander bzw. in unterschiedlichen Kombinationen analysiert und darauf geachtet, ob diese realisierbar sind. Dies erfolgt mit dem Morphologischen Kasten.

Der nächste Abschnitt befasst sich mit der mathematische Beschreibung des Prüfstands, mit der allgemeinen Wellengleichung. Diese wird mit dem Näherungsverfahren nach Galerkin approximiert. Anschließend wird das Modell um die Nichtlineare Saitentheorie erweitert und der Prüfstand mit Matlab simuliert. Mit Hilfe der Erkenntnisse der mathematischen Modellbildung wird der Antrieb dimensioniert. Das Antriebskonzept basiert auf einer zeitlich veränderlichen Seilkraft. Die Seilkraftänderungen werden mit den unterschiedlichen Eigenfrequenzen des Systems abgestimmt, um Resonanz zu erzeugen.

Das Simulations-Messprogramm ist mit Hilfe von LabView erstellt, in diesem werden die einzelnen Sensoren für die Seilauslenkung implementiert. Außerdem ist noch ein Kraftsensor vorhanden, der die Seilkraftänderung misst. Anschließend erfolgt die Inbetriebnahme und Messauswertung.

## Abstract

Faster, more comfortable and increasingly powerful, these are the new requirements for cable cars. In older cable car systems, e.g. in the 4-seat there was still an approximately constant loading condition. Due to the development to larger seats, cabins and also the increasing velocity and the larger distance from each other, the loading state projects onto local load peaks. These local load peaks can cause unpleasant vibration phenomena that degrade the ride comfort.

In this thesis, a test bench based on the linear string theory is developed, constructed and manufactured for the evaluation of rope models.

At the beginning of this thesis, a list of requirements is developed with which the function structure is derived. The subgroup of the function structure rope model, drive and technique of measurement are considered in more detail. Next, several variants are developed with the aid of operating principles for the functions. Subsequently, the different solution concepts or in different combinations are analyzed and tensioned whether these are realizable, this is done with the morphological box.

In addition, the mathematical description of the test bench is made with the general wave equation. This is approximated by the Galerkin approximation method. The power unit is dimensioned with the knowledge of the mathematical modeling. The power unit concept is based on a time-variable rope force. The changes in the cable load are matched with the different natural frequencies of the system in order to generate resonance.

The simulation measuring program is created with the help of LabView, in which the individual sensors for the cable deflection are implemented. Additionally there is, a force sensor, which measures the changes of the cable force. This is followed by commissioning and measurement evaluation.

---

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Aufgabenstellung .....	2
1.2	Arbeitsphasen .....	2
1.2.1	Vorgehensweise.....	3
1.3	Identifikation.....	3
2	Grundlagen der Seilbahntechnik .....	6
2.1	Unterscheidungsmerkmale von Seilbahnen .....	6
2.2	Stahldrahtseil .....	8
2.3	Schwingungen an Seilbahnen .....	8
3	Definieren der Aufgabenstellung .....	10
3.1	Erstellen der Anforderungsliste .....	11
3.1.1	Schwierigkeiten beim Erstellen der Anforderungsliste .....	11
3.1.2	Anforderungsliste für den Seilbahnprüfstand.....	12
4	Konzipieren .....	13
4.1	Analyse der Anforderungsliste.....	13
4.2	Aufbau der Funktionsstruktur .....	14
4.2.1	Gesamtfunktion.....	14
4.2.2	Teilfunktion.....	14
4.2.3	Anwendung von Funktionsstrukturen .....	15
4.2.4	Funktionsstruktur.....	15
4.3	Wirkstruktur und Wirkprinzip entwickeln .....	18
4.3.1	Wirkprinzipien kombinieren .....	18
4.3.2	Antriebsvarianten .....	20
4.3.3	Variante Exzenter.....	21
5	Mathematische Beschreibung des Seilbahn- Prüfstands.....	23
5.1	Seildynamik.....	23
5.1.1	Wellengleichung.....	23
5.1.2	Lösung der Wellengleichung mittels Produktansatz .....	25
5.1.3	Näherungsverfahren nach Galerkin.....	29
5.2	Nichtlineare Saitentheorie .....	38
5.3	Zustandsraum .....	42
6	Prüfstandskonzept .....	43

---

6.1	Antriebsauslegung .....	43
6.1.1	Vorauslegung .....	43
6.1.2	Simulation mit Matlab .....	45
6.2	Prüfstand entwerfen .....	48
7	Messtechnik .....	54
7.1	Sensorik .....	54
7.1.1	Optische Sensoren .....	54
7.1.2	Kraftsensor .....	56
7.1.3	Seilzugsensor .....	57
7.1.4	NI Data Acquisition .....	58
7.2	LabVIEW .....	62
7.2.1	Sensoren einlesen .....	63
7.2.2	Spannung umwandeln .....	63
7.2.3	Frequenzanalyse, FFT und graphische Ausgabe .....	64
7.2.4	Daten speichern .....	66
7.2.5	Frontpanel .....	66
8	Inbetriebnahme und erste Messversuche .....	69
8.1	Erste Optimierungsmaßnahmen .....	69
8.2	Erregung des Systems .....	71
8.3	Frequenzdiagramm .....	72
9	Zusammenfassung .....	73
10	Literaturverzeichnis .....	75
11	Abbildungsverzeichnis .....	78
12	Tabellenverzeichnis .....	80

# 1 Einleitung

Die Seilbahntechnik hat einen höheren Stellenwert als früher, nicht nur wegen der Sommer- sowie Winteraktivitäten, sondern auch aufgrund des immer stärker werdenden Interesses für Urbane-Seilbahntechnik.

Der Trend geht vom kontinuierlich verteilten Beladungszustand bei geringem Fahrzeuggewicht sowie geringen Fahrzeugabständen und kleinen Stützenabständen hin zum konzentrierten Beladungszustand mit schweren Fahrzeugen mit geringem Abstand zwischen den Fahrzeugen in großen Seilfeldern. Dies führt allerdings auch dazu, dass immer öfters unangenehme Schwingungserscheinungen auftreten. In diesen Arbeiten wird ein Seilmodell, basierend auf der linearen Saitentheorie, entwickelt.

Der Prüfstand ist in erster Linie ein Vorführprüfstand. Die maximale Länge beträgt 2,3 m, weshalb die Knickwinkel sehr viel größer als bei realen Seilbahnen sind, dadurch ändert sich das Querkraftverhältnis. Bei Seilbahnen wird das Seil mit 150 kN bis 600 kN vorgespannt und die Fahrbetriebsmittel haben eine Masse bis zu 2000 kg eingehängt, hingegen beträgt beim Vorführstand die Vorspannkraft 200 N und das Gewicht beträgt lediglich 7 kg. Dies hat zur Folge, dass sich das transversale Verhalten sowie die Impulsübertragung unterscheiden.

In dieser Arbeit wird ein Prüfstand für die Evaluierung des hier beschriebenen Seilmodells konstruiert. Zu Beginn dieser Arbeit wird eine Anforderungsliste erarbeitet, mit der die Funktionsstruktur abgeleitet werden kann. Die Funktionen Lagerung, Seilmodell und Antrieb werden detailliert betrachtet. Als nächstes werden mit Hilfe von Wirkprinzipien für die Funktionen mehrere Varianten entwickelt. Anschließend werden die unterschiedlichen Lösungskonzepte miteinander bzw. in unterschiedlichen Kombinationen analysiert und darauf geachtet, ob diese realisierbar sind, dies erfolgt mittels Morphologischen Kasten.

Um den Prüfstand dimensionieren zu können wird ein Simulationsmodell auf Basis der Wellengleichung erstellt. In der Arbeit wird die allgemeine Wellengleichung mit dem Produktansatz gelöst. Um nichtlineare Einflüsse berücksichtigen zu können wird das Näherungsverfahren nach Galerkin eingesetzt. Der Einfluss der nichtlinearen Saitentheorie, resultierend aus dem elastischen Verhalten des Seils, wird mit Hilfe von Matlab untersucht. Die aus den Simulationen gewonnen Erkenntnisse werden zur Auslegung des Antriebs verwendet. Die Erregung des Seils erfolgt anhand der Seilkraftänderung. Der Antrieb erregt mittels variabler Drehzahl über einen Exzenter die Seilauslenkung. Bei der Erregung des Seils wird versucht, die unterschiedlichen Eigenfrequenzen des Systems anzuregen. Es sollen am Prüfstand die Resonanzen erregt werden, um große Schwingungsamplituden zu erzeugen. Die am Prüfstand erzeugten Schwingungsamplituden in den Resonanzfällen werden mit den Simulationsdaten verglichen, um die Grenzen der Modelle bei großen Seilauslenkungen untersuchen zu können. Die Messungen der Seilauslenkung und Seilkraftänderung erfolgt mittels LabView, zu diesem Zweck ist ein Messprogramm entwickelt worden. Zum Schluss erfolgt die Inbetriebnahme des Seilbahnprüfstands. Es werden erste Messungen durchgeführt, um ein breites Frequenzspektrum zur Evaluierung zu generieren. Die Daten der mathematischen Simulation werden mit den Daten aus den Messungen am Seilbahnprüfstand im Frequenzdiagramm miteinander verglichen.



## 1.1 Aufgabenstellung

Auf der Basis von grundlegenden Methoden zur theoretischen Modellbildung der Seildynamik werden Simulationsmodelle entwickelt, die die realen Schwingungsprobleme beschreiben. Für die Verknüpfung der theoretischen Modelle mit der Realität ist der empirische Teil entscheidend, deshalb wird ein Prüfstand gefertigt. Die experimentelle Modellbildung ermöglicht die Ermittlung der notwendigen Parameter für die Simulation, um eine möglichst exakte Abbildung der Wirklichkeit zu gewährleisten.

Dieser Arbeitsschritt befasst sich mit der Untersuchung des Einflusses von großen Knickwinkel auf das dynamische Verhalten der Saitentheorie. In dieser Diplomarbeit soll untersucht werden, ab welcher Durchbiegung und welchem Abstand zwischen den Stützen bzw. der Biegesteifigkeit zur Seilspannung, Einfluss auf das dynamische Verhalten hat. Durch die wesentlich kleinere Länge des Prüfstands ändert sich der Knickwinkel, im Gegenteil zu realen Seilbahnen. Außerdem verändert sich das Querkraftverhältnis. Bei Seilbahnen wird das Seil mit 150 kN bis 600 kN vorgespannt und es werden Fahrzeuge mit einem Gewicht bis zu 2000 kg eingehängt, bei diesem Vorführstand ist die Vorspannkraft lediglich 200 N und die Gewichte sind 7 kg. Dies hat zur Folge, dass sich das transversale Verhalten sowie die Impulsübertragung ändern. Außerdem wird untersucht, ob das reale Modell mit der Simulation übereinstimmt.

## 1.2 Arbeitsphasen

Die Projekte beginnen alle mit der mathematischen Beschreibung des Modells. Die theoretische Untersuchung sind Grundlagen für die Entwicklung eines Prüfstands zur Validierung der Simulationsmodelle (Realitätsabgleich). Bei nicht übereinstimmenden Ergebnissen muss die theoretische Modellbildung angepasst werden und der Iterationszyklus beginnt von vorne. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit den ersten zwei Zyklen, die in Abbildung 1 ersichtlich sind. (Vgl.: Karting et al., 2011, S.10ff)

Die einzelnen Arbeitsschritte sind im nächsten Abschnitt erklärt.

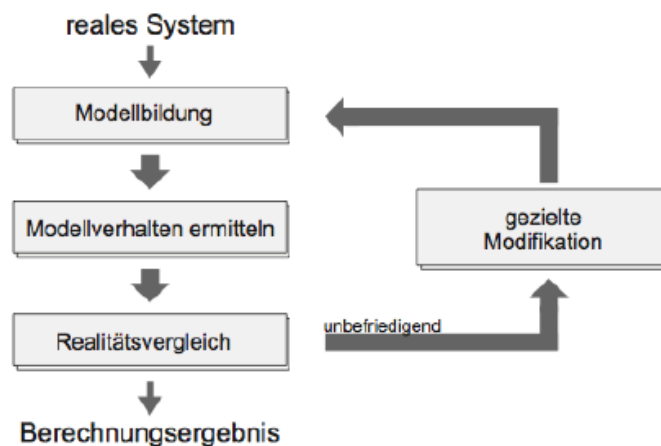


Abbildung 1: Iterationsprozess bei der Modellbildung

## 1.2.1 Vorgehensweise

Ausgehend von der Funktionsstruktur für den Seilbahnprüfstand und der mathematischen Beschreibung des Seils und des Prüfstands werden die zur Parameterbestimmung benötigten Prüfstandskonzepte erarbeitet. Nach der Konstruktion des Prüfstands liegt die Schwierigkeit darin festzustellen, wie das System angeregt wird und wie die Messung der benötigten Ein- und Ausgangssignale erfolgt. (Vgl.: Kartnig et al, 2011/ Tschaikner 2012). Die Diplomarbeit ist wie folgt entwickelt worden:

### 1. Funktionsstruktur für den Seilbahnprüfstand erstellen.

Die Funktionsstruktur dient dazu, um die Zusammenhänge zwischen Eingang und Ausgang eines System zu erkennen. Dabei werden die einzelnen Anforderungen, welche an den Prüfstand gestellt werden, in Funktionen unterteilt. Für die einzelnen Funktionen werden Wirkprinzipien erarbeitet und in einem Morphologischen Kasten miteinander kombiniert.

### 2. Mathematische Beschreibung des Prüfstands

Die mathematische Beschreibung soll als Grundlage für die Prüfstandskonzepte dienen, daraus ergeben sich für das Systemverhalten die benötigten Erreger- und Messeinheiten. Durch diese Erkenntnisse ergeben sich der erforderliche Platzbedarf und die zu erwartenden Auslenkungen und Erregung sowie die Belastung an den Prüfstand.

### 3. Prüfstandskonzepte und die konstruktive Ausführung

Die Prüfstandskonzepte werden intern und mit der Technischen Universität Wien bewertet, verbessert und anschließend an der Technischen Universität Wien gefertigt.

### 4. Seilerregung, Messsensorik und Messung

Geeignete Seilauslenkung und Messsensorik inklusive Messaufzeichnung am Prüfstand sollen entwickelt und umgesetzt werden, damit eine Validierung gewährleistet werden kann.

## 1.3 Identifikation

Die entwickelten Modelle für die Seile, Beladung/ Fahrzeuge und deren Kombination müssen mit dem in der Praxis auftretenden Verhalten ausreichend übereinstimmen, um dies zu realisieren wird ein iterativer Ablauf der Identifikation implementiert. (siehe Abbildung 2).

Es gibt zwei Verfahren zur Identifikation linearer dynamischer Systeme, dies ist der parametrische und der nicht-parametrische Ansatz. Die Untersuchung dieser Arbeit deutet auf ein System mit linearen parametrischen Modelle mit verteilten Parametern hin, weil die Systeme vorwiegend mit linearen partiellen Differentialgleichungen beschrieben werden. Die Identifikation erfolgt von einer modellhaften Vorstellung der physikalischen Realität (theoretische Modellbildung).

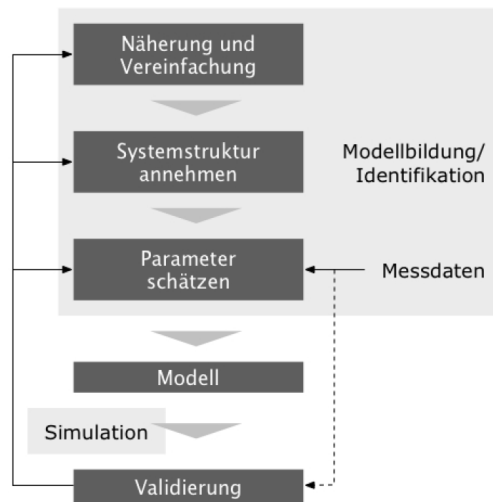


Abbildung 2: Iterative Struktur der Identifikation, Modellierung und Validierung

Quelle: Kozek, 2012, S.15

In Abbildung 3 ist die Struktur einer Identifikation ersichtlich. Ziel der Identifikation ist es durch die gemessenen Ein- und Ausgangssignale des Systems ein Modell zu generieren. Dieses Modell soll das statische und dynamische Verhalten des Systems so gut wie möglich nachbilden. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Eingangssignal  $u$ , der Erregung des Prozesses und dem Ausgangssignals  $y_u$  besteht. Es lässt sich nicht vermeiden, dass der Prozess frei von Störungen ist wie z.B.: Messrauschen.

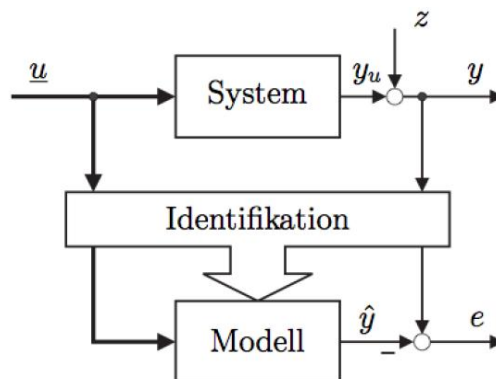


Abbildung 3: Struktur einer Identifikation

Quelle: Schröder, 2010, S.219

Aus diesem Grund wird nur das gestörte Ausgangssignal  $y$  zur Identifikation genutzt. Dieses Signal ist eine Überlagerung des ungestörten Prozessausgangs  $y_u$  und dem Störsignal  $z$  (Vgl.: Schröder, 2010, S.218ff). Das Ziel einer Identifikation ist es die Abweichung  $e$  der Ausgangssignale des Systems  $y$  und des Modells  $\hat{y}$  bei identischem Eingangssignal  $u$  so gering wie möglich zu lassen. Die Identifikation, Modellbildung und Validierung besteht aus drei Schritten (siehe Abbildung 2)

## 1. Strukturauswahl/ Bestimmung

Es wird ein mathematisches Modell (5 Mathematische Beschreibung des Seilbahn-Prüfstands) entwickelt.

## 2. Parameterabschätzung

Um dies zu realisieren muss ein Prüfstand entwickelt werden (experimentelle Modellbildung). Außerdem muss dieser Prüfstand mit geeigneten Testsignalen (Impuls, kontinuierliche Erregung) angeregt werden. Mit den gleichen Signalen wird dann das mathematische Modell erweitert. Die durch gemessene und simulierte Daten entstehende Differenz  $e$  wird berechnet (Abbildung 3).

## 3. Validierung

Dieser Arbeitsschritt soll klären ob die Realität hinreichend genau ist. Die wichtigsten Eigenschaften eines Modells bezüglich Validierung sind: (Vgl.: Kozek, 2012, S14)

- Reproduzierbarkeit: Kann das Modell das Verhalten des realen Systems hinreichend genau abbilden?
- Prädiktion: Kann das Modell das Verhalten des realen Systems ausreichend genau vorhersagen?
- innere Struktur: Stellt das Modell das innere Zusammenwirken des realen Systems eindeutig dar?

Zur Bestimmung der Parameter ist es von Vorteil die Messdaten aufzuspalten, in einen großen Trainingsteil und in einen kleinen Validierungsteil, um eine korrekte Überprüfung der Modellgüte zu gewährleisten. Dies geschieht, weil der Prädiktionsfehler für die Trainingsdaten kontinuierlich mit der Modellordnung abnimmt und der Prädiktionsfehler für die Validierungsdaten bei übereinstimmender Modellordnung bzw. sehr geringer Abweichung ein Minimum aufweist (Vgl.: Kozek, 2012, S.88)

## 2 Grundlagen der Seilbahntechnik

Der Begriff Seilbahn beschreibt ein Verkehrsmittel für den Personen- oder Gütertransport in Fahrbetriebsmitteln. Diese werden mit Hilfe von Seilen bewegt und ohne eine feste Führung von einem oder mehreren Seilen getragen. Die Grundlagen der Seilbahntechnik erfolgt an Anlehnung nach (Vgl.: DIN EN 1907-1 2005/ Tschaiikner 2012).

### 2.1 Unterscheidungsmerkmale von Seilbahnen

Die Seilbahnen werden folgendermaßen unterteilt (Vgl.: CEN EN 12929-1:2004/ Tschaiikner 2012):

#### 1. Art der Tragmittel

Dies wird unterteilt in:

- Schwebeseilbahn: Das Laufwerk oder das Gehänge der Fahrzeuge wird auf einem oder mehreren zwischen frei stehenden Stützen gespannten Seil geführt und angetrieben (Abbildung 4)
- Standseilbahn: Das Laufwerk der Fahrzeuge wird auf Schienen geführt und von einem oder mehreren Seilen angetrieben.

#### 2. Betriebsart

- Pendelbetrieb: Merkmale dieser Betriebsart sind, dass das bewegte Seil seine Bewegungsrichtung nach jedem Fahrtspiel umkehrt. Die Fahrzeuge pendeln zwischen den Stationen, dies ist in Abbildung 4 links ersichtlich.
- Umlaufbetrieb: Kennzeichen dieses Betriebs sind, dass das bewegte Seil immer in dieselbe Bewegungsrichtung läuft. Die Fahrzeuge fahren in gleich bleibender Richtung, dies ist in Abbildung 4 rechts zu erkennen.

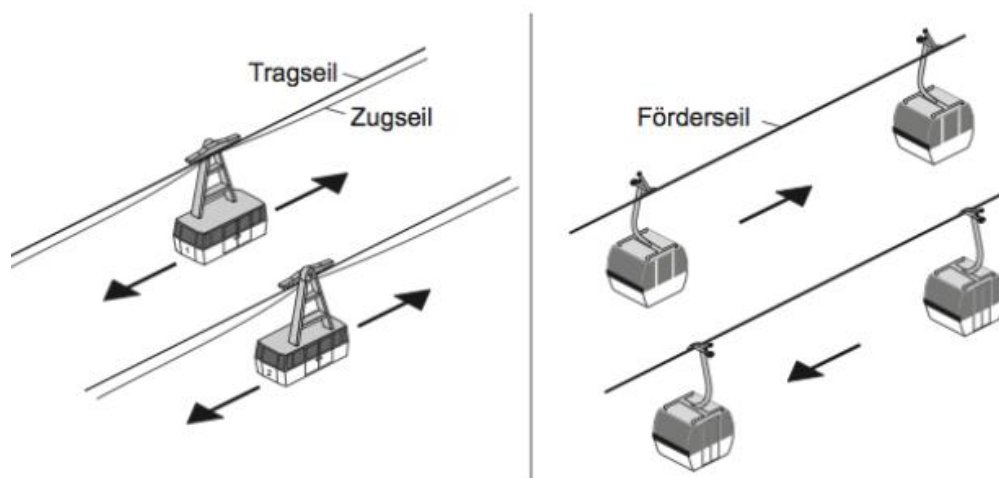


Abbildung 4: Links: Zweiseilschwebeseilbahn im Pendelbetrieb/ Rechts: Einseilschwebeseilbahn im Umlaufbetrieb

### 3. Art der Verbindungen zwischen dem Fahrzeug und dem Seil

- Kuppelbare Seilbahn: Diese Seilbahnen zeichnet aus, dass die Fahrzeuge in den Stationen vom Zug- bzw. Förderseil getrennt werden.
- Festgeklemmte Seilbahn: Unterscheiden sich zu den kuppelbaren Seilbahnen, indem die Verbindung zwischen den Fahrzeugen und dem Zug- bzw. Förderseil bestehen bleibt.

### 4. Anzahl der Seilen mit verschiedenen Aufgaben

Zugseil, Tragseil, Förderseil usw. (Abbildung 4)

### 5. Art der Fahrbetriebsmittel

Sessel, Schleppbügel, Kabinen, Wagen usw.

Beim Seilbahnprüfstand dieser Diplomarbeit werden Untersuchungen am stationären Seilfeld durchgeführt. Somit können die messtechnischen Erfassungen der Schwingungen zwischen den Stützen in einem Seilfeld, (Abbildung 5) untersucht werden.

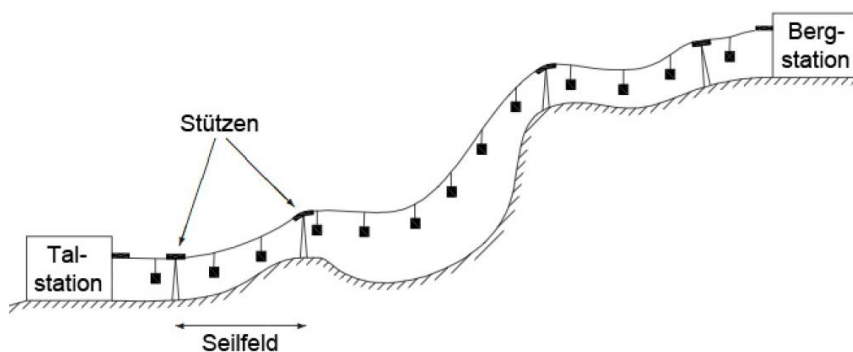


Abbildung 5: Definition Seilfeld

Quelle: CEN EN 12929-1:2004

## 2.2 Stahldrahtseil

Eine wichtige Aufgabe besitzt das Drahtseil. Neben der Verbindung der Stationen einer Schwebeseilbahn übernimmt das Stahldrahtseil sowohl das Tragen als auch das Bewegen der Fahrzeuge. Die verschiedenen Seilbahnen und deren Einsatzgebiete erfordern eine Vielzahl von Drahtseilen, die den jeweiligen Anforderungen und Beanspruchungen wie z.B.: Zug, Biegung, Torsion, Korrosion, Verschleiß, thermische Beanspruchung usw. gerecht werden. Allgemein ist ein Stahldrahtseil nach Abbildung 6 aufgebaut.

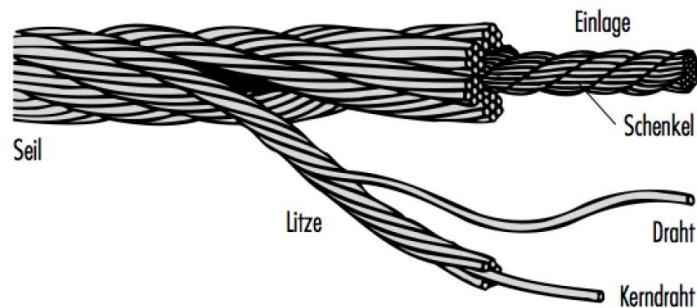


Abbildung 6: Aufbau Stahldrahtseil

Quelle: Fatzer AG, Drahtseiltechnik S.3-10

Für den Prüfstand dieser Diplomarbeit wird ein Silch, eine dünne reißfeste Schnur, verwendet, damit der Einfluss der Biegesteifigkeit des Seils so gering wie möglich bleibt. Außerdem muss das Verhältnis zwischen Seildurchmesser und Fahrzeug/ Gewicht realitätstreu sein.

## 2.3 Schwingungen an Seilbahnen

Als Schwingung wird eine zeitlich veränderliche Zustandsgröße beschrieben. Die Größe nimmt abwechselnd zu oder ab. Mechanische Zustandsgrößen sind z.B.: der Weg, die Geschwindigkeit oder der Drehwinkel eines Systems (Vgl.: DIN 1311-1:2000)

Seile und Fahrbetriebsmittel der Seilbahn sind komplexe schwingfähige Systeme, welche aus unterschiedlichsten elastischen Gliedern und Massen bestehen. Durch eine einmalige oder kontinuierliche Krafteinwirkung/ Störung wird das System aus dem Gleichgewicht gebracht und anschließend durch die rücktreibende Kraft wieder in die Richtung des Ausgangszustandes gedrückt, dadurch entsteht eine Schwingung. Charakteristisch für eine Schwingungsprozess ist, dass die kinetische Energie in potentielle Energie und umgekehrt umgewandelt wird.

Die Ursachen für die Störungen sind (Vgl.: Canale, ISR 6/ 2010, S.24) :

- plötzliche Änderung der Seilspannkraft z.B.: Beschleunigung oder Verzögerung, Änderung der Zugwirkung des Fahrzeuges bei der Stützenüberfahrt.
- Änderung der vertikalen Last in einem Seilfeld
- Änderung der Lastverteilung auf der Strecke
- Einwirkung von außen z.B.: Winderregung

Systeme die eine freie Schwingung ausführen sind durch eine einmalige Störung in Schwingung versetzt worden. Das System gibt die Energie an die Umgebung ab und es liegt real kein konservatives System vor, dadurch wird nach einer gewissen Zeit bzw. Anzahl von Schwingzyklen dieses System zum Stillstand kommen. Die Frequenz eines solchen Systems ist von der Masse und der Steifigkeit abhängig. Die Frequenz ist für das System charakterisierend und bleibt konstant. Diese Frequenz wird als Eigenfrequenz des Systems bezeichnet (Vgl.: Kopanakis, ISR 2/2010, S.32ff). Wenn die Eigenfrequenz der Erregerfrequenz entspricht tritt Resonanz auf, dies bewirkt ein Aufschwingen des Systems.



