Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

Doppelmayr

Diplomarbeit

Entwicklung der Messtechnik für Dynamikuntersuchungen an Seilbahnen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg KARTNIG

Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik
Forschungsbereich Konstruktionslehre und Fördertechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Arnold Tschaikner
0825585 (066482)
Wuhrmeisterstraße 13a
6850 Dornbrin

Wien, am 26. Mai 2014

Arnold Tschaikner

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, am 26. Mai 2014

Arnold Tschaikner

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Kartnig für die angenehme Betreuung dieser interessanten Thematik.

Ein großes Dankeschön gebührt Herrn Thomas Lässer MSc, der mich auf jede erdenkliche Weise unterstützte, mich in die interessante Welt des Seilbahnbaus einführte und ohne dessen Hilfe und Bemühungen diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre. Danken möchte ich außerdem dem Unternehmen Doppelmayr Seilbahnen GmbH und seinen Mitarbeitern für ihre Unterstützung und die gute Zusammenarbeit.

Ferner gilt ein besonderer Dank meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Theresia und Manfred, die mir mein Studium ermöglicht haben und immer hinter mir gestanden sind.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meiner lieben Freundin Evelyn, die mich immer wieder ermutigte, mir emotionalen Rückhalt gab und mich wie – in allen anderen Bereichen des Lebens – tatkräftig unterstützte.

Abschließend danke ich meinen Freunden, die wesentlich zu meinen schönen Studienjahren in Wien beigetragen haben.

Abstract

Development of Measurement Technology for Dynamic Studies of Cablecars

Ropeways are frequently used in mountainous territory, regions with summer and winter resorts, where roads are relatively difficult to build and use. In recent times more and more are integrated into urban public transport systems, due to their economic and ecological characteristics, their little require of infrastructure and the suitable crossing of natural obstacles such as rivers or scaling hills.

The market requires a high level of operational reliability and safety from the ropeway engineering. Hence every manufacturers aim is the improvement of the safety standards of their products in order to achieve the performance requirements from their customers. Modern high-powered ropeways underlie among other things, an increase in operating speed and rope gauge. Therefore a gain in stability is mandatory. Considered from the perspective of stability, the oscillations of the gondolas on an operating ropeway is of particular concern for ropeway manufacturers and responsible authorities as well as for ropeway operators.

This diploma thesis can be regarded as a part of the current research project Das dynamische Verhalten von Seilbahnfahrzeugen in Wechselwirkung mit der Dynamik der Seile, which is related to the matter of oscillations in ropeways. Therefore simulations were developed on the base of mathematical models in order to gain a better understanding of the movement behaviour of ropeways. Of particular concern is the reduction of troublesome gondola vibrations and oscillations to counteract the impairing of safety and comfort. In order to increase stability of the gondola, the simulations serve as a basis for proper damping systems, which will be developed and tested in respect of their real impact.

Some of the parameters for the mathematical model are unknown or of uncertain values, therefore experiments have to be carried out with the goal of verifying, refuting, or estimating the parameters. This procedure plays a critical role in accurately describing system behavior through the simulations. The concept development, planning and implementation of the required test rigs with the proper measurement technology for the experiments will be conducted in this diploma thesis. In order to ensure the precise characterisation of the system consisting of rope and gondolas in the simulation, this thesis will provide results in form of measurement data to enable the parameter estimation.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
- 1.1 Projektbeschreibung . . . 2
  - 1.1.1 Arbeitsphasen . . . 5
- 1.2 Vorgehensweise/Zielsetzung . . . 6
- 1.3 Aufbau der Arbeit . . . 7

2 Grundlagen **10**
- 2.1 Unterscheidungskriterien von Seilbahnen . . . 10
- 2.2 Stahldrahtseile . . . 11
- 2.3 Fahrbetriebsmittel . . . 13
- 2.4 Schwingungen an Seilbahnen . . . 14
- 2.5 Identifikation . . . 15

3 Mathematische Beschreibungen des Seils **18**
- 3.1 Seilstatik . . . 18
  - 3.1.1 Seilkurve (Kettenlinie) . . . 18
  - 3.1.2 Seilnäherung durch Parabel . . . 21
- 3.2 Seildynamik . . . 26
  - 3.2.1 Wellengleichung . . . 26
  - 3.2.2 Wellengleichung mit Biegesteifigkeit und Dämpfung . . . 35
  - 3.2.3 Wellengleichung für Torsionsschwingungen . . . 39

4 Mathematische Beschreibungen der Fahrbetriebsmittel **42**
- 4.1 Bestimmung der Lage eines Fahrbetriebsmittels . . . 42
- 4.2 Schwingverhalten eines Fahrbetriebsmittels . . . 45
- 4.3 Wechselwirkung eines Fahrbetriebsmittels mit dem Seil . . . 49
- 4.4 Massenträgheitsmoment . . . 50

5 Prüfstand P1 **52**
- 5.1 Prüfstandskonzept . . . 52
  - 5.1.1 Anforderungsliste . . . 53
  - 5.1.2 Untersuchungen des Forschungsprojekts . . . 54
  - 5.1.3 Vorversuche an der TU Wien . . . 55
- 5.2 Prüfstandsausführung . . . 57
  - 5.2.1 Erregervorrichtung . . . 59
- 5.3 Messsensorik . . . 62
  - 5.3.1 Optische Sensoren . . . 62
  - 5.3.2 Kraftaufnehmer . . . 65
  - 5.3.3 Impedanzmesskopf . . . 67

5.3.4 NI Data Acquisition . . . 69
5.4 Schwingerregung . . . 75
5.4.1 Schwingerreger . . . 76
5.4.2 Verstärker . . . 78
5.4.3 Vibration Controller . . . 79
5.4.4 Erregerprogramm Vibration Control . . . 80
5.5 Messaufzeichnung in LabVIEW . . . 84
5.5.1 Messprogramm . . . 84
5.6 Messungen am Prüfstand P1 . . . 88
5.6.1 Statische Messung des Seildurchhangs . . . 89
5.6.2 Hysteresemessung am Seil . . . 90
5.6.3 Wellenausbreitungsmessung nach Freigabe einer Anfangsauslenkung . . . 91
5.6.4 Wellenausbreitungsmessung nach Impulserregung . . . 94
5.6.5 Wellenausbreitungsmessung nach Shakererregung . . . 96

6 Prüfstand P2 97
6.1 Prüfstandskonzept . . . 97
6.1.1 Anforderungsliste . . . 98
6.1.2 Untersuchungen des Forschungsprojekts . . . 99
6.1.3 Vorversuche an der TU Wien . . . 100
6.2 Prüfstandsausführung . . . 100
6.2.1 Abspannvorrichtung . . . 102
6.2.2 Fahrbetriebsmittel . . . 104
6.3 Messsensorik . . . 106
6.3.1 Inklinometer . . . 106
6.3.2 Seilzugsensor . . . 108
6.3.3 NI Data Acquisition . . . 109
6.4 Schwingerregung . . . 111
6.4.1 Linearmotoreinheit . . . 111
6.4.2 Steuerungssoftware IndraWorks . . . 113
6.5 Messaufzeichnung in LabVIEW . . . 116
6.6 Messungen am Prüfstand P2 . . . 121
6.6.1 Statische Messung des Seildurchhangs . . . 121
6.6.2 Schwingverhalten der Fahrbetriebsmittel im Seilfeld . . . 122

7 Prüfstand für Fahrbetriebsmitteluntersuchungen 132
7.1 Prüfstandskonzept . . . 132
7.1.1 Anforderungsliste . . . 133
7.2 Prüfstandsausführung . . . 134

7.3 Messsensorik 135
7.3.1 Inklinometer 135
7.3.2 Kranwaage 135
7.4 Messaufzeichnung in LabVIEW 136
7.5 Messungen am Prüfstand für Fahrbetriebsmitteluntersuchungen . . 137
7.5.1 Periodendauermessung der Fahrbetriebsmittel 137
7.5.2 Schwerpunktsmessung der Fahrbetriebsmittel 141

8 Zusammenfassung und Ausblick **142**

Anhang **153**

1 Einleitung

Seilbahnen werden oft in gebirgigen Regionen eingesetzt, um die Erschließung von Erholungs- und Skigebieten, entlegenen oder nur schwer erreichbaren Ausflugszielen für den Personen- oder Gütertransport zu ermöglichen. Auch der urbane Einsatz von Seilschwebebahnen gewinnt zusehends an Bedeutung. Durch die steigende Zahl der in Großstädten lebenden Menschen, stoßen die bestehenden Infrastrukturen zunehmend an ihre Kapazitätsgrenzen. Aufgrund der leichten Überwindung von Hindernissen, die einfache Kombination mit und Integration in andere Verkehrsmittel sowie die relativ geringe technische Infrastruktur wird die Seilschwebebahn in Städten zu einer nicht zu unterschätzenden Form des Personentransports.

Effizienz, Leistungsstärke, Verfügbarkeit und vor allem Sicherheit und Komfort sind die wichtigsten Anforderungen an jede Seilbahn. Diese werden nicht nur von den Fahrgästen, sondern auch von den jeweiligen Betreibern und den zuständigen Ministerien und Ämter verlangt. Um den hohen und stets steigenden Ansprüchen gerecht zu werden, liegt die permanente Suche nach Verbesserungsmöglichkeiten im Interesse aller Seilbahnhersteller. Das Untersuchen, Verstehen und Erforschen des Betriebsverhaltens unter diversen Natureinflüssen ist grundlegend, um dem Wunsch nach höheren Fahrgeschwindigkeiten, gesteigertem Komfort und höherer Sicherheit oder größeren Seilfeldlängen gerecht zu werden.

Das Forschungsprojekt Das dynamische Verhalten von Seilbahnfahrzeugen in Wechselwirkung mit der Dynamik der Seile zielt darauf ab, Konzepte und Methoden zur Optimierung des Schwingungsverhaltens von Seilbahnanlagen zu schaffen (siehe Kapitel 1.1). Durch Modelle von Seilen mit gekoppelten Fahrzeugen soll ein tieferes Verständnis für die auftretenden Schwingungsprobleme erlangt werden. Die Simulationsmodelle werden auf theoretischem Weg im Rahmen dieses Forschungsprojekts erstellt und bilden die grundlegende Struktur des gewünschten Systems als mathematisches Modell ab. Da manche Materialkonstanten, Prozessabläufe oder Systemeigenschaften nicht genau bekannt sind und nicht auf Arbeiten oder Voruntersuchungen zu diesem Thema zurückgegriffen werden kann, treten bei der Bestimmung einiger Parameter große Unsicherheiten auf. Als Beispiel unbekannter Parameter sind in diesem Zusammenhang die Biege- und Torsionssteifigkeit oder die Dämpfung im Seil zu erwähnen.

Die notwendige Ergänzung zur theoretischen Modellbildung (siehe Kapitel 3 und 4) durch Berechnungen bietet die experimentelle Modellbildung (siehe Kapitel 2.5) durch Messungen am realen System und die darauffolgende Identifikation. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden für die experimentelle Modellbildung Prüfstände gebaut, um die theoretischen Modelle validieren und die unbekannten

oder unsicheren Parameter ermitteln zu können. Diese sollen je nach Aufbau das tatsächliche Verhalten des Seils mit und ohne angehängte Fahrzeuge widerspiegeln. Nach der sachgerechten Messung von Eingangs- und Ausgangsgrößen dieser Prüfstandsübertragungssysteme können die gesuchten Parameter bestimmt werden. Diese Diplomarbeit kann als Teil dieser experimentellen Modellbildung gesehen werden. Sie beschäftigt sich in der ersten Phase mit der *Entwicklung* und dem *Aufbau der Prüfstände mit angemessener Erregung und Messtechnik*. Der zweite Abschnitt behandelt die *Durchführung der Messungen*, die als Grundlage für die Validierung der theoretischen Modelle und der Bestimmung der Parameter dient.

1.1 Projektbeschreibung

Bei Seilbahnfahrzeugen können aufgrund ihrer Aerodynamik und spezieller Witterungsverhältnisse Erregerkräfte entstehen, welche Schwingungen der Fahrbetriebsmittel quer zur Bahnrichtung verursachen. Die Stärke der Schwingungen ergibt sich vor allem aus der Kraft der Anregung und dem dynamischen Verhalten der Fahrzeuge in Wechselwirkung mit dem Seil. Die kritischen Windrichtungen für die Entstehung dieser Phänomene beim Stillstand von Bahnen ist stets die Anströmrichtung in Bahnachse auf das Fahrzeug von hinten. Die dabei auftretenden Windgeschwindigkeiten sind sehr gering (Messungen ergaben Geschwindigkeiten unter $5\,m/s$). Für den Betreiber entstehen unerwünschte Stillstandszeiten, wenn durch die Schwingung der kritische Auslenkwinkel der Fahrzeuge zum Passieren der Stützbauwerke überschritten wird. Wird die Bahn im schwingenden Zustand wieder in Betrieb genommen, kommt es durch die Strömungsänderung wieder zum Abklingen der Schwingungen [vgl. Lässer, 2011, S. 4.]

Das von der Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft unterstützte Forschungsprojekt Das dynamische Verhalten von Seilbahnfahrzeugen in Wechselwirkung mit der Dynamik der Seile [Kartnig et al., 2011], durchgeführt vom Unternehmen Doppelmayr Seilbahnen GmbH (Beschreibung der Doppelmayr/Garaventa Gruppe im Anhang) zusammen mit der Technischen Universität Wien, befasst sich, wie sich aus dem Titel erkennen lässt, mit der Beschreibung des dynamischen Verhaltens von Tragseilen mit gekoppelten Fahrzeugen (siehe Abbildung 1.1).

Im Folgenden wird die Vorgehensweise bei diesem Projekt nochmals genauer vorgestellt.

Auf Basis von grundlegenden Verfahren zur theoretischen Modellbildung der Seildynamik werden *Simulationsmodelle* entwickelt, welche das Verständnis für die in natura auftretenden Schwingungsprobleme vertiefen sollen. Es gibt zahlreiche Untersuchungen zum Thema Seildynamik. Die Wechselwirkungen zwischen einem

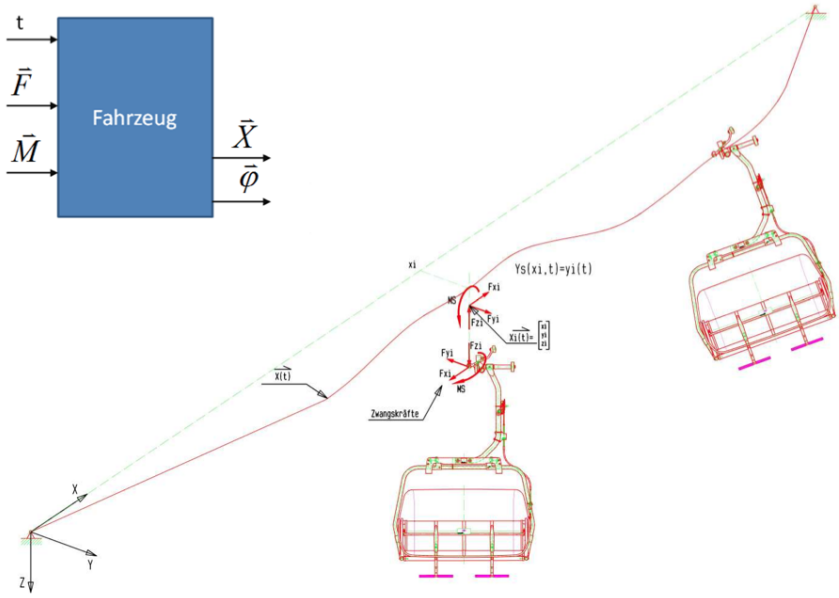


Abbildung 1.1: Zwangsbedingungen für Fahrzeuge am Seil

Seil und den daran befestigten Fahrzeugen – insbesondere unter Einfluss von Windkräften – wurde aber bislang nicht genauer untersucht.

Wichtig für den Abgleich der theoretischen Modelle mit der Realität ist der empirische Teil dieses Forschungsprojekts. Im dessen Rahmen wurden *Prüfstände* gebaut. Diese experimentelle Modellbildung ermöglichte neben der Identifikation (siehe Kapitel 2.5) die Ermittlung der notwendigen Seilparameter für die Simulation sowie die Validierung der Annahmen, um eine möglichst exakte Abbildung der Wirklichkeit zu gewährleisten.

Mit den aus Versuchen optimierten Modellen sollten in der Folge die endgültigen Simulationen erstellt werden, welche die Wechselwirkung zwischen Seil und Fahrzeug beschreiben. Dadurch wurde die Grundlage für die Thematik "neue Optimierungsansätze zur aktiven oder passiven Reduktion von Schwingungen – *Entwicklung von Tilgersystemen* von Seilbahnanlagen" geschaffen, die als letzte Phase des Projektes angesehen werden kann.

Die zu erwartenden Ergebnisse dieses Forschungsprojektes sind [Kartnig et al., 2011, S. 6]:

- transversales Seilmodell ohne Biegesteifigkeit (Saite)

- transversales Seilmodell mit Biegesteifigkeit (reales Seil)
- Torsionsmodell des Seiles
- Simulationsmodell des Fahrzeuges
- Mehrkörpersimulation (Zwangsbedingung zwischen Fahrzeug und Seil bzw. Konzept zur effizienten Kosimulation von Seil mit daran befestigten Fahrzeugen)
- Fahrzeugmodelle mit integrierten Dämpfungssystemen
- mathematische Beschreibung des Seiles unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit, resultierend aus der Reibung im Drahtverbund des Seiles mit Anbindungsmöglichkeit von Fahrzeugen

Dieses Forschungsprojekt umfasst folgendes wirtschaftliches Verwertungspotenzial [vgl. Kartnig et al., 2011, S. 23ff.]:

- Für die Projektierung neuer Seilbahnkonzepte besteht die Notwendigkeit, das genaue Betriebsverhalten und die daraus resultierenden Kräfte und Belastungen auf die einzelnen Komponenten einer Seilbahn genau zu kennen. Aufgrund dieser Belastungen können die Betriebssicherheit, der Passagierkomfort und auch der Anlagenverschleiß und die daraus resultierenden Lifecycle Costs bereits in der Projektierungsphase genauer kalkuliert werden. Das Forschungsprojekt soll die Grundlagen dafür schaffen, Seilbahnen für neue Einsatzbereiche künftig effizienter und kostengünstiger zu entwickeln und zu optimieren sowie bereits in der Verkaufs- und Projektierungsphase von Seilbahnkonzepten mithilfe von Simulationswerkzeugen Aussagen über das dynamische Verhalten der Bahn treffen zu können.
- Bei akuten Schwingungsproblemen bestehender Anlagen soll man Lösungen anbieten können, um die Kundenzufriedenheit zu erhöhen.
- Geplant ist, die aus diesem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse auf neue Produkte anzuwenden. Sie könnten zum Beispiel beim Einsatz von Kurvenfahrten einen entscheidenden Vorteil bieten. Kommt es zukünftig vermehrt zum Bau urbaner Seilbahnsysteme, wird es unumgänglich sein, aus Platzgründen Kurven zu projektieren. Die erarbeiteten Ergebnisse dieses Projekts sind bei solchen Entwicklungen verwertbar. Die Doppelmayr Gruppe entwickelt auch Produkte für neue Anwendungen, wie zum Beispiel Vergnügungsbahnen, Transportsysteme usw., bei deren Einsatz Seiltechnologie Verwendung findet. Alle angeführten Bereiche weisen Probleme in Bezug auf die Dynamik der Seile in Wechselwirkung mit angehängten Lasten auf.

1.1.1 Arbeitsphasen

Die Ziele dieses Forschungsprojektes erforderte eine Gliederung in drei Bereiche (siehe Abbildung A.1 - Projektplan). Jeder Projektabschnitt beginnt mit der mathematischen Formulierung eines Modells. Diese theoretischen Untersuchungen bilden anschließend die Grundlage für die Entwicklung eines Prüfstandes zur Validierung der Simulationsmodelle (Realitätsabgleich) [vgl. Kartnig et al., 2011, S. 10ff.]. Bei unbefriedigenden Ergebnissen, muss die theoretische Modellbildung überarbeitet werden und der Iterationsprozess muss neu vorgenommen werden (siehe Abbildung 1.2). Den Inhalt dieser Diplomarbeit bilden nur die ersten zwei Arbeitspakete AP1 und AP2.

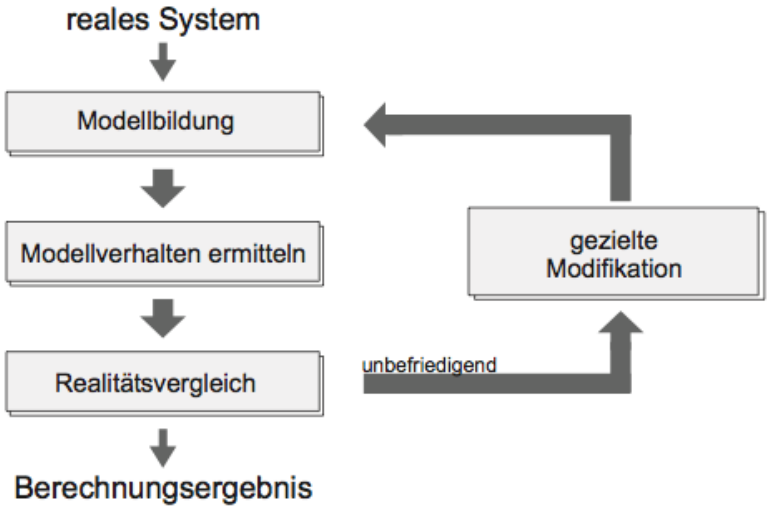


Abbildung 1.2: Iterationsprozess bei der Modellerstellung [Löhr, 2002, S. 23]

Arbeitspaket AP1 - *Mathematische Beschreibung des Seiles*

In diesem Projektabschnitt wird der Einfluss der Biegesteifigkeit auf das dynamische Verhalten des Seils untersucht. Ausgehend von der Seilausführung und der daraus resultierenden Reibungsverhältnisse, ergeben sich seilspannungsabhängige Biegesteifigkeiten. Diese Biegesteifigkeiten verursachen Dispersionserscheinungen, welche das dynamische Verhalten der Fahrzeuge beeinflussen. Im Zuge dieses Forschungsprojektes soll untersucht werden, ab welchen Seildurchmessern und Seilspannungen die Biegesteifigkeit in den Seilen nicht mehr vernachlässigt werden darf. Es soll ein Vergleich eines idealisierten Seiles ohne Biegesteifigkeit mit einem realen Seil mit Biegesteifigkeit aufgestellt werden.

Um die verschiedenen Seilmodelle validieren zu können, muss eine Versuchsanordnung entwickelt und gebaut werden. Im Kapitel 5.1 wird auf den in dieser Phase zu konzipierenden *Prüfstand P1* eingegangen.

Arbeitspaket AP2 - *Fahrzeugmodell und Kopplungsmodell*

Dieses Arbeitspaket behandelt die Wechselwirkung von Seil- und Fahrzeugdynamik. Es werden die im ersten Abschnitt AP1 untersuchten und spezifizierten Seilmodelle mit den als starre Einzelmassen modellierten Fahrzeugen durch Zwangsbedingungen gekoppelt. Mit dem Verfahren der Übertragungsmatrizen werden die Eigenfrequenzen und Eigenformen der gemischten Systeme, bestehend aus kontinuierlichen Seilmodellen und Fahrzeugeinzelmassen, berechnet. Die Freiheitsgrade der Fahrzeuge beschränken sich dabei auf die transversale Bewegung in vertikaler und horizontaler Richtung sowie auf die Verdrehung um die Seilachse (siehe Abbildung 1.1).

Um die Simulationsergebnisse mit der Realität vergleichen zu können und um die gewünschten Parameter zu ermitteln, wird in diesem Abschnitt der *Prüfstand P2* entwickelt, der im Kapitel 6.1 genauer beschrieben ist. Zur vollständigen physikalischen Beschreibung eines Fahrbetriebsmittels ist außerdem noch ein *Prüfstand für Fahrbetriebsmitteluntersuchungen* vonnöten, durch welchen primär das Massenträgheitsmoment eines Fahrzeuges bestimmbar ist.

Arbeitspaket AP3 - *Ergänzung der Fahrzeugmodelle durch Dämpfungssysteme*

In dieser Projektphase werden die Fahrzeuge durch passive und aktive Systeme ergänzt, um eine Verbesserung des Schwingverhaltens zu erzielen. Man erweitert dabei das Simulationsmodell des Fahrzeuges durch die Tilgermechanik. Der Versuchsaufbau wird aus dem Arbeitspaket AP2 übernommen und die Fahrzeuge werden, je nach Tilgersystem (Zusatzmassensteuerung, Doppelpendel mit Lagermomentregelung oder Schwingungsdämpfung durch gyroskopische Effekte) präpariert. Man erfasst die Bewegungen der Fahrzeuge messtechnisch und vergleicht sie mit der Simulation, um die gewünschten Ergebnisse zur Verbesserung des Schwingungsverhalten zu erkennen.

1.2 Vorgehensweise/Zielsetzung

Ausgehend von der modellhaften Vorstellung und Beschreibung der physikalischen Realität des Seils und der Fahrbetriebsmittel, werden die zur Identifikation bzw. Parameterbestimmung benötigten Prüfstandskonzepte erarbeitet. Neben der Frage

nach der konstruktiven Ausführung der Prüfstande besteht die Schwierigkeit festzustellen, inwiefern das System mit den geeigneten Testsignalen angeregt wird und wie die sachgerechte Messung der benötigten Ein- und Ausgangssignale durchzuführen ist. Hilfestellung bieten dabei sind neben den Anforderungen, Wünschen und Berechnungen aus dem Forschungsprojekt [Kartnig et al., 2011] auch vorangegangene Bachelor- und Diplomarbeiten zu diesem Thema.

Die *Vorgehensweise* dieser Arbeit:

1. Mathematische Beschreibungen des Seils und der Fahrbetriebsmittel

   Zielsetzung: Mathematische Beschreibungen sollen neben den Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt als Grundlage der Prüfstandskonzepte dienen. Das Systemverhalten an den Prüfständen und somit die benötigten Erreger- und Messeinheiten sollen damit im Voraus abgeschätzt werden. Daraus resultierten neben dem erforderlichen räumlichen Bedarf durch die zu erwartenden Auslenkungen und die dazu benötigte Erregung auch die Belastungen an den Prüfständen.

2. Prüfstandskonzepte und deren konstruktive Ausführung

   Zielsetzung: Die an der Technischen Universität Wien vorab entwickelten Prüfständskonzepte sollen weiterentwickelt und an die Erfordernisse der Unternehmen Doppelmayr Seilbahnen GmbH und Fatzer AG angepasst werden.

3. Schwingerregung, Messsensorik und Messaufzeichnung

   Zielsetzung: Die geeignete Schwingerregung und Messsensorik mit einer triggerbaren Messaufzeichnung an den einzelnen Prüfständen sollen realisiert und getestet werden, um die Grundlage für eine reibungslose Identifikation und Validierung zu garantieren.

4. Messungen an den Prüfständen und Messdatenaufbereitung

   Zielsetzung: Die Vorbereitung, Planung und Durchführung der einzelnen Messungen an den Prüfständen sowie deren Aufbereitung für die Weiterverwendung.

1.3 Aufbau der Arbeit

Das *Kapitel 1* führt an die Thematik heran. Nach einer allgemeinen Einführung wird das gegenwärtig laufende Forschungsprojekt [Kartnig et al., 2011] beschrieben und der Stellenwert der vorliegenden Diplomarbeit darin veranschaulicht.

Kapitel 2 beschäftigt sich mit einigen Grundlagen des Seilbahnbaus, um einen

groben Überblick über die Fachbegriffe dieser Disziplin zu bieten. Nach einer allgemeinen Übersicht über die Unterscheidungskriterien von Seilbahnen wird auf einige grundlegende Elemente dieser Verkehrsmittel wie Stahldrahtseile oder Fahrbetriebsmittel eingegangen. Anschließend folgt ein kleiner Ausblick auf die Thematik der Identifikation und Modellbildung, da die Prüfstandsmodelle anhand dieser Technik mit der Realität abgeglichen werden.

Die darauf folgenden *Kapitel 3* und *4* widmen sich der mathematischen Beschreibung des Seils und der Fahrbetriebsmittel.

Kapitel 5 bis *7* decken jeweils einen Prüfstand ab; *Kapitel 5* widmet sich dem Prüfstand P1, *Kapitel 6* dem Prüfstand P2 und *Kapitel 7* dem Prüfstand für Fahrbetriebsmitteluntersuchungen.

Grundlage für das erste Unterkapitel über die jeweiligen Prüfstände – die Prüfstandskonzepte – bilden die Ergebnisse des Forschungsprojekts, die Erkenntnisse aus *Kapitel 3* und *4* und weitere Voruntersuchungen dieser zu Materie. An erster Stelle wird auf die im Forschungsprojekt vorgeschlagenen und zwingenden Beschaffenheiten der einzelnen Prüfstände anhand einer Anforderungsliste eingegangen. Darauf folgt eine überblicksmäßige Vorstellung der Voruntersuchungen an Prüfständen der TU Wien sowie eine Diskussion ihrer Konzeptideen.

Die endgültige Ausführung der Prüfstände, der Schwingerregung, der Messsensorik und der Messaufzeichnung werden in den nächsten Unterkapiteln über die jeweiligen Prüfstände verdeutlicht. Die Beschreibungen der einzelnen Mess- und Schwingkomponenten sowie deren Software und Messprogramme zur Handhabung erfolgen in diesem Abschnitt.

Inhalt der letzten Unterkapitel der jeweiligen Prüfstände sind Messungen mit den jeweiligen Versuchsanordnungen, -abläufen und den Ergebnissen. Abschließend erfolgt eine erste Gegenüberstellung mit den errechneten Werten aus den mathematischen Untersuchungen in Kapitel 3 und 4.

Die grundlegende Vorgehensweise dieser Arbeit veranschaulicht die Abbildung 1.3.

Abbildung 1.3: Vorgehensweise

2 Grundlagen

Unter dem Begriff "Seilbahn" versteht man ein Verkehrsmittel für den Personen- oder Gütertransport in Fahrbetriebsmitteln, wobei diese durch Seile bewegt werden und ohne eine feste Führung von einem oder mehreren Seilen getragen werden [vgl. DIN EN 1907-1:2005].

2.1 Unterscheidungskriterien von Seilbahnen

Seilbahnen können nach folgenden Kriterien klassifiziert werden [vgl. CEN EN 12929-1:2004]:

1. Art des Tragmittels
   a) Schwebeseilbahn: Das Laufwerk oder Gehänge der Fahrzeuge wird auf einem oder mehreren zwischen frei stehenden Stützen gespannten Seil geführt und gezogen (siehe Abbildung 2.1).
   b) Standseilbahn: Das Laufwerk der Fahrzeuge (Wagen) wird auf Schienen geführt und von einem oder mehreren Seilen gezogen.
2. Betriebsart
   a) Pendelbetrieb: Das bewegende Seil kehrt seine Bewegungsrichtung nach jedem Fahrtspiel um; die Fahrzeuge oder Gruppen von Fahrzeugen pendeln zwischen den Stationen (siehe Abbildung 2.1 links).
   b) Umlaufbetrieb: Das bewegende Seil läuft immer in derselben Bewegungsrichtung; die Fahrzeuge verkehren in gleich bleibender Richtung (siehe Abbildung 2.1 rechts).
3. Art der Verbindung zwischen Fahrzeug und Seil
   a) Kuppelbare Seilbahn: Die Fahrzeuge werden in den Stationen vom Zug- oder Förderseil getrennt.
   b) Festgeklemmte Seilbahn: Die Verbindung zwischen den Fahrzeugen und dem Zug- oder Förderseil ist fest.
4. Anzahl der Seile mit unterschiedlichen Funktionen (Förderseil, Tragseil, Zugseil, usw.) (siehe Abbildung 2.1)
5. Art der Fahrzeuge (Wagen, Kabine, Sessel, Schleppbügel usw.)

Beim Prüfstand P2 können an einem stationären Seilfeld einer Einseilumlaufbahn Untersuchungen durchgeführt werden. Dadurch wird einem Ziel dieser Arbeit, die messtechnischen Erfassung der Wechselwirkungen zwischen Seil und Fahrbetriebsmittel in einem Seilfeld (siehe Abbildung 2.2) zu erforschen, Rechnung getragen.

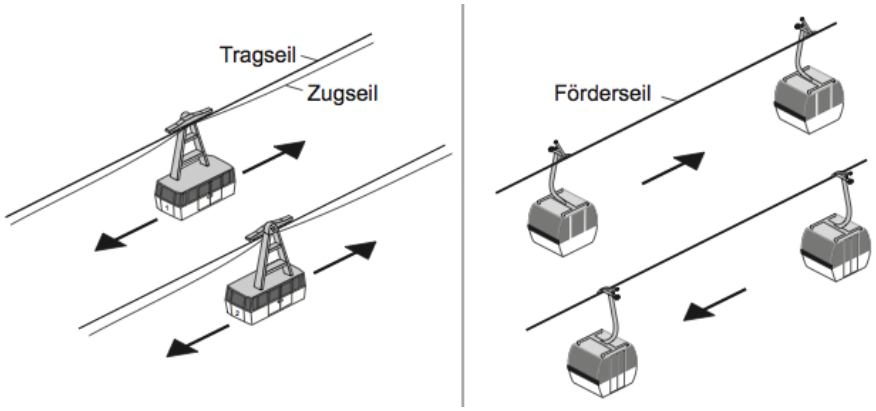


Abbildung 2.1: Zweiseilschwebebahn im Pendelbetrieb; Einseilschwebebahn im Umlaufbetrieb

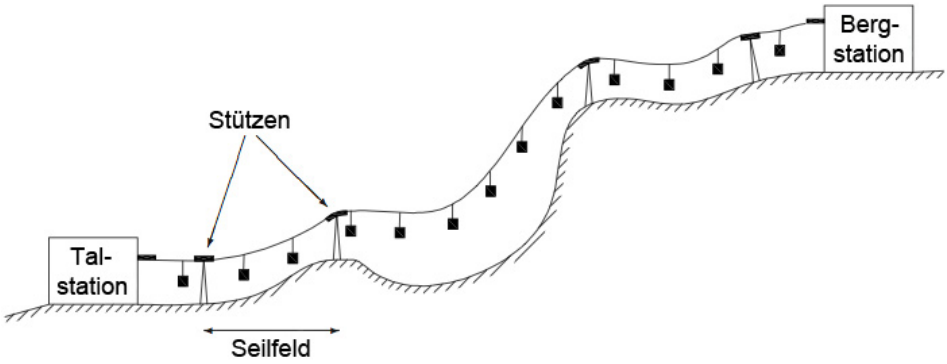


Abbildung 2.2: Beispiel für ein Seilfeld – Seilabschnitt zwischen zwei Seilunterstützungen

2.2 Stahldrahtseile

Das Drahtseil ist eines der wichtigsten Bauteile der Seilbahn. Es verbindet die Stationen einer Schwebeseilbahn und übernimmt sowohl das Tragen als auch das Bewegen der Fahrzeuge. Verschiedene Seilbahnsysteme und Einsatzziele in aller Welt fordern unterschiedliche Drahtseile, die den hohen Anforderungen und Beanspruchungen (Zug, Biegung, Torsion, Pressung, Verschleiß, Korrosion, thermische Beanspruchungen usw.) gerecht werden müssen.

Die große Bedeutung, die dem Seil zukommt, zeigt sich beim Prüfstand P1, der eigens zur Erfassung des dynamischen Verhaltens von Seilen konzipiert wurde.

Für die Herstellung der Litzenseile wird als Erstes eine Einlage aus Kunststofffaserfäden angefertigt. Dann folgt das Verseilen der einzelnen Drähte zu Litzen.

Der letzte Arbeitsgang besteht im Schlagen der Litzen zum Seil [vgl. Fatzer AG, Drahtseiltechnik, S. 3.10ff].

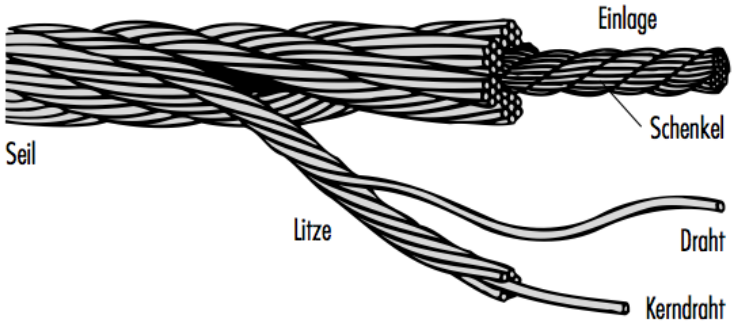


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung eines Litzenseiles

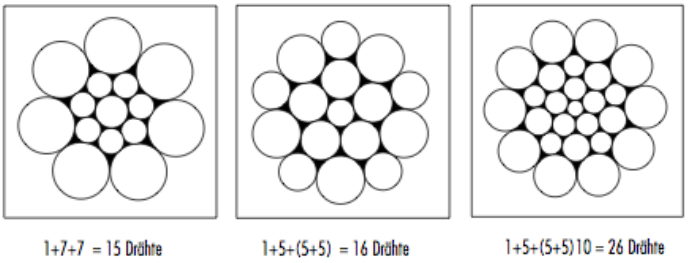
Für die Prüfstände P1 und P2 kommt ein gleichgeschlagenes 6x36 Warrington Seal Zug- und Förderseil (siehe Abbildung 2.4) mit einem Durchmesser von $d = 45\,mm$ zum Einsatz [vgl. Fatzer AG, Seiltabellen 2013].

Abbildung 2.4: 6x36 Warrington Seal Zug- und Förderseil

Der Begriff "Gleichschlagen" bedeutet, dass die Schlagrichtung der Drähte in den Litzen gleich der Schlagrichtung der Litzen im Seil ist.

Auskunft über den Aufbau des Seiles gibt die Bezeichnung 6x36 – es besteht aus 6 Litzen mit je 36 Drähten.

Warrington Seal Seile sind eine Kombination aus der Seal- und Warringtonmachart (siehe Abbildung 2.5 (c)) . Bei Ersterer ist die Anzahl der Drähte in jeder Lage gleich. Deshalb muss der Drahtdurchmesser von Lage zu Lage grösser gewählt werden (siehe Abbildung 2.5 (a)). Bei der Warringtonmachart weisen die Drähte der ersten Lage die gleichen Durchmesser auf. In den Rillen der ersten Lage befinden sich die Drähte der zweiten Lage. Die Leerräume dieser Lage werden dann mit Drähten kleineren Durchmessers gefüllt (siehe Abbildung 2.5 (b)). Bei der Kombination der Macharten wird um eine warringtonähnliche Konstruktion eine Drahtlage nach dem Seale-Prinzip gewickelt [vgl. Fatzer AG, Drahtseiltechnik, S. 3.04ff].



(a) Seal (b) Warrington (c) Warrington Seal

Abbildung 2.5: Seilmacharten

2.3 Fahrbetriebsmittel

Zwischen den Begriffen "Fahrzeug" und "Fahrbetriebsmittel" kann insofern unterscheiden werden, als das Fahrzeug im Gegensatz zum Fahrbetriebsmittel durch eigene Antriebsenergie bewegt wird (z. B. Auto, Eisenbahn). Da der gängige Ausdruck "Fahrzeug" bei der europaweiten Harmonisierung der Seilbahnnormen auch im Sinn von "Fahrbetriebsmittel" verwendet wurde, sind diese Begriffe in dieser Arbeit gleich verwendet.

Fahrzeuge bestehen grundsätzlich aus (siehe Abbildung 2.6) [Doppelmayr, 1997]:

1. Seilklemme
2. Gehänge mit Gehängekopf zur Aufnahme der Klemme
3. Fahrgastteil

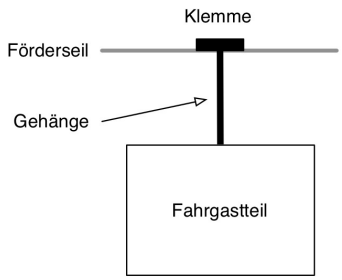


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung eines Fahrzeugs

Für die Fahrzeuge des Prüfstands P2 wurde der Fahrgastteil durch Zusatzmassen ersetzt (siehe Abbildung 2.7). Um anregen zu können, ist beim Erregerfahrzeug die Möglichkeit vorhanden, die Zusatzmassen zu verfahren. In Kapitel 6.2.2 folgt die ausführliche Beschreibung.

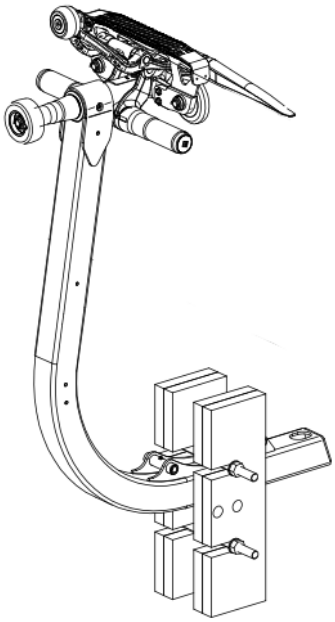


Abbildung 2.7: Fahrzeug des Prüfstands P2

2.4 Schwingungen an Seilbahnen

Eine Schwingung ist eine zeitliche Änderung einer Zustandsgröße. Im Allgemeinen nimmt diese Größe abwechselnd zu oder ab. Bei mechanischen Schwingungen sind diese Zustandsgrößen z. B. der Weg, die Geschwindigkeit oder der Drehwinkel eines Systems [vgl. DIN 1311-1:2000].

Seile und Kabinen der Seilbahnen sind ein äußerst kompliziertes schwingfähiges System, bestehend aus verschiedensten elastischen Gliedern und Massen. Tritt – einmalig oder kontinuierlich – eine Krafteinwirkung bzw. -änderung (Störung) auf, wird das System aus seinem Gleichgewicht gebracht und anschließend durch eine rücktreibende Kraft wieder in Richtung des Ausgangszustands gezwungen (Entstehung einer Schwingung). Während eines Schwingprozesses wandelt sich kontinuierlich kinetische in potenzielle Energie und umgekehrt um.

Ursachen dieser Störungen sind [Canale, ISR 6/2010, S. 24]:

1. eine plötzliche Änderung der Seilspannkraft (Beschleunigung oder Verzögerung, Änderung der Zugwirkung des Fahrzeuges bei der Stützenüberfahrt),
2. eine Änderung der vertikalen Last in einem Seilfeld,
3. eine Änderung der Lastverteilung auf der Strecke und
4. eine Einwirkung von außen (z. B. Winderregung).

Ein schwingfähiges System, welches durch eine einmalige Störung in Schwingung versetzt und frei gelassen wird, führt eine freie Schwingung aus. Da es aber ständig Energie an die Umgebung abgibt und real kein konservatives System vorliegt, wird es nach einer gewissen Zeit bzw. Anzahl von Schwingzyklen zum Stillstand kommen. Die Frequenz eines derart frei schwingenden Systems hängt von der Masse und der Steifigkeit des Systems ab. Diese Frequenz ist für das jeweilige System bezeichnend und bleibt konstant. Sie wird als Eigenfrequenz des Systems bezeichnet [vgl. Kopanakis, ISR 2/2010, S. 32ff]. Entspricht die Erregerfrequenz der Eigenfrequenz (Resonanzfall), bewirkt das ein Aufschwingen.

Abbildung 2.8: Schwingungen an einem 8er-Sessel

2.5 Identifikation

Wie im Kapitel 1 bereits erwähnt, müssen die entwickelten Modelle der Seile, Fahrzeuge und deren Kombination mit dem in der Praxis auftretenden Verhalten hinreichend übereinstimmen. Dies gelingt durch den iterativen Ablauf der Identifikation (siehe Abbildung 2.10).

Die Verfahren zur Identifikation linearer dynamischer Systeme können in parametrische und nichtparametrische Ansätze unterteilt werden. Die vorliegenden theoretischen Untersuchungen dieser Arbeit und die Ergebnisse des Forschungsprojekts [Kartnig et al., 2011] deuten auf lineare parametrische Modelle mit verteilten Parametern hin, da die Systeme meist mit linearen partiellen Differentialgleichungen beschrieben werden können.

Ausgehend von einer modellhaften Vorstellung der physikalischen Realität (theoretische Modellbildung) erfolgt die Identifikation. Ziel einer Identifikation ist es,

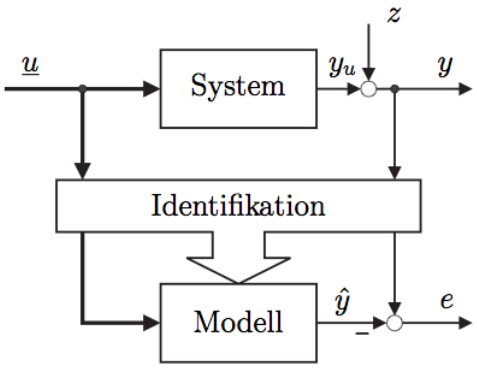


Abbildung 2.9: Prinzipielle Struktur einer Identifikation [Schröder, 2010, S. 219]

mithilfe gemessener Ein- und Ausgangssignale des Prozesses ein Modell zu bestimmen, welches das statische und dynamische Verhalten des Prozesses möglichst gut nachbildet. Dabei wird angenommen, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Eingangssignalen u, der Anregung des Prozesses und dem Ausgangssignal y_u existiert. Aufgrund der Tatsache, dass auf jeden Prozess Störungen – wie z. B. Messrauschen – einwirken, kann nur das gestörte Ausgangssignal y zur Identifikation genutzt werden, welches als Überlagerung des ungestörten Prozessausgangs y_u mit einem Störsignal z angesehen werden kann [Schröder, 2010, S. 218ff]. Ziel der Identifikation ist es die Differenz e der Ausgangssignale des Systems y und des Modells $\hat{y}$ bei gleichen Eingangssignalen u minimal werden zu lassen. Die grundsätzliche Struktur der Identifikation ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

Die Identifikation, Modellbildung und Validierung setzt sich nach durchgeführter Vereinfachung, aus drei grundlegenden Schritten zusammen (siehe Abbildung 2.10):

1. Strukturauswahl bzw. Strukturbestimmung
   Diese theoretische Modellbildung wird im Forschungsprojekt [Kartnig et al., 2011] und auch in dieser Arbeit (siehe Kapitel 3 und 4) abgehandelt. Dabei wird ein mathematisches Modell mit freien Parametern erstellt.

2. Parameterschätzung
   Für diese Aufgabe werden Prüfstände benötigt (experimentelle Modellbildung), welche mit geeigneten Testsignalen (Sprung, Impuls, Weißes Rauschen o. a.) angeregt werden. Dieselben Signale werden dann dem mathematischen Modell mit freien Parametern aus der theoretischen Modellbildung zugeführt. Die Differenz e von gemessenen und simulierten Daten wird berechnet (siehe Abbildung 2.9) und mit entsprechenden Kriterien bewertet.

3. Validierung
   In diesem Punkt geht es um die Fragen, ob die Realität hinreichend genau

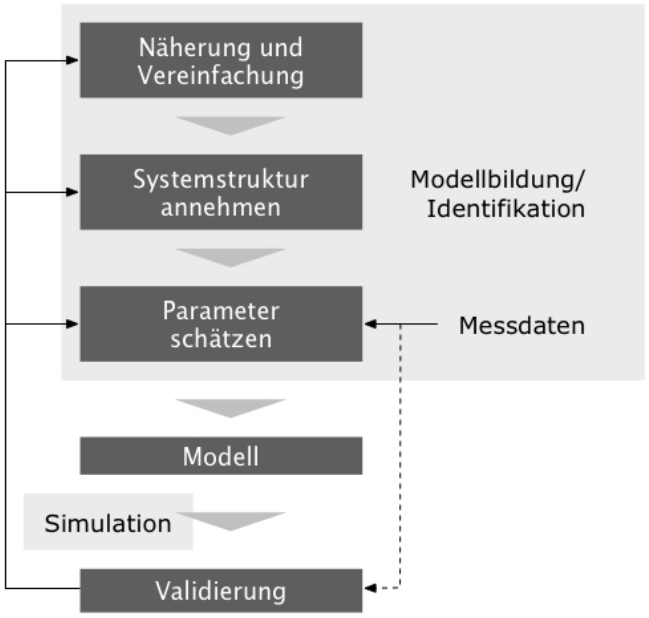


Abbildung 2.10: Iterativer Ablauf der Identifikation, Modellierung und Validierung [Kozek, 2012, S. 15]

abgebildet wird, ohne dabei zu umfangreich zu sein. Als wichtigste Eigenschaften eines Modells, die im Sinne der Validierung zu überprüfen sind, gelten [Kozek, 2012, S. 14]:

- die Reproduzierbarkeit: Kann das Modell das Verhalten des realen Systems zufriedenstellend wiedergeben?
- die Prädiktion: Kann das Modell das Verhalten des realen Systems genügend genau vorhersagen?
- die innere Struktur: Stellt das Modell das innere Zusammenwirken des realen Systems eindeutig dar?

Zur Identifikation der Parameter, sollten die Messdaten in einen großen Trainingsteil und in einen kleinen Validierungsteil getrennt werden, um eine korrekte Überprüfung der Modellgüte zu gewährleisten. Der Grund dafür ist, dass der Prädiktionsfehler für Trainingsdaten kontinuierlich mit der Modellordnung abnimmt, während der Prädiktionsfehler für die Validierungsdaten bei der korrekten Modellordnung (oder sehr nahe bei dieser) ein Minimum aufweist [vgl. Kozek, 2012, S. 88].

Die Durchführung der Parameterschätzung in der Identifikation, die endgültige Modellbildung und deren Validierung wird im Forschungsprojekt [Kartnig et al., 2011] durchgeführt.

3 Mathematische Beschreibungen des Seils

3.1 Seilstatik

3.1.1 Seilkurve (Kettenlinie)

Die Berechnung der Statik stützt sich auf die Annahmen, dass die Seile weder Querkraft noch Biegemomente übertragen können, also biegeschlaff sind. Weiters wird vorausgesetzt, dass die von der Zugkraft hervorgerufenen Verformungen sehr klein sind und dadurch vernachlässigt werden können. Die Seile werden dehnstarr behandelt. Überwiegt die äußere Belastung deutlich gegenüber dem Eigengewicht des Seils, kann das Eigengewicht vernachlässigt werden. In diesem Fall nähert sich die Form des Seils bei Einzelkraftbelastung F einer Geraden an (siehe Abbildung 3.1). Die nachfolgenden Überlegungen erfolgen in Anlehnung an das Buch Technische Mechanik [Dankert and Dankert, 2006, S. 143ff].

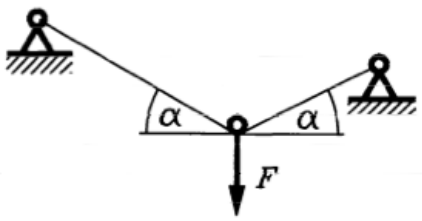


Abbildung 3.1: Statik unter Vernachlässigung des Seileigengewichts

Die beiden Seilkräfte F_s ergeben sich aus der Formel

$$F_s = \frac{F}{2 \cdot \sin \alpha}. \tag{3.1}$$

Bei Seilbahnen ist das Eigengewicht des Seils gegenüber der äußeren Belastung nicht zu vernachlässigen. Aufgrund der Biegeschlaffheit des Seils stellt sich eine Seilkurve (Kettenlinie) ein (siehe Abbildung 3.2 links).

Gleichgewichtsbedingungen am Seilelement (siehe Abbildung 3.2 rechts):

$$\sum F_x = 0: \quad -F_{SH} + F_{SH} + dF_{SH} = 0 \quad \rightarrow \quad F_{SH} = konst. \tag{3.2}$$

$$\sum F_y = 0: \quad -F_{SV} + F_{SV} + dF_{SV} - q \cdot ds = 0 \quad \rightarrow \quad dF_{SV} = q \cdot ds. \tag{3.3}$$

Die horizontale Seilkraft F_{SH} ist bei einem nur durch das Eigengewicht belasteten Seil immer konstant.

