



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Mechanische Modellierung und dynamische Untersuchung eines intelligenten industriellen Transportsystems

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für
Maschinenwesen und Betriebswissenschaften von

Johannes Baumkirchner, BSc

Mat. Nr. 11902026

unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Edelmann

Institut für Mechanik und Mechatronik, E325-01

Wien, im Oktober 2024

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Wien, im Oktober 2024

Johannes Baumkirchner, BSc

Danksagung

Mit großer Freude und Dankbarkeit blicke ich auf die Entstehung dieser Arbeit zurück, die ohne die Unterstützung und Hilfe vieler Menschen nicht möglich gewesen wäre.

Diese Diplomarbeit entstand in Kooperation mit B&R Automation. Für diese wertvolle Zusammenarbeit und Unterstützung möchte ich mich herzlich bedanken.

Vor allem gilt mein Dank Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Edelmann für die umfassende Betreuung und die wertvolle fachliche Unterstützung zu allen Zeitpunkten im Projektverlauf.

Auch Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Haudum möchte ich besonderen Dank aussprechen. Seine Unterstützung und Vermittlung von Informationen waren sehr hilfreich.

Weiters bedanke ich mich bei Herrn DI(FH) Michael Brucker für das Ermöglichen der Durchführung der Diplomarbeit.

Ebenso danke ich allen Kolleg:innen, Freund:innen und meiner Familie, die mich während meines gesamten Studiums unterstützt haben.

Vielen Dank!

Kurzfassung

ACOPOStrak ist ein automatisiertes Transportsystem für Industrieanlagen, welches multifunktional und flexibel eingesetzt wird. In der vorliegenden Arbeit wird die Bewegung des Shuttles auf der Führungsschiene mittels Mehrkörpersystemsimulation untersucht, um ein besseres Systemverständnis zu entwickeln und den Einfluss einzelner Parameter auf die Lebensdauer zu erörtern. Nach erfolgter Modellbildung und Parametrierung wird durch Variation der Parameter der Einfluss möglicher Änderungen analysiert. Dabei kann festgestellt werden, dass die Erhöhung der Steifigkeit der Rollen potentiell einen positiven Effekt auf die Lebensdauer zur Folge hat. Zudem treten bei der Fortbewegung des Shuttles bei zwei Geschwindigkeiten hohe Verstärkungsfaktoren der Amplitude der mikroskopischen Drehbewegung des Shuttles auf, da hier eine Anregung mit der Eigenfrequenz eines Eigenmodes erfolgt. Eine Vermeidung des Betriebes des Transportsystems in der Nähe dieser Geschwindigkeiten kann eine Erweiterung der Lebensdauer bewirken.

Abstract

ACOPOStrak is an automated transport system for industrial facilities that is used in a multifunctional and flexible manner. In this thesis, the motion of the shuttle on the guide rail is analysed using multi-body system simulation in order to develop a better understanding of the system and to discuss the influence of individual parameters on the service life. After modelling and parameterisation, the influence of possible changes is analysed by varying the parameters. It can be determined that increasing the rigidity of the rollers potentially has a positive effect on the service life. In addition, high amplification factors of the amplitude of the microscopic rotational movement of the shuttle occur when the shuttle moves at two speeds, as excitation with the natural frequency of a natural mode takes place here. Avoiding operation of the transport system near these speeds can extend its service life.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Aufgabenstellung	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Modellbildung	4
2.1	Koordinatensysteme	6
2.2	Körper und Gelenke	8
2.3	Substructure Flachrolle	9
2.3.1	Normalkräfte	10
2.3.2	Kräfte in lateraler und longitudinaler Richtung	11
2.3.3	Bewegungswiderstand	14
2.4	Substructure V-Rolle	15
2.4.1	Normalkräfte	16
2.4.2	Kräfte in lateraler und longitudinaler Richtung	17
2.5	Magnetkräfte	18
2.6	Antriebskraft	21
3	Parametrierung der Subsysteme	22
3.1	Geometrie und Masseigenschaften	22
3.2	Kontakt Rolle-Führungsschiene	24
3.2.1	Rollensteifigkeit	24
3.2.2	Rollendämpfung	26
3.2.3	Reibeigenschaften	29
3.3	Bewegungswiderstand	30
3.4	Drehgelenk Flachrollenaufnahme	32
3.5	Magnetkräfte	33

4	Validierung des Simulationsmodells	34
4.1	Summe der Normalkräfte	34
4.2	Ausrollversuch	35
4.3	Vergleich mit Messdaten	37
5	Ergebnisse	39
5.1	Geschwindigkeit	39
5.2	Winkelposition Shuttle	40
5.3	Schlupf	41
6	Parametervariationen	44
6.1	Mit oder ohne Filz	44
6.2	Luftspalt	46
6.3	Breite des Shuttles	46
6.4	Steifigkeit der V-Rollen	47
6.5	Geschwindigkeit	49
7	Zusammenfassung und Ausblick	53

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

B&R Industrial Automation GmbH (B&R), ein Hersteller von Automatisierungstechnik [3], bezeichnet ihr Produkt ACOPOStrak als multifunktionales und flexibles Transportsystem, welches auf Basis der Langstator-Lineararmortertechnologie funktioniert. Shuttles, frei bewegliche Elemente, werden an Segmenten in Normalkraft als auch in Vorwärtskraft geregelt. Dies ermöglicht eine individuelle und beliebige Positionierung der Shuttles. Die Segmente sind in einem Führungssystem eingebaut und bilden beliebige offene und geschlossene Bahnen auf Basis eines Gittersystems. Die individuelle Regelung der Normalkraft jedes einzelnen Shuttles ermöglicht es, dass Verzweigungen wie Weichen rein elektrisch realisiert werden können. Durch diesen Aufbau des Transportsystems können Produkte und Produktbestandteile schnell und flexibel durch eine Anlage oder Maschine von Bearbeitungsstation zu Bearbeitungsstation transportiert werden. Zudem ist ein Shuttle-Wechsel während des Betriebs möglich, ebenso wie eine Kombination mit konventionellen Transportsystemen.[2]

In Abbildung 1.1 werden die einzelnen Komponenten des Transportsystems ACOPOStrak dargestellt:

- a) Segmente
- b) Legacy-Shuttles
- c) Führungselemente mit Führungsschiene

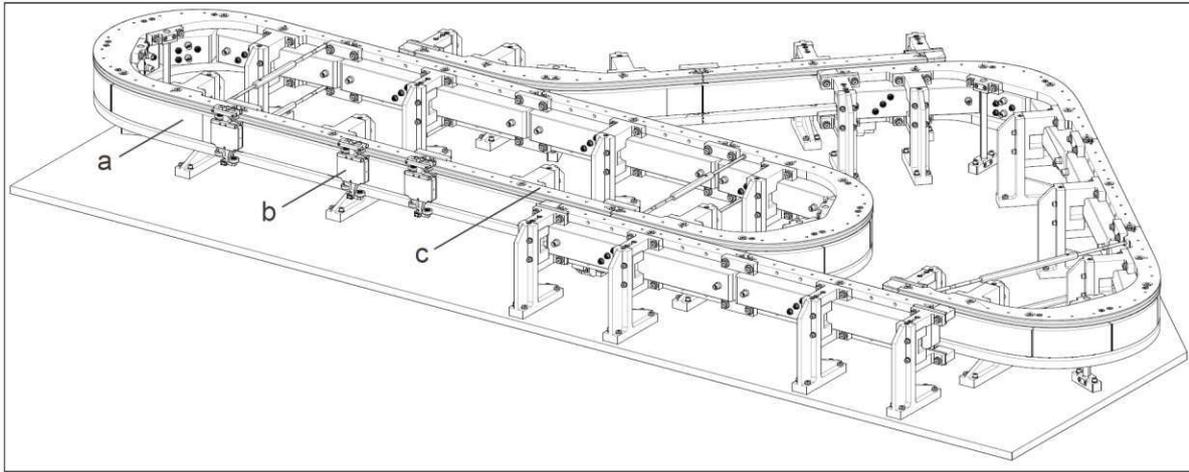


Abbildung 1.1: Komponenten des ACOPOStrak Transportsystems [2]

In der Vergangenheit wurden Messungen der auftretenden Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten am Shuttle durchgeführt. Es gibt jedoch kein Mehrkörpersystem (MKS)-Modell des Shuttles. Ein solches könnte dazu beitragen, ein besseres Systemverständnis der Bewegung des Shuttles auf den Führungsschienen zu gewinnen.

Durch den automatisierten Dauerbetrieb mit mehreren Shuttles kommt es zu sehr hohen Lastzahlen. Infolge dessen sind dynamische Untersuchungen auch insofern von Interesse, da kleine Änderungen größere Auswirkungen auf die Lebensdauer haben können.

1.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, das dynamische Verhalten des Transportsystems ACOPOStrak zu untersuchen und ein besseres Systemverständnis zu entwickeln. Dafür soll ein Mehrkörpersystemdynamikmodell des Shuttles aufgebaut werden. Darin wird der Kontakt zwischen Rolle und Schiene modelliert und die Abbildung der elektromagnetischen Kräfte soll durch ein vereinfachtes Modell realisiert werden. Das Modell des Shuttles soll die Simulation dessen Bewegung bei konstanter Geschwindigkeit auf einem Geradensegment ermöglichen. Darauf soll eine Validierung des dynamischen Modells folgen.

Mit dem Modell werden im Anschluss Analysen zum Systemverhalten durchgeführt. Betrachtet werden soll der Einfluss einzelner Parameter. Hierbei ist das Ziel, Abänderungs-

vorschläge zu erarbeiten, welche einen positiven Effekt auf die Lebensdauer zur Folge haben. Relevant sind nach Archard in diesem Fall die Normalkraft und der Schlupf [1]. Eine Reduktion dieser Größen bewirkt eine Reduktion des Abriebes.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn der vorliegenden Arbeit wird beschrieben, wie die Modellbildung des Shuttles erfolgt. Dabei wird darauf eingegangen, welche Annahmen getroffen werden und wie das Modell strukturiert ist. Darauf folgt die Definition der Parameter, welche notwendig für die Simulationsdurchführung sind. Es wird dargelegt, welche Informationsquellen verwendet, und welche Versuche durchgeführt werden, um die notwendigen Zahlenwerte zu erhalten. Um die Plausibilität des Modells sicherzustellen, erfolgt in Kapitel 4 eine Ausführung der durchgeführten Validierungen. Im Anschluss werden die mithilfe von Mehrkörpersystemsimulation erhaltenen Ergebnisse dargelegt und kommentiert. Um potentielle Verbesserungsvorschläge für das Transportsystem ACOPOStrak zu erarbeiten, werden im darauffolgenden Kapitel die durchgeführten Variationen der Parameter vorgestellt. Zum Abschluss erfolgt eine Zusammenfassung der Erkenntnisse dieser Arbeit und ein Ausblick, wie das im Rahmen dieses Projektes erstellte Modell verbessert und angewendet werden könnte.

2 Modellbildung

Funktionsweise ACOPOStrak

Bei dem Transportsystem ACOPOStrak werden die Shuttles rein durch magnetische Anziehungskraft an den Führungsschienen gehalten. In Abbildung 2.1(a) wird die Lage des Shuttles an den Schienen dargestellt. Im Shuttle befinden sich Permanentmagnete, in den Segmenten zwischen den Führungsschienen sind hingegen eine Reihe Eisenkerne mit Spulen montiert. Durch die Anziehung zwischen diesen wird jene Normalkraft erzeugt, welche das Shuttle an die Schienen drückt. Es gibt verschiedene Shuttlebreiten, in dieser Arbeit werden jedoch vorwiegend Shuttles mit 50 Millimeter Breite untersucht. Bei dieser Breite beträgt die nominelle Anziehungskraft in etwa 250 Newton. Durch eine geregelte Bestromung der Spulen wird eine Kraft in Fahrtrichtung des Shuttles erzeugt und so die Bewegung vorgegeben. Wie in Bild 2.1(b) zu sehen ist, sind die am Shuttle befestigten Permanentmagnete im Vergleich zu den Eisenkernen nach oben verschoben. Dadurch entsteht zusätzlich eine Querkraft. Dieser Versatz ist notwendig, da sich hier der Sensor zur Positionserfassung des Shuttles befindet.

Aufgrund der Abstände zwischen den Eisenkernen verändern sich die Kräfte periodisch bei der Fahrt des Shuttles in Fortbewegungsrichtung. So kommt es zu einer periodischen Geschwindigkeitsveränderung, auch Geschwindigkeitsrippel genannt, und, wenn der Massenmittelpunkt nicht mit dem Magnetkraftangriffspunkt übereinstimmt, auch zu einer Drehbewegung des Shuttels.

Die Abstützung des Shuttles an den Schienen erfolgt durch vier Rollen. Die beiden in Abbildung 2.1(a) oben dargestellten Rollen haben die Form zweier miteinander verbundener Kegelstümpfe und werden V-Rollen genannt. Über sie wird die vertikale Kraftkomponente übertragen. Durch einen montierten Filz werden die V-Rollen im Betrieb

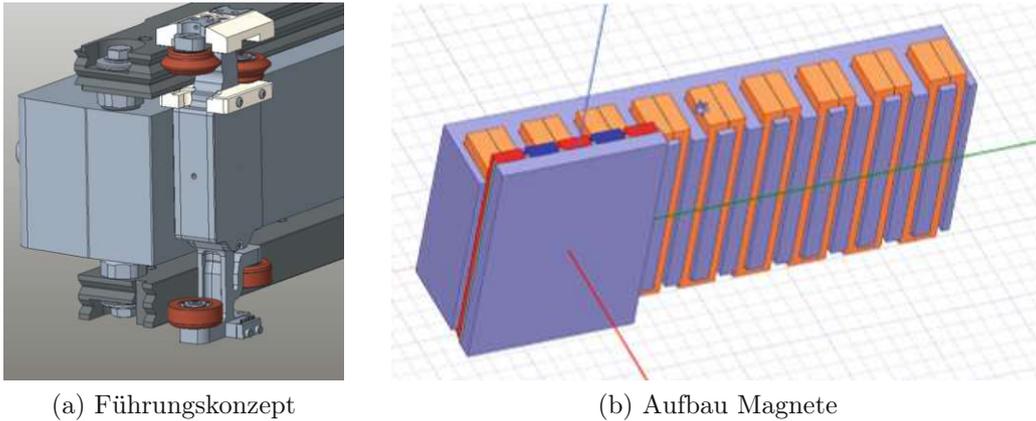


Abbildung 2.1: Funktionsweise (zur Verfügung gestellt von B&R)

geschmiert. Unten befinden sich zwei zylinderförmige Rollen, welche Flachrollen genannt werden. Diese übertragen bei reibungsfreier Betrachtung ausschließlich Kräfte in horizontaler Richtung. Die Torsionssteifigkeit des Bereiches des Shuttlekörpers, an welchem die Flachrollen befestigt werden, ist verhältnismäßig gering, was die Geräuschemissionen im Betrieb verringert. Anzumerken ist weiters, dass die Einbaulage des gesamten Transportsystems variabel ist.

Anforderungen an das Modell

Mit dem zu erstellenden Modell soll die Fahrt des Shuttles auf einem Geradensegment simuliert werden können. Eine Kurvenfahrt soll in dieser Untersuchung nicht betrachtet werden. Weiters ist auch das Verhalten bei Fortbewegungsgeschwindigkeiten nahe null nicht von Interesse. Wichtig ist hingegen, dass die „Mikrobewegungen“ des Shuttles in alle Raumrichtungen abgebildet werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird für den Aufbau des Modells und die darauffolgende Simulation die MKS-Simulationssoftware „SIMPACT“ eingesetzt. SIMPACK wird verwendet um nichtlineare Bewegungen von mechanischen oder mechatronischen Systemen simulieren zu können. Es ermöglicht, virtuelle dreidimensionale Modelle zu generieren und zu lösen, um Bewegung, Kopplungskräfte und Belastung zu prognostizieren und zu visualisieren [10].

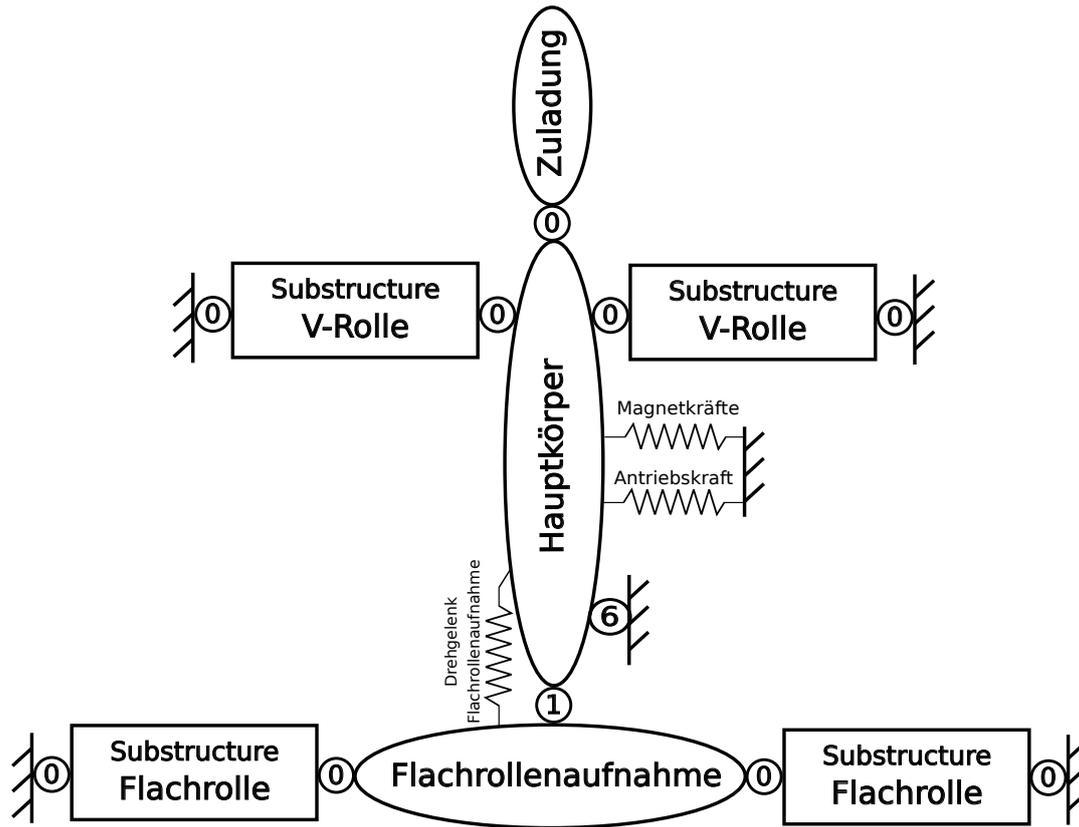


Abbildung 2.2: Topologie des Modells

Topologie des Modells

In Abbildung 2.2 wird die Topologie des MKS-Modells dargestellt. Die darin enthaltenen Ellipsen stellen Starrkörper und die Kreise Gelenke dar. Die Zahlen in den Kreisen stehen für die entsprechende Anzahl an Gelenksfreiheitsgraden. Die Rechtecke stehen für die Substructures der Rollen und Schienen. Die Federn zeigen die Implementierung der Kraftelemente. Das Modell des Shuttles hat insgesamt elf unabhängige Lagekoordinaten (siehe folgende Kapitel).