### 3 Definieren der Aufgabenstellung

Die Entwicklungs-/ Konstruktionsabteilung erhalten ihre Aufgaben von anderen Unternehmensbereichen, dabei wird die Aufgabenstellung an die Konstruktion oder an die Entwicklung in folgender Form herangetragen:

- Entwicklungsauftrag: extern oder intern durch die Produktplanung in Form eines Produktvorschlages
- konkrete Bestellung eines Kunden
- Anregung aufgrund von z.B.: Verbesserungsvorschlägen und Kritik durch Verkauf, Versuch, Prüffeld, Montage oder aus den benachbarten bzw. eigenem Konstruktionsbereich

Die Aufträge beinhalten die Aussagen zum Produkt und seiner Funktionalität sowie Leistungsfähigkeit. Das Problem der Entwicklungs-/ Konstruktionsabteilung ist die lösungs- und gestaltbeeinflussenden Produktspezifikationen zu erkennen und quantitative Angaben zu formulieren und zu dokumentieren. Das Ergebnis dieses Prozesses ist die Anforderungsliste. Diese ist das Dokument zur Produktspezifikation und somit auch das Maß für den Grad der Aufgabenerfüllung für die Entwicklungs-/ Konstruktionsabteilung. In Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber werden zuerst folgende Fragen geklärt:

- Welchen Zweck muss die Lösung erfüllen?
- Welche Eigenschaften muss sie aufweisen?
- Welche Eigenschaften darf sie nicht haben?

Als wichtige Vorarbeit zum Erstellen einer Anforderungsliste, kann das Erkennen von Kundenwünschen und deren Umformulierung in Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt sein. (Vgl.: Pahl et al. 2007, S.213)

### 3.1 Erstellen der Anforderungsliste

Es handelt sich hierbei um ein zweistufiges Vorgehen. In der ersten Stufe werden offensichtliche Anforderungen definiert und dokumentiert. Im zweiten Schritt werden diese Anforderungen, wenn nötig, mit Hilfe entsprechender Methoden ergänzt bzw. weiter spezifiziert.

Die Anforderungen in Forderungen und Wünsche unterteilen.

- Forderungen: müssen unter allen Umständen erfüllt werden, d.h. ohne deren Erfüllung ist die Lösung keinesfalls akzeptabel.
- Wünsche: sind nach Möglichkeit zu berücksichtigen, evtl. mit dem Zugeständnis, dass ein begrenzter Mehraufwand dabei zulässig ist. Es wird empfohlen, die Wünsche nach hoher, mittleren und geringer Bedeutung zu klassifizieren.

Die Forderungen und Wünsche sind mit Quantitäts- und Qualitätsaspekten aufzustellen.

- Quantität: alle Angaben über Anzahl, Stückzahl, Losgröße und Menge, oft auch pro Zeiteinheit wie Leistung, Durchsatz, Volumenstrom usw.
- Qualität: alle Angaben über zulässige Abweichungen und besondere Anforderungen wie tropenfest, korrosionsbeständig usw.

Die Anforderungen sollen, wenn möglich, durch Zahlenangaben präzisiert werden. Wenn dies nicht möglich ist müssen verbale Aussagen klar formuliert werden. Die Anforderungsliste stellt die Ausgangsposition und, da sie stets auf neuesten Stand gehalten wird, die aktuelle Arbeitsunterlage dar. (Vgl.: Pahl et al 2007 S.214f)

#### 3.1.1 Schwierigkeiten beim Erstellen der Anforderungsliste

Bei der praktischen Anwendung entstehen oft Fragen oder Schwierigkeiten, die noch näher behandelt werden. (Vgl.: Pahl et al. 2007, S229-230)

- Selbstverständliches: wie z.B.: billig fertigen oder einfach montieren, wird nicht in eine Anforderungsliste aufgenommen.
- Nicht immer lassen sich in dem frühen Stadium des ersten Aufstellens einer Anforderungsliste präzise Aussagen tätigen.
- Das schrittweise Entwickeln der Anforderungsliste kann bei vagen Aufgabenstellungen durchaus zweckmäßig sein.
- Beim Aufstellen der Anforderungsliste oder bei der Diskussion werden häufig bereits Funktionen genannt oder Lösungsideen geäußert.
- Erkannte Mängel oder Fehler können Anforderungen initiieren. Diese müssen lösungsneutral formuliert werden.

### 3.1.2 Anforderungsliste für den Seilbahnprüfstand

Die Anforderungsliste für den Prüfstand ist in Tabelle 1 ersichtlich. Die Gesamtlänge, Höhe sowie die Antriebsleistung, Anfahrmoment und die Drehzahlen sind in den Kapiteln 5 und 6 berechnet worden.


		Anforderungsliste für den Seilbahnprüfstand	Seite 1 von 1
Änderungen	F W	Anforderungen	Verantw.
		<b>1. Konstruktion</b> Seilbahnprüfstand F Gesamtgewicht-Prüfstand: max. 50kg F Länge: 2.3m F Abstand zw. den Stützen: 0.65m F Höhe: 0.6m Seil F Durchmesser: $\leq 2\text{mm}$ F Max. Zulässige Zugkraft: $F \geq 200\text{N}$ Einspannung F Vorspannkraft: $F = 200\text{N}$ F Fixe Einspannung an beiden Enden Beladung F $m_1 = 5\text{kg}$ F $m_2 = 7\text{kg}$ <b>2. Schwingungserregung</b> F Erregung mittels Antrieb W Erregung mittels Impuls W Einfacher Aufbau und kosten für Antrieb unter 500€ F Drehzahl einstellbar $n_1 = 127\text{min}^{-1}$ und $n_2 = 151\text{min}^{-1}$ F Antriebsleistung: $P = 45\text{W}$ F Anfahrmoment: $M = 4\text{Nm}$ F Gewicht Antrieb: $\leq 10\text{kg}$ <b>3. Messtechnik/ Sensorik</b> F Optische Messung der Seilbewegung an zwei Stellen W Seilkraft W Seilkraftänderung	Spieler

Tabelle 1: Anforderungsliste Prüfstand

## 4 Konzipieren

Konzipieren ist der Teil des Konstruierens, der nach dem Klären der Aufgabenstellung durch Abstrahieren auf die wesentlichen Probleme, Aufstellen von Funktionsstrukturen und durch Suche nach geeigneten Wirkprinzipien und deren Kombination in einer Wirkstruktur die prinzipielle Lösung festlegt. Unter Konzipieren versteht man die prinzipielle Festlegung einer Lösung. (Vgl.: Pahl et al. 2007, S.231)

Nach geklärter Aufgabenstellung durch die vorläufig festgelegte Anforderungsliste muss über folgende Fragen eine Entscheidung getroffen werden:

- Ist die Aufgabenstellung soweit geklärt, dass die Entwicklung der konstruktiven Lösung eingeleitet werden kann?
- Ist eine Konzepterarbeitung notwendig oder können schon bekannte Lösungen direkt Grundlage der Entwurfs- bzw. Ausarbeitungsphase sein?
- Wenn die Konzeptphase durchlaufen werden muss, wie und in welchem Umfang ist diese in Anlehnung an das methodische Vorgehen zu gestalten?

### 4.1 Analyse der Anforderungsliste

Der erste Arbeitsschritt zur Lösung besteht darin, die Anforderungsliste auf die geforderte Funktion und auf die wesentlichen Bedingungen zu analysieren.

Das Allgemeingültige und Wesentliche einer Aufgabe kann durch eine Analyse bezüglich funktionaler Zusammenhänge und wesentlicher aufgabenspezifischer Bedingung bei gleichzeitiger schrittweiser Abstraktion aus der Anforderungsliste relativ einfach gewonnen werden. Dazu muss wie folgt vorgegangen werden.

1. Gedankliche Wünsche weglassen
2. Nur noch Forderungen berücksichtigen, welche die Funktion und wesentliche Bedingungen unmittelbar betreffen.
3. Quantitative Angaben in Qualitative umwandeln und auf wesentliche Aussagen reduzieren.
4. Sinnvoll erweitern.
5. Problem lösungsneutral formulieren.

Bei der Neuentwicklung müssen grundsätzlich alle Wege offen bleiben bis klar erkennbar ist, welches Lösungsprinzip für den vorliegenden Fall das geeignetste ist. Für den nächsten Schritt ist es sehr hilfreich, die endgültige Formulierung lösungsneutral und zugleich als Funktion zu formulieren. (Vgl.: Pahl et al. 2007 S.237-242)

## 4.2 Aufbau der Funktionsstruktur

Die Anforderungen an eine Anlage, Maschine oder Baugruppe bestimmen die Funktion, die den Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems darstellt. Es muss zwischen Neukonstruktionen und Anpassungskonstruktionen unterschieden werden. Bei Neukonstruktionen ist der Ausgangspunkt für die Funktionsstruktur die Anforderungsliste und die abstrakte Problemformulierung. Aus den Forderungen und Wünschen sind funktionale Zusammenhänge erkennbar. Daraus ergeben sich meistens die Teilfunktionen am Eingang und Ausgang einer Funktionsstruktur. (Vgl.: Pahl et al. 2007 S.242-255)

### 4.2.1 Gesamtfunktion

Ist die Gesamtaufgabe im Wesentlichen formuliert kann die Gesamtfunktion angegeben werden, die unter Bezug auf den Energie-, Stoff- und/oder Signalumsatz unter Verwendung einer Blockdarstellung lösungsneutral den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen angibt. Die Gesamtfunktion wird in weiteren Schritten in Teilfunktionen gegliedert. (Vgl.: Pahl et al. 2007 S.242-243)

### 4.2.2 Teilfunktion

Die Gesamtfunktion wird je nach Komplexität der zu lösenden Aufgabe ebenfalls mehr oder weniger komplex sein. Unter Komplexität versteht man den Grad der Übersichtlichkeit des Zusammenhangs zwischen Eingang und Ausgang, die Vielschichtigkeit der notwendigen physikalischen Vorgänge sowie die sich ergebende Anzahl der zu erwartenden Baugruppen und Einzelteile. (Vgl.: Pahl et al. 2007, S.242-244)

Die Gesamtfunktion kann in Teilfunktionen niedrigerer Komplexität aufgegliedert werden. Die Verknüpfung der einzelnen Teilfunktionen ergibt die Funktionsstruktur, welche die Gesamtfunktion widerspiegelt.

Zielsetzung der Arbeitsschritte ist:

- für die Lösungssuche erleichterndes Aufteilen der geforderten Gesamtfunktion in Teilfunktionen
- Verknüpfen der Teilfunktionen zu einer einfachen und eindeutigen Funktionsstruktur

### 4.2.3 Anwendung von Funktionsstrukturen

Die Aufstellung einer Funktionsstruktur soll die Lösungsfindung erleichtern. Wie vollständig und stark untergliedert diese ist hängt vom Neuheitsgrad der Aufgabenstellung und dem Erfahrungsschatz des Bearbeiters ab. (Vgl.: Pahl et al. 2007, S.252-255)

Folgende Empfehlungen werden zum Aufstellen von Funktionsstrukturen gemacht:

- Zunächst grobe Strukturen mit nur wenigen Teilfunktionen bilden, um dies dann schrittweise durch Zerlegen komplexer Teilfunktionen weiter aufzugliedern.
- Können keine eindeutigen Verknüpfungen zwischen Teilfunktionen erkannt und angegeben werden ist zur Suche nach einem ersten Lösungsprinzip auch die bloße Auflistung erkannter Teilfunktionen ohne logische oder physikalische Verknüpfung hilfreich.
- Logische Zusammenhänge können zu Funktionsstrukturen führen.
- Aus einer Grobstruktur oder durch ein bekanntes System ermittelten Funktionsstruktur können weitere Varianten gewonnen werden durch:
  - Zerlegen oder Zusammenlegen einzelner Teilfunktionen
  - Ändern der Reihenfolge einzelner Teilfunktionen
  - Ändern der Schaltungsart
  - Verlegen der Systemgrenze
- Funktionsstrukturen sollen so einfach wie möglich aufgebaut sein.
- Zur Lösungssuche sollen nur aussichtsreiche Funktionsstrukturen verwendet werden.
- Die Darstellung von Funktionsstrukturen erfolgt mit einfachen, aussagefähigen Symbolen.
- Die Analyse der Funktionsstruktur lässt erkennen, für welche Teilfunktionen neue Wirkprinzipien gesucht werden müssen und für welche bereits bekannte Lösungen genutzt werden können.

### 4.2.4 Funktionsstruktur

Die Funktionsstruktur für den Prüfstand ist in die Hauptfunktionen (Abbildung 8) unterteilt und es wird anschließend auf die Punkte Seilmodell, Antrieb und Messtechnik genauer eingegangen. Diese werden in Teilfunktionen unterteilt damit im nächsten Kapitel Wirkprinzipien erstellt werden können. Die Eingangs- bzw. Ausgangsvariablen sind in Energie-, Stoff- und Signalfloss unterteilt (Abbildung 7). (Vgl.: Pahl et al. 2007, S.248)

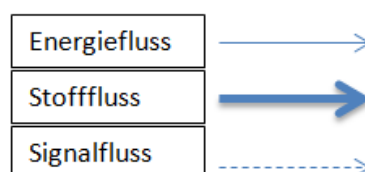


Abbildung 7: Eingang und Ausgangsvariablen

Als Energiefluss wird folgendes verstanden:

- Energie wandeln- elektrische in mechanische Energie
- Energiekomponenten ändern- Drehmoment vergrößern
- Energie leiten- Kraft übertragen

Als Stofffluss wird folgendes definiert:

- Stoffumsatz wandeln- Luft verflüssigen
- Stoff mit Energie verknüpfen- Teil bewegen

Unter Signalfluss wird folgendes definiert:

- Signal wandeln- mechanische in elektrisches Signal wandeln
- Signalgröße ändern- Ausschlag vergrößern
- Signal leiten- Daten übertragen
- Signal speichern- Daten bereithalten
- Signalgröße ändern- Ausschlag vergrößern

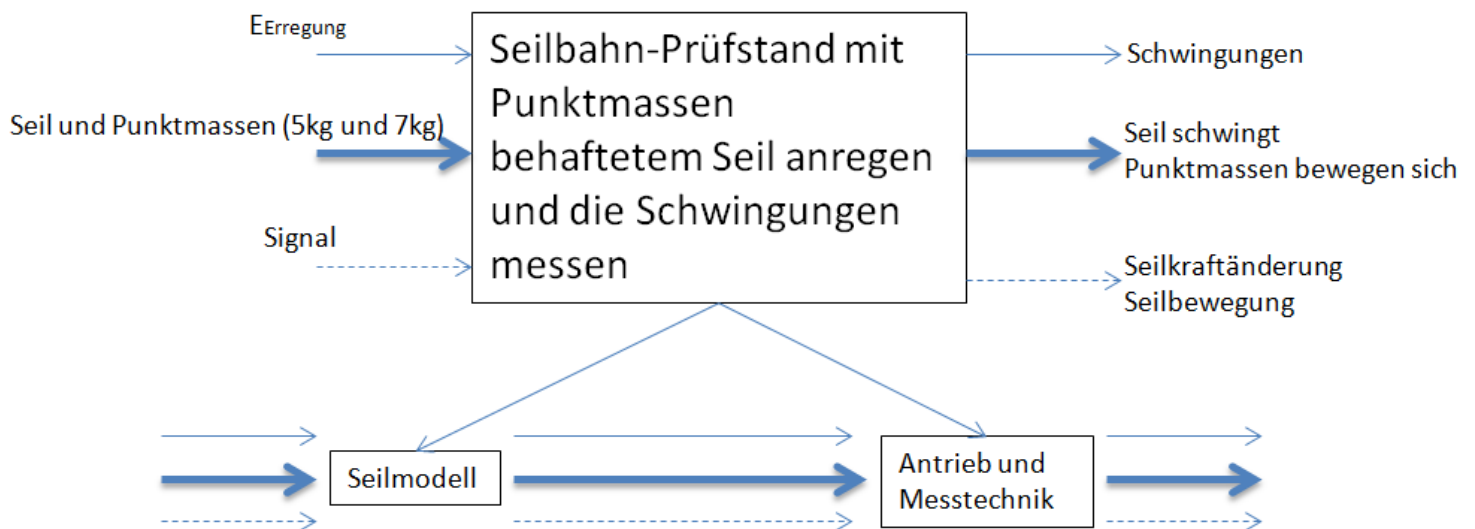


Abbildung 8: Hauptstruktur

Wie eingangs erwähnt wird das Seilmodell ebenfalls in eine Funktionsstruktur umgewandelt und ist in Abbildung 9 ersichtlich. Am Ausgang wird die Seilkraft gemessen.

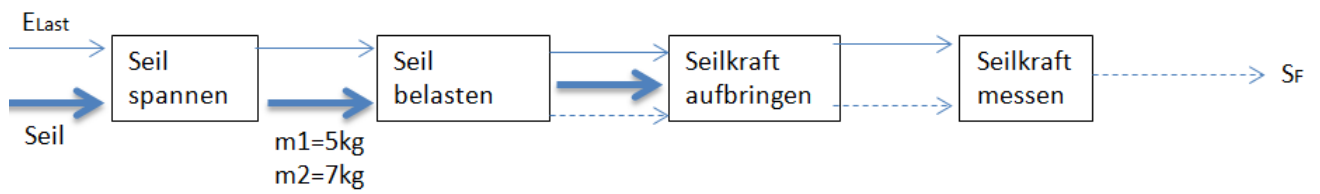


Abbildung 9: Funktionsstruktur Seilmodell

Die Antriebs und Messtechnik wird ebenfalls in eine Funktionsstruktur überführt und ist in Abbildung 10 zu sehen.

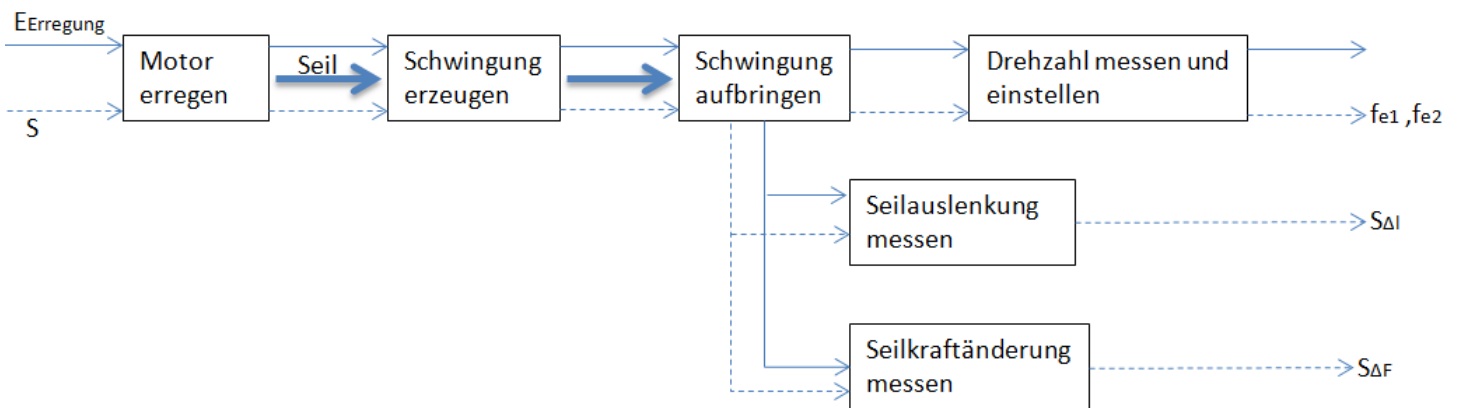


Abbildung 10: Funktionsstruktur Antriebs und Messtechnik

Aus den Funktionsstrukturen lassen sich nun Wirkprinzipien und daraus Lösungsvarianten entwickeln.



## 4.3 Wirkstruktur und Wirkprinzip entwickeln

Zu den Teilfunktionen müssen Wirkprinzipien gefunden werden, die später zu einer Wirkstruktur zusammengefügt werden, bei der die prinzipielle Lösung durch weitere Konkretisierung entsteht. Das Wirkprinzip beinhaltet den für die Erfüllung einer Funktion erforderlichen physikalischen Effekt. Die betrachteten Hauptarbeitsschritte sollen zu mehreren Lösungsvarianten (Lösungsfeld) führen. Ein Lösungsfeld kann durch Variation der physikalischen Effekte, sowie der geometrischen und stofflichen Merkmale aufgebaut werden. Zur Erfüllung einer Teilfunktion können mehrere physikalische Effekte an einem oder mehreren Funktionsträgern wirksam sein.

Wenn Lösungen für mehrere Teilfunktionen gesucht werden ist es zweckmäßig die Funktion als "Ordnenden Gesichtspunkt" und damit die zu erfüllende Teilfunktionen als Zeilenparameter zu wählen und in die zugehörigen Spalten mögliche Lösungsprinzipien mit ihren Merkmalen nummeriert einzutragen.

In Abbildung 11 ist der prinzipielle Aufbau ersichtlich.

		Lösungen						
		1	2	...	j	...	m	
Funktionen	1	$F_1$	$E_{11}$	$E_{12}$		$E_{1j}$		$E_{1m}$
	2	$F_2$	$E_{21}$	$E_{22}$		$E_{2j}$		$E_{2m}$
	⋮		⋮	⋮		⋮		⋮
	i	$F_i$	$E_{i1}$	$E_{i2}$		$E_{ij}$		$E_{im}$
	⋮		⋮	⋮		⋮		⋮
	n	$F_n$	$E_{n1}$	$E_{n2}$		$E_{nj}$		$E_{nm}$

Abbildung 11: Aufbau Wirkstruktur

Quelle: Pahl et al 2007 S. 256

Den Funktionen  $F_i$  (Teilfunktionen) werden in den Zeilen Lösungen  $E_{ij}$  zugeordnet. Je nach Konkretisierung können diese physikalische Effekte oder schon Wirkprinzipien mit geometrisch-stofflichen Realisierungen sein: (Vgl.: Pahl et al. 2007, S255-259)

### 4.3.1 Wirkprinzipien kombinieren

Zum Erfüllen der in der Aufgabenstellung geforderten Gesamtfunktion müssen aus dem Feld der Lösungen (Wirkprinzipien) Gesamtlösungen durch Verknüpfung zu einer Wirkstruktur erarbeitet werden. Grundlage für den Verknüpfungsprozess ist die aufgestellte Funktionsstruktur, welche in logischer und/ oder physikalischer Hinsicht mögliche bzw. zweckmäßig Reihenfolge und Schaltung der Teilfunktionen angibt.

Zur systematischen Kombination eignet sich am besten der Morphologische Kasten. Bei diesem Ordnungsschema sind in der Kopfspalte die zu erfüllenden Teilfunktionen und in den zugeordneten Zeilen die gefundenen Wirkprinzipien aufgeführt. Durch Kombinationen der Wirkprinzipien, die die Teilfunktionen erfüllen, erhält man nach einem Verknüpfungsprozess für alle Teilfunktionen eine mögliche Wirkstruktur als Gesamtlösung.

Es können nur Wirkprinzipien zu einer Funktionsverknüpfung kombiniert werden, welche miteinander verträglich sind.

Hauptproblem von Kombinationsschritten ist das Erkennen von physikalischen Verträglichkeiten zwischen den zu verbindenden Wirkprinzipien, zum Erreichen eines weitgehend störungsfreien Energie-, Stoff- und/ oder Signalfusses sowie Kollisionsfreiheit in geometrischer Hinsicht.

Ein weiteres Problem liegt in der Auswahl von technisch und wirtschaftlich günstigen Kombinationen aus dem Feld theoretisch möglicher Kombinationen. (Vgl.: Pahl et al. 2007 S. 259-260)

### 4.3.2 Antriebsvarianten

Aus der Funktionsstruktur lassen sich nun mehrere Lösungsvarianten für die Teilfunktionen erarbeiten.

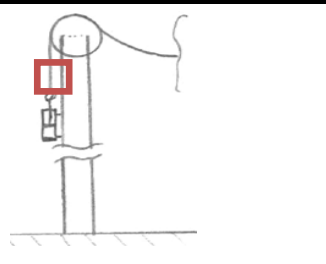
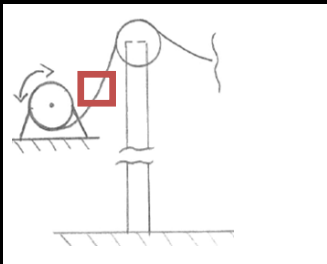
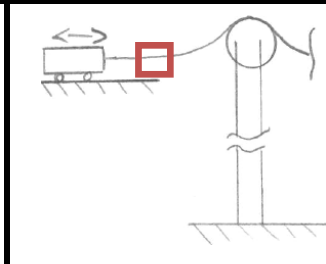
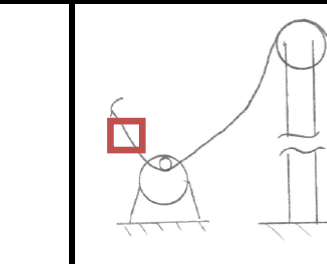
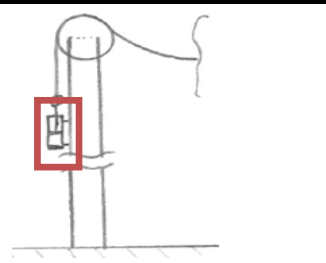
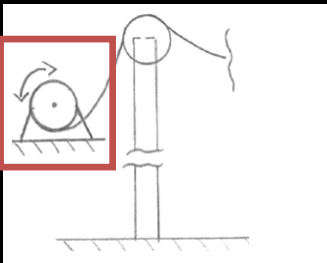
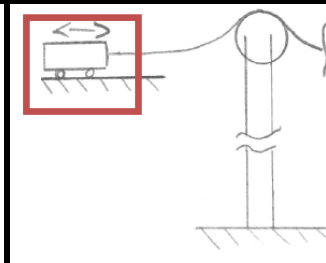
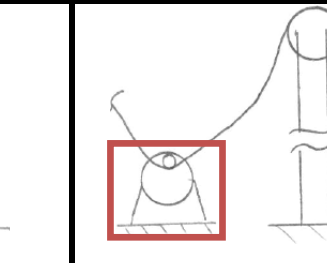
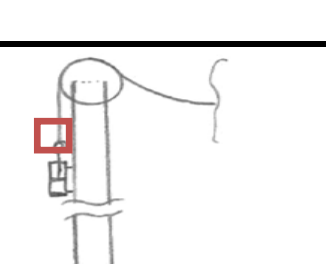
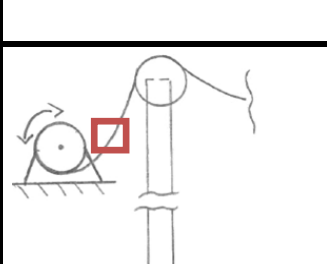
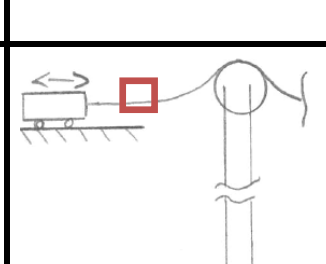
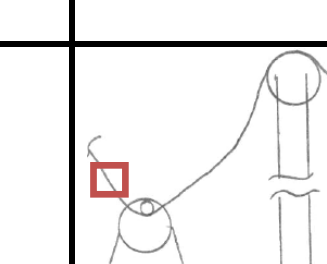
Varianten Funktionen	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Seil definiert vorspannen und Seilkraft messen				
Seil und Massen erregen				
Erregung steuern und messen				

Tabelle 2: Antriebskonzepte

Die Variante 1 von der Tabelle 2 wird mittels elektro-pneumatischer Zylinder realisiert. Durch Ein- bzw. Ausfahren des Zylinders wird die Masse erregt. Mit Hilfe eines Kraftsensors kann die Erregung gesteuert werden. Variante 2 wird durch einen Schrittmotor/ Servomotor angesteuert, der durch Vor und Zurückdrehen das System erregt. Außerdem wird diese Variante ebenfalls mittels Kraftsensor gesteuert. Aufgrund der hohen Kosten sowie der komplexen Ansteuerung des Systems wird diese Variante nicht weiterverfolgt.

Der Linearmotor bringt den Prüfstand bei Variante 3 in Schwingung. Die Steuerung erfolgt über einen Weg- bzw. Kraftsensor. Der große Nachteil dieser Variante liegt bei den hohen Anschaffungskosten sowie der komplexen Steuerung des Antriebs, deshalb scheidet diese Variante aus. Bei Variante 4 wird ein Motor mit exzentrisch gelagerter Schwungscheibe in Betrieb genommen, dadurch wird der Prüfstand in Erregung gebracht. Wegen des einfachen Aufbaus sowie den niedrigen Anschaffungskosten und der internen Beurteilung wird Variante 4 genauer untersucht.

### 4.3.3 Variante Exzenter

Die Anforderungen an den Prüfstand sind, dass verschiedene Amplituden einstellbar sind, durch die das System erregt werden kann. Außerdem soll eine Impulserregung möglich sein. Die unterschiedlichen Varianten sind in Tabelle 3 ersichtlich.