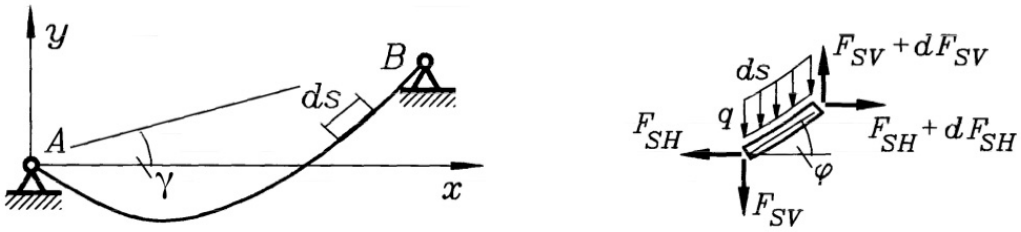


Abbildung 3.2: An zwei Punkten aufgehängtes Seil unter Eigengewichtbelastung; Kräftegleichgewicht an einem Seilelement

Aus der Geometrie folgt

$$F_{SV} = F_{SH} \cdot \tan\varphi \tag{3.4}$$

und

$$\tan\varphi = \frac{dy}{dx} = y'. \tag{3.5}$$

Einsetzen von (3.5) in (3.4), Bildung der ersten Ableitung nach dem Ort und Einsetzen von (3.3) gibt

$$\frac{q \cdot ds}{dx} = F_{SH} \cdot \frac{d^2y}{dx^2}. \tag{3.6}$$

Weiters ergibt sich aus der Geometrie

$$ds = \frac{dx}{\cos\varphi} = dx \cdot \sqrt{1 + \tan^2\varphi} = dx \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}. \tag{3.7}$$

Durch Einsetzen von (3.7) in (3.6) folgt eine nichtlineare Differentialgleichung zweiter Ordnung

$$\frac{q}{\cos\varphi} = F_{SH} \cdot \frac{d^2y}{dx^2}, \tag{3.8}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{q}{F_{SH}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}. \tag{3.9}$$

Zur Lösung der Differentialgleichung (3.9) wird mit $y' = u$, $y'' = u'$ substituiert, und durch Trennung der Variablen folgt

$$\frac{q}{F_{SH}} dx = \frac{du}{\sqrt{1+u^2}}. \tag{3.10}$$

Nach der Integration und dem zweiten Integrieren nach der Rücksubstitution ergibt sich die Lösung zu

$$y(x) = \frac{F_{SH}}{q} \cdot \cosh\left(\frac{q}{F_{SH}}x + C_1\right) + C_2. \tag{3.11}$$

Die zwei unbekannten Integrationskonstanten C_1 und C_2 werden durch die Randbedingungen des zu untersuchenden Systems bestimmt.

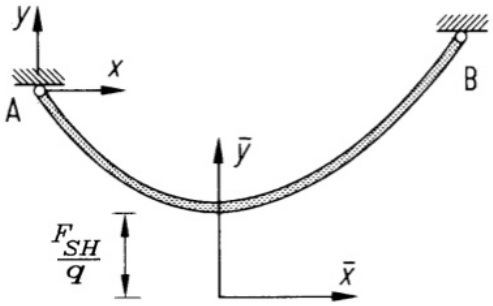


Abbildung 3.3: Koordinatenverschiebung zur Konstanteneliminierung

Wenn ein neues Koordinatensystem eingeführt wird, das mit der $\overline{y}$-Achse durch die tiefste Stelle des Seils geht und mit der $\overline{x}$-Achse den Abstand F_{SH}/q besitzt (siehe Abbildung 3.3), verschwinden beide Integrationskonstanten, und es folgt die Lösung für die allgemeine Kettenlinie (Randbedingungen $\overline{y}(0) = F_{SH}/q$, $\overline{y}'(0) = 0$) [vgl. Gross et al., 2009, S. 169f]

$$\overline{y}(\overline{x}) = \frac{F_{SH}}{q} \cdot \cosh\left(\frac{q}{F_{SH}}\overline{x}\right). \tag{3.12}$$

Es folgen die beidseitig eingerückten und kursiv geschriebenen Absätze der in den Kapiteln 3 und 4 ausgeführten Berechnungen, angepasst an die Gegebenheiten eines im Zuge dieser Arbeit aufgebauten Prüfstands (siehe Kapitel 5.1, 6.1 und 7). Diese theoretischen Untersuchungen werden anschließend in den Kapiteln 5.6, 6.6 und 7.5 mit den Messungen verglichen.

Prüfstand P1 hat eine Länge von $L = 120\,m$, eine Vorspannkraft von $F_{SH} = 320000\,N$ und ein Seil mit der längenbezogenen Masse von $q = 7.4\,kg/m$.

Die Randbedingungen des für den Prüfstand P1 ergeben sich zu $y(0) = 0$, $y(L) = 0$ (siehe Abbildung 3.4). Eingesetzt in (3.11) lässt sich die Seilkurve berechnen (siehe Abbildung 3.5).

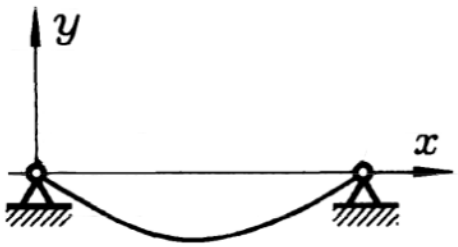


Abbildung 3.4: Schematische Skizze des Prüfstands P1

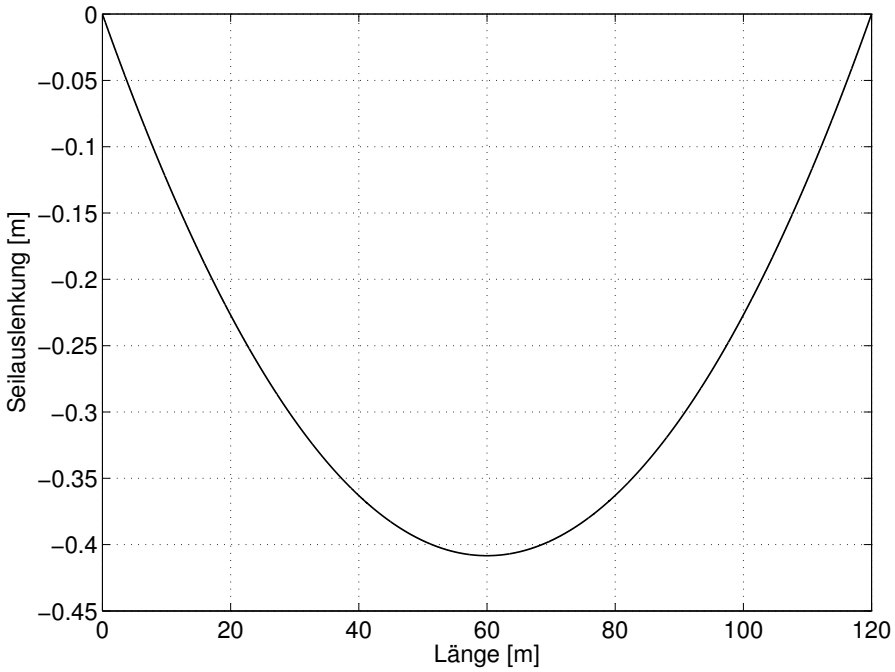


Abbildung 3.5: Seildurchhang Prüfstand P1

3.1.2 Seilnäherung durch Parabel

Für einen flachen Durchhang des Seils, also für schwach gekrümmte Seilkurven und straff gespannte Seile, kann die Kettenlinie mithilfe einer Parabel angenähert werden. Dadurch ändert sich der Tangentenwinkel φ der Seilkurve nur wenig. In der Differentialgleichung (3.8) wird daraufhin der Term $q/\cos\varphi$ für ein bestimmtes Seilfeld als konstant betrachtet. Mit γ als Sehnenneigunswinkel (siehe Abbildung 3.2 links) darf

$$\frac{q}{\cos\varphi} \approx \frac{q}{\cos\gamma} = q' \tag{3.13}$$

geschrieben werden, was einer gleichmäßigen Verteilung des Eigengewichtes über das Seilfeld entspricht [vgl. Czitary, 1962, S. 37f].

In dieser Arbeit wird die Parabel durch eine Tayloreihe des Kosinus Hyperbolicus (3.14) entwickelt. Die ersten beiden Terme beschreiben eine Parabel und können als Approximation der Cosh-Funktion verwendet werden. Dieser Vorgang führt zum gleichen Ergebnis wie die Lösung der Differentialgleichung (3.8) mit eingesetztem q' aus (3.13).

$$\cosh(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n}}{(2n)!} \cdot x^n = 1 + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + ... \tag{3.14}$$

Eingesetzt in die Seilkurve (3.11) ergibt

$$y(x) = \frac{F_{SH}}{q} \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{q}{F_{SH}} \cdot x + C_1\right)^2\right] + C_2 \tag{3.15}$$

mit der ersten Ableitung nach dem Ort

$$\frac{dy}{dx} = \frac{q}{F_{SH}} \cdot x + C_1. \tag{3.16}$$

Zur Vereinfachung von (3.15) wird $C_2 = C_2^* - F_{SH}/q$ gewählt, somit fällt die Konstante F_{SH}/q weg, es ergibt sich

$$y(x) = \frac{F_{SH}}{2 \cdot q} \cdot \left(\frac{q}{F_{SH}} \cdot x + C_1\right)^2 + C_2^*. \tag{3.17}$$

Die Berechnung eines Seilfeldes mit einer Anzahl von n Fahrzeugen benötigt n Kräftegleichgewichtgleichungen, für jede Krafteinleitungsstelle eine. Die vertikale Seilkomponente ist dabei Horizontalzug, multipliziert mit dem Anstieg der Seilkurve (3.19). Die Krafteinleitung der Fahrzeuge erfolgt nur in vertikaler Richtung. Ein Gleichgewicht der angreifenden Kraft mit der Seilkraft ist nur möglich, wenn die Seillinie an dieser Stelle einen Knick hat. Deswegen muss ein Seilfeld in $i = n + 1$ Abschnitte aufgeteilt werden (siehe Abbildung 3.6). Die Geometriegleichungen (3.18) betrachten den Höhenunterschied, der zwischen zwei benachbarten Fahrzeugen überwindet wird. In jedem Abschnitt gilt die allgemeine Form der Seillinie [vgl. Dankert and Dankert, 2006, S. 148]. Für $i = 0...n$ gilt

$$\begin{aligned} y_{i+1} - y_i = {} & \frac{F_{SH}}{2 \cdot q} \cdot \left(\frac{q}{F_{SH}} \cdot x_{i+1} + C_{1i+1}\right)^2 + C_{2i+1}^* \\ & - \left(\frac{F_{SH}}{2 \cdot q} \cdot \left(\frac{q}{F_{SH}} \cdot x_i + C_{1i+1}\right)^2 + C_{2i+1}^*\right), \end{aligned} \tag{3.18}$$

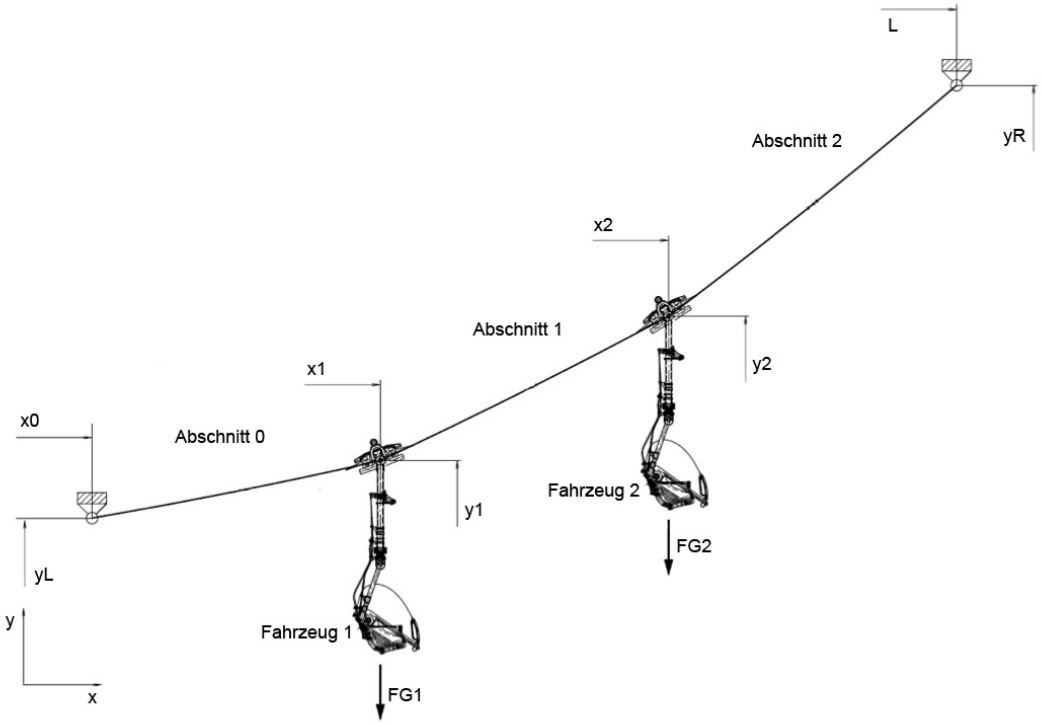


Abbildung 3.6: Seilfeld mit zwei Fahrzeugen [vgl. Lässer, 2009, S. 29].

$$F_{Gi} = F_{SH} \cdot \frac{dy_{i+1}(x_i)}{dx} - F_{SH} \cdot \frac{dy_i(x_i)}{dx}. \tag{3.19}$$

Aus (3.18) ergibt sich die Formel (3.20), und aus (3.19) folgt mit (3.16) die Gleichung (3.21).

$$y_i - y_{i+1} + C_{1i+1} \cdot (x_{i+1} - x_i) = \frac{q}{2 \cdot F_{SH}} \cdot \left({x_i}^2 - {x_{i+1}}^2\right) \tag{3.20}$$

$$F_{SH} \cdot C_{1i+1} - F_{SH} \cdot C_{1i} = F_{Gi} \tag{3.21}$$

Prüfstand P2 hat eine Länge von $L = 39{,}4\,m$, eine Vorspannkraft von $F_{SH} = 148000\,N$ und ist ausgestattet mit einem Seil mit der längenbezogenen Masse von $q = 7.4\,kg/m$. Die Einspannstellen sind auf einer Höhe von $y_L = y_R = 3.8\,m$, und es werden drei Fahrbetriebsmittel an das Seil geklemmt (siehe Tabelle 1).

Fahrzeug n	Abstand zur linken Abspannung x_n	Gewichtskraft F_{Gn}
1	$9{,}9\,m$	$4532\,N$
2	$20{,}6\,m$	$3865\,N$
3	$30\,m$	$4532\,N$

Tabelle 1: Fahrzeuge am Prüfstand P2

Für die Berechnung der Integrationskonstanten ergibt das Gleichungssystem (3.22).

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & x_1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & (x_2 - x_1) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & (x_3 - x_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & (L - x_3) \\ 0 & 0 & 0 & -F_{SH} & F_{SH} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -F_{SH} & F_{SH} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -F_{SH} & F_{SH} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{q}{2 \cdot F_{SH}} \cdot {x_1}^2 - y_L \\ \frac{q}{2 \cdot F_{SH}} \cdot ({x_1}^2 - {x_2}^2) \\ \frac{q}{2 \cdot F_{SH}} \cdot ({x_2}^2 - {x_3}^2) \\ \frac{q}{2 \cdot F_{SH}} \cdot ({x_3}^2 - L^2) + y_R \\ F_{G1} \\ F_{G2} \\ F_{G3} \end{pmatrix} \tag{3.22}$$

Die Position des Seils bei den Fahrzeugen (siehe Tabelle 2) und die Integrationskonstanten ergeben sich durch das Invertieren der ersten Matrix aus (3.22) und deren Linksmultiplikation mit der Gleichung.

Fahrzeug n	Position y_n	Durchhang des Seils
1	$3{,}3\,m$	$0{,}5\,m$
2	$3{,}15\,m$	$0{,}65\,m$
3	$3{,}31\,m$	$0{,}49\,m$

Tabelle 2: Fahrzeugpositionen am Prüfstand P2

Der Verlauf des Seils (siehe Abbildung 3.7) wird durch die Formel (3.20) mit den aus (3.22) gewonnenen Integrationskonstanten für jedes Seilfeld i berechnet. Die Positionen der Fahrzeuge sind durch Quadrate symbolisiert.

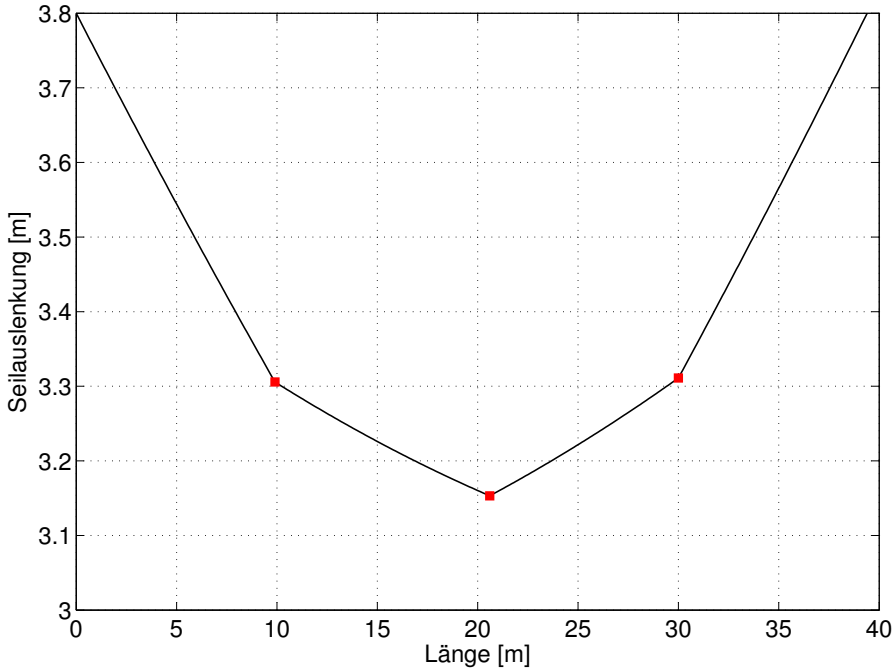


Abbildung 3.7: Seilverlauf am Prüfstand P2

3.2 Seildynamik

3.2.1 Wellengleichung

Die Wellengleichung ist eine partielle Differentialgleichung, welche die Bewegung einer Saite beschreibt. Als Saite wird ein durch die Zugkraft S gespanntes kurzes und dünnes Seil ohne Biegesteifigkeit und mit konstanter Massenbelegung μ verstanden (siehe Abbildung 3.8 links). Wird die Saite ausgelenkt und sich selbst überlassen, so führt sie eine freie Schwingung aus. Ihre Auslenkung w aus der Ruhelage ist dabei im Allgemeinen vom Ort x und von der Zeit t abhängig. Die Lösung der Wellengleichung muss sowohl die Randbedingungen erfüllen als auch dem Anfangswertproblem genügen. Durch verschiedene Anfangsbedingungen kann die Saite in Ruhe oder mit einer Anfangsgeschwindigkeit beschreiben werden. Die Randbedingungen sind Aussagen über die Deformations- bzw. die Kraftgrößen an den Rändern. Allgemein bezeichnet man ein Problem, das durch eine Bewegungsgleichung sowie durch Anfangs- und durch Randbedingungen beschrieben wird, als Anfangs-Randwertproblem. Die Herleitung der Wellengleichung und deren Lösung nach Bernoulli erfolgt in Anlehnung an das Buch Technische Mechanik 4 [Gross et al., 2009, S. 212ff.]. Da diese Arbeit überwiegend erregte Schwingungsvorgänge behandelt, wurde auf die Lösung der Wellengleichung durch Integration nach d'Alembert verzichtet. Befindet sich eine Erregung $q(x,t)$ an der Saite, spricht man von einer inhomogenen Wellengleichung, andernfalls liegt ein homogener Fall vor.

Homogene Wellengleichung

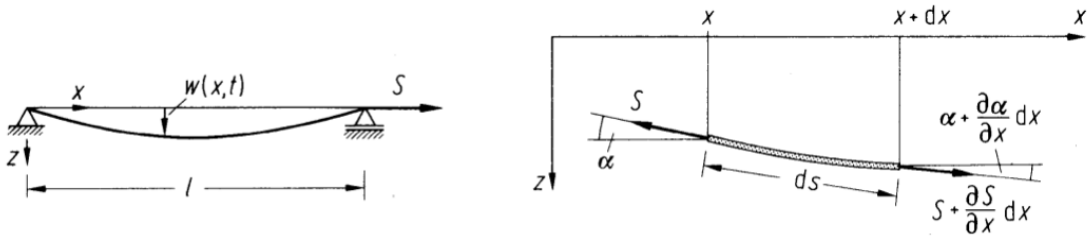


Abbildung 3.8: Auslenkung an einer Saite, Saitenelement

Die Bewegungsgleichungen an einem Saitenelement (siehe Abbildung 3.8 rechts) werden unter der Annahme, dass $w \ll 1$ aufgestellt. Dies bewirkt die Vereinfachungen $\alpha \approx \sin\alpha \approx w'$, $(\alpha + d\alpha) \approx \sin(\alpha + d\alpha) \approx w' + w''dx$, $\cos\alpha \approx 1$, $\cos(\alpha + d\alpha) \approx 1$, $ds \approx dx$ und $dm = \mu ds \approx \mu dx$.

$$\sum F_x = 0: \quad -S + \left(S + \frac{\partial S}{\partial x}dx\right) = 0 \quad \rightarrow \quad S = konst \tag{3.23}$$

$$\sum F_z = m\ddot{w}: \quad -Sw' + \left(S + \frac{\partial S}{\partial x}dx\right)(w' + w''dx) = \mu dx\ddot{w} \tag{3.24}$$

Mit $\partial S/\partial x = 0$ folgt aus Gleichung (3.24) die eindimensionale Wellengleichung (3.25) mit c als Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit.

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad mit \quad c^2 = \frac{S}{\mu} \tag{3.25}$$

Mithilfe des Produktansatzes $w(x,t) = W(x) \cdot T(t)$ ergibt sich aus (3.25)

$$W''(x) \cdot T(t) = \frac{1}{c^2} W(x) \cdot \ddot{T}(t) \quad \rightarrow \quad c^2 \frac{W''(x)}{W(x)} = \frac{\ddot{T}(t)}{T(t)}. \tag{3.26}$$

Für alle x und t kann diese Gleichung nur dann erfüllt sein, wenn beide Seiten einer Konstanten gleich sind, die hier mit $-w^2$ bezeichnet wird.

$$c^2 \frac{W''(x)}{W(x)} = \frac{\ddot{T}(t)}{T(t)} = -w^2 \tag{3.27}$$

Aus (3.27) folgen zwei gewöhnliche Differentialgleichungen zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten

$$W''(x) + \left(\frac{w}{c}\right)^2 W = 0, \quad \ddot{T} + w^2 T = 0, \tag{3.28}$$

mit ihren allgemeinen Lösungen

$$W(x) = A \cdot \cos\left(\frac{w}{c}x\right) + B \cdot \sin\left(\frac{w}{c}x\right), \quad T(t) = C \cdot \cos(wt) + D \cdot \sin(wt). \tag{3.29}$$

Die Produktlösung aus (3.29) kann geschrieben werden als

$$w(x,t) = \left[A \cdot \cos\left(\frac{w}{c}x\right) + B \cdot \sin\left(\frac{w}{c}x\right)\right][C \cdot \cos(wt) + D \cdot \sin(wt)]. \tag{3.30}$$

Wie schon erwähnt, muss diese Lösung sowohl den Rand- als auch den Anfangsbedingungen genügen. Die Randbedingungen für eine Saite mit festen Rändern (siehe Abbildung 3.9) liefern

$$\begin{aligned} w(0,t) = 0 \quad &\rightarrow \quad W(0) = 0: \qquad A = 0, \\ w(l,t) = 0 \quad &\rightarrow \quad W(l) = 0: \quad B \cdot \sin\left(\frac{w}{c}l\right) = 0. \end{aligned} \tag{3.31}$$

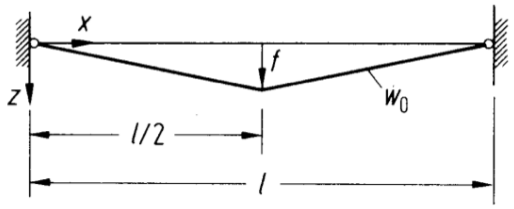


Abbildung 3.9: Beidseitig eingespannte Saite

Wenn die triviale Lösung $W(x) = 0$ ausgeschlossen wird, dann muss $B \neq 0$ sein, und es folgt die charakteristische transzendente Gleichung (3.32), welche die Eigenkreisfrequenzen (Eigenwerte) w_n festlegt.

$$\sin\left(\frac{w}{c}l\right) = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{w}{c}l = n\pi \quad \rightarrow \quad w_n = n\pi\frac{c}{l} \quad mit \quad n = 1, 2, ... \tag{3.32}$$

Zu jeder Eigenkreisfrequenz w_n gehört eine Eigenfunktion (siehe Abbildung 3.10)

$$W_n(x) = B_n \cdot \sin\left(\frac{w_n}{c}x\right) = B_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \tag{3.33}$$

und damit auch, ohne Einschränkung der Allgemeinheit durch $B_n = 1$, eine Lösung

$$w_n(x,t) = W_n(x) \cdot T_n(t) = \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \cdot [C_n \cdot \cos(w_n t) + D_n \cdot \sin(w_n t)]. \tag{3.34}$$

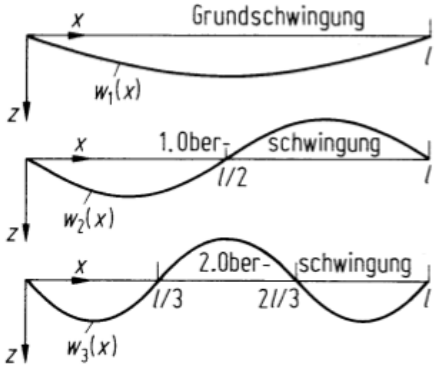


Abbildung 3.10: Eigenfunktionen der eingespannten Saite

Da die Differentialgleichung (3.25) linear ist, stellt die Summe von Eigenschwingungen ebenfalls eine Lösung dar, die den Randbedingungen genügt (Superposition). Überlagern wir alle Eigenschwingungen, dann erhalten wir die allgemeine Lösung

$$w(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} w_n = \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \cdot [C_n \cdot \cos(w_n t) + D_n \cdot \sin(w_n t)]. \tag{3.35}$$

Diese Lösung kann als Darstellung der Auslenkung $w(x)$ zu jedem Zeitpunkt t durch eine Fourierreihe aufgefasst werden. Dabei ist $T_n(t)$ der Fourierkoeffizient zum Zeitpunkt t.

Beim Prüfstand P1 wird eine Anfangsauslenkung von w_0 = -0.2m aufgebracht. Die Anfangsgeschwindigkeit v_0 soll 0 sein. Der Aufbau hat eine Länge von $L = 120\,m$, eine Vorspannkraft von $S = 320000\,N$ und ein Seil mit der längenbezogenen Masse von $\mu = 7.4\,kg/m$. Aus den Anfangsbedingungen folgt

$$\begin{aligned} w(x,0) = w_0(x): &\qquad \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) = w_0(x), \\ \dot{w}(x,0) = 0: &\qquad \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cdot \frac{n\pi c}{l} \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) = 0 \rightarrow D_n = 0. \end{aligned} \tag{3.36}$$

Zur Bestimmung der Konstante C_n wird die Gleichung (3.36) oben mit $\sin(i\pi x/l)$ multipliziert und anschließend über die Länge der Saite integriert.

$$\int_0^l \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \cdot \sin\left(\frac{i\pi x}{l}\right) dx = \int_0^l w_0(x) \cdot \sin\left(\frac{i\pi x}{l}\right) dx \tag{3.37}$$

Unter Ausnutzung der Orthogonalität der Eigenfunktionen

$$\int_0^l \sin\left(\frac{i\pi x}{l}\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) dx = \begin{cases} 0 & i \neq n \\ l/2 & i = n \end{cases} \tag{3.38}$$

ergibt sich aus (3.37) die Gleichung (3.39), die zum gleichen Ergebnis führt, wie bei der Fourierkoeffizientberechnung der Konstante C_n aus der Gleichung (3.36) oben.

$$C_n = \frac{2}{l} \int_0^l w_0(x) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) dx. \tag{3.39}$$

Um das Auslassen des niedergespannten Seils am Prüfstand P1 zu modellieren, wird eine dreieckförmige Anfangsauslenkung (siehe Abbildung 3.11) mit $w_0 = 2fx/l$ *für* $0 \leq x \leq l/2$ *und* $w_0 = 2f(1-x/l)$ *für* $l/2 \leq x \leq l$ *vorgegeben.*

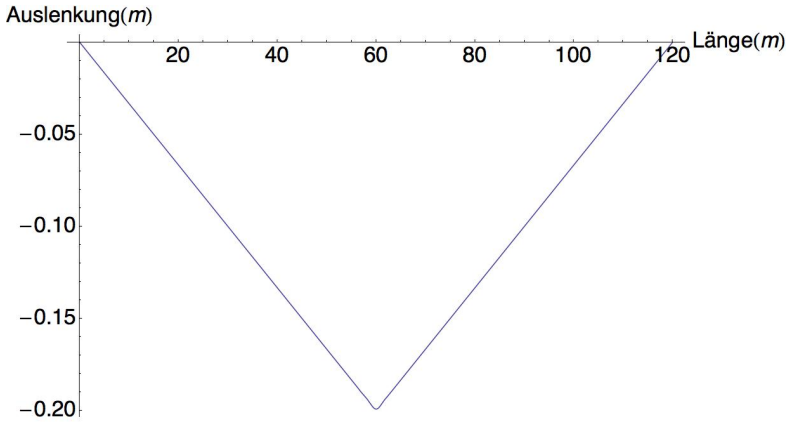


Abbildung 3.11: Anfangsauslenkung am Prüfstand P1

Durch Einsetzen (3.39) und $D_n = 0$ *in (3.35) ergibt sich die Wellenausbreitung* $w(x,t)$ *(siehe Abbildung 3.12). Diese klingt in der Saitentheorie aufgrund der fehlenden Dämpfung nicht ab. Um ein reales Verhalten modellieren zu können, werden im Kapitel 3.2.2 fehlende Parameter mitberücksichtigt.*

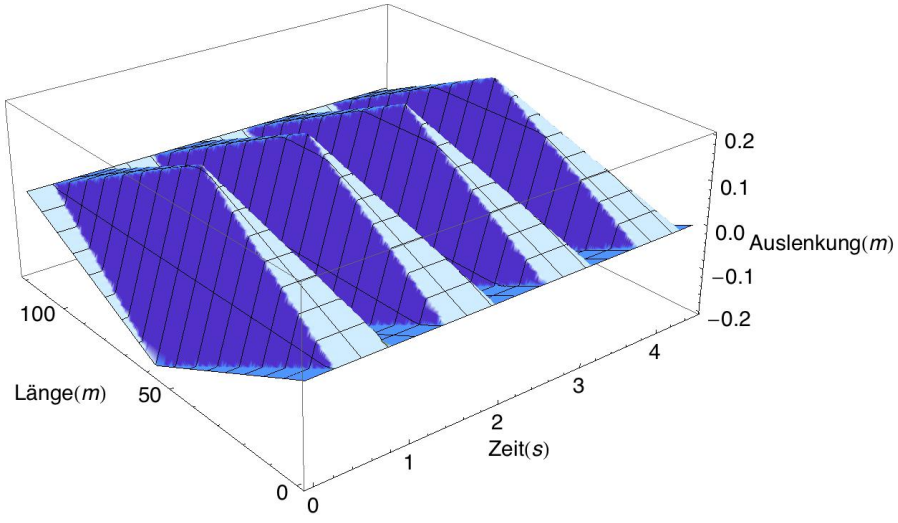


Abbildung 3.12: Wellenausbreitung am Prüfstand P1 nach Anfangsauslenkung

Inhomogene Wellengleichung

Im Fall der Erregung der Saite wird aus der Gleichung (3.25)

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - c^2 \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{q(x,t)}{\mu} \quad mit \quad c^2 = \frac{S}{\mu}. \tag{3.40}$$

Die Lösung dieser Gleichung setzt sich aus der homogenen (3.35) und einer partikulären Lösung zusammen. Um eine analytische Lösung zu erzielen, muss die im partikulären Teil der Lösung enthaltene Erregung $q(x,t)$ mit der Einheit N/m so formuliert sein, dass ein Koeffizientenvergleich möglich ist. Bewerkstelligen lässt sich das mithilfe der Fourierreihendarstellung, welche mit einer hohen Anzahl von Reihengliedern beinahe alle Erregergeometrien ohne große Abweichungen nachbilden kann [Lässer, 2009, S. 48ff.].

$$q(x,t) = \underbrace{q(t)}_{Zeitfuktion} \cdot \underbrace{\sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right)}_{Fourierreihendarstellung \quad der \quad Ortsfunktion} \tag{3.41}$$

Als Beispiel für die Fourierreihendarstellung der Ortsfunktion wird ein Seilfeld mit der Länge von $L = 10\,m$ mit einer Kraft von $F = 100\,N$ in der Mitte nach unten gedrückt. Das Ortsfenster mit der Krafteinleitungsbreite von $B = 0.2\,m$ wurde durch eine Heaviside Theta Funktion $q(x)$ modelliert. Nach Bildung des Fourierkoeffizienten (3.42) und dessen Einsetzen in den rechten Term von (3.41) ergibt sich die Fourierreihendarstellung der Ortsfunktion mit hier gewählten 50 Gliedern (siehe Abbildung 3.13). Typisches Merkmal für die Fourier Transformation sind die Überschwingungen in der Umgebung von Sprungstellen, das so genannte Gibbssche Phänomen. Diese Überschwingungen verschwinden auch dann nicht, wenn endliche viele Terme zur Approximierung verwendet werden.

$$E_n = \frac{2}{l} \int_0^l q(x) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) dx. \tag{3.42}$$

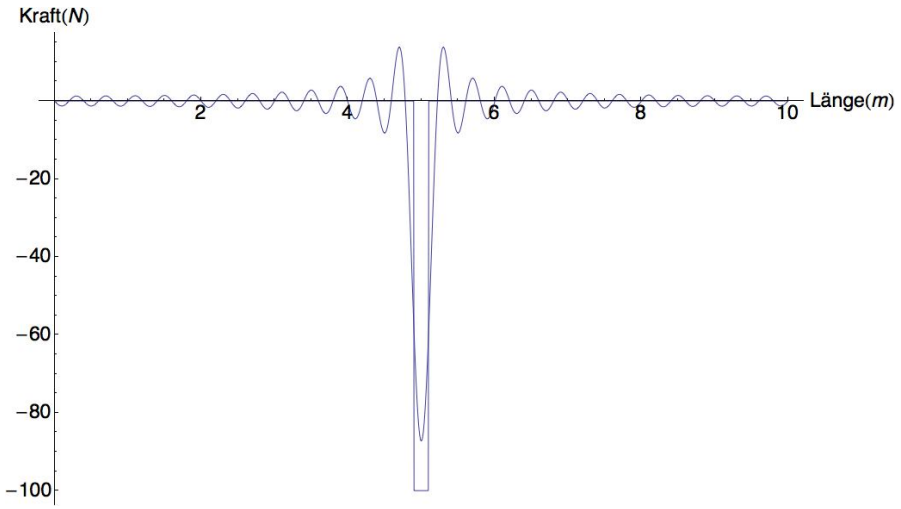


Abbildung 3.13: Fourierreihendarstellung der Ortsfunktion

Der Ansatz vom Typ der rechten Seite für die partikuläre Lösung von (3.40) ergibt sich zu

$$\begin{aligned} w_p(x,t) &= \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right), \\ \ddot{w}_p(x,t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \ddot{F}_n(t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right), \\ w_p''(x,t) &= -\sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) \cdot \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right). \end{aligned} \tag{3.43}$$

Durch Einsetzten in die inhomogene Wellengleichung folgt

$$\begin{aligned} &\sum_{n=1}^{\infty} \ddot{F}_n(t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) + c^2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) \cdot \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) = \frac{q(t)}{\mu} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right), \\ &\left[\ddot{F}_n(t) + F_n(t) \cdot \left(\frac{n\pi c}{l}\right)^2\right] \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) = \frac{q(t)}{\mu} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right). \end{aligned} \tag{3.44}$$

Nach dem Koeffizientenvergleich entfällt die Ortsabhängigkeit der charakteristischen Gleichung.

$$\ddot{F}_n(t) + F_n(t) \cdot \left(\frac{n\pi c}{l}\right)^2 = \frac{q(t)}{\mu} \cdot E_n \tag{3.45}$$

Um die analytische Lösung zu vereinfachen, wird für die Zeitfunktion der Erregung auf die Laplace-Transformation zurückgegriffen, und zwar mit dem Vorteil der Algebraisierung. Ableitungen im Bildbereich entstehen als Produkt aus Laplace Transformierter der Originalfunktion und dem Laplace Faktor s.

$$\mathscr{L}\left\{\ddot{F}_n(t) + F_n(t)\cdot\left(\frac{n\pi c}{l}\right)^2 = \frac{q(t)}{\mu}\cdot E_n\right\} \Rightarrow \left[s^2 + \left(\frac{n\pi c}{l}\right)^2\right]\cdot F_n(s) = \frac{q(s)}{\mu}\cdot E_n \tag{3.46}$$

Daraus folgt die charakteristische Gleichung im Laplace Raum.

$$F_n(s) = \frac{q(s)\cdot E_n}{\mu}\cdot\frac{1}{\left[s^2 + \left(\frac{n\pi c}{l}\right)^2\right]} \tag{3.47}$$

Durch die Rücktransformation $\mathscr{L}^{-1}\{F_n(s)\}$ folgt der Koeffizient $F_n(t)$. Dessen Einsetzen in die oberste Gleichung von (3.43) ergibt die partikuläre Lösung. Neben der Multiplikation im Laplace Raum, wie sie in (3.47) durchgeführt wurde, ist es auch möglich, mit der Faltung des Zeitsignals $q(t)$ mit $\mathscr{L}^{-1}\left\{1/(s^2 + (n\pi c/l)^2)\right\}$ auf dasselbe Ergebnis von $F_n(t)$ zu kommen. Der Vorteil liegt darin, dass das Erregersignal nicht in den Laplace Raum überführt werden muss.

Prüfstand P1 soll mit einer mittigen Sinusrregung von $q(L/2,t) = 100\,N sin(2\pi ft)$ mit $f = 1\,Hz$ erregt werden. Es soll weiters keine Anfangsauslenkung $w_0 = 0$ und keine Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 0$ vorhanden sein. Der Prüfstand hat eine Länge von $L = 120\,m$, eine Vorspannkraft von $S = 320000\,N$ und ein Seil mit der längenbezogenen Masse von $\mu = 7.4\,kg/m$.

Die Lösung ergibt sich, wie schon oben erwähnt, aus der homogenen (3.35) und der partikulären Lösung (3.43)

$$w(x,t) = w_h(x,t) + w_p(x,t) =$$
$$\sum_{n=1}^{\infty}\sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right)\cdot\left[C_n\cdot\cos\left(w_n t\right) + D_n\cdot\sin\left(w_n t\right)\right] + \sum_{n=1}^{\infty}F_n(t)\cdot\sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right). \tag{3.48}$$

Aus den Anfangsbedingungen folgt

$$
\begin{aligned}
w(x,0) = 0: \qquad & \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} F_n(0) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) = 0 \\
& \rightarrow C_n = -F_n(0), \\
\dot{w}(x,0) = 0: \qquad & \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cdot \frac{n\pi c}{l} \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{F}_n(0) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) = 0 \\
& \rightarrow D_n = -\frac{\dot{F}_n(0) l}{n\pi c}.
\end{aligned}
\tag{3.49}
$$

Bei der Lösung der inhomogenen Wellengleichung (3.48) mit dem Koeffizient $F_n(t)$ nach der Rücktransformation aus (3.47) und den Anfangsbedingungen aus (3.36) lässt sich eine Schwebung aufgrund der Interferenz von Erreger- und Reflexionswellen erkennen (siehe Abbildung 3.14). Weiters ist zu sehen, wie sich die Welle am Anfang mit einer Geschwindigkeit von ca. $c = 200\,m/s$ seilfeldmittig zu den beiden Enden ausbreitet. Aufgrund der Anfangsbedingungen ist die Gesamtlösung nur von der partikulären Lösung $w_p(x,t)$ abhängig. Bei der konstanten periodischen Anregung gehen die Saitenschwingungen nach dem Abklingen der transienten Vorgänge in eine stationäre Schwingung über.

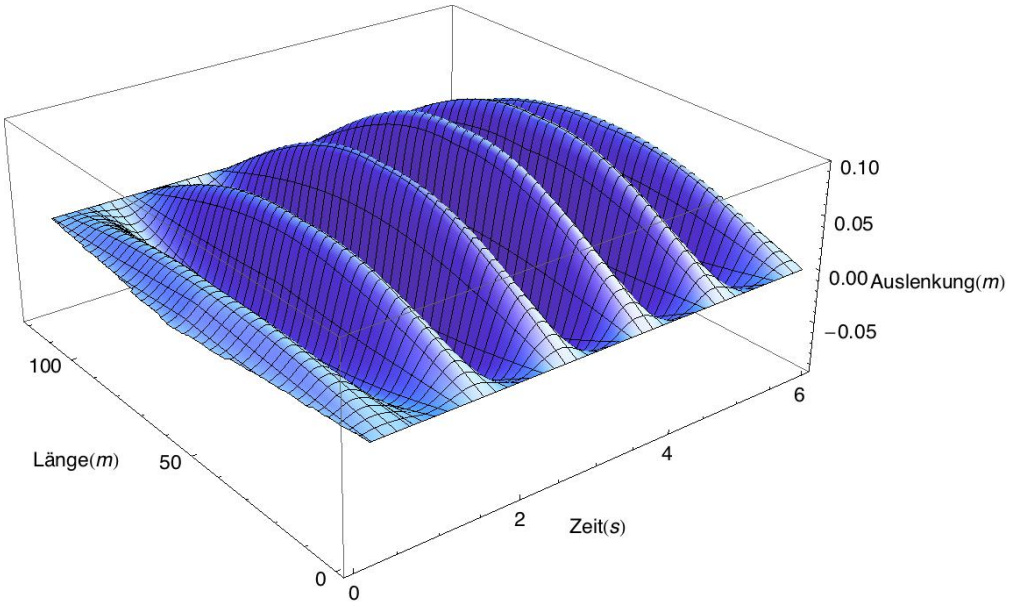


Abbildung 3.14: Wellenausbreitung bei konstanter Erregung am Prüfstand P1

Der Prüfstand P1 wird nun mit einem mittigen Impuls bei $t = 5.3\,s$ mit der Ortsfunktion von $q(x) = e^{-1^2(x-L/2)^2}$ über einen Zeitraum von $\Delta t = 0.1\,s$ erregt. Es soll keine Anfangsauslenkung $w_0 = 0$ und keine Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 0$ vorhanden sein. Der Prüfstand hat eine Länge von $L = 120\,m$, eine Vorspannkraft von $S = 320000\,N$ und ein Seil mit der längenbezogenen Masse von $\mu = 7.4\,kg/m$. Die Wellenausbreitung ist in Abbildung 3.15 zu sehen, wobei die unbenetzten Flächen auf einen Grafikfehler zurückzuführen sind. Zu erkennen ist, dass sich aufgrund der Erregung eine Rechteckschwingung ausbildet.

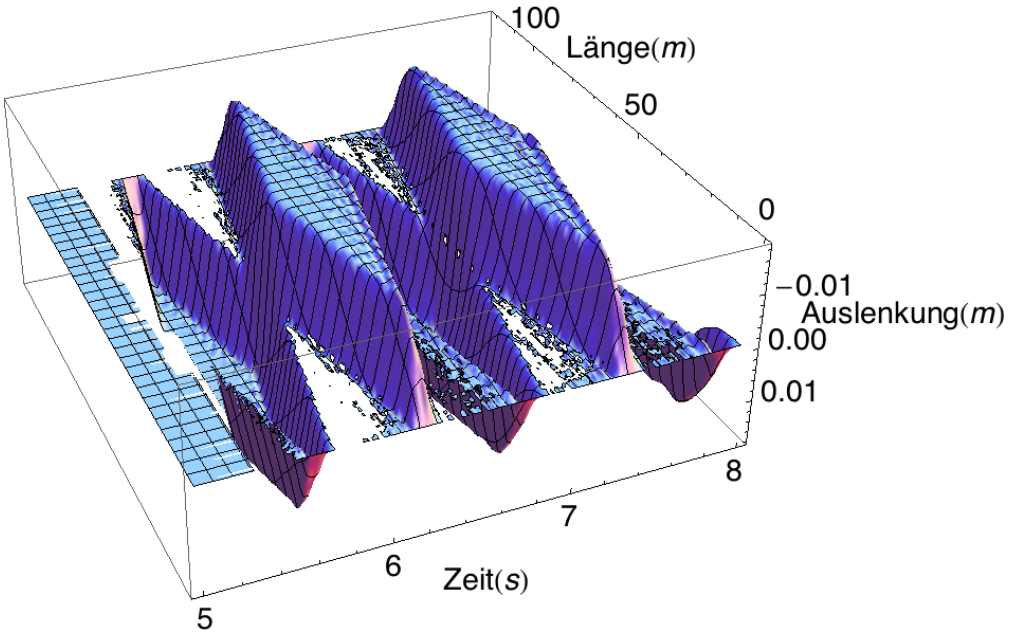


Abbildung 3.15: Wellenausbreitung bei mittiger Impulserregung am Prüfstand P1

3.2.2 Wellengleichung mit Biegesteifigkeit und Dämpfung

Bei realen Seilen liegt das dynamische Verhalten zwischen dem der Saite und dem eines Balkens mit Biegesteifigkeit. Im Seilbahnbau sind überwiegend stark gespannte Seile mit hohen angehängten Lasten in Form von Fahrzeugen vorzufinden. Daraus folgt, dass die Eigenschwingungen niedriger Ordnung relevant sind und damit die klassische Biegetheorie nach Bernoulli Euler verwendet werden kann. Die Berücksichtigung der Schubverformung, also die Verwendung der Theorie von Timoshenko,

zeigt erst bei höheren Frequenzen wesentliche Verbesserungen und wird deswegen vernachlässigt. Zudem besteht eine weitere Schwierigkeit darin, dass die Schubsteifigkeit des Seils aufgrund der Geometrie nicht proportional zur Biegesteifigkeit ist [vgl. Kartnig et al., 2011, S. 11ff.]. Durch die Erweiterung der Gleichung (3.40) mit einer konstanter Biegesteifigkeit EI und einer geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung d (viskose Dämpfung) folgt

$$\underbrace{\frac{EI}{\mu}\cdot\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}}_{Biegesteifigkeit}\ \underbrace{-c^2\cdot\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}}_{Saitentheorie}+\ \underbrace{d\cdot\frac{\partial w}{\partial t}}_{Daempfung}\ =\ \underbrace{\frac{q(x,t)}{\mu}}_{Erregung}\quad mit\quad c^2=\frac{S}{\mu}. \tag{3.50}$$

Um die Richtigkeit dieser Gleichung zu gewährleisten wird die Kontrolle der Einheiten durchgeführt.

$$\frac{kg}{s^2\cdot m}\cdot m^4\cdot\frac{m}{kg}\cdot\frac{1}{m^3}-\frac{kg\cdot m}{s^2}\cdot\frac{m}{kg}\cdot\frac{1}{m}+\frac{m}{s^2}+\frac{1}{s}\cdot\frac{m}{s}=\frac{kg}{s^2}\cdot\frac{m}{kg} \tag{3.51}$$

Der Lösungsweg dieser Gleichung gestaltet sich ähnlich wie im Kapitel *Inhomogene Wellengleichung*. Die Erregung wird in eine Zeit- und Ortsfunktion getrennt, wobei Letztere als Fourierreihe dargestellt wird (3.41). Neben den Ansätzen aus (3.43) kommen wegen den zusätzlichen Ableitungen w'''' und $\dot{w}$ folgende hinzu

$$\begin{aligned} w_p''''(x,t)&=\sum_{n=1}^{\infty}F_n(t)\cdot\left(\frac{n\pi}{l}\right)^4\sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right),\\ \dot{w}_p(x,t)&=\sum_{n=1}^{\infty}\dot{F}_n(t)\cdot\sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right). \end{aligned} \tag{3.52}$$

Mit diesem Ansatz lautet die Differentialgleichung

$$\begin{aligned} &\frac{EI}{\mu}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}F_n(t)\cdot\left(\frac{n\pi}{l}\right)^4\sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right)+c^2\cdot\sum_{n=1}^{\infty}F_n(t)\cdot\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2\sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right)\\ &+\sum_{n=1}^{\infty}\ddot{F}_n(t)\cdot\sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right)+d\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\dot{F}_n(t)\cdot\sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right)=\frac{q(t)}{\mu}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}E_n\cdot\sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right),\\ &\left[\ddot{F}_n(t)+d\cdot\dot{F}_n(t)+F_n(t)\cdot\left\{\frac{EI}{\mu}\cdot\left(\frac{n\pi}{l}\right)^4+\left(\frac{n\pi c}{l}\right)^2\right\}\right]\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right)\\ &=\frac{q(t)}{\mu}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}E_n\cdot\sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right), \end{aligned} \tag{3.53}$$

woraus die charakteristische Gleichung (3.54) folgt.

$$\ddot{F}_n(t) + d \cdot \dot{F}_n(t) + F_n(t) \cdot \left[\frac{EI}{\mu} \cdot \left(\frac{n\pi}{l} \right)^4 + \left(\frac{n\pi c}{l} \right)^2 \right] = \frac{q(t)}{\mu} \cdot E_n \tag{3.54}$$

Durch die Laplace Transformation $\mathscr{L}$ von (3.54) lässt sich $F_n(s)$ errechnen

$$F_n(s) = \frac{q(s) \cdot E_n}{\mu} \cdot \frac{1}{s^2 + s \cdot d + \frac{EI}{\mu} \cdot \left(\frac{n\pi}{l} \right)^4 + \left(\frac{n\pi c}{l} \right)^2} \tag{3.55}$$

und nach der Rücktransformation $\mathscr{L}^{-1}\{F_n(s)\}$ folgt der Koeffizient $F_n(t)$. Im Laplace Raum ist zu erkennen, dass das Übertragungsverhalten einem PT2 Glied entspricht.

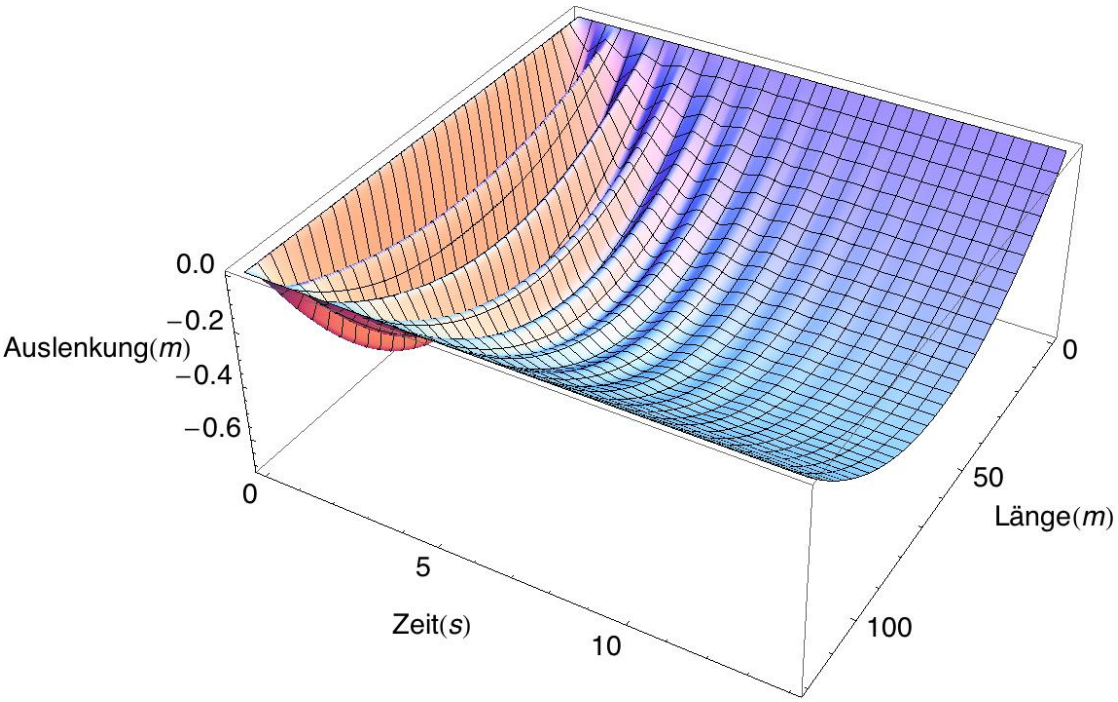


Abbildung 3.16: Einschwingung des Seils aufgrund der Schwerebeschleunigung

Die allgemeine Lösung ergibt sich mit den Anfangsbedingungen aus (3.36) zu

$$w(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi x}{l} \right) \cdot \left[-F_n(0) \cdot \cos\left(w_n t \right) - \frac{\dot{F}_n(0) l}{n\pi c} \cdot \sin\left(w_n t \right) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l} \right). \tag{3.56}$$

Bei der Berechnung der Auslenkung des Seils aufgrund der Schwerebeschleunigung (siehe Abbildung 3.16) ist zu beachten, dass die Fallbeschleunigung auf der rechten Seite der Gleichung (3.50) nicht mit der längenbezogenen Masse μ dividiert wird, da sonst die physikalischen Einheiten nicht mehr übereinstimmen.

