

Simulationsbasierte Weiterentwicklung einer Berechnungsvorschrift für Taschensortersysteme

Patrick Kröpfl¹, Alexander Ortner-Pichler¹, Andreas Siegl², Christian Landschützer¹ und Jürgen Neugebauer²

¹Technische Universität Graz - Institut für Technische Logistik, ²Beumer Group Austria GmbH

DOI: 10.3217/978-3-85125-995-7-01

Abstract

Vor allem getrieben durch einen Anstieg im Bereich des E-Commerce, erhöhen sich die Sendungszahlen in der Kurier-, Express- und Paketdienstbranche, mit einem durchschnittlichen Wachstum von 4,84%. Durch die entstehenden Anforderungen im E-Commerce-Fulfillment und durch die zunehmende Integration von Einzelhandel und Direct-to-Consumer (D2C) gewinnen dabei Taschensortersysteme zunehmend an Bedeutung. Angesichts der wachsenden Größe und Komplexität dieser Anlagen wird ein tiefgreifendes Systemverständnis immer wichtiger, um auch in Zukunft energieeffiziente und ressourcenschonende Systeme zu entwickeln.

Als ein weltweit führender Anbieter von Taschensortersystemen sieht sich auch die Beumer Group Austria GmbH dieser Herausforderung gegenüber. Um ihr gerecht zu werden, ist eine kontinuierliche Verbesserung unumgänglich. Dazu beitragen soll eine Weiterentwicklung der bestehenden Berechnungsvorschrift für das Taschensortersystem – BG Pouch System. Der Fokus liegt dabei auf der Analyse der Einflüsse von dynamischen Wechselwirkungen der Systemkomponenten.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Technische Logistik der Technischen Universität Graz erfolgt dazu eine breit angelegte Untersuchung des Taschensortersystems. Mit Hilfe von Mehrkörpersimulationen werden dabei dynamischen Wechselwirkungen quantifiziert, um diese in die bestehende Berechnungsvorschrift aufzunehmen. Die so gewonnenen Erkenntnisse sind von entscheidender Bedeutung, um das Systemverständnis zu vertiefen und energieeffiziente sowie ressourcenschonende Systeme zu entwickeln. Dies trägt zur Verwirklichung der Nachhaltigkeitsziele der Beumer Group Austria GmbH bei und festigt ihre Position in einem zunehmend anspruchsvollen Marktumfeld.

Keywords: Taschensorter, E-Commerce, Berechnungsvorschrift, numerische Simulation, Mehrkörpersimulation, Energieeffizienz, Nachhaltigkeit

1 Einleitung

Die Kurier-, Express- und Paketdienstbranche erlebt in den letzten Jahren einen kontinuierlichen Anstieg der Sendungszahlen, der vor allem durch das Wachstum im Bereich des E-Commerce angetrieben wird. Laut einer Studie des Bundesverband Paket & Express Logistik, aus dem Jahr 2023 verzeichnet dieser Sektor ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 4,84%. [1] Besonders im E-Commerce-Fulfillment und durch die wachsende Integration von Einzelhandel und Direct-to-Consumer (D2C) gewinnen Taschensortersysteme zunehmend an Bedeutung. Diese spezialisierte Form der Hängefördertechnik wird für den Transport und die Zwischenlagerung von kleinen bis mittelgroßen Artikeln mit geringer Masse eingesetzt. Ihre Vorteile zeigen sich insbesondere im Retourenmanagement, da die dynamische Pufferung den erneuten Lager- und Kommissioniervorgang überflüssig macht. Durch das steigenden Sendungsvolumen des Online-Handels wächst auch die Anzahl der Retouren und wird insbesondere für Online-Händler zu einer finanziellen Belastung, was wiederum zu einer erhöhten Attraktivität und einem steigenden Bedarf an Taschensortersystemen führt. [2]

Angesichts des Trends zu zunehmend größeren und komplexeren Anlagen in diesem Bereich erhöhen sich auch die Anforderungen an die Planung von Taschensortersystemen. Die Beumer Group Austria GmbH hat dabei die Notwendigkeit einer Weiterentwicklung ihrer Berechnungsvorschrift¹ erkannt. Ziel ist es ein noch besseres Systemverständnis zu erlangen und den steigenden Anforderungen gerecht zu werden. Insbesondere die Berücksichtigung dynamischer Wechselwirkungen² in der Berechnungsvorschrift sind ein zentraler Schwerpunkt. Die zunehmende Größe und Komplexität dieser Anlagen unterstreichen die Notwendigkeit eines vertiefenden Systemverständnisses, um auch zukünftig energieeffiziente, ressourcenschonende und betriebssichere Systeme entwickeln zu können.