2.1 Koordinatensysteme

Der erste Schritt des Modellaufbaus in SIMPACK ist die Definition geeigneter Referenzkoordinatensysteme. In Abbildung 2.3(a) ist die Lage des globalen Referenzsystems,

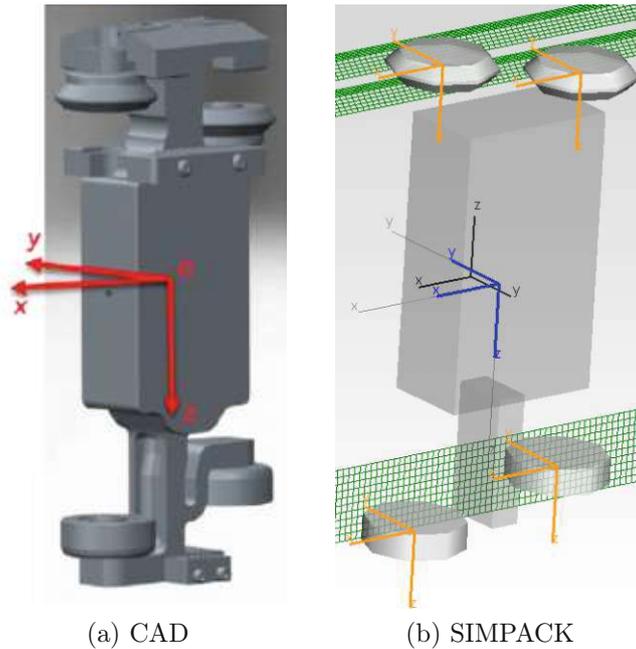


Abbildung 2.3: Koordinatensysteme

ein Inertialsystem, zu sehen. Die Orientierung ist so gewählt, dass die X-Achse in Fortbewegungsrichtung weist, die Y-Achse zeigt zu den Schienen und die Z-Achse zu den Flachrollen. Die Einbaulage des Systems wurde in dieser Arbeit so definiert, dass die Gravitation positiv in Richtung der Z-Achse wirkt. In der Ausgangsposition des Shuttles liegt der Ursprung in der Ebene der Drehachsen der Rollen und ist in X-Richtung symmetrisch zu diesen. In Z-Richtung ist er symmetrisch zu den Auflagemittelpunkten der Rollen.

Das globale Referenzsystem ist in Abbildung 2.3(b) in grau dargestellt. In blau zu sehen ist das Körperreferenzsystem, welches in Ausgangslage mit dem globalen Referenzsystem zusammenfällt, im Gegensatz dazu jedoch körperfest zu dem Shuttlehauptkörper ist. Das schwarze Koordinatensystem dient als Referenzsystem für die Magnetkräfte. Es hat eine andere Orientierung und Position als das Körperreferenzsystem. Zudem bewegt es sich zwar translatorisch mit dem Shuttle mit, rotativ hingegen nicht. Die orangenen Koordinatensysteme dienen als Referenzpunkt für die Rollen, wobei die im Bild oben dargestellten als Mittelpunkt für die V-Rollen dienen und körperfest mit dem Shuttlehauptkörper sind. Die beiden unteren sind der Mittelpunkt der Flachrollen und sind körperfest mit der Flachrollenaufnahme.

2.2 Körper und Gelenke

Alle Körper werden als Starrkörper modelliert, da davon ausgegangen wird, dass die Verformung der Rollen in der Umgebung des Kontaktbereiches und die Verdrehung des Shuttles zwischen der Magneteinheit und der Montageposition der Flachrollen (siehe unten) deutlich größer sind als die restlichen Verformungen des Shuttlekörpers. Die Modellierung dieser relevanten Verformungen wird mit Krafterelementen realisiert. Die weiteren Verformungen werden durch die Modellierung mit Starrkörpern vernachlässigt.

Der zentrale Körper des Modells ist der Hauptkörper, welcher den größten Teil des Shuttles abbildet. Alles, außer die Rollen, die Zuladung und die Aufnahme für die Flachrollen, wird diesem Körper zugeordnet, unter anderem auch die Permanentmagnete. Somit wirken die Magnetkräfte und die Antriebskraft auf den Hauptkörper. Keiner der 6 Freiheitsgrade des Hauptkörpers in Relation zum Inertialsystem wird durch ein Gelenk eingeschränkt.

Am realen Shuttle ist auch die Flachrollenaufnahme mit dem Hauptkörper verbunden. Diese Verbindung ist jedoch mit einem I-Querschnitt realisiert, welche verhältnismäßig torsionsweich ist. Um dies im Modell abzubilden, wird die Flachrollenaufnahme als separater Starrkörper modelliert. Dieser ist mit einem Scharniergelenk mit einem Freiheitsgrad um die Z-Achse mit dem Hauptkörper verbunden. Zusätzlich wird im Modell ein Drehfeder-Drehdämpfer Krafterelement verwendet, um die Eigenschaften des Materials bei Verdrehung zu simulieren.

Das Shuttle bietet die Möglichkeit, Zuladung oben oder unten zu befestigen. Ist das Shuttle nicht weichenfähig, kann alternativ auch seitlich Zuladung angebracht werden. Die am häufigsten verwendete Montagemöglichkeit ist jedoch oben, weshalb der Körper für die Zuladung starr mit dem Hauptkörper verbunden ist. Die reale Zuladung und damit auch deren Eigenschaften können sehr unterschiedlich sein. Sie verändert jedoch in jedem Fall die Masse und den Massenmittelpunkt des Shuttles, weshalb sie nicht vernachlässigt werden kann. Die gewählte Modellierung stellt eine häufige Anwendung dar, soll jedoch der Betrieb mit einer speziellen Zuladung simuliert werden, muss das Modell gegebenenfalls angepasst werden.

2.3 Substructure Flachrolle

Da an einem Shuttle zwei Flachrollen verbaut sind, werden diese als „Substructure“ modelliert. So muss dieses Untermodell nur einmal aufgebaut werden und kann dann an den beiden Positionen in Hauptmodell platziert werden. Zusätzlich müssen gegebenenfalls notwendige Änderungen nur einmal durchgeführt werden.

In Abbildung 2.4 wird die Topologie der Substructure Flachrolle dargestellt. Darin enthalten sind drei Starrkörper. Der Körper „Führung Flachrolle“ wird im Hauptmodell ohne Freiheitsgrad im Inertialsystem positioniert. Er bewegt sich nicht, doch ist er nützlich, um darauf Koordinatensysteme zu definieren und dient zur Visualisierung der Führungsschiene. Auf ihn wirken zudem die Kontaktkräfte der Rollen.

In der Realität ist die Rolle ein Körper, auf den alle Kontaktkräfte zwischen Rolle und Führung wirken. Da die Modellierung der Normalkraft jedoch einfacher ist, wenn sich der Körper, auf welchen die Kraft wirkt, nicht dreht, werden für die Modellierung zwei Körper verwendet. Der Körper mit dem Angriffspunkt der Normalkraft wird im Hauptmodell mit einem Gelenk ohne Freiheitsgrad an der Flachrollenaufnahme platziert. Jener Körper bleibt masselos, da die Masse der Flachrolle einem zweiten Körper zugeordnet wird. Dieser weitere Körper wird drehbar um die Z-Achse mit dem Körper „Flachrolle Normalkraft“ verbunden. Zwischen diesen beiden wirken zudem zwei Kraftelemente zur Implementierung des Bewegungswiderstandes des Shuttles. Auf den massebehafteten und drehbaren Körper wirken die longitudinalen- und lateralen Kräfte, womit folglich die Drehbewegung der Rolle simuliert werden kann.

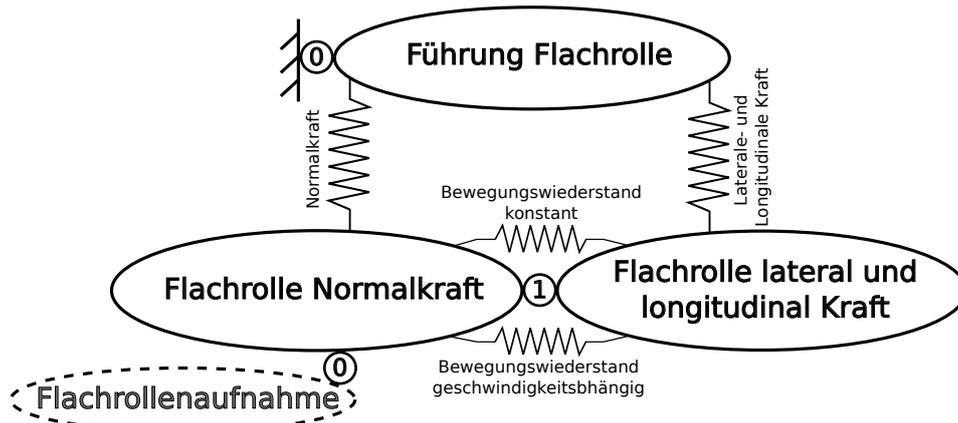


Abbildung 2.4: Topologie Substructure Flachrolle

2.3.1 Normalkräfte

Werden zwei Körper zunächst ohne wirkende Kraft von außen in Kontakt gebracht, so berühren sich nur die Oberflächen. Wirkt zudem eine Kraft P in Normalenrichtung auf die Körper, verformen sich diese und es stellt sich ein Kontaktgebiet mit einer Druckverteilung $p(x, y)$ ein (siehe Abbildung 2.5). Die Folge dieser Deformation ist zudem eine Annäherung δ_z der beiden Körper. Analog führen Belastungen in die tangentialen Richtung Q_x und Q_y zu Schubspannungsverteilungen q_x und q_y [9].

Das allgemeine Kontaktproblem kann gemäß [9] wie folgt formuliert werden: „Finde die Spannungsverteilungen $p(x, y)$, $q_x(x, y)$ und $q_y(x, y)$ für bekannte Deformationen $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$, bekannte Belastungen (P, Q_x, Q_y) oder eine Kombination davon.“

Für die Modellierung der Normalkraft zwischen den Flachrollen und der Führungsschiene wird der Zusammenhang zwischen Normalkraft und Verschiebung in Normalenrichtung bei statischer Betrachtung vereinfacht als linear angenommen. Mit einer Steifigkeit c ergibt sich die Verschiebung zu:

$$\delta_z = \frac{P}{c}. \quad (2.1)$$

Zusätzlich wird angenommen, dass sich der Druckmittelpunkt der Flächenberührung in der Mitte der Auflagefläche der Rolle befindet.

Da das Modell für dynamische Untersuchungen benötigt wird, muss auch die Dämpfung im Material berücksichtigt werden. Diese wird vereinfacht als rein viskose Dämpfung

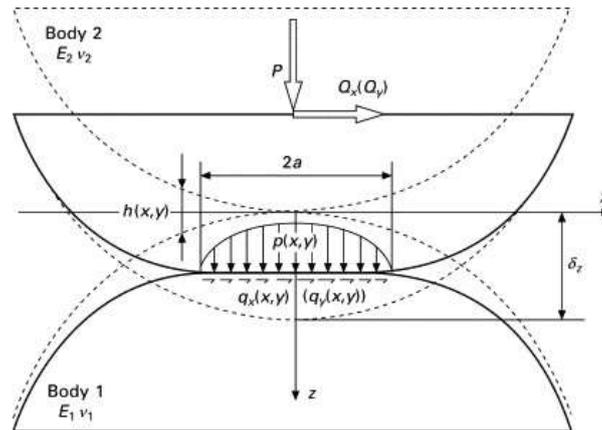


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des Kontaktes zweier elastischer Körper bei normaler und tangentialer Belastung P , Q_x und Q_y , die daraus resultierenden Spannungen p , q_x und q_y und Verschiebung δ_z (nach [9])

modelliert. Mit der geschwindigkeitsproportionalen Dämpfungskonstante k ergibt sich die modellierte Gesamtnormalkraft zu:

$$\begin{aligned}
 P &= c \cdot \delta_z + k \cdot \dot{\delta}_z \quad \text{für } \delta_z \geq 0, \quad \dot{\delta}_z \geq 0 \\
 P &= c \cdot \delta_z \quad \text{für } \delta_z \geq 0, \quad \dot{\delta}_z \leq 0 \\
 P &= 0 \quad \text{für } \delta_z \leq 0.
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

In Gleichung 2.2 wird zudem berücksichtigt, dass ein Abheben der Rolle möglich ist, was ein Verschwinden der Normalkraft zu Folge hat, und, dass bei der Expansion des Kontaktes keine Dämpfungskraft wirkt.

Dieser Modellierungsansatz stellt eine starke Vereinfachung der Realität dar, es wird jedoch angenommen, dass dieser für die zu erwartenden kleinen Verformungen und die Betrachtung der Gesamtbewegung des Shuttles ausreichend ist.

2.3.2 Kräfte in lateraler und longitudinaler Richtung

Für die Modellierung der Kräfte des Flachrollen-Führungsschienen-Kontakts in longitudinaler und lateraler Richtung wird das „Tire Brush Model“ verwendet. Dies stellt ein Modell für den Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn dar, wobei die Kontaktfläche des Reifens betrachtet wird, als wäre sie mit elastischen Borsten, welche die Fahrbahn

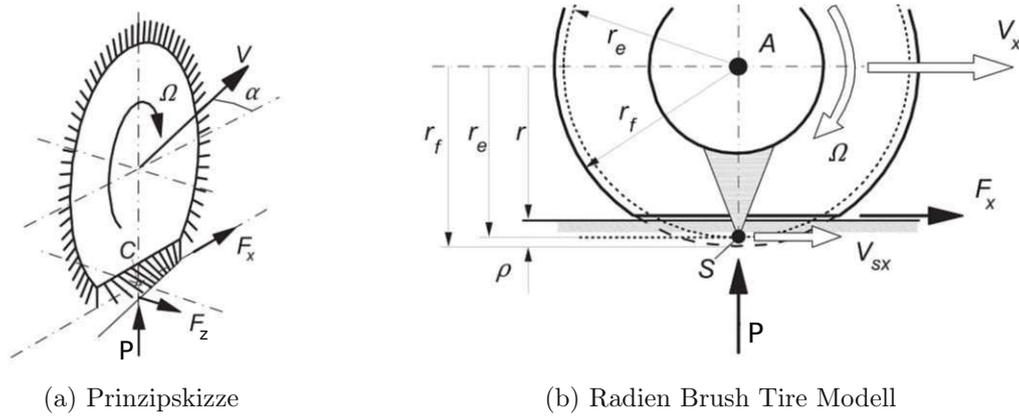


Abbildung 2.6: Brush Tire Modell [8]

berühren, bestückt [8] (siehe Abbildung 2.6(a)). Daraus wird ein Formelwerk abgeleitet, welches die Berechnung der longitudinalen und lateralen Kräfte ermöglicht. Dieses Modell wurde für die Betrachtung von Reifen entwickelt, obgleich wird es in dieser Arbeit für die Modellbildung des Kontaktes einer Kunststoffrolle auf einer Stahlschiene verwendet, da sich zwar die Parameterwerte unterscheiden, die grundsätzliche Problemstellung jedoch nicht. Hier wird der für die Modellbildung des Kontaktes zwischen Rolle und Schiene relevante Berechnungsweg geschildert, für weiterführende Informationen zum Tire Brush Modell sei auf [8] verwiesen.

In Abbildung 2.6(b) werden die relevanten Radien beim Abrollen für das Tire Brush Modell dargestellt. Dabei ist r_f der Außenradius der undeformierten Rolle, r_e der effektive Rollradius und r der Abstand zwischen Schiene und Rollendrehmittelpunkt. Zugleich ist r der Normalabstand zwischen den Kräften in der Berührebene (longinale und laterale Reibkräfte) und dem Rollenmittelpunkt A .

Der longitudinale Schlupf κ ist definiert als

$$\kappa = -\frac{V_x - r_e \cdot \Omega}{V_x}, \quad (2.3)$$

wobei V_x die Geschwindigkeit des Rollenmittelpunktes in X-Richtung und Ω die Winkelgeschwindigkeit der Rolle um die Z-Achse ist. Daraus lässt sich der theoretische longitudinale Schlupf σ_x bestimmen:

$$\sigma_x = \frac{\kappa}{1 + \kappa}. \quad (2.4)$$

Aufgrund der Division durch $1 + \kappa$ ist dieses Modell nur für $\kappa > -1$ gültig. Diese Einschränkung muss bei der Auswertung der Simulationsergebnisse beachtet werden. Die Berechnung des lateralen Schlupfes $\tan \alpha$ erfolgt mit

$$\tan \alpha = -\frac{V_z}{|V_x|}. \quad (2.5)$$

V_z bezeichnet dabei die Geschwindigkeit des Rollenmittelpunktes in Z-Richtung. In Gleichung 2.5 wird der Betrag von V_x verwendet, damit die Berechnung ebenfalls gültig ist, wenn das Shuttle in die negative X-Richtung bewegt wird. Der theoretische Schlupf in lateraler Richtung ist definiert als

$$\sigma_z = \frac{\tan \alpha}{1 + \kappa}. \quad (2.6)$$

Der theoretische Schlupf kann auch in Vektorform angeschrieben werden, wobei sich dessen Betrag als

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2} \quad (2.7)$$

angeben lässt.

Der Ausdruck für den isotropen Modellparameter θ lautet

$$\theta = \frac{2 c_p a^2}{3 \mu P}. \quad (2.8)$$

Für die kombinierte Betrachtung von longitudinalem und lateralem Schlupf wird in [8] θ für beide Richtungen gleichgesetzt, um die mathematische Einfachheit zu bewahren. Es wird angenommen, dass dies auch für den Schlupf der Rolle auf der Führungsschiene in guter Näherung stimmt. In Gleichung 2.8 bezeichnet μ den Reibkoeffizienten und $c_p a^2$ ist konstant und dient als Parameter für die Schlupfsteifigkeit der Materialpaarung.

Der Betrag der Reibkraft ergibt sich damit zu

$$\begin{aligned} F &= \mu P \{3\theta\sigma - 3(\theta\sigma)^2 + (\theta\sigma)^3\} & \text{für } \sigma \leq \frac{1}{\theta} \\ F &= \mu P & \text{für } \sigma > \frac{1}{\theta}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Daraus können die Komponenten des Reibkraftvektors erhalten

$$\begin{aligned} F_x &= F \frac{\sigma_x}{\sigma} \\ F_z &= F \frac{\sigma_z}{\sigma} \end{aligned} \quad (2.10)$$

und im Modell zwischen Rolle und Führungsschiene aufgebracht werden.

Bei der Implementierung der Gleichungen 2.3 bis 2.10 in SIMPACK wurden die Nenner nach unten auf eine kleine positive Zahl beschränkt, um eine Division durch null zu verhindern. Daraus resultiert, dass das Modell nicht bei Fortbewegungsgeschwindigkeiten nahe null verwendet werden kann.