Prüfstand P1 wird mit einer mittigen Kraft von $q(L/2,t) = 270\,N$ bis zu dem Zeitpunkt $t = 1.5\,s$ niedergespannt. Es soll eine Anfangsauslenkung w_0 aufgrund der Schwerebeschleunigung (siehe Abbildung 3.16) und keine Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 0$ vorhanden sein. Der Prüfstand hat eine Länge von $L = 120\,m$, eine Vorspannkraft von $S = 320000\,N$ und ein Seil mit der längenbezogenen Masse von $\mu = 7.4\,kg/m$. Die Dämpfung des Seils wird mit $d = 0.1\,s^{-1}$ und einem E-Modul von $E = 200\,kN/mm^2$ [vgl. Fatzer AG Drahtseiltechnik, S. 3.03] angenommen. Weiters wird der Seilquerschnitt als Kreis mit Durchmesser $D = 45\,mm$ und dem dazugehörigen Flächenträgheitsmoment von $I = 201289\,mm^4$ verwendet. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 3.17 zu sehen.

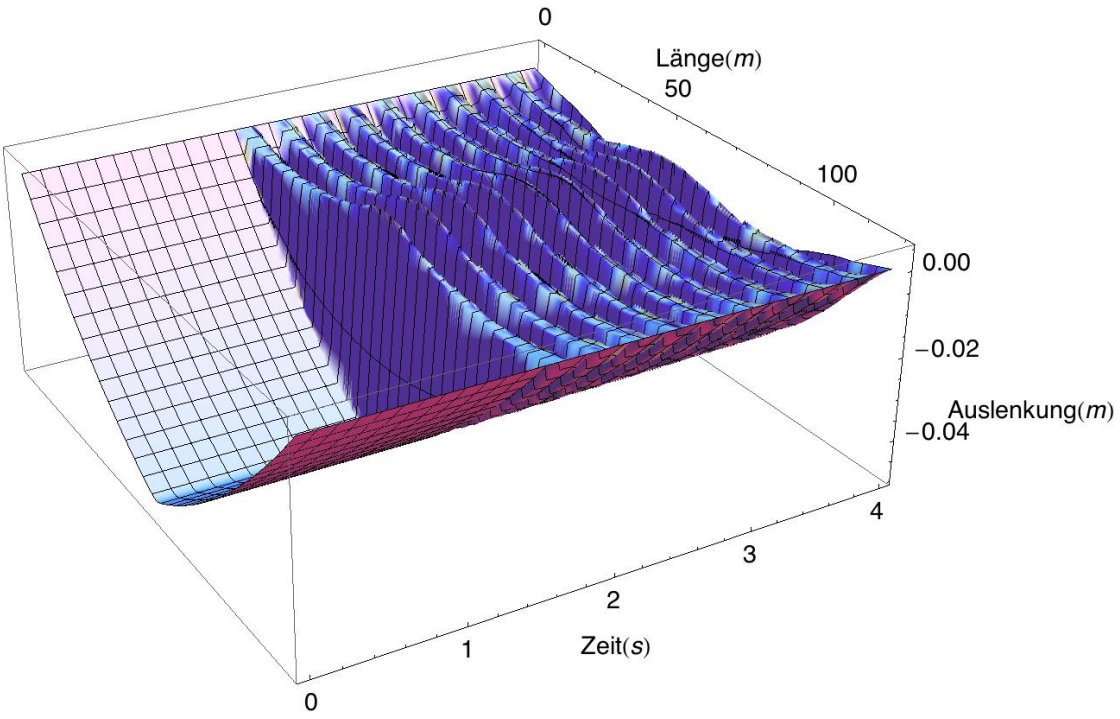


Abbildung 3.17: Wellenausbreitung bei Entlassen der Niederspannkraft am Prüfstand P1

3.2.3 Wellengleichung für Torsionsschwingungen

Bei Versuchen an Seilbahnanlagen mit künstlicher Erregung konnte festgestellt werden, dass ein in Rotation versetztes Fahrzeug die umliegenden Fahrzeuge erregt [vgl. Lässer, 2011, S. 19f.]. Aus diesem Grund ist auch eine rotatorische Betrachtung der Fahrzeuge in Wechselwirkung mit dem Seil erforderlich. Diesem Problem widmet sich der Prüfstand P2.

Die Herleitung der Wellengleichung für Torsionsschwingungen richtet sich nach [Gross et al., 2009, S. 233ff.].

Es wird ein homogener Stab, welcher ohne Wölbbehinderung eine freie Torsionsschwingung ausführt (siehe Abbildung 3.18 links), mit konstanter Querschnittsfläche als Näherung für das Seil betrachtet. Dabei erfahren die Querschnitte eine Drehung $\varphi(x,t)$ um die x-Achse (Schwerachse). Die Bewegungsgleichung (Drallsatz) am Stabelement (siehe Abbildung 3.18 rechts) ergibt sich mit dem Massenträgheitsmoment $d\Theta = \varrho I_p$ des Elements bezüglich der Schwerachse zu

$$d\Theta\ddot{\varphi} = -M_T + \left(M_T + \frac{\partial M_T}{\partial x}dx\right) \quad \rightarrow \quad \varrho I_p\ddot{\varphi} = M_T', \tag{3.57}$$

wobei I_p das polare Flächenträgheitsmoment der Querschnittsfläche ist.

Abbildung 3.18: Homogener Stab, Stabelement

Eliminiert man das Moment M_T mithilfe des linearen Elastizitätsgesetzes

$$M_T = GI_T \cdot \varphi', \tag{3.58}$$

wobei der Schubmodul G mit dem Torsionsträgheitsmoment I_T multipliziert die Torsionssteifigkeit ergibt, so erhält man ähnlich der translatorischen Schwingungen einer Saite (3.25) die homogene Wellengleichung für Torsionsschwingungen

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2}\cdot\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} \quad mit \quad c^2 = \frac{GI_T}{\varrho I_P}. \tag{3.59}$$

Die Gleichung (3.59) wird wie im Kapitel 3.2.1 – *Homogene Wellengleichung* mit dem Separationsansatz gelöst. Werden als Randbedingungen feste Ränder

angenommen, so folgt die homogene Lösung

$$\varphi_h(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \cdot [C_n \cdot \cos(w_n t) + D_n \cdot \sin(w_n t)]. \tag{3.60}$$

Erweitert man nun die homogene Wellengleichung (3.59) mit einer Erregung, so folgt die inhomogene Wellengleichung für Torsionsschwingungen.

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c^2 \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{M_{er}(x,t)}{\varrho I_P} \quad mit \quad c^2 = \frac{G I_T}{\varrho I_P} \tag{3.61}$$

Zuerst wird die Fourierreihendarstellung der Ortsfunktion des Erregermoments $M_{er}(x,t)$, dessen Einheit Nm/m ist, wie in der Gleichung (3.41) im Kapitel 3.2.1 – *Inhomogene Wellengleichung* durchgeführt. Dann folgt die partikuläre Lösung mit dem Ansatz vom Typ der rechten Seite analog zur translatorischen Schwingungsberechnung (3.43) zu

$$\varphi_p(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right), \tag{3.62}$$

wobei die Variable $F_n(t)$ durch die Rücktransformation der charakteristischen Gleichung im Laplace Raum

$$F_n(s) = \frac{M(s) \cdot E_n}{\varrho I_P} \cdot \frac{1}{\left[s^2 + \left(\frac{n\pi c}{l}\right)^2\right]} \tag{3.63}$$

mit

$$E_n = \frac{2}{l} \int_0^l M(x) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) dx \tag{3.64}$$

gegeben ist.

Die Gesamtlösung $\varphi(x,t) = \varphi_h(x,t) + \varphi_p(x,t)$ ergibt sich dann zu

$$\varphi(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \cdot [C_n \cdot \cos(w_n t) + D_n \cdot \sin(w_n t)] + \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right). \tag{3.65}$$

Aus den Anfangsbedingungen folgt

$$\begin{aligned}
\varphi(x,0)=0: \qquad & \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} F_n(0) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) = 0 \\
& \rightarrow C_n = -F_n(0), \\
\dot{\varphi}(x,0)=0: \qquad & \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cdot \frac{n\pi c}{l} \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{F}_n(0) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) = 0 \\
& \rightarrow D_n = -\frac{\dot{F}_n(0) l}{n\pi c},
\end{aligned} \tag{3.66}$$

und somit ist die inhomogene Seiltorsionsgleichung gelöst.

Die Torsionswellen des Prüfstands P2 mit einer Länge von $L = 40\,m$, bei dem das Seil von einem pendelnden Fahrzeug in der Mitte mit einem angreifenden Erregermoment von $M_{er}(L/2,t) = 50\,N\sin(2\pi f t)$ mit $f = 1\,Hz$ in Schwingung gebracht wird, sollen berechnet werden. Die Torsionssteifigkeit wurde dabei mit $GI_T = 30\,Nm^2$ und die Dichte multipliziert mit dem polaren Flächenträgheitsmoment mit $\varrho I_P = 0{,}1834\,kg^2/m$ angenommen, um die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit klein zu halten und damit eine schöne Visualisierung der Ausbreitung zu gewährleisten. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.19 zu sehen.

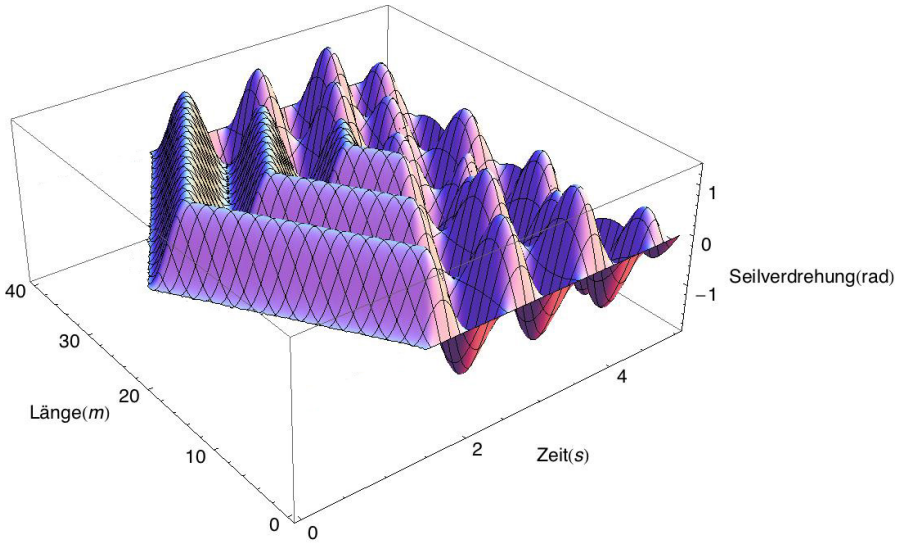


Abbildung 3.19: Torsionswellenausbreitung bei mittiger periodischer Torsionserregung am Prüfstand P2

4 Mathematische Beschreibungen der Fahrbetriebsmittel

4.1 Bestimmung der Lage eines Fahrbetriebsmittels

Für die genaue Erfassung der Lage einzelner Fahrbetriebsmittel während der Versuche werden einerseits die aktuellen Seilpositionen bei den Fahrzeugen und andererseits die Winkel der Gehängestangen aufgezeichnet. Die Notationen SS und IN in der Abbildung 4.1 und den folgenden Berechnungen stehen für $Seilzugsensor$ und $Inklinometer$. Die erste Messkomponente ermöglicht die gewünschte Aufnahme der translatorischen Bewegung zwischen Seil und Inertialsystem, und die zweite Installation deckt die Aufzeichnung der Rotation der Fahrbetriebsmittel ab (siehe Kapitel 6.3.1 und 6.3.2). Somit ist eine vollständige Beschreibung der Bewegung möglich, wie im *Arbeitspaket AP*2 im Kapitel 1.1.1 gefordert. Auf die genaue Beschreibung des Messvorganges wird in Kapitel 6.2 eingegangen.

Zur Vereinfachung wird angenommen, dass das Seil mit der Frequenz des Fahrzeugs mitschwingt. Dadurch bilden die zwei Komponenten gemeinsam ein schwingendes Pendel.

Aus Abbildung 4.1 ist ersichtlich, dass sich durch den Kosinussatz der Winkel β berechnen lässt.

$$\beta = \arccos\left(\frac{{l_{SS1}}^2 + c^2 - {l_{SS2}}^2}{2 l_{SS1} c}\right) \tag{4.1}$$

Anschließend folgt für die Lage des Seiles mit der Berücksichtigung des Seilradius w die Beschreibung

$$r_{Seil} = \begin{pmatrix} l_{SS1}\cos\beta + w\sin\varphi \\ l_{SS1}\sin\beta + w\cos\varphi \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{4.2}$$

Letztlich kann nun die Schwerpunktlage des Fahrbetriebsmittels gegenüber dem Inertialsystem mit l als Abstand vom Seil- zum Massenmittelpunkt beschrieben werden mit

$$r_{FBM} = \begin{pmatrix} l_{SS1}\cos\beta + (w+l)\sin\varphi \\ l_{SS1}\sin\beta + (w+l)\cos\varphi \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{4.3}$$

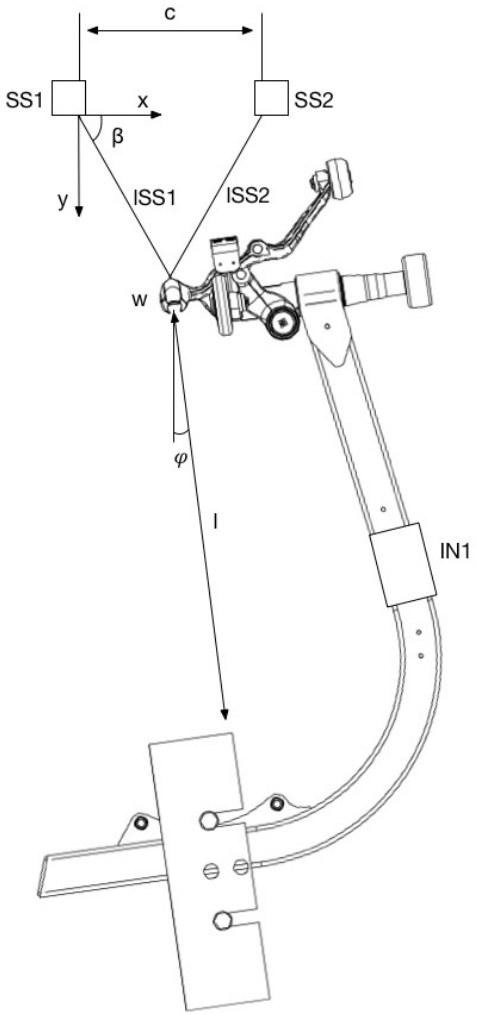


Abbildung 4.1: Skizze der Messvorrichtung am Fahrzeug

Winkelmessung mithilfe der Inklinometer

Beim Messen der Querpendelung bzw. des Winkels φ der Fahrzeuge ist eine fehlerfreie Messung durch die Inklinometer nur dann möglich, wenn diese im Drehpunkt positioniert werden. Dies ist jedoch aufgrund der Messvorrichtung nicht möglich. Dadurch wirken neben der Schwerebeschleunigung, den Beschleunigungen aus der Pendelbewegung auch die Seilbeschleunigungen auf die Inklinometer, und das Ergebnis wird leicht verfälscht. Die tatsächlich gemessene Querbeschleunigung, aus der sich der Winkel φ berechnen lässt, ist die Addition der Komponenten, die in der sensiblen Achse eines Inklinometers wirken (siehe Abbildung 4.2 und 4.3).

Durch das Pendeln um die Seilachse ergeben sich mit dem Abstand L von der

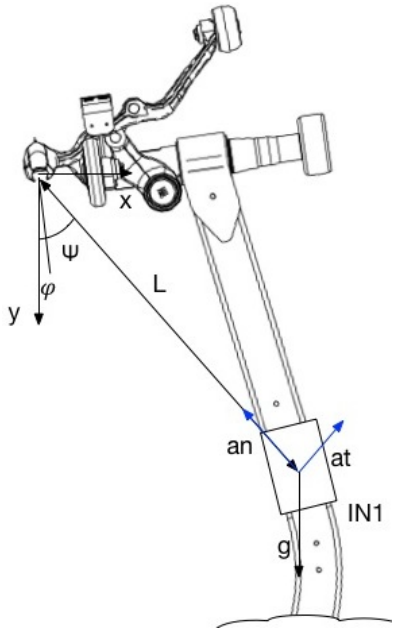


Abbildung 4.2: Beschleunigungen bei Querauslenkung

Seilmitte zum Messgerätmittelpunkt die Tangential- und Normalbeschleunigungen zu

$$a_t = \ddot{\varphi} L \qquad a_n = \dot{\varphi}^2 L. \tag{4.4}$$

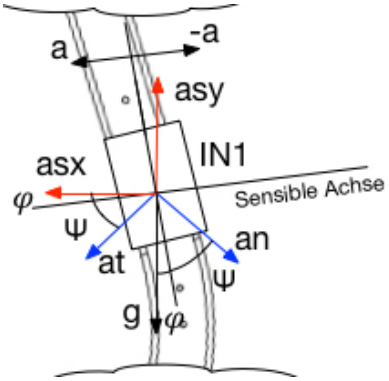


Abbildung 4.3: Beschleunigungen am Inklinometer

Die Beschleunigung in der sensiblen Achse des Inklinometers beläuft sich auf

$$a = \ddot{\varphi} L \cos\psi - \dot{\varphi}^2 L \sin\psi + g \sin\varphi + a_{SX} \cos\varphi - a_{SY} \sin\varphi, \tag{4.5}$$

wobei a_{SX} die erste und a_{SY} die zweite Zeile des zweimalig nach der Zeit abgeleiteten Lagevektors des Seil r_{Seil} aus Gleichung (4.2) ist. Wird die Vereinfachung eines fixen Aufhängepunktes für das Pendeln angenommen, fallen die Beschleunigungen des Seiles weg. Aufgrund der großen Massenkonzentration am Fahrbetriebsmittel ist das hinreichend gegeben.

$$a = \ddot{\varphi} L \cos\psi - \dot{\varphi}^2 L \sin\psi + g \sin\varphi \tag{4.6}$$

Eine Möglichkeit, die Gleichung (4.6) zu lösen, bietet die Verwendung der linearisierten Bewegungsgleichnung des Pendels (siehe Gleichung (4.18)). Durch das Einsetzen der Winkelbeschleunigung $\ddot{\varphi}$ aus der Gleichung (4.6) in die Bewegungsgleichung (4.9) wird eine Differentialgleichung erster Ordnung geschaffen, allerdings mit dem Nachteil, dass die Eigenkreisfrequenz w in der Berechnung vorkommt.

Eine Erleichterung bei der Berechnung folgt dann, wenn zwei Inklinometer auf einem Gehänge verbaut werden. Die Differenz der Beschleunigungen der einzelnen Inklinometer a_1 und a_2 in der sensiblen Achse ergibt dann das Produkt aus Sensorabstand d, Eigenkreisfrequenz ω zum Quadrat und Auslenkwinkel φ (siehe Gleichung (4.7)) [vgl. Huber, 2008, S. 6ff.].

$$\varphi = \frac{a_1 - a_2}{d\omega^2} \tag{4.7}$$

Aufgrund der Limitation auf zwei Inklinometer am Prüfstand P2 und die Aufgabe des Aufzeichnens von mindestens zwei Fahrzeugen konnte allerdings nicht auf diese Vereinfachung zurückgegriffen werden. Es wurden Messungen an einem Fahrbetriebsmittel mit zwei verbauten Inklinometern mit der Auslenkungsmessung mit nur einem Inklinometer am Fahrzeug verglichen. Durch die geringen Abweichungen wurde, auch im Sinne der Komplexitätsminimierung des Messprogramms, die Auswertung der Ausgangsspannungen der einzeln an den Fahrzeugen verbauten Messgeräte vereinfacht. Die Berechnungen der Winkel erfolgt durch Interpolation (siehe Kapitel 6.5).

4.2 Schwingverhalten eines Fahrbetriebsmittels

Als Näherung kann das Fahrbetriebsmittel ohne Erregung (siehe Abbildung 4.4) als Schwerependel angesehen werden. Die Bewegung des Seils und die damit verbundenen Beeinflussungen des Fahrzeugs werden vernachlässigt. Bei einer Auslenkung um den Winkel φ aus der Vertikallage entsteht eine rückstellende Komponente der Gewichtskraft von der Größe

$$F_G = -m_{FZ} g \sin\varphi. \tag{4.8}$$

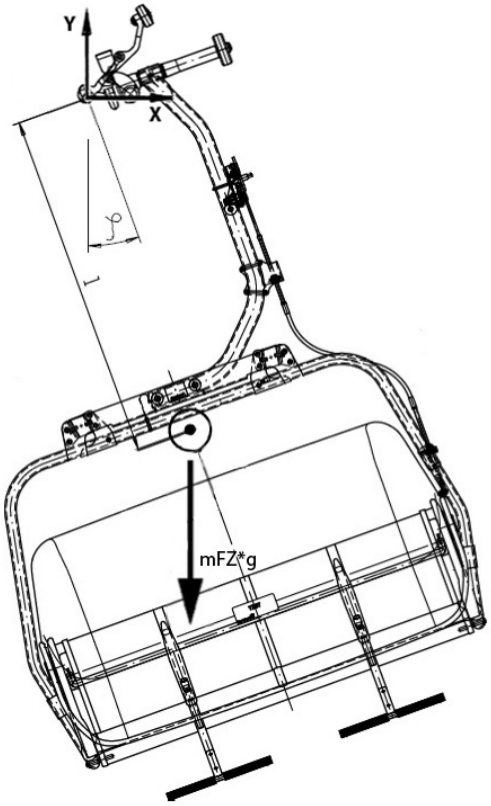


Abbildung 4.4: Ausgelenktes Fahrbetriebsmittel

Mit dem Drallsatz um den Koordinatenursprung ergibt sich mit dem Massenträgheitsmoment I bezüglich der Drehachse

$$I\ddot{\varphi} = -m_{FZ}gl\sin\varphi \quad \rightarrow \quad \ddot{\varphi} + \underbrace{\frac{m_{FZ}gl}{I}}_{\omega^2}\sin\varphi = 0. \tag{4.9}$$

Für die Berechnung der Schwingung eines Fahrbetriebsmittels mit Erregung (siehe Abbildung 4.5) werden zunächst mithilfe der Absolutkinematik der Lagevektor r_E, die Geschwindigkeit v_E und die Beschleunigung a_E der Erregermasse errechnet. Die Beschreibung erfolgt in kartesischen Koordinaten mit dem Ursprung im Drehpunkt des Fahrzeugs.

$$r_E = \begin{pmatrix} (l+a)\sin\varphi - x(t)\cos\varphi \\ -(l+a)\cos\varphi - x(t)\sin\varphi \\ 0 \end{pmatrix} \tag{4.10}$$

$$v_E = \begin{pmatrix} (l+a)\cos\varphi + x(t)\sin\varphi \\ (l+a)\sin\varphi - x(t)\cos\varphi \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\varphi} - \begin{pmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \\ 0 \end{pmatrix} \dot{x}(t) \tag{4.11}$$

$$\begin{aligned} a_E = \begin{pmatrix} (l+a)\cos\varphi + x(t)\sin\varphi \\ (l+a)\sin\varphi - x(t)\cos\varphi \\ 0 \end{pmatrix} \ddot{\varphi} + \begin{pmatrix} -(l+a)\sin\varphi + x(t)\cos\varphi \\ (l+a)\cos\varphi + x(t)\sin\varphi \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\varphi}^2 - \\ \begin{pmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \\ 0 \end{pmatrix} \ddot{x}(t) + \begin{pmatrix} 2\sin\varphi \\ -2\cos\varphi \\ 0 \end{pmatrix} \dot{\varphi}\dot{x}(t) \end{aligned} \tag{4.12}$$

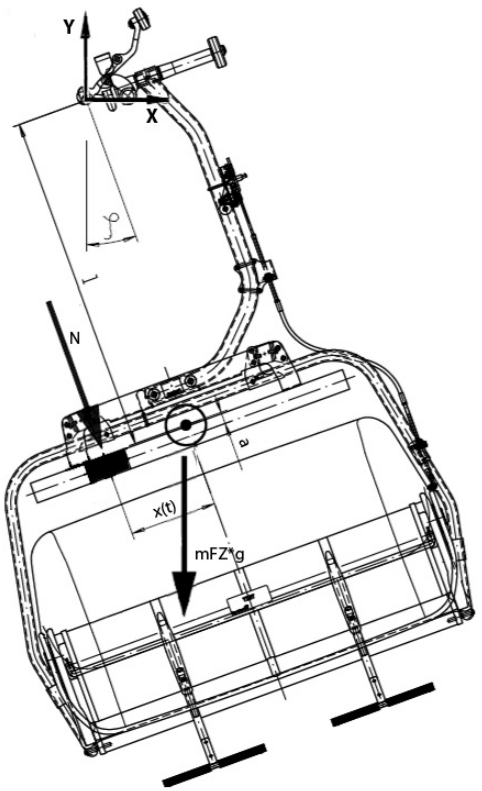


Abbildung 4.5: Reaktionskräfte des ausgelenkten Fahrbetriebsmittels mit Erregervorrichtung (schwarz eingefärbt)

Der Schwerpunktsatz angewendet auf die Erregermasse ergibt die benötigte

Reaktionskraft N auf das Fahrzeug.

$$m_E \begin{pmatrix} a_{EX} \\ a_{EY} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N \sin\varphi \\ m_E g - N\cos\varphi \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \rightarrow \qquad N = \frac{m_E(g - a_{EY})}{\cos\varphi} \tag{4.13}$$

Da die z-Achse des Koordinatensystems in Richtung der Rotationsachse zeigt, ist das von der Position der Erregermasse $x(t)$ abhängige Massenträgheitsmoment I gleich

$$I = m_{FZ} l^2 + m_E \left((l+a)^2 + x(t)^2 \right). \tag{4.14}$$

Aus dem Drallsatz um die Rotationsachse des Fahrzeugs folgt

$$I\ddot{\varphi} = Nx(t) - m_{FZ} g l \sin\varphi. \tag{4.15}$$

Das Erregerfahrzeug soll mit den in Tabelle 3 gegebenen Parametern simuliert werden. Dabei sind die Anfangsbedingungen für die Lösung der Differenzialgleichung $\varphi(0) = 0$ und $\dot{\varphi}(0) = 0$.

Parameter	Zahlenwert/Einheit
Masse Erregung m_E	$150\,kg$
Masse Fahrzeug m_{FZ}	$250\,kg$
Schwerpunktsabstand Fahrzeug l	$1.2\,m$
Abstand Schwerpunkt Fahrzeug zu Erregung a	$0.8\,m$
Erregerfrequenz f	$0.37\,Hz$
Erregeramplitude A	$0.46\,m$

Tabelle 3: Parameter des Fahrbetriebsmittels mit Erregung

Die Erregung der Masse erfolgt mit

$$x(t) = A\cos(2\pi f t), \tag{4.16}$$

dadurch ergibt sich ein Aufschaukeln des Fahrbetriebsmittels (siehe Abbildung 4.6).

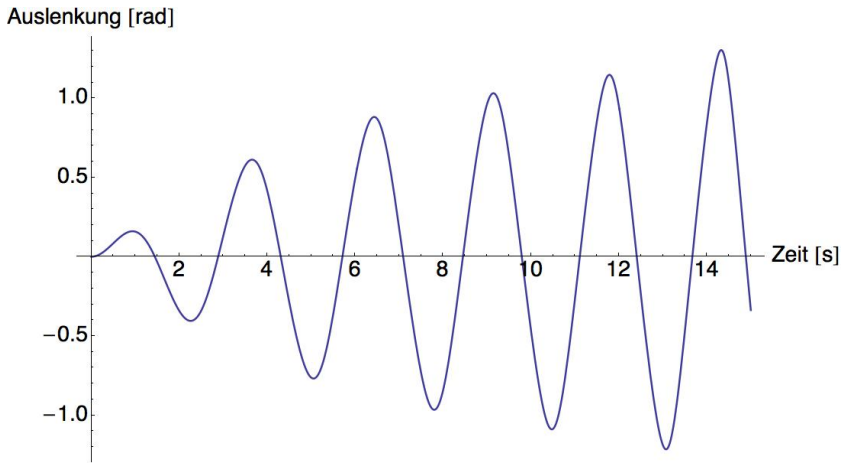


Abbildung 4.6: Aufschaukeln des Fahrbetriebsmittels durch die Erregereinheit

4.3 Wechselwirkung eines Fahrbetriebsmittels mit dem Seil

Die Wechselwirkungen zwischen Seilen und Fahrzeugen in einem Seilfeld können mathematisch beschrieben werden, indem das Torsionsmoment M_T des Seils in die Fahrzeugmodelle als Randbedingung eingeleitet wird. Auf diese Weise wird das Fahrzeug mit der Wellengleichung für Torsionsschwingungen (siehe Kapitel 3.2.3) gekoppelt.

$$\ddot{\varphi} + \frac{m_{FZ} g l}{I} \sin \varphi = M_T \tag{4.17}$$

Für mehrere Fahrzeuge im Seilfeld wird ein numerisches Verfahren für die Berechnung der homogenen Seilgleichung angewandt. Die Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Seil erfolgt über inhomogene Randbedingungen. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 4.7 zu sehen, wobei hier drei Fahrzeuge in einem Seilfeld simuliert werden. Die vier Seilabschnitte werden pro Zeitschritt dt mit den entsprechenden inhomogenen Randbedingungen (in der Grafik rechts) aufgrund der Fahrzeuge und/oder den Seilunterstützungen errechnet.

Die Simulationsergebnisse des Verfahrens sind in Abbildung 6.2 zu sehen. Für die Behandlung der Wechselwirkung der Fahrzeuge mit dem Seil ist mit der Darstellung des Rechenschemas in dieser Arbeit Sorge getragen. Bei vertieftem Interesse wird auf die Ergebnisse des Forschungsprojektes [Kartnig et al., 2011] verwiesen.

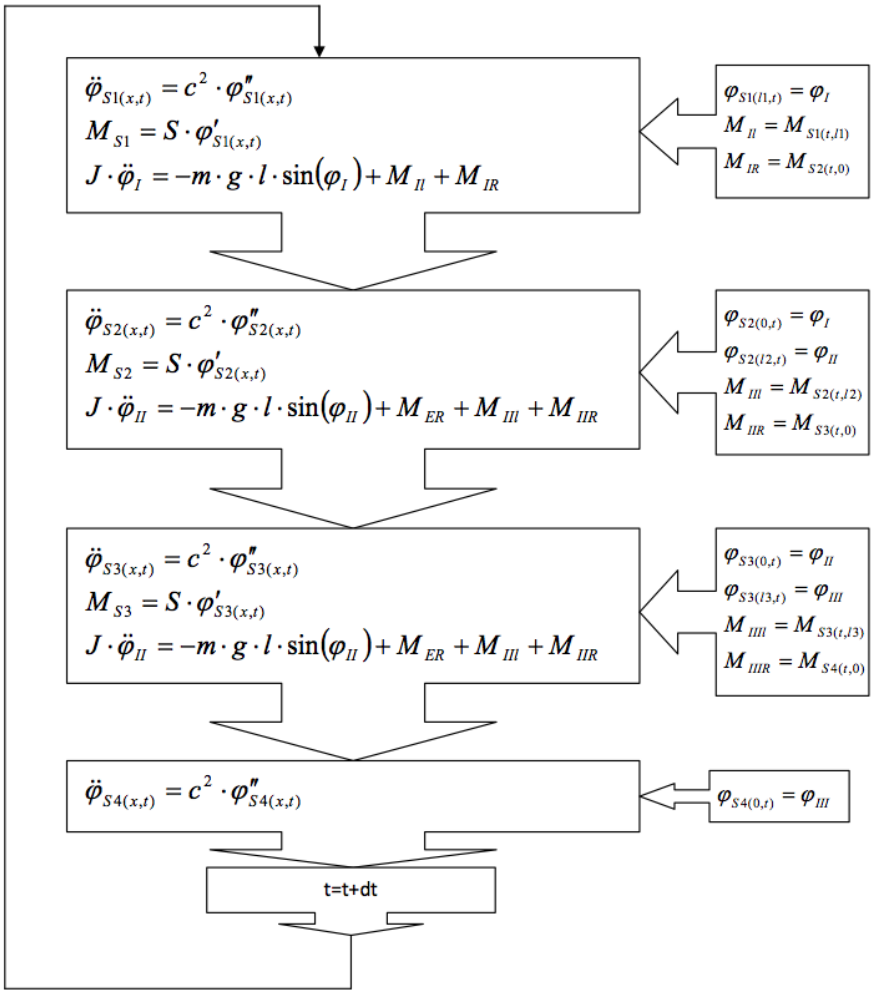


Abbildung 4.7: Rechenschema des numerischen Verfahrens bei mehreren Fahrzeugen im Seilfeld [Lässer, 2011, S. 29]

4.4 Massenträgheitsmoment

Massenträgheitsmomente I lassen sich nur für relativ einfache (symmetrische) Massenverteilungen schnell berechnen. In der Praxis sind die Massenverteilungen jedoch meist sehr komplex. Deshalb werden die Massenträgheitsmomente I oft – wie auch in dieser Arbeit – für die einzelnen Fahrzeuge des Prüfstands P2 experimentell eruiert. Dazu wird zunächst die Schwingung der Fahrzeuge um eine feste Drehachse aufgezeichnet, um daraus die Periodendauer T_S zu ermitteln.

Die nichtlineare Gleichung (4.9) wird vereinfacht, indem nur Auslenkungen bis zu 30 ° berücksichtigt werden. Dadurch kann mit hinreichender Genauigkeit die Sinusreihenentwicklung nach dem ersten Glied abgebrochen werden. Es ergibt sich

die linearisierte Form zu

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \varphi = 0, \tag{4.18}$$

wobei ω die Eigenkreisfrequenz für das Fahrzeug ist und mit $\omega = 2\pi/T_S$ berechnet werden kann. Sie ist für das jeweilige System bezeichnend und bleibt konstant.

$$\omega = \sqrt{\frac{m_{FZ} g l}{I}} \qquad \rightarrow \qquad I = \frac{m_{FZ} g l}{\omega^2} \qquad \rightarrow \qquad I = \frac{m_{FZ} g l}{\left(\frac{2\pi}{T_S}\right)^2} \tag{4.19}$$

Das gewünschte Massenträgheitsmoment I kann nun bei bekannter Gesamtmasse m_{FZ}, bekanntem Abstand l des Massenmittelpunktes zum Drehpunkt und Periodendauer berechnet werden.

Ein Fahrzeug ohne Erregung vom Prüfstand P2 soll berechnet werden. Die Gesamtmasse von $m_{FZ} = 462\,kg$ wurde gewogen. Um den Massenmittelpunktsabstand l zur Drehachse zu bestimmen, wurde das Fahrzeug zunächst in die Horizontale gebracht. Dann folgte das Abstützen der Klemme auf einer Auflagefläche, und zuletzt wurde das Gewicht von $m_A = 322\,kg$ an einem gemessen Abstand $a = 1.65\,m$ zum Auflagepunkt quantifiziert. Dann ergibt sich der Massenmittelpunktsabstand l zu

$$l = \frac{m_A a}{m_{FZ}} = \frac{322\,kg \cdot 1.65\,m}{462\,kg} = 1.15\,m. \tag{4.20}$$

Bei einer gemessenen Periodendauer von $T_S = 2.72\,s$ ergibt sich dann das Massenträgheitsmoment mit Gleichung (4.19) zu $I = 977 kgm^2$.

5 Prüfstand P1

5.1 Prüfstandskonzept

Um die verschiedenen Seilmodelle des Arbeitspaketes AP1 (siehe Kapitel 1.1.1) validieren zu können, muss ein Prüfstand entwickelt und gebaut werden. Dieser soll es ermöglichen, die Biege-, Torsionssteifigkeiten und Dämpfung von Seilen messtechnisch zu ermitteln. Das gelingt durch die Eruierung der Phasengeschwindigkeit einer von der Erregereinheit induzierten Welle durch deren Messung an zwei Messpositionen (siehe Abbildung 5.3). Aus den grafisch aufgezeichneten ort- und zeitversetzten Wellenpaketen kann die Phasendifferenz herausgelesen werden. Aus der Differenz der Messpositionen folgt die frequenzabhängige Phasengeschwindigkeit.

Die Berechnung der Biegesteifigkeit ergibt sich anschließend mit der Vorspannkraft S und einer längenbezogenen Masse μ zu

$$EI = \frac{\mu \cdot \left[\left(2c^2 - \frac{S}{\mu}\right)^2 - \left(\frac{S}{\mu}\right)^2\right]}{16\pi^2 f^2}. \tag{5.1}$$

Aus der Gleichung (5.1) ist ersichtlich, dass sich im Seil spannungsabhängige Biegesteifigkeiten ergeben, die Dispersionserscheinungen verursachen. Diese äußern sich im Auseinanderlaufen des Wellenpaketes, welches durch die unterschiedlichen frequenzabhängigen Phasengeschwindigkeiten der Einzelwellen des Wellenpaketes hervorgerufen wird.

Es soll im Zuge des Forschungsprojektes ein Seilmodell erstellt werden, welches die Biegesteifigkeit als Funktion der Konstruktionsart des Seiles, der Seilspannung und der Seilkrümmung angibt. Mithilfe dieser Modelle können dann Dispersionskurven (siehe Abbildung 5.1) für die Seile erstellt werden, die der dynamischen Simulation der Fahrzeuge bei verschiedenen Seilanwendungen dienen.

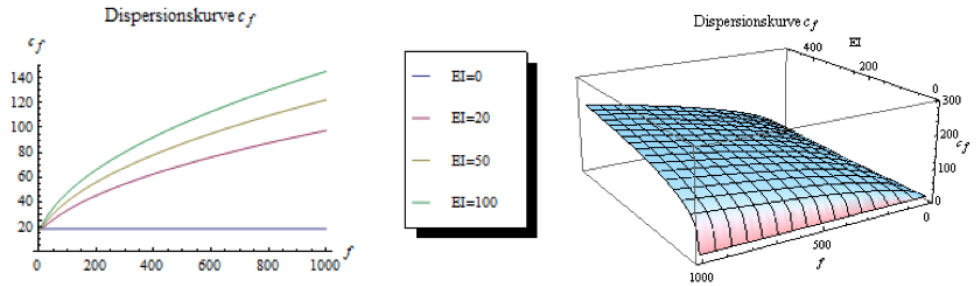


Abbildung 5.1: Dispersionskurve des Seils

5.1.1 Anforderungsliste

Doppelmayr / TU WIEN	***Anforderungsliste für den Prüfstand P1***	Seite 1 von 1
Änderungen	*F* / *W* Anforderungen	Verantw.
		Tschaikner
		1. Konstruktion
		Seil
	F	Länge: 120 m
	F	Durchmesser: 45 mm
	F	Machart: 6x36 Warrington Seal
		Einspannung
	W	Vorspannkraft: 0-360 kN
	F	Festabspannung: Fixe Einspannung an beiden Enden
		2. Schwingerregung
	F	Erregungsmöglichkeit mittels Shaker, Niederspannvorrichtung, Hebelarm und Hammer
	F	Torsions- und Transversalerregung
	W	Einfacher Aufbau und Wechsel der Erregungsmöglichkeiten
		3. Messsensorik
	F	Optische Messung der Seilbewegung an zwei Stellen
	W	Höhenverstellbare Vorrichtung zur genauen Positionierung der Sensoren entlang der Seilachse
	F	Laser-Messung des Seildurchhangs
	F	Synchronisation von Erregung und Messung
		4. Termin
		Arbeitsphase 1, November 2013
		5. Einsatzort
		Vorversuche
		Labor des Instituts für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik an der TU Wien
		Finale Versuche
		Fatzer AG Drahtseilwerk in Romanshorn
	1. Ausgabe, 20. Juli 2013	

Tabelle 4: Anforderungsliste für den Prüfstand P1

Die Anforderungsliste der Prüfstände (siehe Tabelle 4) wird erstellt, um einen klaren Überblick über die Ziele und Bedingungen zu erhalten. Dabei steht ein *F* für

eine Forderung, die unter allen Umständen erfüllt werden muss. Das bedeutet, dass ohne Erfüllung dieser Bedingungen, die vorgesehene Lösung keinesfalls akzeptabel ist. Die Wünsche W sollen nach Möglichkeit berücksichtigt werden sollen, eventuell mit dem Zugeständnis, dass ein begrenzter Mehraufwand dabei zulässig ist [vgl. Pahl et al., 2006, S. 213ff.].

5.1.2 Untersuchungen des Forschungsprojekts

Da es keine relevanten Voruntersuchungen und Forschungsergebnisse (insbesondere keine gemessenen Torsionswellengeschwindigkeiten) für die Projektierung dieses Projekts herangezogen werden können, waren Ausgangspunkte für die grundlegenden Überlegungen zur Konzeption des Prüfstands P1 das Modell (siehe Abbildung 5.2) aus dem Forschungsprojekt [Kartnig et al., 2011] und die mathematische Beschreibung des Seils in Kapitel 3. In diesem Matlab Simulink Modell aus dem Forschungsprojekt ist es möglich, jegliche Art der Anregung zu simulieren und die daraus resultierende Antworten des Seils in Abhängigkeit zu den untersuchenden Seilparametern zu erhalten.

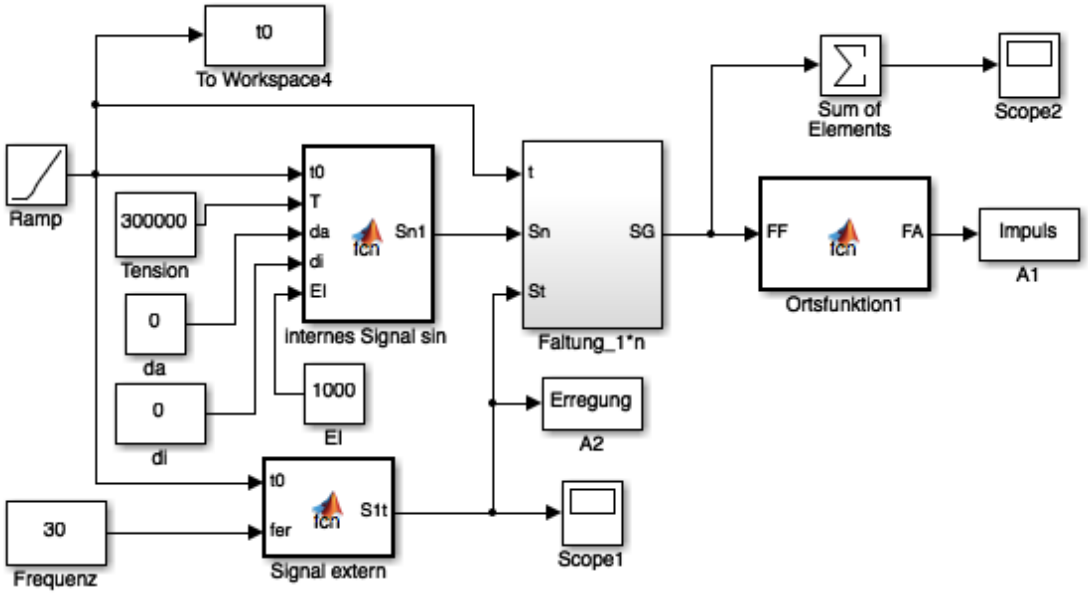


Abbildung 5.2: Prüfstand P1 modelliert in Matlab Simulink

Daraus konnten die benötigten Kräfte der Erregereinheit, die erforderlichen Messbreiten und die Empfindlichkeiten der optischen Messgeräte zur Messung der Welle vorab geschätzt werden.

5.1.3 Vorversuche an der TU Wien

Die erste Versuchsphase des Arbeitspakets AP1, der Vorversuch an der TU Wien, dient der Einstellung des Prüfstandes P1. Bestimmte Parameter der Erregereinheit wie Signalintensität und Signaldauer müssen auf das resultierende Wellenpaket und die Position des Messgerätes zur Erfassung der induzierten Wellenpakete abgestimmt werden. Diese Vorgehensweise ist erforderlich, da die zu messenden Parameter noch nicht bekannt sind. Die für die Auslegung des Prüfstandes P1 verwendeten Parameter stammen aus idealisierten Modellannahmen, die in der Realität davon abweichen können. An der TU Wien wurde ein $15\,m$ langer Prüfstand mit einer Festabspannung in Form von Lagerböcken, welche das Seil mithilfe einer Feder vorspannen, konstruiert (siehe Abbildung 5.3).

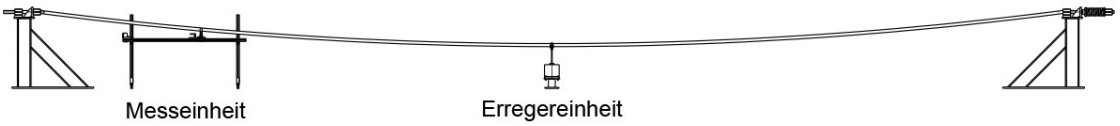


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung des Prüfstands an der TU Wien

Erregung

In der Mitte des Seils befindet sich die Erregereinheit (siehe Abbildung 5.3), die durch Umrüsten entweder eine Torsions- oder Transversalkrafteinleitung durchführt. Harmonische Erregung an der seilmittigen Messvorrichtung erfolgt mithilfe eines Shakers. Weitere Erregungsmöglichkeiten sind eine Niederspannvorrichung, welche zur Erregung ausgelassen wird, oder ein Hammer. Die Intensität des eingeleiteten Kraftsignals wird auf einem Niveau gewählt, das Verschiebungen der Einzeldrähte im Seil ausschließt, denn es soll die Biegesteifigkeit ohne Einfluss der Reibproblematik zwischen Haften und Gleiten ermittelt werden. Der Einfluss der Drahtverschiebungen und der daraus resultierende Amplitudenabfall könnte nach Möglichkeit über die zu ermittelnden Dämpfungskonstanten in der Materialdämpfung Berücksichtigung finden.

Messung

Die messtechnische Ermittlung der Parameter erfolgt, wie schon erwähnt, aus der frequenzabhängigen Phasengeschwindigkeit der induzierten Welle, durch Messen der Wellenpakete an zwei Messpositionen (siehe Abbildung 5.4 rechts). Diese Messung wird an zwei von der Messeinheit einstellbaren Punkten durchgeführt (siehe Abbildung 5.3).

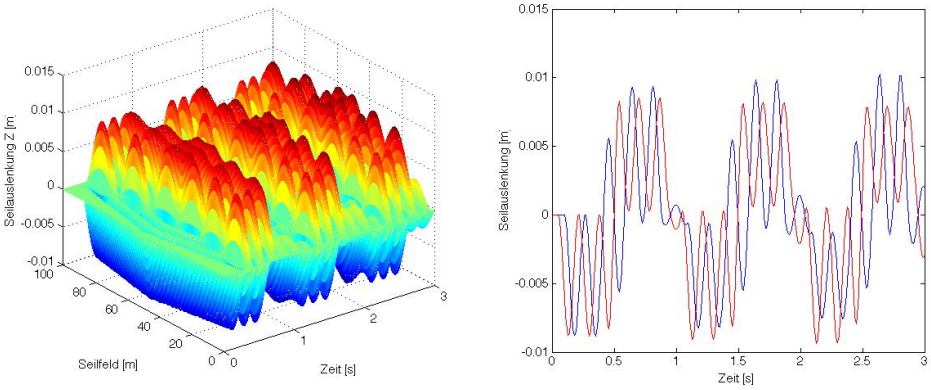


Abbildung 5.4: Wellenausbreitung bei mittiger Sinuserregung, Wellenmessung an 2 Punkten

Die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit bei Transversalwellen kann durch die Seilspannung verändert werden. Insbesondere die Torsionswellen weisen eine hohe Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit auf, die laut Seilhersteller mit ca. $c = 1200\,m/s$ deutlich höher ist als jene der Transversalwellen.

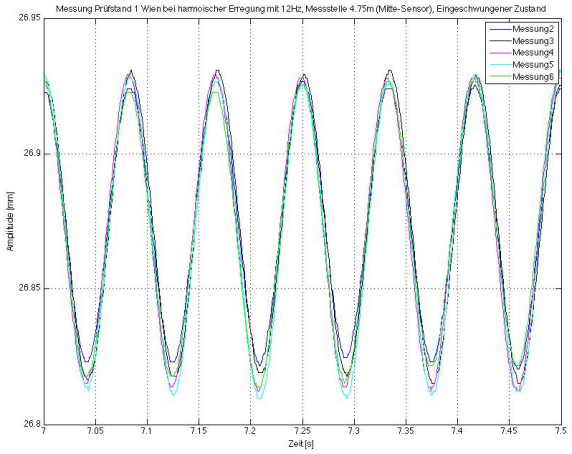


Abbildung 5.5: Präzision am Prüfstand an der TU Wien

An diesem Prüfstand konnte die Vorrichtung zur Torsions- und Transversalerregung mittels Shaker getestet und abgestimmt werden. Eine weitere wichtige Aufgabe hatten die Vorversuche an der TU Wien in Bezug auf das Testen der Erregereinheit und -vorrichtung und die Erprobung der Messgeräte. Die Prüfung der Präzision (siehe Abbildung 5.5), ein Kriterium der Qualität eines Messverfahrens, und das

erste Validieren des Seilmodells anhand des Messens des statischen Durchhangs wurde durchgeführt.

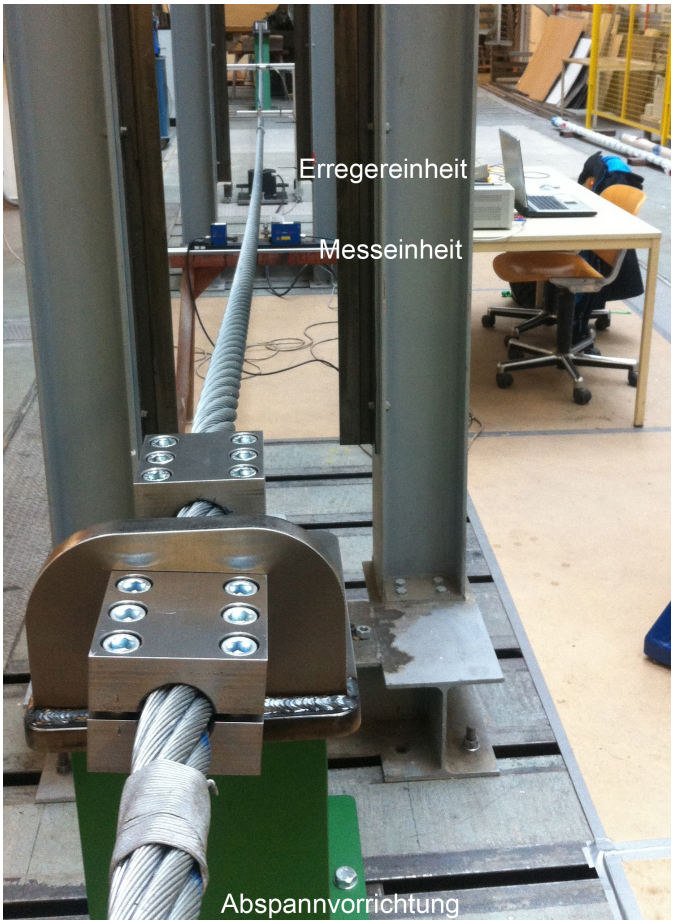


Abbildung 5.6: Prüfstand P1 an der TU Wien

5.2 Prüfstandsausführung

Das Unternehmen *Fatzer AG* besitzt in Romanshorn in der Schweiz ein Testgelände mit einem Seilprüfstand, worauf diese Untersuchungen durchgeführt werden. Der Ausgangspunkt sind zwei Einspannstellen für das Seil, die in einem Abstand von $120\,m$ zueinander angeordnet sind. Das verwendete gleichgeschlagene 6x36 Warrington Seal Stahldrahtseil wird im entspannten Zustand durch Unterstützungen in einer Horizontalen gehalten, bis durch das Hydraulikaggregat das Seil (siehe Abbildung 2.4) mit $320000\,N$ vorgespannt ist. Um die Versuche durchführen zu können, werden die Unterstützungsvorrichtungen pneumatisch entlüftet (siehe

Abbildung 5.7).