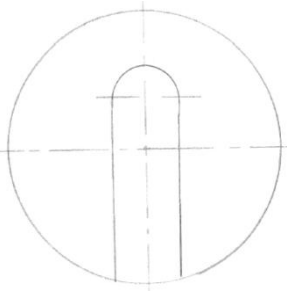
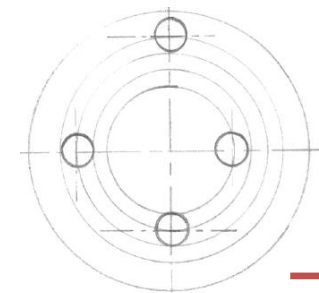
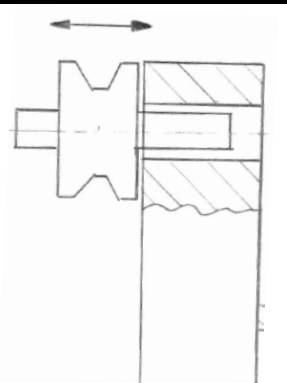
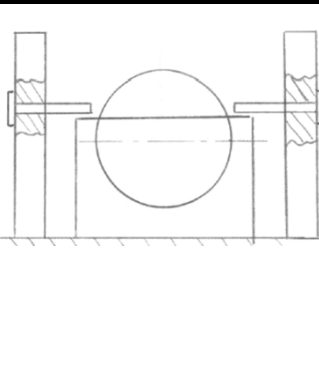
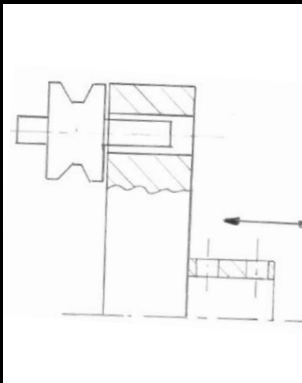
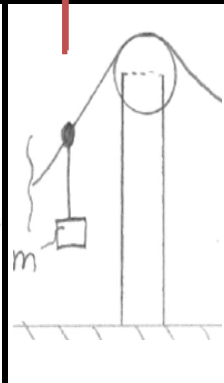
Varianten Funktionen	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Amplitude einstellen				
Seil impulsartig anregen				

Tabelle 3: Variante Exzenter

Durch den Morphologischen Kasten ergeben sich mehrere Varianten. Um mehrere unterschiedliche Amplituden einstellen zu können wird entweder ein Lochmuster gebohrt oder eine T-Nut in die Scheibe gefräst.

Die Impulserregung erfolgt bei der Variante 1 durch Herausziehen des "Zapfens". An diesen Zapfen wird ein Gewicht gehängt und anschließend abgeschnitten, dadurch schwingt das System. Bei der Variante 2 wird die gesamte Antriebseinheit am Boden mithilfe von "Befestigungsschrauben" fixiert. Durch Herausnehmen dieser wird die Antriebseinheit aufgrund der Seilvorspannkraft nach oben gezogen und dies hat zur Folge, dass das Seil schwingt.

Die Impulserregung bei V3, erfolgt durch die Entkoppelung der exzentrischen Scheibe vom Antrieb. Anschließend wird dies mittels Gewicht ausgelenkt und durch Abschneiden des Gewichts erfolgt die Impulserregung.

Bei V4 wird ein Gewicht durch eine Vorrichtung am Seil montiert. Anschließend wird das Gewicht abgeschnitten und dies hat zur Folge, dass das System schwingt.

Die einfachste und billigste Variante ist in Tabelle 3 hervorgehoben (rote Linie). Aufgrund der geringen Herstellungskosten sowie fertigungstechnischen geringen Aufwand wird dieses Konzept weiterentwickelt.

Um den Prüfstand dimensionieren zu können wird dieser nun mathematisch simuliert/ beschrieben und anschließend erfolgt die Detailzeichnung. (6 Prüfstandkonzept)

In Abbildung 12 ist die Konzeptskizze für den Seilbahn- Prüfstand ersichtlich.

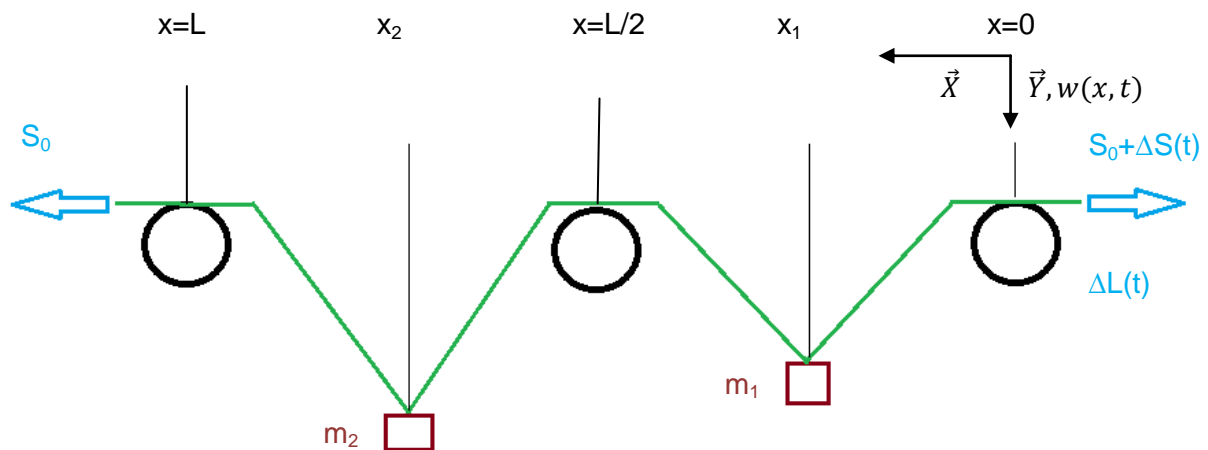


Abbildung 12: Konzeptskizze Seilbahn-Prüfstand

# 5 Mathematische Beschreibung des Seilbahn- Prüfstands

## 5.1 Seildynamik

In diesem Abschnitt werden die Grundgleichungen des Seils sowie die mathematische Modelbildung und die Schwingungsgleichungen, welche für den Prüfstand notwendig sind, erarbeitet. Bei realen Seilen ist das dynamische Verhalten zwischen dem der Saite und dem eines Balkens mit Biegesteifigkeit, einzuordnen. In der Seilbahntechnik sind überwiegend stark vorgespannte Seile mit großen Lasten (Gondeln) vorhanden. Dadurch folgt, dass die Eigenschwingungen niedriger Ordnung relevant sind und somit die klassische Biegetheorie nach Bernoulli-Euler verwendet werden kann. Die Herleitung der Wellengleichung und die Lösung nach Bernoulli sowie die mathematische Entwicklung des Seilbahnprüfstand erfolgt in Anlehnung nach (Vgl.: Gross et al. 2009, S.212ff/ Feurstein 2014 S.31ff) Die Berücksichtigung der Schubverformung, die Theorie von Timoshenko, ist erst bei höheren Frequenzen relevant. Außerdem ist die Schwierigkeit, dass die Schubsteifigkeit des Seils aufgrund der Geometrie nicht proportional zur Biegesteifigkeit ist. (Vgl. Karnig et al. 2011, S.11ff)

### 5.1.1 Wellengleichung

Eine Saite ist ein vorgespanntes fadenförmiges Kontinuum, welches keine Biegesteifigkeit besitzt. Bei der Wellengleichung wird eine Saite mit konstanter Massebelegung  $\mu$  (Masse pro Längeneinheit), die durch die Zugkraft  $S$  gespannt ist, betrachtet.

Wird die Saite ausgelenkt und sich selbst überlassen, führt diese eine freie Schwingung aus. Die Auslenkung  $w$  aus der Ruhelage ist im Allgemeinen vom Ort  $x$  und von der Zeit  $t$  abhängig,  $w=w(x,t)$ . Die Lösung der Wellengleichung muss neben den Randbedingungen (Informationen über die Deformations- und Kraftgrößen an den Rändern) auch die Anfangsbedingungen (Saite in Ruhe oder mit einer Anfangsgeschwindigkeit) erfüllen. Die Bewegungsgleichungen werden nach einem Saitenelement nach Abbildung 13 (rechts) formuliert. Es gilt wegen  $w' \ll 1$  die Vereinfachungen  $\alpha \approx \sin \alpha \approx w'$ ,  $(\alpha + d \alpha) \approx \sin(\alpha + d \alpha) \approx w' + w'' dx$ ,  $\cos \alpha \approx 1$ ,  $\cos(\alpha + d \alpha) \approx 1$  und  $ds \approx dx$ . Mit  $dm = \mu * ds \approx \mu * dx$  erhält man:

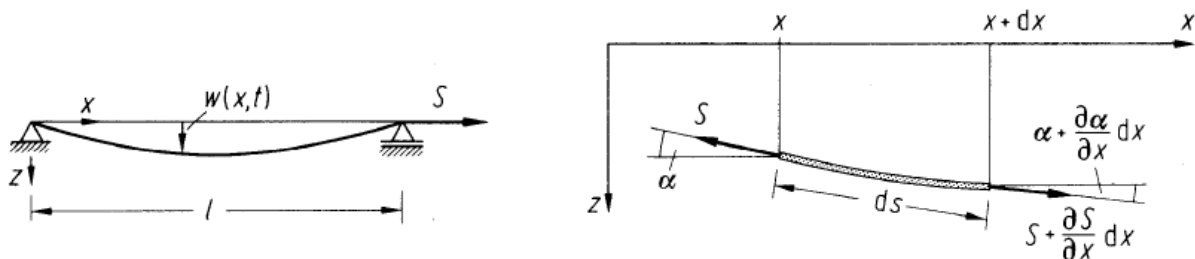


Abbildung 13: Auslenkung einer Saite

Durch das Kräftegleichgewicht am Seilelement kann die Grundgleichung berechnet werden.

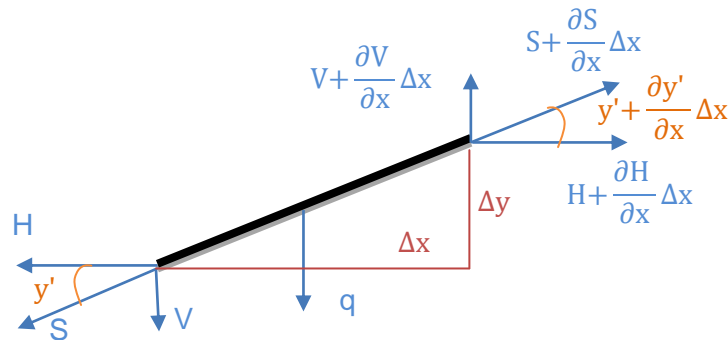


Abbildung 14: Kräfte am Seilelement

Kräftegleichgewicht in x-Richtung:

$$H + \frac{\partial H}{\partial x} \Delta x - H = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (5.1)$$

Da keine Kräfte in x-Richtung angreifen, bleibt der Horizontalzug H im Seilfeld konstant (siehe (5.3)). Aufgrund der Annahme von kleinen Auslenkungen wird der Horizontalzug mit der Seilkraft gleichgesetzt.

$$\begin{aligned} H &= S * \cos \alpha \\ \cos \alpha &\approx 1 \\ H &= S \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$x - \text{Richtung: } 0 = -S + \left( S + \frac{\partial S}{\partial x} dx \right) \rightarrow \frac{\partial S}{\partial x} = 0 \rightarrow S = \text{konst.} \quad (5.3)$$

$$y - \text{Richtung: } \mu * dx * \ddot{w} = -S * w' + \left( S + \frac{\partial S}{\partial x} dx \right) * (w' + w'' dx) \quad (5.4)$$

Wenn  $\frac{\partial S}{\partial x} = 0$  folgt aus (5.4)

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} * \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad \text{mit } c^2 = \frac{S}{\mu} \quad (5.5)$$

Diese Differentialgleichung (5.5) wird als eindimensionale Wellengleichung bezeichnet. Die Konstante c hat die Dimension einer Geschwindigkeit und wird als Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit bezeichnet.

Um die Lösung der Wellengleichung in einem konkreten Fall angeben zu können, werden die Anfangsbedingungen sowie die Randbedingungen benötigt. Mittels Anfangsbedingungen sind die Auslenkung und die Geschwindigkeit der Saite zu Beginn der Bewegung definiert (zum Zeitpunkt  $t=0$ ):

$$w(x, 0) = w_0(x) \text{ und } \dot{w}(x, 0) = v_0(x) \quad (5.6)$$

Die Randbedingungen liefern Informationen über die Deformations- bzw. die Kraftgrößen an den Rändern. Ganz allgemein wird ein Problem, welches durch eine Bewegungsgleichung sowie durch Anfangs- und Randbedingungen beschrieben wird, als Anfangs-Randwertproblem bezeichnet.

### 5.1.2 Lösung der Wellengleichung mittels Produktansatz

Mit Hilfe des Produktsatzes  $w(x, t) = W(x) * T(t)$  wird die Bewegung, bei welcher sich alle Punkte der Saite nach dem gleichen Zeitgesetz (synchron) bewegen, beschrieben. Ziel des Verfahrens ist eine erste näherungsweise Lösung der Schwingungsgleichung für den Seilbahnprüfstand. Der Produktsatz wird in Gleichung (5.5) eingesetzt und ergibt folgendes:

$$W''(x) * T(t) = \frac{1}{c^2} * W(x) * \ddot{T}(t) \rightarrow c^2 \frac{W''(x)}{W(x)} = \frac{\ddot{T}(t)}{T(t)} \quad (5.7)$$

Bei der Gleichung (5.7) rechts, sind die Variablen getrennt, die linke Seite ist von  $x$  und die rechte Seite von  $t$  abhängig. Diese Gleichung ist für alle  $x$  und  $t$  nur dann erfüllt, wenn beide Seiten einer Konstanten gleich sind, diese wird mit  $-\omega^2$  definiert.

$$c^2 \frac{W''(x)}{W(x)} = \frac{\ddot{T}(t)}{T(t)} = -\omega^2 \quad (5.8)$$

Aus (5.8) folgen zwei gewöhnliche Differentialgleichungen zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten

$$W'' + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 * W = 0 \text{ und } \ddot{T} + \omega^2 * T = 0 \quad (5.9)$$

Die allgemeine Lösung lautet:

$$W(x) = A * \cos \frac{\omega}{c} x + B * \sin \frac{\omega}{c} x, \quad T(t) = C * \cos \omega t + D * \sin \omega t \quad (5.10)$$



Der Zeitverlauf  $T(t)$  beschreibt eine harmonische Schwingung mit der Kreisfrequenz  $\omega$  und der zugehörige Ortsverlauf  $W(x)$  ist ebenfalls harmonisch und wird über seine Periode  $\omega/c$  definiert. Die Produktlösung aus (5.10) wird folgendermaßen geschrieben:

$$w(x, t) = \left( A * \cos \frac{\omega}{c} x + B * \sin \frac{\omega}{c} x \right) * (C * \cos (\omega t) + D * \sin (\omega t)) \quad (5.11)$$

Die Lösung muss sowohl den Rand- als auch den Anfangsbedingungen erfüllen. Die Randbedingungen für eine Saite mit festen Rändern (Abbildung 15) liefern

$$\begin{aligned} w(0, t) = 0 &\rightarrow W(0) = 0: & A = 0 \\ w(l, t) = 0 &\rightarrow W(l) = 0: & B \sin \frac{\omega}{c} l = 0 \end{aligned} \quad (5.12)$$

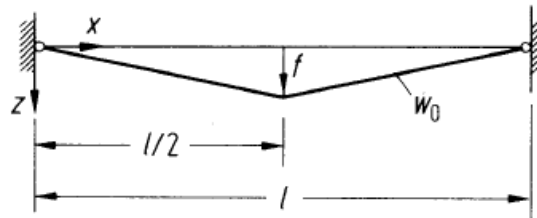


Abbildung 15: Saite mit festen Rändern

Wenn die triviale Lösung  $W(x)=0$  ausgeschlossen wird, dann muss  $B \neq 0$  sein und somit ergibt sich

$$\sin \frac{\omega}{c} l = 0 \rightarrow \frac{\omega}{c} l = k\pi \rightarrow \omega_k = k\pi \frac{c}{l}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (5.13)$$

Die Gleichung (5.13) wird als charakteristische transzendente Gleichung bezeichnet, welche die Eigenfrequenzen (Eigenwerte)  $\omega_k$  festlegen.

Zu jeder Eigenfrequenz  $\omega_k$  gehört eine Eigenfunktion

$$W_k(x) = B_k \sin \frac{\omega_k}{c} x = B_k \sin \frac{k\pi x}{l} \quad (5.14)$$

und damit ergibt sich nach (5.11) eine Lösung ohne Beschränkung der Allgemeinheit durch  $B_k = 1$

$$w_k(x, t) = W_k(x)T_k(t) = \sin \frac{k\pi x}{l} (C_k \cos \omega_k t + D_k \sin \omega_k t) \quad (5.15)$$

Durch die Gleichung (5.15) wird eine Eigenschwingung mit der Eigenfrequenz  $\omega_k$  und der Eigenschwingungsform  $W_k(x)$  beschrieben. In Abbildung 16 sind die Eigenschwingungsformen für die Grundschrwingungen sowie für die 1 und 2 Oberschrwingung dargestellt.

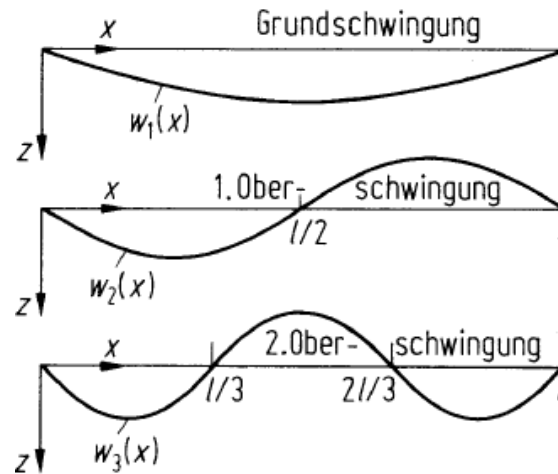


Abbildung 16: Eigenfunktion der eingespannten Saite

Die Differentialgleichung (5.5) ist linear, somit ist die Summe von Eigenschwingungen ebenfalls eine Lösung, die den Randbedingungen genügt (Superposition). Wenn alle Eigenschwingungen überlagert werden, ergibt sich die allgemeine Lösung.

$$w(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} w_k = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{k\pi x}{l} (C_k \cos \omega_k t + D_k \sin \omega_k t) \quad (5.16)$$

Diese Gleichung ist die Darstellung der Auslenkung  $w(x)$  zu jedem Zeitpunkt  $t$  durch die Fourierreihe. Dabei sind die  $T_k(t)$  die Fourierkoeffizienten zum Zeitpunkt  $t$ .

Der Prüfstand hat eine Anfangsauslenkung von 0,05 m und die Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  ist 0. Die Länge des Prüfstands ist 1,3 m und das Seil wird mit 200 N vorgespannt. Das Seil besitzt einen längenbezogene Masse von  $\mu = 1,134 \cdot 10^{-2}$  kg/m.

Durch die Anfangsbedingungen (5.6) vereinfacht sich die Gleichung (5.16) folgendermaßen zu:

$$\begin{aligned}
 w(x, 0) = w_0(x): & \quad \sum_{k=1}^{\infty} \overbrace{C_k \sin \frac{k\pi x}{l}}^{W_k(x)} = w_0(x) \\
 \dot{w}(x, 0) = v_0(x): & \quad \sum_{k=1}^{\infty} \overbrace{D_k \sin \frac{k\pi x}{l}}^{W_k(x)} = v_0(x)
 \end{aligned}
 \tag{5.17}$$

Die Konstanten  $C_k$  und  $D_k$  lassen sich durch Multiplikation der Gleichungen mit  $W_i = \sin(i\pi x/l)$  und Integration über die Länge der Saite bestimmen. Mit der Beziehung der Orthogonalitätsrelation der Eigenfunktionen (5.18)

$$\int_0^l W_i(x)W_k(x)dx = \int_0^l \sin \frac{i\pi x}{l} \sin \frac{k\pi x}{l} dx = \begin{cases} 0 & \text{für } i \neq k \\ \frac{l}{2} & \text{für } i = k \end{cases}
 \tag{5.18}$$

ergibt sich

$$C_k = \frac{2}{l} \int_0^l w_0(x) \sin \frac{k\pi x}{l} dx, \quad D_k = \frac{2}{w_k l} \int_0^l v_0(x) \sin \frac{k\pi x}{l} dx,
 \tag{5.19}$$

Somit ist die Lösung (5.16) eindeutig. Diese Gleichung vereinfacht sich, wenn die Anfangsbedingung  $v_0$  verschwindet  $\rightarrow D_k=0$ .

Die Auslenkung des Seils am Prüfstand wird mit den zuvor berechneten Formeln (5.18) und (5.19) mit Hilfe eines Berechnungsprogramms simuliert und ist in Abbildung 17 ersichtlich.

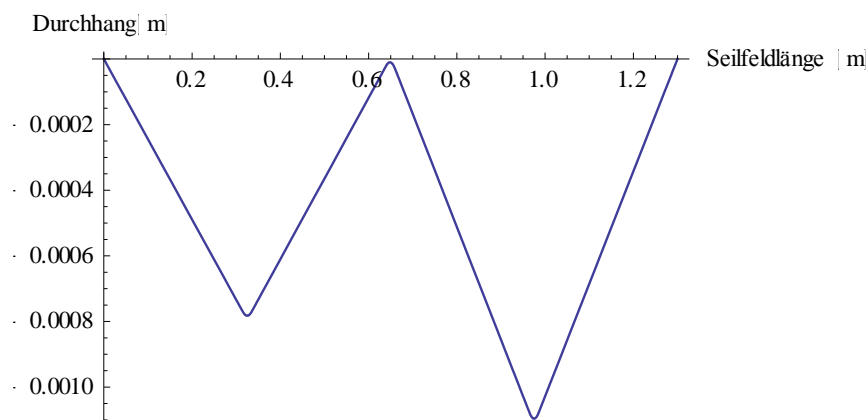


Abbildung 17: Durchhang leeres Seil

### 5.1.3 Näherungsverfahren nach Galerkin

Die Vorgehensweise zur näherungsweise Lösung der partiellen Schwingungsgleichung des Seils ist das Galerkin-Verfahren. Die Idee dahinter ist, dass der mit  $\eta$  gewichtete Fehler  $R(\tilde{w})$  der Näherungslösung  $\tilde{w}$  im Mittel über das gesamte Seilfeld verschwindet.

$$\int_0^l R(\tilde{w})\eta \, dx = 0 \quad (5.20)$$

Folgende Bedingungen sind an das Näherungsverfahren gestellt:

- kinematischen Randbedingungen  $\tilde{w}(L) = \tilde{w}(0) = 0$  und  $\tilde{w}'(L) = \tilde{w}'(0) \neq 0$  und die dynamischen Randbedingungen (angreifende Kräfte) müssen vom Näherungsansatz erfüllt werden.
- Der Näherungsansatz muss für eine Differentialgleichung 2n-ter Ordnung (2n-1) stetig differenzierbar sein.

Aus der Differentialgleichung wird der Fehler  $R(\tilde{y})$  (Residuum) gebildet (siehe Gleichung (5.21) )

$$R_0 = \mu\ddot{\tilde{w}} - S\tilde{w}'' + EI\tilde{w}^{IV} - q(x, t) \quad (5.21)$$

Der Fehler berücksichtigt die längsbezogene Masse des Seils, die Vorspannkraft, die Biegesteifigkeit sowie die Erregung.

#### 5.1.3.1 Leeres Seil

Dies Kapitel beschreibt den Seilbahnprüfstand, welches anfangs nur das Seil eingehängt hat. Der Gesamtfehler wird mit der Gewichtsfunktion  $\eta$  multipliziert und mittels Integration über die gesamte Länge summiert. Die Fehler entstehen, wenn Kräfte und Momente am Rand wirken und somit nicht alle dynamischen Randbedingungen erfüllt sind.

$$\int_0^L R_0\eta \, dx = \int_0^L (\mu\ddot{\tilde{w}} - S\tilde{w}'' + EI\tilde{w}^{IV} - q(x, t)) \eta \, dx = 0 \quad (5.22)$$

Der Term  $\int_0^L EI\tilde{w}^{IV} \eta \, dx$  wird zweimal partiell integriert und der Term  $\int_0^L S\tilde{w}'' \eta \, dx$  wird einmal partiell integriert. Die partielle Integration hat den wesentlichen Vorteil, dass die Ordnung der Differentialgleichungen reduziert wird. Dies hat zur Folge, dass die Ansatzfunktionen nur noch (n-1) stetig differenzierbar sein müssen.

$$\int_0^L \left( (\mu\ddot{\tilde{w}} - q)\eta + S\tilde{w}''\eta' + EI\tilde{w}''\eta'' \right) dx - S\tilde{w}'\eta|_0^L + EI\tilde{w}'''\eta|_0^L - EI\tilde{w}''\eta'|_0^L = 0 \quad (5.23)$$

Die Gewichtsfunktion  $\eta$  erfüllt die Randbedingungen bei gelenkigen Lagerbedingungen  $\eta(0) = 0$  und  $\eta(L) = 0$  sowie  $\eta'(0) \neq 0$  und  $\eta'(L) \neq 0$ . Dadurch vereinfacht sich (5.23) zu:

$$\int_0^L ((\mu\ddot{\tilde{w}} - q)\eta + S\tilde{w}'\eta' + EI\tilde{w}''\eta'') dx = 0 \tag{5.24}$$

Mit Hilfe des gewählten Näherungsansatz (5.25)

$$\tilde{w}(x) = \sum_{n=1}^N T_n \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) = \begin{pmatrix} \sin\left(\frac{\pi}{L}x\right) \\ \vdots \\ \sin\left(\frac{N\pi}{L}x\right) \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_N \end{pmatrix} = \mathbf{C}^T \mathbf{T} \tag{5.25}$$

folgt

$$\int_0^L (\mu\mathbf{C}^T \ddot{\mathbf{T}}\eta + S\mathbf{C}'^T \mathbf{T}\eta' + EI\mathbf{C}''^T \mathbf{T}\eta'') dx = \int_0^L q(x, t) \eta dx \tag{5.26}$$

Für die Gewichtsfunktion  $\eta$  wird der Näherungsansatz  $\eta = \mathbf{C}$  angewendet. Der Koeffizientenvektor  $\mathbf{T}$  der Gewichtsfunktion tritt in jedem Term auf. Nach dem Koeffizientenvergleich folgt die genäherte Schwingungsgleichung des axial bewegten Seils.

$$\int_0^L (\mu\mathbf{C}\mathbf{C}^T \ddot{\mathbf{T}} + S\mathbf{C}'\mathbf{C}'^T \mathbf{T} + EI\mathbf{C}''\mathbf{C}''^T \mathbf{T}) dx = \int_0^L q(x, t) \mathbf{C} dx \tag{5.27}$$

Durch die Definition von Matrizen (Tabelle 4), kann die Gleichung (5.27) als Matrixgleichung angegeben werden.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{T}} + \mathbf{K}\mathbf{T} = \mathbf{Q} \tag{5.28}$$

<b>Massenmatrix</b>	$\mathbf{M} = \int_0^L \mu\mathbf{C}\mathbf{C}^T dx$
<b>Steifigkeitsmatrix</b>	$\mathbf{K} = \int_0^L (S\mathbf{C}'\mathbf{C}'^T + EI\mathbf{C}''\mathbf{C}''^T) dx$
<b>Allgemeiner Kraftvektor</b>	$\mathbf{Q} = \int_0^L q(x, t)\mathbf{C} dx$

Tabelle 4: Schwingungsgleichung des bewegten Seils

Die Elemente der Matrizen (Tabelle 4) in der k-ten Zeile und j-ten Spalte lauten folgendermaßen

$$M_{kj} = \int_0^L \mu \sin\left(\frac{k\pi}{L}x\right) \sin\left(\frac{j\pi}{L}x\right) dx \quad (5.29)$$

$$K_{kj} = \int_0^L \left( S \left(\frac{k\pi}{L}\right) \left(\frac{j\pi}{L}\right) \cos\left(\frac{k\pi}{L}x\right) \cos\left(\frac{j\pi}{L}x\right) + EI \left(\frac{k\pi}{L}\right)^2 \left(\frac{j\pi}{L}\right)^2 \sin\left(\frac{k\pi}{L}x\right) \sin\left(\frac{j\pi}{L}x\right) \right) dx \quad (5.30)$$

$$Q_{kj} = \int_0^L q(x, t) \sin\left(\frac{k\pi}{L}x\right) dx \quad (5.31)$$

Wenn die Massendichte  $\mu$ , die Biegesteifigkeit  $EI$  und die Seilspannung  $S$  konstant sind, gelten die Orthogonalitätseigenschaften der harmonischen Funktionen mit den Integralen (5.32) und (5.33)

$$\int_0^L \sin\left(\frac{k\pi}{L}x\right) \sin\left(\frac{j\pi}{L}x\right) dx = \begin{cases} \frac{L}{2} & \text{für } k = j \\ 0 & \text{für } k \neq j \end{cases} \quad (5.32)$$

$$\int_0^L \cos\left(\frac{k\pi}{L}x\right) \cos\left(\frac{j\pi}{L}x\right) dx = \begin{cases} \frac{L}{2} & \text{für } k = j \\ 0 & \text{für } k \neq j \end{cases} \quad (5.33)$$

Mit Hilfe der Orthogonalitätsbedingungen ((5.32) und (5.33)) können die Matrizen (Tabelle 4) in folgender Form dargestellt werden.

$$\begin{pmatrix} \mu L/2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mu L/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{T}_1 \\ \vdots \\ \ddot{T}_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L/2 \left( S \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 + EI \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \right) & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & L/2 \left( S \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 + EI \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_n \end{pmatrix} \quad (5.34)$$

Durch diese Schreibweise ist es möglich jede Zeile der Matrixgleichung (5.34) separat zu beschreiben und das k-te Glied  $T_k$  zu lösen.

$$\mu \ddot{T}_k + \left( S \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 + EI \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \right) T_k = \frac{2}{L} Q_k \quad (5.35)$$

Somit kann die Gesamtlösung des schwingenden Seils mit dem Näherungsverfahren (5.25) gelöst werden. Die Gleichung für die schwingende Saite ergibt sich, wenn  $EI=0$  wird.