1.1 Stand der Technik

Bisherige Ansätze im Bereich der Auslegung von Sortier- und Verteilförderern, zu denen der Taschenförderer zählt, basieren größtenteils auf analytischen und quasistatischen Berechnungsmethoden [3]. [4], [5] und [6] zeigen die Berechnung des Gesamtwiderstandes³ eines Förderers durch die Summation von Einzelwiderständen. Hinzu kommen häufig noch empirische Kenngrößen für Anfahrvorgänge wie in [7] und [8] exemplarisch dargestellt. Eine Berücksichtigung von dynamischen Wechselwirkungen der Komponenten kann mit solchen quasistatischen Berechnungen naturgemäß nicht abgebildet werden.

1.2 Zielsetzung und Motivation

Angesichts der Einschränkungen derzeitiger Auslegungen ergibt sich die Zielsetzung einer Weiterentwicklung der bestehenden Berechnungsvorschrift um dynamische Wechselwirkungen. Dabei unterstützt das Institut für Technische Logistik der Technischen Universität Graz dieses Vorhaben. Als

¹ Die Planungsrichtlinie der Beumer Group Austria GmbH bezeichnet ein Dokument, das eine Berechnungsvorschrift enthält, um basierend auf dem Anlagenlayout die erforderliche Antriebsleistung des Förderers zu ermitteln. Inhalte

² Dynamische Wechselwirkungen im Kontext des Taschenförderers umfassen sämtliche dynamischen Interaktionen zwischen den Systemkomponenten, einschließlich Abweichungen vom Idealbetrieb und Einflüsse verschiedener Fahrmanöver.

³ Als Gesamtwiderstand werden analog der klassischen Zugmitteltheorie alle Widerstandskräfte, welche im Taschensorter auftreten, aufsummiert. Für den Betrieb der Anlage muss jener Widerstand vom Antrieb überwunden werden.

Hilfsmittel für die Quantifizierung der dynamischen Wechselwirkungen werden dabei numerische Simulationen eingesetzt. [9], [10], [11] und [12] zeigen dabei bereits grundlegende Simulationsansätze, welche in diesem Vorhaben auf den Taschensorter angewandt werden.

Die Motivation für dieses Vorhaben liegt in der Optimierung des Layouts während der Anlagenplanung, um die Platzierung der benötigten Systemkomponenten (z.B. Weichen, Antrieb oder die Anordnung von Kurvenelementen) zu optimieren und den Gesamtwiderstand der Anlage zu minimieren. Eine solche Optimierung zielt darauf ab, den Energieverbrauch zu reduzieren, die Nachhaltigkeitsziele zu erreichen und die Lebensdauer der Anlagenkomponenten zu erhöhen.