Abbildung 5.7: Prüfstand P1 bei der Firma Fatzer AG, wobei links die Unterstützungsvorrichtungen hochgefahren sind

Die Erweiterung des vorhandenen Prüfstands umfasst die Konstruktion der Erregervorrichtung, die im Kapitel 5.2.1 vorgestellt wird. Diese wird benötigt, um das Seil mit möglichst geringen Beeinflussungen gewünscht erregen zu können. Zudem sind noch geeignete Vorrichtungen für die Positionierung der optischen Sensoren zu konstruieren. Diese werden mithilfe des Aluminium-Profilsystem-Baukastens der Firma *item* hergestellt (siehe Abbildung 5.8). Der Sensor ist auf einem Schlitten gelagert, damit das gezielte horizontale Verfahren möglich ist. Die Position wird durch den Seilzugsensor genau aufgezeichnet. Leider konnte diese Vorrichtung jedoch nicht bis zum Prüftermin fertiggestellt werden.

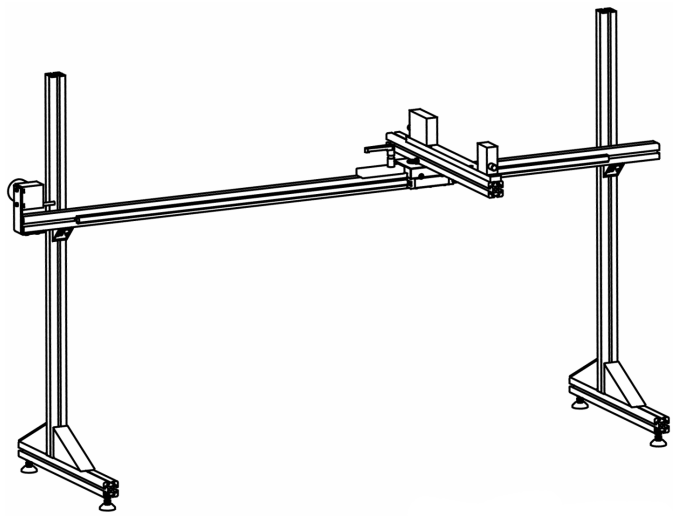


Abbildung 5.8: Messvorrichtung für die optischen Sensoren am Prüfstand P1

5.2.1 Erregervorrichtung

Wie in den Kapiteln 5.1.3 und 5.2 schon erwähnt wurde, benötigt dieser Prüfstand eine Konstruktion in der Seilmitte, um die gewünschten Erregung am Seil einzuleiten. Die Wellenausbreitungsmessung soll nach einer Anfangsauslenkungsfreigabe, nach einer Impulserregung und nach einer Anregung durch einen Shaker durchgeführt werden. Auch zwischen Torsions- oder Transversaleinleitung dieser Erregungsmöglichkeiten soll unterschieden werden. Zudem soll auch zur Nichtlinearitätenuntersuchung eine manuelle Verdrehung des Seils vorhanden sein. Einfacher Aufbau, schnelles Umrüsten auf die einzelnen Anregungsmöglichkeiten und eine möglichst geringe Beeinflussung des Seils sind von Vorteil.

Transversalerregung

Die Ausführung der Vorrichtung für die Transversalerregung (siehe Abbildung 5.9) besteht einerseits aus der Grundplatte, welche an die Gegebenheiten bei der Firma *Fatzer AG* angepasst wird, um dort am Prüfstandsgelände montiert werden zu können. Weiters benötigt diese Ausführung eine Seilklemme, an der ein Verbindungsstück, bestehend aus einem Kraftsensor zum Messen der Vorspannung und einem Teilstück mit einem eingespannten Draht. Durch dessen Durchtrennung wird die Anfangsauslenkung aufgegeben (siehe Abbildung 5.10).

Bei der Erregung durch einen Hammer wird das Verbindungsstück entfernt. Auch bei der Anregung durch den Shaker wird auf diese Verbindung verzichtet. Das Teilstück zwischen Seilklemme und Shaker wird ersetzt durch eine Kombination aus Impedanzmesskopf und einer durchgehenden Stange.

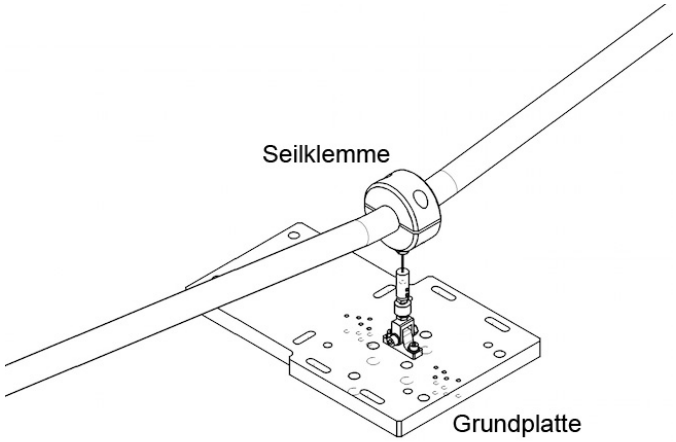


Abbildung 5.9: Erregervorrichtung für die Transversalanregung des Prüfstands P1

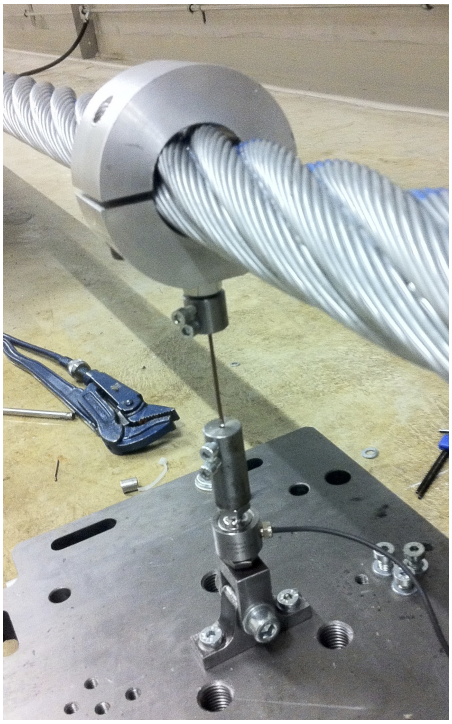


Abbildung 5.10: Erregervorrichtung für die Transversalanregung bei Anfangsauslenkungsfreigabe am Prüfstand P1

Torsionserregung

In Abbildung 5.11 ist die Erregervorrichtung in einer Torsionsausführung abgebildet. Die Grundplatte ist die gleiche wie beim Transversalaufbau. Die an dieser Platte angebrachte Säule ist höhenverstellbar und kann somit dem Seildurchhang angepasst werden.

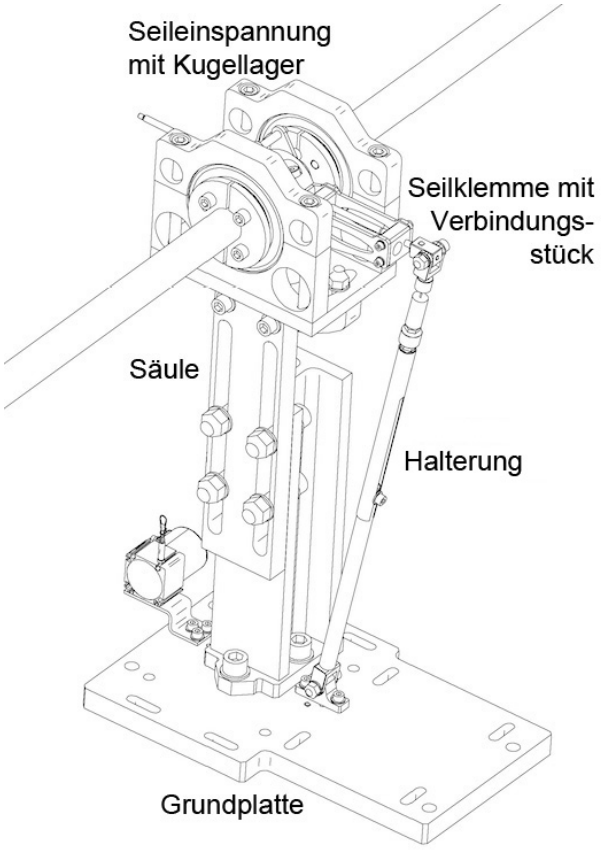


Abbildung 5.11: Erregervorrichtung für die Torsionsanregung des Prüfstands P1

Wichtig bei dieser Vorrichtung ist, dass eine reine Torsionseinleitung gewährleistet wird. Dazu ist eine Seileinspannung mit Kugellagern vorgesehen, welche hauptsächlich für die Einschränkung der translatorischen Freiheitsgrade sorgt. Jeweils vier Zentrierscheiben werden pro Rillenkugellager verbaut, um die Verbindung zwischen Vorrichtung und Seil zu realisieren. Verwendet werden zwei Kugellager 6020-2RS1 der Firma *SKF*.

Mit der Halterung kann das Seil in einer verdrehten Position gehalten werden, bevor es bei der Anfangsauslenkungsfreigabe durch das Durchtrennen eines Drahtes freigesetzt wird. In dieser Halterung findet sich der Kraftsensor wieder, welcher

die Vorspannung des jeweiligen Versuchs ausgibt. Die Seilklemme ist bei der Torsionseinleitung mit einem Verbindungsstück zwischen Halterung und Seilklemme ausgestattet. Die Messung der Bewegung des Seils wird durch einen Seilzugsensor aufgezeichnet, der mittels Halteblech an die Grundplatte verschraubt wird.

Bei der Impulserregung mit dem Hammer wird die Halterung entfernt. Auch bei der Erregung mithilfe des Shakers wird diese entfernt. Zusätzlich wird auch das Verbindungsstück zwischen der Seilklemme und der Halterung ausgetauscht, um eine einfache Verbindung des Shakes über den Impedanzmesskopf und eine Gewindestange zu ermöglichen.

Bei der Hysteresemessung wird eine Hebelverlängerung an der Seilklemme mit dem Verbindungsstück angebracht. Diese ist gelenkig an der Klemme gelagert, und über den Kraftaufnehmer wird die Verdrehung am Seil aufgetragen.

In Abbildung 5.12 sind verschiedene Aufbauarten bei der Torsionserregung abgelichtet. Im Kapitel 5.6 werden die benötigten Konfigurationen der Erregervorrichtung den einzelnen Messungen zugeordnet und ausführlicher beschrieben.

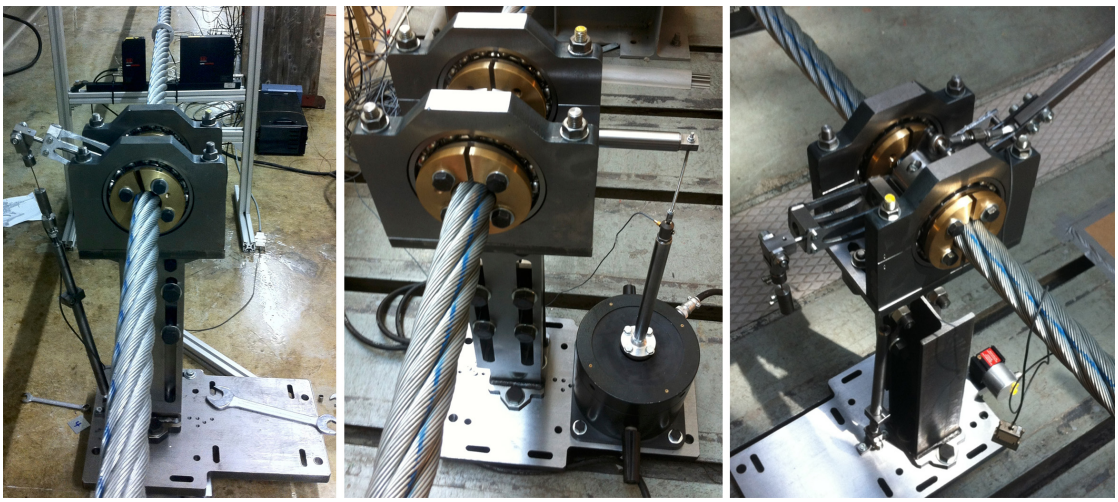


Abbildung 5.12: Aufbauarten der Torsionserregungvorrichtung: Anfangsauslenkung, Shakererregung, Hystereseuntersuchung

5.3 Messsensorik

5.3.1 Optische Sensoren

Für die Messung der Bewegung des Seils werden Optische Digitalmikrometer der Firma $\mu\varepsilon$ – *Micro Epsilon* verwendet. Einerseits kommt das Modell optoCONTROL 1202 mit einem Messbereich bis 98 mm und andererseits das Modell optoCONTROL 2500 mit einem Messbereich bis 34 mm zum Einsatz. Vorteile dieser Sensoren sind

die hohe Genauigkeit und Messrate, die Messbarkeit von Messobjekten ab 0,03 mm und die verschleißfreie Messung für den langlebigen Einsatz.

Messprinzip

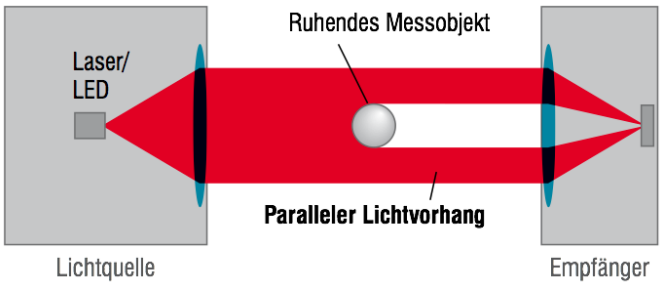


Abbildung 5.13: Schematische Darstellung des Messprinzips der optoCONTROL Digitalmikrometer [Micro-Epsilon Eltrotec GmbH, optoCONTROL]

Mikrometer von Micro-Epsilon arbeiten nach dem Durchlichtverfahren (ThruBeam). Dabei wird von einem Sender ein paralleler Lichtvorhang erzeugt, der auf eine Empfängereinheit trifft. Wird ein Messobjekt in den Lichtstrahl geführt, wird der Strahl unterbrochen (siehe Abbildung 5.13). Die daraus resultierende Abschattung wird von der Empfangsoptik erfasst und als geometrischer Wert ausgegeben [vgl. Micro-Epsilon Eltrotec GmbH, optoCONTROL].

Die in dieser Arbeit benutzten Modelle verwenden verschiedene ThruBeam-Technologien, um einerseits einen großen Messbereich (optoCONTROL 1202) und andererseits eine hohe Auflösung (optoCONTROL 2500) zu ermöglichen. An der Stelle der Erregung ist aufgrund der großen Auslenkungen Ersteres von Interesse. Je weiter man sich von der Krafteinleitungsstelle entfernt, wird die Eigenschaft der Auflösung von größerer Bedeutung.

5.3.1.1 optoCONTROL 1202 Bei den Laser-Mikrometern optoCONTROL 1202 tritt der Laserstrahl als parallel gerichtetes Laserlicht aus der Sendeoptik aus. In der Empfangsoptik trifft die Laserlinie auf einen CCD-Zeilen Empfänger. CCD-Bildsensoren bestehen aus einer Matrix lichtempfindlicher Fotodioden. Diese können rechteckig oder quadratisch mit Kantenlängen von 1 μm bis über 20 μm sein. Je größer die Fläche der Pixel, desto höher sind die Lichtempfindlichkeit und der Dynamikumfang des CCD-Sensors, aber die Bildauflösung verringert sich. Die während der Integrationszeit gesammelte Lichtmenge jedes dieser Empfangselemente wird als Analogspannung separat ausgelesen und nach erfolgter Analog-Digital-Wandlung als Digitalwert in einem Datenfeld gespeichert. Befindet sich ein nichttransparentes Messobjekt in der Laserlinie, so werden nur die Empfangselemente der Zeile

Abbildung 5.14: optoCONTROL 1202 am Prüfstand P1

beleuchtet, die außerhalb der Schattenzone des Messobjektes liegen. Da der Abstand der Pixel der CCD-Zeile bekannt ist, kann somit die Größe und Position des Messobjektes ermittelt werden (siehe Abbildung 5.14) [vgl. Micro-Epsilon Eltrotec GmbH, optoCONTROL].

Technische Daten	optoCONTROL 1202
Messbereich	98 mm
Abstand Sender – Empfänger	20-2000 mm
Auflösung	8 μm
Messrate	360 Hz
Ausgangsspannung	0-10 V

Tabelle 5: Technische Daten des optoCONTROL 1202

5.3.1.2 optoCONTROL 2500 Das Messgerät optoCONTROL 2500 basiert auch auf einem Lasermesssystem mit integrierter hochauflösender CCD-Kamera. Das ThruBeam Mikrometer misst nach dem Schattenwurfprinzip die Dimension eines Messobjektes oder die Lage einer Körperkante. Die mit verschiedenen wählbaren Messprogrammen gewonnenen Daten werden über eine analoge Schnittstelle ausgegeben. Dank der hohen Auflösung wird das Lasermikrometer besonders für

Abbildung 5.15: optoCONTROL 2500 am Prüfstand P1

präzise Mess- und Prüfaufgaben eingesetzt. Das Messgerät optoCONTROL 2500 besteht aus einer Sensoreinheit und einem Controller. Die Sensoreinheit umfasst eine Laserlichtquelle (Sender) und eine CCD-Kamera (Empfänger). Mit der Laserlichtquelle wird ein paralleler Lichtvorhang erzeugt. Die CCD-Zeile im Empfänger misst die durch Schattenwurf abgebildete Kontur des Messobjekts mit hoher Genauigkeit. Gesteuert und ausgewertet wird die Sensoreinheit durch einen intelligenten Controller mit Grafikdisplay zur Bedienung und Messwertanzeige (siehe Abbildung 5.15) [vgl. Micro-Epsilon Eltrotec GmbH, optoCONTROL].

Technische Daten	optoCONTROL 2500
Messbereich	$34\,mm$
Abstand Sender – Empfänger	150-300 mm
Auflösung	$1\,\mu m$
Messrate	$2{,}3\,kHz$
Ausgangsspannung	0-10 V

Tabelle 6: Technische Daten des optoCONTROL 2500

5.3.2 Kraftaufnehmer

Der Kraftsensor U9B der Firma *HBM* wird beim Versuch "Wellenausbreitungsmessung nach Freigabe einer Anfangsauslenkung" verwendet (siehe Kapitel 5.6.3). Durch ihn ist es möglich, die für die Versuchsauswertung benötigte Vorspannkraft des Seils aufzuzeichnen (siehe Abbildung 5.17).

Abbildung 5.16: Kraftaufnehmer U9B 5 kN [Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Montageanleitung]

Messprinzip

Abbildung 5.17: Kraftaufnehmer U9B am Prüfstand P1

Der Messkörper ist eine Membran, auf der vier Dehnungsmessstreifen (DMS) so installiert sind, dass zwei gestaucht und zwei gedehnt werden. Durch die in Messrichtung wirkende Kraft wird die Membran mit den DMS elastisch verformt. Die DMS

ändern proportional zu ihrer Längenänderung ihren ohm'schen Widerstand und verstimmen dabei eine Wheatstone-Brücke. Liegt eine Brückenspeisespannung an, liefert die Schaltung ein Ausgangssignal, das proportional zur Widerstandsänderung ist und somit auch proportional zur aufgebrachten Kraft. Die Kraft wird über zwei Gewindebolzen auf den Messkörper der U9B eingeleitet (siehe Abbildung 5.16) [vgl. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Montageanleitung, S. 30].

Technische Daten	U9B 5 kN
Nennkraft	5 kN
Nennkennwert	1 mV/V
Speisespannung	0,5-12 V
Ausgangsspannung	$\pm$0,5 V

Tabelle 7: Technische Daten des Kraftaufnehmers U9B

5.3.3 Impedanzmesskopf

Abbildung 5.18: Impedanzmesskopf 8001 [Brüel&Kjær, Impedance Heads]

Dieses Messgerät wird benötigt um die Regelung des Shakers zu ermöglichen. Es wird der Impedanzmesskopf 8001 (siehe Abbildung 5.18) der Firma *Brüel & Kjær* verwendet. Dieser kann gleichzeitig Beschleunigungen und angreifende Kräfte aufnehmen. Vorteil dieser Sensoren ist, dass keine Hilfsenergie vonnöten ist. Im Gegenzug dazu ist die Auswertung der ausgegebenen Ladung des Impedanzmesskopfs aber nur durch einen Ladungsverstärker möglich. Dieser wandelt die Ladung in eine proportionale Spannung um. Verwendet wird für die Messungen der piezoresistive Verstärker vom Typ 5134A vom Unternehmen *Kistler* (siehe Abbildung 5.19). Die in Spannungen umgewandelten Signale werden dann dem Regler Vibration Controller (siehe Kapitel 5.4.3) zugeführt, der nach einem Ist/Soll-Vergleich ein Drive Signal erzeugt, welches über einen Verstärker an den Shaker weitergegeben wird (siehe Abbildung 5.26).

Abbildung 5.19: Ladungsverstärker 5134A [vgl. Kistler Gruppe, Piezoresistiver Verstärker]

Messprinzip

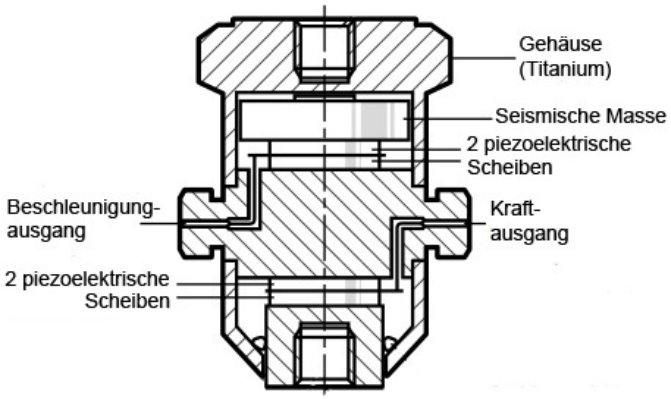


Abbildung 5.20: Schematischer Aufbau des Impedanzmesskopfs 8001 [vgl. Brüel&Kjær, Impedance Heads]

Der Sensor funktioniert nach dem piezoelektrischen Effekt. Dieser nützt die Änderung des spezifischen Widerstandes eines Halbleiterkristalls unter Druck- oder Zugbelastung.

Bei der Krafteinwirkung entsteht durch Gitterverschiebungen im Kristall eine Störung der sonst gleichverteilten Ladung proportional zur Kraft.

Bei der Beschleunigungsanwendung wirken aufgrund der Trägheit der seismischen Masse Scherkräfte auf das Piezokristall. Das Kristall erzeugt daraufhin eine Ladung, die der Beschleunigung proportional ist.

Diese Ladungsveränderungen werden von den Membranen zwischen den piezoelektrische Scheiben erfasst und anschließend ausgegeben (siehe Abbildung 5.20).

Technische Daten	Impedanzmesskopf 8001
Empfindlichkeit Beschleunigung	$3\,pC/ms^{-2}$
Empfindlichkeit Kraft	$370\,pC/N$
Maximale Beschleunigung	$20000\,m/s^2$
Maximale Spannung	$300\,N$
Maximaler Druck	$2000\,N$
Ausgangsspannung Ladungsverstärker	0-10 V

Tabelle 8: Technische Daten des Impedanzmesskopfs 8001

5.3.4 NI Data Acquisition

Das NI Data Acquisition der Firma *National Instruments* ist für die Messdatenerfassung der Prüfstande verantwortlich. Im Allgemeinen versteht man unter "messen" das quantitative Erfassen einer Größe, der sog. Messgröße. Präziser formuliert heißt "messen" eine zu messende Größe als Vielfaches einer allgemein anerkannten Einheitsgröße derselben physikalischen Dimension zu bestimmen, und zwar durch den experimentellen Vergleich mit einer Maßverkörperung dieser Einheit. Dabei bedienen wir uns so genannter Messgeräte. Diese helfen, insbesondere den Teil der Natur zu erschließen, für den unsere Sinne keine Empfindungen haben [vgl. Lerch, 2012, S. 3].

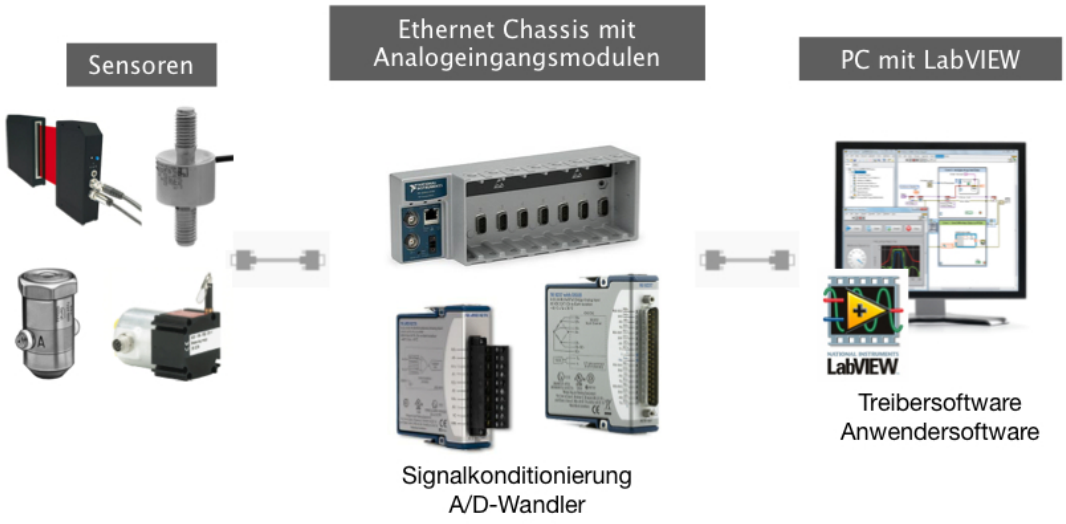


Abbildung 5.21: Aufbau der rechnerunterstützten Messdatenerfassung

Die Hauptaufgaben der, wie in dieser Arbeit verwendeten, rechnerunterstützten

Messdatenerfassung sind die korrekte Erfassung der Messdaten, ihre anschließende Auswertung inklusive Fehlerkorrektur sowie ihre Visualisierung und effiziente Speicherung (Archivierung) [Lerch, 2012, S. 497]. Die Übernahme von Messdaten in einen Digitalrechner erfolgt dabei mit den an den Rechnerbus angeschlossenen Eingangsmodulen mit Analog/Digital Wandler, die auf einem Ethernet Chassis angebracht sind (siehe Abbildung 5.21). Des Weiteren erfolgt in diesen Versuchen eine Online-Erfassung in der Anwendungssoftware, was bedeutet, dass die Messdaten direkt in den Rechner eingelesen werden.

Die wichtigsten Anforderungen an ein Messdatenerfassungssystem sind neben der korrekten 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 bezüglich der Software [Lerch, 2012, S. 498].

Ethernet Chassis NI cDAQ-9188

Abbildung 5.22: Ethernet Chassis NI cDAQ-9188

Das NI cDAQ-9188 ist ein CompactDAQ Ethernet Chassis mit acht Steckplätzen (siehe Abbildung 5.22) und ist für das dezentrale oder verteilte Messen von elektrischen und sensorischen Signalen konzipiert. Mithilfe von Modulen kann dieses Chassis verschiedene Sensormessungen mit Spannungs-, Strom- und Digitalsignalen gleichzeitig durchführen. Über eine Ethernet-Schnittstelle wird die Verbindungen mit dem Messcomputer realisiert.

Für die Messungen des Prüfstands P1 müssen neben den optischen Sensoren (siehe Kapitel 5.3.1), dem Kraftaufnehmer (siehe Kapitel 5.3.2), welcher ein Brückenmodul benötigt, auch ein Seilzugsensor (siehe Kapitel 6.3.2) aufgezeichnet werden. Der Impedanzmesskopf (siehe Kapitel 5.3.3) wird nur für den Regler Vibration Controller (siehe Kapitel 5.4.3) benötigt und damit nicht im Ethernet Chassis erfasst.

Beim Prüfstand P2 müssen vier Seilzugsensoren, die ein Analogeingangsmodul mit vier Kanälen belegen, und zwei Servoinklinometer (siehe Kapitel 6.3.1), für die

ein weiteres Eingangsmodul benötigt wird, installiert werden.

Daraus ergibt sich der Bedarf von *zwei Analogeingangsmodulen* mit je vier Kanälen und *einem Brückenmodul*. Diese werden nachfolgend beschrieben.

Analogeingangsmodul NI 9215

Das Modul NI 9215 verfügt über vier simultan abgetastete Analogeingangskanäle und einen A/D-Wandler. Die Auflösung des Wandlers wird durch die Anzahl der Bits bestimmt, die zur Digitalisierung des Eingangssignals herangezogen werden. Für den in diesem Modul verbauten 16-Bit-Wandler wird der gesamte Spannungsbereich von $10\,V$ durch 216 (65.536) diskrete digitale Werte abgebildet.

Technische Daten	NI 9215
Messtyp	Spannung
Signalkonditionierung	-
Kanäle	4
Auflösung	$16\,bit$
Sample Rate	$100\,kS/s$
Max. Eingangsspannung	$10\,V$

Tabelle 9: Technische Daten des Analogeingangsmoduls NI 9215

Brückenmodul NI 9237

Das Brückenmodul mit simultaner Abtastung verfügt über alle notwendigen Signalkonditionierungsfunktionen zur Versorgung und Messung von bis zu vier brückenbasierten Sensoren gleichzeitig. Zudem wird bei diesem Modul ein 37 Pin D-Sub-Anschlussblock NI CB-37F-LP verbaut, um eine einfache Anbindung von I/O-Signalen durch Schraubklemmenanschlüsse zu ermöglichen.

Technische Daten	NI 9237
Messtyp	Messbrücke
Signalkonditionierung	Brückenvervollständigung, Antialiasing-Filter
Kanäle	4
Auflösung	$24\,bit$
Sample Rate	$50\,kS/s$
Max. Eingangsspannung	$25\,mV/V$
Brückenkonfigurationen	Voll-, Halb-, Viertelbrücke

Tabelle 10: Technische Daten des Brückenmoduls NI 9237

Ethernet Chassis Konfiguration am Prüfstand P1

Es wird am Steckplatz 2 und 4 des Ethernet Chassis NI cDAQ 9188 jeweils ein Analogeingangsmodul NI 9215 verbaut (siehe Abbildung 5.23). Des Weiteren wird das Brückenmodul NI 9237 auf dem Steckplatz 8 installiert. Das erste Modul nimmt die zwei optischen Sensoren auf. Der Seilzugsensor wird mit dem Modul 4 abgedeckt. Das Brückenmodul ist für die Aufzeichnung des Kraftsensors verantwortlich. In Tabelle 11 ist die Belegung der Module 2 und 8 angeführt, wobei die Sensoren mit ihren Analogausgangsspannungen nach Pinbelegung aufgelistet sind.

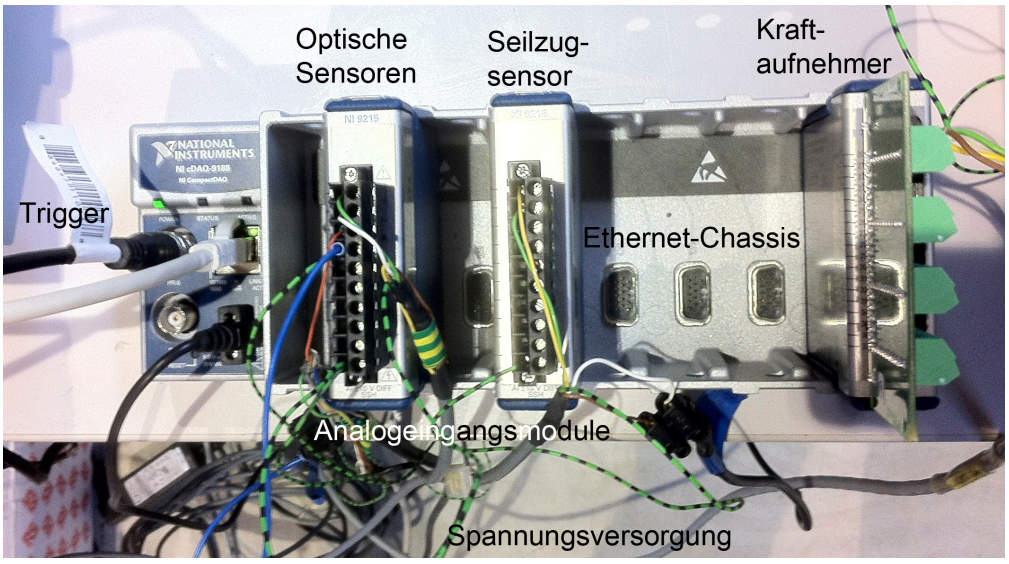


Abbildung 5.23: Angeschlossenes Ethernet Chassis mit Messwertkarten

Die Versorgung von 14-27 V Gleichspannung des Seilzugsensors sowie die Span-

nung von 15-30 V für die optischen Sensoren wird durch ein Laptop-Netzteil realisiert. Die erforderliche Speisespannung des Kraftaufnehmers von 0,5-12 V wird durch das Brückenmodul NI 9237 erzeugt.

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

Tabelle 11: Belegung der Module 2 und 4

Die Brückenmodulbelegung des Anschlussblocks wird in der Tabelle 12 mithilfe der Brückenschaltung (siehe Abbildung 5.24) verdrahtet, wobei AI+ und AI- dem Messsignal und RS+ und RS- der Speisespannung entsprechen.

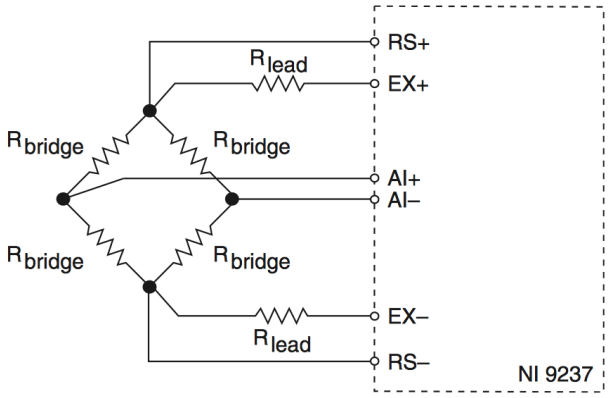


Abbildung 5.24: Brückenschaltung des Moduls NI 9237 [National Instruments, 2013, S. 13]

Kanal	Pin	Brückenmodul 8	
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 12: Belegung des Moduls 8

NI Measurement & Automation Explorer

Der NI Measurement & Automation Explorer (siehe Abbildung 5.25) ist ein Teil der Treibersoftware NI-DAQmx. Die zentrale Konfiguration der Hardwarekomponenten wird in einem Programm zusammengefasst. Mit diesem Werkzeug, welches standardmäßig bei allen Hardwareprodukten von NI mit der Treibersoftware mitgeliefert wird, werden Hardware-Support und Datenaufbereitung so erleichtert, dass zu einem späteren Zeitpunkt bei der Programmierung in LabVIEW keine Konfiguration nötig ist [vgl. Jamal and Hagestedt, 2004, S. 361].

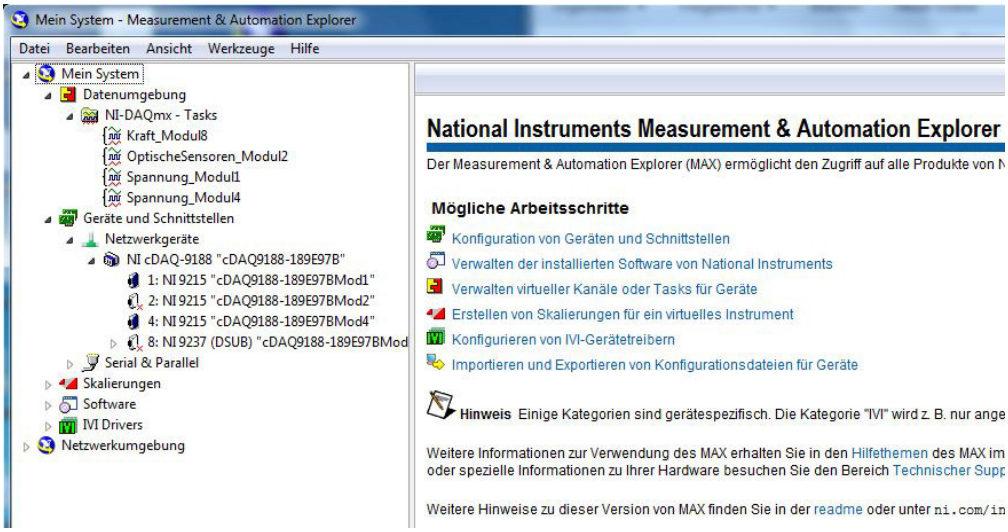


Abbildung 5.25: NI Measurement & Automation Explorer

Zusätzlich können hier auch Tasks erstellt werden. Um den Kerngedanken dieser Tasks zu verstehen, muss zunächst die Unterscheidung zwischen einem physikali-

schen und einem virtuellen Kanal vorgenommen werden. Ein physikalischer Kanal ist ein Anschluss oder Steckkontakt an den Messkarten, woran ein analoges oder digitales Signal gemessen oder erzeugt wird. Ein virtueller Kanal hingegen ist die Darstellung eines physikalischen Kanals und dessen Einstellungen, z. B. der Pinbelegung, der Art der Messung oder der Signalerzeugung und Skalierungsinformationen.

Die Zuweisung dieser Einstellungen, um einem virtuellen Kanal zu erstellen, erfolgt je nach Aufbau des LabVIEW Messprogramms entweder im NI Measurement & Automation Explorer – wie in unserem Fall, indem ein NI-DAQmx Task im Menüpunkt *Datenumgebung* erstellt wird – oder im LabVIEW Messprogramm, bei dem die benötigen Informationen durch einstellbare Blöcke bereitgestellt werden.

Ein Task stellt virtuelle Kanäle mit Angaben zum Timing, Trigger und anderen Einstellungen dar. In einem Task sind also alle Parameter einer Messung zusammengefasst. Die Einstellungen eines Tasks sind veränderbar und lassen sich speichern, damit dieser in LabVIEW verwendet werden kann.

Nach dem Verkabeln der einzelnen Sensoren werden im NI Measurement & Automation Explorer (siehe Abbildung 5.25) das Ethernet Chassis und die entsprechenden Messwertkarten im Menü *Geräte und Schnittstellen / Netzwerkgeräte* hinzugefügt. Anschließend folgt die Einrichtung der drei benötigten Tasks *Optische_Sensoren2*, *Spannungs_Modul4* und *Kraft_Modul8* im Untermenü *Datenumgebung / NI-DAQmx-Tasks* für die Module dieses Prüfstands. An den Messwertkarten sind Spannungen am Eingang zu messen, die je nach angeschlossenem Sensor (Ausgangsspannungen dieser sind in Tabelle 11 und 12 aufgelistet) unterschiedlich sein können. Eine weitere Einstellung der Tasks führt dazu, dass die Triggerung dem Messprogramm überlassen wird.

Somit sind alle Vorbereitungen getroffen, um eine reibungslose Messaufzeichnung in LabVIEW zu gewährleisten.

5.4 Schwingerregung

Der grundlegende Aufbau der Schwingerregung beim Prüfstand P1 ist aus der Abbildung 5.26 ersichtlich. Dieser Aufbau entspricht einem typischen einschleifigen Regelkreis. Die Aufgabe dieses Kreises besteht darin, dass die Regelgröße (am Impedanzmesskopf gemessen) der gegebenen Führungsgröße (vom PC vorgegeben) möglichst gut folgt. Diese Aufgaben übernimmt der Vibration Controller, indem er die Regel- mit der Führungsgröße vergleicht und ein entsprechendes Drive Signal (Stellgröße) ausgibt. Wünschenswert ist, dass die unangenehmen Auswirkungen von Stör- und Regelgrößen möglichst gering sind.

Grund für den Einsatz des Shakers ist, dass durch diesen die gezielten Anregungen des Systems mit gewünschter Signalform (Sinus-, Rausch-, Stoßtests usw.) und Frequenz bzw. Frequenzbereich möglich ist. Weiters kann mehr Energie in die Struktur eingeleitet werden, und der menschliche Faktor (bei der Impulserregung durch

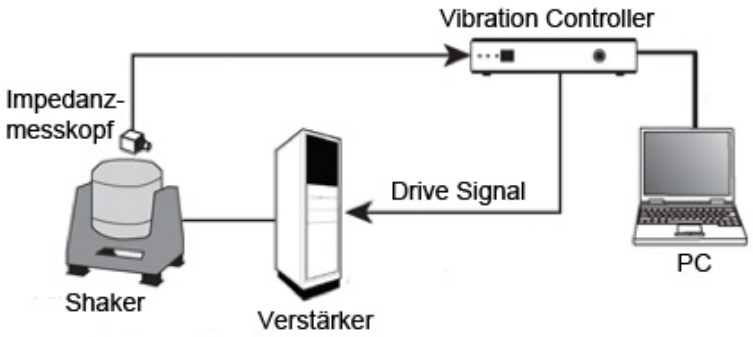


Abbildung 5.26: Regelkreis Vibration Controller, Verstärker und Impedanzmesskopf [vgl. Brüel&Kjær, VC-LAN Vibration Controller, S. 10]

einen Hammerschlag), welcher das Messergebnis verfälschen kann, ist eliminiert. Die genaue Charakterisierung des dynamischen Verhaltens des Seils wird aufgrund der großen Struktur am Prüfstand P1 vor allem bei tiefen Frequenzen durch den Shaker erleichtert.

5.4.1 Schwingerreger

Abbildung 5.27: Brüel & Kjær Shaker 4808 [Brüel&Kjær, PM Vibration Exciter Type 4808, S. 1]

Zum Einsatz kommt der Shaker 4808 des Unternehmens *Brüel & Kjær* (siehe Abbildung 5.27). Vereinfacht ausgedrückt dient ein elektrodynamischer Schwingerreger (Shaker) dazu, Energie (elektrischen Wechselstrom) in eine mechanische Bewegung zu transformieren. Die technischen Daten des Shakers sind in Tabelle 13 aufgelistet.

Technische Daten	Brüel & Kjær 4808
Kraftbereich	0-112 N
Frequenzbereich	5-10000 Hz
Maximale Beschleunigung	700 m/s^2
Maximale Geschwindigkeit	1,4 m/s
Maximale Auslenkung	12,5 mm
Maximaler Eingangsstrom	15 A
Gewicht	35 kg

Tabelle 13: Technische Daten des Brüel & Kjær 4808

Funktionsweise

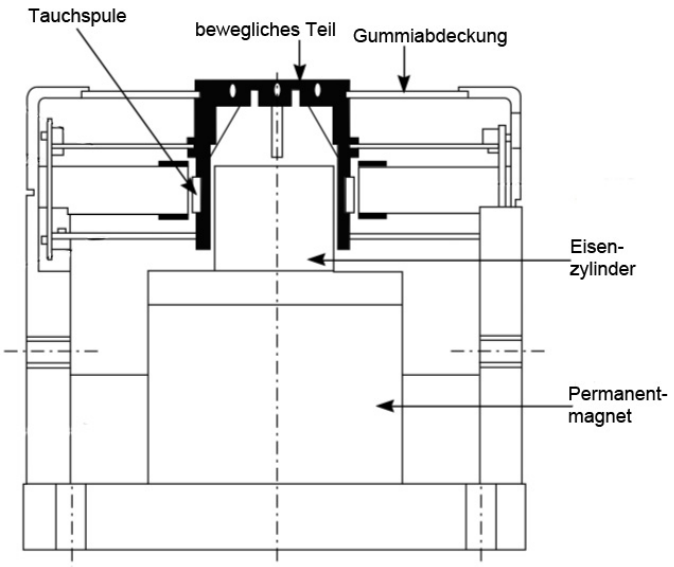


Abbildung 5.28: Aufbau des Schwingerregers Brüel & Kjær 4808 [vgl. Brüel&Kjær, PM Vibration Exciter Type 4808, S. 9]

Die Arbeitsweise entspricht der eines Lautsprechers (siehe Abbildung 5.28). Die Schwingbewegung entsteht durch die Wechselwirkung zwischen dem elektrischen Strom durch die Tauchspule und einem magnetischen Feld. Beim Schwingerreger 4808 wird dieses Feld mithilfe eines Permanentmagnets erzeugt. Die Kraft zur Beschleunigung des beweglichen Teils, bestehend aus einem Zylinder und einer umwickelten Tauchspule, ist beim Drahtverlauf senkrecht zum Magnetfeld, dem Spulenstrom, der magnetischen Flussdichte und der Länge des Leiters im magnetischen

Feld proportional.

Anhand der elektrischen Stromstärke lässt sich also die Schwingung des beweglichen Teils steuern. Die maximal erreichbare Beschleunigung ist von der Stromstärke und der zu bewegenden Gesamtmasse abhängig. Bei tiefen Frequenzen werden jedoch die Grenzen der Schwinggeschwindigkeit und der Auslenkung eher erreicht als die der Beschleunigung.

5.4.2 Verstärker

Um das Drive Signal des Vibration Controllers für den Brüel & Kjær Shaker 4808 anzupassen, wird der eigens für diesen Schwingerreger entwickelte Leistungsverstärker Brüel & Kjær 2712 verwendet (siehe Abbildung 5.29). Hauptaufgabe des Verstärkers ist, am Ausgang mehr Signalleistung abzugeben als am Eingang aufgenommen wurde. Dazu wird Strom von einer externen Quelle (Stromnetz) so geformt, dass er den zeitlichen Verlauf des Eingangssignals nachbildet. Somit ist das Ausgangssignal ein Abbild des Eingangssignals, nur auf einem höheren Leistungsniveau. Vereinfacht kann gesagt werden, dass ein Verstärker wie ein elektrisch vom Eingangssignal steuerbarer Widerstand für die vom externen Strom gespeiste Seite arbeitet. Ein Qualitätsmerkmal ist eine geringe Verzerrung, das bedeutet, die Linearität der Verstärkung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal ist ausgeprägt. Wünschenswert ist auch, dass der Verstärker auf einen möglichst hohen Wirkungsgrad kommt, um unerwünschte Wärmeentwicklung zu vermeiden.

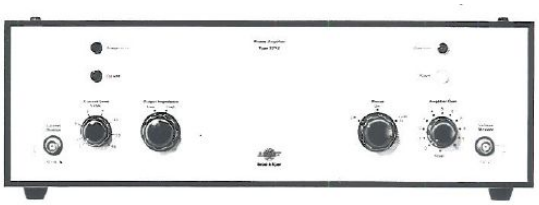


Abbildung 5.29: Brüel & Kjær Verstärker 2712 [Brüel&Kjær, Power Amplifier Type 2712, S. 1]

Technische Daten	Brüel & Kjær 2712
Maximale Ausgangsleistung	180 W
Maximale Ausgangsspannung	12 V
Maximaler Ausgangsstrom	15 A
Frequenzbandbreite	40-10000 Hz

Tabelle 14: Technische Daten des Brüel & Kjær 2712

5.4.3 Vibration Controller

Abbildung 5.30: Brüel & Kjær Vibration Controller 7541 [Brüel&Kjær, VC-LAN Vibration Controller, S. 4]

Die Aufgaben des Schwingungsreglers Vibration Controller 7541 der Firma *Brüel & Kjær* am Prüfstand P1 sind es, ein Referenzsignal (Drive Signal) zu generieren, das Regelsignal (am Impedanzmesskopf) aufzunehmen und diese Signale miteinander zu vergleichen. Mithilfe dieser Gegenüberstellung erzeugt der Regler letztendlich ein korrigiertes Drive Signal für den Shaker, damit sich die gewünschte Schwingung einstellt (siehe Abbildung 5.26 und 5.30).

In der Software Vibration Control (siehe Kapitel 5.4.4) für diesen Regler wird die Schwingungsform, Amplitude und Frequenz eingestellt. Der Vibration Controller 7541 erzeugt dann das entsprechende Signal. Nachdem dieses den Verstärker 2712 passiert hat, regt es den Shaker zum Schwingen an. Die Bewegungen des Shakers werden anschließend durch den Impedanzmesskopf aufgezeichnet und im Vibration Controller mit dem gewünschten Signal verglichen. Durch bestimmte Regelalgorithmen wird das Drive Signal dann so abgeändert, bis sich die gewünschte Schwingung eingestellt hat (siehe Abbildung 5.26).

Technische Daten	Brüel & Kjær 7541
Verbindung mit PC	Ethernet
Maximale Eingangsspannung	$20\,V$
Maximale Ausgangsspannung	$10\,V$
Maximaler Ausgangsstrom	$25\,mA$
Frequenzbandbreite	0-46000 Hz

Tabelle 15: Technische Daten des Brüel & Kjær 7541

5.4.4 Erregerprogramm Vibration Control

Das Erregerprogramm Vibration Control der Firma *Brüel & Kjær* ist eine Software zur Automatisierung von Schwingprüfungen. Damit ist es möglich, Tests gleicher oder auch unterschiedlicher Anregungsarten beliebig oft hintereinander ablaufen zu lassen. Anhand von Schwingprüfungen werden die dynamischen Eigenschaften einer Struktur experimentell ermittelt. Die Reaktion der Struktur auf die Erregerkraft ist von Interesse, da sich dadurch die Fähigkeit der Struktur zur Übertragung bzw. Dämpfung von Schwingungen bestimmen lässt. Außerdem können gegebenenfalls auch die Eigenschwingungsformen und Eigenfrequenzen des Systems beschrieben werden.

Wird der Regler Vibration Controller mit dem PC über das Ethernet verbunden, muss dieser mithilfe der TCP/IP Protokolle im *Front-End System Configuration* Menü gefunden und einmalig eingerichtet werden (siehe Abbildung 5.31 rechts). Ist das durchgeführt, kann das Programm gestartet werden. Es muss nun eine *Microsoft SQL Server* Datenbank eingerichtet werden, in der Konfigurationen und Messdaten gespeichert werden (siehe Abbildung 5.31 links).

Um eine neue Untersuchung zu starten, sollte zuerst der Impedanzmesskopf eingerichtet werden. Das wird im Menü *Channel Setup* durchgeführt (siehe Abbildung 5.32). Es werden dort der Eingangskanal, die Messgröße und Einheit, die Empfindlichkeit des Sensors sowie die maximal zu erwartende Spannung eingetragen.

Wenn im Programm die Schaltfläche *New Test* angeklickt wird, kommt das *Wizard for a Front-End New Test*-Menü zum Vorschein (siehe Abbildung 5.33), worin verschiedene Anregungsarten wählbar sind. Auf die für den Prüfstand P1 wichtigen Erregungsmöglichkeiten wird hier kurz eingegangen.

- Random: Rauschen ist eine der beiden Grundanregungsarten in der Schwingprüfung. Bei diesem Test wird das Prüfsystem für eine bestimmte Zeit mit einem Rauschsignal mit einem definierten Leistungsdichtespektrum angeregt.
- Swept Sine: Sinus ist die zweite Grundanregungsart in der Schwingprüfung.