Die Gleichung (5.35) ist eine gewöhnliche Differentialgleichung 2. Ordnung mit konstanten Koeffizienten.

### Beispiel Leeres Seil:

Damit ersichtlich wird für was die Gleichung (5.35) berechnet wurde, wird diese Gleichung mittels Berechnungsprogramm simuliert. Dies ist eine erste gute Näherung an das Modell für den Seilbahn-Prüfstand.

Die Abbildung 18 zeigt das leere Seil, welches zum Zeitpunkt  $t=0$  an der Stelle 0.325m mit einem Gewicht von 5kg ausgelenkt wird. Anschließend wird das Gewicht ruckartig entfernt und das Seil beginnt zu schwingen (Abbildung 19).

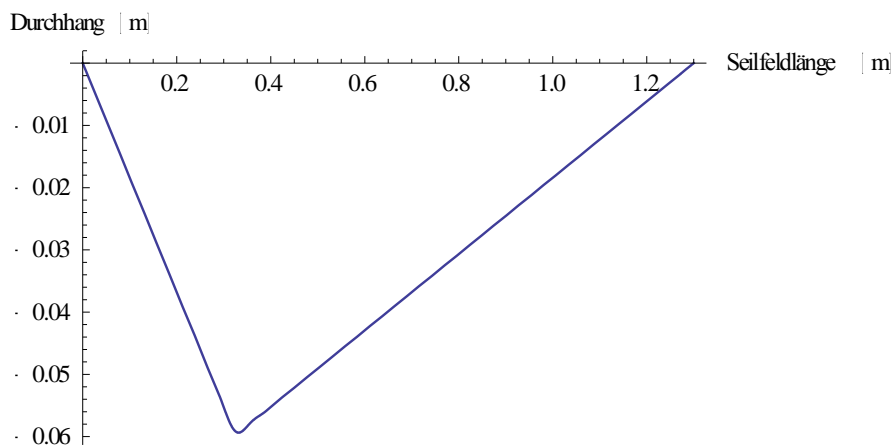


Abbildung 18: Seildurchhang leeres Seil

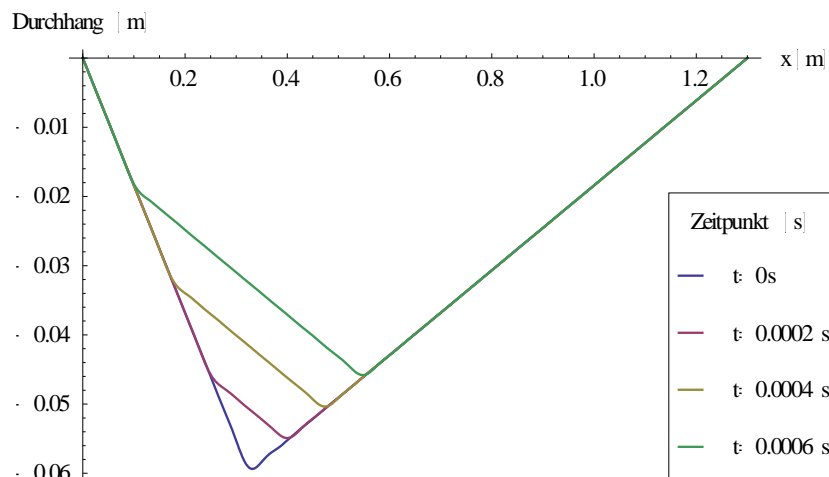


Abbildung 19: Schwingungsverhalten leeres Seil

### 5.1.3.2 Seil mit Massen

In diesem Kapitel werden dem Seil zwei Punktmassen hinzugefügt, dadurch verändert sich die Massenverteilung. Diese wird nun von der X-Koordinate abhängig. Dies hat zur Folge, dass sich das mathematische Modell dem realen Prüfstand nähert.

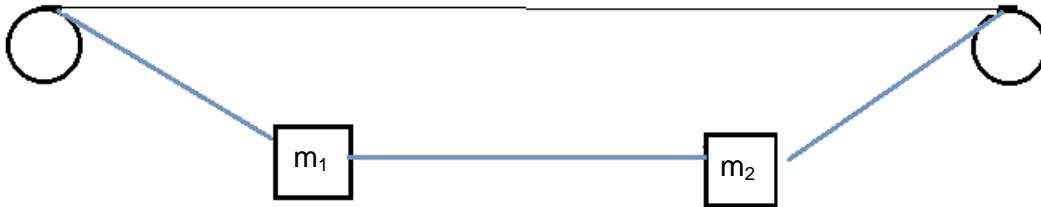


Abbildung 20: Seil mit Massen

Die mathematische Beschreibung der Punktmassen erfolgt mittels Dirac-Impuls. Dies hat zur Folge dass sich die Massenverteilung  $\mu$  und die Erregung  $q$  ändert.

$$\mu = \mu_0 + \underbrace{\delta(x - x_1)}_{\text{Definition Diracimpuls}} m_1 + \delta(x - x_2)m_2 \quad (5.36)$$

$$q = -\mu_0 g - \delta(x - x_1)m_1 g - \delta(x - x_2)m_2 g \quad (5.37)$$

Die Gleichung (5.38) ist formal dieselbe wie die des leeren Seils (5.24).

$$\int_0^L ((\mu \ddot{w} - q)\eta + S\tilde{w}'\eta' + EI\tilde{w}''\eta'') dx = 0 \quad (5.38)$$

Das Lösungsverfahren der Gleichung ist dasselbe wie in Kapitel 5.1.3.1 und das Ergebnis ist die untenstehende Gleichung.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{T}} + \mathbf{K}\mathbf{T} = \mathbf{Q} \quad (5.39)$$

Jedoch ändert sich die Massenmatrix und der allgemeine Kraftvektor folgendermaßen.

$$\mathbf{M} = \int_0^L \mu \mathbf{C}\mathbf{C}^T dx = \underbrace{\int_0^L \mu_0 \mathbf{C}\mathbf{C}^T dx}_{\mathbf{M}_0} + \underbrace{\int_0^L m_1 \delta(x - x_1) \mathbf{C}\mathbf{C}^T dx}_{m_1 \mathbf{C}(x_1) \mathbf{C}^T(x_1)} + \underbrace{\int_0^L m_2 \delta(x - x_2) \mathbf{C}\mathbf{C}^T dx}_{m_2 \mathbf{C}(x_2) \mathbf{C}^T(x_2)} \quad (5.40)$$



$$\mathbf{Q} = \int_0^L q(x,t) \mathbf{C} dx = \underbrace{- \int_0^L \mu_0 g \mathbf{C} dx}_{\mathbf{Q}_0} - \underbrace{\int_0^L g m_1 \delta(x - x_1) \mathbf{C} dx}_{g m_1 \mathbf{C}(x_1)} - \underbrace{\int_0^L g m_2 \delta(x - x_2) \mathbf{C} dx}_{g m_2 \mathbf{C}(x_2)} \quad (5.41)$$

**Beispiel Seil mit Massen:** Die Gleichung mit der veränderten Massenmatrix sowie dem verändertem allgemeinen Kraftvektor wird mit Hilfe eines Berechnungsprogramms simuliert. Die Abbildung 21 zeigt das Seil mit den Massen  $m_1=5$  kg an der Stelle  $x_1= 0.325$  m und der Masse  $m_2=7$ kg an der Stelle  $x_2=0.975$  m, welches zum Zeitpunkt  $t=0$  an der Stelle 0.325m mit einem Gewicht von 5kg ausgelenkt wird. Anschließend wird das Gewicht ruckartig entfernt und das Seil beginnt zu schwingen (Abbildung 22).

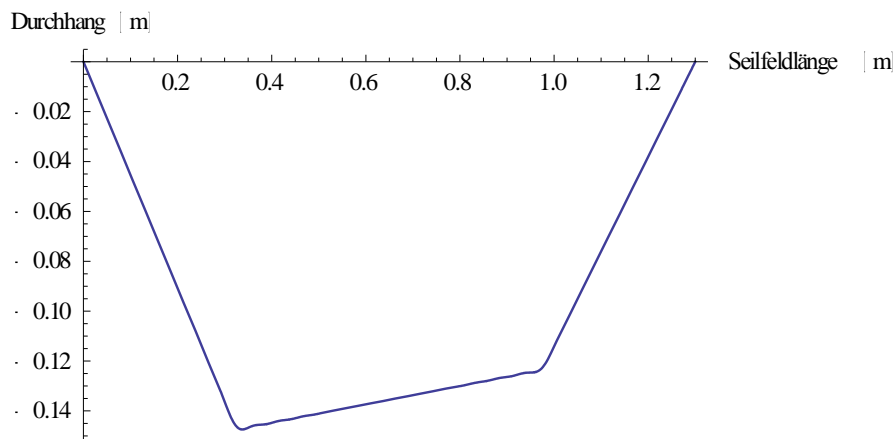


Abbildung 21: Seildurchhang Seil mit Massen

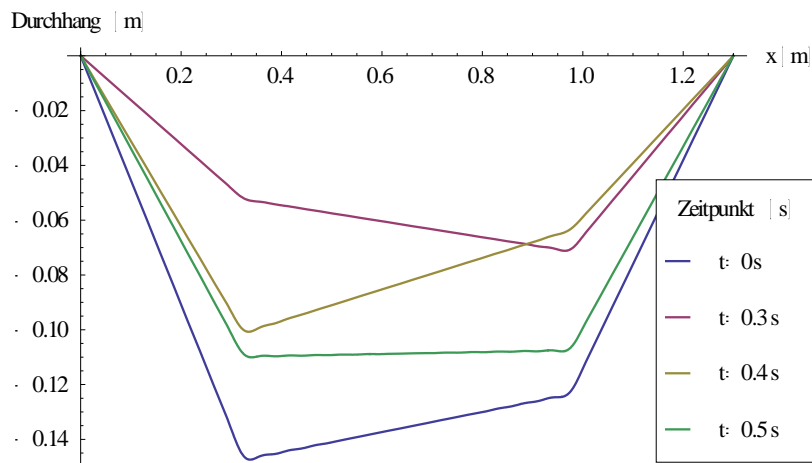


Abbildung 22: Schwingungsverhalten Seil mit Massen

**5.1.3.3 Seil mit Massen und Stütze**

Der Unterschied zum Seil mit Massen ist, dass die wirkende Belastung  $q(x,t)$  noch zusätzlich vom Rollendruck  $p(x,t)$ , aus diesem lässt sich die Rollkraft ermitteln, abhängig ist.

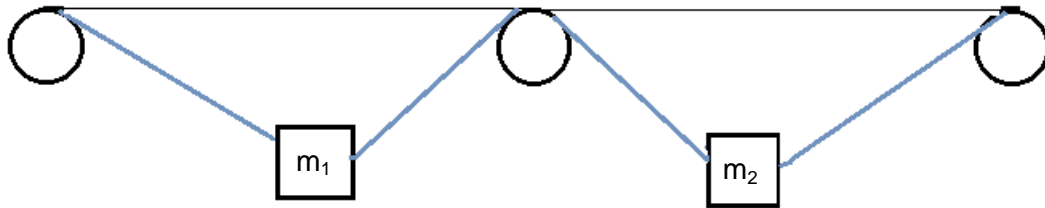


Abbildung 23: Seil mit Massen und Stütze

$$q(x, t) = q_0 + p(x, t) \tag{5.42}$$

mit

$$q_0 = -\mu_0 g - \delta(x - x_1)m_1 g - \delta(x - x_2)m_2 g \tag{5.43}$$

Der Rollendruck wird über die Feder mit der Steifigkeit  $k_p$  auf das Seil aufgebracht (siehe Abbildung 24). Der Rollendruck mit dem Verstärkungsfaktor/ Federsteifigkeit  $k_p$  ist proportional zur Abweichung des Seils von der Referenzlage  $y_{ref}$ .

$$e = y(x_R, t) - y_{ref} \tag{5.44}$$

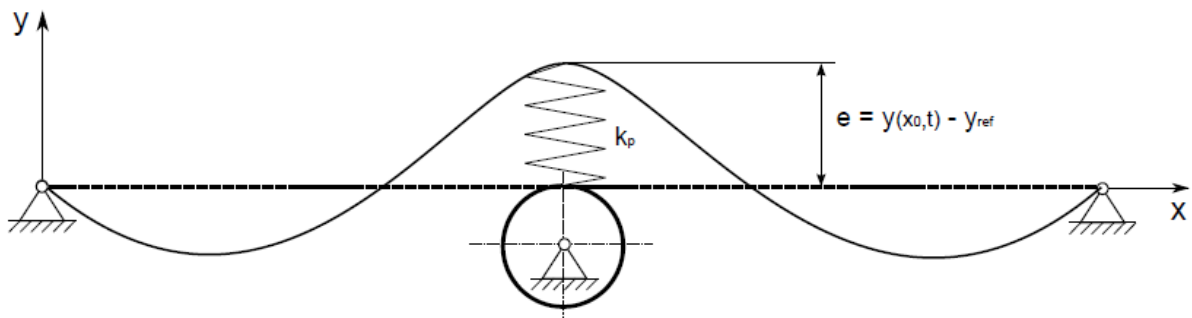


Abbildung 24: Kopplung von Seil und Rolle

Quelle: Feurstein. 2014, S.57

Nach Untersuchungen von Feurstein 2014, geht die Auflagefläche des Seils auf der Rolle gegen Null. Daraus Folgt, dass der örtliche Verlauf des Rollendrucks einem Dirac-Impuls entspricht, dieser ist durch Gleichung (5.45) definiert:

$$\delta(x - x_0) = \begin{cases} 1 & x = x_0 \\ 0 & x \neq x_0 \end{cases} \tag{5.45}$$

Somit ergibt sich aus der Formel (5.44) folgendes für den Rollendruck

$$p(x, t) = -e\delta = -k_p\delta(x - x_0)(y(x_R, t) - y_{ref}) \quad (5.46)$$

Aufgrund dessen ändert sich die verallgemeinerte Kraft

$$\mathbf{Q} = \int_0^L q(x, t)\mathbf{C}dx = \int_0^L q_0(x, t)\mathbf{C}dx - \int_0^L k_p\delta(x - x_0)(y(x_R, t) - y_{ref})\mathbf{C}dx \quad (5.47)$$

Das Integral mit dem Dirac-Impuls löst sich auf, weil die von der X-Koordinate abhängige Funktion nur an der Stelle  $x_R$  definiert ist. Durch den Näherungsansatz  $y(x_r, t) = \mathbf{C}^T(x_R)\mathbf{T}$  folgt, mit der Gewichtskraft  $\mathbf{Q}$  und der wirkenden Rollenkraft  $P_{Rolle}$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \int_0^L q_0(x, t)\mathbf{C}dx - k_p(y(x_R, t) - y_{ref})\mathbf{C}_{x_R} \\ &= \underbrace{\int_0^L q_0(x, t)\mathbf{C}dx}_{\hat{\mathbf{Q}}} - \underbrace{k_p(\mathbf{C}(x_R)^T\mathbf{T} - y_{ref})\mathbf{C}(x_R)}_{P_{Rolle}} \end{aligned} \quad (5.48)$$

Die Näherungslösung hat nun folgende Form (5.49) und die Matrizen sind nach Tabelle 5 aufgebaut.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{T}} + \mathbf{K}\mathbf{T} = \mathbf{Q} \quad (5.49)$$

<b>Massenmatrix</b>	$\mathbf{M} = \int_0^L \mu_0\mathbf{C}\mathbf{C}^T dx + \mathbf{m}_1\mathbf{C}(x_1)\mathbf{C}^T(x_1) + \mathbf{m}_2\mathbf{C}(x_2)\mathbf{C}^T(x_2)$
<b>Steifigkeitsmatrix</b>	$\mathbf{K} = \int_0^L (S\mathbf{C}'\mathbf{C}'^T + E\mathbf{I}\mathbf{C}''\mathbf{C}''^T)dx - k_p\mathbf{C}(x_R)\mathbf{C}^T(x_R)$
<b>Allgemeiner Kraftvektor</b>	$\mathbf{Q} = - \int_0^L \mu_0g\mathbf{C}dx - g\mathbf{m}_1\mathbf{C}(x_1) - g\mathbf{m}_2\mathbf{C}(x_2) + k_p y_{ref}\mathbf{C}(x_R)$

Tabelle 5: Schwingungsgleichung

**Beispiel Seil mit Massen und Stütze:** Die Matrixgleichung mit der veränderten Massenmatrix, Steifigkeitsmatrix und der allgemeine Kraftvektor wird mit Hilfe eines Berechnungssoftware simuliert. Die Abbildung 25 zeigt das Seil mit der Masse  $m_1=5$  kg an der Stelle  $x_1=0.325$  m und der Masse  $m_2=7$  kg an der Stelle  $x_2=0.975$  m und der Stütze in der Mitte (1.65 m), welches zum Zeitpunkt  $t=0$  an der Stelle 0.325m mit einem Gewicht von 5kg ausgelenkt wird. Anschließend wird das Gewicht ruckartig gelöst und das Seil beginnt zu schwingen (Abbildung 26).

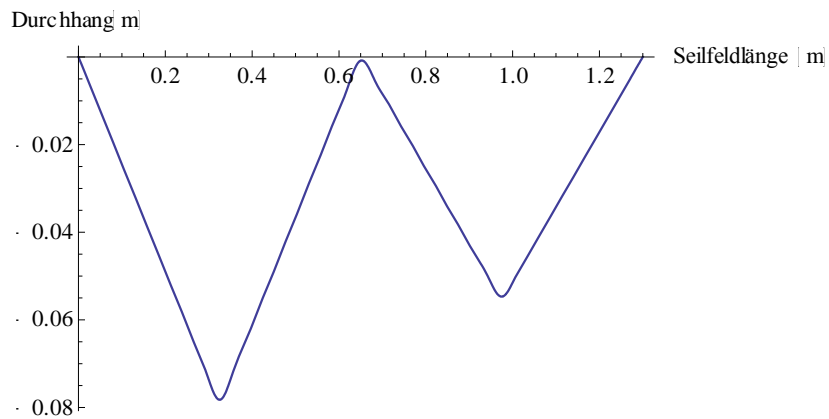


Abbildung 25: Seildurchhang Seil mit Massen und Stützen

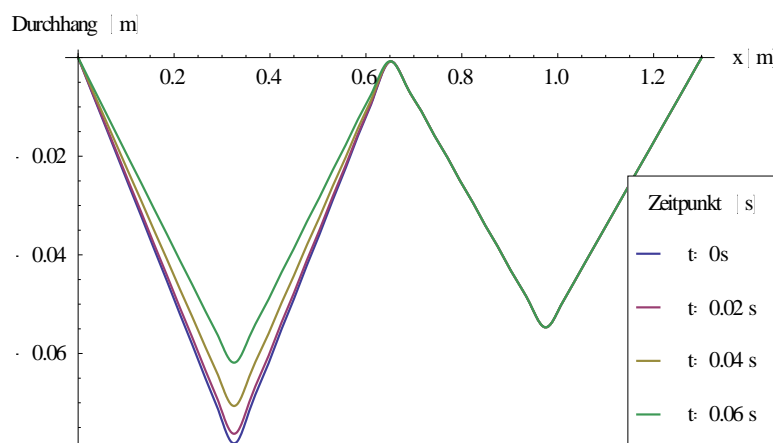


Abbildung 26: Schwingungsverhalten Seil mit Massen und Stützen

Da die Seilkraft als konstant angenommen wird, wird die Schwingung im ersten Feld aufgrund der Auflage des Seils auf der Rolle nicht ins zweite übertragen. Im nächsten Abschnitt wird ein Modell untersucht, das die Seilkraftänderungen berücksichtigt.

## 5.2 Nichtlineare Saitentheorie

In der vorherigen Berechnung wurde die Seilkraft als Konstant angenommen, die veränderliche Variable war nur die Seillänge. Um die Modelle, mathematisches und realer Seilbahn-Prüfstand, miteinander vergleichen zu können, muss die veränderliche Seilkraft ebenfalls mitberücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird der Prüfstand mit Hilfe der Nichtlinearen Saitentheorie berechnet und anschließend im Berechnungstool simuliert. Dieses Kapitel ist mit Anlehnung an (Vgl.: Petersen 2000, S447ff) erarbeitet worden. In der linearen Theorie der schwingenden Saite wird vorausgesetzt, dass die Kraft in der Saite von der Größe der Schwingungsamplitude unabhängig (konstant) ist. Diese Voraussetzung gilt für kleine Amplituden

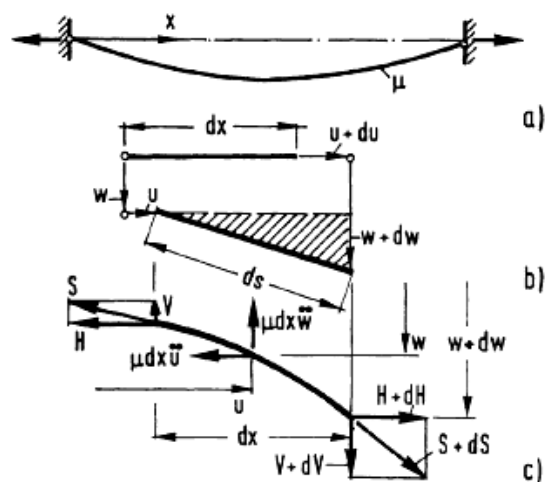


Abbildung 27: Seilkraftänderung

Der momentane Schwingungszustand ist in Abbildung 27 zu sehen. Die anfängliche Seilkraft  $S_0$  wächst an der Stelle  $x$  auf  $S(x, t)$  an. Ein Punkt auf der Saite an der Stelle  $x$  wiederfährt bei der Schwingung eine Querverschiebung um  $w$  und eine Längsverschiebung um  $u$ . Ein Punkt auf der Saite an der Stelle  $x+dx$  wiederfährt die zusätzlichen Verschiebungsanteil  $dw/du$ . In Abbildung 27 b ist das ursprüngliche Element der Länge  $dx$  in der ausgelenkten Lage, diese beträgt jetzt  $ds$ . Aus dem "Dreieck" ergibt sich folgende Formel:

$$ds^2 = (dx + du)^2 + dw^2$$

$$ds = dx \sqrt{1 + 2 \frac{du}{dx} + \left(\frac{du}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2} \quad (5.50)$$

Bezogen auf die ursprüngliche Länge des Elements, ergibt sich die Dehnung wie folgt:

$$\Delta\epsilon = \frac{ds - dx}{dx} = \sqrt{1 + 2\frac{du}{dx} + \left(\frac{du}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2} - 1 \quad (5.51)$$

Das quadratische Glied  $(du/dx)^2$  wird gegenüber  $du/dx$ , das unter der Wurzel steht, vernachlässigt. Der daraus entstehende neue Wurzelterm wird entwickelt und liefert:

$$\Delta\epsilon = 1 + \frac{1}{2}\left(2\frac{du}{dx} + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2\right) + \dots - 1 = \frac{du}{dx} + \frac{1}{2}\left(\frac{dw}{dx}\right)^2 \quad (5.52)$$

Für den Anstieg der Saitenkraft im betrachteten Saitenelement ergibt sich:

$$\Delta S = EA\Delta\epsilon = EA\left(u' + \frac{1}{2}w'^2\right) \quad (5.53)$$

Hierbei ist EA die Dehnsteifigkeit. Die Saitenkraft beträgt:

$$S = S_0 + \Delta S = S_0 + EA\left(u' + \frac{1}{2}w'^2\right) \quad (5.54)$$

Mittels Abbildung 27 c werden die Gleichgewichtsbedingungen formuliert. Der Term  $\mu g dx$  wird vernachlässigt. (wird von einer gestreckten Saite ausgegangen). Die Gleichgewichtsgleichungen sind:

$$\begin{aligned} \sum H = 0: & \quad H - (H + dH) + \mu \ddot{u} dx = 0 \rightarrow \mu \ddot{u} dx - dH = 0 \rightarrow \mu \ddot{u} dx - dS = 0 \\ \sum V = 0: & \quad V - (V + dV) + \mu \ddot{w} dx = 0 \rightarrow \mu \ddot{w} dx - dV = 0 \\ \sum M = 0: & \quad V dx - H dw = 0 \rightarrow V = Hw' \rightarrow V' = (Hw')' = (Sw')' \end{aligned} \quad (5.55)$$

Durch die Horizontalkomponente wird die lokale Saitenkraft angenähert. Aus der ersten Gleichung, zweiten und dritten Gleichung entsteht ein gekoppeltes Differentialgleichungssystem in w und u:

$$\begin{aligned} \mu \ddot{u} - EA\left(u' + \frac{1}{2}w'^2\right)' &= 0 \\ \mu \ddot{w} - \left\{ \left[ S_0 + EA\left(u' + \frac{1}{2}w'^2\right) \right] w' \right\}' &= 0 \end{aligned} \quad (5.56)$$

Dieses Gleichungssystem kennzeichnet die nichtlineare Saitenschwingung, welches sich mit elementaren Mitteln nicht lösen lässt.

Durch unterdrücken des Trägheitsglieds in Längsrichtung folgt für (5.56) folgendes

$$\left(u' + \frac{1}{2}w'^2\right)' = 0 \quad (5.57)$$

Das heißt, dass nach (5.53) die Saitenkraftzunahme für jeden Wert von  $x$  innerhalb der Saite konstant ist.

Wird bei der zweiten Gleichung in (5.56) die eckige Klammer ausdifferenziert und (5.57) beachtet ( $S_0$  und  $EA$  sind konstant) ergibt sich

$$\mu\ddot{w} - Sw'' = 0 \quad (5.58)$$

mit

$$S = S(t) = S_0 + \Delta S(t) \neq konst \quad (5.59)$$

Durch die Zunahme der Saitenkraft infolge der seitlichen Auslenkung folgt

$$\begin{aligned} \frac{EA}{l}(\text{Bogenlänge} - \text{Ursprungslänge}) &= \frac{EA}{l}(b - l) = \frac{EA}{l} \left( \int_0^l \left(1 + \frac{1}{2}w'^2\right) dx - l \right) \\ &= \frac{EA}{l} \frac{1}{2} \int_0^l w'^2 dx \end{aligned} \quad (5.60)$$

Die Bewegungsgleichung der nichtlinearen Saitenschwingungstheorie lautet:

$$\mu\ddot{w} - \left( S_0 + \frac{EA}{2l} \int_0^l w'^2 dx \right) w'' = 0 \quad (5.61)$$

$S$  ist konstant innerhalb der Saitenlänge, wächst hingegen gegenüber  $S_0$  mit der Auslenkung  $w$  an.

**Beispiel Nichtlineare Saitentheorie:** Um zu verstehen was die Gleichung (5.61) bedeutet wird diese ins Simulationsprogramm implementiert und mit den Daten für den Prüfstand erweitert. Die Eingangsdaten sind folgende:

<b>Drahtdurchmesser</b>	1,5mm
<b>Massendichte</b>	0,01134 kg/m
<b>Spannung</b>	$100 \cdot 10^3 \cdot d^2 \pi / 4 \text{ N}$
<b>Länge des Prüfstands</b>	1.3 m
<b>Biegesteifigkeit</b>	0 Nm <sup>2</sup>
<b>Seilvorspannkraft</b>	200 N
<b>Masse 1</b>	5 kg
<b>Masse 2</b>	7 kg
<b>Seilauslenkung an der Stütze</b>	$y = 0 \text{ m}$

In Abbildung 28 und Abbildung 29 sind die Schwingungen der Massen zu erkennen, aufgrund der Längenänderung und Seilkraftänderung des Seils.