1.3 Methodische Vorgehensweise

Abbildung 1 zeigt den Ablauf der entwickelten Methode zur Ergänzung der Berechnungsvorschrift um dynamische Wechselwirkungen. Diese beginnt mit einer umfassenden Untersuchung der Anlage, um potenzielle Einflussfaktoren auf die Gesamtwiderstandskraft des Förderers zu identifizieren. Diese Identifizierung bildet den Ausgangspunkt der Quantifizierung der Effekte⁴, die für die dynamischen Wechselwirkungen verantwortlich sind. Für diese werden analytische, empirische und numerische Lösungsmöglichkeiten herangezogen. Die Grundlage für analytische und empirische Lösungen bilden Berechnungsgleichungen und Kenngrößen⁵ aus einschlägiger Fachliteratur (siehe Abschnitt 1.2). Zur Quantifizierung von Effekten, die nicht durch diese Ansätze abgedeckt werden können, werden numerische Simulationen verwendet. Parallel zur numerischen Simulation erfolgen Messstudien nach dem Prinzip des Design of Experiment (DoE) an realen Versuchsanlagen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen der Parametrisierung der Simulationsmodelle und zur Validierung der Berechnungsvorschrift. Der Prozess der Simulations- und Messstudie wird iterativ betrachtet, wobei die Parametrisierung fortgeführt wird, bis die Abweichung zwischen Messung und Simulation im vorgegebenen Bereich liegt. Anschließend werden verschiedene Fahrmanöver, Beladungen und Abweichungen vom Idealbetrieb in einer Simulationsstudie untersucht. Die Simulation ermöglicht eine quantifizierbare Analyse einzelner Effekte, die mit Realversuchen nur bedingt möglich ist. Die Ergebnisse der Simulationsstudie bilden die Grundlage für die Ableitung von Berechnungsmethoden für dynamische Wechselwirkungen, welche die Weiterentwicklung der Berechnungsvorschrift unterstützen. Diese wird anschließend anhand verschiedener Betriebsszenarien validiert, wobei erneut Realversuche an den Versuchsanlagen verwendet werden.

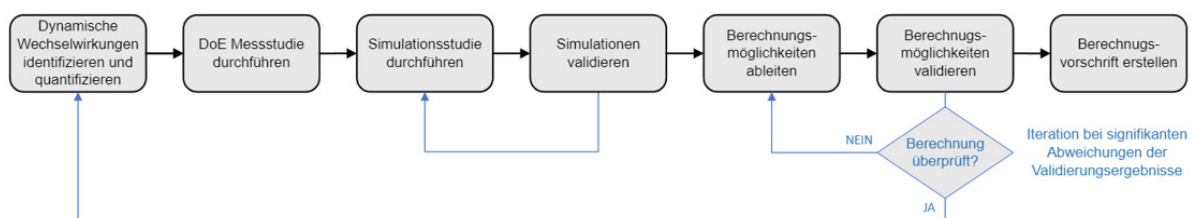


Abbildung 1: Methode zur Weiterentwicklung der Berechnungsvorschrift

⁴ In dieser Arbeit versteht sich der Begriff "Effekt" als Ursache für dynamische Wechselwirkungen. Die Untersuchungen zielen darauf ab, sowohl die auftretenden Effekte als auch die daraus resultierenden dynamischen Wechselwirkungen zu quantifizieren. Siehe Abschnitt 2.1 für Details. Weitere Effekte sind in Abbildung 4 aufgeführt.

⁵ Empirische Kenngrößen beziehen sich auf versuchsbasierte Kenngrößen, die zur Quantifizierung von Effekten verwendet werden können. In der Regel bezeichnen sie die Proportionalitätskonstante einer beschreibbaren Korrelation des Systems.

1.4 Systembeschreibung – BG Pouch System

Das BG Pouch System ist ein Taschensortersystem aus dem Bereich der Hängefördertechnik. Da in dieser Arbeit, die von der Beumer Group Austria GmbH üblichen Begrifflichkeiten für das Taschensortersystem verwendet werden, beschäftigt sich dieser Abschnitt mit einer Einführung in das System. Dazu dient Abbildung 2, welche das Prinzip des Taschensortersystems, bestehend aus mehreren Kreisförderern, zeigt.