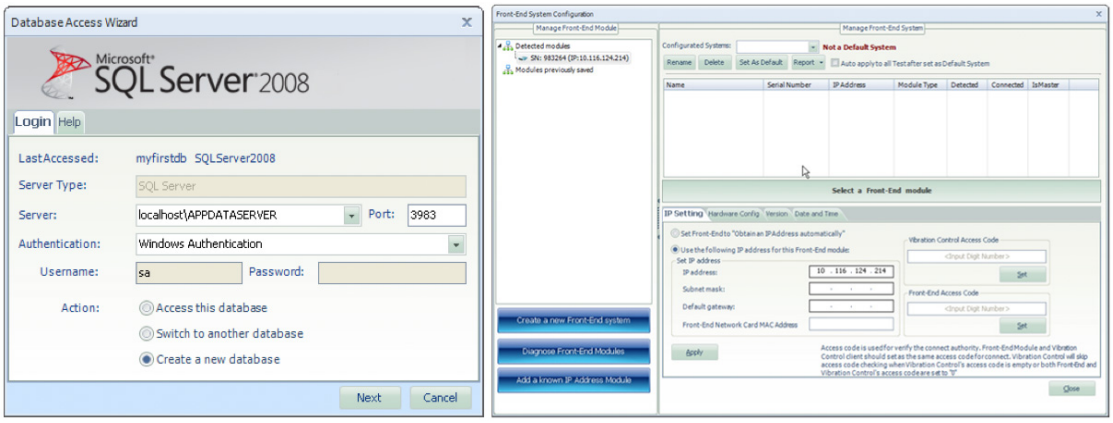


Abbildung 5.31: Einrichten einer Datenbank; Verbindung des Vibration Controller mit dem PC [Brüel&Kjær, 2012, S. 13ff.]

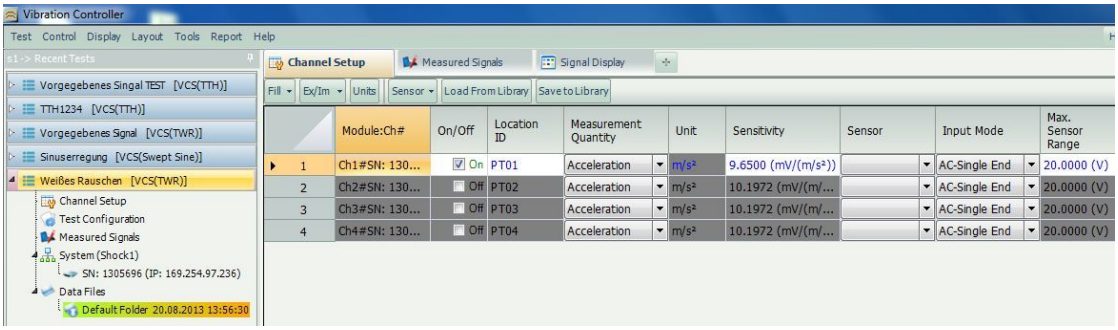


Abbildung 5.32: Einrichten des Sensors

Bei dieser Anregungsart wird mit einem sinusförmigen Signal erregt, welches mit einer definierten Sweepgeschwindigkeit für eine vorgegebene Anzahl von Durchläufen in einem definierten Frequenzbereich gleitet. Auch das Erregen mit einer Sinusfrequenz ist möglich.

- Classic Shock: Schocktests simulieren Belastungen am Prüfling, wie sie beim Seil zum Beispiel während des Laufens über eine Rollenbatterie der Fall ist. Angeregt wird bei diesem Test mit einer der klassischen Pulsformen, wie dem Halbsinus, Haversine, Sägezahn, Dreieck, Rechteck oder Trapez.

- Transient History Control: Bei dieser Anregungsart können beliebige Zeitsignale eingelesen und nachgefahren werden.

Wurde ein Test ausgewählt, müssen im Fenster *Test Configurations* die angezeigten Menüpunkte zur Einstellung der Anregung durchgegangen werden (siehe

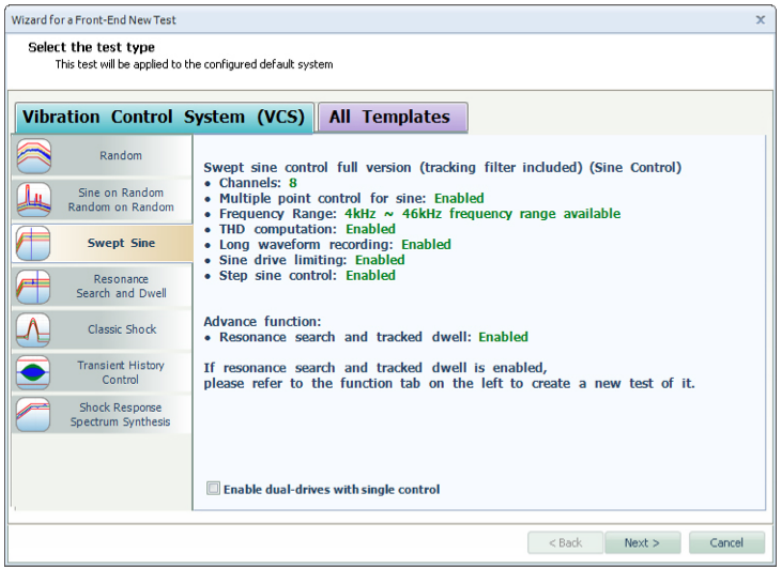


Abbildung 5.33: Menüfenster zum Erstellen einer neuen Untersuchung

Abbildung 5.34). In dem *Schedule and Profile*-Register sind die Einstellungen für den Testablauf zu tätigen. Neben der Amplitude, Frequenz und Wiederholung der Durchläufe kann hier auch der Befehl zur Ausgabe eines digitalen Triggers stehen. Wichtig ist, im Menü *Shaker Parameters* die passenden technischen Daten (siehe Tabelle 13) des Schwingerregers einzugeben, da sonst der Verstärker aufgrund der zu hohen Anforderungen abschaltet oder die Software zu früh begrenzt. Der Reiter *Test Parameters* bietet Sicherheits- und Kontrolleinstellmöglichkeiten.

Synchronisation

Das Synchronisieren von Geräten ist ein wesentlicher Bestandteil jeder korrekten Messung. Der einfachste Weg, unterschiedliche Geräte eines Messsystems zu synchronisieren, besteht darin, einen gemeinsamen Takt und Trigger zu nutzen. Dadurch können Ereignisse zeitlich korreliert bzw. aufeinander abgestimmt werden.

Die Unterpunkte *Event Action Rules* (siehe Abbildung 5.35 links) und *Miscellaneous* (siehe Abbildung 5.35 rechts) des *Test Configurations*-Fensters, werden für die Triggereinrichtung benötigt. Beim ersten Menüpunkt wird die Art des digitalen Triggersignals eingestellt. Der zweite ist für die Einrichtung des Befehls zuständig. Dieser wird unter einem gewünschten Namen mit der Funktion erstellt. Nachdem der Ausgangskanal 1 zugewiesen wurde, kann dieser Trigger, wie schon oben erwähnt, in den *Schedule and Profile*-Testablauf implementiert werden.

Um mit den Triggern das Ethernet Chassis (siehe Kapitel 5.3.4) ansteuern zu können, benötigt man eine entsprechende Hardware. Der Vibration Controller

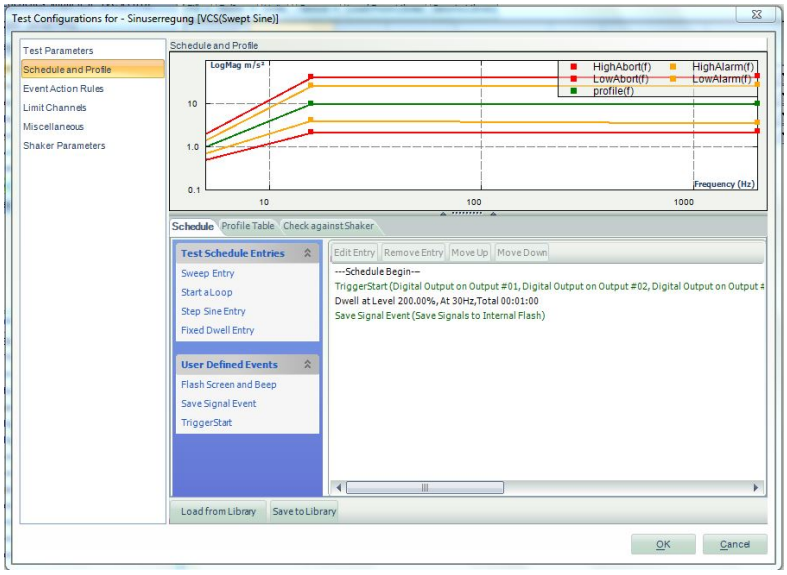


Abbildung 5.34: Test Configurations Fenster

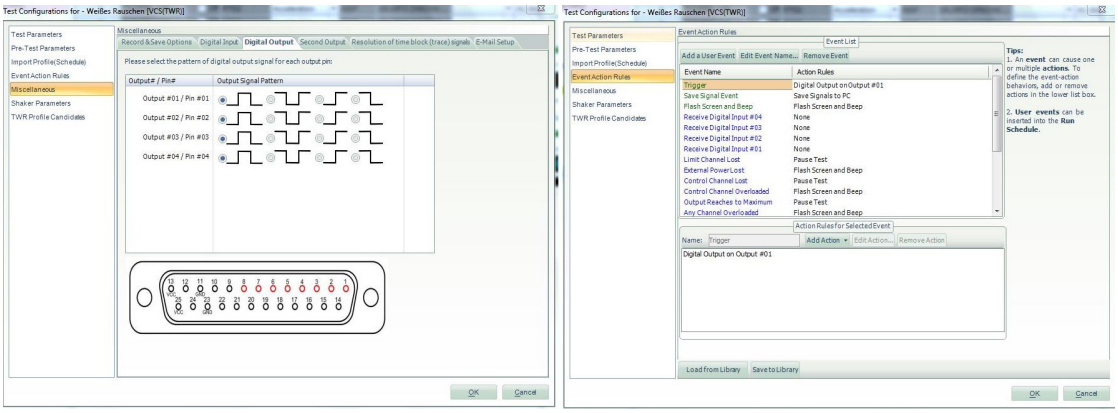


Abbildung 5.35: Einrichten des Triggers

verfügt über einen 25-poligen D-Sub-Stecker (DB-25) mit je 8 digitalen Ein- und Ausgängen. Wie im Schaltplan in Abbildung 5.36 zu sehen ist, benötigt es eine externe Spannungsquelle von $12\,V$, um einen Trigger nutzen zu können. Es muss ein Kabel gefertigt werden mit einem DB-25-Stecker für den Vibration Controller und einem BNC-Ende für das Ethernet Chassis, wobei am DB-25 Stecker auch eine Versorgung vorhanden sein muss. Erreicht wird das mit einem Netzteil, dessen Anschlüsse an die entsprechenden Pins EX_PWR und EX_GND gelötet werden. Da der digitale Trigger 1 in der Software konfiguriert wurde, wird zudem noch der Pin 1 verlötet. Er bildet zusammen mit EX_GND die Triggerleitung.

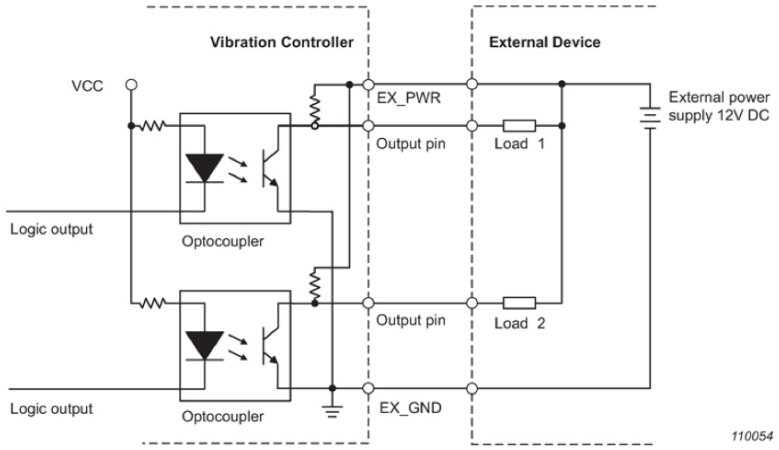


Abbildung 5.36: Ausgangsschaltung des Vibration Controllers 7541 [Brüel&Kjær, 2012, S. 36]

5.5 Messaufzeichnung in LabVIEW

5.5.1 Messprogramm

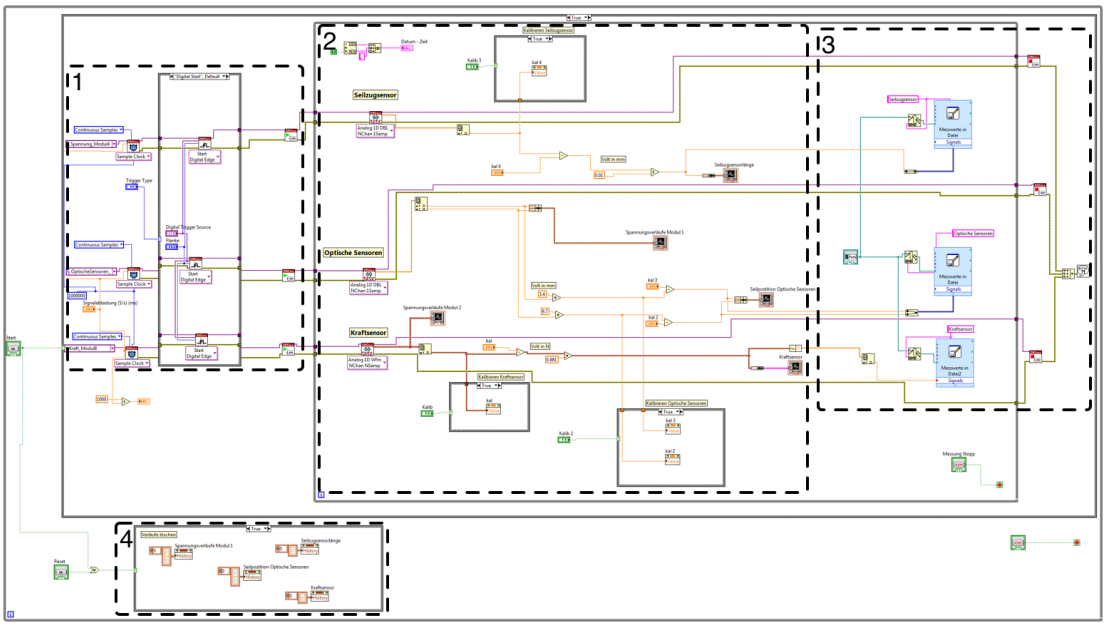


Abbildung 5.37: Blockdiagramm des Messprogramms für den Prüfstand P1

Am Prüfstand P1 werden durch das LabVIEW Messprogramm die optischen Sensoren, ein Seilzugsensor und der Kraftaufnehmer ausgewertet. Die Spannungen

der Sensoren werden durch geeignete Umrechnung in die gewünschten Einheiten konvertiert und in eine Excel-Datei ausgelesen. Der synchronisierte Messbeginn mit dem Start der Erregung durch die Software Vibration Control ist durch dieses Messprogramm abgedeckt (siehe Kapitel 5.4.4 – Synchronisation). Die Nullstellung der Sensoren ist erforderlich, um die Software mit den Gegebenheiten am Prüfstand P1 abzugleichen. In der Abbildung 5.37 ist das Blockdiagramm des Messprogramms dargestellt. Unterteilt ist dieses in Abschnitte mit unterschiedlichen Aufgaben, welche nachfolgend im Detail beschrieben werden.

Abschnitt 1

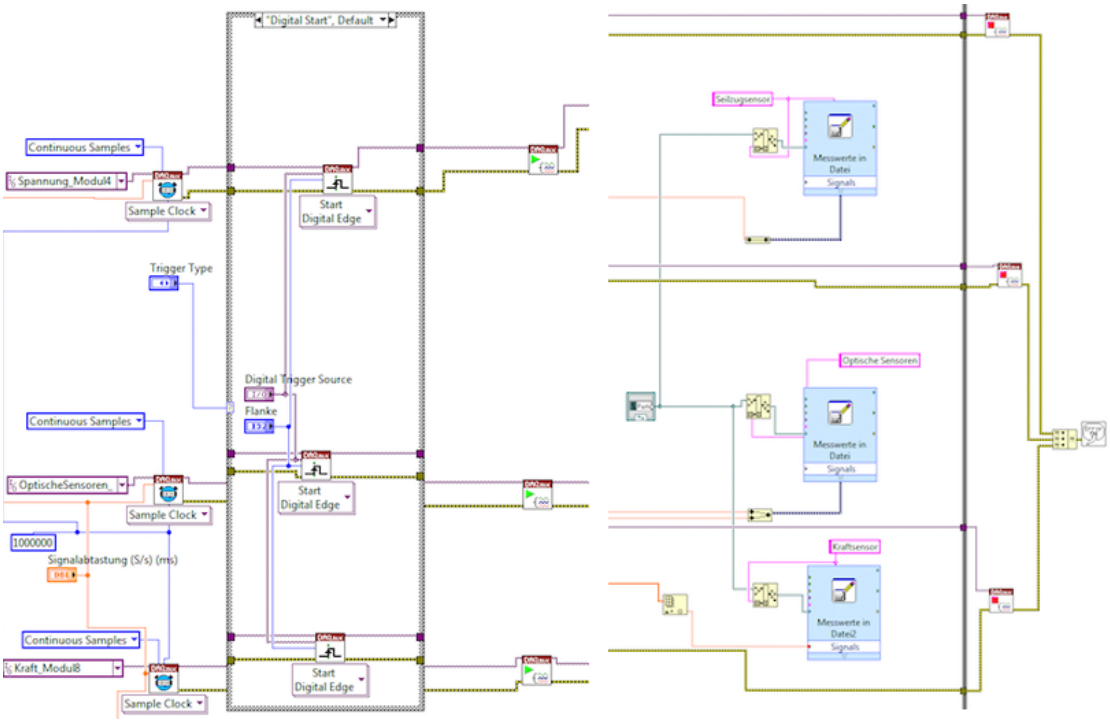


Abbildung 5.38: Abschnitt 1 und 3 des Blockdiagramms

Die in Kapitel 5.3.4 beschriebenen Tasks *Spannungs_ Modul4*, *Optische_ Sensoren2* und *Kraft_ Modul8* werden in dieser Sektion eingelesen. Anschließend folgt das Sampling der Signale durch eine im Frontpanel einstellbare Abtastfrequenz. In der darauffolgenden Case-Struktur wird ausgewählt, ob die Aufzeichnung mit oder ohne einem digitalen Trigger gestartet wird. Bei der Auswahl des synchronisierten Starts wird auf eine digitale Flanke am entsprechenden Eingang des Ethernet Chassis gewartet. Die letzten Blöcke nach der Case-Struktur starten den entsprechenden Task (siehe Abbildung 5.38 links).

Abschnitt 2

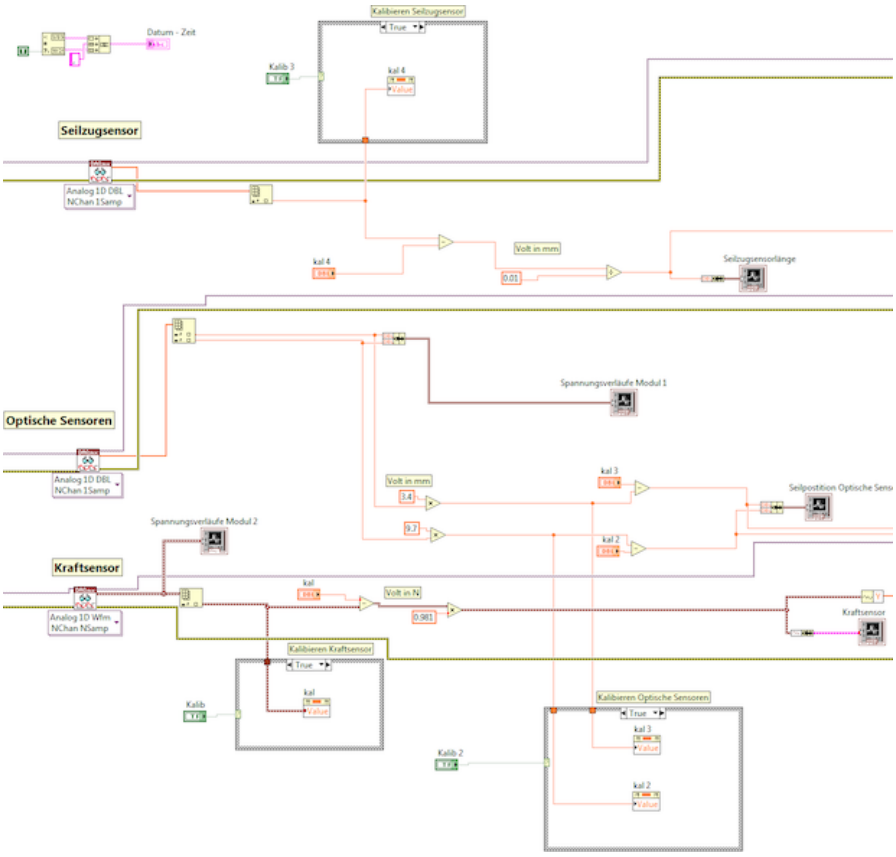


Abbildung 5.39: Abschnitt 2 des Blockdiagramms

Der erste Block der jeweiligen Tasks entspricht dem Lesen, wobei die Signale mit gewünschten der Abtastung aufgenommen werden. Beim Modul 4 (Belegung siehe Tabelle 11) wird nur das Signal des Seilzugsensors (siehe Abbildung 5.39 oben) weitergeführt, da die restlichen Anschlüsse nicht verkabelt sind. Die Aufzeichnung der für den Prüfstand P1 wichtigen optischen Sensoren (siehe Abbildung 5.39 mittig) wird durch das Modul 2 (Belegung siehe Tabelle 11) gewährleistet. Da auf dieser Steckkarte nur zwei Sensoren verkabelt sind, werden auch nur diese zwei weitergeführt. Schlussendlich folgt noch das Modul 8 (Belegung siehe Tabelle 12) für die Messung des Kraftaufnehmers (siehe Abbildung 5.39 unten). Die nachfolgenden Case-Stukturen der einzelnen Tasks ermöglichen das Nullstellen der einzelnen Sensoren. Nach der Umrechnung der Spannungen in gewünschte Maßeinheiten werden die Signale in einem *Waveform-Chart* am Frontpanel ausgegeben.

Abschnitt 3

In diesem Abschnitt werden die Werte in eine Excel-Datei ausgelesen (siehe Abbildung 5.38 rechts). Der entsprechende Dateipfad kann am Frontpanel eingetragen werden. Auch das Stoppen der Tasks wird hier nach dem Beenden der While-Schleife des Messens durchgeführt.

Abschnitt 4

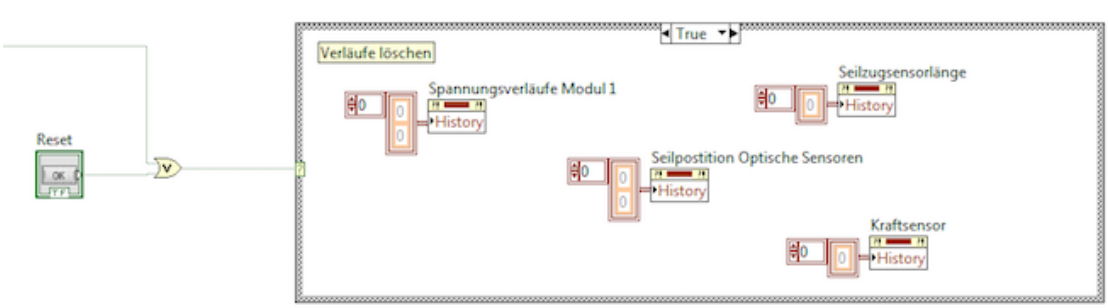


Abbildung 5.40: Abschnitt 4 des Blockdiagramms

Diese Case-Struktur ist für das Löschen der *Waveform-Charts* zuständig (siehe Abbildung 5.40). Das passiert entweder durch Drücken der Schaltfläche *Verläufe löschen* am Frontpanel oder automatisch beim Start einer neuen Messung.

Frontpanel

Das Frontpanel ist die Benutzeroberfläche der Messaufzeichnung während der Versuche. Die Eingabe der Abtastfrequenz, des Speicherorts und der Verwendung eines Triggers ist hier möglich. Auch die Kalibrierung der einzelnen Sensoren wird hier vom Benutzer durchgeführt. Weiters wird die aktuelle Zeit angezeigt. Die *Waveform-Charts* Seilposition, Optische Sensoren, Seilzugsensorlänge und Kraftsensor stellen die in Längen, Positionen und Kräften umgewandelten Spannungssignale während der Messung dar (siehe Abbildung 6.26).

Die aufgezeichneten Werte werden mit den Zeitmarken (Time Stamps) für die optischen Sensoren, den Seilzugsensor und den Kraftaufnehmer in eigene Excel-Dateien geschrieben.

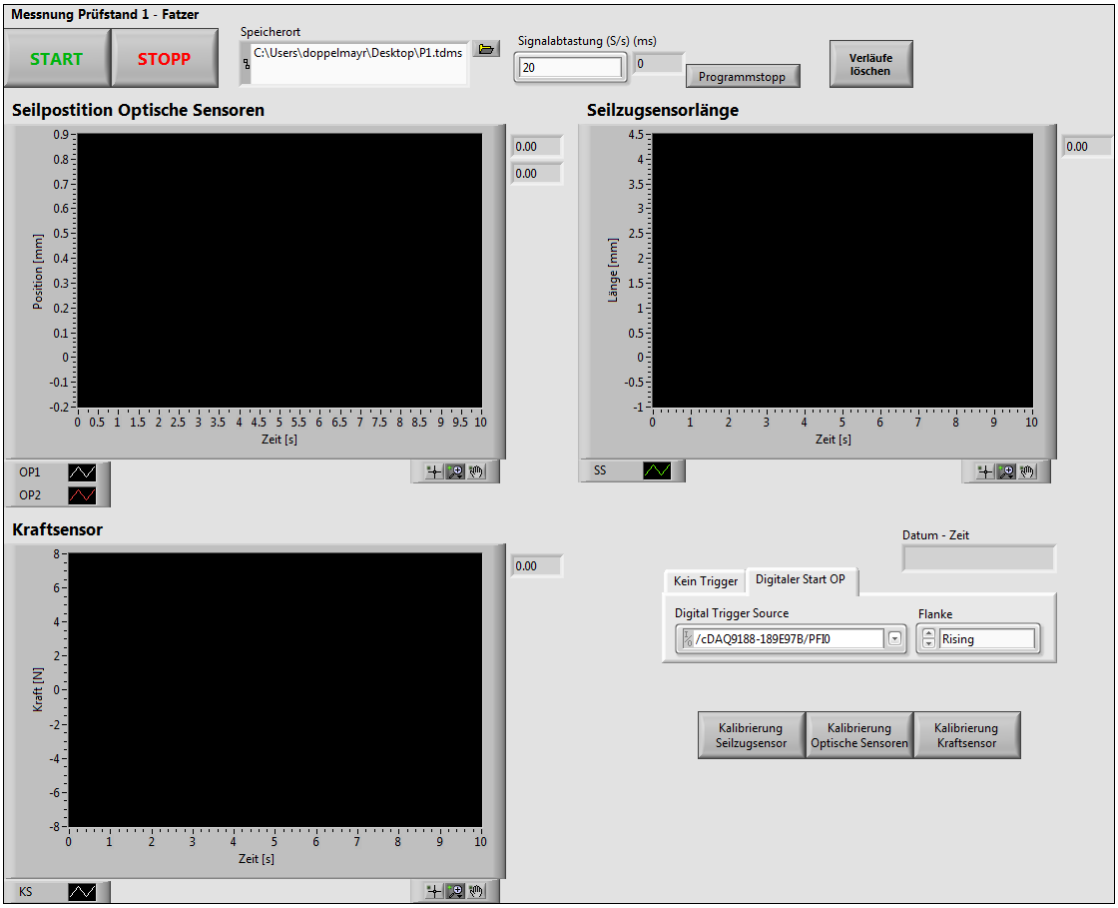


Abbildung 5.41: Frontpanel des Messprogramms für den Prüfstand P1

5.6 Messungen am Prüfstand P1

Zunächst wird die statische *Messung des Seildurchhangs* durchgeführt, um die mathematische Beschreibung des Seils mithilfe der Kettenlinie (siehe Kapitel 3.1.1) mit der Praxis vergleichen zu können.

Der Nachweis der Annahme, dass das Seil über eine lineare Strukturdämpfung verfügt, erfolgt im Kapitel *Hysteresemessung am Seil*.

Um das dynamische Übertragungsverhalten des linear modellierten Systems Seil zu beschreiben, gibt es zwei Testsignale, deren als Eingang besondere Bedeutung zukommt: zum einen die Einheitssprungfunktion, welche durch die *Wellenausbreitungsmessung nach Freigabe einer Anfangsauslenkung* gegeben ist, und zum anderen den Dirac-Delta-Impuls, welcher mit der *Wellenausbreitungsmessung nach Impulserregung* simuliert wird. Die Eingänge dieser Messungen werden durch Sensoren aufgezeichnet, und mit der Kenntnis der Gewichtsfunktion (Ausgang aufgrund

des Dirac-Delta-Impuls) bzw. der Sprungantwort (Ausgang aufgrund der Einheitssprungfunktion) ist das dynamische Verhalten dieses kontinuierlichen Systems beschrieben. Stationärverstärkungen und Nichtlinearitäten können auf diese Weise gut erfasst werden.

Der letzte Abschnitt befasst sich mit der *Wellenausbreitungsmessung nach Shakererregung*, bei der das System auch mit harmonischen Funktionen angeregt werden kann. Der Nachteil ist allerdings, dass jede Funktion nur eine einzelne Frequenz anregt. Abhilfe ermöglicht das Weiße Rauschen, eine Funktion, die zu jedem Zeitpunkt gleich viel Energie je Frequenz enthält. Diese Art der Anregung ist vor allem bei der Systemidentifikation beliebt [vgl. Kozek, 2012, S. 22ff.].

Auf eine statistische Auswertung dieser Messungen wie im Kapitel 6.6 – Messungen am Prüfstand P2 wird aufgrund der zu geringen Anzahl an gleichartigen Wiederholungen verzichtet.

5.6.1 Statische Messung des Seildurchhangs

5.6.1.1 Versuchsanordnung und -ablauf Für diese Messung wird der Laser-Entfernungsmesser GLM 150 Professional der Firma *Bosch* verwendet. Er nimmt die Höhe des Seils vom Boden aus an bestimmten Stellen bei der Vorspannung von $320000\,N$ auf. Die Messung wird nur bis zu Mitte durchgeführt, da von einer symmetrischen Auslenkung ausgegangen werden kann.

5.6.1.2 Ergebnisse Die Ergebnisse der Seildurchhangsmessung können mit dem Werten aus dem Kapitel 3.1.1 verglichen werden. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass sich bei der Berechnung die Einspannstellen auch auf einem Niveau von $0{,}8\,m$ befinden.

Messpunkt	gemessener Seildurchhang	berechneter Seildurchhang
$0{,}61\,m$	$0{,}8\,m$	$0{,}79\,m$
$1{,}49\,m$	$0{,}79\,m$	$0{,}78\,m$
$2{,}09\,m$	$0{,}77\,m$	$0{,}77\,m$
$8{,}62\,m$	$0{,}69\,m$	$0{,}69\,m$
$13{,}86\,m$	$0{,}57\,m$	$0{,}62\,m$
$36{,}18\,m$	$0{,}48\,m$	$0{,}45\,m$
$62{,}29\,m$	$0{,}39\,m$	$0{,}39\,m$

Tabelle 16: Gemessener und berechneter Seildurchhang am Prüfstand P1

Erkennbar ist, dass die Biegesteifigkeit des Seils statisch keine Rolle spielt, da die

Berechnungen ohne deren Berücksichtigung die Realität hinreichend gut widerspiegelt. Grund dafür ist unter anderem die Vorspannung des Seils. Die Messergebnisse passen sehr gut mit den berechneten überein. Die größte Abweichung von 0,05 m findet sich beim Messpunkt 13,86 m.

5.6.2 Hysteresemessung am Seil

5.6.2.1 Versuchsanordnung Für die erste dynamische Messung am Prüfstand P1 wird der Kraftaufnehmer (siehe Kapitel 5.3.2), ein Seilzugsensor (siehe Kapitel 6.3.2) und der optischen Sensor optoCONTROL 2500 (siehe Kapitel 5.3.1) verwendet. Des Weiteren wird eine Hebelverlängerung für die manuelle Auslenkmöglichkeit an der Seilklemme mit dem Verbindungsstück angebracht (siehe Abbildung 5.42). Diese Verlängerung ist gelenkig an der Klemme gelagert, wodurch die Verdrehung über den Kraftaufnehmer eingeleitet wird. Dadurch wird die benötigte Kraft für die Verdrehung des Seils, welche mit dem Seilzugsensor über einen Hebelarm und mit dem optischen Sensor über eine Seilklemme mit einem Aufbau aufgezeichnet wird, direkt ermittelt.

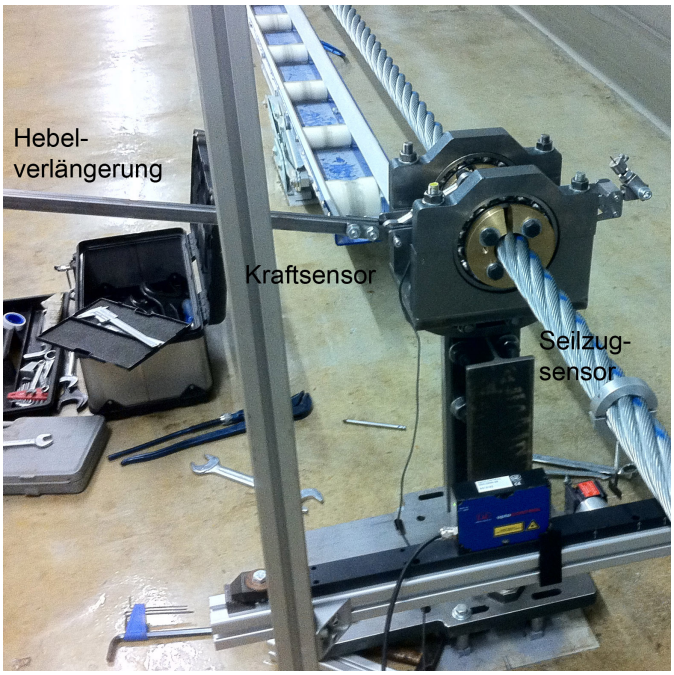


Abbildung 5.42: Aufbau der Hysteresemessung am Prüfstand P1

5.6.2.2 Versuchsablauf Vom unbelasteten Zustand aus wird dem Seil manuell über die Hebelverlängerung eine immer größer werdende Verdrehung bis zu

$\pm 30\,°$ aufgetragen. Währenddessen werden die Signale des Kraftaufnehmers, die des Seilzugsensors sowie die des optischen Sensors in LabVIEW über die Zeit aufgezeichnet.

5.6.2.3 Ergebnisse Aus der Auswertung dieses Versuchs ist ersichtlich, dass aufgrund des regelmäßigen Verlaufes der Hysteresekurve (siehe Abbildung 5.43) keine Nichtlinearitäten auftreten. Die lineare Modellierung der Strukturdämpfung des Seils ist somit gerechtfertigt.

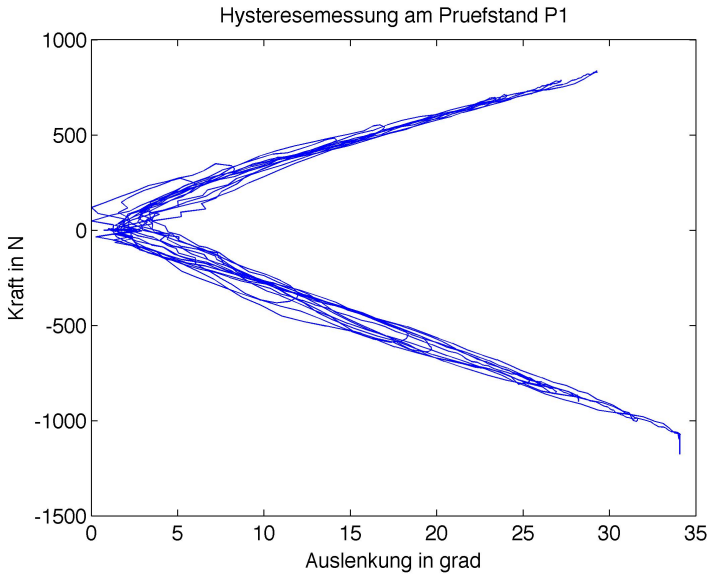


Abbildung 5.43: Hysteresemessung am Prüfstand P1

5.6.3 Wellenausbreitungsmessung nach Freigabe einer Anfangsauslenkung

5.6.3.1 Versuchsanordnung Für diese Messungen kommen neben dem Kraftaufnehmer (siehe Kapitel 5.3.2), welcher die Vorspannung des Seils misst, auch die zwei optischen Sensoren (siehe Kapitel 5.3.1), die für die Aufzeichnung der Seilbewegung an zwei Stellen zuständig sind, zum Einsatz. Das Modell optoCONTROL 1202 (siehe Abbildung 5.14) mit einem Messbereich von $98\,mm$ wird mit einem Abstand von $0{,}97\,m$ zur Erregervorrichtung platziert. Das zweite optische Messgerät optoCONTROL 2500 (siehe Abbildung 5.15) mit einem Messbereich von $34\,mm$ wird mit einer Differenz zum ersten Messinstrument von $32\,m$ ($19\,m$ zur Abspannvorrichtung) angebracht.

Im Kapitel 5.2.1 sind die für diese Messungen in der Mitte des Seilfeldes benötigten Aufbauten der Erregervorrichtung skizziert. Die Vorrichtung für die Transversal-

anregung ist in Abbildung 5.9 als Skizze und in Abbildung 5.10 als Ausführung abgebildet. Der Aufbau der Torsionsanregung ist in Abbildung 5.11 als Skizze und in Abbildung 5.44 als fertiger Aufbau mit dem optischen Sensor optoCONTROL 1202 und der benötigten Seilklemme mit Aufbau zu sehen.

Abbildung 5.44: Aufbau bei torsaler Vorspannung des Seils am Prüfstand P1

5.6.3.2 Versuchsablauf Bei der Transversalanregung wird das Seil mithilfe der in Abbildung 5.10 abgebildeten Vorrichtung niedergespannt. Bei der torsalen Messung wird das Seil über einen Hebelarm verdreht (siehe Abbildung 5.12 links). Bei beiden Versuchen ist der Kraftaufnehmer für das Aufzeichnen der Vorspannkraft gedacht. Um die Messungen zu starten, wird der Metalldraht abgezwickt und die Anfangsauslenkung dadurch aufgegeben.

Bei der Torsionserregung wird bei den optischen Sensoren wie bei der Hysteresemessung zusätzlich ein kleiner Aufbau am Seil benötigt (siehe Abbildung 5.42), um die Verdrehung messen zu können.

5.6.3.3 Ergebnisse Die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit bei Transversalwellen kann durch die Seilspannung verändert werden. Im Fall des Prüfstandes P1

ist die Seilspannung konstant bei 320000 N. Der Abstand der zwei optischen Sensoren beträgt 32 m. Die verstrichenen Zeit von 0,033 s, bis das Wellenpaket von einem Messgerät zum anderen gelangt, ergibt eine Transversalwellenfortpflanzungsgeschwindigkeit nach der Freigabe einer Anfangsauslenkung von $c_{tr} = 970\,m/s$. Dieses Ergebnis passt zu den Angaben von Seilherstellern, die eine Geschwindigkeit von ca. $c_{tr} = 1200\,m/s$ angeben.

Bei der Torsionswellengeschwindigkeit gibt es keine Voruntersuchungen, Forschungsergebnisse oder Angaben von Seilherstellern, die als Vergleich herangezogen werden können. Bei einer Distanz von 18 m zwischen den optischen Sensoren und mit der Zeit von 0,0025 ms, die das Wellenpaket nach der Freigabe einer Anfangsauslenkung von einem zum anderen Messgerät benötigt, ergibt sich eine Torsionswellenfortpflanzungsgeschwindigkeit von $c_{to} = 7200\,m/s$.

In Abbildung 5.45 entspricht der schwarze Verlauf dem Sensor optoCONTROL 1202 in der Nähe der Einleitung. Der blaue Verlauf gehört zum Messgerät optoCONTROL 2500.

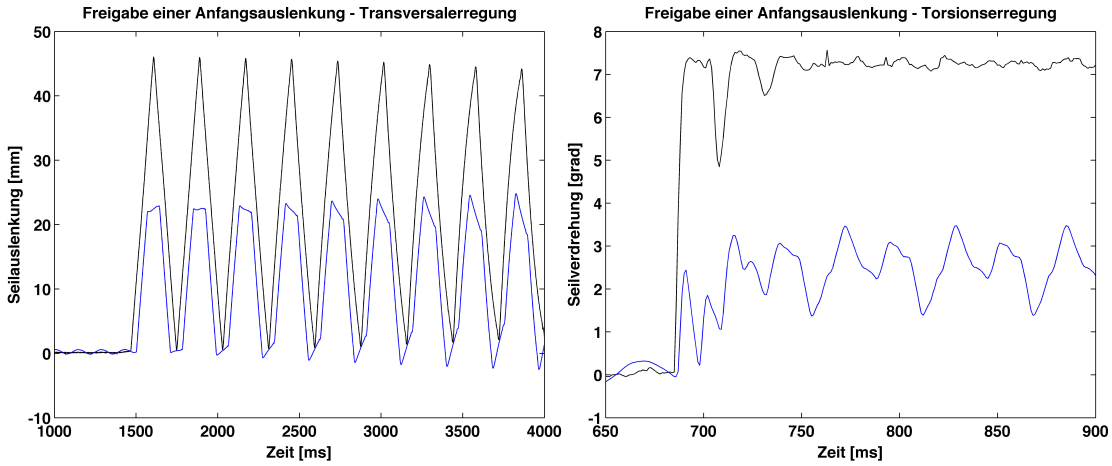


Abbildung 5.45: Transversale bzw. torsale Wellenausbreitungsmessung nach Freigabe einer Anfangsauslenkung am Prüfstand P1

Nach dem Anpassen der Parameter gibt es nur noch geringe Abweichungen zu den transversalen Berechnungen im Kapitel 3.2.2. Gründe dafür sind Näherungen, die getroffen wurden, wie zum Beispiel das Flächenträgheitsmoment eines Keises oder die Fourierzerlegung der Signale. Auch über die Biegesteifigkeit und die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit können nur Annahmen getroffen werden. Der in Abbildung 3.17 dargestellte Signalverlauf an den Stellen der zwei optischen Sensoren, ergibt ein dem Messergebnis ähnliches Bild (siehe 5.46).

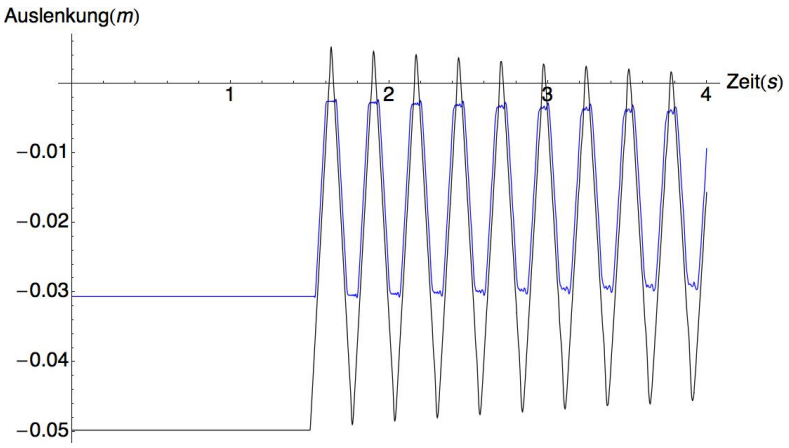


Abbildung 5.46: Transversale Wellenausbreitungsberechnung nach Freigabe einer Anfangsauslenkung an den Stellen der optischen Sensoren

5.6.4 Wellenausbreitungsmessung nach Impulserregung

5.6.4.1 Versuchsanordnung Bei einer transversalen Anregung wird die Erregervorrichtung, die in Kapitel 5.2.1 vorgestellt wurde, bis auf die Seilklemme entfernt. Ist die Torsionsimpulserregung erwünscht, so wird die Erregervorrichtung (siehe Abbildung 5.11) verwendet, wobei die Halterung und das Verbindungsstück abmontiert werden.

Der Impuls wird über die Seilklemme eingeleitet, bei torsaler Anregung über einen Hebelarm, der an dieser Klemme befestigt ist.

Die Anordnung der Messgeräte entspricht im Wesentlichen jener im Kapitel 5.6.3 – Wellenausbreitungsmessung nach Freigabe einer Anfangsauslenkung. Um das Erregersignal aufzuzeichnen, wird der optische Sensor optoCONTROL 1202 an der Einleitungsstelle platziert. Das zweite Messgerät optoCONTROL 2500 wird in einer Entfernung von $32\,m$ im tansversalen und $18\,m$ im torsalen Fall installiert.

5.6.4.2 Versuchsablauf Die Impulserregung erfolgt durch einen Messinghammer, welcher bei transversaler Erregung direkt auf die Seilklemme auftrifft und torsal über die Erregervorrichtung mit dem Hebelarm angreift.

5.6.4.3 Ergebnisse Die Transversalwellenfortpflanzungsgeschwindigkeit nach der Freigabe einer Impulserregung beträgt $c_{tr} = 235\,m/s$, da der Abstand der Sensoren $32\,m$ beträgt und die verstrichenen Zeit $0{,}136\,s$, bis das Wellenpaket von einem Messgerät zum anderen gelangt, gemessen wurde. Dieses Ergebnis entspricht der Formel $c_{tr} = \sqrt{S/\mu}$, welche keine Disperionserscheinungen berücksichtigt. Dies bedeutet, dass von keiner Frequenzabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit

ausgegangen wird. Somit zerläuft das Wellenpaket nicht.

Bei der Torsionswellenmessung fällt aufgrund der zu geringen Auflösung des Sensors optoCONTROL 1202 die Auswertung schwer (siehe Abbildung 5.48).

In Abbildung 5.47 und 5.48 entspricht der schwarze Verlauf dem Sensor optoCONTROL 1202 in der Nähe der Einleitung, und der blaue Verlauf gehört zum Messgerät optoCONTROL 2500.

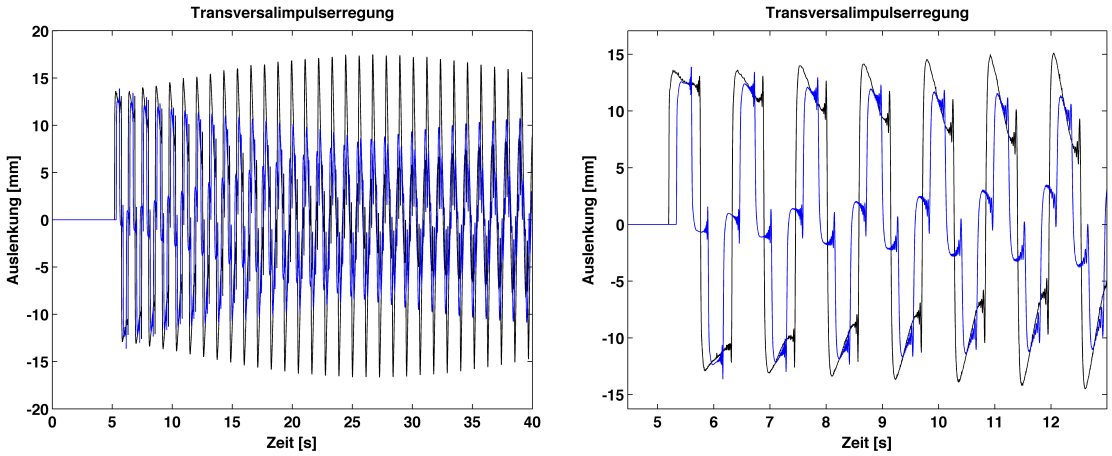


Abbildung 5.47: Wellenausbreitung nach transversaler Impulserregung am Prüfstand P1

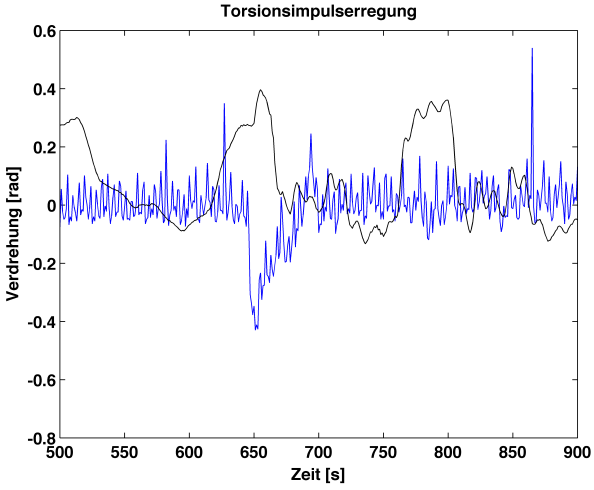


Abbildung 5.48: Torsionswellenausbreitung nach torsaler Impulserregung am Prüfstand P1

Das gemessene Ergebnis der Wellenausbreitung nach transversaler Impulserregung entspricht den berechneten Resultaten aus dem Kapitel 3.2.1 – Inhomogene Wellengleichung (siehe Abbildung 3.15). Aufgrund der Vernachlässigung der Dämpfung bei der Berechnung, sinkt die Amplitude nicht, wie es real der Fall ist. Bei den Versuchen war es interessant zu sehen, wie das Seil anfänglich die berechnete Rechteckschwingung ausführte (siehe Abbildung 5.47 rechts und 5.49).

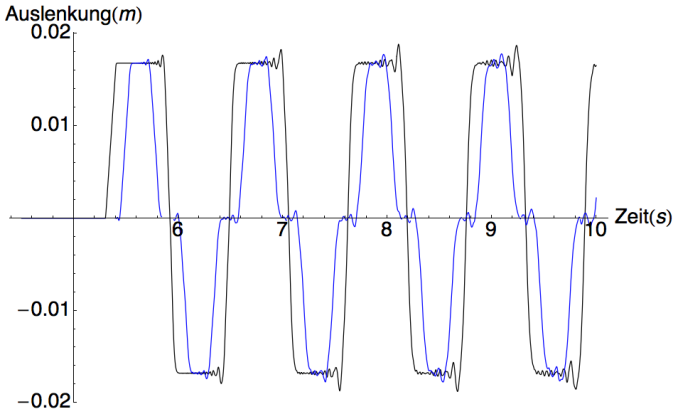


Abbildung 5.49: Transversale Wellenausbreitungsberechnung nach einer Impulserregung an den Stellen der optischen Sensoren

5.6.5 Wellenausbreitungsmessung nach Shakererregung

Der für diese Versuche gedachte Schwingerreger Brüel & Kjær 4808 (siehe Kapitel 5.4.1) hat bei den Vorversuchen an der TU Wien (siehe Kapitel 5.1.3) mit einer brauchbaren Amplitude erregt (siehe Abbildung 5.6). Aufgrund der wesentlich erhöhten Seillänge und -vorspannung am Prüfstand P1 beim Unternehmen Fatzer AG kann dieser Schwingerreger die Struktur nicht mit ausreichender Energie anregen. Dadurch wird kein angemessenes Signal-Rausch-Verhältnis erreicht. Es musste auf die Wellenausbreitungsmessung nach einer Shakererregung verzichtet werden.