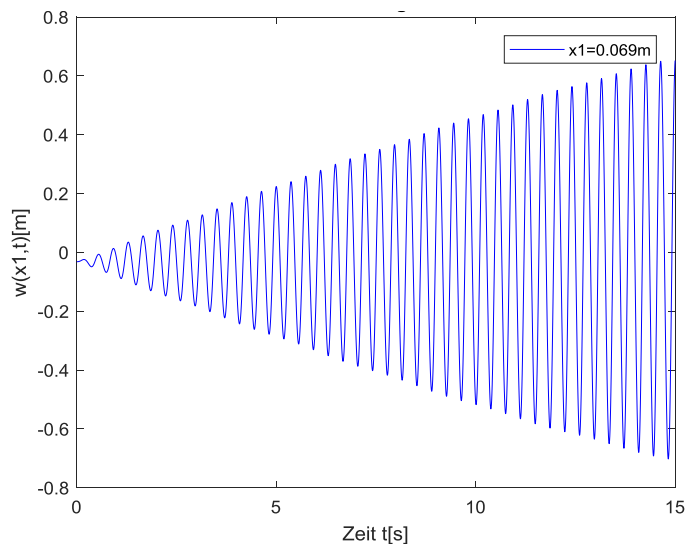


Abbildung 28: Seilauslenkung von Masse 1

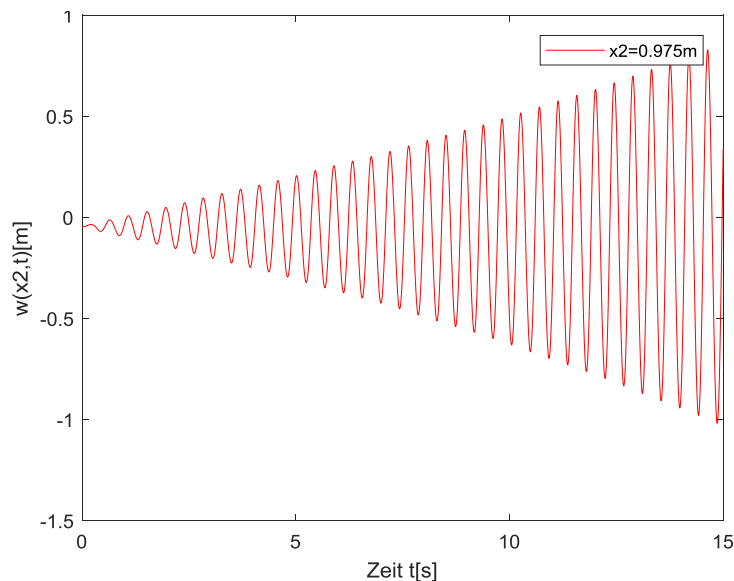


Abbildung 29: Seilauslenkung von Masse 2



### 5.3 Zustandsraum

Die Überführung in den Zustandsraum erfolgt, weil dadurch die Differentialgleichungen höherer Ordnung in ein System aus Differentialgleichungen erster Ordnung umgewandelt werden. Dieses System kann mit der ODEsuite von Matlab gelöst werden. (Vgl.: Gasch et al. 2012/ Nelles 2015)

Die Schwingungsgleichung des bewegten Seils ((5.49) und Tabelle 5) wird in den Zustandsraum überführt.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{T}} \\ \ddot{\mathbf{T}} \end{pmatrix}}_{\dot{\mathbf{x}}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{K} + \mathbf{C}(x_R)\mathbf{C}^T(x_R)k_p) & 0 \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}} \underbrace{\begin{pmatrix} \mathbf{T} \\ \dot{\mathbf{T}} \end{pmatrix}}_x + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}(\hat{\mathbf{Q}} + \mathbf{C}(x_R)y_{ref}k_p) \end{pmatrix}}_f \quad (5.62)$$

Die Zustandsraumdarstellung lautet mit dem Zustandsvektor  $x$ , der Systemmatrix  $A$ , dem Belastungsvektor  $f$  und dem Ausgang  $y(x, t) = \mathbf{C}^T \mathbf{T}$  (Vgl.: Gasch et al. 2012/Nelles 2015)

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}x + \mathbf{f} \\ y(x, t) &= \mathbf{C}^T \mathbf{T} = (\mathbf{C}^T \quad 0)x \end{aligned} \quad (5.63)$$

## 6 Prüfstandkonzept

Durch die mathematische Beschreibung des Prüfstandes sind die Daten für die Auslegung vorhanden.

### 6.1 Antriebsauslegung

Um den gesamten Prüfstand konstruieren zu können, fehlen noch die Antriebsdaten, um das Seil und damit die Massen in Schwingung versetzen zu können.

#### 6.1.1 Vorauslegung

Um einen groben Überblick über die benötigte Antriebsleistung zu erhalten, wird die maximal zu erwartende statische Auslenkung des Seils betrachtet.

Die tatsächliche Seillänge ist in Abbildung 30 (rote Linie) zu erkennen. Die Differenz zwischen ursprünglicher Seillänge zur ausgelenkten Seillänge beträgt  $\Delta L_{max} = L_0 - L_{err} = 0.015m$

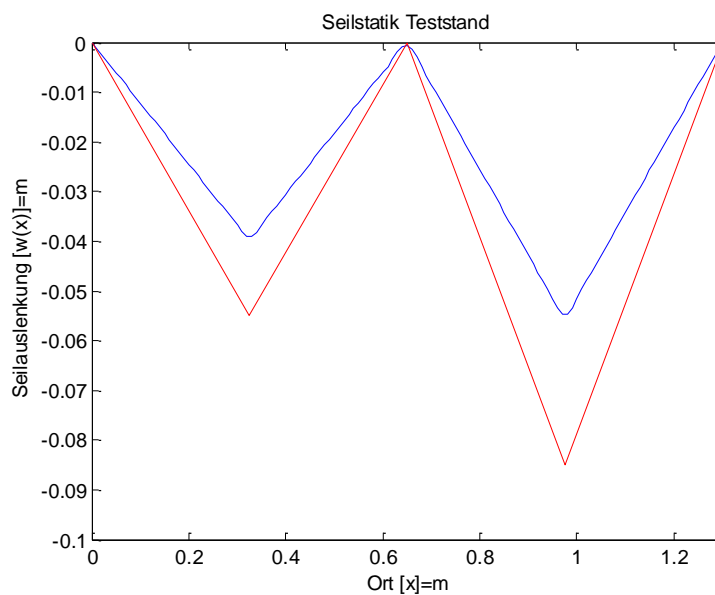


Abbildung 30: Seillängenänderung durch die Auslenkung

Somit ergibt sich eine Amplitude für den Antrieb von 0,01m. Erregt wird der Prüfstand mittels einer Sinusschwingung und der Eigenfrequenz der Masse 1 (siehe Abbildung 31). Die Eigenfrequenzen sind mit Hilfe von Matlab berechnet worden und betragen für die Masse1  $f_{e1}=2.27$  Hz und für die Masse2  $f_{e2}=2.78$  Hz. Die Randerregung wird mit folgender Funktion simuliert.

$$\Delta L(t) = \Delta L_{max} * \sin(2\pi f_e t) \quad (6.1)$$

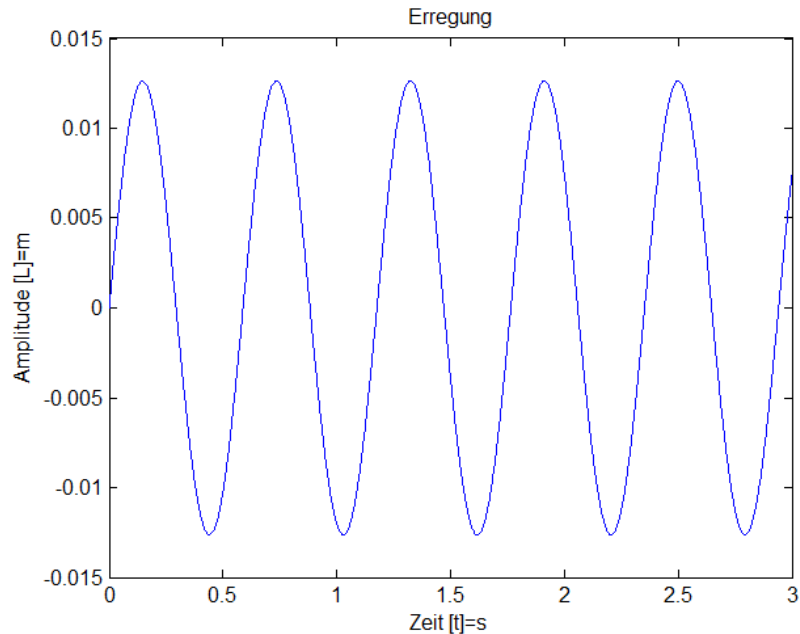


Abbildung 31: Erregerschwingung

Um die benötigte Antriebsleistung berechnen zu können, fehlt noch die Geschwindigkeit. Diese ergibt sich durch die Ableitung der Erregung und ist in Abbildung 32 zu erkennen.

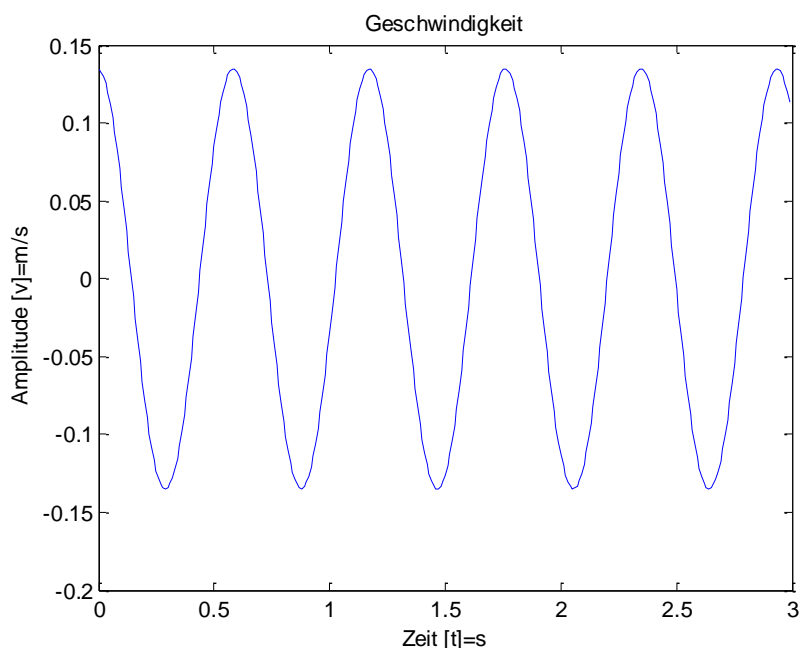


Abbildung 32: Geschwindigkeit der Erregung

Die maximale Geschwindigkeit mit der Erregerfrequenz für die Masse1 ( $f_{e1}=2.27$  Hz) ist in der Gleichung (6.2) berechnet.

$$v_{max1} = \Delta L * 2 * \pi * f_e * \underbrace{\cos(2\pi f_e t)}_{\max.=1} = 0,214 \frac{m}{s} \quad (6.2)$$

Die maximale Antriebsleistung berechnet sich nun aus der maximalen Zugkraft  $F_{max}$  des verwendeten Seils, multipliziert mit der maximalen Geschwindigkeit.

$$P_{max1} = F_{max} * v_{max1} = 700N * 0,214 \frac{m}{s} = 149,76 W \quad (6.3)$$

Wenn die Erregung über die Masse 2 erfolgt, ändert sich die Eigenfrequenz ( $f_{e2}=2.78$  Hz). Dies hat zur Folge, dass die max. Geschwindigkeit und die Antriebsleistung steigen. (siehe (6.4)und (6.5))

$$v_{max2} = \Delta L * 2 * \pi * f_e * \underbrace{\cos(2\pi f_e t)}_{\max.=1} = 0,262 \frac{m}{s} \quad (6.4)$$

$$P_{max2} = F_{max} * v_{max2} = 700N * 0,262 \frac{m}{s} = 183,41 W \quad (6.5)$$

In diesem Abschnitt wurde nur die Seilstatik berücksichtigt um einen Überblick über die benötigte Leistung zu erhalten. Damit der Antrieb dimensioniert werden kann, muss die Seildynamik mitberücksichtigt werden. Aus diesem Grund, wird die Berechnung mit Hilfe von Matlab realisiert.

### 6.1.2 Simulation mit Matlab

Für die Bestimmung der benötigten Antriebsleistung wird das Beispiel Nichtlineare Saitentheorie auf Seite 41 mit Matlab simuliert. Es wird mit den Eigenfrequenzen der Massen ( $f_{e1}=2.27$  Hz und  $f_{e2}=2.78$  Hz) erregt, um das System in seinen Resonanzzustand zu bringen.

Die benötigte Antriebsleistung wird über die Beziehung

$$P = S(t) * v(t) \quad (6.6)$$

berechnet. Die Abbildung 33 zeigt den zeitlichen Verlauf der Antriebsleistung mit der Eigenfrequenz der Masse 1 und die Abbildung 34 zeigt den Verlauf der Antriebsleistung mit der Eigenfrequenz der Masse 2. Es ist zu erkennen dass die Eigenfrequenzen Einfluss auf die Antriebsleistung und Drehzahl haben.

Der Vergleich mit der geschätzten maximalen Antriebsleistung von Gleichung (6.5) zeigt, dass die tatsächlich erforderliche Antriebsleistung um einiges geringer ist. Das liegt daran, dass die tatsächliche Seilkraft geringer ist, als die maximal mögliche Seilkraft.

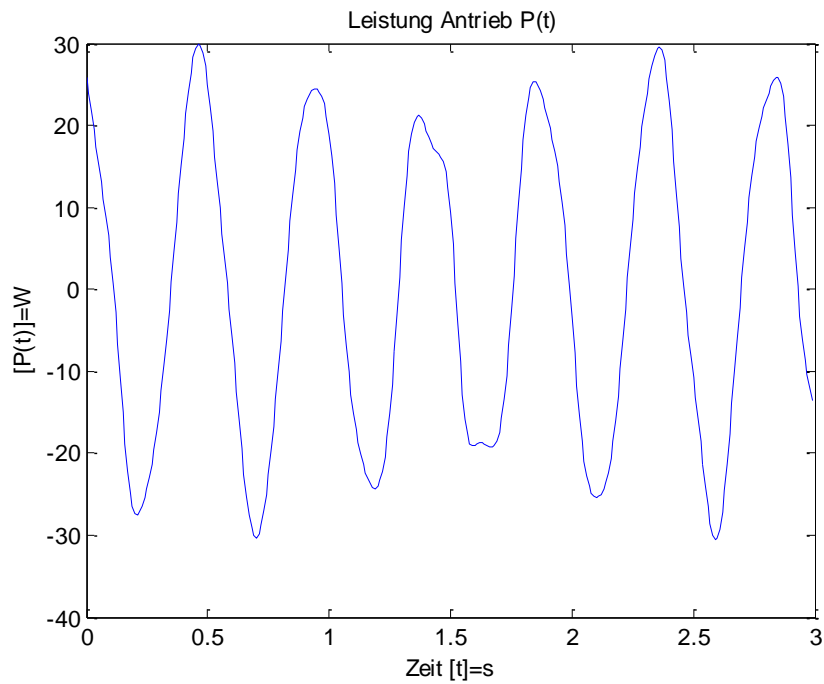


Abbildung 33: Antriebsleistung bei Eigenfrequenz von Masse 1

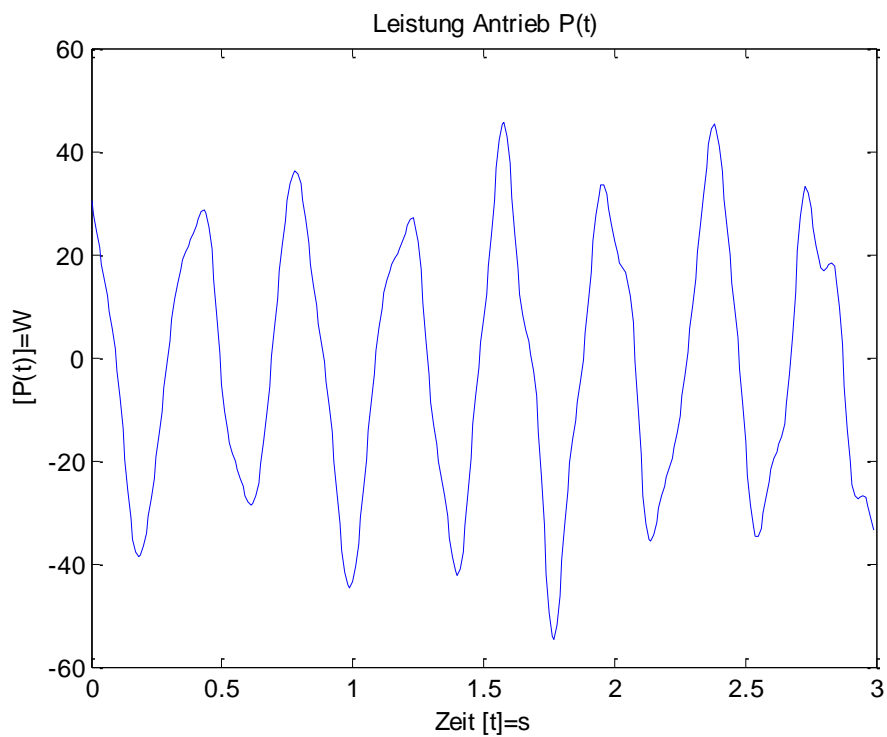


Abbildung 34: Antriebsleistung bei Eigenfrequenz von Masse 2

Nach der Berechnung mit Hilfe von Matlab ergibt sich eine Antriebsleistung von 45 W. Um das erforderliche Antriebsmoment berechnen zu können, werden die Gleichung (6.7), (6.8) und (6.9) verwendet.

$$\begin{aligned} P &= M * \omega = 45W \\ \omega &= 2 * \pi * f \end{aligned} \quad (6.7)$$

Wobei  $f$  die Eigenfrequenz ist, die ebenfalls berechnet worden ist. Die Eigenfrequenz für die Masse1 ist  $f_1 = 2.27 \text{ Hz}$  und für die Masse2  $f_2 = 2.78 \text{ Hz}$ .

Daraus ergibt sich ein erforderliches Antriebsmoment für die Masse 1 von:

$$M_1 = \frac{P}{\omega} = \frac{45W}{2 * \pi * f_1} = \frac{45W}{2 * \pi * 2.27\text{Hz}} = 3.155 \text{ Nm} \quad (6.8)$$

und für die Masse 2 von:

$$M_2 = \frac{P}{\omega} = \frac{45W}{2 * \pi * f_2} = \frac{45W}{2 * \pi * 2.78\text{Hz}} = 2.576 \text{ Nm} \quad (6.9)$$

Ebenso ergeben sich zwei unterschiedliche Drehzahlen, bei denen die Massen in Resonanz kommen. Für die Masse 1 ist dies:

$$\omega_1 = 2 * \pi * f_1 = \frac{n_1 * \pi}{30} \rightarrow n_1 = 60 * f_1 = 136,2 \frac{1}{\text{min}} \quad (6.10)$$

und für die Masse 2 ergibt sich die Drehzahl von:

$$\omega_2 = 2 * \pi * f_2 = \frac{n_2 * \pi}{30} \rightarrow n_2 = 60 * f_2 = 166,8 \frac{1}{\text{min}} \quad (6.11)$$

Durch die Antriebsleistung und das Anfahrmoment ist der Antrieb definiert und kann bestellt werden.

## 6.2 Prüfstand entwerfen

Der gesamte Prüfstand (Abbildung 35) hat eine maximale Länge von 2.3 m. Dies rührt daher, dass neben der geforderten Länge von 1.3 m zwischen den "Stützen" von Masse 1 und Masse 2 noch die Antriebseinheit sowie die Seilabspannung untergebracht werden muss.

Die Lagerböcke, auf denen der Prüfstand aufliegt, sind bereits vorhanden. Das Hohlprofil wird mittels Schraubzwingen an den Lagerböcken befestigt. Die zwei optischen Sensoren (grüne Markierung) werden direkt nach den Seillagerungen montiert. Der Kraftsensor (orange Markierung) wird am Ende des Prüfstandes angebracht, dadurch bleibt dieser in Ruhe und misst die Kraftänderung des Seils. Als Seil wird ein dünner Stahldraht verwendet.

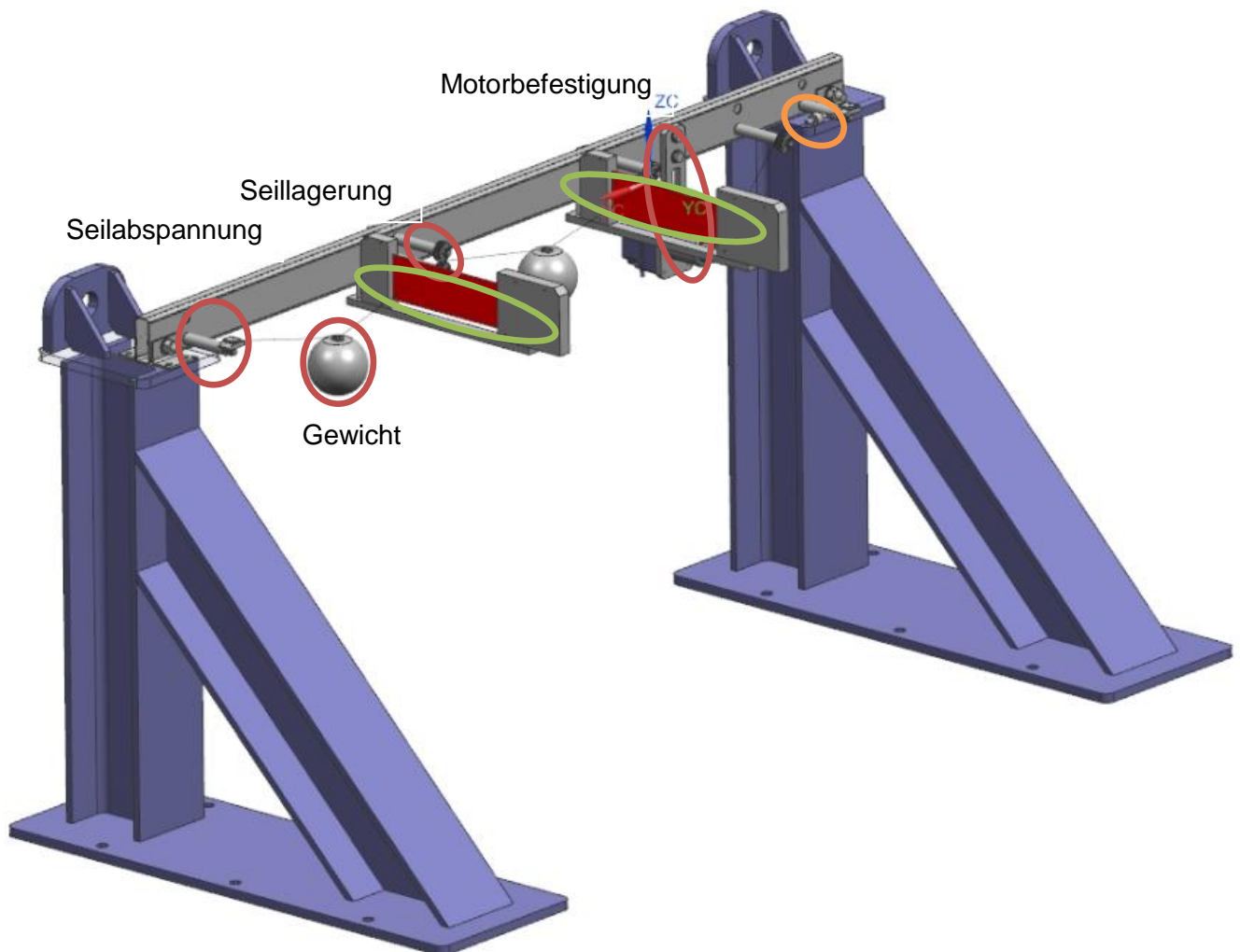


Abbildung 35: Prüfstand Gesamt

Das Detail Seilführung (Abbildung 36) zeigt zwei Seilrollen. In der unteren Seilrolle ist das Seil geführt. Die obere Seilrolle verhindert, dass bei zu großen Schwingungen das Seil heraus springt.

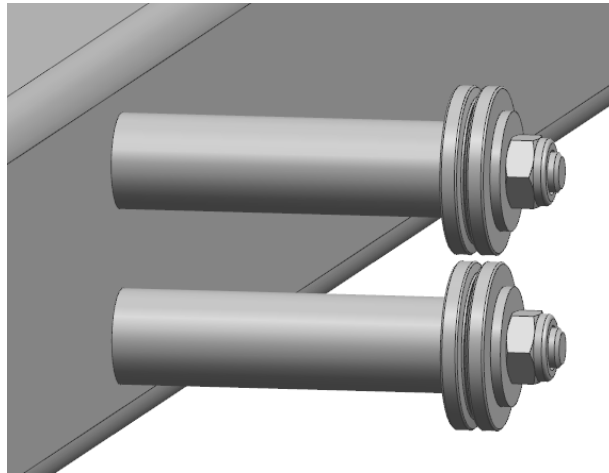


Abbildung 36: Seilführung

Der Verbindungsbolzen, der in Abbildung 37 dargestellt ist, wird durch das Hohlprofil gesteckt und mit einer Mutter gesichert.

Außerdem wird auf den Verbindungsbolzen ein Lager gepresst (roter Bereich), welches anschließend in die Seilrolle (Abbildung 38) gepresst wird.

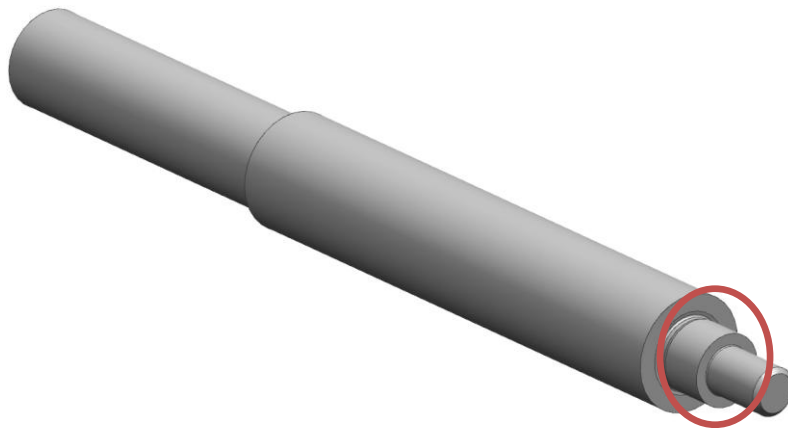


Abbildung 37: Verbindungsbolzen



Abbildung 38: Seilrolle



Die Seilabspannung ist in Abbildung 39 ersichtlich. Das untere Bauteil der Seilabspannung (Abbildung 40) wird am Verbindungsbolzen (Abbildung 41) mit Hilfe einer Mutter fixiert. Zwischen dem Unterteil der Seilabspannung und der darauf montierten Platte wird das Seil eingespannt.

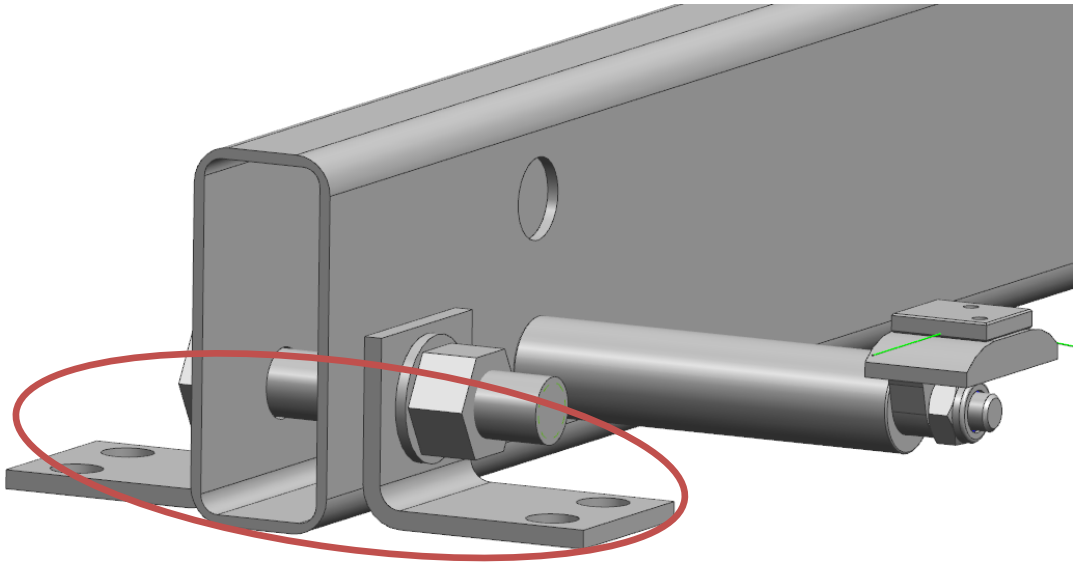


Abbildung 39: Seilabspannung

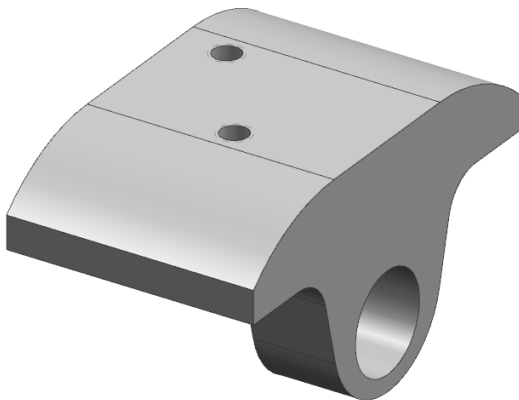


Abbildung 40: Seilabspannung UT

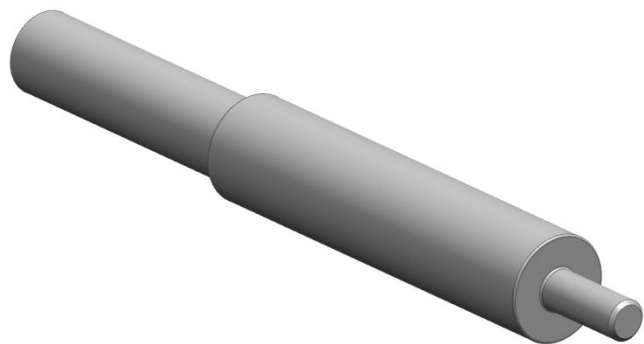


Abbildung 41: Verbindungsbolzen Seilabspannung

Des Weiteren folgt in Abbildung 39 die Befestigung des Prüfstands auf den Lagerblöcken (rote Markierung), dies geschieht mit zwei Winkeln pro Seite.