2.3.3 Bewegungswiderstand

Der Bewegungswiderstand, welcher bremsend auf das Shuttle wirkt, resultiert aus mehreren Einflüssen:

- Abrollwiderstand der vier Rollen auf den Schienen
- Lagerreibung der Kugellager mit welchen die Rollen am Shuttle befestigt sind
- Reibung des Filzes, welcher die V-Rollen schmiert
- magnetische Schmutzeffekte
- Luftwiderstand
- weitere Einflüsse mit untergeordneter Größenordnung

Sowohl der Abrollwiderstand, die Lagerreibung als auch die Filzreibung wirken direkt oder indirekt als bremsendes Moment auf die Rollen. Anzumerken ist, dass die Filzreibung nur für den Bewegungswiderstand der V-Rollen relevant ist, da an den Flachrollen kein Filz montiert ist. Die magnetischen Schmutzeffekte und der Luftwiderstand wirken zusammengefasst als resultierende Kraft auf den Hauptkörper. Es wird jedoch angenommen, dass die Größenordnung der Einflüsse der bremsenden Momente signifikant größer ist als die der bremsenden Kräfte. Deshalb erfolgt die Modellierung des Bewegungswiderstandes rein durch ein Moment, welches entgegengesetzt zur Drehrichtung der Rolle zwischen Shuttlehauptkörper und Flachrolle wirkt. Die Zusammenhänge zwischen diesen bremsenden Einflüssen und der Geschwindigkeit sind in der Realität komplex und die

genaue Bestimmung aufwändig. Es wird angenommen, dass die Modellierung mit einem konstanten und einem geschwindigkeitsproportionalen Anteil die Realität in guter Näherung abbildet. Das Moment M , welches den Bewegungswiderstand im Modell darstellt, wird durch

$$M = -\{c_1 \cdot \text{sign}(\Omega) + c_2 \cdot \Omega\} \quad (2.11)$$

bestimmt, wobei c_1 und c_2 konstante Parameter sind, welche den Einfluss des konstanten und des geschwindigkeitsproportionalen Anteils vorgeben. Angemerkt sei, dass der Coulombsche Anteil bei der Formulierung in Gleichung 2.11 bei Ω gleich null eine Unstetigkeit aufweist. Dies wird bei der Implementierung im Modell verhindert, indem statt dem Sprung eine Regulierungsfunktion verwendet und der Bereich somit sprung- und knickfrei wird.

2.4 Substructure V-Rolle

Die Substruktur zur Modellierung der V-Rolle weist in vielen Punkten Ähnlichkeiten zur Modellierung der Flachrolle auf. Aus diesem Grund wird hier auf schon beschriebene Punkte nicht im Detail eingegangen. So sind unter anderem die Starrkörper des V-Rollen Modells, welche in Abbildung 2.7 der Topologie der Substructure der V-Rolle zu sehen sind, ähnlich zu jenen der Flachrolle. Rein die Geometrie unterscheidet sich. Die Führung der V-Rolle ist ohne Freiheitsgrad mit dem Inertialsystem im Hauptmodell verbunden, am Hauptkörper des Shuttles ist ohne relative Bewegungsmöglichkeit der Körper „V-Rolle Normalkraft“ angebracht und wiederum damit ist der Körper „V-Rolle lateral und longitudinal Kraft“ mit Drehmöglichkeit um die Z-Achse gelenkig verbunden.

Im Unterschied zur Flachrolle liegt die V-Rolle an zwei Berührflächen an der Führungsschiene auf. Somit ist die Modellierung der Normalkraft als auch der longitudinalen und lateralen Kraft für die obere und die untere Berührfläche notwendig.

Die Modellierung des Bewegungswiderstandes ist analog wie bei der Flachrolle, mit dem einzigen Unterschied, dass die Werte der Parameter c_1 und c_2 größer ausfallen, da zusätzlich die Reibung des Filzes auf die V-Rollen wirkt. Die Substructure V-Rolle wird wie die der Flachrolle zweimal im Hauptmodell verwendet.

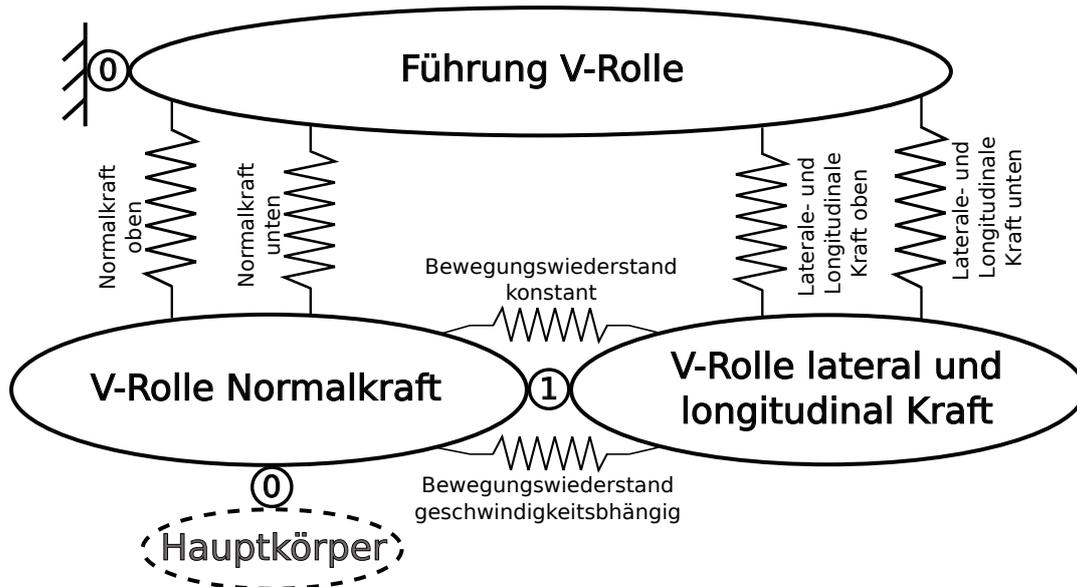


Abbildung 2.7: Topologie Substructure V-Rolle

2.4.1 Normalkräfte

Alle für die Modellierung der Normalkraft der Flachrolle getroffenen Annahmen und Überlegungen treffen auch für die Modellbildung der Normalkräfte der V-Rollen zu. Bei der V-Rolle wird die Normalkraft auf der Ober- und Unterseite in analoger Weise modelliert. Hinzu kommt, dass sich die Auflagelänge der Auflagefläche reduziert, wenn nur einer der beiden Kegelstümpfe mit der Führungsschiene in Berührung ist. Zu sehen ist dies in der schematischen Abbildung 2.8 wobei der Querschnitt der V-Rolle in blau und der Querschnitt der Führung in schwarz dargestellt ist.

Es wird angenommen, dass sich die Steifigkeit und die Dämpfung des Kontaktes verringern, wenn die Rolle nicht über die ganze Länge aufliegt. Um dies in das Modell

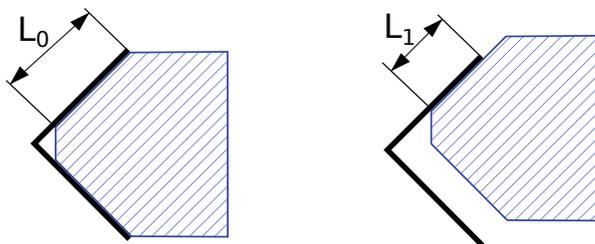


Abbildung 2.8: Unterschiedliche Auflagelänge der V-Rolle

einfließen zu lassen, wird das Verhältnis V_{Auflage} eingeführt:

$$V_{\text{Auflage}} = \frac{L_1}{L_0}. \quad (2.12)$$

L_0 bezeichnet dabei die maximal erreichbare Auflagelänge, welche üblicherweise im Betrieb auftritt. L_1 steht für die aktuell vorhandene Auflagelänge, welche zwischen L_0 und null variieren kann. Wird davon ausgegangen, dass sich die Steifigkeit und die Dämpfung proportional mit der Auflagefläche ändern, ergibt sich folgender Ausdruck für die Normalkraft für eine Seite der V-Rolle:

$$\begin{aligned} P &= c \cdot V_{\text{Auflage}} \cdot \delta_z + k \cdot V_{\text{Auflage}} \cdot \dot{\delta}_z \quad \text{für } \delta_z \geq 0, \quad \dot{\delta}_z \geq 0 \\ P &= c \cdot V_{\text{Auflage}} \cdot \delta_z \quad \text{für } \delta_z \geq 0, \quad \dot{\delta}_z \leq 0 \\ P &= 0 \quad \text{für } \delta_z \leq 0. \end{aligned} \quad (2.13)$$

2.4.2 Kräfte in lateraler und longitudinaler Richtung

Die Kräfte in lateraler und longitudinaler Richtung werden gleichermaßen, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, bestimmt. Abgeändert wird nur Gleichung 2.3 zu

$$\kappa = -\frac{V_x - r_{e \text{ Aktuell}} \cdot \Omega}{V_x}, \quad (2.14)$$

da sich der durchschnittliche Abstand der Auflagefläche zum Rollenmittelpunkt ändern kann, wenn eine der Seiten der V-Rolle abhebt. $r_{e \text{ Aktuell}}$ wird in der Simulation ausgelesen und anstatt eines konstanten Wertes, wie bei der Flachrolle, in Formel 2.14 eingesetzt.

Anzumerken ist zudem, dass der Bohrschlupf in der Modellbildung vernachlässigt wird. Anstelle des Abrollens der beiden Kegelstümpfe pro V-Rolle wird also das Abrollen zweier Kreise modelliert.

2.5 Magnetkräfte

Zur Implementierung der Magnetkräfte im Modell wurde bei B&R eine elektromagnetische Finite Elemente Analyse (FEA) durchgeführt [6]. Deren Ergebnisse werden dem Modell als Lookup-Tables zugeführt. Diese werden bei der Simulation der Bewegung des Shuttles ausgelesen und mittels modelliertem Kraftelement zwischen dem Inertialsystem und dem Magnetkraftangriffspunkt, welcher körperfest am Shuttle ist, aufgebracht. In der Ausgangsposition ist der Magnetkraftangriffspunkt deckungsgleich mit dem Referenzkoordinatensystem der Magnetkräfte, welches in Abbildung 2.3(b) zu sehen ist. Dieses bewegt sich translatorisch mit den Shuttle mit, jedoch führt es keine rotatorischen Bewegungen aus. Das Referenzkoordinatensystem wurde zur Durchführung der FEA definiert und deren Ergebnisse und damit auch die Lookup-Tables sind darauf bezogen.

Abbildung 2.9 zeigt das FEA Modell zur Bestimmung der Magnetkräfte mittels magnetostatischer Simulation. Darin wird die dreidimensionale Geometrie der Permanentmagnete im Shuttle und die der Eisenkerne eines geraden Segmentstückes modelliert. Verzichtet wird dabei auf Radien und andere gekrümmte Flächen. Ebenso werden die Einflüsse der Spulen, welche in der Realität um jeden zweiten Eisenkern gewickelt sind, nicht berücksichtigt. Dadurch wird auch der Einfluss der Bestromung der Spulen auf das Bewegungsverhalten des Shuttles nicht in die Simulation miteinbezogen. Der Luftspalt zwischen Eisenkernen und Permanentmagneten beträgt zwei Millimeter, was auch der Nominalwert des realen Transportsystems ist.

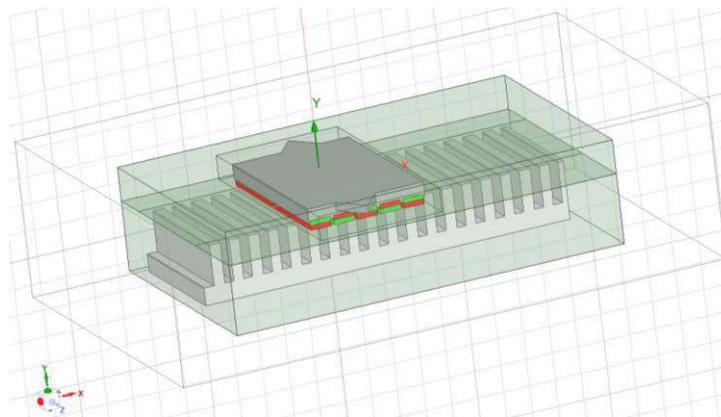


Abbildung 2.9: Modell für Finite Elemente Analyse der Magnetkräfte [6]

Mit diesem Modell wurden die resultierenden magnetischen Kräfte und Momente in die sechs Raumrichtungen für verschiedene Positionen in X-Richtung und verschiedene Rotationswinkel β um die Y-Achse simuliert. Die Position in X-Richtung wurde dabei von null bis 15 Millimeter mit einer Auflösung von einem Millimeter variiert. Dies ist dadurch begründet, dass die Eisenkerne alle 15 Millimeter periodisch angeordnet sind. Zusätzlich wurde die Finite Elemente Rechnung für eine Verdrehung β von null, einem und zwei Grad durchgeführt. Eine Simulation der Magnetkräfte für negative Verdrehwinkel β ist nicht notwendig, da die Kräfte in die X-, Y- und Z-Richtung achsensymmetrisch sind und sich die Momente um die X-, Y- und Z-Achse punktsymmetrisch zu deren Schnittpunkt mit der Ordinate verhalten.

Da die Auflösung der Ergebnisse der FEA begrenzt ist und um den Einfluss von numerischem Rauschen zu reduzieren, wird der Verlauf der Magnetkräfte über die Verschiebung in X-Richtung mit harmonischen Funktionen gefittet. Die Ordnung wird dabei individuell passend zum Funktionsverlauf gewählt. Dabei wird zudem vorgegeben, dass die gefitteten Kurven alle 15 Millimeter periodisch sind. In Abbildung 2.10 werden die normalisierten Verläufe der Magnetkräfte über den Verschiebeweg dargestellt. Dabei steht „F“ für die Kräfte, „T“ für die Momente und die tiefgestellten Buchstaben für die Wirkrichtung dieser. Die unterschiedlichen Farben der Kurven stellen die Verläufe für verschiedene Verdrehwinkel β dar.

Die gefitteten Kurven werden mit einer Auflösung von einem Zehntel Millimeter in das MKS Modell als Lookup-Table eingebettet. Darin erfolgt eine kubische Interpolation zwischen den Datenpunkten, sowohl für den Verschiebeweg, als auch für den Drehwinkel. Im Modell sind die Lookup-Tables nur für den Bereich von null bis 15 Millimeter Verschiebeweg und von null bis zwei Grad Verdrehwinkel definiert. Die aktuelle Position des Shuttles in X-Richtung wird so umgerechnet, als würden sich die Verläufe der Magnetkräfte periodisch wiederholen. So erfolgt zum Beispiel für eine Position von $x = 35\text{mm}$ ein Auslesen der Magnetkräfte bei $x = 5\text{mm}$. Für negative Verdrehwinkel wird die definierte Symmetrie berücksichtigt.

Da auch eine Veränderung des Luftspaltes eine Veränderung der Magnetkräfte nach sich zieht [7], wurde dieser Zusammenhang von B&R untersucht. Ohne physikalische Modellbildung wurde folgende Näherungsformel zum Einfluss von Luftspaltänderungen

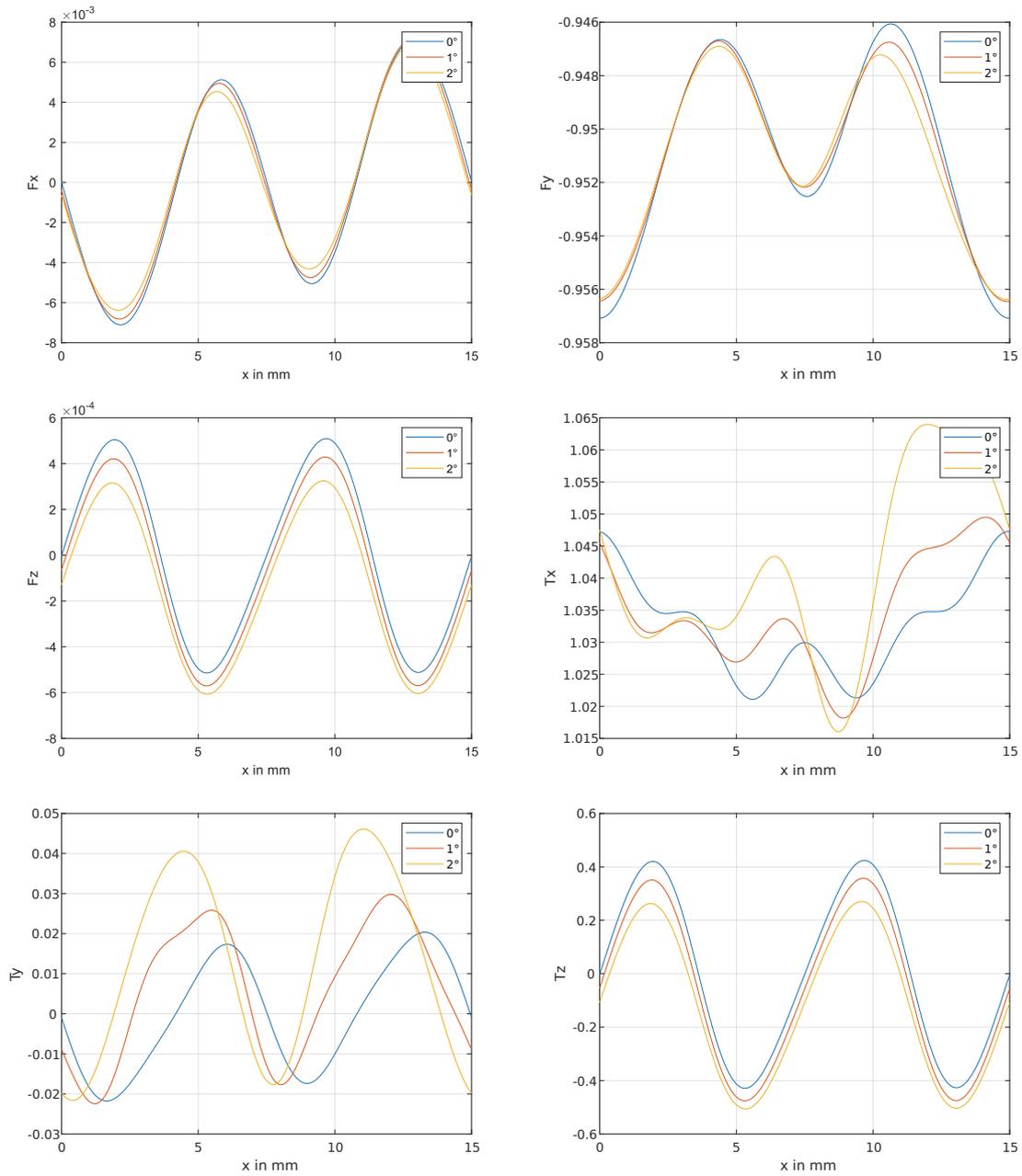


Abbildung 2.10: Gefittete Verläufe der Magnetkräfte normalisiert

$\Delta\delta$ auf die Magnetkräfte F_i entwickelt [6]:

$$F_i(x, \Delta\delta) = (1 - k_i\Delta\delta)^2 \cdot F_i(x, 0). \quad (2.15)$$

Diese Abschätzung stellt für kleine Abweichungen des Luftspaltes eine gute Näherung dar. Da dies für die Simulation der Bewegung des Shuttles zu erwarten ist, wird die Gleichung 2.15 verwendet, um den Einfluss von Luftspaltveränderungen auf die magnetischen Kräfte und Momente zu modellieren. Die Parameter k_i modellieren den Betrag des Einflusses von Luftspaltänderungen.