6 Prüfstand P2

6.1 Prüfstandskonzept

Der zweite Prüfstand P2 dient zur Ermittlung der Wechselwirkungen von Seil- und Fahrbetriebsmitteldynamik. Aus den Unterlagen zur Dokumentation des Forschungsprojekts – Das dynamische Verhalten von Seilbahnfahrzeugen in Wechselwirkung mit der Dynamik der Seile [Kartnig et al., 2011] geht die Versuchsanordnung für diese zweite Projektphase hervor. Sie besteht aus einem Seilfeld und drei Fahrzeugen (siehe Abbildung 6.1). Die Fahrbetriebsmittel werden vereinfacht aus Kuppelklemme, Gehänge, einem Zusatzgewicht und beim Erregerfahrzeug mit einer Linearantriebseinheit konzipiert. Dadurch ist das Hauptaugenmerk dieser Untersuchungen auf die Wechselwirkungen gerichtet, und die Fahrzeuge sind ohne Dämpfungsterme beschreibbar.

Zufolge der Erregung am mittleren Fahrzeug führt dieses eine Drehbewegungen aus. Die in das Seil eingeleiteten Torsionswellen und die daraus resultierenden Momente regen die angrenzenden Fahrzeuge zu Schwingungen an (siehe Abbildung 6.2). Aus diesem Grund lassen sich Rückschlüsse auf die Wechselwirkung von Seil und Fahrzeugdynamik bzw. auf die Zwangsbedingungen ziehen. Die Bewegungen des Erregerfahrzeugs und des Messfahrzeugs werden messtechnisch erfasst und mit der Simulation verglichen, wobei bei größeren Abweichungen die örtliche Funktion der Seilverformung solange variiert wird, bis eine hinreichende Übereinstimmung besteht.

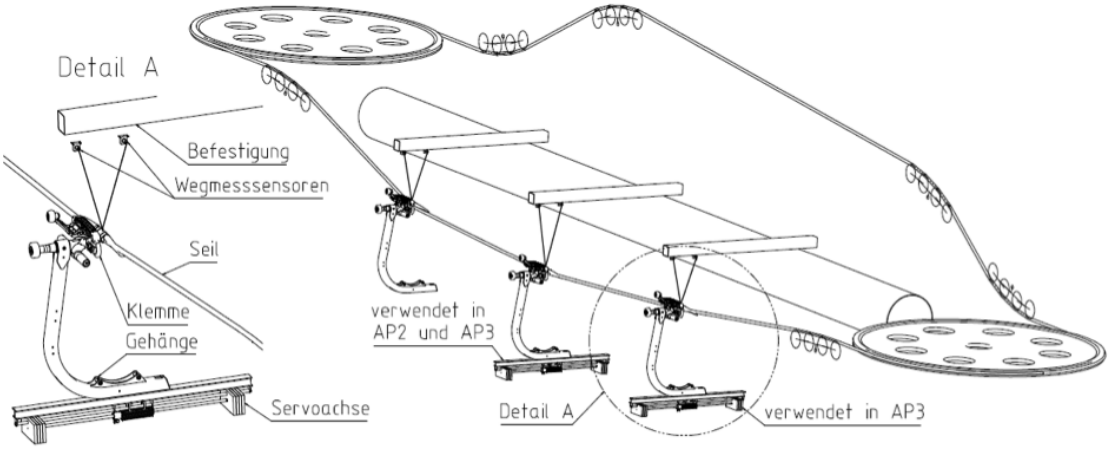


Abbildung 6.1: Konzept des Prüfstands P2

6.1.1 Anforderungsliste

Doppelmayr / TU WIEN	*Anforderungsliste für den Prüfstand P2*	Seite 1 von 1

Änderungen	F W	Anforderungen	Verantw.
		1. Konstruktion	Tschaikner
		Seil	
	F	Länge: 40 m	
	F	Durchmesser: 45 mm	
	F	Machart: 6x36 Warrington Seal	
		Einspannung	
	W	Vorspannkraft: 0-140 kN	
	F	Abspannung: über Rollenbatterien und Abspannvorrichtung zur Umlenkrolle	
		Fahrzeuge	
	W	Einfacher Aufbau: Klemme, Gehänge und Zusatzmasse ggf. mit Antriebseinheit	
	F	Drei Fahrzeuge, ein Erregerfahrzeug	
	W	Möglichkeit zur Änderung der Position und Anzahl der Fahrzeuge im Seilfeld	
		2. Schwingerregung	
	F	Erregungsmöglichkeit mittels Linearantriebseinheit	
	W	Harmonische und impulsartige Erregung	
		3. Messsensorik	
	F	Wegmessung der Seilbewegung am Erreger- und Messfahrzeug	
	F	Winkelmessung des Erreger- und Messfahrzeugs	
	F	Laser-Messung des Seildurchhangs	
	F	Synchronisation von Erregung und Messung	
		4. Termin	
		Arbeitsphase 2, September 2013	
		5. Einsatzort	
		Vorversuche	
		Labor des Instituts für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik an der TU Wien	
		Finale Versuche	
		Doppelmayr Seilbahnen in Wolfurt	
	1. Ausgabe, 20. Juli 2013		

Tabelle 17: Anforderungsliste für den Prüfstand P2

6.1.2 Untersuchungen des Forschungsprojekts

Eine numerische Simulation eines dem Prüfstandes P2 ähnlichen Aufbaus aus früheren Untersuchungen [vgl. Lässer, 2011, S. 30] zeigt, dass mehrere Fahrzeuge in einem Seilfeld durch die Torsionssteifigkeit des Seiles etwas zeitversetzt und nahezu um 180 ° phasenverschoben (siehe Abbildung 6.2) einem hier mittig torsal angeregten Fahrzeug folgen. Im Kapitel 4.2 wurde überblicksmäßig auf die Vorgehensweise dieser Berechnung eingegangen.

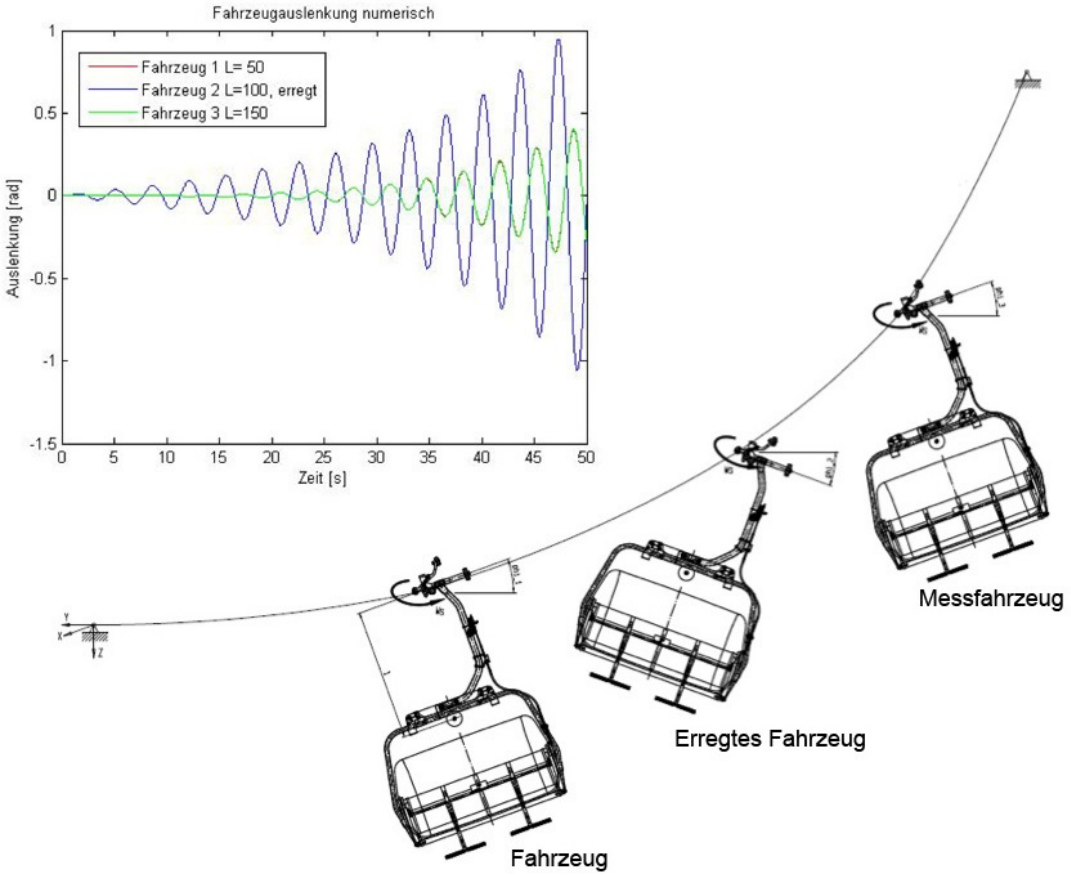


Abbildung 6.2: Auslenkung der Fahrzeuge, Schwingung am Prüfstand P2

Aus der Voruntersuchung des Forschungsprojekts [Kartnig et al., 2011] und mithilfe der mathematischen Beschreibung des Seil sowie des Fahrzeugs in Kapitel 3 und 4 konnten die benötigten Kräfte der Erregereinheit, konstruktive Auslegungen wie die geforderte Prüfstandsbreite aufgrund der Schwingung und die benötigte Seilhöhe sowie die Gestaltung der Messtechnik vorab geschätzt werden.

6.1.3 Vorversuche an der TU Wien

Die Vorversuche an der TU Wien befassten sich hauptsächlich mit dem Erregerfahrzeug. Dieses war mit einer Antriebseinheit mit beweglicher Zusatzmasse ausgestattet, um die in natura auftretenden Seilschwingungen durch Windkräfte, Kurvenfahrten und schwingende Nachbarfahrzeuge zu simulieren. Der Prüfstand für dieses Erregerfahrzeug in Wien wurde in zwei Varianten konzipiert.

1. Variante: fixe Einspannung der Seilklemme (siehe Abbildung 6.3 rechts) – Ausführung als Einfachpendel
2. Variante: Doppelpendel im Aufhängepunkt (siehe Abbildung 6.3 links)

Die erste Variante ermöglicht es, allgemeine Untersuchungen, wie zum Beispiel die Eigenfrequenzermittlung, zu tätigen. Mit der zweiten Variante kann die Bewegung eines realen Seiles imitiert werden, es sind also Messungen ähnlich der Situation in einem realen Seilfeld durchführbar. Durch den Prüfstand konnte das Erregerfahrzeug an der TU Wien bezüglich der Erregereinheit und den Messkomponenten entwickelt, getestet und abgestimmt werden. Für genauere Ausführungen wird hier auf die Diplomarbeit "Entwicklung und Inbetriebnahme eines Prüfstandes zur Messung von Seilbahnschwingungen" [Kalkan, 2013] verwiesen.

6.2 Prüfstandsausführung

Das Unternehmen *Doppelmayr Seilbahnen* verfügt über ein Testgelände mit einem Seilschleifenprüfstand, wo diese Untersuchungen durchgeführt werden. Der Ausgangspunkt sind zwei Seilscheiben, die in einem Abstand von $60.5\,m$ zueinander angeordnet sind. Durch ein Hydraulikaggregat besteht die Möglichkeit, ein Seil, das zwischen den Seilscheiben läuft, mit bis zu $418\,kN$ pro Seilzugseite vorzuspannen. Da bei früheren Untersuchungen an diesem Prüfstand der Fokus auf Seiluntersuchungen gelegt wurde, muss dieser auf den Testbetrieb mit Fahrbetriebsmitteln umgerüstet werden.

Die benötigten Erweiterungen des vorhandenen Prüfstands umfasst neben dem Konstruieren der Abspannvorrichtungen, das im Kapitel 6.2.1 vorgestellt wird, auch das Konzipieren der Seilunterstützungen in Form der Rollenbatterien mit geeignetem Joch (siehe Abbildung 6.5 links). Auch eine robuste Vorrichtung zur Einrichtung der Seilzugsensoren, welche die genau Lage des Seils aufzeichnen, war zu entwickeln (siehe Abbildung 6.5 rechts). Es wurde darauf wertgelegt, vorhandene Halbzeuge, im Falle der Seilunterstützungen lagernde Rechteckprofile und bei den Seilzugsensorenvorrichtungen vorrätige Kisten, zu verwenden, um eine rationelle und kostengünstigen Fertigung zu ermöglichen.

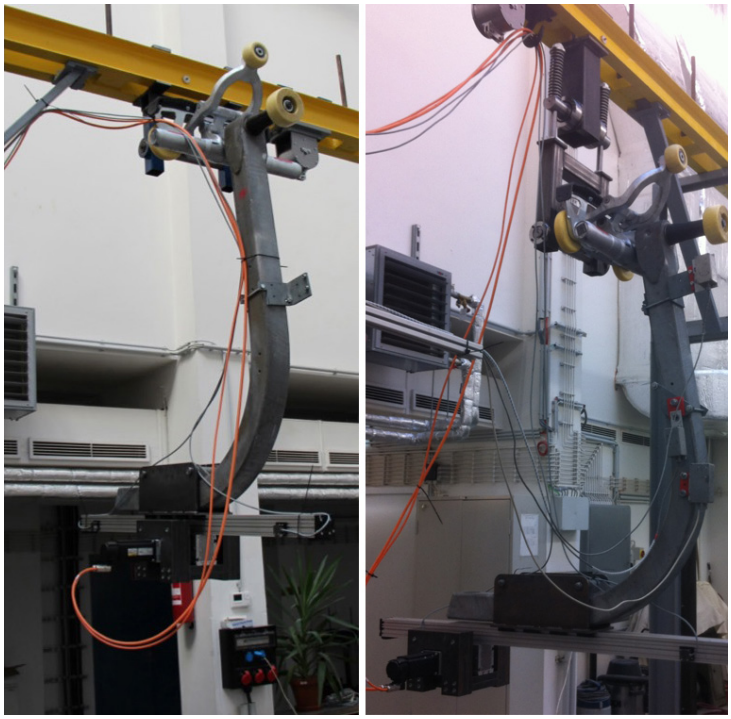


Abbildung 6.3: 1. und 2. Variante des Prüfstands an der TU Wien

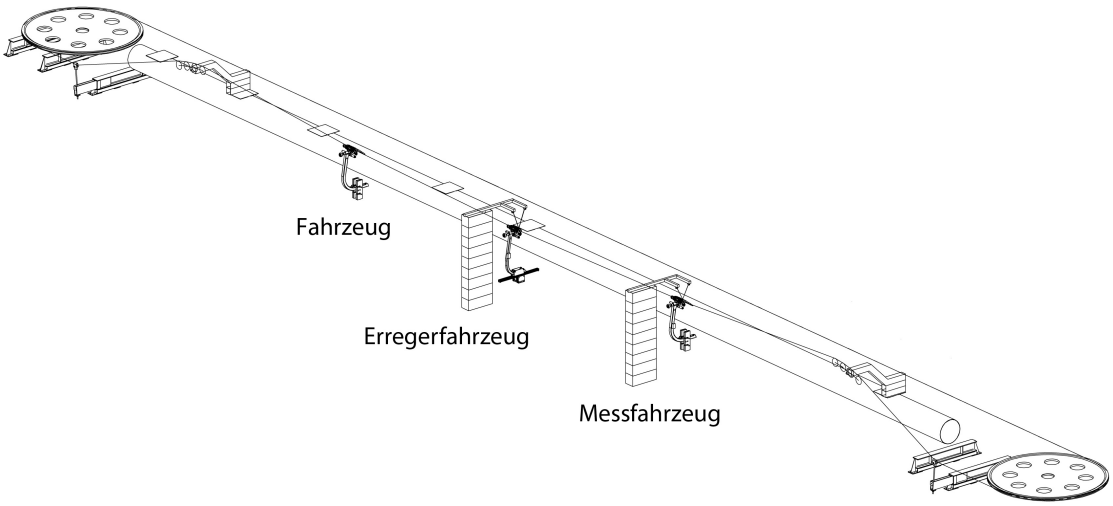


Abbildung 6.4: Prüfstand P2 mit drei Fahrzeugen

Für diesen Prüfstand mussten geeignete Fahrbetriebsmittel angefertigt werden, die einem realen Fahrzeug nahe kamen, leicht messbar und zweckoptimiert waren. Diese sind im Kapitel 6.2.2 veranschaulicht.

Ferner wurde für den Prüfstand P2 (siehe Abbildung 6.4) ein Warrington Seal Zug- und Förderseil mit dem Durchmesser von 45 mm (siehe Kapitel 2.2) mit entsprechender Gesamtlänge von 138 m bestellt. Um ein durchgehend umlaufendes Seil zu erhalten, wurde gespleißt. Bei diesem Vorgang dreht man das Seil, welches aus mehreren Litzen besteht an den Enden auf. Dann werden die einzelnen Litzen der beiden Enden ineinander verflochten.

Abbildung 6.5: Joch mit Rollenbatterie als Seilfeldunterstützung; Vorrichtung zur Positionierung der Seilzugsensoren

6.2.1 Abspannvorrichtung

Wie eingangs schon erwähnt, musste die Seilführung der Versuchsseite des vorhandenen Seilschleifenprüfstands auf ein Niveau gebracht werden, das den Fahrbetriebsmitteln ein ungestörtes Schwingen ermöglichte. Die Seilunterstützungen wurden mithilfe von Rollenbatterien realisiert. Um zu gewährleisten, dass das Seil in der Horizontale in die Seilscheibe einmündete, wurde eine Abspannvorrichtung entwickelt (siehe Abbildung 6.6). Dadurch ließen sich mögliche Schäden am Seil

oder an der Scheibe verhindern, und eine reibungslose Vorspannung war mit dem Hydraulikaggregat möglich.

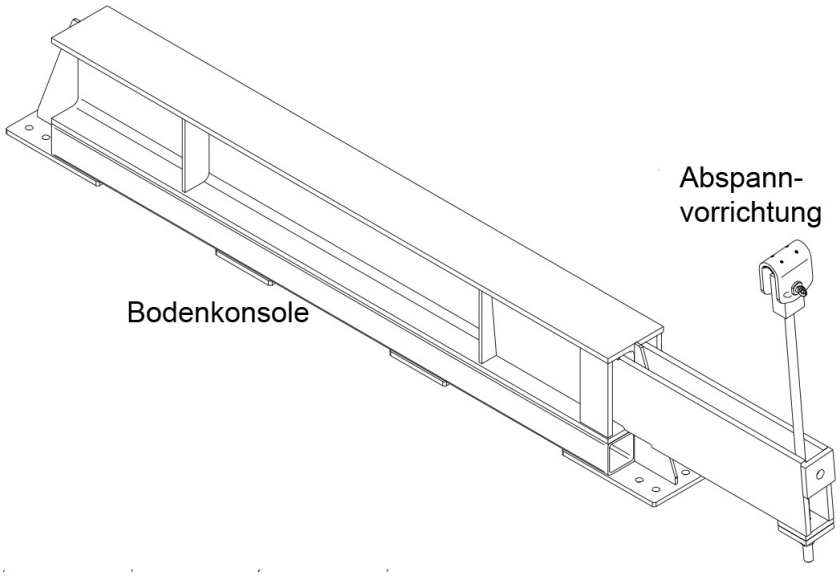


Abbildung 6.6: Skizze der Abspannvorrichtung

Die vorhandenen Bodenkonsolen des Seilschleifenprüfstands sind die Basis für die Abspannvorrichtungen. Sie sind an diese angepasst. Mit diesen Konsolen ist das Niederhalten des Seils erst möglich. Um fertigungsgerecht zu entwickeln, wurde darauf geachtet, dass hauptsächlich ein Stahlblech *S355J2* mit der Dicke von $25\,mm$ zum Einsatz kam. Dieses ließ sich in der Fertigung durch Brennschneiden ohne größeren Zeitaufwand herstellen.

Ausgelegt wurde diese Abspannvorrichtung auf eine Seilspannung von $S = 300\,kN$. Aus den CAD-Daten ergibt sich der Winkel des ein- zum auslaufendem Seil des Seilbügels zu $\alpha = 23°$. Dadurch ist zu rechnen mit einer Zugkraft P, wirkend in der Gewindestangenachse, von

$$P = 2S \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 119\,kN. \tag{6.1}$$

Aus der Festigkeitsberechnung der einzelnen Bauteile ging hervor, dass zwei Platten bei der Verbindung von Gewindestange *M34x4* zu Querträgern nötig waren. Alle weiteren festigkeitsrelevanten Größen lagen innerhalb der vorgeschriebenen Sicherheitsbereiche. Auf die Ausführung der Schweißnahtberechnungen nach interner Doppelmayr-Vorschrift wurde hier verzichtet, da die Nähte nicht an Stellen höchster und ungünstiger Beanspruchung angeordnet waren und im Falle der Querträger (Verbindung Vorrichtung mit Bodenkonsole) mehr der Lagesicherung dienten. Die

Zahl der Schweißnähte wurde klein gehalten, um mögliche Maß- und Formänderung zu unterbinden.

Zur Unterstützung des I-Trägers der Bodenkonsole wurde noch ein Trägerblech an den Kanten mit Kehlnähten als T-Stoß ohne Kantenvorbereitung verschweißt. Das Ausbeulen sollte dadurch verhindert werden. Neben der vordefinierten Schrägstellung der Vorrichtung um 5° wurde die Verbindung zwischen Gewindestange und Abspannvorrichtung mit einer Kugelscheibe-Kegelpfannen-Kombination realisiert. Diese Neigungsmöglichkeit der Stangenachse verhalf im Zusammenwirken mit dem gelenkig gelagerten Seilbügeln zu einer besseren Krafteinleitung. Die Querträger der Vorrichtung wurden als Schrägstoß mit Kantenvorbereitung durch Kehlnähte mit den Bodenkonsolen verschweißt (siehe Abbildung 6.7).

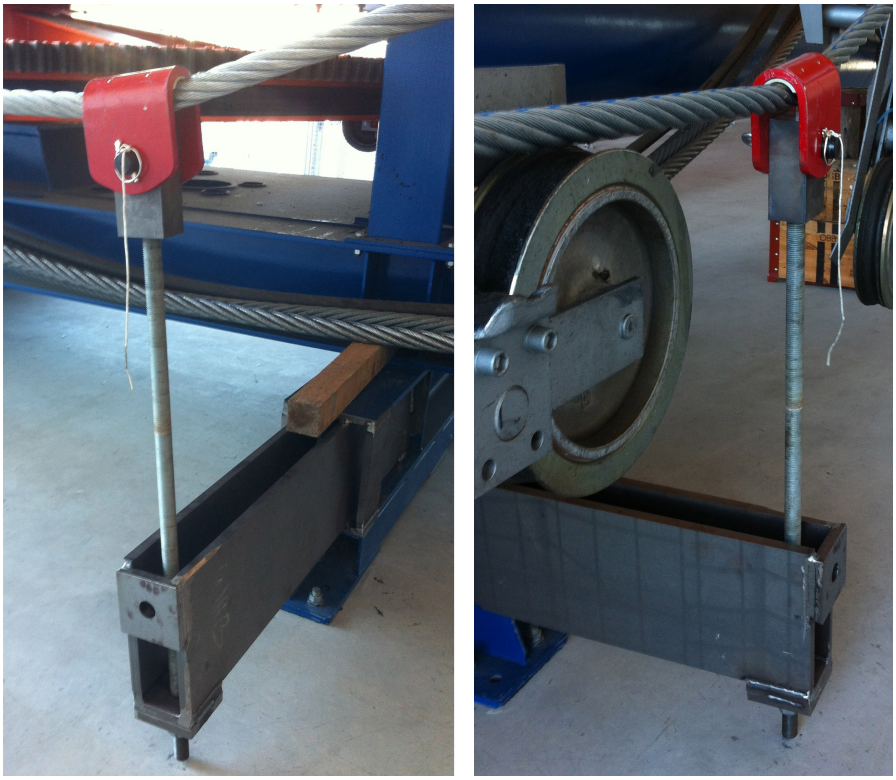


Abbildung 6.7: Abspannvorrichtung

6.2.2 Fahrbetriebsmittel

Das Erregerfahrzeug wird aus den Vorversuchen an der TU Wien (siehe Kapitel 6.1.3) übernommen und besteht wie die zwei weiteren Fahrbetriebsmittel aus vorhandenen Klemmen und Gehängestangen. Zusätzlich besitzt das Erregerfahrzeug

eine Antriebseinheit mit Zusatzmassen und die anderen Fahrzeuge Stahlplatten als Ersatz für den fehlenden Fahrgastteil. Da der Schwerpunkt der Untersuchung am Prüfstand P2 auf den Zwangsbedingungen liegt, ist diese einfache Ausführung der Fahrzeuge opportun. Die Komponenten der jeweiligen Fahrzeuge sind aus Tabelle 18 zu entnehmen.

Fahrzeug	Klemme	Gehängestange	Zusatzmasse
Erregerfahrzeug	DT108 DM45	8MGD GCS	Lineareinheit mit bewegl. Zusatzmasse
Messfahrzeug	DT108 DM41	8MGD GCS	Stahlplatten
Fahrzeug	DT108 DM46	8MGD GCS	Stahlplatten

Tabelle 18: Fahrbetriebsmittel des Prüfstands P2

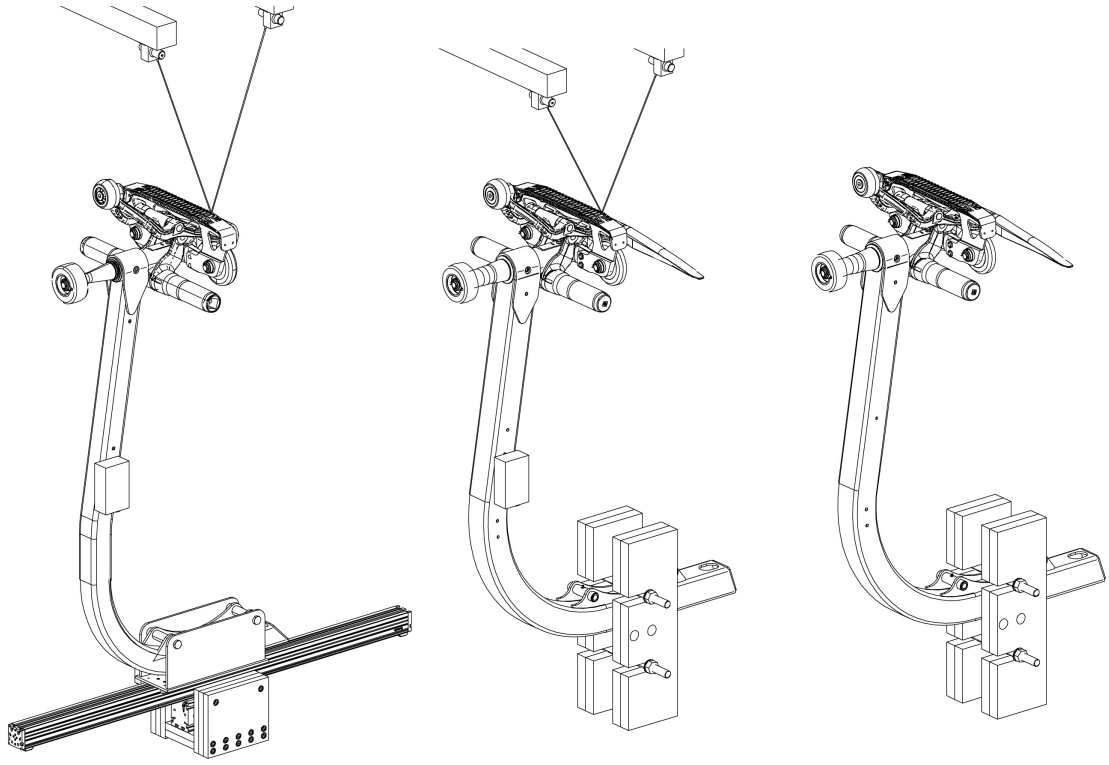


Abbildung 6.8: Erreger-, Mess- und Fahrzeug des Prüfstands P2

In Abbildung 6.8 sind die Fahrbetriebsmittel des Prüfstands abgebildet. Erkennbar ist, dass Erreger- und Messfahrzeug mit Seilzugsensoren (oben) und Inklinometern

(an den Gehängestangen) ausgestattet sind. Das Fahrzeug ohne Aufzeichnungsmöglichkeit wird verwendet, um eine realistische Nachbildung eines Seilfelds mit entsprechenden Wechselwirkungen zu erhalten. Weiters muss die Möglichkeit bestehen, Messungen nur mit einem Erreger- und einem Messfahrzeug durchführen zu können. Durch das einfache Entfernen des Fahrzeugs ist diese Option gegeben.

6.3 Messsensorik

6.3.1 Inklinometer

Abbildung 6.9: Inklinometer Wuntronic TS30

Für die Messung der Auslenkung der Fahrbetriebsmittel wird der kombinierte Neigungs- und Beschleunigungsaufnehmer TS30 der Firma *Wuntronic* verwendet. Vorteile dieses Servo-Inklinometers sind neben der hohen Auflösung auch die schnellere Reaktionszeit.

Ein Problem dieses Messsystems bildet die Tatsache, dass eine genaue Winkelmessung nur im Drehpunkt möglich ist. Andernfalls werden Beschleunigungen der Bewegung mitgemessen. Genauere Ausführungen dazu finden sich im Kapitel 4 (Winkelmessung mithilfe der Inklinometer).

Messprinzip

Ein Pendel ist an einer Torsionsfeder mit geringer Steifigkeit beweglich angebracht (siehe Abbildung 6.10). Eine Lageänderung wird durch einen photoelektrischen Positionssensor erfasst. Dieses Signal wird über einen Verstärker an eine Spule eines elektromagnetischen Drehmoment-Erzeugers angelegt, der am Pendel befestigt ist. Die Polarität dieser verbundenen Elemente ist so gewählt, dass ein entgegengerichtetes Moment entsteht, das das Pendel wieder in die Nullstellung bringt (Merkmal eines Servo-Sensors). Der Eingang und die Gegentorsion bilden immer einen gegenseitigen Abgleich, wobei der Strom, der die Gegentorsion bewirkt, proportional zur Querbeschleunigung ist. Bei der Beschleunigungsanwendung des Inklinometers wird dieser am Ausgang in ein Spannungssignal umgesetzt.

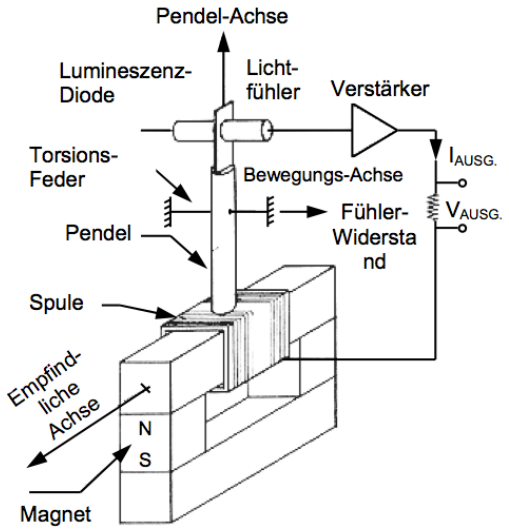


Abbildung 6.10: Messprinzig des Inklinometers Wuntronic TS30

Ist der Sensor in der Drehachse gelagert, erfährt der Inklinometer in seiner empfindlichen Achse nur die Sinuskomponente der Schwerebeschleunigung. In diesem Fall, der Neigungsanwendung des Inklinometers, ist die Ausgangsspannung linear abhängig vom Sinus des Neigungswinkels (siehe Abbildung 6.11).

Technische Daten	TS30
Messbereich Beschleunigung	$\pm 1\,g$
Messbereich Neigung	$\pm 90°$
Kleinster Messwert	$0.00001\,g$ bzw. 1”
Ausgangsspannung	$\pm 5\,V$

Tabelle 19: Technische Daten des Inklinometers Wuntronic TS30

Das Servo-Inklinometer TS30 ist auf Neigungen von $\pm 30°$ kalibriert, d. h. Querbeschleunigungen bis $\pm$g/2 können gemessen werden ($\sin 30° = 0,5$). Mit einer Empfindlichkeit von $E = 10\ Volt/g$ ergibt sich die Querauslenkung φ in rad zu

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{Volt}{10}\right) \tag{6.2}$$

und die Querbeschleunigung a in m/s^2 zu

$$a = \frac{Volt}{10} g. \tag{6.3}$$

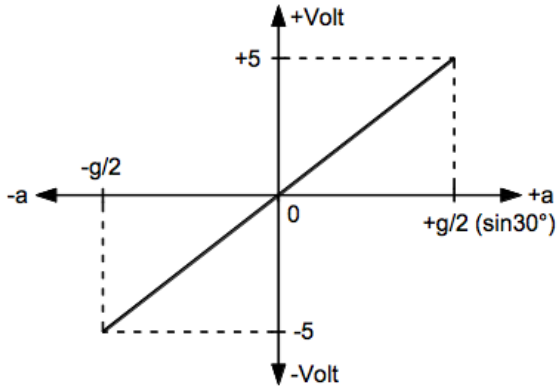


Abbildung 6.11: Kennlinie des Inklinometers Wuntronic TS30

6.3.2 Seilzugsensor

Die Messung der Position des Seils an einem Fahrbetriebsmittel übernehmen je zwei Seilzugsensoren WDS-1000-P60 analog (siehe Abbildung 6.12) der Firma $\mu\varepsilon$ - *Micro Epsilon*. Ein wesentlicher Vorteil dieser Messweise ist, dass der Weg direkt ausgelesen werden kann. Es besteht kein Bedarf der Integration, wodurch Fehler vermieden werden.

Abbildung 6.12: Seilzugsensor $\mu\varepsilon$ WDS-1000-P60 analog

Messprinzip

Seilzug-Wegsensoren messen die lineare Bewegung eines Messobjektes über ein Messseil aus hochflexiblen Stahladern, das mit einem Federmotor auf eine Trommel gewickelt wird (siehe Abbildung 6.13). Die Messtrommel ist axial mit einem Hybrid-Potentiometer (Sensorelement) gekoppelt. Über das Seilzugprinzip wird

eine Linearbewegung in eine Rotationsbewegung transformiert und in eine Widerstandsänderung gewandelt. Je nach Seilstellung wird eine entsprechende Spannung ausgegeben.

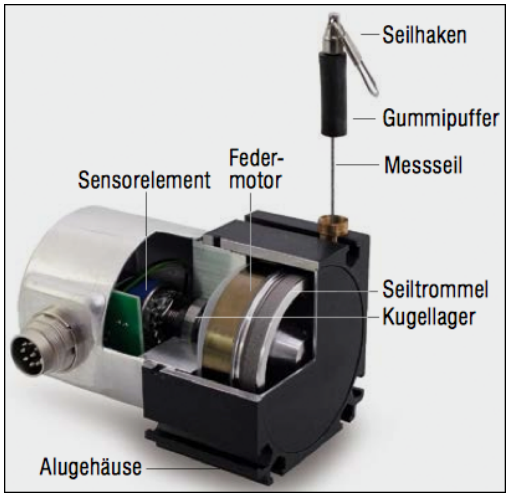


Abbildung 6.13: Aufbau des Seilzug-Wegsensors

Technische Daten	WDS-1000-P60
Messbereich	1000 mm
Linearität	$\pm 1\,mm$
Auflösung	gegen unendlich
Ausgangsspannung	0-10 V

Tabelle 20: Technische Daten des Seilzug-Wegsensors

6.3.3 NI Data Acquisition

Im Kapitel 5.3.4 wurden die Elemente dieser Datenerfassungshardware mit der entsprechenden Funktionsweise beschrieben (siehe Abbildung 5.21). Der Prüfstand P2 benötigt keine Signalkonditionierung wie Verstärkung oder Filterung. Es wird am Steckplatz 1 und 4 des Ethernet Chassis NI cDAQ 9188 jeweils ein Analogeingangsmodul NI 9215 verbaut (siehe Abbildung 5.25 und 6.14). Das Modul 1 nimmt neben den zusätzlich am Erregerfahrzeug montierten Beschleunigungssensoren auch die weit wichtigeren Inklinometer des Erreger- und Messfahrzeugs auf. Auf die Beschleunigungssensoren wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, da sie für

die Realisierung der Ziele dieser Thesis nicht von Relevanz sind. Modul 4 tastet die vier Seilzugsensoren ab und wandelt die analogen Eingangssignale wie Modul 1 in digitale um. In Tabelle 21 ist die Belegung der einzelnen Module angeführt, wobei die Sensoren mit ihren Analogausgangsspannungen nach Pinbelegung aufgelistet sind.

Der Spannungswandler bzw. Gleichrichter wird benötigt, um die erforderliche Speisespannung von $\pm 15\,V$ für die Inklinometer zu erzeugen. Die Versorgung von 14-27 V Gleichspannung der Seilzugsensoren wird durch ein Laptop-Netzteil realisiert.

Kanal	Pin	Modul 1		Modul 4	
1	0	Beschl.-Sensor	grün $0\,V$	Seilzugsensor 1	grün $0\,V$
	1		grau $5\,V$		gelb $10\,V$
2	2	Beschl.-Sensor	geld $0\,V$	Seilzugsensor 2	grün $0\,V$
	3		pink $5\,V$		gelb $10\,V$
3	4	Inkinometer 1	braun $-5\,V$	Seilzugsensor 3	grün $0\,V$
	5		weiß $5\,V$		gelb $10\,V$
4	6	Inkinometer 2	braun $-5\,V$	Seilzugsensor 4	grün $0\,V$
	7		weiß $5\,V$		gelb $10\,V$
Erdung	9		grün-schwarz		grün-schwarz

Tabelle 21: Belegung der Module 1 und 4

Nach dem Verkabeln der einzelnen Sensoren werden im NI Measurement & Automation Explorer (siehe Abbildung 5.25) das Ethernet Chassis und die entsprechenden Messwertkarten im Menü *Geräte und Schnittstellen / Netzwerkgeräte* hinzugefügt. Des Weiteren werden die für diesen Prüfstand P2 benötigten Tasks *Spannung_ Modul1* und *Spannung_ Modul4* im Untermenü *Datenumgebung / NI-DAQmx-Tasks* laut den Sensordatenblättern erstellt. Hardwaretechnisch ist somit alles abgehandelt und die Programmierung in LabVIEW kann erfolgen.

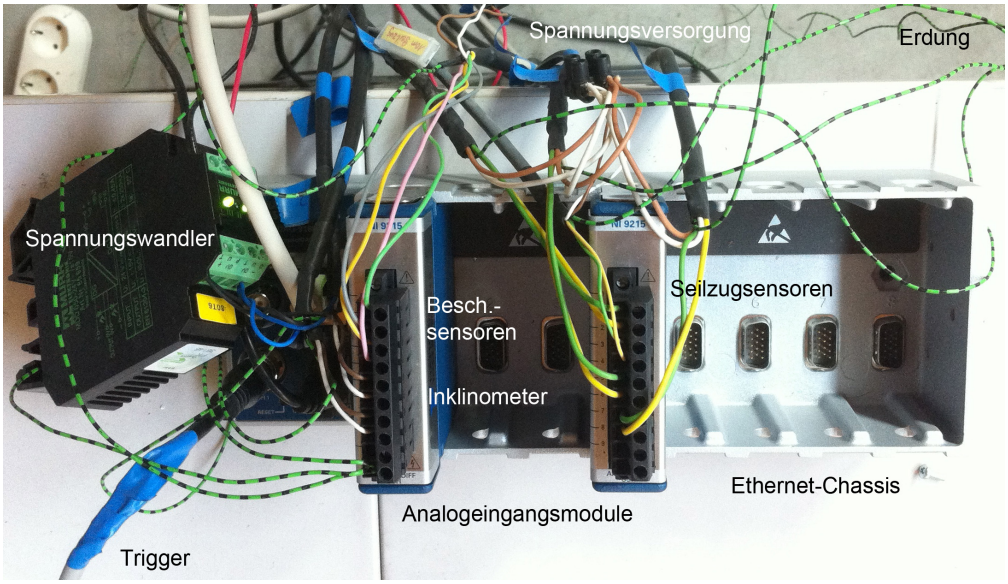


Abbildung 6.14: Angeschlossenes Ethernet Chassis mit Messwertkarten

6.4 Schwingerregung

6.4.1 Linearmotoreinheit

An der Gehängestange des Erregerfahrzeugs befindet sich anstelle des Fahrgastteils ein Linearantrieb mit beweglicher Zusatzmasse. Dieser wird je nach Wahl in der Software (siehe Kapitel 6.4.2) verschiedene Erregerprogramme durchfahren. Einstellbar sind die Periodendauer und die Amplitude des Geschwindigkeitssollwertes für eine harmonische, rauschartige oder impulsartige Anregung. Die Anforderung an diese Erregereinheit ist, dass sei eine hohe Dynamik unter Lasten (Zusatzmasse) auf langen Verfahrwegen besitzt.

Zur Erregung wird das Omegamodul OBB85 mit Kugelschienenführung, Zahnriementrieb und Getriebe der Firma *Rexroth* verwendet (siehe Abbildung 6.15). Eine Zusatzmasse von $150\,kg$ ist als Ersatz des Fahrgastteils am Tischteil des Linearantriebs montiert.

Technische Daten	Omegamodul OBB85
Antriebsmoment	$154\,Nm$
Länge Hauptkörper	$5500\,mm$
Geschwindigkeit	$5\,m/s$

Tabelle 22: Technische Daten des Omegamoduls OBB85

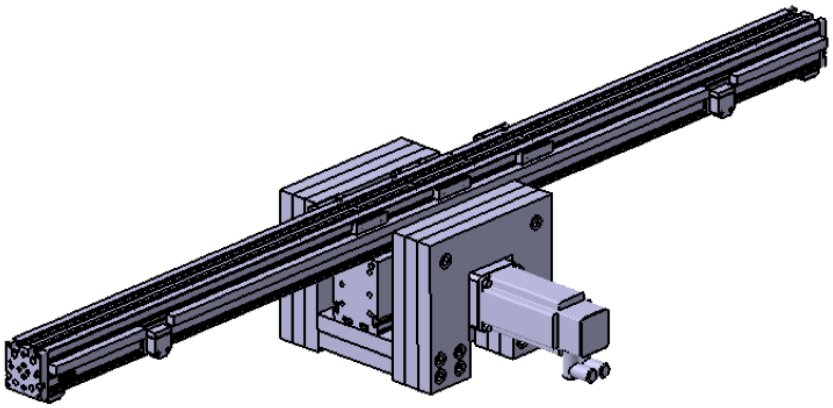


Abbildung 6.15: Linearantrieb des Erregerfahrzeugs

Die Kontrolle, ob der Motor mit der Zusatzmasse den Anforderungen genügt, wurde in der Diplomarbeit "Entwicklung und Inbetriebnahme eines Prüfstandes zur Messung von Seilbahnschwingungen" [Kalkan, 2013] durchgeführt. Die auftretenden Momente von Motor und Getriebe liegen unterhalb der Werte, die laut Datenblatt maximal zulässig sind.

Arbeitsweise

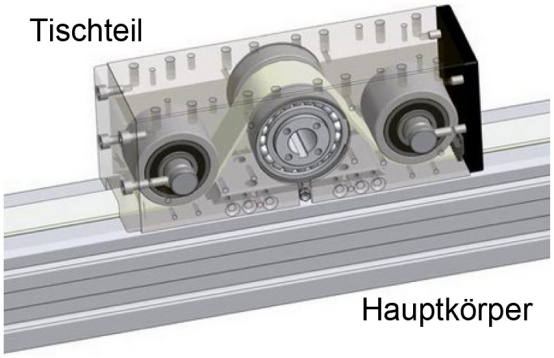


Abbildung 6.16: Funktionsweise des Omegamoduls OBB85 [vgl. Bosch Rexroth AG, Omegamodule OBB]

Der Tischteil des Omegamoduls besteht aus drei Rollen, wobei die mittlere mit dem Zahnriemen interagiert und vom Motor getrieben ist. Die Rollen sind so angeordnet, dass der Zahnriemen eine Omega-Form annimmt (siehe Abbildung 6.16). Damit wird eine hohe Spannung des Zahnriemens erreicht, die für die geforderten

Beschleunigungen benötigt wird. Der Zahnriemen ist an den beiden Enden des Hauptkörpers mit Schrauben kraftschlüssig vorgespannt. Die Führung des Tischteils erfolgt über eine Kugelschienenführung.

6.4.2 Steuerungssoftware IndraWorks

Um eine optimale Bedienbarkeit des Omegamoduls zu gewährleisten, wird die Steuerungssoftware IndraWorks der Firma *Rexroth* verwendet. IndraWorks bietet fertige Tools für die Ansteuerung des Antriebs und hat im Gegensatz zu LabVIEW, welches ein zusätzliches Steuerelement benötigen würde, vollen Zugriff auf die Antriebssteuerung.

Für die Steuerung und Positionsregelung des Omegamoduls OBB85 wird ein Schaltschrank, der mit den benötigten Komponenten verdrahtet ist, bestellt. Diese Elektrosteuerung besteht aus einem HCS02 IndraDrive Kompaktumrichter inklusive Netzfilter, einem CSH01.3C IndraDrive Steuerteil und der IndraDrive Firmware. Mit diesen Bestandteilen kann eine SPS-Steuerung programmiert werden. Das Engineering-Framework IndraWorks ermöglicht dabei die einfache Kommunikation über Ethernet oder eine D-Sub-Verbindung.

Abbildung 6.17: Getriebe- und Bewegungsgrenzwerteinstellungen

Nach der Verbindung der Steuersoftware IndraWorks mit dem Omegamodul wird ein Strukturbaum mit möglichen Einstellungen zum Antrieb und dessen Dynamik angezeigt (siehe Abbildung 6.18). Viele Grundeinstellungen werden vom Programm nach Erkennen des Omegamoduls selbstständig getätigt. Die Getriebekonfiguration und die Bewegungsgrenzwerte sind zwei erwähnenswerte Punkte, die manuell eingestellt werden müssen (siehe Abbildung 6.17).

Neben dem Verfahrbereich wird bei der Getriebekonfiguration auch die Getriebeübersetzung eingestellt. Die Einstellung der Grenzwerte kann sowohl durch einen Softwareendschalter als auch durch einen Hardwareendschalter programmiert werden. Generell wird zuerst der Softwareendschalter ausgelöst, der Hardwareendschalter dient als zusätzliche Sicherheit. Weiters ist auch die Einstellung der

Geschwindigkeits- und Beschleunigungsgrenzwerte in diesem Fenster möglich. Andere Justierungen, wie zum Beispiel im Falle einer Störung oder einer Notbremsung reagiert wird, kann in anderen Registerkarten eingerichtet werden.

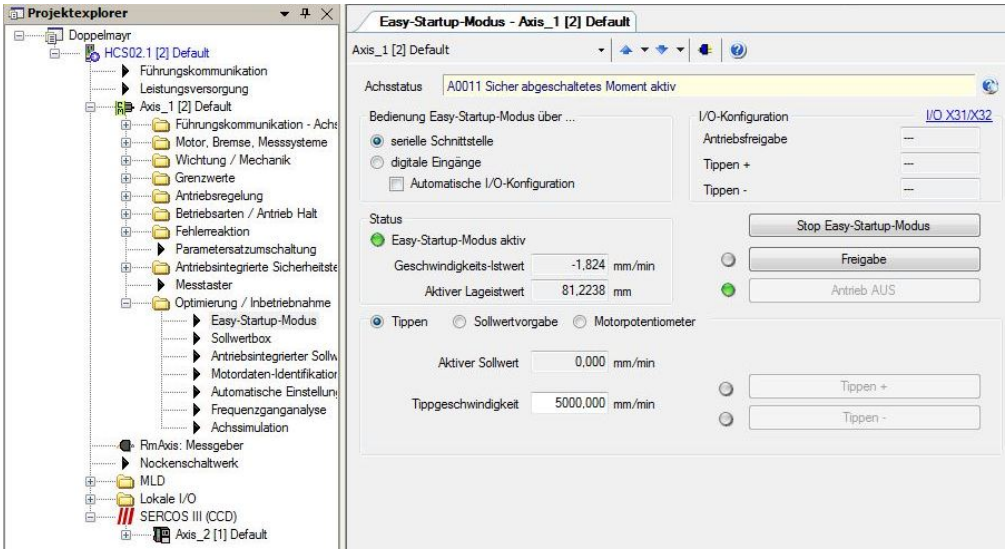


Abbildung 6.18: Easy-Startup-Modus

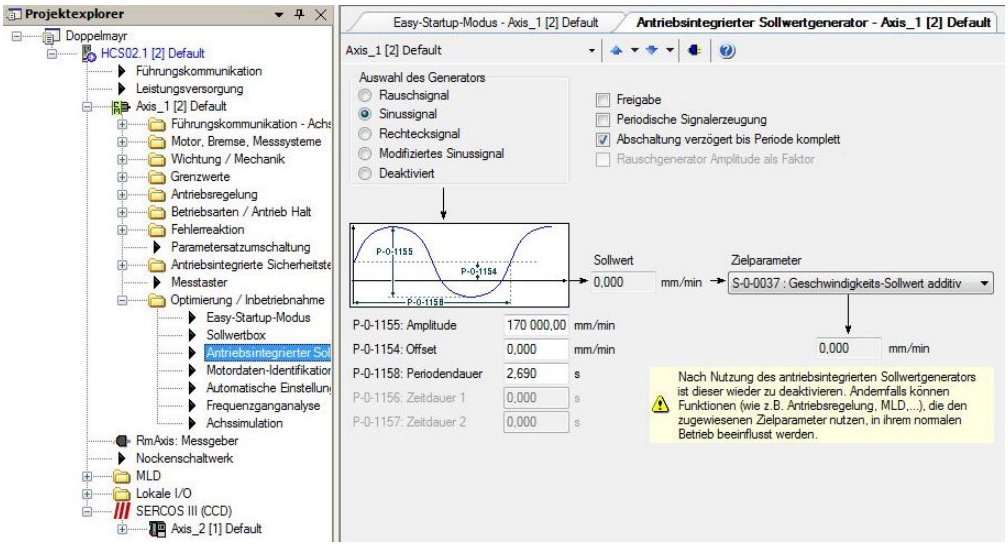


Abbildung 6.19: Antriebsintegrierter Sollwertgenerator

Für die Inbetriebnahme des Antriebs bietet sich der *Easy-Startup-Modus* (siehe Abbildung 6.18) an, bei dem nach der Freigabe des Motors durch Tippen das

Tischteil in eine bestimmte Lage gebracht werden kann. Um den Antrieb geregelt fahren zu lassen, wird in das Fenster *Antriebsintegrierter Sollwertgenerator* (siehe Abbildung 6.19) gewechselt. Hier können Rausch-, Sinus- und Rechtecksignale für die Erregung generiert werden. Bei den Messungen wird hauptsächlich der Sinus geschwindigkeitsabhängig geregelt, um ein Aufschaukeln des Fahrbetriebsmittels zu erreichen. Einstellbar sind Amplitude, Offset und Periodendauer der periodischen Signalerzeugung. Für die Messungen müssen der Weg, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung des Tischteils aufgezeichnet werden. Auch das ist in IndraWorks direkt möglich.

Synchronisation

Wie schon im Kapitel 5.4.4 – Synchronisation erwähnt wurde, ist das Triggern von Geräten ein wesentlicher Bestandteil jeder korrekten Messung. Dadurch sind die bei den Versuchen involvierten Instrumente zeitlich aufeinander abgestimmt.