Die Befestigung des Motors am Prüfstand ist in Abbildung 42 zu erkennen. Die Motorplatte (Abbildung 43) wird am Hohlprofil mit zwei Schrauben fixiert.

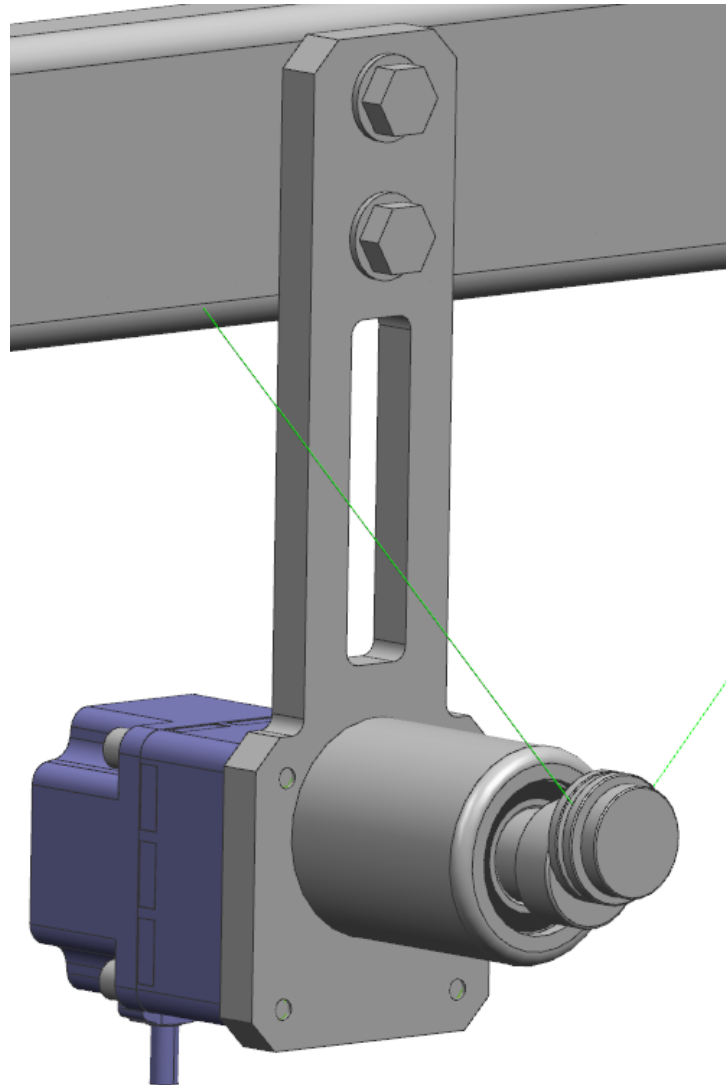


Abbildung 42: Motormontage

Der Motor wird an der Motorplatte (Abbildung 43) mit vier Schrauben angeflanscht. Außerdem wird die Lagerhülse (Abbildung 45) auf der Motorplatte befestigt, damit die Schwungscheibe entlastet und gegen Lösen gesichert wird.

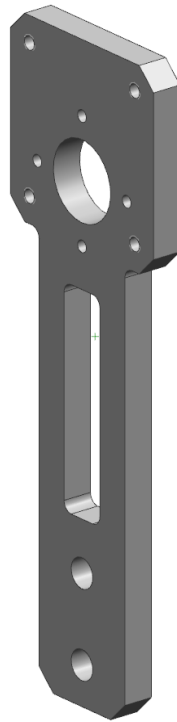


Abbildung 43: Motorplatte

Die Schwungscheibe (Abbildung 44) wird mittels Passfederverbindung auf der Motorwelle montiert. Hinzu kommt, dass ein Lager im roten Bereich aufgepresst wird.

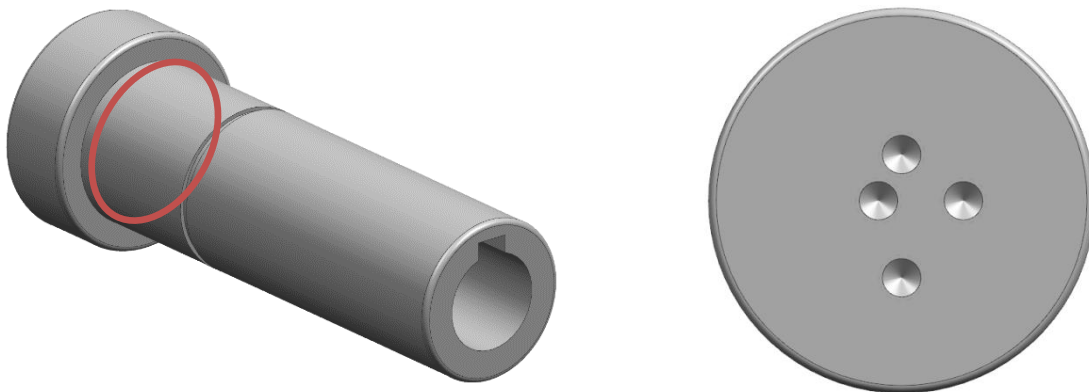


Abbildung 44: Schwungscheibe

In das Lagergehäuse (Abbildung 45) wird das Lager, welches auf der Schwungscheibe montiert wird, eingepresst. Die Schwungscheibe besitzt ein exzentrisches Lochmuster. Aufgrund dieses Lochmusters können unterschiedliche Auslenkungsamplituden simuliert werden.

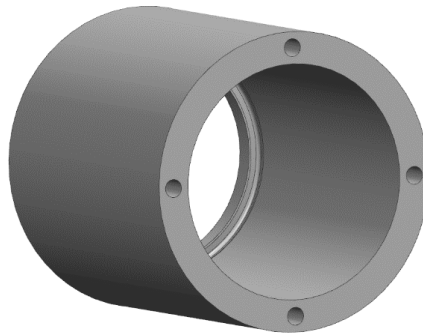


Abbildung 45: Lagergehäuse

Auf die Schwungscheibe wird die "Steckschraube" (Abbildung 46) geschraubt. Die Baugruppe Steckschraube besteht aus drei Bauteilen, die folgendermaßen miteinander montiert werden: Auf die Steckschraube (Abbildung 46) wird ein Lager (roter Bereich) und auf dieses Lager wiederum die Seilrolle (Abbildung 45) befestigt.

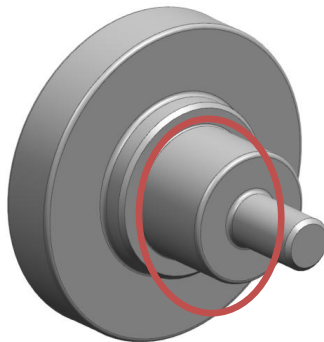


Abbildung 46: Steckschraube



Abbildung 47: Seilrolle

Die Gewichte sind mit einer einfachen Platte direkt am Seil montiert (siehe Abbildung 48). Dies hat zur Folge dass die Pendelbewegungen der Massen minimiert werden.

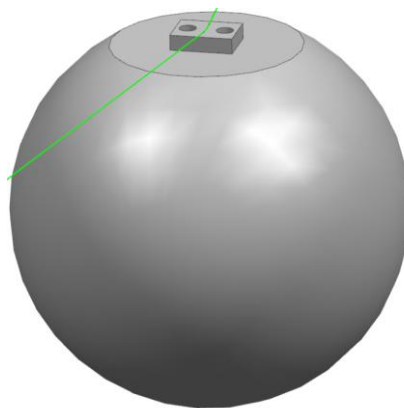


Abbildung 48: Gewichtsmontage

## 7 Messtechnik

An die Messtechnik für den Prüfstand werden folgende Anforderungen gestellt. Zum einen muss die Auslenkung des Seils erfasst werden, jeweils bei den einzelnen Massen. Zum anderen soll eine Vorspannkraft von 200 N eingestellt werden können und die Kraftänderung gemessen werden.

### 7.1 Sensorik

In diesem Kapitel werden die Sensoren beschrieben, die im Prüfstand verwendet werden.

#### 7.1.1 Optische Sensoren

Für die Messung der Bewegung des Seils sind optische Digitalmikrometer von Micro Epsilon im Einsatz. Es werden zwei Sensoren benötigt, um die Auslenkungen der Masse 1 und 2 zu erfassen. Einerseits wird das Modell opotCONTROL 1202 verwendet, dieser hat einen Messbereich bis 98mm und andererseits das Modell optoCONTROL 2500 mit einem Messbereich von 34mm. Die wesentlichen Vorteile dieser Sensoren sind die hohe Messrate, kompakte Bauweise und die Messbarkeit von Messobjekten ab 0,3mm. (Vgl.: Micro-Epsilon o.J.a)

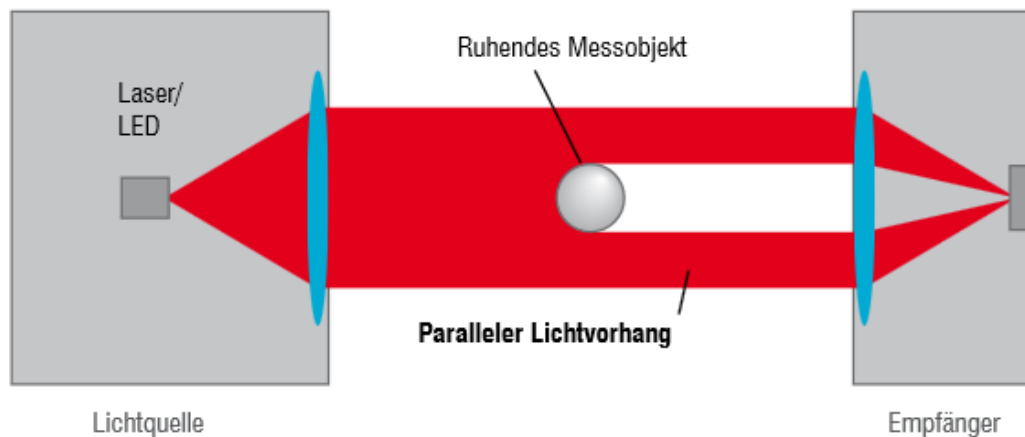


Abbildung 49: Messprinzip von optischen Sensoren

Quelle: Micro-Epsilon o.J.a

Die optischen Präzisions-Mikrometer von Micro-Epsilon arbeiten nach dem Durchlichtverfahren (ThruBeam). Von einem Sender wird ein paralleler Lichtvorhang erzeugt, der auf eine Empfängereinheit trifft. Wenn ein Messobjekt in den Lichtstrahl geführt wird, wird der Strahl unterbrochen. Dadurch ergibt sich eine Abschattung, diese wird von der Empfangsoptik erfasst und als geometrischer Wert ausgegeben. (Vgl.: Micro-Epsilon o.J.a)

### 7.1.1.1 optoCONTROL 1202

Beim Laser-Mikrometer optoCONTROL 1202 tritt der Laserstrahl als parallel gerichtetes Laserlicht aus der Sendeoptik aus. In der Empfangsoptik trifft die Laserlinie auf einen CCD-Zeilen Empfänger. Die während der Integrationszeit gesammelte Lichtmenge jedes der Empfangselemente, wird als Analogspannung separat ausgelesen und nach abgeschlossener Analog-Digital-Wandlung als Digitalwert in einem Datenfeld gespeichert. Wenn sich ein nichttransparentes Messobjekt in der Laserlinie befindet, werden nur die Empfangselemente der Zeile beleuchtet, die außerhalb der Schattenzone des Messobjekts liegen. Da der Abstand der Pixel der CCD-Zeile bekannt ist, kann die Größe und Position des Messobjekts ermittelt werden.



Abbildung 50: optoCONTROL 1202

Quelle: Micro-Epsilon o.J.b

Die Komponenten des optoCONTROLS sind zum einen eine Lichtquelle und zum anderen eine Empfängereinheit (siehe Abbildung 50). Die gesamte Elektronik ist im Empfängergehäuse untergebracht und die Lichtquelle und der Empfänger können in beliebigen Abständen innerhalb des Messabstandes zueinander montiert werden. (Vgl.: Micro-Epsilon o.J.b)

### 7.1.1.2 optoCONTROL 2500

Das Messprinzip ist ein laserbasiertes Mess-System mit integriert hochauflösender CCD-Kamera. Das ThruBeam Mikrometer misst nach dem Schattenwurfprinzip die Dimensionen eines Messobjekts oder die Lage einer Körperkante. Durch die hohe Messrate, die hervorragenden Genauigkeit und die ausgezeichneten Auflösung wird das Lasermikrometer besonders für präzise Mess- und Prüfaufgaben eingesetzt. Das optoCONTROL 2500 besteht aus einer Sensoreinheit und einem Controller. Die Sensoreinheit besteht aus einer Laserlichtquelle (Sender) und einer CCD-Kamera (Empfänger). Die Laserlichtquelle erzeugt einen parallelen Lichtvorhang. Die CCD Zeile im Empfänger misst die mittels Schattenwurf abgebildete Kontur des Messobjekts mit hoher Genauigkeit. Gesteuert und ausgewertet wird die Sensoreinheit mittels intelligentem Controller mit Grafikdisplay zur Bedienung und Messwertanzeige (siehe Abbildung 51) (Vgl.: Micro-Epsilon o.J.b)

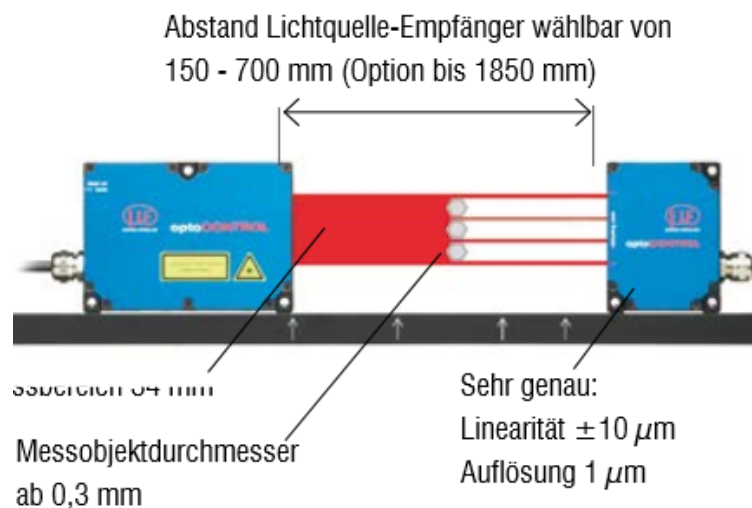


Abbildung 51: optoCONTROL 2500

Quelle: Micro-Epsilon o.J.b

### 7.1.2 Kraftsensor

Der Kraftsensor kommt zum Einsatz, damit eine definierte Vorspannkraft aufgebracht werden kann und um die Kraftänderung durch die Auslenkung zu erfassen.

Der Messkörper ist eine Membran. Auf dieser sind vier Dehnungsmessstreifen (DMS) so montiert, damit sich zwei stauchen und zwei dehnen. Die Membran mit den DMS wird elastisch verformt, durch die in Messrichtung wirkende Kraft. Dadurch, dass die DMS durch die proportionale Längenänderung ihren ohmschen Widerstand ändern, verstimmen diese die Wheatstone-Brücke.

Wenn eine Brückenspeisespannung anliegt, liefert die Schaltung ein Ausgangssignal, welches proportional zur Widerstandsänderung ist und somit auch proportional zur aufgetragenen Kraft. Die Kraft wird über zwei Gewindebolzen auf den Messkörper eingeleitet. (Vgl.: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH)



Abbildung 52: Kraftsensor U9B 5kN

Quelle: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

### 7.1.3 Seilzugsensor

Der Seilzugsensor (WDS-1000-P60 analog), ersichtlich in Abbildung 53, wird verwendet um die axiale Wegänderung des Seils, aufgrund der Erregung, zu messen. Der Weg wird direkt ausgelesen, und es ist keine Integration nötig, wodurch Fehler vermieden werden.



Abbildung 53: Seilzugsensor

Quelle: Micro-Epsilon o.J.c



Der Seilzug-Wegsensor misst die lineare Bewegung über ein hochflexibles Stahlseil. Die Seiltrommel ist mit einem Sensorelement verbunden, das ein wegproportionales Ausgangssignal erzeugt. Über das Seilzugprinzip wird eine Linearbewegung in eine Rotationsbewegung transformiert und in eine Widerstandsänderung umgewandelt. Je nach Seilstellung wird eine Spannung ausgegeben. (Vgl.: Micro-Epsilon o.J.c)

### 7.1.4 NI Data Acquisition

Mit Hilfe der Software, NI Data Acquisition, wird der Prüfstand messtechnisch realisiert. Unter messen versteht man das quantitative Erfassen einer Größe, der Messgröße. (Vgl.: Lerch 2007 S.3)

Die wesentlichen Entscheidungsmerkmale bei rechnergestützten Messdatenerfassungen sind die korrekte Erfassung der Messdaten und die anschließende Auswertung inklusive Fehlerkorrektur sowie die Visualisierung und effiziente Speicherung.

Die Übernahme von Messdaten in einen Digitalrechner geschieht mit Hilfe, den an den Rechnerbus angeschlossenen Messmodulen mit Analog-Digital-Umsetzer, die auf einem Ethernet Chassis montiert sind. (Abbildung 54) Die wichtigste Anforderung an ein Messdatenerfassungssystem sind die korrekte Erfassung der Messsignale, die schnelle Reaktion auf externe bzw. interne Ereignisse, die Prioritätensteuerung der verschiedenen Aufgaben, gute Visualisierungs- und Archivierungsmöglichkeiten, einfache Bedienung, hohe Zuverlässigkeit sowie die Erweiterbarkeit, Portierbarkeit und Wartbarkeit hinsichtlich der Software. (Vgl.: Lerch 2007 S.497-498)

#### 7.1.4.1 Ethernet Chassis NI cDAQ-9188

Das NI cDAQ-9188 ist ein CompactDAQ-Ethernet-Chassis mit acht Steckplätzen, das für dezentrale oder verteilte Messungen elektrischer und sensorischer Signale konzipiert ist. Es sind Module für verschiedene Sensormessungen erhältlich, diese können die Spannungs-, Strom- und Digitalsignale verarbeiten. Über die Ethernet-Schnittstelle wird das Chassis mit dem Messcomputer verbunden. Für die Messungen am Prüfstand wird neben den zwei optischen Sensoren und dem Seilzugsensor auch noch ein Kraftaufnehmer, welcher ein Brückenmodul benötigt, verwendet. (Vgl.: National Instrument o.J.\_a)



Abbildung 54: Ethernet Chassis NI cDAQ 9188

Quelle: National Instrument o.J.\_a

### 7.1.4.2 Analogeingangsmodul NI 9215

Das NI 9215 Modul für NI-CompactDAQ-Chassis verfügt über vier simultane abgetastete Analogeeingangskanäle und SAR-A/D-Wandler, die eine Auflösung von 16 bit haben. (Vgl.: National Instrument o.J.\_b)



Abbildung 55: Analogeingangsmodul NI 9215

Quelle: National Instrument o.J.\_b

### 7.1.4.3 Brückenmodul NI 9237

Das Brückenmodul mit simultaner Abtastung für das NI CompactDAQ Chassis verfügt über alle Signalkonditionierungsfunktionen, welche zur gleichzeitigen Versorgung und Messung von bis zu vier brückenbasierten Sensoren erforderlich sind. Diese vier RJ-50-Anschlüsse ermöglichen die direkte Anbindung von Kraftmessdosen. (Vgl.: National Instrument o.J.\_c)



Abbildung 56: Brückenmodul NI 9237

Quelle: National Instrument o.J.\_c

#### 7.1.4.4 Ethernet Chassis Anschlussplan

Am Steckplatz 3 des Ethernet Chassis NI cDAQ 9188 wird das Analogeingangsmodule NI 9215 und am Steckplatz 8 das Brückenmodul NI 9237 eingebaut (siehe Abbildung 57).

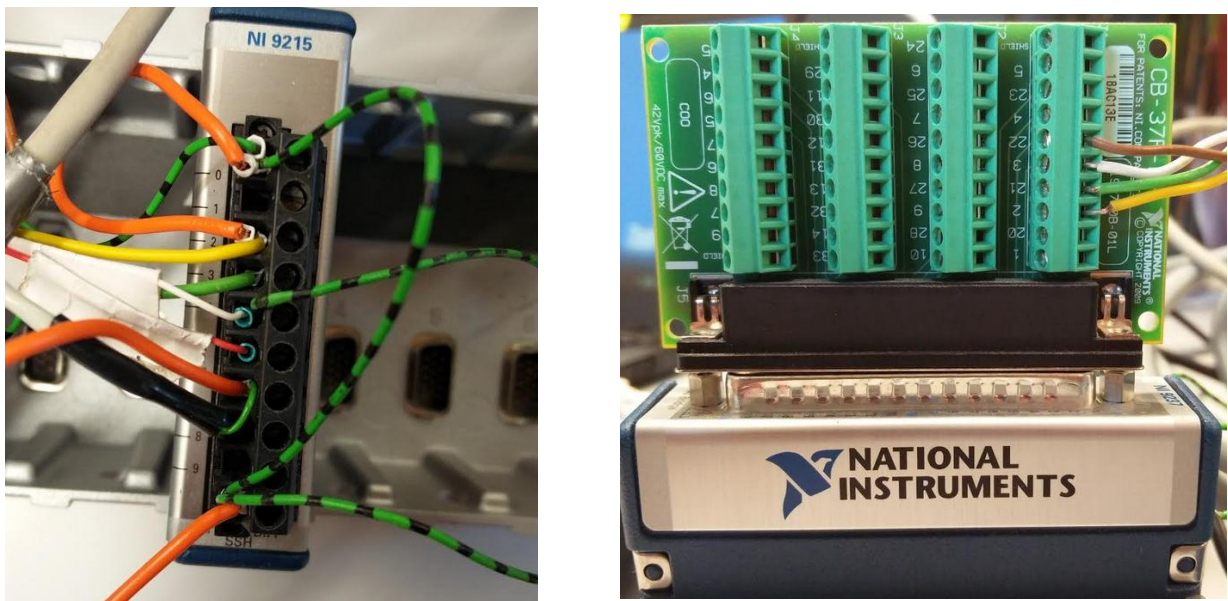


Abbildung 57: Ethernet Chassis Anschlussplan

Am Analogeingangsmodule NI 9215 sind die zwei optischen Sensoren sowie der Seilzugsensor angeschlossen. Am Brückenmodul ist der Kraftsensor installiert. Die Versorgung des Seilzugsensors mit 14-27 V Gleichspannung und den optischen Sensoren von 15-30 V wird mit einem Laptop-Netzteil realisiert. Die Spannungsversorgung des Kraftsensors mit 0,5-12 V erfolgt über das Brückenmodul NI 9237. In der Tabelle 6 ist die Pinbelegung des Analogeingangsmodule NI 9215 ersichtlich.

Kanal	Pin	Analogeingangsmodule NI 9215	
1	0 1		
2	2 3	Seilzugsensor	gelb 0V Grün 10V
3	4 5	optoCONTROL 1202	weiß 0V rot 10V
4	6 7	optoCONTROL 2500	grün 10V schwarz 0V
Erdung	9	grün-schwarz	

Tabelle 6: Pinbelegung von Analogeingangsmodule NI 9215

Die Belegung des Brückenmoduls NI 9237 ist in Tabelle 7 ersichtlich.

Kanal	Pin	Brückenmodul NI 9237	
1	2 3 21 22	HBM U9B	gelb 10 V RS+ weiß 0,5 V AI+ grün 0 V RS- braun -0,5 V AI-
2	8,9,26,27		
3	12,13,31,32		
4	17,18,26,37		

Tabelle 7: Pinbelegung von Brückenmodul NI 9237

#### 7.1.4.5 NI Measurement und Automation Explorer

Der NI Measurement & Automation Explorer, welcher in Abbildung 58 zu sehen ist, ist für die Konfiguration der Hardwarekomponenten zuständig. Mit Hilfe des Programmes werden der Hardware-Support und die Datenaufbereitung erleichtert, außerdem können Tasks erstellt werden.

Es ist dabei zu beachten, dass zwischen physikalischen und virtuellen Kanälen unterschieden wird. Ein physikalischer Kanal ist ein Anschluss bzw. Steckkontakt an der Messkarte, an der ein analoges oder digitales Signal gemessen / erzeugt wird. Ein virtueller Kanal ist die Darstellung eines physikalischen Kanals und dessen Einstellung z.B.: Pinbelegung und Skalierungsinformation. Um einen virtuellen Kanal erstellen zu können müssen entweder in LabVIEW die dafür benötigten Blöcke in das Blockdiagramm eingefügt oder im Measurement & Automation Explorer im Unterpunkt, Datenumgebung, ein Task erstellt werden.

Nachdem die Sensoren mit den Messwertkarten verbunden sind und diese an das Ethernet Chassis angeschlossen sind, wird dieser im Measurement & Automation Explorer unter "Geräte und Schnittstellen" hinzugefügt (Abbildung 58). (Vgl.: Jamal R und Hagestedt A. 2004, S.361)

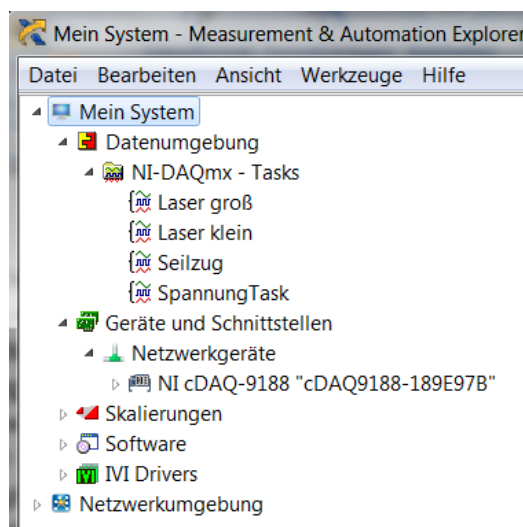


Abbildung 58: Measurement & Automation Explorer

## 7.2 LabVIEW

LabVIEW ist die Abkürzung für Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. Es ist Entwicklungsumgebung und graphische Programmiersprache zugleich. Die Idee dahinter ist, die Programmierung nicht, wie bisher üblich, zeilenweise in Form von Anweisungen, genannt Statements, niederzuschreiben, sondern Funktionsblöcke in einem Blockdiagramm auf dem Bildschirm darzustellen. (Vgl.: Georgie W, Hohl P, 2015, S.20)

Die Software des Prüfstands wird mit dem Messprogramm LabVIEW realisiert. Zuerst werden die zwei optischen Sensoren, der Seilzugsensor sowie der Kraftsensor ausgelesen. Anschließend wird die Spannung der Sensoren mit Hilfe von Umrechnungsfaktoren, welche in den jeweiligen Bedienungsanleitungen zu finden sind, in die gewünschte Einheit umgerechnet. Diese Daten werden im letzten Schritt im Frequenz- und Zeitbereich dargestellt, um diese danach bewerten zu können. In Abbildung 59 ist das Blockdiagramm ersichtlich. Es ist in unterschiedliche Abschnitte unterteilt, die anschließend detaillierter beschrieben werden.