2.6 Antriebskraft

In der Realität erfolgt der Antrieb des Shuttles durch eine geregelte Bestromung der Spulen, was eine Vortriebskraft zur Folge hat. Da der Einfluss der Spulen und damit auch der Einfluss des Reglers nicht im Modell berücksichtigt werden, ist es notwendig, eine Antriebskraft vorzugeben, wenn eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit simuliert werden soll. Der implementierte Bewegungswiderstand würde sonst eine Verzögerung des Shuttles bewirken.

Die vorgegebene Antriebskraft stellt eine konstante Kraft dar, welche im Magnetkraftangriffspunkt in X-Richtung wirkt, da angenommen wird, dass auch die reale Resultierende der Vortriebskraft in der Nähe davon angreift. Der Betrag kann beliebig gewählt werden, da sich nach einiger Zeit eine konstante Geschwindigkeit einstellt, da der Bewegungswiderstand im Modell mit steigender Geschwindigkeit linear zunimmt. Standardmäßig wird im Modell eine Formulierung für die Antriebskraft gewählt, womit bei verschiedenen Parameterkombinationen möglichst schnell der Zustand konstanter Geschwindigkeit erreicht wird. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass hier von einer makroskopisch konstanten Geschwindigkeit die Rede ist, da durch die schwankende Magnetkraft in X-Richtung immer eine Geschwindigkeitsschwankung auftritt.

3 Parametrierung der Subsysteme

Um Simulationsergebnisse zu erhalten, welche eine Aussagekraft für die reale Bewegung des Shuttles besitzen, ist es notwendig, die Parameter des Modells so gut wie möglich abzuschätzen. Gleichzeitig muss eine Abwägung zwischen Aufwand zur Bestimmung der Parameter und der dadurch realisierten Verbesserung der Ergebnisse getroffen werden. Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie die Festlegung der Parameter erfolgt.

3.1 Geometrie und Masseigenschaften

Die Geometrie- und Masseparameter des Shuttles und der Rollen werden aus „Computer Aided Design“ (CAD) Modellen ausgelesen und in das SIMPACK Modell übertragen. Dazu zählen alle Abmessungen, sowie die Massen, Massenträgheitsmomente und Massenmittelpunkte. Werte, welche in Tabelle 3.1 nicht angeführt werden, werden entweder aus den angegebenen Werten bestimmt oder werden als null angenommen. Null gesetzt werden zum Beispiel die Deviationsmomente der Rollen oder die Position des Massenmittelpunktes der Flachrollenaufnahme in X- und Y-Richtung, da die Beträge diese Werte sehr klein, und damit vernachlässigbar für die Simulation der Bewegung des Shuttles, sind.

Für die Zuweisung der Masseigenschaften des Hauptkörpers und der Flachrollenaufnahme werden die Masseigenschaften des Hauptkörpers und der Flachrollenaufnahme kombiniert und die der Flachrollenaufnahme einzeln definiert. Daraus lassen sich mit

$$M_{\text{Haupt}} = M_{\text{ges}} - M_{\text{FLauf}} \quad (3.1)$$

Parameter	Beschreibung	Wert	Einheit
Z_{V-FL}	Mittlerer Abstand zw. V- und Flachrollen in Z	130	mm
Z_V	Abstand zwischen V-Rollen in Z	11	mm
Z_{FL}	Abstand zwischen Flachrollen in Z	11	mm
X_V	Abstand zwischen V-Rollen in X	50	mm
X_{FL}	Abstand zwischen Flachrollen in X	50	mm
M_{ges}	Masse Hauptkörper und Flachrollenaufnahme	0,6578	kg
$I_{xx\ ges}$	Trägheitsmoment I_{xx} Hauptk.+Flachrollenaufn.	1211,1	kgmm ²
$I_{yy\ ges}$	Trägheitsmoment I_{yy} Hauptk.+Flachrollenaufn.	1302,2	kgmm ²
$I_{zz\ ges}$	Trägheitsmoment I_{zz} Hauptk.+Flachrollenaufn.	189,7	kgmm ²
$I_{xy\ ges}$	Trägheitsmoment I_{xy} Hauptk.+Flachrollenaufn.	0,0188	kgmm ²
$I_{xz\ ges}$	Trägheitsmoment I_{xz} Hauptk.+Flachrollenaufn.	1,877	kgmm ²
$I_{yz\ ges}$	Trägheitsmoment I_{yz} Hauptk.+Flachrollenaufn.	-0,012	kgmm ²
$CM_X\ ges$	Pos SP Hauptk. + Flachrollenaufn. in X	-0,005	mm
$CM_Y\ ges$	Pos SP Hauptk. + Flachrollenaufn. in Y	-0,0002	mm
$CM_Z\ ges$	Pos SP Hauptk. + Flachrollenaufn. in Z	-7,42	mm
M_{FLauf}	Masse der Flachrollenaufnahme	0,041	kg
$I_{xx\ FLauf}$	Trägheitsmoment I_{xx} der Flachrollenaufn.	11,25	kgmm ²
$I_{yy\ FLauf}$	Trägheitsmoment I_{yy} der Flachrollenaufn.	17,85	kgmm ²
$I_{zz\ FLauf}$	Trägheitsmoment I_{zz} der Flachrollenaufn.	9,03	kgmm ²
$CM_Z\ FLauf$	Position Schwerpunkt Flachrollenaufn. in Z	66,44	mm
M_{Zu}	Masse der Zuladung	0,5	kg
$CM_Z\ Zu$	Position Schwerpunkt Zuladung in Z	-120	mm
D_{FL}	Außendurchmesser der Flachrolle	30	mm
B_{FL}	Breite der Lauffläche der Flachrolle	8	mm
M_{FL}	Masse der Flachrolle	0,0068	kg
$I_{xx\ FL}$	Trägheitsmoment I_{xx} der Flachrolle	0,593	kgmm ²
$I_{yy\ FL}$	Trägheitsmoment I_{yy} der Flachrolle	0,593	kgmm ²
$I_{zz\ FL}$	Trägheitsmoment I_{zz} der Flachrolle	1,046	kgmm ²
$CM_Z\ FL$	Pos SP Flachrolle in Z zu Mittelpunkt Rolle	-1,11	mm
$\alpha_V\ oeff$	Öffnungswinkel der V-Rolle	90	°
$D_V\ a$	Außendurchmesser der V-Rolle	33	mm
$D_V\ i$	Innendurchmesser der Lauffläche der V-Rolle	26	mm
$\Delta_Z\ V$	Fasenlänge der V-Rolle	1	mm
M_V	Masse der V-Rolle	0,0062	kg
$I_{xx\ V}$	Trägheitsmoment I_{xx} der V-Rolle	0,523	kgmm ²
$I_{yy\ V}$	Trägheitsmoment I_{yy} der V-Rolle	0,523	kgmm ²
$I_{zz\ V}$	Trägheitsmoment I_{zz} der V-Rolle	0,935	kgmm ²
$CM_Z\ V$	Pos SP in Z zu Mittelpunkt V-Rolle	1,19	mm

Tabelle 3.1: Geometrie- und Massenparameter

$$CM_{Z \text{ Haupt}} = \frac{CM_{Z \text{ ges}} \cdot M_{\text{ges}} - CM_{Z \text{ FLauf}} \cdot M_{\text{FLauf}}}{M_{\text{Haupt}}} \quad (3.2)$$

$$I_{xx \text{ Haupt}} = I_{xx \text{ ges}} + M_{\text{ges}} \cdot (CM_{Z \text{ ges}} - CM_{Z \text{ Haupt}})^2 - \{I_{xx \text{ FLauf}} + M_{\text{FLauf}} \cdot (CM_{Z \text{ FLauf}} - CM_{Z \text{ Haupt}})^2\} \quad (3.3)$$

$$I_{yy \text{ Haupt}} = I_{yy \text{ ges}} + M_{\text{ges}} \cdot (CM_{Z \text{ ges}} - CM_{Z \text{ Haupt}})^2 - \{I_{yy \text{ FLauf}} + M_{\text{FLauf}} \cdot (CM_{Z \text{ FLauf}} - CM_{Z \text{ Haupt}})^2\} \quad (3.4)$$

$$I_{zz \text{ Haupt}} = I_{zz \text{ ges}} - I_{zz \text{ FLauf}} \quad (3.5)$$

die Eigenschaften des Hauptkörpers alleine bestimmen. M_{Haupt} bezieht dabei die Masse des Hauptkörpers, $I_{xx \text{ Haupt}}$, $I_{yy \text{ Haupt}}$ und $I_{zz \text{ Haupt}}$ die Massenträgheitsmomente um die X-, Y-, beziehungsweise Z-Achse. $CM_{Z \text{ Haupt}}$ steht für die Position des Massenmittelpunktes des Hauptkörpers in Z-Richtung.

Masse, Position und Geometrie der Zuladung des Shuttles können im Betrieb sehr unterschiedlich ausfallen. Die in Tabelle 3.1 angegebenen Werte werden als Basiswerte für die Simulation festgelegt, da sie eine durchschnittliche Zuladung darstellen. Soll eine Simulation für eine bestimmte Zuladung durchgeführt werden, müssen diese Parameter angepasst werden.

3.2 Kontakt Rolle-Führungsschiene

3.2.1 Rollensteifigkeit

Bei B&R wurde zur Bestimmung der Steifigkeit der Rollen eine FEA durchgeführt [4]. Dafür wurde ein Modell inklusive der Rolle, dem Kugellager und einem Teil der Führungsschiene aufgebaut. Dabei wird der Innenring des Kugellagers in alle Raumrichtungen festgehalten und die seitlichen Ränder des Führungsschienenteils sind nur in Y-Richtung verschieblich. Im Modell ist der Kontakt reibungsfrei modelliert. Auf den Führungskörper wird daraufhin eine Kraft F von 60 Newton aufgebracht, was in etwa einem Viertel der nominellen magnetischen Anziehungskraft des Shuttles entspricht.

Damit wird die statische Verschiebung δ der Führung unter dieser Belastung bestimmt.

Wird angenommen, dass sich die Verschiebung bei statischer Betrachtung direkt proportional zur aufgebrachten Normalkraft verhält, so lässt sich aus den Ergebnissen dieser FEA die Ersatzfedersteifigkeit des Rollenkontaktes bestimmen. Für die Flachrolle wird folgende Formulierung verwendet:

$$c_{FL} = \frac{F}{\delta_{FL}} = \frac{60N}{0,006mm}. \quad (3.6)$$

Bei der Berechnung der Ersatzfedersteifigkeit c_V der V-Rolle muss zudem der Öffnungswinkel $\alpha_{V\text{ oeff}}$ und das Vorhandensein von zwei Berührflächen und damit zwei Normalkräften P berücksichtigt werden:

$$c_V = \frac{\frac{F}{2 \cdot \sin(\alpha_{V\text{ oeff}}/2)}}{\delta_V \cdot \sin(\alpha_{V\text{ oeff}}/2)} = \frac{\frac{60N}{2 \cdot \sin 45^\circ}}{0,008mm \cdot \sin 45^\circ}. \quad (3.7)$$

Die Steifigkeit c_V gilt somit für die Kraft normal auf die jeweilige Berührfläche.

Die in der FEA bestimmten Verschiebungen unter Belastung werden zudem als konstante Differenzen zwischen den undeformierten Rollradien r_f der Rollen und den belasteten Abständen r zwischen den Kontaktpunkten und den Rollenmittelpunkten vorgegeben. Dies definiert den Angriffspunkt für die longitudinalen und lateralen Kräfte. Es wäre auch möglich, diesen Abstand als veränderlichen Wert permanent aus der Simulation auszulesen, doch ist der Zahlenwert so klein, dass angenommen wird, dass der dadurch erhöhte Detaillierungsgrad des Modells weniger Genauigkeitsgewinn bringt, als durch etwaig erzeugte numerische Fehler verloren gehen würde. Der exakte Wert des effektiven Rollradius r_e müsste über einen verhältnismäßig aufwändigen Versuch bestimmt werden. Da davon ausgegangen wird, dass der Einfluss des genauen Wertes klein auf das Bewegungsverhalten des gesamten Shuttles ist, wird die Annahme getroffen, dass r_e das arithmetische Mittel von r und r_f ist.

In Tabelle 3.2 werden die Steifigkeitsparameter der V- und Flachrolle zusammengefasst.

Parameter	Beschreibung	Wert	Einheit
c_{FL}	Steifigkeit der Flachrolle	9,6447	MN/m
$r_{f FL} - r_{FL}$	Verschiebung der Flachrolle durch Kontakt	0,006221	mm
$r_{f FL} - r_{e FL}$	Differenz undeformierter zu eff. Rollradius	0,003115	mm
c_V	Steifigkeit der V-Rolle	6,8415	MN/m
$r_{f V} - r_V$	Verschiebung der V-Rolle durch Kontakt	0,00877	mm
$r_{f V} - r_{e V}$	Differenz undeformierter zu eff. Rollradius	0,004385	mm

Tabelle 3.2: Parameter Rollensteifigkeit

3.2.2 Rollendämpfung

In Abbildung 3.1 wird der Versuchsaufbau zur Ermittlung der Rollendämpfung dargestellt. Das Aluminiumpendel mit bekannten Masseigenschaften inklusive montierter Flachrolle wird aus einer Anfangshöhe $H1$ fallen gelassen. Beim Erreichen der horizontalen Lage trifft die Flachrolle auf der Führungsschiene auf. Das Pendel springt daraufhin zurück nach oben, erreicht dann den Punkt der zweiten Drehrichtungsumkehr in der Höhe $H2$, welche geringer ist als $H1$, da während des Kontaktes zwischen der Rolle und der Schiene Energie dissipiert wurde. Daraus kann die Dämpfungskonstante k_{FL} der Flachrolle bestimmt werden.

Der Versuch wurde mehrmals durchgeführt, um stochastische Einflüsse auf das Ergebnis zu reduzieren und ein gemittelt Verhältnis der Starthöhe $H1$ zur Rücksprunghöhe $H2$ zu erhalten. In Tabelle 3.3 sind die einzelnen Höhen, welche mittels Videoauswertung ermittelt werden, mehrerer Versuchsdurchführungen aufgelistet.

In Abbildung 3.2 wird das mechanische Ersatzmodell des Drehschwingers, welcher das Aluminiumpendel während des Kontaktes zwischen der Rolle und der Schiene darstellt,

H1 in mm	H2 in mm	H1/H2
100	27	3,704
68	17	4
150	38	3,947
38	12	3,167
60	18	3,333
	Durchschnitt	<u>3,63</u>

Tabelle 3.3: Auswertung des Versuchs zur Bestimmung der Rollendämpfung

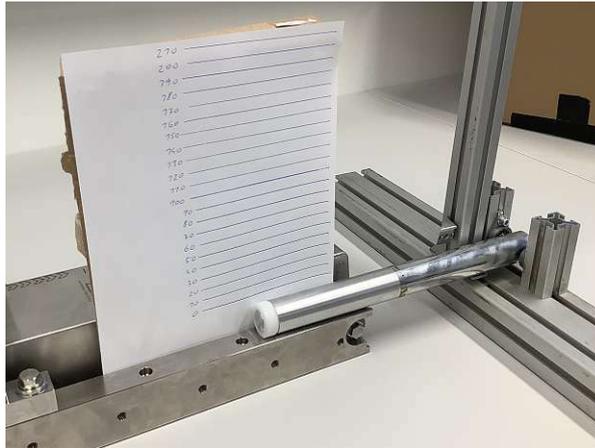


Abbildung 3.1: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Rollendämpfung

gezeigt. Das Massenträgheitsmoment J_D um den Drehpunkt D und die Länge L zwischen Dreh- und Kontaktpunkt des Pendels sind bekannte Größen. Ebenso wird die Steifigkeit c_{FL} der Flachrolle in Kapitel 3.2.1 bestimmt.

Das logarithmische Dämpfungsdekrement Λ eines Einfreiheitsgradschwingers bei einem Ausschwingversuch ist laut [5]

$$\Lambda = \frac{1}{n} \ln \left| \frac{q(t_k)}{q(t_k + nT)} \right|, \quad (3.8)$$

wobei $q(t_k)$ die Position des Schwingers zum Zeitpunkt t_k beschreibt und T für die Dauer einer Schwingungsperiode steht. Da der Kontakt der Flachrolle auf der Führung während des Aufpralls nur eine halbe Schwingungsperiode dauert, wird n , die Anzahl der vergangenen Perioden, gleich 0,5 gesetzt. Die Amplitude der Position des Schwingers ist proportional zur Amplitude der Geschwindigkeit, da bei linearisierter Betrachtung die kinetische Energie des Schwingers mit $\frac{J_D \dot{q}^2}{2I^2}$ und die Federenergie mit $\frac{c_{FL} q^2}{2}$ bestimmt werden kann und die beiden Energieformen während des Schwingvorgangs periodisch

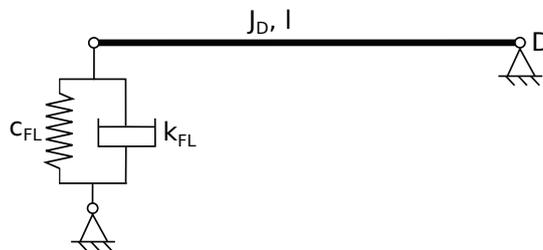


Abbildung 3.2: Mechanisches Ersatzmodell des Drehschwingers während des Kontaktes

ineinander übergeführt werden. Somit kann statt der aktuellen Positionsamplitude \hat{q} die Geschwindigkeitsamplitude $\hat{\dot{q}}$ verwendet werden. Da die Geschwindigkeit vor und nach dem Aufprall schwieriger zu messen ist als die Höhen, an welchen die Geschwindigkeit verschwindet, wird die Höhe zur Berechnung des Logarithmischen Dekrements verwendet. Bei einer reibungsfreien Betrachtung der Bewegung des Pendels, wird die kinetische Energie des Pendels nach dem Kontakt bis zum Verschwinden der Geschwindigkeit in potentielle Energie umgewandelt. Die Höhe geht linear in die Berechnung der potentiellen Energie ein, weshalb die Geschwindigkeit proportional zur Quadratwurzel der Höhe ist. Somit lässt sich das logarithmische Dämpfungsdekrement mit

$$\Lambda = \frac{1}{0,5} \ln \left| \sqrt{\frac{H1}{H2}} \right| = 1,289 \quad (3.9)$$

bestimmen. Nach [5] kann das Lehrsche Dämpfungsmaß D durch

$$D = \frac{\Lambda}{2\pi} \quad (3.10)$$

angegeben werden. Die Bewegungsgleichung des Drehschwingers mit Drehwinkel φ ergibt sich zu

$$J_D \cdot \ddot{\varphi} + k_{FL} l^2 \cdot \dot{\varphi} + c_{FL} l^2 \cdot \varphi = 0. \quad (3.11)$$

Mit bekanntem Lehrschen Dämpfungsmaß lässt sich daraus die gesuchte geschwindigkeitsproportionale Dämpfungskonstante der Flachrolle bestimmen:

$$k_{FL} = 2D \sqrt{\frac{c_{FL} J_D}{l^2}} = 516,92 \text{ Ns/m}. \quad (3.12)$$

Da bei diesem Versuch auch andere energiedissipierende Faktoren, wie zum Beispiel die Lagerreibung im Lagerpunkt D, wirken, wird das Ergebnis abgerundet und $k_{FL} = 500 \text{ Ns/m}$ im Modell verwendet.