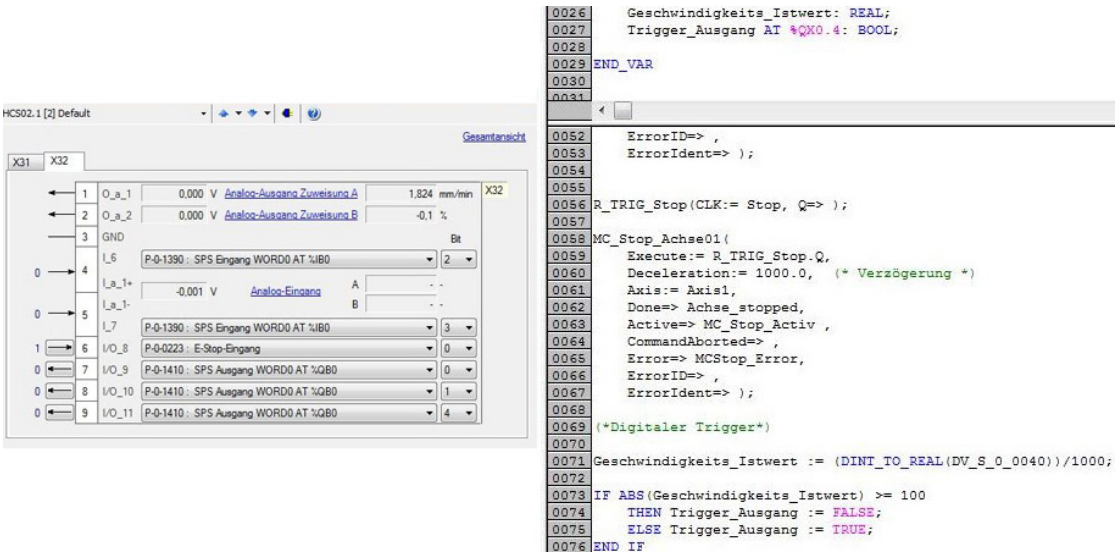


Abbildung 6.20: Einrichten des SPS Ausgangs; Variablendekleration und Code für die digitale Triggerung

Am Prüfstand P2 wird die Synchronisation der Erregereinheit mit der Messaufzeichnung durchgeführt, indem ein digitaler Trigger von der Motorsteuerung an das LabVIEW Programm geschickt wird, sobald die Erregung eingeleitet wurde. Das Ethernet Chassis NI cDAQ 9188 (siehe Kapitel 5.3.4) verfügt dafür über spezielle Triggerleitungen mit BNC-Anschlüssen. Auf der Seite der Erregung muss zunächst ein freier SPS Ausgang für diese Aufgabe im IndraWorks zugewiesen und im Schaltschrank verkabelt werden (siehe Abbildung 6.20 links). Dann folgen im

IndraLogic, ein Unterprogramm von IndraWorks, SPS Befehle, welche einen Trigger beim Anfahren des Antriebs ausgeben (siehe Abbildung 6.20 rechts).

Mit der Messung der Sensoren in LabVIEW wird dann so lange gewartet, bis der Trigger aus der Antriebssteuerung in Form einer steigende Flanke von $10\,V$ erkannt wird (siehe Kapitel 6.5).

6.5 Messaufzeichnung in LabVIEW

Das Messprogramm in LabVIEW wird verwendet, um die Auswertung der Seilzugsensoren und Inklinometer zu ermöglichen. Die am Ethernet Chassis NI cDAQ 9188 anliegenden Spannungen der einzelnen Sensoren sollen je nach Anforderung in Längen und Winkel umgerechnet und in eine Excel-Datei ausgeschrieben werden. Zusätzlich besteht die Anforderung, dass die Messung mit der Erregereinheit synchronisiert wird (siehe Kapitel 6.4.2). Neben der Unterscheidung zwischen kontinuierlicher und definierter Messdauer sollte auch die Kalibrierung der Inklinometer möglich sein. Dadurch lässt sich die Nulllage des Fahrzeugs exakt mit dem Ist-Zustand vergleichen und abgleichen. In der Abbildung 6.21 ist das Blockdiagramm des Messprogramms dargestellt. Unterteilt ist dieses in Abschnitte unterschiedlicher Aufgabenerfüllung, welche nachfolgend im Detail beschrieben werden.

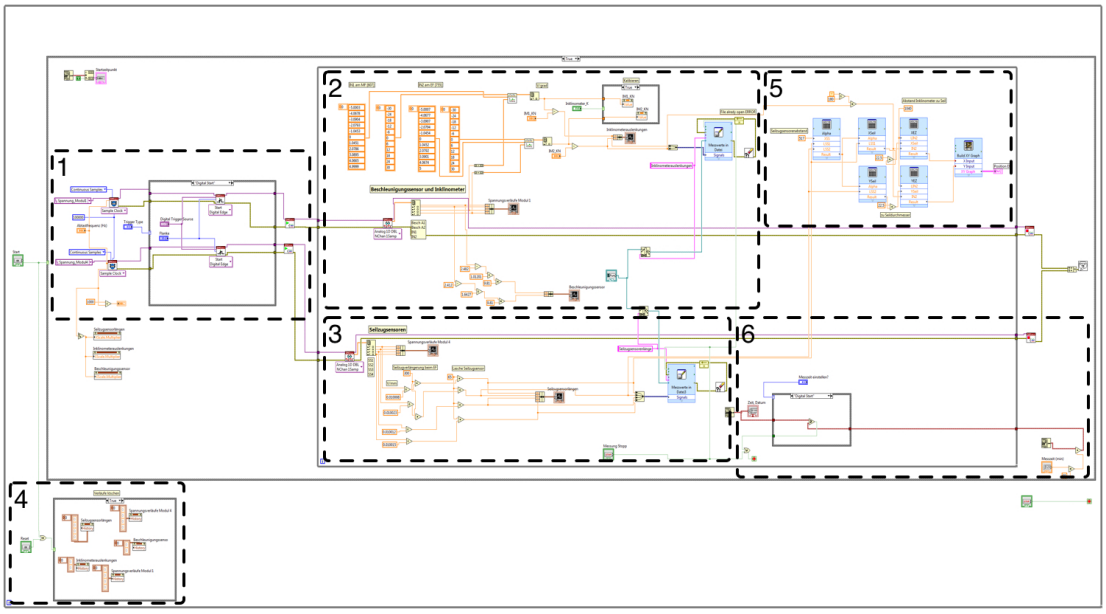


Abbildung 6.21: Blockdiagramm des Messprogramms für den Prüfstand P2

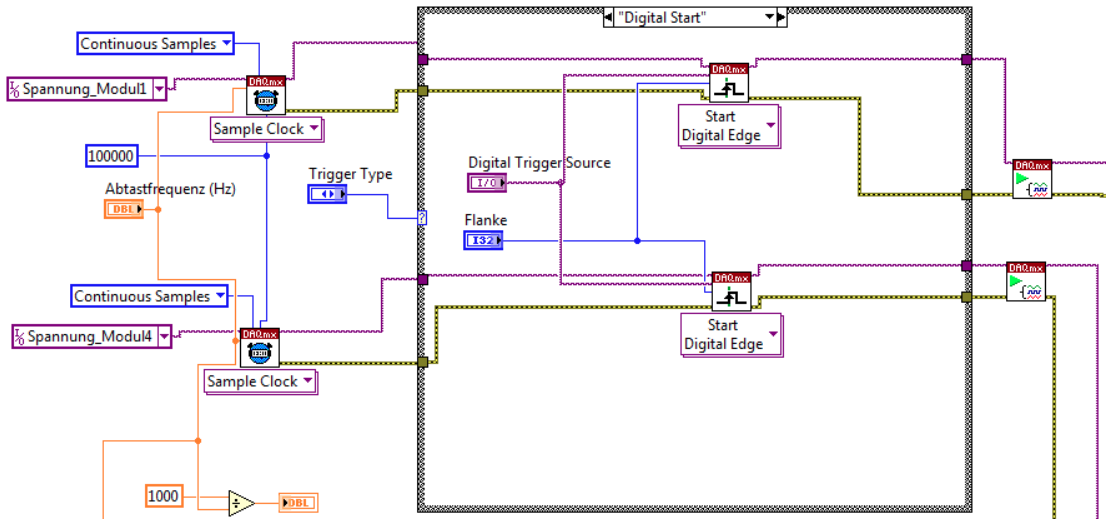


Abbildung 6.22: Abschnitt 1 des Blockdiagramms

Abschnitt 1

Die Spannungswerte werden zunächst durch die im NI Measurement & Automation Explorer erstellten Tasks (siehe Kapitel 5.3.4) *Spannung_Modul1* und *Spannung_Modul4* eingelesen. Anschließend folgt das Sampling der Signale durch eine im Frontpanel einstellbare Abtastfrequenz. In der darauffolgenden Case-Struktur wird ausgewählt, ob die Aufzeichnung mit oder ohne einem digitalen Trigger gestartet wird. Bei Auswahl des synchronisierten Starts wird auf eine digitale Flanke am entsprechenden Eingang am Ethernet Chassis gewartet. Die letzten Blöcke starten den entsprechenden Task (siehe Abbildung 6.22).

Abschnitt 2

Der erste Block entspricht dem Lesen des Tasks *Spannung_Modul1* mit der gewünschten Abtastung. Am Ausgang werden die Signale der 4 Sensoren (Belegung siehe Tabelle 21) aufgeteilt und je nach Sensor unterschiedlich behandelt. Die Aufzeichnung der für den Prüfstand P2 wichtigen Inklinometer (siehe Abbildung 6.23 oben) wird anhand einer Interpolation durchgeführt (siehe Kapitel 4). Durch Vergleiche von Inklinometerauslenkungen aus Messungen mit einem bzw. zwei Messgeräten an einem Fahrzeug kann durch die Interpolation eine hinreichend genaue Winkelvorhersage getroffen werden. Diese Interpolation ordnet den Spannungswerten der Inklinometer Winkel zu und gibt diese dann aus. Die nachfolgende Case-Stuktur ermöglicht das Kalibrieren der Inklinometer. Nach der Ausgabe der Messwerte in einem *Waveform-Chart* am Frontpanel werden die Werte in eine

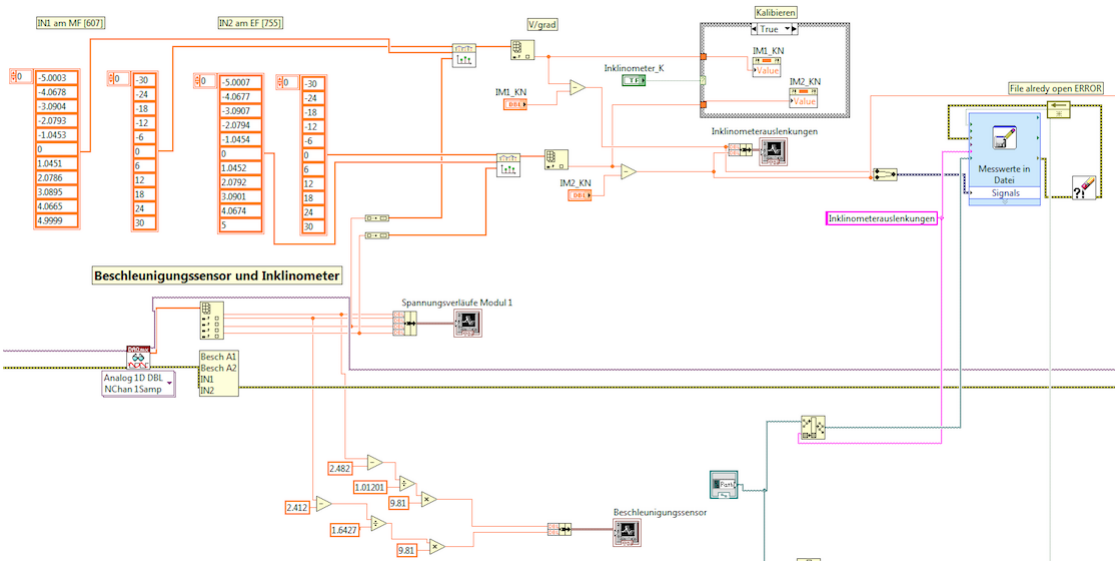


Abbildung 6.23: Abschnitt 2 des Blockdiagramms

Excel-Datei ausgeschrieben. Der entsprechende Dateipfad kann am Frontpanel eingetragen werden.

Die Aufzeichnung des Beschleunigungsensors wird auch abgehandelt (siehe Abbildung 6.23 unten). Da diese Messergebnisse aber ohne Bedeutung für diese Arbeit sind, wurden sie nicht in eine Excel-Datei ausgeschrieben.

Abschnitt 3

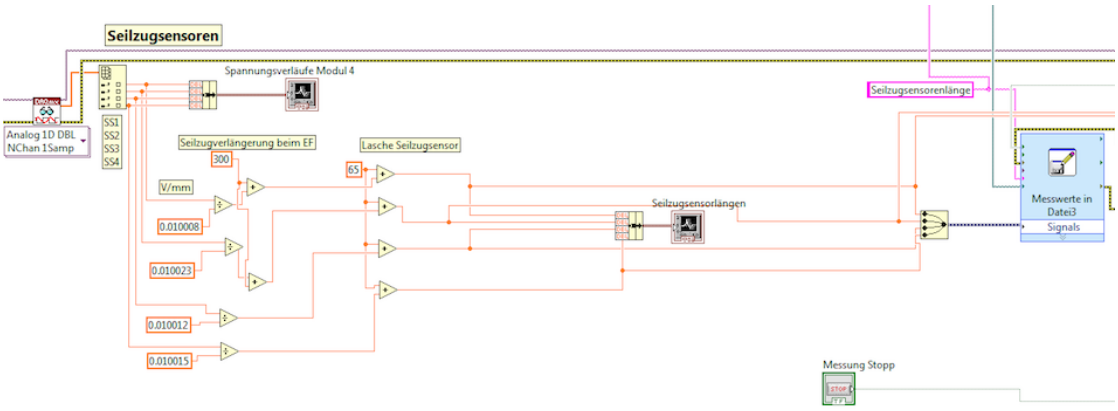


Abbildung 6.24: Abschnitt 3 des Blockdiagramms

Abschnitt 3 des Messprogramms behandelt den Task *Spannung_Modul4* und

somit die vier Seilzugsensoren (siehe Tabelle 21). Nachdem die eingelesenen Signale je Sensor aufgeteilt wurden, folgt die Umrechnung der Spannung in die Messseillänge. Zusätzlich wird beim Erregerfahrzeug aufgrund der Verlängerung der Seilzüge am Prüfstand eine Korrektur der gemessenen Länge vorgenommen. Die Länge der Seilhaken und der Gummipuffer (siehe Abbildung 6.13) muss bei allen Seilzugsensoren zum gemessenen Wert addiert werden. Anschließend folgt die Darstellung der Signale in einem *Waveform-Chart* am Frontpanel und das Übermitteln der Messwerte in eine Excel-Datei (siehe Abbildung 6.24).

Abschnitt 4

Diese Case-Struktur ist für das Löschen der *Waveform-Charts* zuständig. Das passiert entweder durch Drücken der Schaltfläche *Verläufe löschen* am Frontpanel oder automatisch beim Start einer neuen Messung.

Abschnitt 5

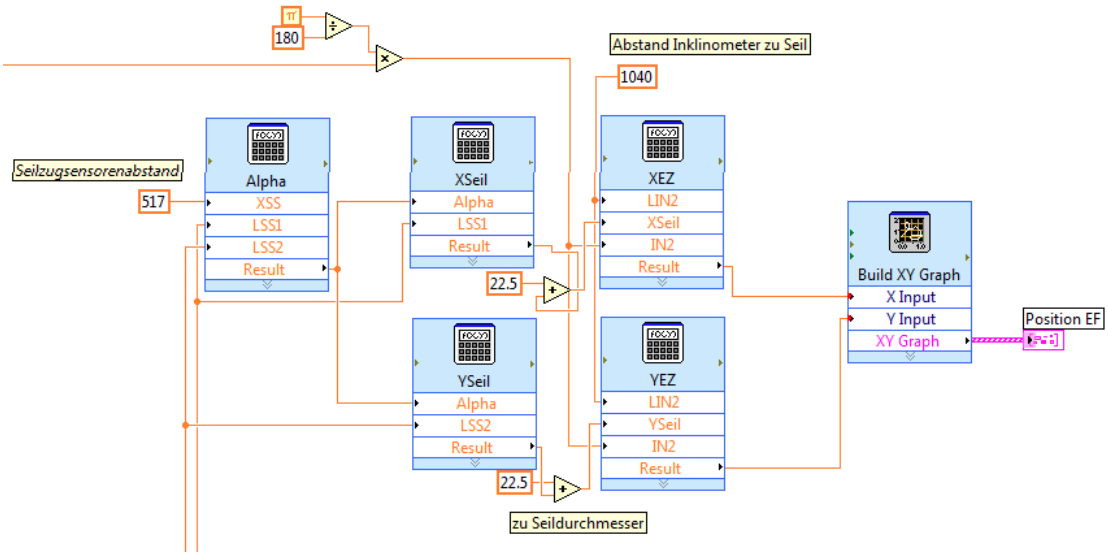


Abbildung 6.25: Abschnitt 5 des Blockdiagramms

Durch die *Formel Express-VI*-Blöcke können Formeln direkt im LabVIEW eingetragen werden (siehe Abbildung 6.25). Dadurch wird hier die Berechnung der Position des Erregerfahrzeugs, wie in Kapitel 4 vorgestellt, direkt durchgeführt und durch einen *XY Graph* am Frontpanel dargestellt.

Abschnitt 6

Im Frontpanel kann die Messzeit eingestellt werden. Bei einer kontinuierlichen Messung unterbricht nur das Drücken der Schaltfläche *Stopp* die While-Schleife für die Aufzeichnung (Abschnitte 2, 3, 5 und zum Teil 6 befinden sich in dieser Schleife – siehe Abbildung 6.21). Wird eine bestimmte Messzeit eingestellt, so übernimmt der Abschnitt 6 das Stoppen der Ausführung der While-Schleife.

Frontpanel

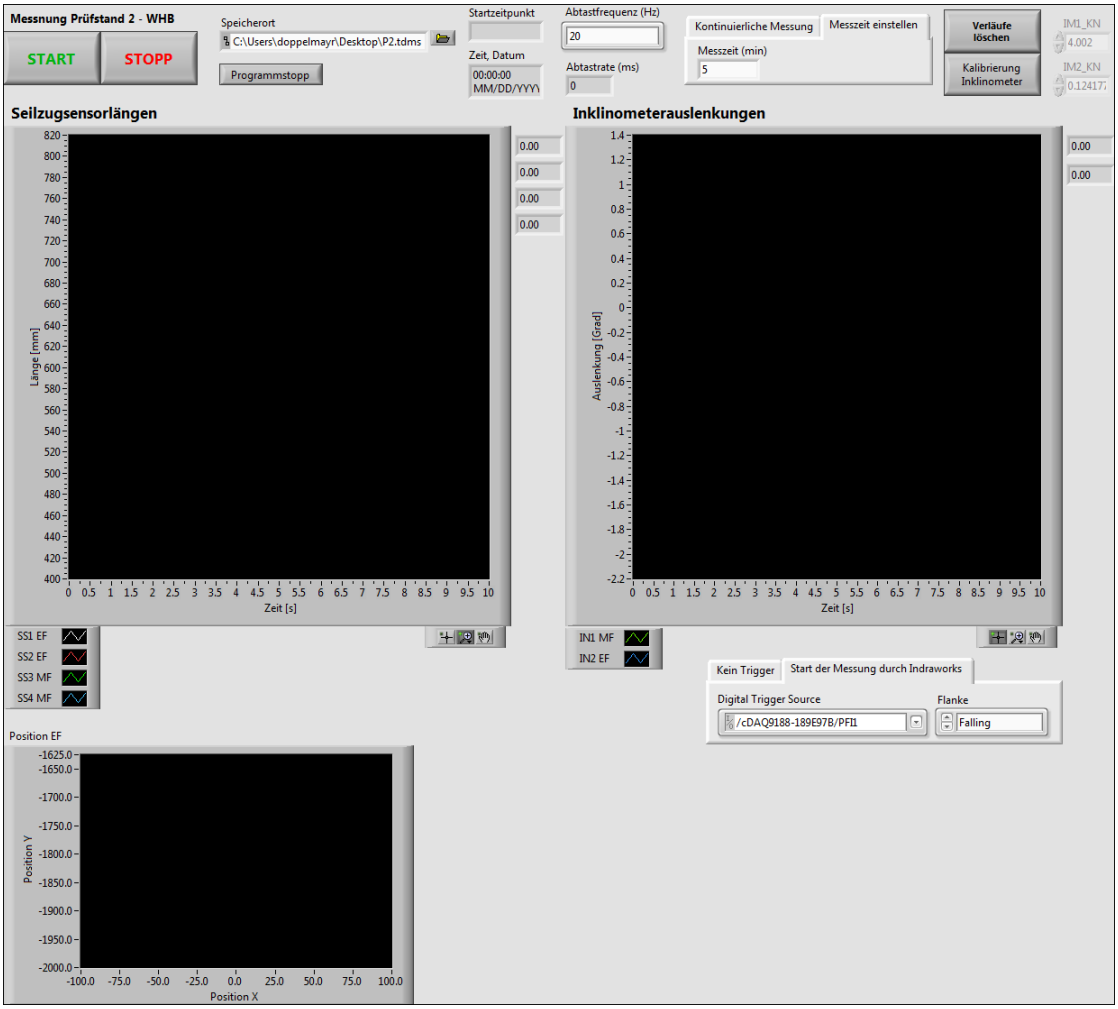


Abbildung 6.26: Frontpanel des Messprogramms für den Prüfstand P2

Das Frontpanel ist die Benutzeroberfläche der Messaufzeichnung während der Versuche. Die Eingabe der Abtastfrequenz, des Speicherorts, der Messzeit und der

Verwendung eines Triggers ist hier möglich. Auch die Kalibrierung der Inklinometer wird hier vom Benutzer durchgeführt. Weiters wird der Startzeitpunkt der Messung und die aktuelle Zeit angezeigt, um den Fortschritt der Messung einschätzen zu können. Die *Waveform-Charts* Seilzugsensorlängen, Inklinometerauslenkungen und der *XY Graph* Position EF stellen die in Längen, Winkeln und Positionen umgewandelten Spannungssignale während der Messung dar (siehe Abbildung 6.26).

Die aufgezeichneten Werte werden mit den Zeitmarken (Time Stamps) für Seilzugsensoren und Inklinometer in eine eigene Excel-Dateien geschrieben.

6.6 Messungen am Prüfstand P2

Auch beim Prüfstand P2 wird als Erstes eine *statische Messung des Seildurchhangs* durchgeführt. Dadurch kann die mathematische Formulierung des Durchhangs mit Einzellasten mit der Realität verglichen werden.

Anschließend werden die dynamischen Untersuchungen an diesem Prüfstand durchgeführt. Dazu wird das *Schwingverhalten der Fahrbetriebsmittel im Seilfeld* aufgezeichnet. Auf diese Weise lassen sich Rückschlüsse auf die Wechselwirkungen von Seil- und Fahrbetriebsmitteldynamik ziehen (siehe Kapitel 6.1).

Für die Untersuchungen gibt es zwei Versuchsanordnungen (siehe Abbildung 6.27). Zunächst wird mit drei Fahrzeugen im Seilfeld gemessen. Nach zahlreichen Versuchen wird das Fahrzeug ohne Messequipment aus dem Seilfeld genommen, und die Messungen beginnen von Neuem.

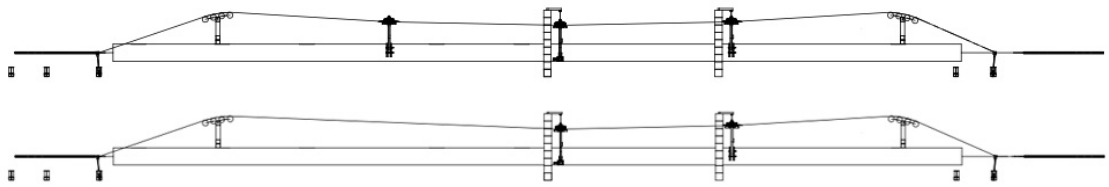


Abbildung 6.27: Seitenansicht des Prüfstands P2 mit drei bzw. zwei Fahrzeugen

6.6.1 Statische Messung des Seildurchhangs

6.6.1.1 Versuchsanordnung und -ablauf Für diese Messung wird der Laser-Entfernungsmesser GLM 150 Professional der Firma *Bosch* verwendet. Vom Boden aus wird die Höhe des Seils an den Stellen der Seilunterstützungen und der Fahrzeuge aufgenommen. Diese Höhenaufzeichnung wird an den drei bzw. zwei Fahrzeugen je nach Prüfstandsaufbau durchgeführt (siehe Abbildung 6.27).

6.6.1.2 Ergebnisse Die Ergebnisse der Seildurchhangmessung kann mit dem Werten aus dem Kapitel 3.1.2 verglichen werden. Die Differenzen ergeben sich unter anderem aus der Berechnungsannahme, dass die Seilunterstützungen auf gleichem Niveau von 3,8 m sind. In der Realität beträgt die Seilhöhe bei der Unterstützungsstelle des Fahrzeugs 3,79 m und beim Messfahrzeug 3,88 m.

Fahrzeug	gemessener Seildurchhang	berechneter Seildurchhang
Erregerfahrzeug	3,19 m	3,15 m
Messfahrzeug	3,38 m	3,3 m
Fahrzeug	3,33 m	3,31 m

Tabelle 23: Gemessener und berechneter Seildurchhang bei drei Fahrzeugen am Prüfstand P2

Fahrzeug	gemessener Seildurchhang	berechneter Seildurchhang
Erregerfahrzeug	3,3 m	3,31 m
Messfahrzeug	3,37 m	3,41 m

Tabelle 24: Gemessener und berechneter Seildurchhang bei zwei Fahrzeugen am Prüfstand P2

Erkennbar ist, dass die Biegesteifigkeit des Seils statisch keine allzu große Rolle spielt, da die Berechnungen ohne Berücksichtigung die Realität hinreichend gut widerspiegelt. Grund dafür sind sicherlich die Fahrzeuge im Seilfeld mit ihrer hohen Massenkonzentration sowie die Vorspannung des Seils.

6.6.2 Schwingverhalten der Fahrbetriebsmittel im Seilfeld

6.6.2.1 Versuchsanordnungen Die Messungen werden an den zwei möglichen Anordnungen, die in der Abbildung 6.27 skizziert sind, durchgeführt.

6.6.2.2 Versuchsablauf In der Tabelle 25 ist die Abfolge der Messungen aufgelistet. Neben der grundsätzlichen Unterscheidung nach dem Aufbau, wird bei der Erregung zwischen Sinus und Weißem Rauschen, auf welches kurz im Kapitel 5.6 eingegangen wurde, differenziert. Bei der Sinusanregung wird die Periodendauer variiert. Die Amplitude bleibt im Gegensatz zum Weißen Rauschen konstant,

da mit $170\,m/min$ der maximale Verfahrweg der Lineareinheit gegeben ist. Das Hauptaugenmerk wird allerdings auf die harmonische Erregung gerichtet, wodruch mehr Energie durch das Erregerfahrzeug in das System eingeleitet wird.

Wird in der Nähe der Eigenfrequenz mit einem Sinus angetrieben, gelingen große Auslenkungen. Diese Eigenfrequenz wird neben der Berechnung auch durch einen eigenen Prüfstand ermittelt, welcher in Kapitel 7 vorgestellt wird. Durch die Koppelung des Fahrzeuges mit dem Seilfeld ändert sich die Eigenfrequenz. Für die erste Abschätzung sind aber die Untersuchungen am Prüfstand für Fahrbetriebsmitteluntersuchungen sehr hilfreich.

Grundsätzlich wurde eine Messdauer von $5\,min$ gewählt, um die transienten Vorgänge zum Verschwinden zu bringen. Bei den ersten zwei Messungen wird $5\,min$ erregt und das Ausschwingen für weitere $5\,min$ aufgezeichnet.

Mess. Nr.	Messaufbau	Periodendauer	Geschw. Amplitude	Messdauer
1 und 2	3 Fahrzeuge	Sinus 2,68 s	$170\,m/min$	$10\,min$
3 bis 15		Sinus 2,68 s	$170\,m/min$	$5\,min$
16		Sinus 2,70 s	$170\,m/min$	$5\,min$
17		Sinus 2,69 s	$170\,m/min$	$5\,min$
18		Weißes Rauschen	$150\,m/min$	$5\,min$
19		Weißes Rauschen	$200\,m/min$	$5\,min$
20		Weißes Rauschen	$250\,m/min$	$5\,min$
21		Weißes Rauschen	$250\,m/min$	$5\,min$
22 bis 32	2 Fahrzeuge	Sinus 2,68 s	$170\,m/min$	$5\,min$
33		Weißes Rauschen	$150\,m/min$	$5\,min$
34		Weißes Rauschen	$200\,m/min$	$5\,min$
35		Weißes Rauschen	$250\,m/min$	$5\,min$
36		Weißes Rauschen	$250\,m/min$	$5\,min$
37		Sinus 2,70 s	$170\,m/min$	$5\,min$
38		Sinus 2,69 s	$170\,m/min$	$5\,min$
39		Sinus 2,67 s	$170\,m/min$	$5\,min$
40		Sinus 2,66 s	$170\,m/min$	$5\,min$

Tabelle 25: Messtabelle – Schwingverhalten der Fahrbetriebsmittel im Seilfeld

6.6.2.3 Statistische Auswertung Zweck der sich gleichenden Messungen 3 bis 15 bei einem Messaufbau mit drei Fahrzeugen und der Messungen 22 bis 32 mit zwei Fahrzeugen im Seilfeld ist es, die zufälligen Einflüsse zu identifizieren. Diese verursachen Abweichungen, welche nur durch Messungen unter weitestgehend identischen

Bedingungen erkannt werden können. Die durch die wiederholten Messungen entstandenen Messreihen werden anschließend mithilfe von statistischen Methoden auf ihre zufälligen Abweichungen analysiert. Eine geeignete mathematische Auswertung der Messreihe erlaubt Aussagen zu dem Bereich, worin der wahre Wert bzw. der Erwartungswert der Messgröße mit einer angenommenen Wahrscheinlichkeit, also der vorgegebenen statistischen Sicherheit, liegt [vgl. Parthier, 2008, S. 55].

Ausgehend von der Tatsache, dass es technisch nicht möglich ist, eine fehlerfreie Messung durchzuführen, stellt die Abschätzung der Brauchbarkeit einer Messung auf Basis der auftretenden Messabweichungen die entscheidende Aufgabe bei der Durchführung und Auswertung von Messungen dar. Das ist umso wichtiger, weil in der Messpraxis kein Ergebnis akzeptiert werden kann, das nicht durch eine Angabe zur Vertrauenswürdigkeit des Messergebnisses charakterisiert ist [Parthier, 2008, S. 47].

Angenommen wird, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte einer Messreihe der Normalverteilung gehorcht. Dies trifft in der Praxis häufig zu. In diesem Fall kann ein Vertrauensbereich für den Mittelwert $\bar{x}$ (siehe Formel 6.4) zu einem geforderten Vertrauensniveau, also der geforderten statistischen Sicherheit, angegeben werden [vgl. Parthier, 2008, S. 67].

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{6.4}$$

Die empirische Standardabweichung ergibt

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2} \tag{6.5}$$

und die Größe des Vertrauensbereiches, gekennzeichnet durch obere und untere Grenze, wird mithilfe der diskreten t-Verteilung berechnet zu

$$v = \pm \frac{t}{\sqrt{n}}. \tag{6.6}$$

Im Fall der $n = 13$ Messungen bei einem Messaufbau von drei Fahrzeugen ergibt sich das t-Quantil für einen zweiseitigen 95% Vertrauensbereich zu $t = 2,16$ [DIN 1319-3:1996, S. 8]. Aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes wird die Prädiktion des Messwertes mit der Anzahl der Messungen genauer. Für die weitere Verwendung der Messdaten ist diese Anzahl von Versuchen jedoch genügend.

In Abbildung 6.28 sind die Messergebnisse der Seilzugsensoren übereinander gelegt. Durch den Trigger ist der Startpunkt der Messungen und der Verlauf beinahe ident. Die Ausreißer der Messreihen sind auf externe Störungen (z. B. Temperatureinflüsse, Imperfektionen, Rückwirkung des Messgeräts auf das Messobjekt

usw.) zurückzuführen. Sie können durch einen Tiefpassfilter oder durch statistische Methoden zum Verschwinden gebracht werden.

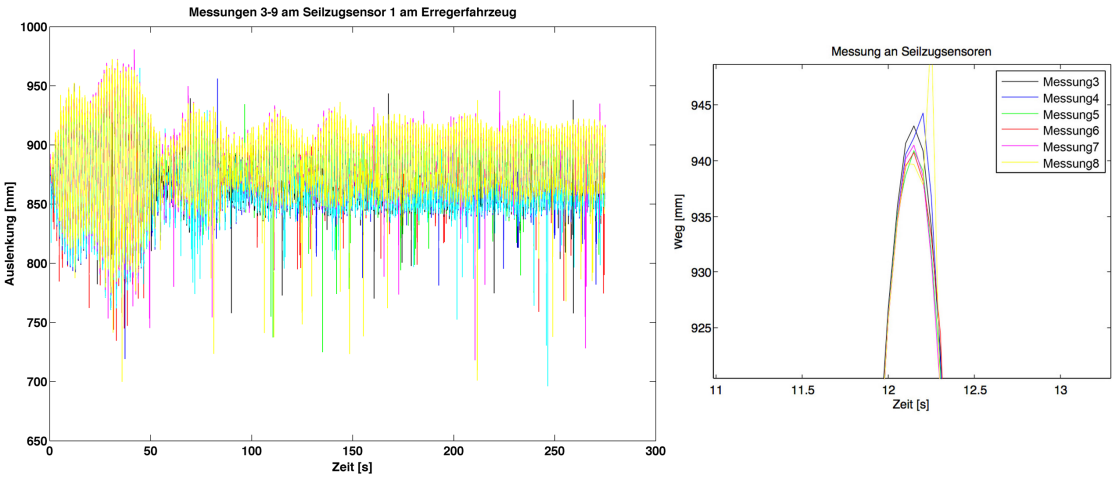


Abbildung 6.28: Messungen 3 bis 8 am Seilzugsensor SS1 des Erregerfahrzeuges am Prüfstand P2, Synchronisation der Messungen

Genauer wird hier nur auf die statistischen Auswertungen der Messungen 3 bis 15 am Seilzugsensor SS1 am Erregerfahrzeug eingegangen. Erkennbar ist, dass die Ausreißer, welche weiter als das 1,5-Fache des Quartilabstandes außerhalb dieses Intervalls liegen, je nach Messung an einer andere Stelle liegen. Aufgrund des Abstandes und des zufälligen Auftretens kann es sich somit nicht um ein verlässliches und echtes Ergebnis handeln (siehe Abbildung 6.29).

In Abbildung 6.30 sind die Messsignale des Inklinometers am Erregerfahrzeug und deren statistische Auswertungen abgebildet.

Somit kann der Anforderung einer Angabe eines vollständigen Messergebnisses (in diesem Fall die Angabe als Vertrauensbereich) nach DIN 1319 [DIN 1319-3:1996, S. 7] nachgekommen werden.

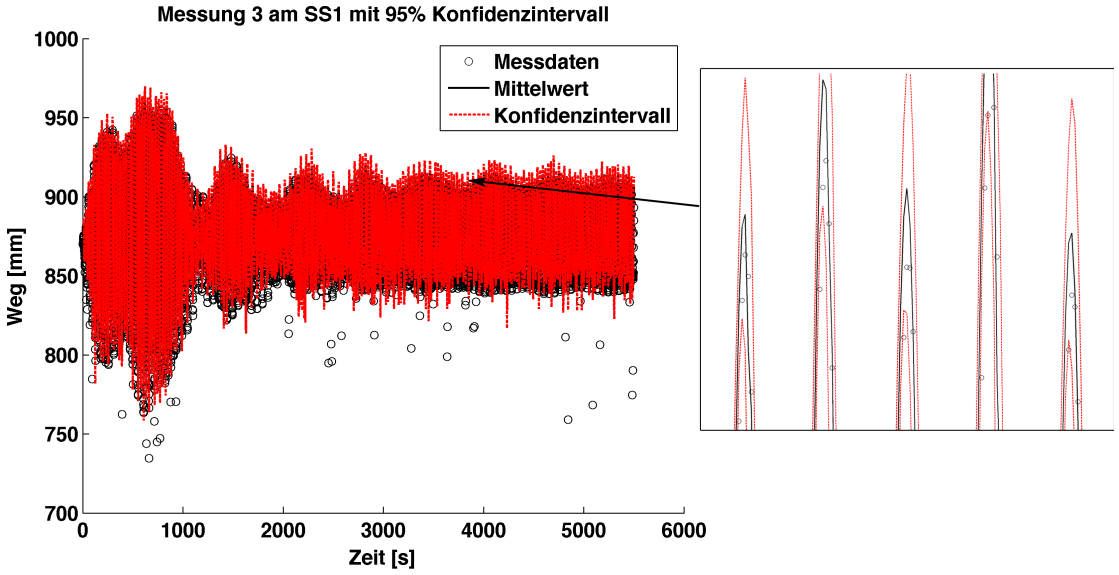


Abbildung 6.29: Statistische Auswertung der Messungen 3 bis 15 am Seilzugsensor SS1 des Erregerfahrzeuges mit Daten aus der 3. Messung

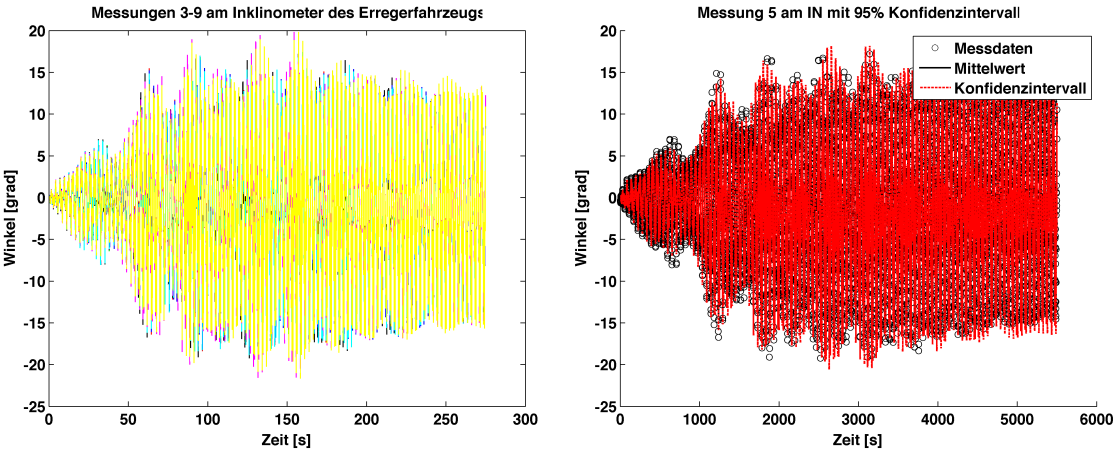


Abbildung 6.30: Messungen 3 bis 15 am Inklinometer des Erregerfahrzeuges und deren statistische Auswertung

6.6.2.4 Ergebnisse im Zeitbereich Mit den aufgezeichneten Signalen der einzelnen Sensoren am Prüfstand P2 kann mithilfe der Berechnungen aus dem Kapitel 4 die Lage der Fahrbetriebsmittel in Abhängigkeit von der Zeit kalkuliert werden. Im Zeitbereich wird nur auf die Messung 39 mit 2 Fahrbetriebsmitteln näher eingegangen, da alle Messungen im Verlauf ähnlich sind. Die Erregung erfolgt dabei mit

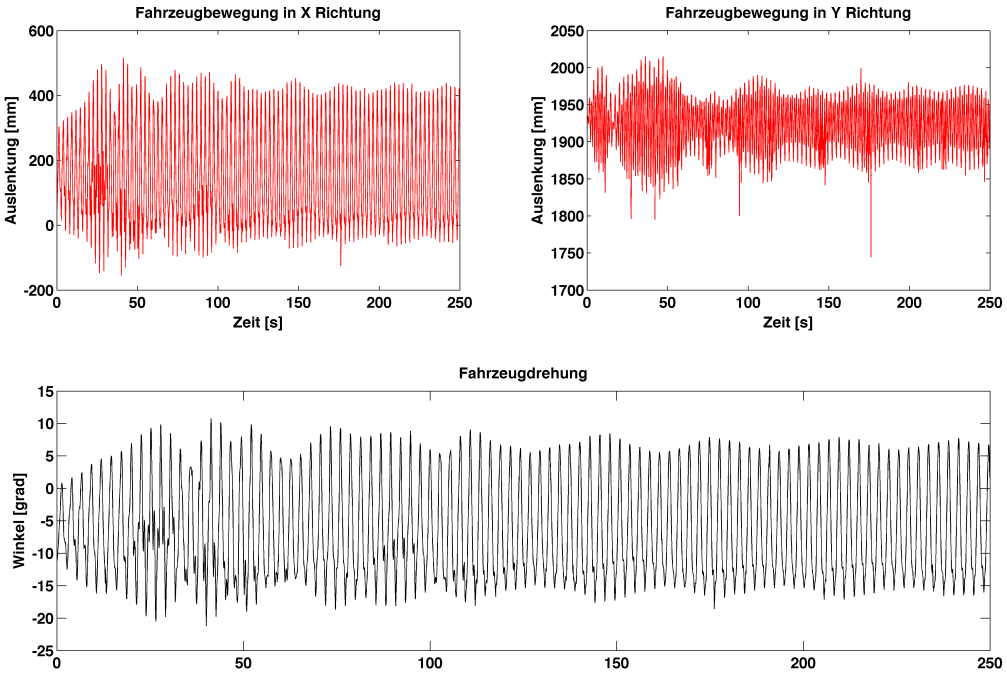


Abbildung 6.31: Bewegungsauswertung des Erregerfahrzeuges bei der Messung 39

einem Sinus mit einer Periodendauer von 2,67 s und einer Geschwindigkeitsamplitude von 170 m/min.

In Abbildung 6.31 und 6.32 sind die bei der Messung 39 aufgezeichneten Fahrzeugbewegungen der zwei Fahrbetriebsmittel durch die translatorischen Bewegungen (x- und y-Koordinaten) und die Rotation (φ Koordinate) des Massenmittelpunkts abgebildet. Eine Skizze eines Fahrzeugs samt Messaufbau liegt in Abbildung 4.1 vor.

Bei der Aufzeichnung des Erregerfahrzeuges ist erkennbar (siehe Abbildung 6.31), wie zunächst das Aufschaukeln erfolgt. Nach dem Abklingen der transienten Vorgänge führt das Gesamtsystem periodische Bewegungsabläufe durch.

Bei der Bewegungsauswertung des Messfahrzeuges wird bewusst nur ein Zeitabschnitt von 10 s im eingeschwungenen Zustand gewählt (siehe Abbildung 6.32), um den Schwingungsverlauf genauer darstellen zu können.

In Abbildung 6.33 wird, die Massenmittelpunktsbewegung des Messfahrbetriebsmittels der Messung 26 im Raum über die Zeit dargestellt. Erkennbar wird hier durch das Nachfahren der blauen Linie, wie sich die Schwingung über die Zeit entwickelt. Zu beachten ist, dass sich die Linie aufgrund der fortlaufenden Zeit nicht kreuzt. Die “Schlaufe” an der Stelle von 2 s ist auf den Einfluss der Seilbewegung auf das Schwingverhalten des Fahrzeugs zurückzuführen. In Abbildung 6.32 (Fahrzeugbewegung in x-Richtung) sind diese Einflüsse durch die zeitweisen

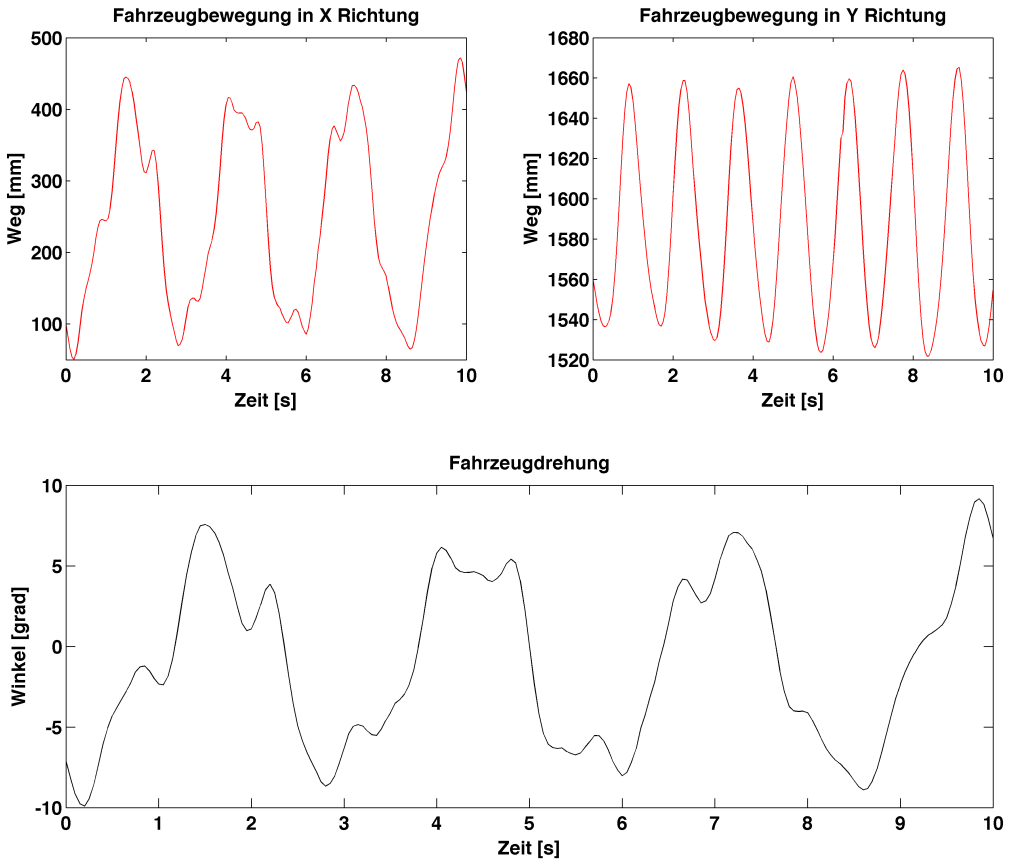


Abbildung 6.32: Zeitabschnitt der Bewegungsauswertung des Messfahrzeugs bei der Messung 39

Umkehrungen der Bewegungsrichtung zu erkennen. Es ist auch festzustellen, dass der Seileinfluss in y-Richtung gering ist (siehe Abbildung 6.32 (Fahrzeugbewegung in y-Richtung)).

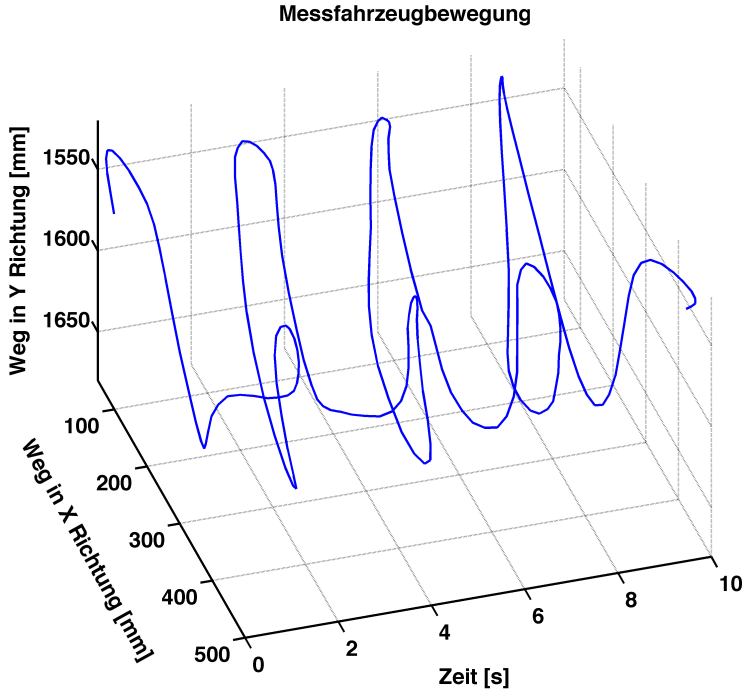


Abbildung 6.33: Bewegung des Messfahrzeugs über die Zeit bei der Messung 39

6.6.2.5 Ergebnisse im Frequenzbereich An dieser Stelle wird die FFT (Fast Fourier Transformation) angewendet, ein mathematisches Werkzeug, das zeitabhängige Schwingungsdaten in den Frequenzbereich transformiert. Dadurch lässt sich einfach feststellen, wie stark die verschiedenen Frequenzen in einem Signal enthalten sind.

Repräsentativ für alle Messungen wird auf die Messung 8 mit 3 Fahrzeugen im Seilfeld und auf die Messung 26 mit 2 Fahrbetriebsmitteln näher eingegangen. Die Erregung erfolgt bei beiden Messungen mit einem Sinus mit einer Periodendauer von 2,68 s und einer Geschwindigkeitsamplitude von 170 m/min.

Nach der FFT-Analyse der Inklinometer ist zu erkennen, dass die Frequenz mit der größten Amplitude bei den Messungen, am Erreger- und Messfahrzeug (siehe Abbildung 6.35 und 6.36), wie zu erwarten war die Erregerfrequenz von 0,37 Hz der Lineareinheit ist (siehe Abbildung 6.34).

Es ist festzustellen, dass die Frequenzen im Spektrum einen äquidistanten Abstand von 0,37 Hz zueinander aufweisen. Die auftretenden Frequenzen sind das Vielfache der Grundfrequenz, ähnlich dem Frequenzspektrum einer Saitenschwingung. Die Überlagerung von kontinuierlich einlaufenden Wellen über das Erregerfahrzeug mit den reflektierten Wellen an den Stellen großer Massenkonzentration (Fahrbetriebsmittel) oder an den Einspannstellen führt zu diesem Phänomen (Reflexions- und

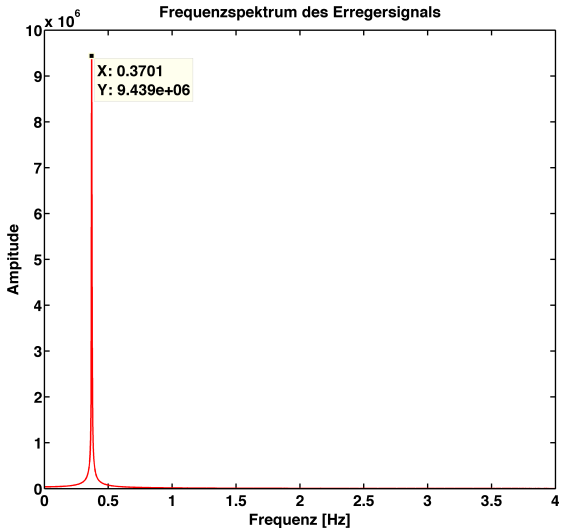


Abbildung 6.34: Frequenzspektrum des Erregersignals der Lineareinheit bei den Messungen 8 und 26

Transmissionseffekte). Befinden sich 3 Fahrzeuge im Seilfeld (siehe Abbildung 6.35), sind die so genannten Oberschwingungen ausgeprägter als im Fall der Messung 26 (siehe Abbildung 6.36).

Im Kapitel 3.2.3 wird die Wellengleichung für Torsionsschwingungen (siehe Gleichung 3.61) hergeleitet. Aus der Formel 3.32 lässt sich die Eigenfrequenz der Harmonischen, bei beidseitig eingespanntem Seil, überschlagsmäßig als Saite berechnen zu

$$f_n = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{GI_T}{\varrho I_P}}. \tag{6.7}$$

Aufgrund unbekannter und notwendiger Seilparameter, wie zum Beispiel die Torsionssteifigkeit GI_T, wird bezüglich der weiterführenden Auswertung auf das Forschungsprojekt [Kartnig et al., 2011] verwiesen.