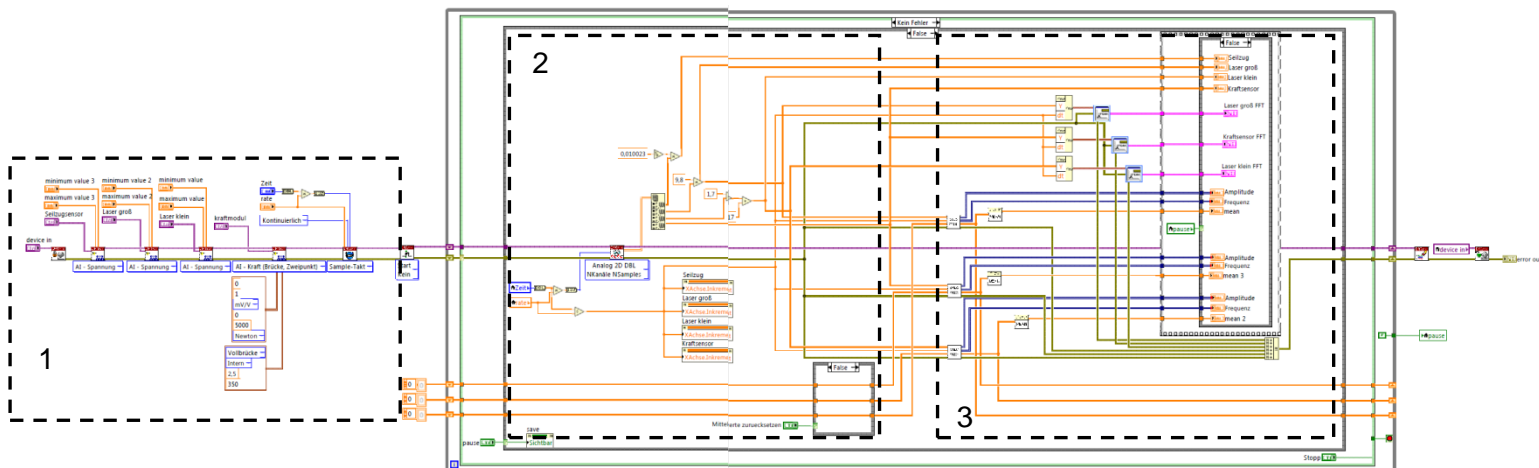


Abbildung 59: Blockdiagramm für den Prüfstand

## 7.2.1 Sensoren einlesen

Als erstes muss das DAQ-Netzwerkgerät reserviert werden. Bevor dies möglich ist, muss im NI Measurement und Automation Explorer hinzugefügt werden (siehe 7.1.4.5). Anschließend werden die zwei optischen Sensoren sowie der Seilzugsensor über die Bausteine AI-Spannung eingelesen (siehe Abbildung 60). Der Kraftsensor wird über den Baustein AI-Kraft eingelesen, dies ist ebenfalls in Abbildung 60 ersichtlich. Außerdem werden Angaben über die verwendete Brücke sowie die Skalierungsinformation angegeben. Abschließend wird der Taktgeber, die Frequenz des Sample-Takts und die Anzahl der zu erfassenden Samples konfiguriert.

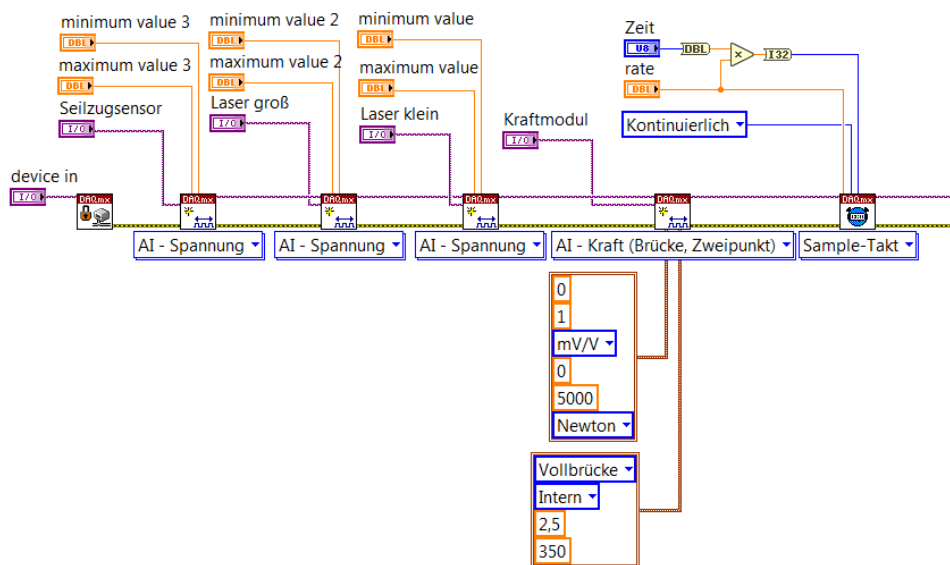


Abbildung 60: Sensoren einlesen

## 7.2.2 Spannung umwandeln

Im nächsten Abschnitt werden die Spannungen der Sensoren gemessen und mit Hilfe von linearen Gleichungen in die benötigte Einheit transferiert. Der Block Analog 2D DBL ist für das "Einlesen" der Signale verantwortlich, dies geschieht mit einer durch den Block vordefinierten Abtastrate, siehe hierzu Abbildung 61. Anschließend werden die unterschiedlichen Eingangssignale mit Hilfe von Umrechnungsfaktoren in die gewünschte Maßeinheit transferiert. Des Weiteren wird die Zeitachse für alle Sensoren einstellbar gemacht. Außerdem wird der Knopf, Mittelwert zurücksetzen, implementiert. Die Funktion Mittelwert zurücksetzen ist aus dem Grund adaptiert worden, weil am Anfang der Messung ein Rauschen vorhanden ist, dass das Messsignal verfälscht.

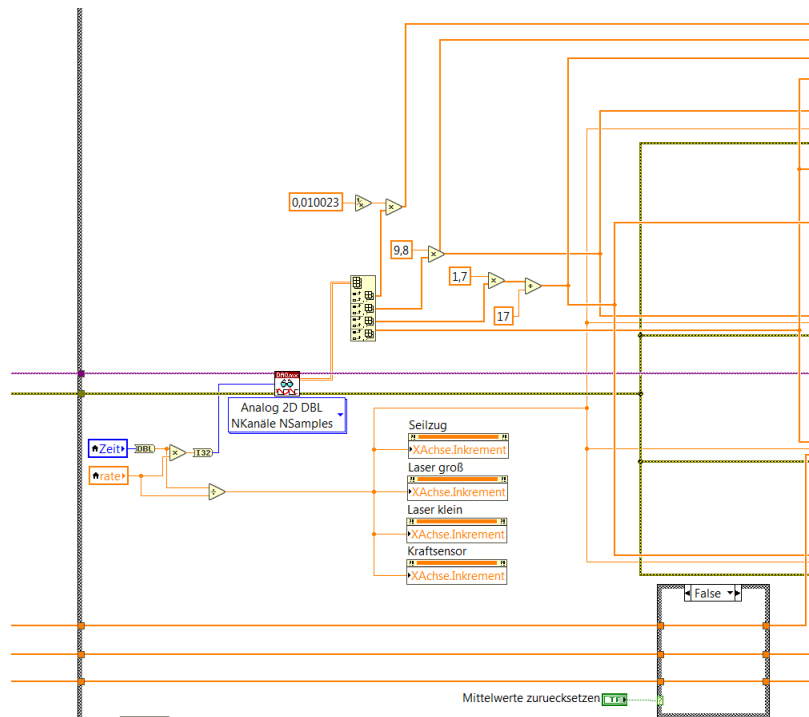


Abbildung 61: Spannungen umwandeln

### 7.2.3 Frequenzanalyse, FFT und graphische Ausgabe

Für die Frequenzmessung wird ein kleines Unterprogramm (SubVi) geschrieben, damit das Blockdiagramm übersichtlicher wird. In Abbildung 62 ist zu erkennen, dass neben dem Signal des jeweiligen Sensors auch die Abtastrate in den Baustein zur Messung von Frequenzkomponenten geführt wird. Dieser wandelt das zeitliche Signal in Frequenz und Amplitude um. Anschließend wird der Mittelwert der Frequenz berechnet.

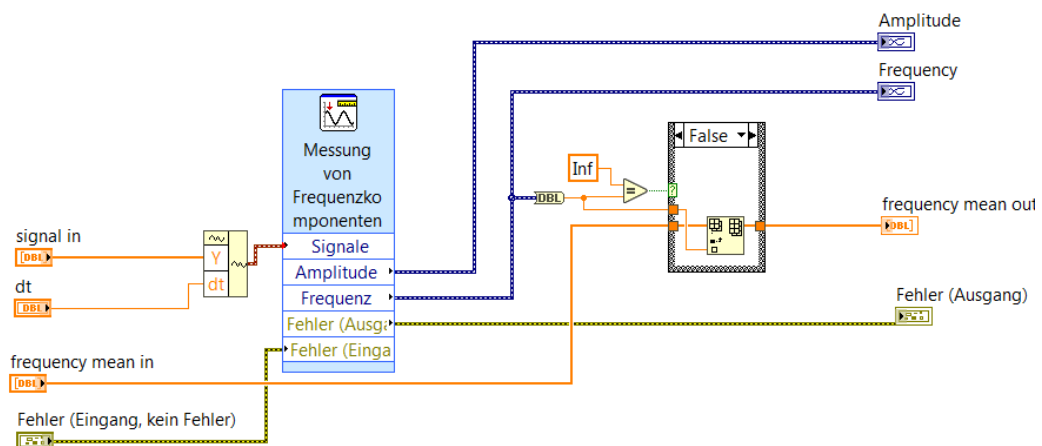


Abbildung 62: Frequenz messen



Als nächstes erfolgt die eigentliche FFT-Analyse. Diese wird ebenfalls mit einem fertigen Baustein von LabVIEW realisiert. Die FFT wandelt einen Zeitbereichssignalzug in Frequenzbereichsspektren um. Bei einer großen Anzahl von Signalen kann durch die Betrachtung der Spektralrepräsentation bessere Einsicht gewonnen werden als durch die Zeitbeschreibung. In der Spektralanalysetheorie wird angenommen, dass das umzuwandelnde Signal von unendlicher Dauer ist, da kein physikalisches Signal die Bedingung erfüllen kann, dass das Signal aus einer unendlichen Serie von Repliken seiner selbst besteht. Diese Repliken werden durch ein Anzeigegitter multipliziert, welches außerhalb dieses Gitters null ist. (Vgl.: Fast Fourier Transform o.J)

Abschließend werden die Signale bzw. Frequenzen in Signalverlaufsgraphen ausgegeben, dies ist in Abbildung 63 am rechten Rand zu sehen.

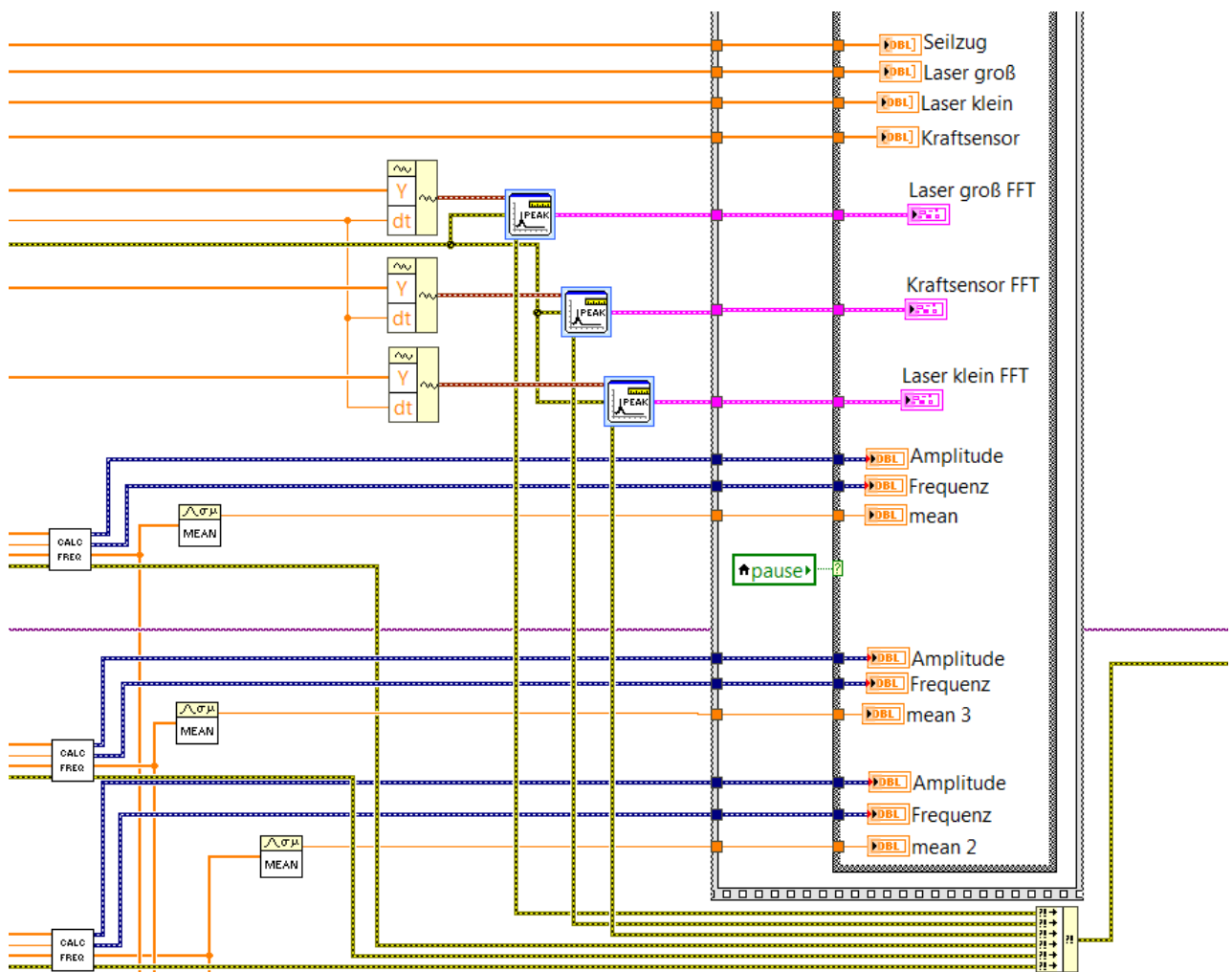


Abbildung 63: Frequenz messen, FFT und graphische Ausgabe



## 7.2.4 Daten speichern

Durch den Block "Dateidialog" wird festgelegt, wie die zu speichernden Daten heißen und, welches Format diese Daten besitzen. Um die Datenweitergabe möglichst einfach zu gestalten, werden die Daten als "CSV-Format" exportiert. Diese Datensätze können anschließend in anderen Programmen, wie beispielsweise Excel und Matlab importiert und weiter verarbeitet werden. (Abbildung 64)

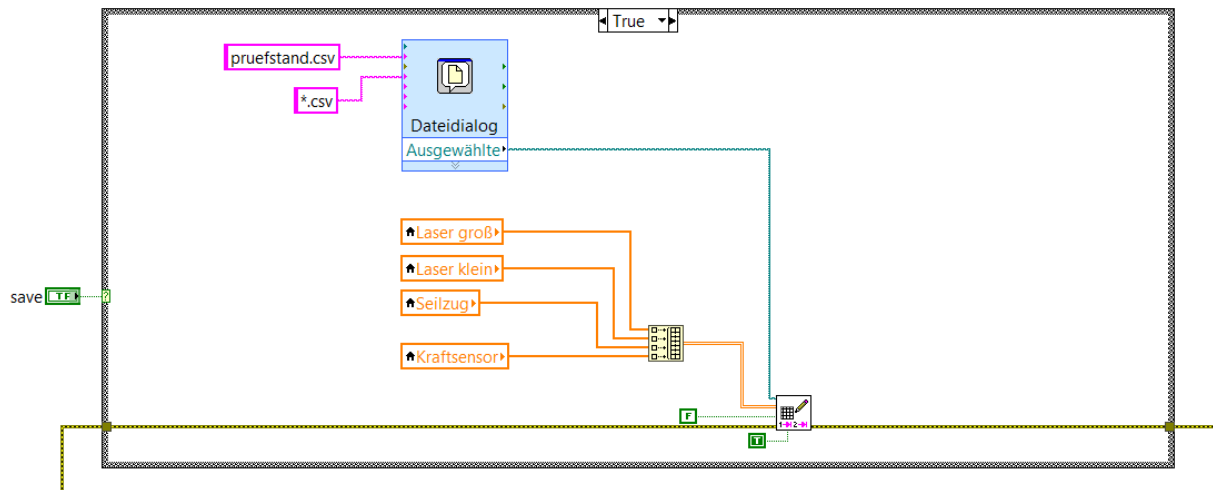


Abbildung 64: Daten speichern

## 7.2.5 Frontpanel

Das Frontpanel ist die Benutzeroberfläche, die der Anwender des Prüfstands bedient. Es ist als Registerkarte aufgebaut mit den Registern Setup, Graph und FFT (siehe Abbildung 65, Abbildung 66 und Abbildung 67).

In Abbildung 65 wird die Hardware NI cDAQ 9188, wie in 6.1.4.1 beschrieben, sowie die optischen Sensoren, der Seilzugsensor und der Kraftsensor eingelesen. Außerdem kann der Messbereich mittels den Größen Maximum und Minimum festgelegt werden.

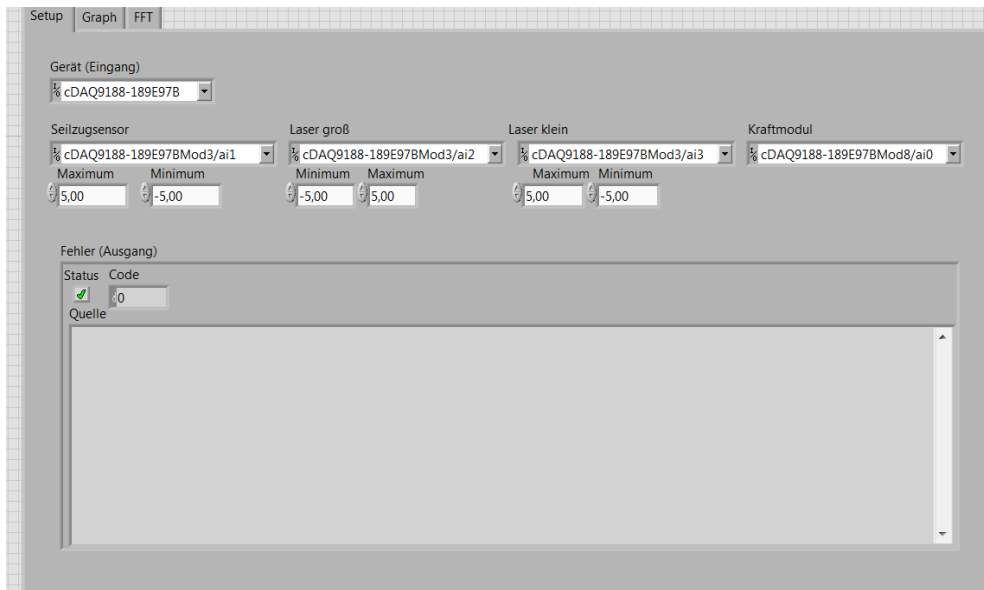


Abbildung 65: Registertarte Setup

Die nachfolgende Abbildung (Abbildung 66) zeigt für die jeweiligen Sensoren die dazugehörigen Graphen. Außerdem sind die Werte für die Amplitude, die Frequenzen und den Mittelwerte unter den Graphen dargestellt. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit den Mittelwert zurücksetzen, die Messung zu pausieren und den Zeitbereich/ Messbereich einzustellen. Der Mittelwert muss zu Beginn jeder Messung zurückgesetzt werden, da das Rauschen des Messsignals zu Beginn die Messung verfälscht. Die Möglichkeit zu pausieren wurde implementiert, um Messdaten abzuspeichern. Außerdem ist die Messzeit einstellbar.

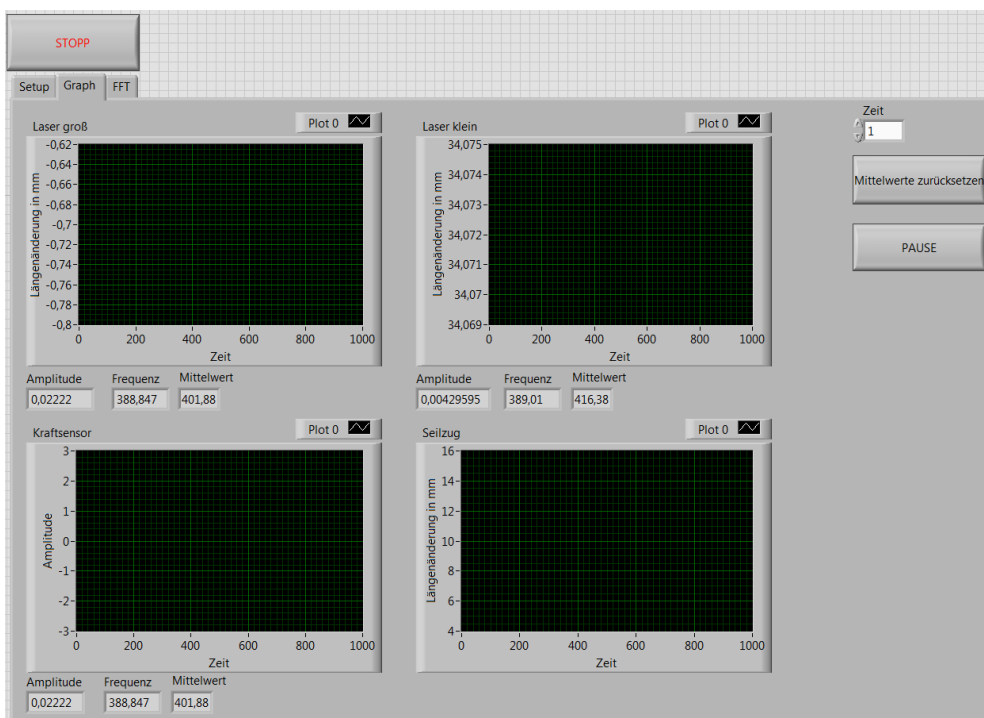


Abbildung 66: Registertarte Graph

Im letzten Fenster (Abbildung 67) sind die Graphen für die Ergebnisse der FFT ersichtlich.

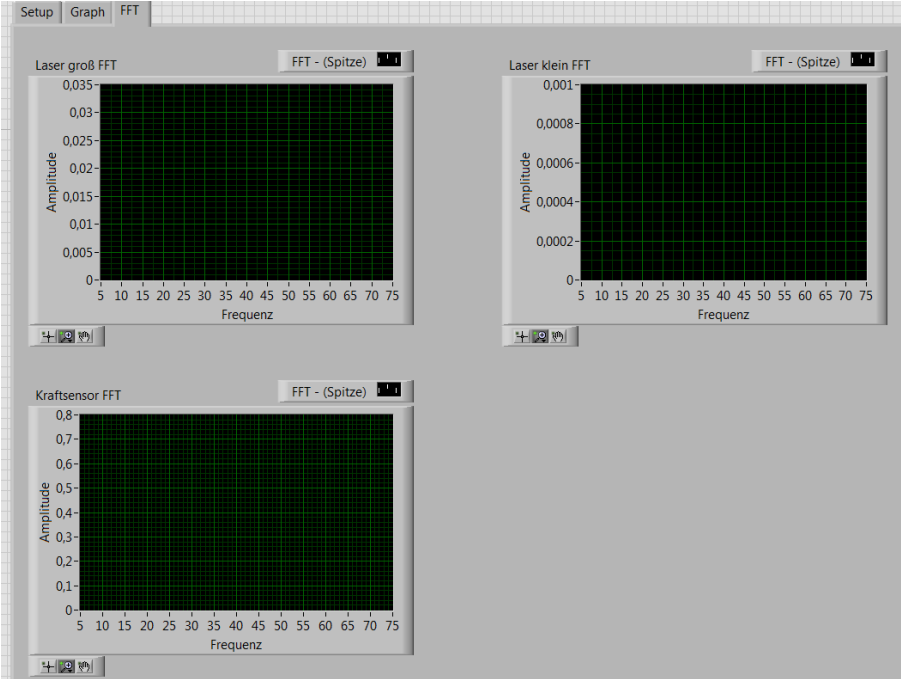


Abbildung 67: Registerkarte FFT

## 8 Inbetriebnahme und erste Messversuche

In diesem Kapitel werden die ersten Messversuche sowie die Inbetriebnahme des Seilbahn-Prüfstands behandelt.

Nach der konstruktiven Gestaltung und Umsetzung des Prüfstandes sowie der Auslegung des Antriebs und dem Schreiben des Messprogramms wird der Prüfstand gefertigt und anschließend zusammengebaut.

Der Seilbahn-Prüfstand ist auf einem Item-Profil montiert. In Abbildung 68 ist der Prüfstand abgebildet. Die Gewichtskugeln (gelb 7 kg und rot 5 kg) simulieren die Fahrzeuge und sind mittig zwischen den Stützen montiert. Die optischen Sensoren (blau) sind direkt nach der Seilführung (grün) montiert und messen die Bewegung des Seils. Erregt wird das System durch die exzentrisch angebrachte Rolle am Antrieb (weiß). Der Kraftsensor (rot) ist ganz rechts im Bild und ist zwischen der Seilrolle und Seilabspannung befestigt, an dieser Stelle sind die Schwingungsamplituden im Seil vernachlässigbar klein und der Seilkraftsensor bewegt sich bei einer Änderung der Seillänge nur minimal. Die Seilabspannung (orange) erfolgt jeweils am Ende des Prüfstandes.

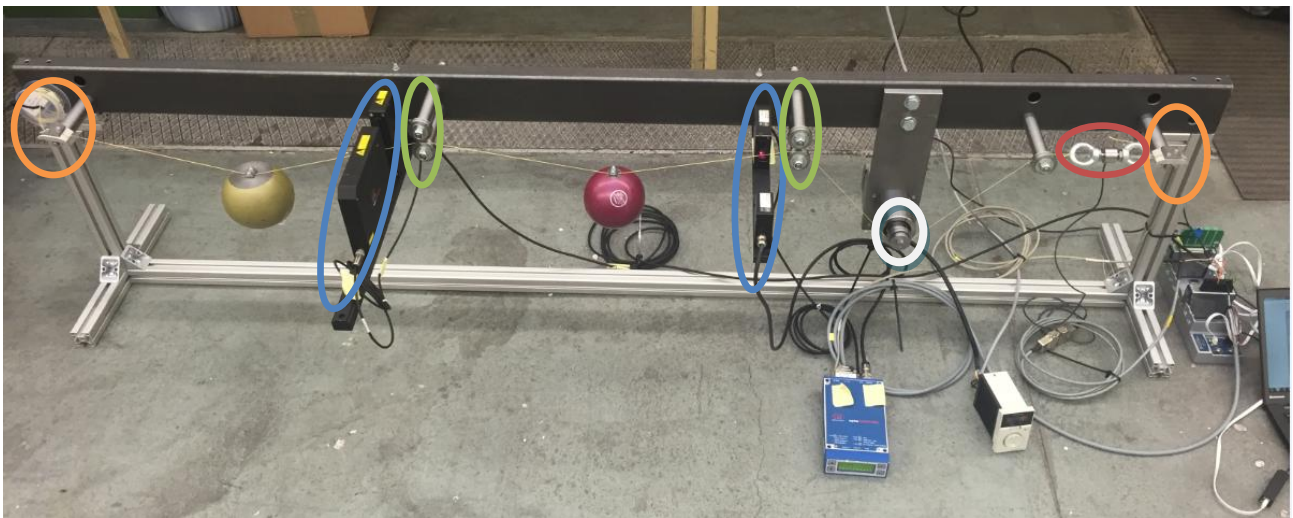


Abbildung 68: Aufbau Prüfstand

### 8.1 Erste Optimierungsmaßnahmen

Nach den ersten Messversuchen hat sich herausgestellt, dass die Pendelbewegungen der Massen einen zu großen Einfluss auf die Messung hat. Im Zuge dessen wurde die Befestigung der Massen am Seil optimiert. Außerdem ist noch eine Führung der Massen implementiert worden, um die Pendelbewegung zu reduzieren.

In Abbildung 69 ist die konstruktive Änderung der Befestigung der Massen ersichtlich. Durch die Seilrollen an den Massen wird die Pendelbewegung minimiert.

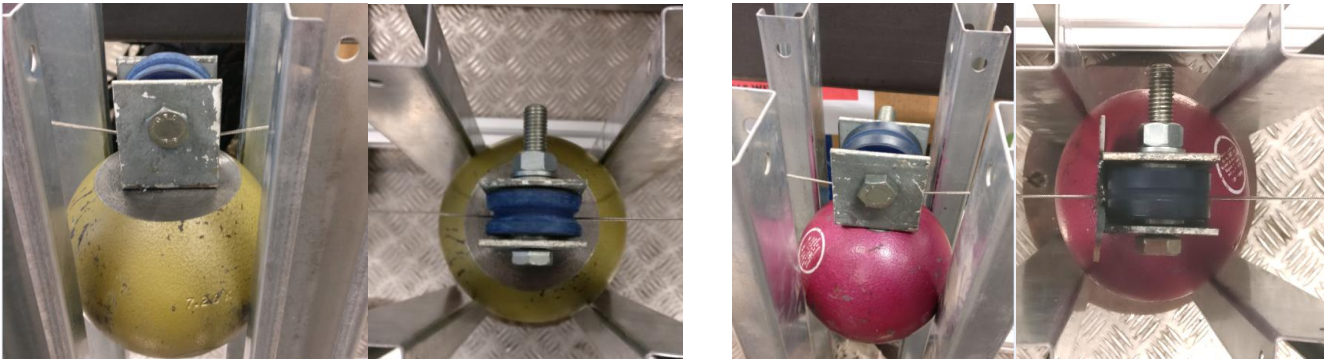


Abbildung 69: Optimierte Gewichtsbelegung

In Abbildung 70 ist der gesamte Seilbahnprüfstand mit den Änderungen ersichtlich.