Für die Bestimmung der Dämpfungskonstante k_V der V-Rolle wird angenommen, dass sich die Dämpfung proportional mit der Steifigkeit verhält. Damit ergibt sich diese zu

$$k_V = k_{FL} \cdot \frac{c_V}{c_{FL}}. \quad (3.13)$$

Nach dem Abrunden, aufgrund des gleichen Grundes wie bei der Flachrolle, wird $k_V = 350 \text{ Ns/m}$ festgelegt.

3.2.3 Reibeigenschaften

Bei der gewählten Modellierung der lateralen und longitudinalen Kräfte müssen der Reibungskoeffizient μ und die Schlupfsteifigkeit $c_p a^2$ für das Tire Brush Modell festgelegt werden. Da die V-Rolle im Gegensatz zur Flachrolle durch den Filz geschmiert wird und da sich die durchschnittlichen Normalkräfte unterscheiden, sind die Parameter μ und $c_p a^2$ unterschiedlich für die V- bzw. Flachrolle. Zur Bestimmung des Reibkoeffizienten für den Kontakt zwischen dem trockenen Rollenmaterial und der Führungsschiene wurde bei B&R eine tribometrische Untersuchung durchgeführt. Der daraus bestimmte Reibwert wird im Modell für die Flachrolle verwendet. Es liegt kein gemessener Wert für die geschmierte Materialpaarung vor, es wird jedoch angenommen, dass dieser deutlich niedriger ist. Eine Übersicht der Parameterwerte ist in Tabelle 3.4 zu finden.

Zur Bestimmung der Schlupfsteifigkeit wird, wie in Abbildung 3.3 dargestellt, gewählt, dass die Tangente an den Verlauf der Reibkraft F über den theoretischen Schlupf σ bei Nominalnormallast P_0 durch den Ursprung die maximale Reibkraft $F = \mu P$ bei zwei Prozent Schlupf erreichen soll. $2c_p a^2$ entspricht der Steigung dieser Tangente. Dafür muss

$$c_p a^2 = \frac{\mu P_0}{2 \cdot 0,02} \quad (3.14)$$

gelten. Für die Flachrolle wird die Nominalnormallast P_0 mit 60 Newton und für die V-Rolle mit $60\text{N} \cdot \sin(\alpha_{V \text{ oeff}}/2)$ festgelegt.

Parameter	Beschreibung	Wert	Einheit
μ_{FL}	Reibungskoeffizient Flachrolle auf Schiene	0,57	1
$c_p a^2_{\text{FL}}$	Schlupfsteifigkeit Flachrolle	855	N
μ_{V}	Reibungskoeffizient V-Rolle auf Schiene	0,1	1
$c_p a^2_{\text{V}}$	Schlupfsteifigkeit V-Rolle	106,1	N

Tabelle 3.4: Reibeigenschaften

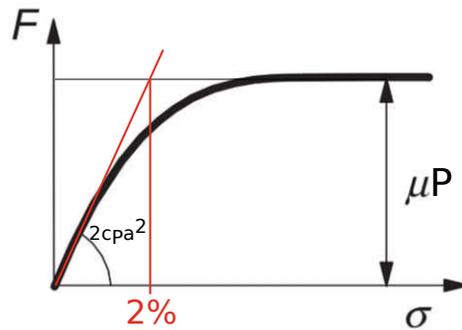


Abbildung 3.3: Schlupfkurve des Tire Brush Modells

3.3 Bewegungswiderstand

Der Versuchsaufbau, welcher zur Bestimmung der Parameter des Bewegungswiderstandes verwendet wird, ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Dabei wird der Innenring des Kugellagers der Rolle am unteren Sockel festgehalten, wobei sich die Rolle inklusive zusätzlicher Masse drehen lässt. Montiert ist zudem der Filz, dessen Anpresskraft an die V-Rolle durch eine Schraube variiert werden kann. Wird die Schraube gelockert bis kein Kontakt zwischen Rolle und Filz mehr besteht, können die Parameter der Flachrolle bestimmt werden, da der Aufbau der Lagerung bis auf den Filz identisch zu dem der V-Rolle ist.

Bei der Versuchsdurchführung wird die Masse mit bekanntem Massenträgheitsmoment J_B inklusive der Rolle mit Hilfe eines Akku-Bohrschraubers auf eine Winkelgeschwindigkeit von etwa zwanzig Umdrehungen pro Minute gebracht. Dies entspricht in etwa einer



Abbildung 3.4: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Bewegungswiderstandsparameter

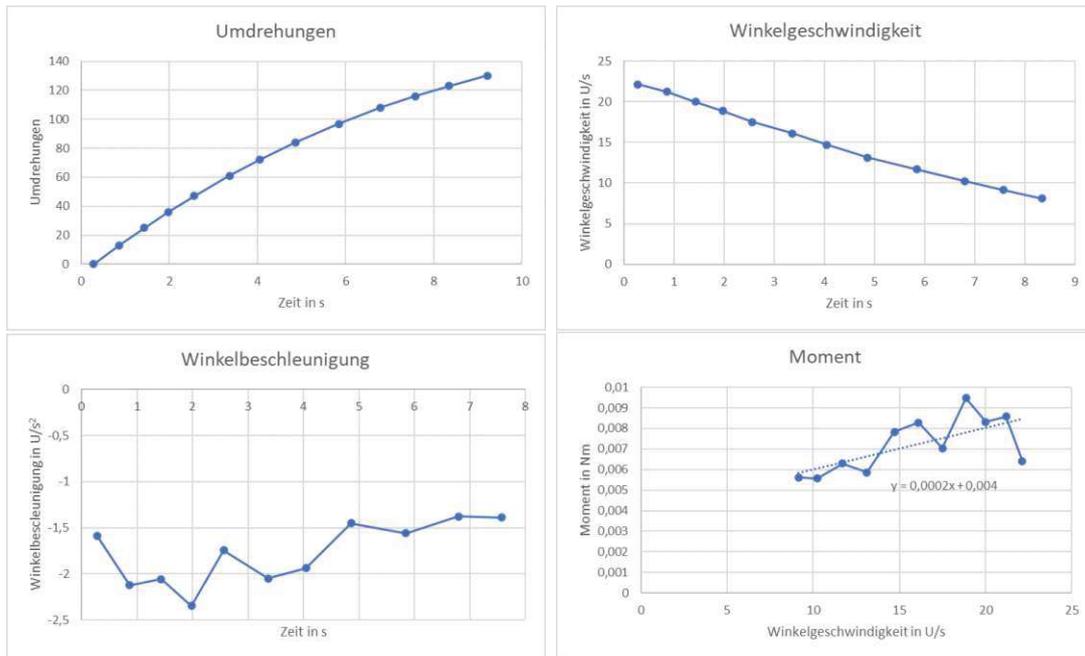


Abbildung 3.5: Auswertung Versuch Bewegungswiderstand Flachrolle

Fortbewegungsgeschwindigkeit des Shuttles von zwei Metern pro Sekunde, was ein im Betrieb üblicher Wert ist. Im Anschluss wird die Rolle beobachtet, bis sie ohne Antrieb zum Stillstand gekommen ist. Durch Videoauswertung wird die Winkelposition der Rolle zu diskreten Zeitpunkten erfasst und durch Bildung des Differenzenquotienten zwischen den Datenpunkten wird der Winkelgeschwindigkeitsverlauf bestimmt. Die Berechnung des Differenzenquotienten der Geschwindigkeitsdatenpunkte ergibt den Zeitverlauf der Winkelbeschleunigung der Rolle. Durch Anwendung des Drallsatzes lässt sich daraus der Betrag des Moments M bestimmen, welches reduzierend auf die Winkelgeschwindigkeit ω wirkt:

$$M = |\dot{\omega} \cdot J_B|. \quad (3.15)$$

Der Verlauf dieses Moments wird über die Winkelgeschwindigkeit in Abbildung 3.5 dargestellt. Wird daraus eine Regressionsgerade berechnet, lassen sich die Koeffizienten als Parameter für den Bewegungswiderstand im MKS Modell verwenden. Die Verschiebungskonstante der Gerade ist dabei der Parameter für den geschwindigkeitsunabhängigen Anteil des Bewegungswiderstandes c_1 und die Steigung der Gerade der Parameter für den geschwindigkeitsproportionalen Anteil c_2 .

Für die Bestimmung der Parameter des Bewegungswiderstandes der V-Rolle wurden mehrere Versuchsauswertungen mit verschiedenen Anpresskräften des Filzes durchge-

Parameter	Beschreibung	Wert	Einheit
$c_{1\text{ FL}}$	Bewegungswiderstand konstant Flachrolle	0,004	Nm
$c_{2\text{ FL}}$	Bewegungswid. geschwindigkeitsabh. FL	$3,18 \cdot 10^{-5}$	Nms/rad
$c_{1\text{ V}}$	Bewegungswiderstand konstant V-Rolle	0,0077	Nm
$c_{2\text{ V}}$	Bewegungswid. geschwindigkeitsabh. V	$1,118 \cdot 10^{-4}$	Nms/rad

Tabelle 3.5: Parameter Bewegungswiderstand

führt. Es ist anzunehmen, dass diese Kraft bei realen Shuttles unterschiedlich ausfällt. Für die Festlegung der Parameter für das Simulationsmodell wurde eine Versuchsauswertung mit mittlerer Anpresskraft und damit durchschnittlichem Reibmoment verwendet.

Tabelle 3.5 stellt eine Übersicht über die definierten Parameter zur Modellierung des Bewegungswiderstandes dar.

3.4 Drehgelenk Flachrollenaufnahme

Bei einer früheren Untersuchung von B&R wurde mittels FEA die Steifigkeit des Shuttlekörpers analysiert. Dabei wurde die Position der Magneteinheit des Shuttlekörpers fixiert. Die Belastung erfolgte an der realen Rollenposition für jede Rolle einzeln. Aus dem Verhältnis der daraus resultierenden Verschiebung der Rollenposition zur angreifenden Last lässt sich die Ersatzsteifigkeit der Rollenaufnahme bestimmen. Die Umrechnung dieser linearen Ersatzsteifigkeiten $c_{\text{FL } 1,2}$ zur Drehfedersteifigkeit c_{T} für das Kraftelement zwischen Hauptkörper und Flachrollenaufnahme im MKS Modell kann mit

$$c_{\text{T}} = (c_{\text{FL } 1} + c_{\text{FL } 2}) \cdot \left(\frac{X_{\text{FL}}}{2} \right)^2 = 840 \text{Nm} \quad (3.16)$$

erfolgen.

Die Bewegungsgleichung der Flachrollenaufnahme bei festgehaltenem Shuttlehauptkörper ergibt sich zu

$$I_{zz\text{ FLauf}} \cdot \ddot{\varphi} + k_{\text{T}} \cdot \dot{\varphi} + c_{\text{T}} \cdot \varphi = 0, \quad (3.17)$$

wobei φ den Verdrehwinkel zwischen den beiden Körpern darstellt. Nach [11] kann das Lehrsche Dämpfungsmaß D von kontinuierlichen Metallstrukturen mit 0,03 angenommen

werden. Somit wird mit

$$k_T = 2D\sqrt{I_{zz \text{ FL auf}} \cdot c_T} = 0,005226\text{Nms} \quad (3.18)$$

die geschwindigkeitsproportionale Drehdämpfungs-konstante k_T der Verbindung zwischen Hauptkörper und Flachrollenaufnahme bestimmt.

3.5 Magnetkräfte

In [6], einer Analyse der magnetischen Kräfte von B&R, wird der Wert der Parameter k_x und k_y , welche den Einfluss von Luftspaltänderungen auf die Magnetkraft in X- bzw. Y-Richtung beziffern, bestimmt. Zu diesem Zweck wurde ein zweidimensionales Modell der für die Magnetkräfte relevanten Komponenten aufgebaut. Damit wurden Simulationen mit unterschiedlichen Werten für den Luftspalt durchgeführt und so k_x und k_y berechnet. Für den Parameter k_z , welcher den Einfluss von Luftspaltänderungen auf die Magnetkraft in Z-Richtung angibt, gibt es bis zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit keinen berechneten Wert. Dieser wird für das MKS Modell als Durchschnitt von k_x und k_y festgelegt, da angenommen wird, dass der Einfluss des genauen Wertes auf die Bewegung des Shuttles vernachlässigbar ist. Ebenso gibt es keine bestimmten Werte für den Einfluss von Luftspaltänderungen auf die magnetischen Momente, weshalb hierfür die gleichen Parameter wie für die Kräfte verwendet werden. In Tabelle 3.6 werden die Parameter für die Simulation der Magnetkräfte angegeben.

Parameter	Beschreibung	Wert	Einheit
k_x	Luftspalteinfluss auf Magnetkraft in X-Richtung	0,22	1/mm
k_y	Luftspalteinfluss auf Magnetkraft in Y-Richtung	0,36	1/mm
k_z	Luftspalteinfluss auf Magnetkraft in Z-Richtung	0,29	1/mm

Tabelle 3.6: Parameter Magnetkräfte

4 Validierung des Simulationsmodells

Im Zuge der Modellvalidierung wird das Modell mit dem realen Shuttle verglichen und so die prinzipielle Funktionsweise des Modells überprüft. Zudem wird die Plausibilität des Modells analysiert.

4.1 Summe der Normalkräfte

Auf das Shuttle wirkt eine magnetische Anziehungskraft in Y-Richtung. Bei der Fahrt auf einem Geradensegment wird das Shuttle durch die Normalkräfte auf den Führungsschienen abgestützt. Alle dieser Kräfte unterliegen, aufgrund der Abstände zwischen den Eisenkernen, Schwankungen, jedoch muss die Summe der Anteile der Normalkräfte in Y-Richtung im Mittel gleich groß sein wie der gemittelte Wert der Magnetkraft in diese Richtung, da es sich sonst um keine Geradeausfahrt handeln könnte.

In Abbildung 4.1 werden die Zeitverläufe der Normalkräfte aller Rollen normalisiert bezüglich der gemittelten magnetischen Kraft in Y-Richtung dargestellt. Betragsmäßig am größten sind dabei die Normalkräfte auf die Flachrollen, was plausibel ist, da sie nicht auf eine obere und eine untere Auflagefläche, wie bei den V-Rollen, aufgeteilt werden. Auffällig ist zudem, dass die Normalkräfte der V-Rollen der unteren Auflageflächen größer sind als die der oberen. Diese Differenz tritt auf, da die Gravitation nach unten wirkt und das Shuttle dadurch gegen ein Abgleiten nach unten abgestützt ist. Weiters wirkt eine Magnetkraft positiv in die Z-Richtung, da die Permanentmagnete im Shuttle zu den Eisenkernen des Segmentes in Z-Richtung verschoben sind.

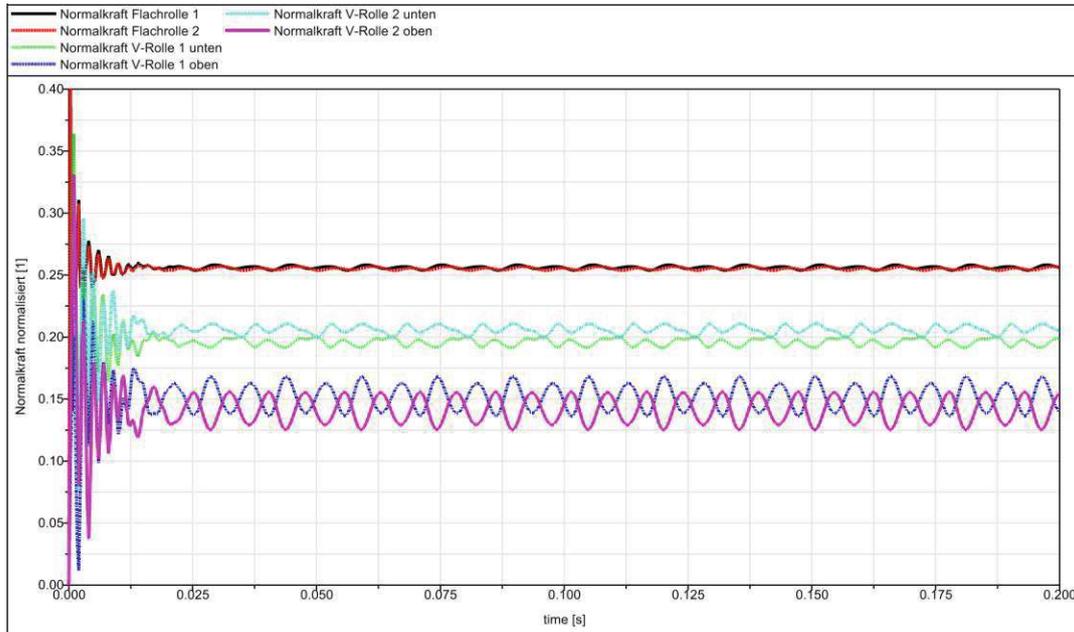


Abbildung 4.1: Normalkräfte der Rollen

Um den Anteil der Normalkräfte der V-Rollen in Y-Richtung zu erhalten, müssen diese mit $\sin(\alpha_{V\text{ oeff}}/2)$ multipliziert werden. Die Summe der Anteile der gemittelten normierten Normalkräfte in Y-Richtung ergibt sich damit zu 0,996. Damit ist dieser Wert sehr nahe an der Magnetkraft in Y-Richtung.

Wird die Summe der Differenzen der gemittelten Normalkräfte der V-Rollen zwischen oben und unten mit $\cos(\alpha_{V\text{ oeff}}/2)$ multipliziert, ist das Ergebnis sehr nahe an der Summe der Gewichtskraft des Shuttles und der gemittelten magnetischen Kraft in Z-Richtung.

Damit sind die mittels MKS Simulation ermittelten Normalkräfte plausibel und nachvollziehbar.