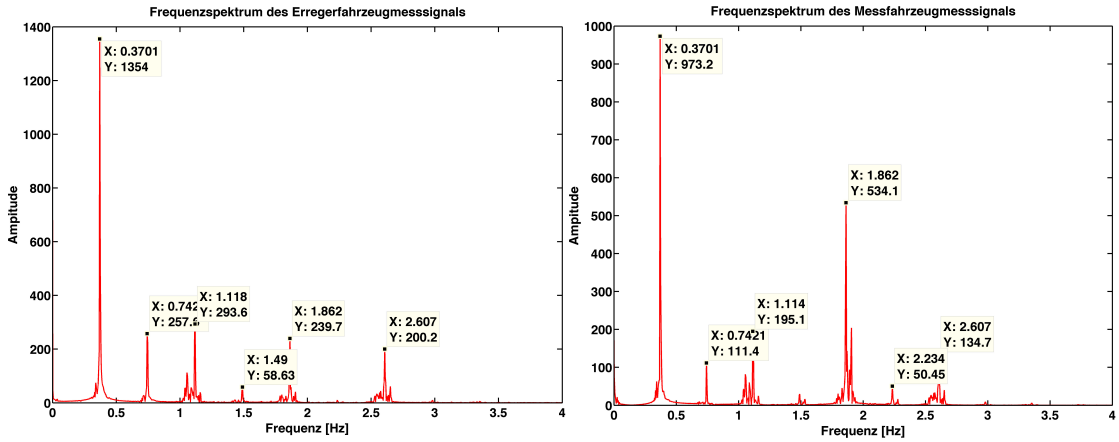


Abbildung 6.35: Frequenzspektrum der Inklinometer am Erreger- bzw. Messfahrzeugs bei der Messung 8

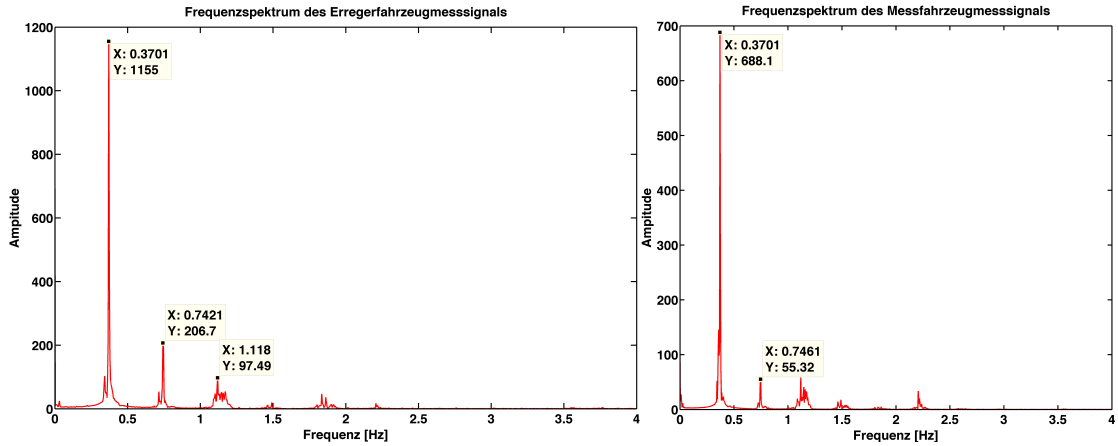


Abbildung 6.36: Frequenzspektrum der Inklinometer am Erreger- bzw. Messfahrzeugs bei der Messung 26

7 Prüfstand für Fahrbetriebsmitteluntersuchungen

7.1 Prüfstandskonzept

Um das Verhalten der Fahrzeuge näher zu untersuchen und damit eine bessere Simulation zu erreichen, wird dieser Prüfstand konzipiert. Dabei werden an den Fahrzeugen zwei Untersuchungen durchgeführt:

1. Untersuchung: Bestimmung der Eigenfrequenzen (siehe Abbildung 7.1)
2. Untersuchung: Bestimmung des Massenmittelpunkts

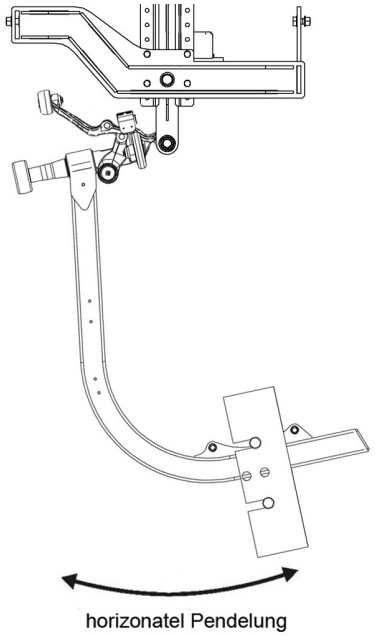


Abbildung 7.1: Schematische Skizze des Prüfstands bei der Durchführung der 1. Untersuchung

Bei der ersten Untersuchung werden dem Fahrzeug bis auf die horizontale Pendelung alle Freiheitsgrade entzogen. Nach der Aufbringung einer Auslenkung führt das Fahrbetriebsmittel eine freie Schwingung aus. Die Frequenz dieser Schwingung ist für das jeweilige Fahrzeug bezeichnend und bleibt konstant. Sie ist dessen Eigenfrequenz. Daraus kann neben der Erregung, bei der das Fahrzeug die größte Auslenkung erfährt, auch das Massenträgheitsmoment errechnet werden. Das bietet einen sinnvollen und auch wertvollen Vergleich der theoretisch errechneten und der

aus dem CAD stammenden Werte mit der Realität. Diese erste Untersuchung entspricht dem gewünschten Ergebnis der ersten Variante des Vorversuchsprüfstands an der TU Wien im Kapitel 6.1.3.

Die zweite Untersuchung dieses Prüfstands betrifft die experimentelle Analyse des Schwerpunkts des Fahrbetriebsmittels. Wie schon im Kapitel 4.4 beschrieben, muss das Fahrzeug, um den Massenmittelpunktsabstand zur Drehachse bestimmen zu können, in die Horizontale gebracht werden. Dann folgt das Abstützen der Klemme auf einer Auflagefläche. An einem Messpunkt, bei dem der horizontale Abstand zum Seilmittelpunkt quantifiziert wurde, wird auch das Gewicht gemessen. Aus diesen Daten lässt sich daraufhin der Massenmittelpunkt errechnen (siehe Kapitel 4.4).

7.1.1 Anforderungsliste

Doppelmayr / TU Wien	***Anforderungsliste für den Prüfstand für Fahrbetriebsmitteluntersuchungen***	Seite 1 von 1

Änderungen	*F* / *W*	Anforderungen	Verantw.
		1. Konstruktion	Tschaikner
	F	Starre und spielfreie Konstruktion	
	W	Einfacher Wechsel der Fahrzeuge	
		2. Kinematik je nach Versuch	
	F	Reine Pendelbewegung	
	F	Statische Messung	
		3. Schwingerregung je nach Versuch	
	F	Erregungsmöglichkeit mittels Auslenkung	
		4. Messsensorik je nach Versuch	
	F	Winkelmessung des Fahrzeugs	
	F	Gewichts- und Abstandsmessung	
		5. Termin	
		September 2013	
		6. Einsatzort	
		Vorversuche	
		Labor des Instituts für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik an der TU Wien	
		Finale Versuche	
		Gassner Stahlbau in Bürs	
	1. Ausgabe, 20. Juli 2013		

Tabelle 26: Anforderungsliste für den Prüfstand Fahrbetriebsmitteluntersuchungen

7.2 Prüfstandsausführung

Für die erste Fahrbetriebsmitteluntersuchung wird ein vorhandener Prüfstand beim Unternehmen *Gassner Stahlbau* verwendet. Allerdings muss dieser aufgrund der vorhandenen Federpakete in der vertikalen Achse (siehe Abbildung 7.2) leicht modifiziert werden. Durch das Blockieren der Federpakete wird die gewünschte Einschränkung der Freiheitsgrade erreicht. Die horizontale Pendelung bleibt als einzig mögliche Bewegung bestehen (siehe Abbildung 7.2 und 7.3 links).

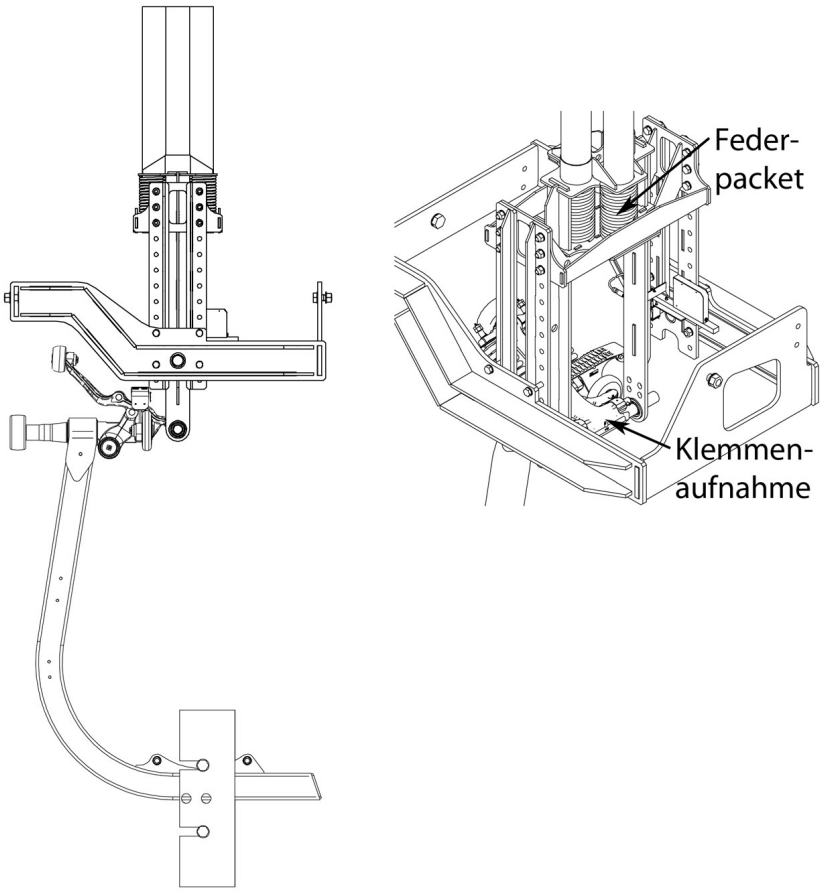


Abbildung 7.2: Schematische Skizze des Prüfstands für FBM-Untersuchung

Für den zweiten Versuch ist keine eigene Vorrichtung vonnöten. Einzig eine Krananlage für das Heben und Messen der Fahrbetriebsmittel und eine geeignete Unterlage für die Klemmenauflage ist erforderlich (siehe Abbildung 7.3 rechts).

Abbildung 7.3: Erste und zweite Untersuchung des Prüfstands für FBM-Untersuchung

7.3 Messsensorik

7.3.1 Inklinometer

Da dieses Messinstrument schon ausführlich in Kapitel 6.3.1 beschrieben wurde, sei an dieser Stelle darauf verwiesen.

7.3.2 Kranwaage

Für die Aufzeichnung des Gewichts wurde das elektronische Zugkraft-Messgerät DYNAFOR LLX-0.5 (siehe Abbildung 7.4) ausgewählt. Die wichtigsten technischen Daten dieser Vorrichtung für die Messung von Zugkräften und die Bestimmung hängender Massen sind in Tabelle 27 dargestellt.

Technische Daten	LLX-0.5
Messbereich	$500\,kg$
Genauigkeit	$1\,kg$
Kleinster Messwert	$0.2\,kg$

Tabelle 27: Technische Daten der elektronischen Kranwaage

Abbildung 7.4: Elektronische Kraftmessvorrichtungen DYNAFOR LLX-0.5

Messprinzip

Das Zugkraft-Messgerät DYNAFOR LLX-0.5 ist ausgestattet mit DMS Wägezellen. Das Messprinzip entspricht jenem einer Federwaage. Die Funktion der Feder wird durch einen verformbaren und elastischen Messkörper, einen Hohlzylinder oder einen Stab, gewährleistet. Die Federsteifigkeit des Messkörpers ist besonders groß ausgelegt, um die Auslenkung des verwogenen Materials oder Objektes möglichst gering zu halten.

Die Gewichtskraft selbst erzeugt eine Auslenkung bzw. eine Längenänderung des Messkörpers. Dies geschieht innerhalb von Grenzen, die durch das Hookesche Gesetz beschrieben werden. So ist die Längenänderung des Messkörpers durch die DMS-Wägezellen sehr exakt messbar. Das physikalisches Prinzip der Wägezellen basiert auf dem Effekt, dass ein elektrischer Leiter bei mechanischer Verformung seinen elektrischen Widerstand ändert.

Grundsätzlich zeichnet die DMS-Wägezellen eine hohe Robustheit aus. Sie sind einfach zu bauen und ihre Nennlasten reichen von etwa einem Kilogramm bis zu etwa 1000 Tonnen [vgl. Schenck Process GmbH, DMS Wägezelle].

7.4 Messaufzeichnung in LabVIEW

Das Messprogramm für die erste Untersuchung des Prüfstands für Fahrbetriebsmitteluntersuchungen entspricht im Wesentlichen dem im Kapitel 6.5 vorgestellten Programm für den Prüfstand P2. Da nur die Winkelmessung von Interesse ist, wurde bis auf die Auswertung des benötigten Inklinometers auf alles Weitere verzichtet. Beim zweiten Versuch wurde keine Auswertung in LabVIEW benötigt. Das Front-Panel des Messprogramms für diesen Prüfstand ist in Abbildung 7.5 zu sehen.

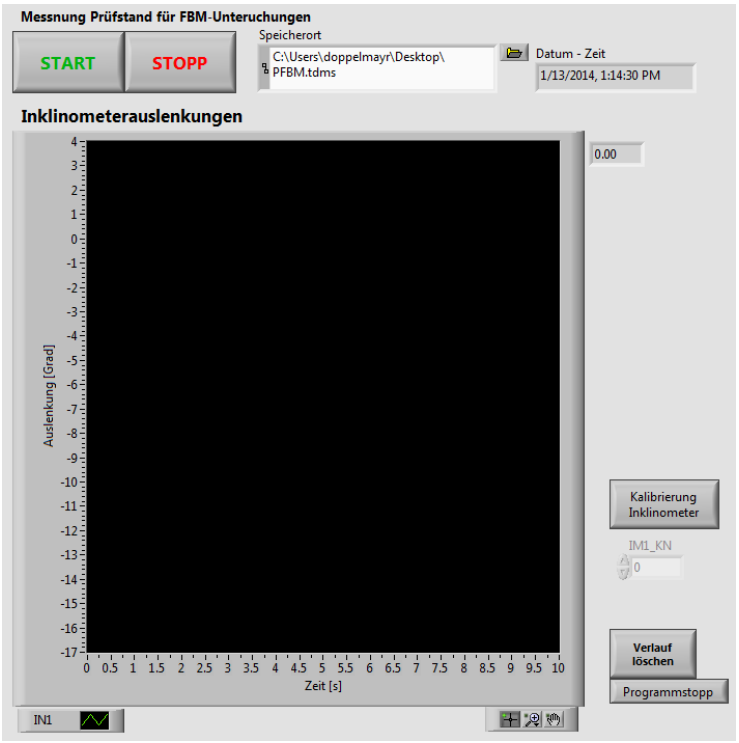


Abbildung 7.5: LabVIEW Benutzeroberfläche

7.5 Messungen am Prüfstand für Fahrbetriebsmitteluntersuchungen

7.5.1 Periodendauermessung der Fahrbetriebsmittel

Erregung

Bei der ersten Untersuchung wird bei den Fahrzeugen manuell eine Auslenkung aufgebracht. Beim Erregerfahrzeug wird die Pendelung mit der Lineareinheit in verschiedenen Stellungen gemessen, um somit überschlagsmäßig die Eigenfrequenz, die sich je nach Stellung der Zusatzmasse ändert, zu erhalten. Des Weiteren kann mithilfe der Lineareinheit beim Erregerfahrzeug angeregt werden, wobei in Bereichen der Eigenfrequenz eine Zunahme der Pendelbewegung mit der Zeit zu erkennen ist (siehe Abbildung 7.8).

Messung

Von Interesse sind die Winkel der Fahrzeuge. Diese werden mithilfe der Inklinometer, die auf den Gehängestangen montiert sind, gemessen. Auf das Aufzeichnen

des Fahrzeugs ohne Erreger- und Messeinheit wird verzichtet, da es sich vom Messfahrzeug nur gering unterscheidet.

Mess. Nr.	Fahrzeug	Messdauer	Motorstellung
1	Erregerfahrzeug	$5\,min$	$1000\,mm$
2	Erregerfahrzeug	$5\,min$	$1300\,mm$
3	Erregerfahrzeug	$5\,min$	$700\,mm$
4	Erregerfahrzeug	$5\,min$	$400\,mm$
5	Erregerfahrzeug	$5\,min$	$100\,mm$
6	Erregerfahrzeug	$5\,min$	$740\,mm$ (Mittellage)
7	Messfahrzeug	$5\,min$	-
8	Messfahrzeug	$5\,min$	-
9	Messfahrzeug	$5\,min$	-
10	Messfahrzeug	$5\,min$	-

Tabelle 28: Messtabelle für die erste Untersuchung

Ergebnisse

In Abbildung 7.6 sieht man das Auspendeln des Fahrzeuges nach einer aufgebrachten Auslenkung. Man erkennt, dass die Schwingung schwach gedämpft ist und die Hüllkurve mit der Zeit linear abklingt. Dies deutet auf eine nicht lineare Dämpfung (Coulombsche Dämpfung) hin, die aufgrund der Trockenreibung im Aufhängepunkt entsteht.

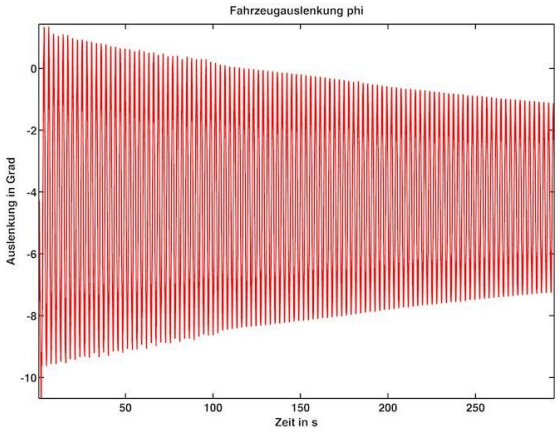


Abbildung 7.6: Aufzeichnung der Auslenkung bei der ersten Untersuchung

Die Fast Fourier Transformation wird für die Suche der Eigenfrequenz angewendet. Die gesuchte Frequenz im Spektrum ist jene mit dem größten Amplitudenanteil. Daraus lässt sich die Periodendauer für die Erregung berechnen, um ein größtmögliches Aufschaukeln des Fahrzeugs zu erreichen. Erkennbar ist, dass sich die Eigenfrequenz je nach Motorstellung beim Erregerfahrzeug ändert. Grund dafür ist die unterschiedliche Massenverteilung des Gesamtsystems (siehe Abbildung 7.7). Die Eigenfrequenz befindet sich je nach Tischteilstellung zwischen 0,354 Hz und 0,367 Hz.

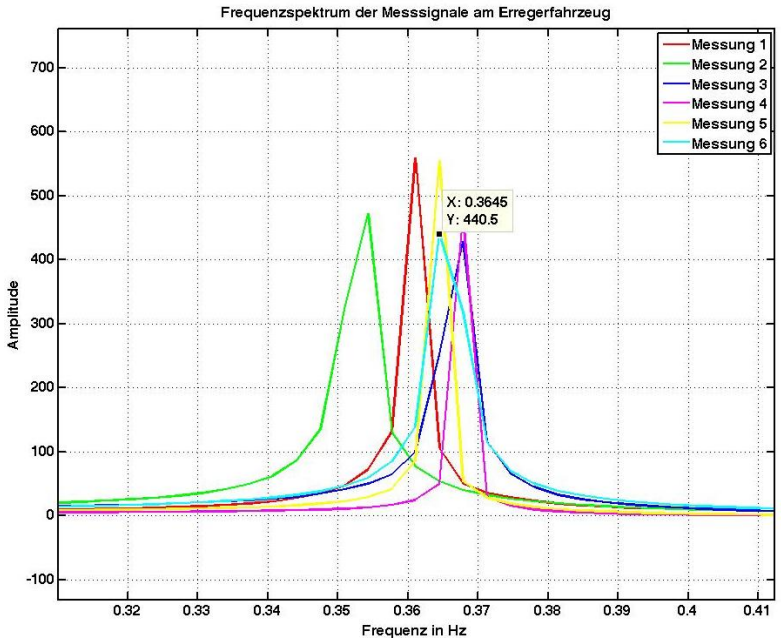


Abbildung 7.7: FFT-Analyse der Messungen am Erregerfahrzeug

Wird das Erregerfahrzeug durch die Antriebseinheit mit einer Periodendauer von $T = 2{,}7\,s$ und einer Amplitude von 170 m/min mobilisiert und einer FFT Analyse unterzogen, bekommt man eine Frequenz mit dem größten Amplitudenanteil von 0,37 Hz (siehe Abbildung 7.8). Das System wird in diesem Fall durch eine periodische Erregung der Lineareinheit in der Nähe der Eigenfrequenz bewegt. Dadurch wächst die Amplitude in diesem so genannten Resonanzfall an, weil bei jeder Schwingung Energie aufgenommen und gespeichert wird. Das Anwachsen wird aber begrenzt, da mit zunehmender Amplitude die zugeführte Energie vermehrt von der Dämpfung umgewandelt wird. Im eingeschwungenen Zustand stimmt die Erreger- mit der Schwingfrequenz überein, da die hinzugeführte Energie vollständig von der Dämpfung aufgezehrt wird. Nach dem Abstellen der Erregung schwingt das System mit seiner Eigenfrequenz allmählich ab, bis es zur Ruhe kommt.

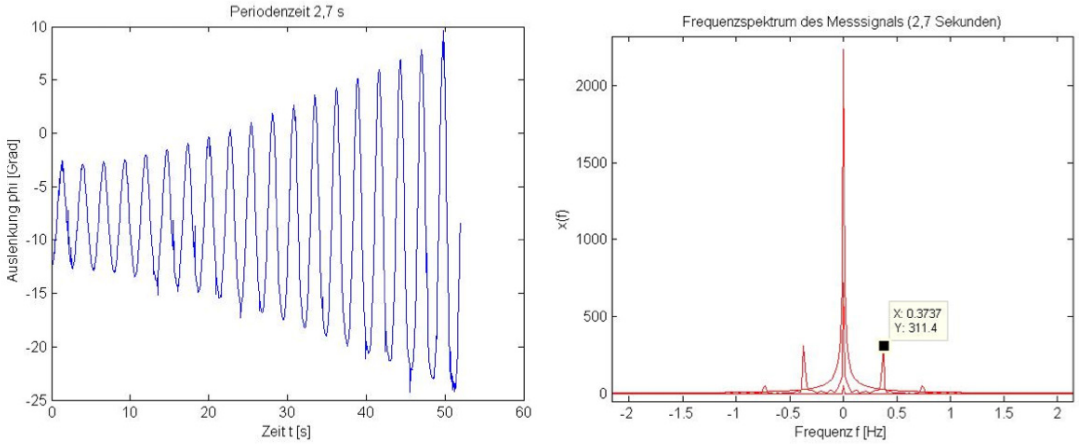


Abbildung 7.8: Auslenkung bei Erregerung über die Zeit, FFT-Analyse

Bei der FFT-Analyse des Fahrzeugs ohne Erregereinheit bleibt die Eigenfrequenz von 0,378 Hz bei den vier durchgeführten Versuchen, wie zu erwarten war, immer gleich (siehe Abbildung 7.9).

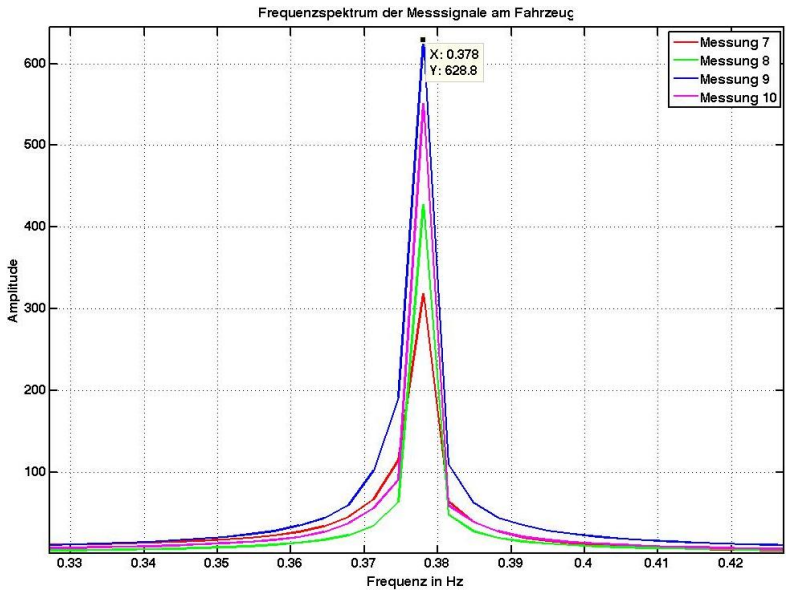


Abbildung 7.9: FFT-Analyse der Messungen am Fahrzeug

7.5.2 Schwerpunktsmessung der Fahrbetriebsmittel

Erregung

Die Erregung bei der zweiten Untersuchung fällt weg, da es sich um eine statische Messung handelt.

Messung

Neben dem Gesamtgewicht wird auch das Gewicht des vertikalen Fahrbetriebsmittels an einer gemessenen Stelle (Messpunkt) aufgezeichnet, während die Klemme aufliegt (siehe Abbildung 7.3 rechts). Somit lässt sich der Schwerpunkt mit der im Kapitel 4.4 vorgestellten Berechnung feststellen.

Ergebnisse

Fahrzeug	Gesamtgewicht	Messpunkt Abstand Klemme	Gewicht Messpunkt
Erregerfahrzeug	394 kg	155 mm	290 kg
Messfahrzeug	462 kg	165 mm	322 kg
Fahrzeug	462 kg	165 mm	322 kg

Tabelle 29: Messergebnisse für die zweite Untersuchung

Der Schwerpunktsabstand vom Drehpunkt (Seilmittelpunkt) der einzelnen Fahrzeuge kann mit der im Kapitel 4.4 eingeführten Gleichung (4.20) berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 30 aufgelistet.

Fahrzeug	Schwerpunktsabstand
Erregerfahrzeug	1.14 m
Messfahrzeug	1.15 m
Fahrzeug	1.15 m

Tabelle 30: Schwerpunktsabstand vom Drehpunkt der Fahrbetriebsmittel

8 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Diplomarbeit ist Teil des Forschungsprojekts Das dynamische Verhalten von Seilbahnfahrzeugen in Wechselwirkung mit der Dynamik der Seile [Kartnig et al., 2011], welches sich mit der mathematischen Beschreibung von Tragseilen mit gekoppelten Fahrbetriebsmitteln auseinandersetzt. Sein Ziel ist es, Simulationsmodelle zu entwickeln, welche die real auftretenden Schwingungsprobleme an Seilschwebebahnen beschreiben.

Um diese dynamischen Modelle zu erstellen, bedarf es der Kenntnis der Seilparameter, welche oft nicht bekannt sind. Als Beispiele für diese unbekannten bzw. unsicheren Parameter sind die Seilsteifigkeiten und -dämpfungen zu nennen. Zum Zeitpunkt des Projektbeginns lagen keine zufriedenstellenden Werte dieser Parameter vor, die eine genaue Simulation zugelassen hätten. Daher ist die empirische Komponente dieses Forschungsprojekts von hoher Bedeutung, um die aufgearbeitete Theorie und die daraus entstehenden Modelle mit den in der Realität auftretenden Parametern zu ergänzen.

Dazu benötigt es einen empirischen Teil, den dieser Diplomarbeit enthält. Es mussten Prüfstände gebaut werden, welche den Abgleich zwischen Modellen und Realität erlaubten. Ausgehend von mathematischen Beschreibungen des Seils und der Fahrbetriebsmittel sowie von Voruntersuchungen aus dem Forschungsprojekt wurden drei Prüfstände mit entsprechender Erregung und Messsensorik errichtet. Prüfstand P1 erlaubte Untersuchungen nur am Seil, Prüfstand P2 bezog sich auf die Wechselwirkungen zwischen dem Seil und den Fahrzeugen, und Prüfstand P3 ermöglichte Versuche am Fahrbetriebsmitteln. Die Messungen an diesen drei Prüfständen machten die Ermittlung der gesuchten Seilparameter möglich.

Die Berechnungen der Seile und Fahrbetriebsmittel, angepasst an die jeweiligen Prüfstandsbedingungen, konnten die Messergebnisse gut vorhersagen. Die Resultate der theoretischen Untersuchungen haben sehr geholfen das passende Erreger- und Messequipment für die einzelnen Versuche zu finden. Es konnten dadurch beachtliche experimentelle Resultate erzielt werden. Auch auf die, in Realität eher selten vorkommende und interessant zu beobachtende, Rechteckschwingung war man am Prüfstand P1 vorbereitet.

Am Prüfstand P1 war eine leichte Einbuße bei den Messungen hinzunehmen, da der Schwingerreger nicht zum Einsatz kam. Neben der zu geringen Leistung war auch die Kopplung des in die Jahre gekommenen Shakers mit der aktuellen Technik und Software nicht ideal.

Ein Makel bei den Messungen am Prüfstand P2 am Doppelmayr Testgelände in Wolfurt bildete der Umstand, dass immer wieder zufällige Fehler in Form von Rauschen auftaten. Grund dafür waren neben der Unvollkommenheit der Messeinrichtung vor allem die Umwelteinflüsse am Prüfstand. Durch die Anpassung der Erdung, die Abschaltung der benachbarten Prüfstande oder das Umgehen des Netzanschlusses durch ein Aggregat konnten mehr oder weniger große Erfolge verbucht werden. Die endgültigen Messergebnisse waren aber für die Auswertung im Forschungsprojekt tauglich. Auch die anhaltenden kleinen Störungen wurden mithilfe statistischer Methoden eliminiert.

Die endgültigen Forschungsprojektergebnisse bieten ein großes Verwertungspotenzial, denn die entwickelte Simulationsmethodik fördert das Verständnis für in natura auftretende Schwingungsphänomene an Seilbahnanlagen. Der Simulationsprozess bewirkt Transparenz.

Durch Analysen am Modell kann das System kostengünstig erforscht werden. Aussagekräftige Resultate der Versuche am Modell dienen der Absicherung von Entscheidungen, wodurch Kosten und Risiken reduziert werden.

Es ist angedacht, Neuentwicklungen von Seilbahnkomponenten, wie zum Beispiel Kabinen, Sesselfahrzeuge, Stützen, Rollenbatterien, aber auch Stationseinfahrten mithilfe der Simulationsmethodik auf deren Betriebsverhalten zu testen. Diese Komponenten und deren Zusammenwirken können dabei analysiert werden, bevor man diese baut. Dadurch lassen sich Seilbahnen künftig effizienter und kostengünstiger entwickeln.

Darüber hinaus ist mit den angewandten Simulationen die Analysiere von Änderungen im Sinne von konstruktiven Veränderungen an existierenden Seilbahnanlagen durchführbar. Die Umsetzbarkeit von geplanten Maßnahmen, wie zum Beispiel neue integrierte Konzepte für die aktive oder passive Reduktion von Schwingungen, können risikolos getesten werden. Durch Dämpfungssysteme erhöht sich der Komfort, die Verfügbarkeit, die Effizienz und die Sicherheit für die Passagiere, so dass sich höhere Fördergeschwindigkeiten andenken lassen. Die dafür notwendigen Maßnahmen können damit sachlich, gründlich und ökonomisch abgehandelt werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse dieses Projektes lassen sich auch auf neue Produkte übertragen werden. Bei urbanen Seilbahnsystemen zum Beispiel ist es aus Platzgründen unumgänglich, ein Fahrbetriebsmittel in Kurven zu befördern. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts sind dabei verwertbar.

Literatur

CEN EN 12929-1:2004. *Sicherheitsanforderungen für Seilbahnen für den Personenverkehr – Allgemeine Bestimmungen – Teil 1: Anforderungen für alle Anlagen.* 2004.

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

DIN 1319-3:1996. *Grundlagen der Messtechnik – Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit.* 1996.

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

Bosch Rexroth AG. Omegamodule OBB Anleitung. *R320103025*, 12/2011.

Brüel&Kjær. *Instruction Manual Power Amplifier Type 2712.* `http://doc.es.aau.dk/fileadmin/doc.kom.aau.dk/labs_facillities/control/manuals/Bruel-Kjaer-2712.pdf`, 1977. Zugriff 1.Feb.2014.

Brüel&Kjær. *Technical Documentation PM Vibration Exciter Type 4808.* `http://www.bksv.com/doc/be0194.pdf`, 2006. Zugriff 1.Feb.2014.

Brüel&Kjær. *SYSTEM DATA VC-LAN Vibration Controller - Types 7541 and 7542.* `http://www.bruel.hu/doksik/bu3083vclan.pdf`, 2011. Zugriff 1.Feb.2014.

Brüel&Kjær. *Vibration Controller Type 7542.* User Manual, 2012.

Brüel&Kjær. *Product Data Impedance Heads - Types 8000 and 8001.* `http://www.bruelkjaer.de/doc/bp0244.pdf`, 2014. Zugriff 3.Feb.2014.

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

E. Czitary. *Seilschwebebahnen.* Springer-Verlag, 1962.

J. Dankert and H. Dankert. *Technische Mechanik - Statik, Festigkeitslehre, Kinematik/Kinetik.* Teubner, 2006.

A. Doppelmayr. *Denkanstösse zur Funktionserfüllung von Einseilumlaufbahnen.* Dissertation TU Graz, 1997.

Fatzer AG. *Drahtseiltechnik.* `http://www.fatzer.com/contento/Portals/1/Fatzer/Dokumente/SBO%20deutsch_Drahtseiltechnik.pdf`, 2001. Zugriff 04.Okt.2013.

Fatzer AG. *Seiltabellen 2013*. http://www.fatzer.com/contento/Portals/1/Fatzer/Dokumente/Seiltabelle%202013/Seiltabellen_Fatzer_2013.pdf, 2013. Zugriff 04.Okt.2013.

D. Gross, W. Hauger, and P. Wriggers. *Technische Mechanik 4*. Springer-Lehrbuch, 2009.

Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. *Montageanleitung U9B A0137-7.0 en/de/fr*. http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/a0137.pdf, 2014. Zugriff 3.Feb.2014.

G. Huber. *Adaptierung und Einsatz eines mobilen Messsystems zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens an kuppelbaren Sesselbahnen*. Diplomarbeit TU Wien, 2008.

R. Jamal and A. Hagestedt. *LabVIEW, das Grundlagenbuch*, volume Vierte Auflage. Addison-Wesley, 2004.

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

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

Kistler Gruppe. *Piezoresistiver Verstärker 4603B 000-291d-08.10*. http://www.kistler.com/de/de/product/verst{ä}rker/4603B00, 2010. Zugriff 3.Feb.2014.

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

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

T. Lässer. *Analyse von Querschwingungen an Seilbahnfahrzeugen*. Masterarbeit FH Vorarlberg, 2009.

T. Lässer. *Querpendeldämpfer und Seildynamik*. Projektbeschreibung Querschwingungen, Doppelmayr, 2011.

R. Lerch. *Elektrische Messtechnik*. Springer-Verlag, 2012.

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

Micro-Epsilon Eltrotec GmbH. *optoCONTROL Optische Präzisions-Mikrometer für Industrieanwendungen*. `http://www.micro-epsilon.de/download/products/cat--optoCONTROL--de.pdf`, 2013. Zugriff 02.Feb.2014.

National Instruments. *Operating Instructions and Specifications NI 9237*. `http://www.ni.com/pdf/manuals/374186e.pdf`, 2013. Zugriff 04.Feb.2014.

G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K.H. Grote. *Konstruktionslehre*. Springer-Verlag, 2006.

R. Parthier. *Messtechnik - Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure*. Vieweg, 2008.

Schenck Process GmbH. *DMS Wägezelle*. `http://www.schenckprocess.com/de/glossar/dms-waegezelle`, 2014. Zugriff 20.Jan.2014.

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

Abbildungsverzeichnis

1.1 Zwangsbedingungen für Fahrzeuge am Seil 3
1.2 Iterationsprozess bei der Modellerstellung [Löhr, 2002, S. 23] 5
1.3 Vorgehensweise 9
2.1 Zweiseilschwebebahn im Pendelbetrieb; Einseilschwebebahn im Umlaufbetrieb 11
2.2 Beispiel für ein Seilfeld – Seilabschnitt zwischen zwei Seilunterstützungen 11
2.3 Schematische Darstellung eines Litzenseiles 12
2.4 6x36 Warrington Seal Zug- und Förderseil 12
2.5 Seilmacharten 13
2.6 Schematische Darstellung eines Fahrzeugs 13
2.7 Fahrzeug des Prüfstands P2 14
2.8 Schwingungen an einem 8er-Sessel 15
2.9 Prinzipielle Struktur einer Identifikation [Schröder, 2010, S. 219] . . 16
2.10 Iterativer Ablauf der Identifikation, Modellierung und Validierung [Kozek, 2012, S. 15] 17
3.1 Statik unter Vernachlässigung des Seileigengewichts 18
3.2 An zwei Punkten aufgehängtes Seil unter Eigengewichtbelastung; Kräftegleichgewicht an einem Seilelement 19
3.3 Koordinatenverschiebung zur Konstanteneliminierung 20
3.4 Schematische Skizze des Prüfstands P1 21
3.5 Seildurchhang Prüfstand P1 21
3.6 Seilfeld mit zwei Fahrzeugen [vgl. Lässer, 2009, S. 29]. 23
3.7 Seilverlauf am Prüfstand P2 25
3.8 Auslenkung an einer Saite, Saitenelement 26
3.9 Beidseitig eingespannte Saite 28
3.10 Eigenfunktionen der eingespannten Saite 28
3.11 Anfangsauslenkung am Prüfstand P1 30
3.12 Wellenausbreitung am Prüfstand P1 nach Anfangsauslenkung . . . 30
3.13 Fourierreihendarstellung der Ortsfunktion 32
3.14 Wellenausbreitung bei konstanter Erregung am Prüfstand P1 34
3.15 Wellenausbreitung bei mittiger Impulserregung am Prüfstand P1 . . 35
3.16 Einschwingung des Seils aufgrund der Schwerebeschleunigung 37
3.17 Wellenausbreitung bei Entlassen der Niederspannkraft am Prüfstand P1 38
3.18 Homogener Stab, Stabelement 39
3.19 Torsionswellenausbreitung bei mittiger periodischer Torsionserregung am Prüfstand P2 41
4.1 Skizze der Messvorrichtung am Fahrzeug 43

4.2 Beschleunigungen bei Querauslenkung 44
4.3 Beschleunigungen am Inklinometer 44
4.4 Ausgelenktes Fahrbetriebsmittel 46
4.5 Reaktionskräfte des ausgelenkten Fahrbetriebsmittels mit Erregervorrichtung (schwarz eingefärbt) 47
4.6 Aufschaukeln des Fahrbetriebsmittels durch die Erregereinheit . . . 49
4.7 Rechenschema des numerischen Verfahrens bei mehreren Fahrzeugen im Seilfeld [Lässer, 2011, S. 29] 50
5.1 Dispersionskurve des Seils 52
5.2 Prüfstand P1 modelliert in Matlab Simulink 54
5.3 Schematische Darstellung des Prüfstands an der TU Wien 55
5.4 Wellenausbreitung bei mittiger Sinuserregung, Wellenmessung an 2 Punkten 56
5.5 Präzision am Prüfstand an der TU Wien 56
5.6 Prüfstand P1 an der TU Wien 57
5.7 Prüfstand P1 bei der Firma Fatzer AG, wobei links die Unterstützungsvorrichtungen hochgefahren sind 58
5.8 Messvorrichtung für die optischen Sensoren am Prüfstand P1 59
5.9 Erregervorrichtung für die Transversalanregung des Prüfstands P1 . 60
5.10 Erregervorrichtung für die Transversalanregung bei Anfangsauslenkungsfreigabe am Prüfstand P1 60
5.11 Erregervorrichtung für die Torsionsanregung des Prüfstands P1 . . . 61
5.12 Aufbauarten der Torsionserregungvorrichtung: Anfangsauslenkung, Shakererregung, Hystereseuntersuchung 62
5.13 Schematische Darstellung des Messprinzips der optoCONTROL Digitalmikrometer [Micro-Epsilon Eltrotec GmbH, optoCONTROL] 63
5.14 optoCONTROL 1202 am Prüfstand P1 64
5.15 optoCONTROL 2500 am Prüfstand P1 65
5.16 Kraftaufnehmer U9B 5 kN [Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Montageanleitung] 66
5.17 Kraftaufnehmer U9B am Prüfstand P1 66
5.18 Impedanzmesskopf 8001 [Brüel&Kjær, Impedance Heads] 67
5.19 Ladungsverstärker 5134A [vgl. Kistler Gruppe, Piezoresistiver Verstärker] 68
5.20 Schematischer Aufbau des Impedanzmesskopfs 8001 [vgl. Brüel&Kjær, Impedance Heads] 68
5.21 Aufbau der rechnerunterstützten Messdatenerfassung 69
5.22 Ethernet Chassis NI cDAQ-9188 70
5.23 Angeschlossenes Ethernet Chassis mit Messwertkarten 72

5.24 Brückenschaltung des Moduls NI 9237 [National Instruments, 2013, S. 13] . . . 73
5.25 NI Measurement & Automation Explorer . . . 74
5.26 Regelkreis Vibration Controller, Verstärker und Impedanzmesskopf [vgl. Brüel&Kjær, VC-LAN Vibration Controller, S. 10] . . . 76
5.27 Brüel & Kjær Shaker 4808 [Brüel&Kjær, PM Vibration Exciter Type 4808, S. 1] . . . 76
5.28 Aufbau des Schwingerregers Brüel & Kjær 4808 [vgl. Brüel&Kjær, PM Vibration Exciter Type 4808, S. 9] . . . 77
5.29 Brüel & Kjær Verstärker 2712 [Brüel&Kjær, Power Amplifier Type 2712, S. 1] . . . 78
5.30 Brüel & Kjær Vibration Controller 7541 [Brüel&Kjær, VC-LAN Vibration Controller, S. 4] . . . 79
5.31 Einrichten einer Datenbank; Verbindung des Vibration Controller mit dem PC [Brüel&Kjær, 2012, S. 13ff.] . . . 81
5.32 Einrichten des Sensors . . . 81
5.33 Menüfenster zum Erstellen einer neuen Untersuchung . . . 82
5.34 Test Configurations Fenster . . . 83
5.35 Einrichten des Triggers . . . 83
5.36 Ausgangsschaltung des Vibration Controllers 7541 [Brüel&Kjær, 2012, S. 36] . . . 84
5.37 Blockdiagramm des Messprogramms für den Prüfstand P1 . . . 84
5.38 Abschnitt 1 und 3 des Blockdiagramms . . . 85
5.39 Abschnitt 2 des Blockdiagramms . . . 86
5.40 Abschnitt 4 des Blockdiagramms . . . 87
5.41 Frontpanel des Messprogramms für den Prüfstand P1 . . . 88
5.42 Aufbau der Hysteresemessung am Prüfstand P1 . . . 90
5.43 Hysteresemessung am Prüfstand P1 . . . 91
5.44 Aufbau bei torsaler Vorspannung des Seils am Prüfstand P1 . . . 92
5.45 Transversale bzw. torsale Wellenausbreitungsmessung nach Freigabe einer Anfangsauslenkung am Prüfstand P1 . . . 93
5.46 Transversale Wellenausbreitungsberechnung nach Freigabe einer Anfangsauslenkung an den Stellen der optischen Sensoren . . . 94
5.47 Wellenausbreitung nach transversaler Impulserregung am Prüfstand P1 . . . 95
5.48 Torsionswellenausbreitung nach torsaler Impulserregung am Prüfstand P1 . . . 95
5.49 Transversale Wellenausbreitungsberechnung nach einer Impulserregung an den Stellen der optischen Sensoren . . . 96
6.1 Konzept des Prüfstands P2 . . . 97

6.2 Auslenkung der Fahrzeuge, Schwingung am Prüfstand P2 99
6.3 1. und 2. Variante des Prüfstands an der TU Wien 101
6.4 Prüfstand P2 mit drei Fahrzeugen 101
6.5 Joch mit Rollenbatterie als Seilfeldunterstützung; Vorrichtung zur Positionierung der Seilzugsensoren 102
6.6 Skizze der Abspannvorrichtung 103
6.7 Abspannvorrichtung 104
6.8 Erreger-, Mess- und Fahrzeug des Prüfstands P2 105
6.9 Inklinometer Wuntronic TS30 106
6.10 Messprinzig des Inklinometers Wuntronic TS30 107
6.11 Kennlinie des Inklinometers Wuntronic TS30 108
6.12 Seilzugsensor $\mu\varepsilon$ WDS-1000-P60 analog 108
6.13 Aufbau des Seilzug-Wegsensors 109
6.14 Angeschlossenes Ethernet Chassis mit Messwertkarten 111
6.15 Linearantrieb des Erregerfahrzeugs 112
6.16 Funktionsweise des Omegamoduls OBB85 [vgl. Bosch Rexroth AG, Omegamodule OBB] 112
6.17 Getriebe- und Bewegungsgrenzwerteinstellungen 113
6.18 Easy-Startup-Modus 114
6.19 Antriebsintegrierter Sollwertgenerator 114
6.20 Einrichten des SPS Ausgangs; Variablendekleration und Code für die digitale Triggerung 115
6.21 Blockdiagramm des Messprogramms für den Prüfstand P2 116
6.22 Abschnitt 1 des Blockdiagramms 117
6.23 Abschnitt 2 des Blockdiagramms 118
6.24 Abschnitt 3 des Blockdiagramms 118
6.25 Abschnitt 5 des Blockdiagramms 119
6.26 Frontpanel des Messprogramms für den Prüfstand P2 120
6.27 Seitenansicht des Prüfstands P2 mit drei bzw. zwei Fahrzeugen . . . 121
6.28 Messungen 3 bis 8 am Seilzugsensor SS1 des Erregerfahrzeuges am Prüfstand P2, Synchronisation der Messungen 125
6.29 Statistische Auswertung der Messungen 3 bis 15 am Seilzugsensor SS1 des Erregerfahrzeuges mit Daten aus der 3. Messung 126
6.30 Messungen 3 bis 15 am Inklinometer des Erregerfahrzeuges und deren statistische Auswertung 126
6.31 Bewegungsauswertung des Erregerfahrzeuges bei der Messung 39 . . 127
6.32 Zeitabschnitt der Bewegungsauswertung des Messfahrzeugs bei der Messung 39 128
6.33 Bewegung des Messfahrzeugs über die Zeit bei der Messung 39 . . . 129

6.34 Frequenzspektrum des Erregersignals der Lineareinheit bei den Messungen 8 und 26 130
6.35 Frequenzspektrum der Inklinometer am Erreger- bzw. Messfahrzeugs bei der Messung 8 131
6.36 Frequenzspektrum der Inklinometer am Erreger- bzw. Messfahrzeugs bei der Messung 26 131
7.1 Schematische Skizze des Prüfstands bei der Durchführung der 1. Untersuchung 132
7.2 Schematische Skizze des Prüfstands für FBM-Untersuchung 134
7.3 Erste und zweite Untersuchung des Prüfstands für FBM-Untersuchung 135
7.4 Elektronische Kraftmessvorrichtungen DYNAFOR LLX-0.5 136
7.5 LabVIEW Benutzeroberfläche 137
7.6 Aufzeichnung der Auslenkung bei der ersten Untersuchung 138
7.7 FFT-Analyse der Messungen am Erregerfahrzeug 139
7.8 Auslenkung bei Erregerung über die Zeit, FFT-Analyse 140
7.9 FFT-Analyse der Messungen am Fahrzeug 140
A.1 Projektplan 154

Tabellenverzeichnis

1 Fahrzeuge am Prüfstand P2 24
2 Fahrzeugpositionen am Prüfstand P2 24
3 Parameter des Fahrbetriebsmittels mit Erregung 48
4 Anforderungsliste für den Prüfstand P1 53
5 Technische Daten des optoCONTROL 1202 64
6 Technische Daten des optoCONTROL 2500 65
7 Technische Daten des Kraftaufnehmers U9B 67
8 Technische Daten des Impedanzmesskopfs 8001 69
9 Technische Daten des Analogeingangsmoduls NI 9215 71
10 Technische Daten des Brückenmoduls NI 9237 72
11 Belegung der Module 2 und 4 73
12 Belegung des Moduls 8 74
13 Technische Daten des Brüel & Kjær 4808 77
14 Technische Daten des Brüel & Kjær 2712 79
15 Technische Daten des Brüel & Kjær 7541 80
16 Gemessener und berechneter Seildurchhang am Prüfstand P1 89
17 Anforderungsliste für den Prüfstand P2 98
18 Fahrbetriebsmittel des Prüfstands P2 105
19 Technische Daten des Inklinometers Wuntronic TS30 107
20 Technische Daten des Seilzug-Wegsensors 109
21 Belegung der Module 1 und 4 110
22 Technische Daten des Omegamoduls OBB85 111
23 Gemessener und berechneter Seildurchhang bei drei Fahrzeugen am Prüfstand P2 122
24 Gemessener und berechneter Seildurchhang bei zwei Fahrzeugen am Prüfstand P2 122
25 Messtabelle – Schwingverhalten der Fahrbetriebsmittel im Seilfeld . 123
26 Anforderungsliste für den Prüfstand Fahrbetriebsmitteluntersuchungen 133
27 Technische Daten der elektronischen Kranwaage 135
28 Messtabelle für die erste Untersuchung 138
29 Messergebnisse für die zweite Untersuchung 141
30 Schwerpunktsabstand vom Drehpunkt der Fahrbetriebsmittel 141

Anhang

Die Doppelmayr/Garaventa-Gruppe

Die Doppelmayr/Garaventa-Gruppe ist der Weltmarktführer im Seilbahnbau mit Hauptsitzen in Wolfurt, Österreich, und Goldau, Schweiz. Weitere Produktionsstandorte liegen unter anderem in Italien, Frankreich, USA, Kanada und China. Das Unternehmen plant und produziert neben Einseil-, Mehrseil-, Umlauf-, Pendel-, fixgeklemmten und kuppelbaren Seilbahnen auch Erlebnisbahnen, Materialbahnen, Hochregallagersysteme, Parkhaussysteme, Langstrecken-Stetigförderer und Cableliner. Die Doppelmayr/Garaventa-Gruppe mit Tochterfirmen, Niederlassungen und Vertretungen in über 35 Ländern konnten bislang über 14400 Anlagen in über 88 Ländern auf fünf Kontinenten realisieren. Das Unternehmen Doppelmayr/Garaventa beschäftigt weltweit 2370 Mitarbeiter, 1200 davon am Standort Wolfurt (Stand März 2014).

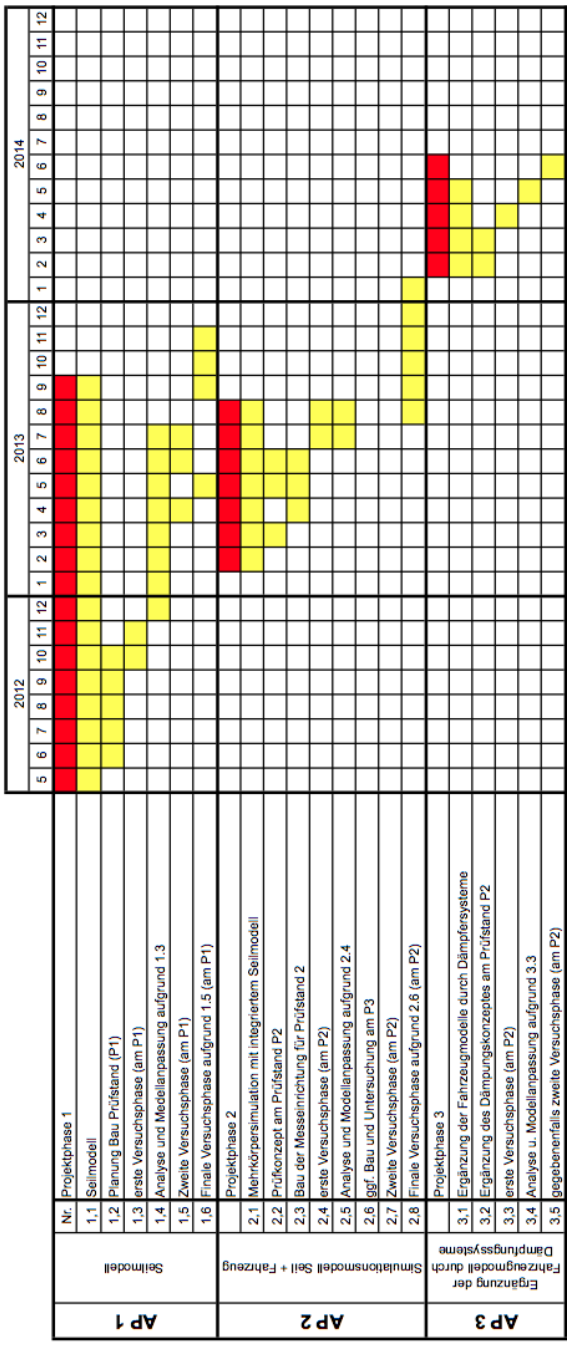


Abbildung A.1: Projektplan