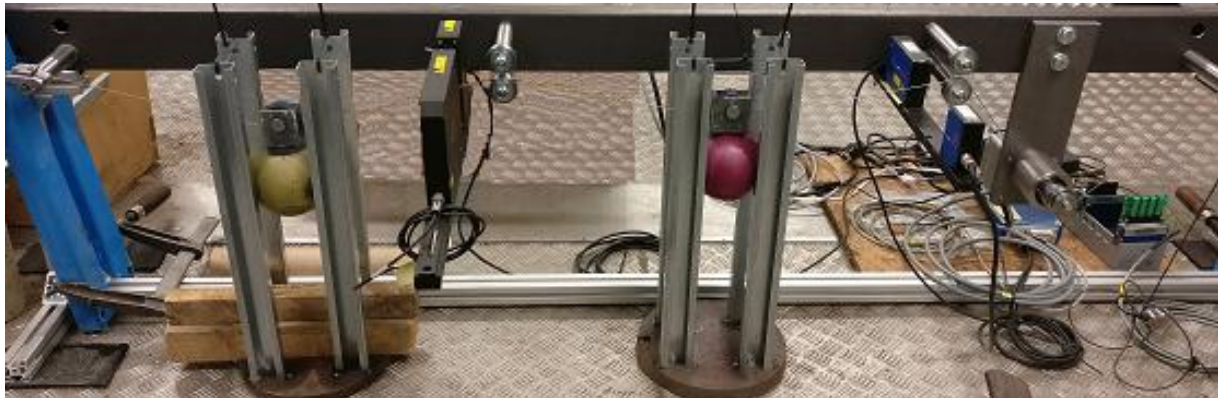


Abbildung 70: Optimierter Prüfstand

Die Erregerfrequenzen des Systems wird über die untenstehende Gleichung nach (Vgl.: Mathe Online (2009)/ Uni Hannover (o.J.)) berechnet. Damit kann abgeschätzt werden, bei welchen Frequenzen die Massen theoretisch aufschwingen. Mit dem Befehl eig() werden die Eigenwerte des Systems berechnet. Das Ergebnis liefert  $\lambda$ -Werte, um von diesen auf die Eigenfrequenzen zu kommen muss die Wurzel gezogen werden.

$$\omega = \sqrt{\text{eig}(M^{-1} * K)} \rightarrow f = \frac{\omega}{2 * \pi}$$

$M^{-1}$  ist die Inverse-Massenmatrix, in dieser Matrix sind das Gewicht des Seils und die Massen implementiert. Die Steifigkeitsmatrix  $K$  beinhaltet neben der Seilspannung noch die Gewichtskraft der Massen und die Steifigkeit der Stütze.

Durch die obige Gleichung ergeben sich die theoretischen Erregerfrequenzen  $f_{e1}=2,27$  Hz und  $f_{e2}=2,78$  Hz.

## 8.2 Erregung des Systems

Der Motor wird mit der Erregerfrequenz der Masse 1 betrieben. Die Erregerfrequenz für die Masse 1 beträgt 2,27 Hz und die Erregerfrequenz der Masse 2 liegt bei 2,78 Hz. Da der Motor eine Getriebeübersetzung von 1:20 hat, um das hohe Anfahrmoment von 3,36 Nm bzw. 2,84 Nm zu überwinden, muss die Drehzahl bei der Masse 1 auf 2724 Umdrehungen pro Minute und bei Masse 2 auf 3336 Umdrehungen pro Minute eingestellt werden. Die Seilvorspannkraft von 200 N wird manuell eingestellt bevor die Massen am Seil angebracht werden und mittels Kraftsensor überprüft.

Die Seilauslenkung der Massen (=Fahrzeuge) kann mit den Sensoren nicht direkt in der Mitte des jeweiligen Seilfeldes der Massen erfolgen, deshalb wird die Bewegung des Seils an einer definierten Stelle gemessen.

Es werden mehrere Messungen gemacht, neben der Seilauslenkung der Massen wird noch die Seilkraftänderung gemessen. In Abbildung 71 ist die Seilbewegung der Massen und die Seilkraftänderung ersichtlich. Die Erregerdrehzahl betrug 1700 Umdrehungen.

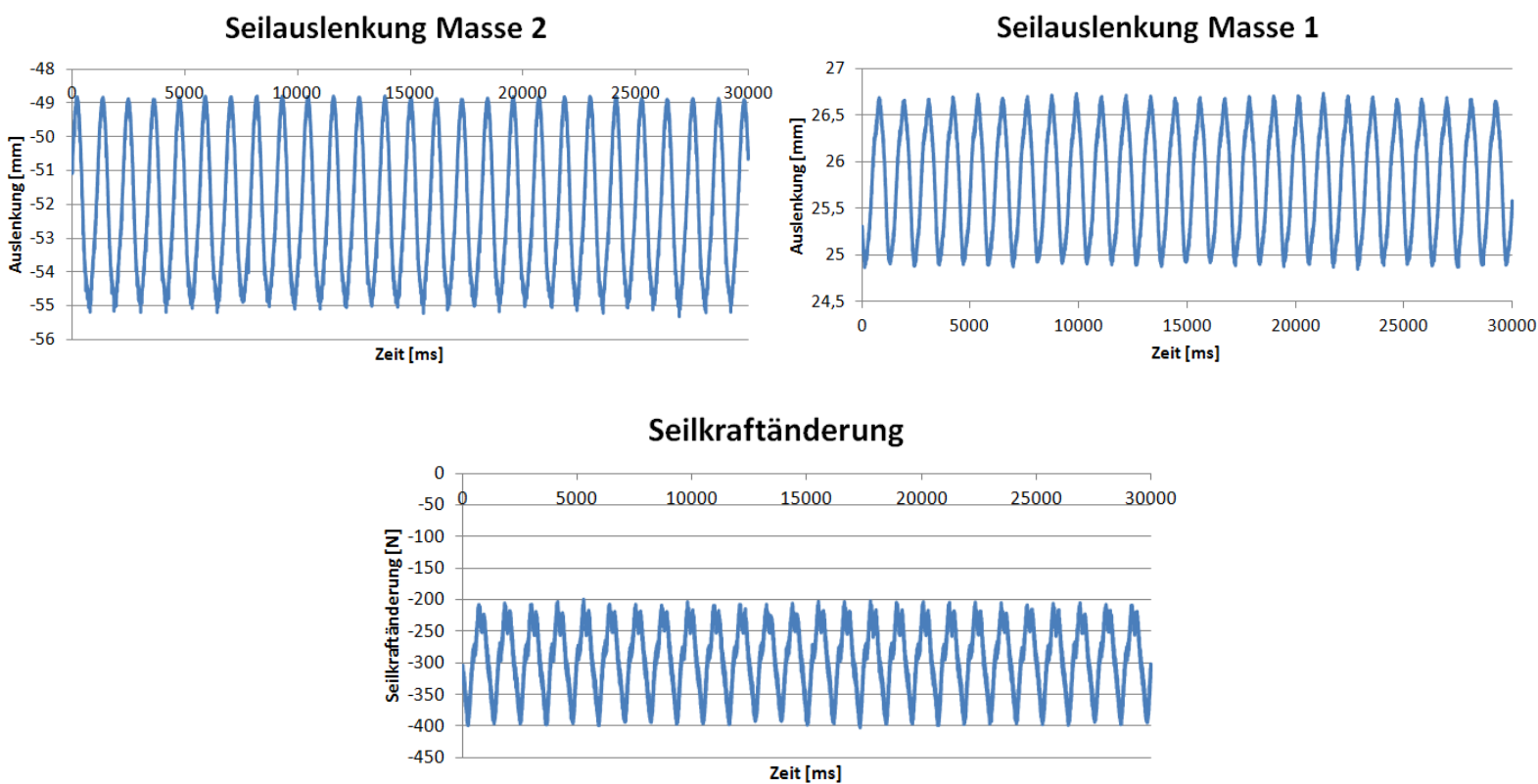


Abbildung 71: Messergebnisse der einzelnen Sensoren



### 8.3 Frequenzdiagramm

Um eine Frequenzanalyse bei diesem Prüfstand durchführen zu können, werden insgesamt 25 Messungen am realen System gemacht. Es werden die Seilauslenkungen der Masse 1 und der Masse 2, sowie die Kraft gemessen. Dabei werden die Amplituden der jeweiligen Sensoren bei den jeweiligen Frequenzen betrachtet. Diese Werte werden in einem separaten Diagramm eingetragen, dadurch ergibt sich das Frequenzdiagramm. Dies wird einmal am realen Prüfstand und einmal mit dem mathematischen Modell durchgeführt.

Das Ergebnis der Frequenzanalyse ist in Abbildung 72 ersichtlich.

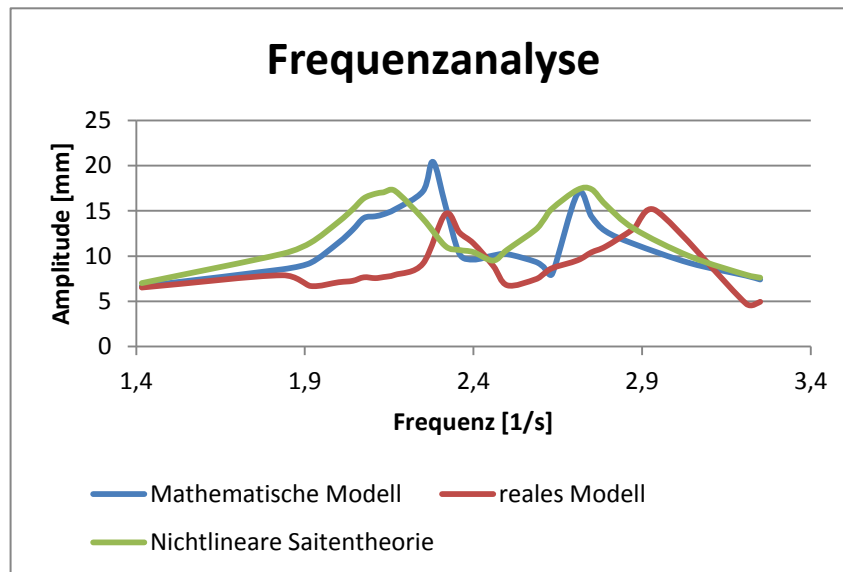


Abbildung 72: Frequenzdiagramm

In Abbildung 72 ist ersichtlich, dass neben dem Seilbahnprüfstand noch zwei Simulationen vorhanden sind. Einmal ist das mathematischen Modell nach der Saitentheorie (blau) simuliert worden und das andere Mal wurde ein Modell nach der Nichtlinearen Saitentheorie erarbeitet. Das Modell der Nichtlinearen Saitentheorie beinhaltet neben der Seilkraftänderung noch den Knickwinkel. Dieser ist umso flacher, je höher die Seilvorspannkraft ist, dadurch wird die Eigenfrequenz des Systems verschoben.

Es ist ersichtlich, dass die Erregerfrequenzen vom realen Modell zu mathematischer Simulation nicht exakt übereinstimmen. Dies ist auf die Dämpfung des realen Systems sowie der immer noch leichten vorhandenen Pendelbewegung der Massen zurückzuführen. Außerdem sind die Amplituden geringer, dies ist ebenfalls auf die Dämpfung und Pendelbewegung des Systems zurückzuführen. Die Erregerfrequenzen am realen System sind  $f_{e1}=2,3$  Hz und  $f_{e2}=2,9$  Hz. Das Ergebnis dieser Auswertung ergab eine Abweichung, dies ist auf die Reibung sowie die immer noch vorhandenen Pendelbewegungen der Massen zurückzuführen.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Das primäre Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Prüfstands zur Untersuchung von großen Seilauslenkungen. Die untersuchten Verhältnisse sollten am Prüfstand weit extremer sein als in der Realität. Die Untersuchungen sollten die Grenzen der Modellbildungen aufgrund der aus den großen Seilauslenkungen resultierenden Nichtlinearitäten deutlich machen. Der Prüfstand soll zusätzlich als Vorführprüfstand verwendet werden.

In einem ersten Schritt wurde ausgehend von der Aufgabenstellung die Anforderungsliste für den Prüfstand abgeleitet. Es wurden unterschiedliche Vorgaben an die geometrischen Anforderungen des Prüfstands gestellt, um die Möglichkeiten für mehrere Prüfstandgestaltungen zu schaffen und eine kostengünstige Konstruktion zu erhalten.

Aus der Anforderungsliste wurden die Funktionen, welche an den Prüfstand gestellt sind, abgeleitet und die Funktionsstruktur erstellt. Hierbei kann der Teststand in der Gesamtfunktion angeschrieben und anschließend in seine Teilfunktionen unterteilt werden. Die Unterpunkte der Teilfunktionen sind Seilmodell, Messtechnik und Antrieb die detaillierter analysiert wurden, um Lösungskonzepte zu generieren.

Durch die differenzierte Betrachtung der Teilfunktionen ergaben sich die dazugehörigen Wirkstrukturen bzw. Wirkprinzipien, d.h. für die jeweilige Funktion wurden mehrere Lösungen erarbeitet. Anschließend wurden die unterschiedlichen Lösungskonzepte im Morphologischer Kasten aufgelistet. Dies hat zur Folge, dass mehrere Konstruktionsvarianten entstanden sind. Bei der Kombination der Varianten musste auf die Realisierbarkeit sowie die "Verträglichkeit" zwischen den unterschiedlichen Varianten geachtet werden.

Nach dieser Analyse hat sich ergeben, dass ein rotierender Antrieb mit exzentrisch gelagerter Schwungscheibe, um die Auslenkungsamplituden zu erzeugen, die beste Variante ist.

Für die Auslegung des Prüfstands wurde ein Prüfstandmodell auf Basis der Wellengleichung erstellt. Aufgrund der im Modell auftretenden Nichtlinearitäten musste zur Lösung des Modells ein Näherungsverfahren verwendet werden. Als Näherungsverfahren kam das Galerkin-Verfahren zum Einsatz. Mit dem erstellten Simulationsprogramm wurden drei Varianten (leeres Seil, Seil mit Massen sowie das Seil mit Massen und Stütze) betrachtet, um das Schwingungsverhalten sowie den Seildurchhang zu analysieren.

Die Antriebsauslegung erfolgt im ersten Schritt in einer Vorauslegung, welche einen groben Überblick über die benötigte Leistung gibt. Anschließend wurde mit Hilfe eines Simulationsprogramms und auf der Grundlage der nichtlinearen Saitentheorie der Prüfstand berechnet. Der variable Eingabeparameter ist die Eigenfrequenz für Masse 1 sowie Masse 2. Daraus ergeben sich unterschiedliche Leistungen und Drehmomente.

Die Prüfstandabmessungen resultierten aus der Abhängigkeit des am Markt verfügbaren Antriebs und den Eigenfrequenzen des Gesamtsystems. Bei der Dimensionierung wurde darauf geachtet, die Anforderungen an einen Vorführprüfstand (kompakt und handlich) zu erfüllen.



Die Messtechnik, beziehungsweise das Monitoring des Prüfstands, umfasst einen Kraftsensor zur Messung der Seilkraftänderung während der Erregung sowie zwei optische Sensoren zur Aufzeichnung der Weg- und Frequenzänderung.

Die Sensoren werden mit Hilfe des Programms LabView initialisiert und ein eigens dafür erstelltes Programm dient dem Monitoring der Sensordaten.

Die ersten Messversuche haben gezeigt, dass die Massen am Seil eine zu große Pendelbewegung ausführen. Aus diesem Grund sind Optimierungsmaßnahmen getroffen worden, die die Pendelbewegungen minimierten. Anschließend sind mehrere Messungen mit unterschiedlichen Frequenzen simuliert worden, um die Resonanzfrequenzen des Systems zu bestimmen. Die Amplitude bei der jeweiligen Frequenz ist in einem Diagramm (Frequenzdiagramm) festgehalten und mit den theoretischen mathematischen Simulationen verglichen. Das Ergebnis dieser Auswertung ergab eine Abweichung, dies ist auf die Reibung sowie die immer noch vorhandenen Pendelbewegungen der Massen zurückzuführen.

Als Nachfolgeprojekt kann ein Regelkreis entwickelt werden, der die im Resonanzfall immer größer werdende Seilauslenkung selbstständig unterbindet, durch eventuelle Anpassung der Frequenz oder der Seilkraft. Außerdem kann die Befestigung der Gewichte optimiert werden, damit die Pendelbewegungen der sich aufschwingenden Massen reduziert wird. Des Weiteren kann die Form der Massen geändert werden, sowie die Befestigung. Diese kann ähnlich wie ein Pendel erfolgen, dadurch müssten auch die mathematischen Berechnungen erweitert werden. Außerdem kann eine Rollenbatterie anstatt einer Einzelrolle als Stütze verwendet werden.

## 10 Literaturverzeichnis

**BREMER, H\_a.:** Dynamik und Regelung mechanischer Systeme. Teubner, 1988

**BREMER, H\_b.:** Elastic Multibody Dynamics. Springer, 2008

**CANALE R.:** Schwingungen bei Seilbahnen (5.Teil). Internationale Seilbahn- Rundschau, 6/2010.

**CEN EN 12929-1:2004:** Sicherheitsanforderung für Seilbahnen für den Personenverkehr- Allgemeine Bestimmungen-Teil 1: Anforderung für alle Anlagen, 2004

**CZITARY E.** Seilschwebbahnen. Springer-Verlag, 1962.

**DIN 1311-1:2000:** Schwingungen und schwingfähige Systeme- Teil 1 Grundbegriffe, Einleitung. 2000

**DIN 1907-1 2005:** Sicherheitsanforderungen für Seilbahnen für den Personenverkehr- Begriffsbestimmungen. 2005

**DOPPELMAYR A.:** Denkanstöße zur Funktionserfüllung von Einseilumlaufbahnen. Dissertation TU Graz, 1997.

**Fast Fourier Transform o.J.:** FFT Online im Internet: [http://cdn.teledynelecroy.com/files/manuals/93xxc\\_appendix\\_c.pdf](http://cdn.teledynelecroy.com/files/manuals/93xxc_appendix_c.pdf) (Zugriff am 29.09.2016)

**Fatzer AG:** Drahtseiltechnik, Online im Internet: [http://www.fatzer.com/content/Portals/1/Fatzer/Dokumente/SBO%20deutsch\\_Drahtseiltechnik.pdf](http://www.fatzer.com/content/Portals/1/Fatzer/Dokumente/SBO%20deutsch_Drahtseiltechnik.pdf) (Zugriff am 20.07.2016)

**FEURSTEIN F.:** Instabilitätsuntersuchung am bewegten Seil. Masterarbeit JKU 2014

**GASCH, R. ; KNOTHE, K. ; LIEBICH, R.:** Strukturdynamik. 2. Auflage. Springer, 2012

**GEORGI, W; HOHL, P.:** Einführung in LabVIEW. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2015

**GROSS, D.; HAUGER, W.; WRIGGERS, P.:** Technische Mechanik 4: Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden. Springer-Verlag, 2011.

**HEUSER, H.:** Gewöhnliche Differentialgleichungen. 3. Auflage. Teubner, 1995

**HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GmbH:** Montageanleitung U9B A0137-7.0 en/de/fr. Online im Internet: <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/a0137.pdf> (Zugriff am 17.08.2016)

**JAMAL R. , HAGESTEDT A.:** LabVIEW, das Grundlagenbuch. 4 Auflage. Addison-Wesley 2004.

**KALKAN Y.:** Entwicklung und Inbetriebnahme eines Prüfstandes zur Messung von Seilbahnschwingungen. Diplomarbeit TU Wien, 2013.

**Kartnig G., Jakubek S., Kozek M., Lässer T., Hinteregger C., Sutter J.:** Das dynamische Verhalten von Seilbahnfahrzeugen in Wechselwirkung mit der Dynamik der Seile. Projektbeschreibung Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft, 2011

**Kopanakis G:** Schwingungen bei Seilbahnen- Grundsätzliches über Schwingungen und Wellen. Internationale Seilbahn-Rundschau, 2/2010

**Kozek M.:** Identifikation und Experimentelle Modellbildung. Vorlesungsskriptum TU Wien, 2012

**LERCH R.:** Elektrische Messtechnik. 6 Auflage. Springer 2007

**LÄSSER T.\_a.:** Analyse von Querschwingungen an Seilbahnfahrzeugen. Masterarbeit FH Vorarlberg, 2009.

**LÄSSER T.\_b:** Querpendeldämpfer und Seildynamik. Projektbeschreibung Querschwingungen, Doppelmayr, 2011.

**LÖHR M.O.:** Simulation der Stationseinfahrt kuppelbarer Einseilumlaufbahnen. Dissertation TU München, 2002

**MAGNUS, K. ; POPP, K. ; SEXTRO, W.:** Schwingungen. 8. Auflage. Vieweg-Teubner, 2008

**Mathe Online (2009):** Eigenwerte und Eigenvektoren von Matrizen. Online im Internet: <http://www.mathe-online.at/materialien/klaus.berger/files/Matrizen/eigenwerte.pdf> (Zugriff am 15.02.2018)

**MICRO-EPSILON (o.J.a):** "Optische Präzision Mikrometer" Online im Internet: <http://www.micro-epsilon.de/index.html> (Zugriff am 17.08.2016)

**MICRO-EPSILON (o.J.b):** "Optische Mikrometer" Online im Internet: <http://www.micro-epsilon.de/download/products/cat--optoCONTROL-ODC--de.pdf> (Zugriff 17.08.2016)

**MICRO-EPSILON (o.J.c):** "Seilzug-Sensor" Online im Internet: <http://www.micro-epsilon.de/download/products/cat--wireSENSOR--de.pdf> (Zugriff 17.08.2016)

**National Instrument (o.J.\_a):** NI cDAQ-9188 Ethernet-Chassis mit 8 Steckplätzen. Online im Internet: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/de/nid/208990> (Zugriff am 13.09.2016)

**National Instrument (o.J.\_b):** NI 9215 Analogeingangsmodule mit 4 Kanälen. Online im Internet: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/de/nid/208793> (Zugriff am 13.09.2016)

**National Instrument (o.J.\_c):** NI 9215 Analogeingangsmodule mit 4 Kanälen. Online im Internet: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/de/nid/208791> (Zugriff am 13.09.2016)

**National Instrument (2013\_d):** Operating Instructions and Specifications NI 9237. Online im Internet: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/de/nid/208791> (Zugriff am 13.09.2016)

**NELLES O.:** Zustandsraum und Digitale Regelung. University of Siegen. Online im Internet: <http://www.mb.uni-siegen.de/mrt/lehre/dr/skriptdr.pdf> (Zugriff am 02.08.16)

**PAHL, G., et al. Pahl/Beitz Konstruktionslehre:** Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. 7. Auflage. Springer-Verlag, 2007.

**PAPULA, L.:** Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 2. 11. Auflage. Vieweg, 2007

**PETERSEN, C.:** Dynamik der Baukonstruktionen. Springer-Verlag, 2010.

**Schröder D.:** Intelligente Verfahren- Identifikation und Regelung nichtlineare Systeme. Springer Verlag, 2010

**TSCHAIKNER, A.:** Entwicklung der Messtechnik für Dynamikuntersuchungen an Seilbahnen. Masterarbeit, TU-Wien, 2014

**TU WIEN 2014:** Schwingungen an Seilbahnen. Online im Internet: [https://www.tuwien.ac.at/aktuelles/news\\_detail/article/8981/](https://www.tuwien.ac.at/aktuelles/news_detail/article/8981/) (Zugriff am 20.07.2017)

**Uni Hannover (o.J):** Eigenwerte und Eigenvektoren. Online im Internet: [http://www2.iazd.uni-hannover.de/~erne/Mathematik1/dateien/maple/MB\\_5\\_1.pdf](http://www2.iazd.uni-hannover.de/~erne/Mathematik1/dateien/maple/MB_5_1.pdf) (Zugriff am 15.02.2018)

**WAUER, J.:** Kontinuumsschwingungen. Vieweg-Teubner, 2008

**ZIEGLER, F.:** Mechanics of Solids and Fluids. 2. Auflage. Springer-Verlag, 1998

# 11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Iterationsprozess bei der Modellbildung.....	2
Abbildung 2: Iterative Struktur der Identifikation, Modellierung und Validierung.....	4
Abbildung 3: Struktur einer Identifikation .....	4
Abbildung 4: Links: Zweiseilschwebbahn im Pendelbetrieb/ Rechts: Einseilschwebbahn im Umlaufbetrieb.....	6
Abbildung 5: Definition Seilfeld .....	7
Abbildung 6: Aufbau Stahldrahtseil.....	8
Abbildung 7: Eingang und Ausgangsvariablen .....	15
Abbildung 8: Hauptstruktur .....	16
Abbildung 9: Funktionsstruktur Seilmodell.....	17
Abbildung 10: Funktionsstruktur Antriebs und Messtechnik.....	17
Abbildung 11: Aufbau Wirkstruktur .....	18
Abbildung 12: Konzeptskizze Seilbahn-Prüfstand.....	22
Abbildung 13: Auslenkung einer Saite .....	23
Abbildung 14: Kräfte am Seilelement.....	24
Abbildung 15: Saite mit festen Rändern .....	26
Abbildung 16: Eigenfunktion der eingespannten Saite.....	27
Abbildung 17: Durchhang leeres Seil.....	28
Abbildung 18: Seildurchhang leeres Seil .....	32
Abbildung 19: Schwingungsverhalten leeres Seil .....	32
Abbildung 20: Seil mit Massen .....	33
Abbildung 21: Seildurchhang Seil mit Massen.....	34
Abbildung 22: Schwingungsverhalten Seil mit Massen.....	34
Abbildung 23: Seil mit Massen und Stütze.....	35
Abbildung 24: Kopplung von Seil und Rolle .....	35
Abbildung 25: Seildurchhang Seil mit Massen und Stützen .....	37
Abbildung 26: Schwingungsverhalten Seil mit Massen und Stützen .....	37
Abbildung 27: Seilkraftänderung.....	38
Abbildung 28: Seilauslenkung von Masse 1 .....	41
Abbildung 29: Seilauslenkung von Masse 2 .....	41
Abbildung 30: Seillängenänderung durch die Auslenkung .....	43
Abbildung 31: Erregerschwingung.....	44
Abbildung 32: Geschwindigkeit der Erregung .....	44
Abbildung 33: Antriebsleistung bei Eigenfrequenz von Masse 1 .....	46
Abbildung 34: Antriebsleistung bei Eigenfrequenz von Masse 2.....	46
Abbildung 35: Prüfstand Gesamt.....	48
Abbildung 36: Seilführung .....	49
Abbildung 37: Verbindungsbolzen .....	49
Abbildung 38: Seilrolle.....	49
Abbildung 39: Seilabspannung .....	50
Abbildung 40: Seilabspannung UT    Abbildung 41: Verbindungsbolzen Seilabspannung....	50
Abbildung 42: Motormontage.....	51

---

Abbildung 43: Motorplatte.....	52
Abbildung 44: Schwungscheibe.....	52
Abbildung 45: Lagergehäuse.....	53
Abbildung 46: Steckschraube      Abbildung 47: Seilrolle .....	53
Abbildung 48: Gewichtsmontage .....	53
Abbildung 49: Messprinzip von optischen Sensoren.....	54
Abbildung 50: optoCONTROL 1202 .....	55
Abbildung 51: optoCONTROL 2500 .....	56
Abbildung 52: Kraftsensor U9B 5kN .....	57
Abbildung 53: Seilzugsensor .....	57
Abbildung 54: Ethernet Chassis NI cDAQ 9188.....	58
Abbildung 55: Analogeingangsmodul NI 9215 .....	59
Abbildung 56: Brückenmodul NI 9237 .....	59
Abbildung 57: Ethernet Chassis Anschlussplan.....	60
Abbildung 58: Measurement & Automation Explorer .....	61
Abbildung 59: Blockdiagramm für den Prüfstand .....	62
Abbildung 60: Sensoren einlesen .....	63
Abbildung 61: Spannungen umwandeln .....	64
Abbildung 62: Frequenz messen .....	64
Abbildung 63: Frequenz messen, FFT und graphische Ausgabe.....	65
Abbildung 64: Daten speichern.....	66
Abbildung 65: Registerkarte Setup .....	67
Abbildung 66: Registerkarte Graph.....	67
Abbildung 67: Registerkarte FFT .....	68
Abbildung 68: Aufbau Prüfstand .....	69
Abbildung 69: Optimierte Gewichtsbefestigung .....	70
Abbildung 70: Optimierter Prüfstand.....	70
Abbildung 71: Messerergebnisse der einzelnen Sensoren .....	71
Abbildung 72: Frequenzdiagramm.....	72

## 12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungsliste Prüfstand.....	12
Tabelle 2: Antriebskonzepte .....	20
Tabelle 3: Variante Exzenter .....	21
Tabelle 4: Schwingungsgleichung des bewegten Seils.....	30
Tabelle 5: Schwingungsgleichung .....	36
Tabelle 6: Pinbelegung von Analogeingangsmodul NI 9215.....	60
Tabelle 7: Pinbelegung von Brückenmodul NI 9237 .....	61