4.2 Ausrollversuch

Zur Validierung der Implementierung des Bewegungswiderstandes wird ein Ausrollversuch durchgeführt. Bei B&R wurde durch Messungen am Realsystem eine Abschätzformel für den gesamten Bewegungswiderstand $F_{W\text{ ges}}$, bei einer Fortbewegungsgeschwin-

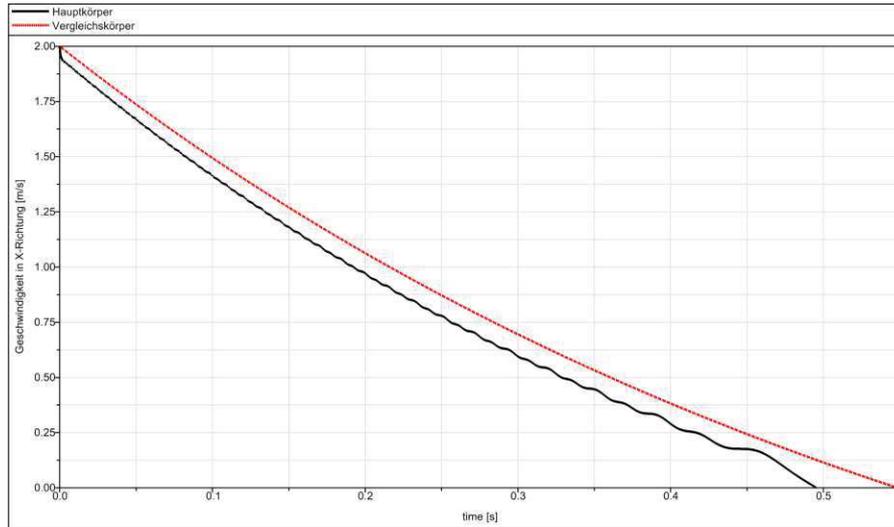


Abbildung 4.2: Ergebnisse Ausrollversuch

digkeit V des Shuttles, ermittelt:

$$F_{W \text{ ges}} = 1,5\text{N} + 1,05\text{Ns/m} \cdot V. \quad (4.1)$$

Für den Abgleich des Modells mit dieser Abschätzformel wird ein Vergleichsmodell aufgebaut. Dieses besteht aus einem Starrkörper mit der Masse des gesamten Shuttles, welcher sich in eine Richtung translatorisch bewegen kann, und einer Kraft, welche gemäß Gleichung 4.1 auf den Körper wirkt.

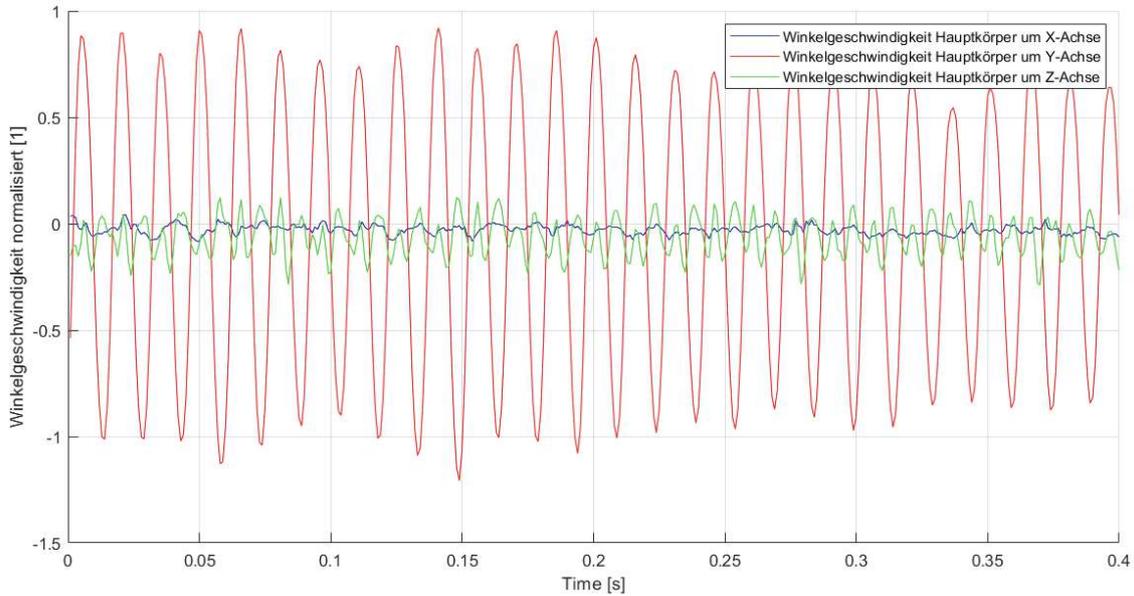
Die gleiche Startgeschwindigkeit, hier mit zwei Metern pro Sekunde gewählt, wird für das Shuttlemodell und das Vergleichsmodell vorgegeben. Für diese Simulation wird die Antriebskraft im Shuttlemodell deaktiviert. Abbildung 4.2 zeigt die simulierten Geschwindigkeiten der beiden Modelle im Zeitverlauf. Kurz nach Simulationsstart fällt die Geschwindigkeit des Shuttlemodells nahezu sprunghaft ab, da die Rollen in Drehung versetzt werden und es zu Reibverlusten kommt. Dieses Verhalten ist plausibel, jedoch im Vergleichsmodell nicht zu sehen, da die Abschätzformel des Bewegungswiderstandes für die Bewegung mit bereits drehenden Rollen gilt. Im weiteren Zeitverlauf fällt die Geschwindigkeit des Shuttlemodells ähnlich, jedoch etwas schneller ab, als die des Vergleichsmodells. Werden die Momente, welche im Shuttlemodell zur Implementierung des Bewegungswiderstandes dienen, zu einer resultierenden Kraft $F_{W \text{ Modell}}$ umgerechnet, so ergibt sich diese zu

$$F_{W \text{ Modell}} = 1,56\text{N} + 1,27\text{Ns/m} \cdot V. \quad (4.2)$$

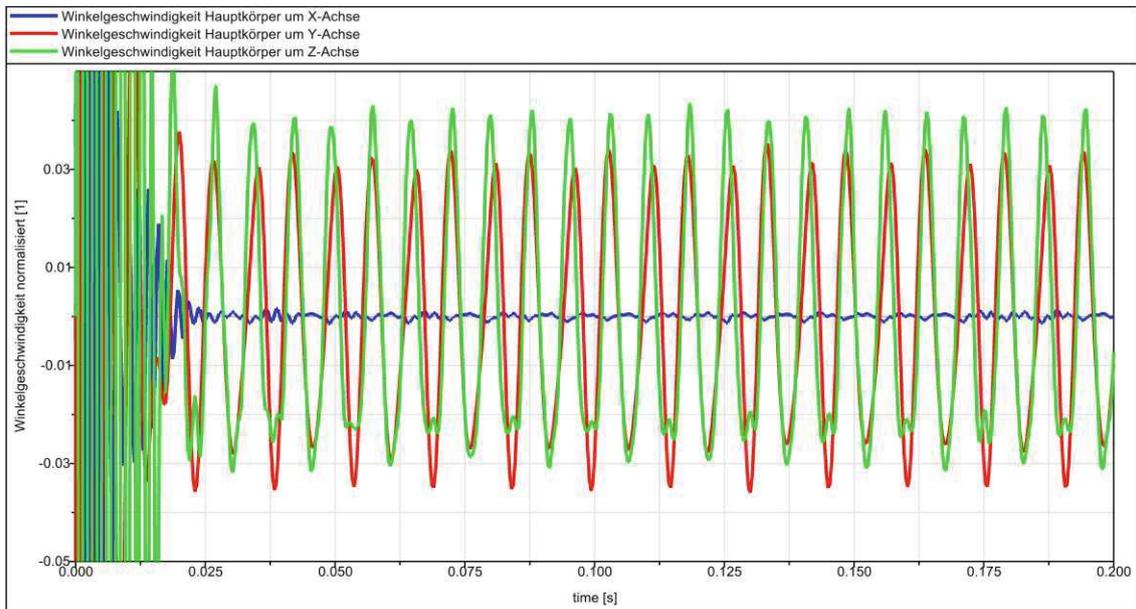
Die Werte der Parameter in Gleichung 4.2 sind größer als in Gleichung 4.1, was den langsameren Abfall der Geschwindigkeit des Vergleichsmodells begründet. Da es sich bei Gleichung 4.1 um eine Abschätzformel handelt, wird der Unterschied im Abfall der Geschwindigkeit akzeptiert und das Ergebnis des Ausrollversuches als plausibel beurteilt.

4.3 Vergleich mit Messdaten

Bei B&R wurde mit einem Diagnoseshuttle eine Messung der Mikrobewegungen des Shuttles durchgeführt. Dieses Diagnoseshuttle ist unter anderem mit einer inertialen Messeinheit ausgestattet, welche die Messung der Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten in alle drei Raumrichtungen ermöglicht, wobei der Shuttlekörper weitestmöglich unverändert bleibt. Die hier zur Validierung verwendete Messung wurde auf einem geraden Segmentstück mit einer Geschwindigkeit von einem Meter pro Sekunde als Regelziel durchgeführt. Abbildung 4.3(a) zeigt den Zeitverlauf der gemessenen Winkelgeschwindigkeit des Hauptkörpers in die drei Raumrichtungen normalisiert. Zum Vergleich der MKS Simulation und der Messung wird eine Simulation mit einer Startgeschwindigkeit von einem Meter pro Sekunde durchgeführt, wobei die Masseeigenschaften der Zuladung im MKS Modell so definiert werden, dass sie die Masse aller Sensoren am Diagnoseshuttle simulieren. Das Simulationsergebnis der Winkelgeschwindigkeiten des Hauptkörpers um alle Raumrichtungen wird in Abbildung 4.3(b) normalisiert dargestellt. Beim Vergleichen der Simulation mit der Messung kann erkannt werden, dass die gemessene und die simulierte Drehbewegung um die X-Achse ähnlich kleine Amplituden aufweisen. Die simulierte Winkelgeschwindigkeit um die Z-Achse zeigt kleinere Amplituden als die gemessene, die Periodendauer ist hingegen mit 0,0075 Sekunden gleich. Bei der Betrachtung der Verläufe der Winkelgeschwindigkeit um die Y-Achse werden größere Unterschiede deutlich. Zum einen ist die Amplitude der Messung signifikant größer als die der Simulation und zum anderen ist die Periodendauer der Messung die doppelte der Simulation. Die Ursache für diese Unterschiede könnte sein, dass im MKS Modell der Einfluss des Reglers nicht berücksichtigt und die Lagerung der V-Rollen als starr angenommen wird. Dass die Steifigkeit einen Einfluss auf die Amplitude und die Eigenfrequenz der Drehbewegung des Shuttles um die Y-Achse hat, wird in Kapitel 6.4 und 6.5 gezeigt. Eine flexible Modellierung der V-Rollenlagerung und das Miteinbeziehen des Reglers könnte in einer zukünftigen Untersuchung erfolgen.



(a) Messergebnisse der Winkelgeschwindigkeiten des Hauptkörpers



(b) Simulierte Winkelgeschwindigkeiten des Hauptkörpers

Abbildung 4.3: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Winkelgeschwindigkeit

5 Ergebnisse

Nach abgeschlossener Modellbildung wird mit den in Kapitel 3 definierten Parametern die MKS Simulation der Bewegung des Shuttles auf den Führungsschienen durchgeführt. Zusätzlich wird eine Startgeschwindigkeit von einem Meter pro Sekunde gewählt. Nachfolgend wird eine Auswahl der Simulationsergebnisse vorgestellt.

5.1 Geschwindigkeit

Abbildung 5.1 zeigt den Verlauf der Geschwindigkeit in X-Richtung des Körperreferenzkoordinatensystems des Hauptkörpers über die Zeit. Zum Startzeitpunkt der Simulation beträgt die Geschwindigkeit, wie definiert, einen Meter pro Sekunde. Danach fällt sie stark ab, da die vier Rollen beschleunigt werden und es dabei zu Reibverlusten kommt. Die dafür benötigte Energie reduziert die kinetische Energie des Shuttlekörpers. Nach einer kurzen Einschwingphase stellt sich ein periodischer Geschwindigkeitsverlauf ein. Diese Schwankung der Geschwindigkeit resultiert aus der periodischen Magnetkraft in X-Richtung, welche das Shuttle periodisch beschleunigt und abbremst. Die Periodendauer der Geschwindigkeitsschwankung beträgt in etwa 0,015 Sekunden. Bei einer Geschwindigkeit von ca. einem Meter pro Sekunde bedeutet das, dass sich der Verlauf der Geschwindigkeit bei einer Fortbewegung um 15 Millimeter wiederholt. Dies muss so sein, da auch die Eisenkerne alle 15 Millimeter periodisch angeordnet sind. Zusätzlich sind auch Zwischenkerne, welche sich um 7,5 Millimeter versetzt zu den Hauptkernen befinden, im Segment verbaut. Die Geschwindigkeitsschwankung mit doppelter Frequenz, welche in Abbildung 5.1 zu sehen ist, resultiert daraus. Die Antriebskraft gleicht den Bewegungswiderstand aus, was eine makroskopisch konstante Geschwindigkeit zur Folge hat.

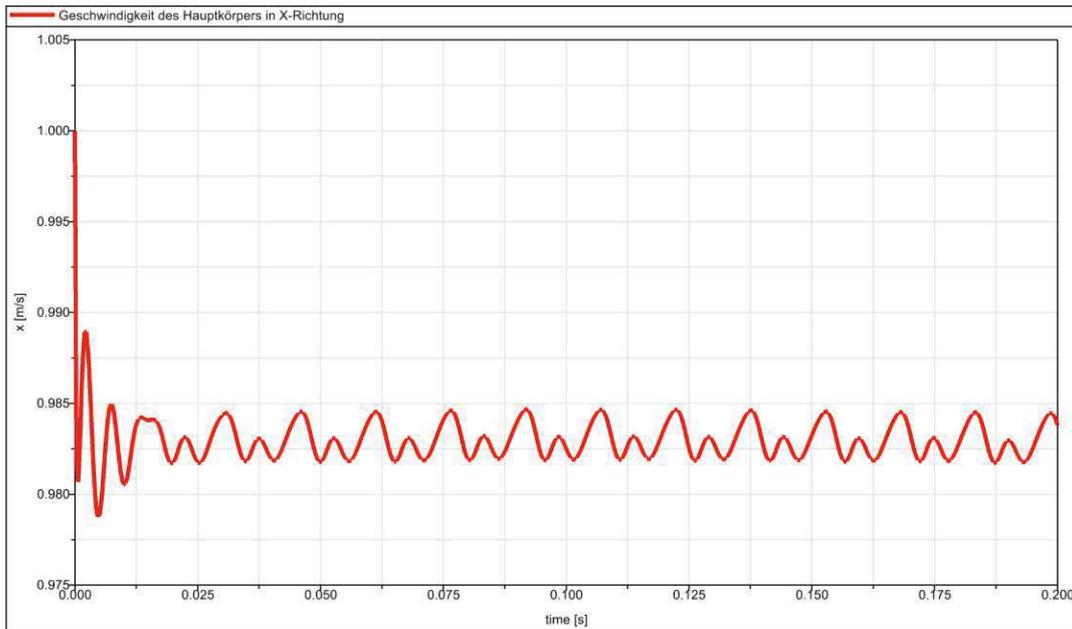


Abbildung 5.1: Geschwindigkeit des Hauptkörpers in X-Richtung

5.2 Winkelposition Shuttle

Der Zeitverlauf der Winkelposition des Hauptkörpers um die drei Raumachsen wird in Abbildung 5.2 dargestellt. Für den Drehwinkel um die X-Achse stellt sich nach dem Einschwingen ein nahezu konstanter positiver Wert ein. Grund dafür ist die größere Verformung in Y-Richtung der V-Rollen im Vergleich zu den Flachrollen. Die größte Amplitude der drei Kurven ist im Zeitverlauf der Winkelposition um die Y-Achse zu finden. Diese verhält sich, ähnlich zur Geschwindigkeit, periodisch mit einer Periodendauer von etwa 0,015 Sekunden. Zusätzlich ist ein Anteil mit einer Periodendauer von 0,0075 Sekunden zu erkennen. Diese Drehbewegung resultiert vor allem aus der Magnetkraft in X-Richtung, deren Kraftangriffspunkt nicht mit dem Massenmittelpunkt des Shuttles inklusive Zuladung übereinstimmt und somit als anregendes Moment um die Y-Achse auf das Shuttle wirkt. Das magnetische Moment um die Z-Achse, welches im Vergleich zu den anderen Magnetmomenten eine deutlich größere Amplitude aufweist, führt zu dem periodischen Verlauf der Winkelposition des Shuttles um die Z-Achse.

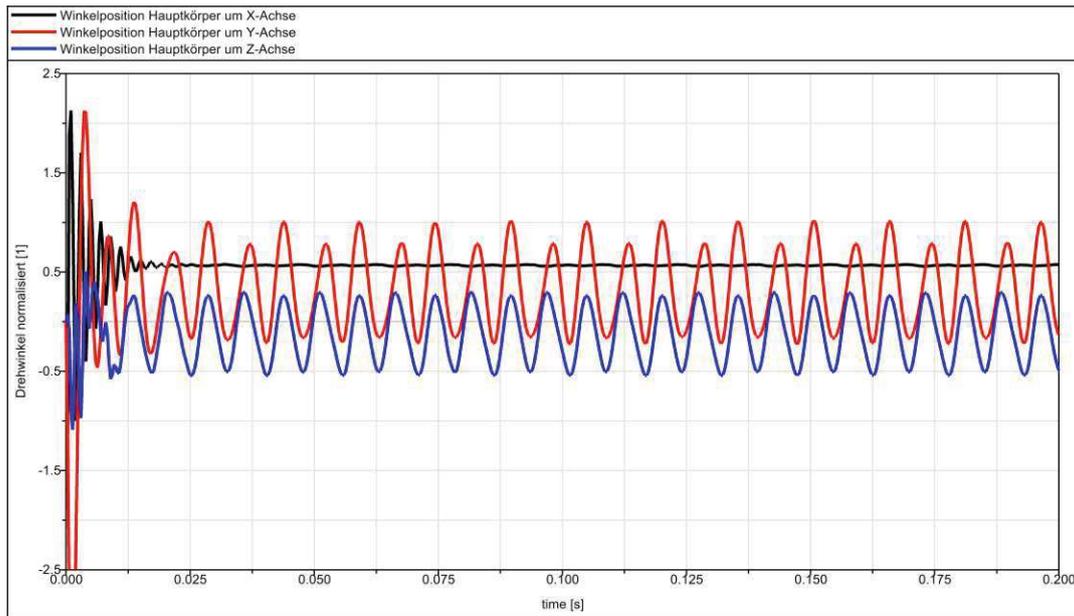
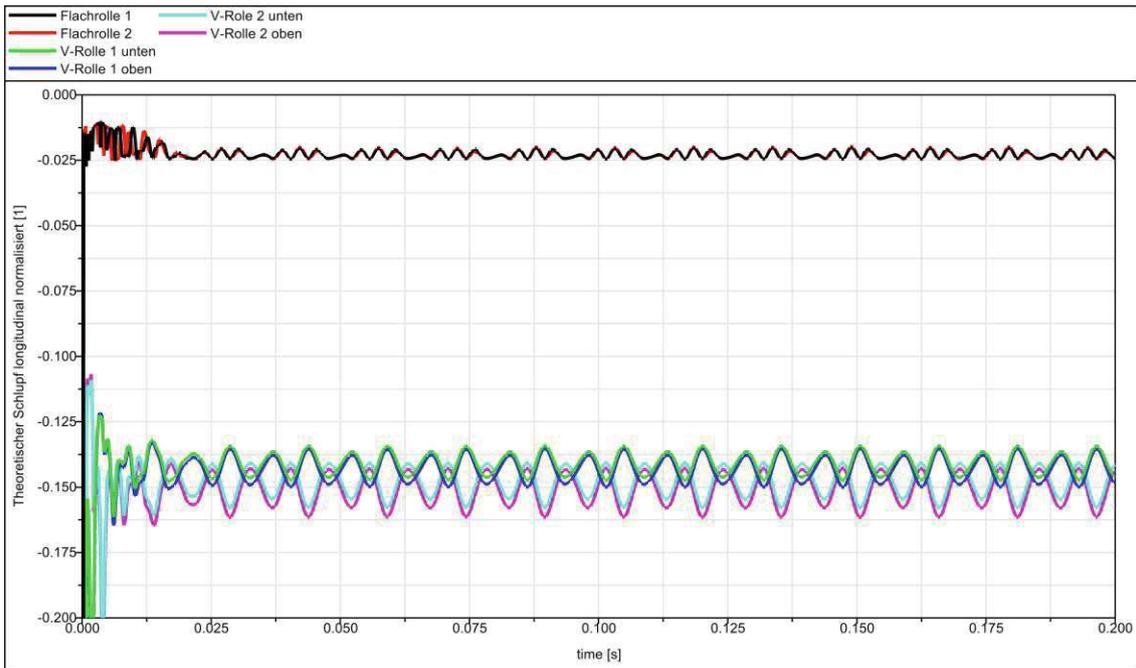


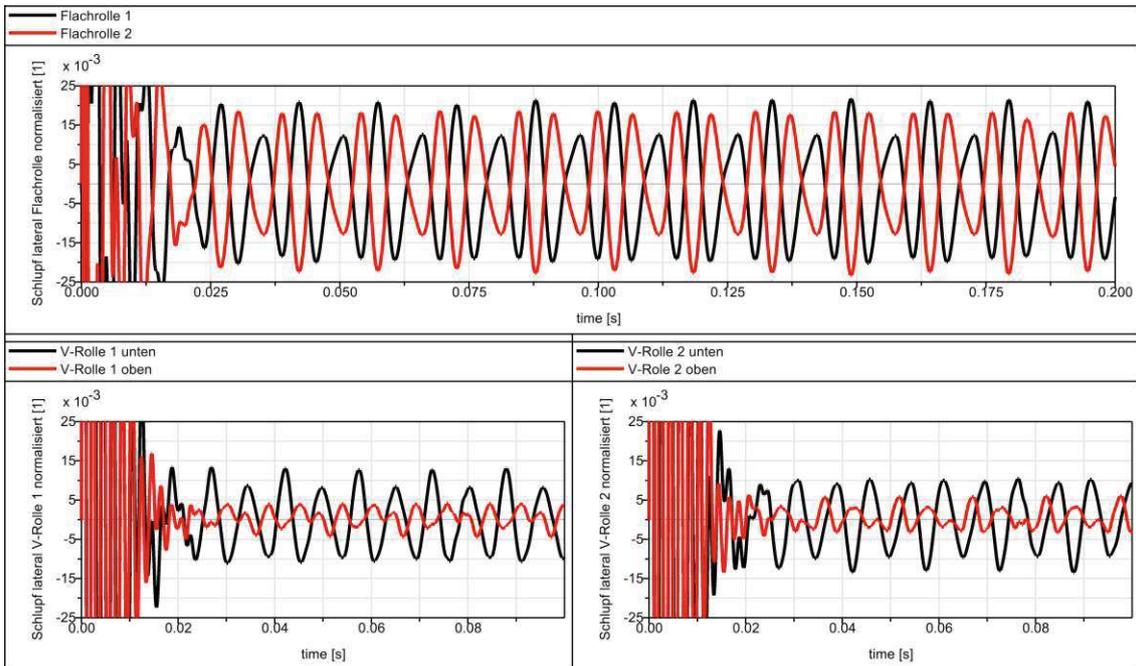
Abbildung 5.2: Winkelposition des Shuttlehauptkörpers

5.3 Schlupf

Der Verlauf des Schlupfes κ in longitudinaler Richtung über die Zeit wird in Abbildung 5.3(a) normalisiert für alle Kontaktflächen der Rollen dargestellt. Das Auftreten von longitudinalem Schlupf ist durch den implementierten Bewegungswiderstand als bremsendes Moment zwischen den Rollen und dem Shuttlekörper begründet. Durch den vorhandenen longitudinalen Schlupf wird eine longitudinale Kraft auf die Rollen aufgebracht, welche entgegen dem Bewegungswiderstand wirkt. Da die translatorische Geschwindigkeit des Hauptkörpers schwankt, schwankt auch die Winkelgeschwindigkeit der Rollen, somit ebenfalls der geschwindigkeitsabhängige Teil des Bewegungswiderstandes und damit wiederum der longitudinale Schlupf. Um die Winkelgeschwindigkeit und damit den Drehimpuls der Rollen analog zur translatorischen Hauptkörpergeschwindigkeit zu verändern, braucht es ebenfalls eine longitudinale Kraft und somit longitudinalen Schlupf. Der Betrag dieser Kraft ist jedoch in Relation zur benötigten Kraft zur Überwindung des Bewegungswiderstandes von untergeordneter Größenordnung. Der longitudinale Schlupf der Flachrollen ist kleiner als der der V-Rollen, da die Werte der Parameter des Bewegungswiderstandes bei den Flachrollen kleiner sind als bei den V-Rollen. Zusätzlich ist der Reibwert der Flachrollen größer, wodurch die Schlupfsteifigkeit erhöht wird und dadurch weniger Schlupf für die gleiche longitudinale Kraft benötigt wird.



(a) Schlupf longitudinal κ



(b) Schlupf lateral $\tan \alpha$

Abbildung 5.3: Schlupf der Rollen

In Abbildung 5.3(b) werden die zeitlichen Verläufe der lateralen Schlüpfen $\tan \alpha$ normalisiert dargestellt. Lateraler Schlupf tritt auf, da sich das Shuttle während der Fortbewegung in X-Richtung um die Y-Achse verdreht und sich dadurch eine laterale Bewegung der Rolle ergibt. Der Betrag des lateralen Schlupfes der Flachrollen ist größer als der der V-Rollen, da der Drehpunkt des Shuttlekörpers näher an den V-Rollen liegt. Durch den lateralen Schlupf werden laterale Kräfte erzeugt, welche bremsend auf die Drehbewegung um die Y-Achse wirken, indem sie entgegengesetzt auf die linken Rollen (1) und die rechten Rollen (2) wirken.

6 Parametervariationen

Um den Einfluss auf die Lebensdauer des ACOPOStrak Transportsystems zu ermitteln, werden Parametervariationen durchgeführt. Dafür werden einzelne Parameter abgeändert, während die restlichen wie in Kapitel 3 definiert bleiben. Bis auf die in Kapitel 6.5 beschriebenen Simulationen bleibt auch die Startgeschwindigkeit mit einem Meter pro Sekunde festgelegt. Die resultierenden Ergebnisse mit unterschiedlichen Parametern werden verglichen und diskutiert. Besonderer Augenmerk wird auf die Größen gelegt, welche relevant für den Abrieb und somit für die Lebensdauer sind. Nach [1] sind das in diesem Anwendungsfall die Normalkraft und der Schlupf der Rollen. Eine Reduktion der Normalkraft ist praktisch jedoch nur durch eine Reduktion der Magnetkräfte möglich. Dies hat zur Folge, dass die transportierbare Masse reduziert wird, was nicht wünschenswert ist, da es die Aufgabe des Systems ist, die Fortbewegung von Zuladung zu ermöglichen. Somit wird das Augenmerk auf die Reduktion des Schlupfes der Rollen gelegt.

6.1 Mit oder ohne Filz

Der erste Vergleich wird zwischen einem Shuttle mit montierten Filzen an den V-Rollen und einem ohne Filze durchgeführt. Durch das Weglassen des Filzes erhöht sich der Reibwert μ_V der V-Rollen auf den der Flachrollen, da die Schmierung wegfällt. Zudem reduzieren sich die Parameter c_{1V} und c_{2V} der V-Rollen zur Implementierung des Bewegungswiderstandes auf den Wert der Parameter der Flachrollen, da die Reibung des Filzes an den V-Rollen wegfällt.

In Abbildung 6.1 wird der Verlauf des longitudinalen Schlupfes κ für die untere Seite

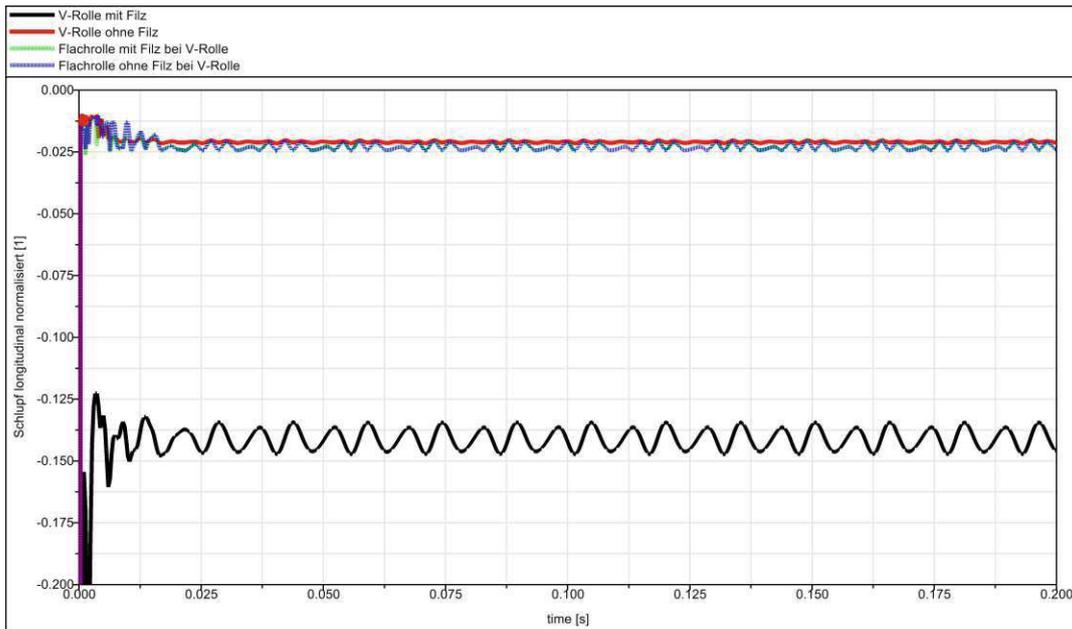


Abbildung 6.1: Vergleich des longitudinalen Schlupfes mit und ohne Filz

einer V-Rolle und für eine Flachrolle jeweils mit und ohne montiertem Filz an den V-Rollen normalisiert über die Zeit dargestellt. Es zeigt sich, dass der longitudinale Schlupf der V-Rolle ohne den Filz auf das Niveau des Schlupfes der Flachrolle reduziert wird. Grund dafür ist zum einen das reduzierte Moment des Bewegungswiderstandes, wodurch eine geringere longitudinale Kraft auf die Rolle notwendig wird. Zum anderen wird die benötigte Kraft durch den höheren Reibwert ohne Filzschmierung und damit einhergehender höherer Schlupfsteifigkeit bereits bei geringerem Schlupf erreicht. Der Schlupf der Flachrolle ändert sich hingegen nicht. Der reduzierte Schlupf der V-Rollen ohne Filz lässt vermuten, dass der Abrieb und damit die Lebensdauer durch das Weglassen des Filzes positiv beeinflusst werden. In dieser Arbeit wird jedoch nicht untersucht, ob dieser positive Effekt durch die fehlende abreibungsmindernde Wirkung der Schmierung wieder aufgehoben, oder dadurch gar die Lebensdauer verkürzt wird.

Ein montierter Filz an den V-Rollen hat weiters zur Folge, dass die longitudinale Kraft auf die V-Rollen größer ist als die auf die Flachrollen, was eine zusätzliche, konstante Verdrehung des Shuttles um die Y-Achse bewirkt. Der Betrag dieser Verdrehung ist in etwa halb so groß wie die Amplitude der periodischen Verdrehung um die Y-Achse, welche durch die Periodizität der magnetischen Kräfte verursacht wird. Ohne Filz entfällt diese konstante Verdrehung, da die longitudinalen Kräfte auf die V- und Flachrollen gleich groß sind.

6.2 Luftspalt

Für die Untersuchung des Luftspalteinflusses werden die Simulationsergebnisse mit den Standardparametern mit Simulationen verglichen, in welchen der Luftspalt um $\pm 0,2$ Millimeter verändert wird. Eine Verringerung des Luftspaltes hat eine Erhöhung aller magnetischen Kräfte und Momente zur Folge. Die höhere Kraft in X-Richtung bewirkt eine größere Amplitude der Drehbewegung um die Y-Achse, was wiederum zu erhöhtem lateralen Schlupf führt. Eine höhere Kraft in die Y-Richtung führt zu höheren Normalkräften an allen Rollen. Ein größerer Luftspalt hat die gegenteiligen Effekte. Aus diesen Ergebnissen kann der Schluss gezogen werden, dass sich die Erhöhung des Luftspaltes positiv auf die Lebensdauer auswirken könnte. Die praktische Umsetzung dieser Änderung wäre jedoch nicht zielführend, da dadurch die maximale Masse der Zuladung, die maximale Geschwindigkeit bei der Bewegung auf einem Kurvenssegment und die erreichbare Beschleunigung verringert werden würde.

6.3 Breite des Shuttles

Der Einfluss der Breite des Shuttles wird analysiert, indem drei Simulationen mit unterschiedlichen Abständen in X-Richtung der Rollen durchgeführt und miteinander verglichen werden. Die Abstände werden mit 30, 50 bzw. 70 Millimeter festgelegt. Eine dreidimensionale Darstellung der Modelle mit unterschiedlichen Breiten ist in Abbildung 6.2 zu finden. In Abbildung 6.3 wird der normalisierte Zeitverlauf der Winkelposition um

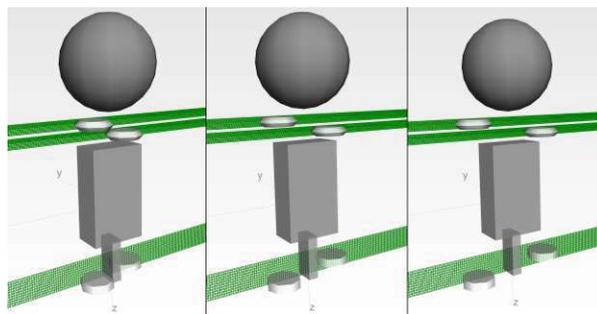


Abbildung 6.2: Dreidimensionale MKS Modelle des Shuttles mit unterschiedlichen Breiten

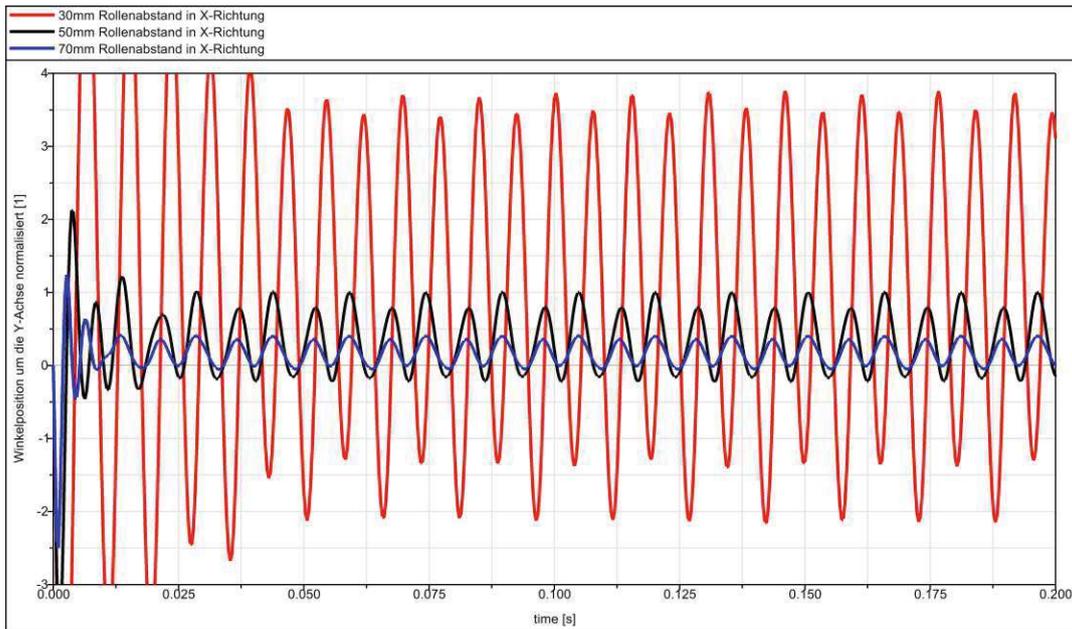


Abbildung 6.3: Vergleich der Drehbewegung um die Y-Achse bei verschiedenen Shuttlebreiten

die Y-Achse für die unterschiedlich breiten Shuttlemodelle gezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Amplitude der Drehbewegung um die Y-Achse abnimmt, wenn die Rollenabstände zunehmen. Daraus resultiert wiederum ein geringerer lateraler Schlupf aller Rollen bei größeren Rollenabständen.

Dieser Analyse zufolge würde ein größerer Abstand in X-Richtung zwischen den beiden V- und den beiden Flachrollen einen positiven Effekt auf die Lebensdauer zur Folge haben. Es muss jedoch angemerkt werden, dass die Umsetzung dieser Änderung verhältnismäßig aufwändig ist, da dies eine Neukonstruktion des Shuttlekörpers notwendig machen würde. Zudem würde sich der Verlauf des Luftspaltes im Bereich der Kurve ändern.

6.4 Steifigkeit der V-Rollen

Die Geometrie der V-Rollen in Kombination mit der Magnetkraft in Y-Richtung ist verantwortlich, dass sich das Shuttle makroskopisch betrachtet nicht um die Y-Achse verdrehen und in Z-Richtung verschieben kann. Somit ist von Interesse, welchen Ein-

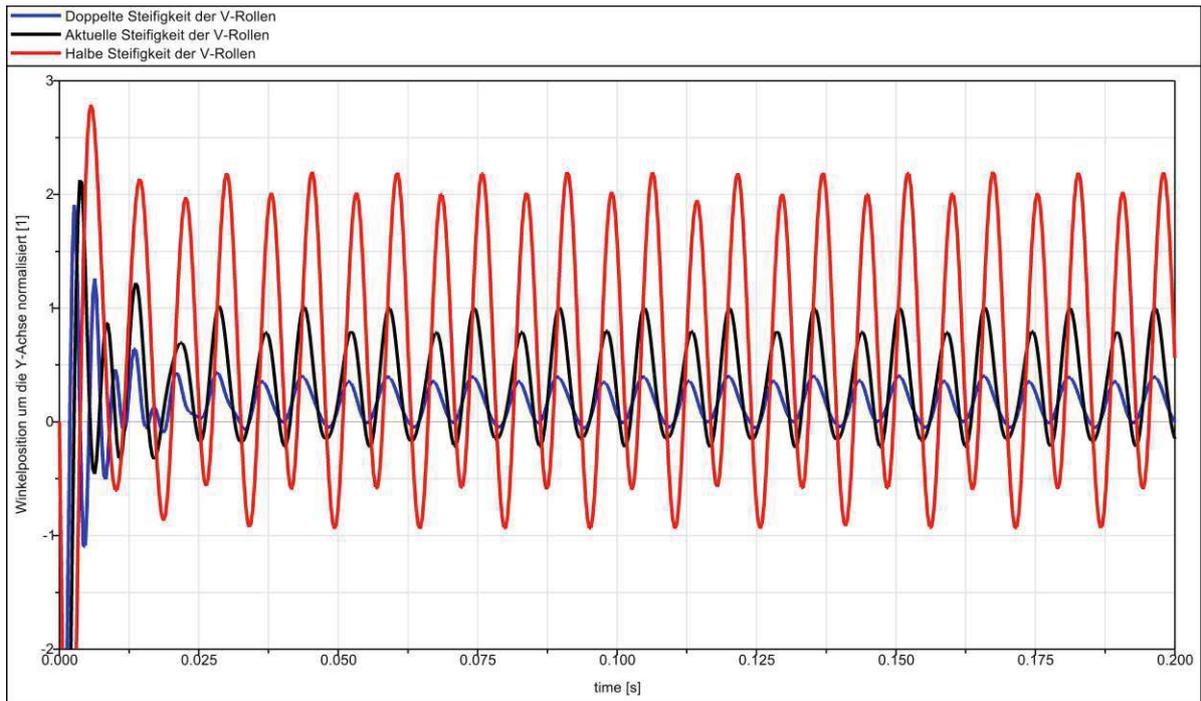


Abbildung 6.4: Vergleich der Drehbewegung um die Y-Achse bei unterschiedlichen Steifigkeiten der V-Rollen

fluss die Steifigkeit der V-Rollen auf die Bewegung des Shuttles hat. Zu diesem Zweck werden drei Simulationen durchgeführt, wobei die Steifigkeit der V-Rollen in der ersten Simulation den aktuellen Wert, bei der zweiten die Hälfte davon und bei der dritten die doppelte Steifigkeit zugewiesen bekommt.

In Abbildung 6.4 werden die Verläufe der Winkelpositionen der drei simulierten Shuttles um die Y-Achse normalisiert über die Zeit dargestellt. Daraus kann festgestellt werden, dass bei einer Startgeschwindigkeit von einem Meter pro Sekunde eine Verdoppelung der Steifigkeit der V-Rollen die Drehbewegungsamplitude um die Y-Achse deutlich reduziert. Eine Halbierung der Steifigkeit hat den gegenteiligen Effekt. Da die Drehbewegung um die Y-Achse lateralen Schlupf zur Folge hat, kann daraus geschlossen werden, dass eine Erhöhung der Steifigkeit der V-Rollen eine Reduktion des Abriebes ergeben sollte.

Eine Möglichkeit zur Steifigkeitserhöhung der realen V-Rolle kann die Verwendung eines Materials mit höherem Elastizitätsmodul darstellen. Eine andere wäre, die Dicke der Rolle zu reduzieren, indem der Außendurchmesser der V-Rollen gleich bleibt, jedoch Kugellager mit größerem Außendurchmesser verbaut werden.

6.5 Geschwindigkeit

Um den Einfluss der Fortbewegungsgeschwindigkeit des Shuttles auf dessen Bewegung zu analysieren, wird die Simulation mit unterschiedlichen Startgeschwindigkeiten durchgeführt. Bei der Betrachtung der Simulationsergebnisse fällt auf, dass der longitudinale Schlupf steigt, je größer die Fortbewegungsgeschwindigkeit ist. Dies ist begründet durch den Umstand, dass das Moment des Bewegungswiderstandes mit steigender Winkelgeschwindigkeit der Rollen wächst und dadurch eine größere longitudinale Kraft notwendig ist. Für eine Steigerung der Lebenserwartung erscheint es daher sinnvoll, die Fortbewegungsgeschwindigkeit zu reduzieren. Hier muss angemerkt werden, dass in Produktionsabläufen, in welchen ACOPOSTrak verwendet wird, kurze Transportzeiten gefordert sind. Daraus resultiert ein Interesse an schnellen Fortbewegungsgeschwindigkeiten.

Zur Untersuchung des lateralen Schlupfes wird, wie schon bei vorangegangenen Parametervariationen, stellvertretend die Drehbewegung des Shuttles um die Y-Achse betrachtet. Die Simulation wird für zwanzig verschiedene Startgeschwindigkeiten durchgeführt, was die Darstellung aller Zeitverläufe ungeeignet macht. Stattdessen wird die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Wert (Spitze-Spitze-Wert) der Drehbewegung im eingeschwungenen Zustand bestimmt. Abbildung 6.5 zeigt die normalisierten Spitze-Spitze-Werte der Drehbewegung um die Y-Achse für die zwanzig Startgeschwindigkeiten. In der Darstellung fallen die zwei Spitzen im Verlauf der Kurve auf. SIMPACK bietet die Möglichkeit, die Eigenfrequenzen für die linearisierten Eigenmoden zu bestimmen. Wird so die Eigenfrequenz des linearisierten Eigenmodes der Drehbewegung des Shuttles um die Y-Achse bestimmt und mit dem Abstand zwischen den Eisenkernen (7,5 Millimeter) multipliziert, ergibt sich daraus die erste Resonanzgeschwindigkeit, bei welcher die erste Spitze auftritt. Die Drehschwingung um die Y-Achse erfährt bei dieser Geschwindigkeit eine Anregung mit ihrer Eigenfrequenz. Im Segment wechseln sich immer ein Eisenkern mit Spule und ein Zwischenkern ab. Die magnetischen Kräfte sind also alle 15 Millimeter periodisch. Die zweite Spitze tritt bei der doppelten Geschwindigkeit auf, wo das Shuttle wieder mit seiner Eigenfrequenz angeregt wird, die Schwingung jedoch periodisch bei einer Fortbewegung alle 15 Millimeter erfolgt.

Bezogen auf den Abrieb ist es somit ungünstig, das Transportsystem mit Fortbewegungsgeschwindigkeiten des Shuttles in der Nähe der Resonanzgeschwindigkeiten zu betreiben.

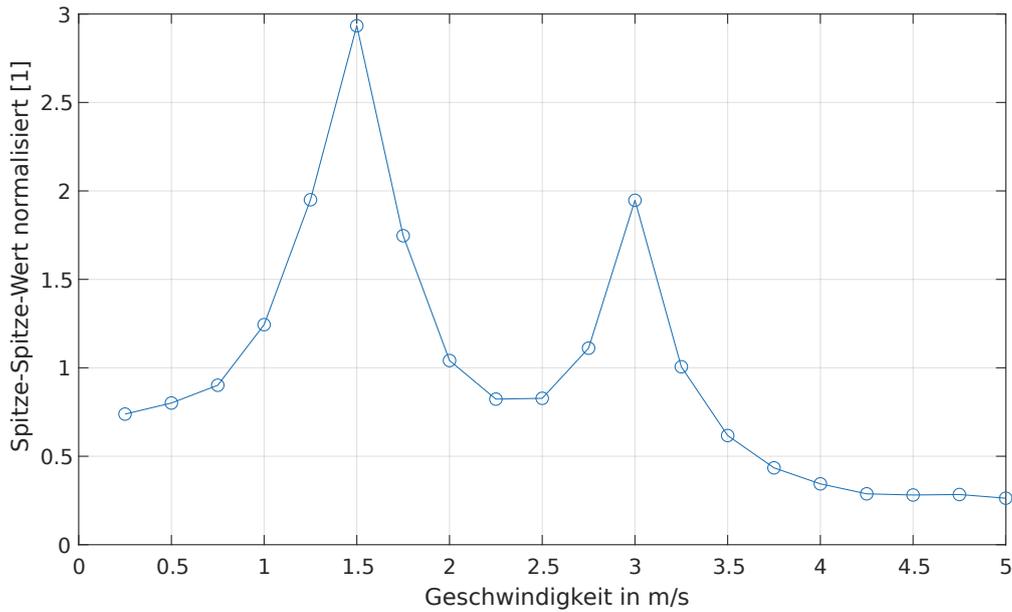
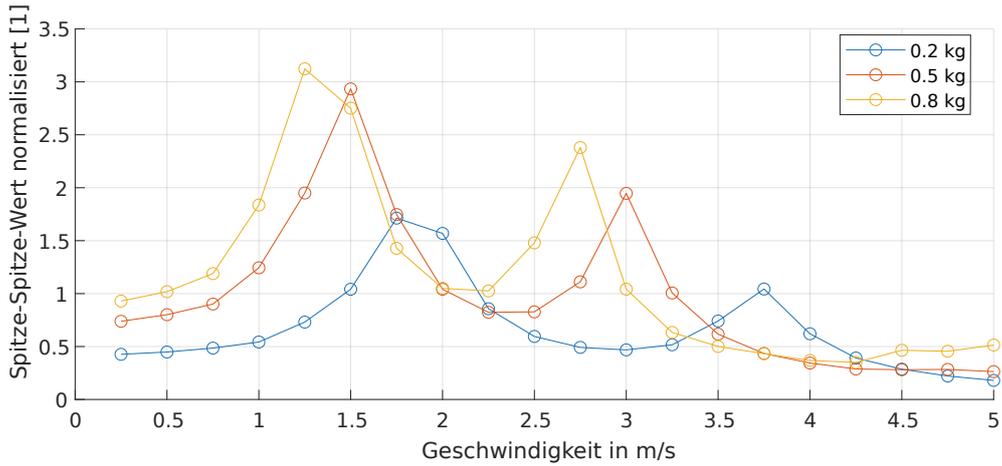


Abbildung 6.5: Verhalten des Spitze-Spitze-Wertes der Drehbewegung um die Y-Achse bei unterschiedlichen Fortbewegungsgeschwindigkeiten

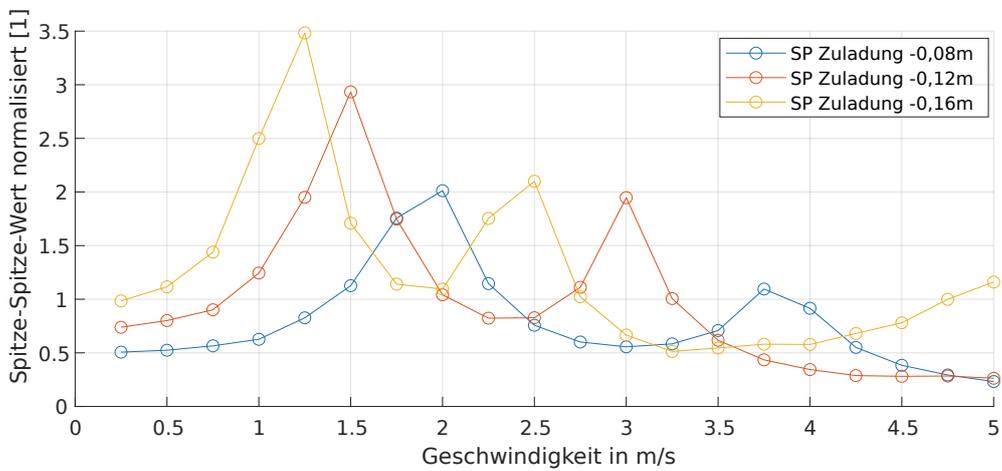
Zusätzlich wurde untersucht, wie sich der Verlauf des Spitze-Spitze-Werts über die Geschwindigkeit (Amplitudenverstärkungsdiagramm) verändert, wenn Parameter des MKS Modells variiert werden. In Abbildung 6.6(a) ist gezeigt, welchen Einfluss die Masse der Zuladung auf das Verhalten der Drehschwingung um die Y-Achse bei verschiedenen Geschwindigkeiten hat. Eine höhere Masse führt zu einem höheren Massenträgheitsmoment, was eine geringere Eigenfrequenz der betrachteten Schwingung zur Folge hat. Die Spitzen im Amplitudenverstärkungsdiagramm treten also bei niedrigeren Geschwindigkeiten auf. Zudem steigt mit erhöhter Zuladungsmasse der durchschnittliche Spitze-Spitze-Wert.

Das Amplitudenverstärkungsdiagramm für unterschiedliche Positionen des Massenmittelpunktes in Z-Richtung der Zuladung wird in Abbildung 6.6(b) dargestellt. Ist der Schwerpunkt der Zuladung weiter vom Magnetkraftangriffspunkt entfernt, bewirkt das ähnliche Effekte wie eine Steigerung der Zuladungsmasse. Es sollte also bei der Montage darauf geachtet werden, die Zuladung so nahe wie möglich am Magnetkraftangriffspunkt zu positionieren, um eine möglichst lange Lebensdauer zu erreichen.

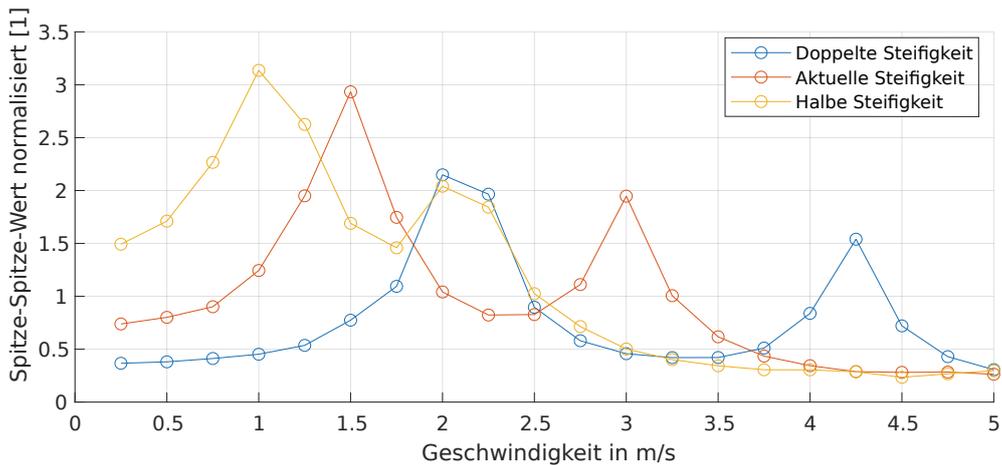
Die Auswirkungen auf das Amplitudenverstärkungsdiagramm durch variierte Steifigkeiten der V-Rollen werden in Abbildung 6.6(c) gezeigt. Eine höhere Steifigkeit bewirkt eine



(a) Amplitudenverstärkungsdiagramm für variierte Zuladungsmassen



(b) Amplitudenverstärkungsdiagramm für variierte Zuladungsschwerpunkte



(c) Amplitudenverstärkungsdiagramm für variierte Steifigkeiten der V-Rollen

Abbildung 6.6: Amplitudenverstärkungsdiagramme für variierte Parameter

höhere Resonanzgeschwindigkeit. Zudem wird der durchschnittliche Spitze-Spitze-Wert reduziert. Dadurch wird die Empfehlung, die Steifigkeit der V-Rollen zu erhöhen, weiter untermauert.

Um einen positiven Effekt auf die Lebensdauer zu erzielen, wäre es, dieser Untersuchung zufolge, sinnvoll, die Resonanzgeschwindigkeiten für die aktuelle Zuladung eines Shuttles zu bestimmen und diese im Betrieb durch Einstellungen des Reglers zu vermeiden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Um ein besseres Systemsverständnis zu entwickeln und um Vorschläge für Änderungen mit einem positiven Effekt auf die Lebensdauer zu erarbeiten, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Mehrkörpersystemdynamikmodell des automatisierten Transportsystems ACOPOStrak mit der Simulationssoftware SIMPACK erstellt. Dabei wurde darauf geachtet, die Annahmen zur Modellbildung so zu treffen, dass die relevanten Aspekte der Bewegung des Shuttles abgebildet werden können. Zur Parametrierung der Subsysteme wurden diverse Quellen benutzt und, wenn notwendig, Versuche durchgeführt. Nach erfolgter Validierung des Modells wurden die Simulationsergebnisse analysiert. Dabei wird sichtbar, dass schwingende Drehbewegungen des Shuttles um die Y-Achse auftreten, welche lateralen Schlupf und somit Abrieb der Rollen und Führungsschienen zur Folge haben.

Das erstellte Modell wurde genutzt, um Parametervariationen durchzuführen und die resultierenden Einflüsse auf die Bewegung des Shuttles zu untersuchen. Daraus kann festgestellt werden, dass die Lebensdauer des Transportsystems positiv beeinflusst werden könnte, indem die zwei Resonanzgeschwindigkeiten für die aktuelle Zuladung bestimmt und im Betrieb vermieden werden. Zudem könnte eine Erhöhung der Steifigkeit der Rollen durch die Verwendung von Kugellagern mit größerem Außendurchmesser bei gleichbleibendem Außendurchmesser der Rolle oder die Verwendung eines anderen Materials einen positiven Effekt auf den Abrieb haben. Ebenso legen die simulierten Ergebnisse dar, dass es sinnvoll sein könnte, den Filz, welcher die V-Rollen schmiert, nicht weiter zu verbauen. Für eine endgültige Aussage, wären hier jedoch noch weitere Versuche notwendig.

Das Modell stellt ein geeignetes Werkzeug dar, um in Zukunft zu untersuchen, welchen Einfluss eine bestimmte Änderung auf das Bewegungsverhalten des Shuttles hat. Zudem

kann es erweitert werden, um auch eine Fortbewegung auf einem Kreissegment oder die Fahrt durch eine Weiche zu simulieren. Um den Detaillierungsgrad des Simulationsmodells zu erhöhen, können auch die Magnetkräfte bei Bestromung der Spulen und dem zugehörigen Regler im Modell inkludiert werden. Auch der Einfluss auf die Magnetkräfte durch eine Positionsänderung in Z-Richtung oder Verdrehung um die X- und Z-Achse können implementiert werden. Zudem kann die Lagerung der V-Rollen verformbar modelliert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] J. F. Archard. „Contact and Rubbing of Flat Surfaces“. In: *J. Appl. Phys.* 24.8 (1953), S. 981–988.
- [2] B&R Automation. *ACOPOStrak Anwenderhandbuch V1.3*. 20. Juli 2023. URL: <https://www.br-automation.com/de-at/downloads/track-technologie/acopostrak/acopostrak-anwenderhandbuch> (besucht am 03.07.2024).
- [3] B&R Automation. *Über uns*. URL: <https://www.br-automation.com/de-at/ueber-uns/> (besucht am 29.07.2024).
- [4] D. Daxecker. *Kontaktanalyse ACOPOStrak Standardrollen POM c*. 2024.
- [5] F. Holzweißig H. Dresig. *Maschinendynamik 10. Auflage*. Springer Verlag, 2011.
- [6] M.Haudum M. Herbst. *ACOPOStrak - Electromagnetic FEA results*. 2024.
- [7] T. Risch N. Dallinger. „Einfluss der Ansteuerung auf Magnetvibrationsförderer“. In: *Logistics Journal: Proceedings* 2016.10 (2016).
- [8] Hans B. Pacejka. *Tire and Vehicle Dynamics*. Elsevier, 2021.
- [9] R. Enblom S. Iwnicki S. Björklund. *Wheel-rail contact mechanics*. Wheel-Rail Interface Handbook. Woodhead Publishing, 2009.
- [10] Dassault Systems. *Simpack – führende MBS-Technologie für Technologieführer*. URL: <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/simulia/produkte/simpack/> (besucht am 09.07.2024).
- [11] A. Askenazi V. Adams. *Building Better Products with Finite Element Analysis*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1999.