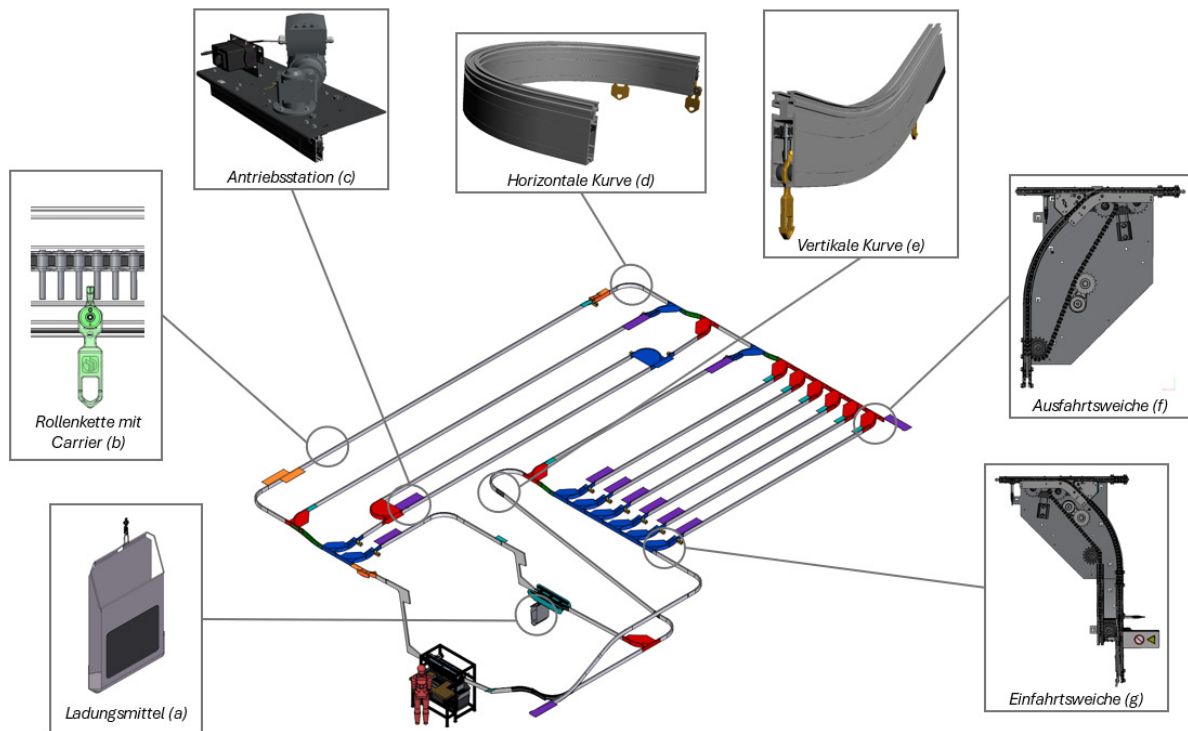


Abbildung 2: Beschreibung der Systemkomponenten des BG Pouch System [13]

Im Taschensorter werden Stückgüter einzeln in Ladungsmitteln/Taschen (a) transportiert. Die Taschen sind gelenkig mit dem Tragmittel (b), den so genannten Carriern, verbunden. Die Carrier besitzen je ein Paar Laufrollen zur beweglichen Abstützung im Fördererprofil und werden durch die Förderkette angetrieben. Die Förderkette ist eine spezielle Rollenkette (b) mit verlängerten Kettenbolzen, die eine formschlüssige Kraftübertragung zu den Carriern herstellt. Durch eine Antriebsstation (c) je Kreisförderer wird das Antriebsdrehmoment über ein Antriebskettenrad auf die Förderkette übertragen. Gestützt wird die Förderkette durch Kunststoffgleitschienen im Führungsprofil (d) (e), welche Auflageflächen für die Kettenlaschen bieten und so die Kette im System führen. Mit Aus- (f) und Einfahrweichen (g) werden die Carrier an definierten Stellen entlang des Layouts ein- und ausgeschleust.

2 Methodische Untersuchung des Taschenfördersystems

Dieser Abschnitt widmet sich der methodischen Untersuchung des Taschenfördersystems. Dabei wird das Vorgehen aus Abschnitt 1.3 angewandt. Der folgende Abschnitt gliedert sich dabei in die Systemanalyse, numerische Simulation und Messstudie.

2.1 Systemanalyse

Die Systemanalyse des Taschenförderers zielt darauf ab, sämtliche Einflussfaktoren zu identifizieren, die den Gesamtwiderstand der Anlage beeinflussen können. Während Widerstände, die sich durch quasistatische Betrachtungen hinreichend genau erfassen lassen, bereits in die Berechnungsvorschrift integriert sind, liegt der Fokus hier auf der Erfassung und Quantifizierung von Effekten und den daraus entstehenden dynamischen Wechselwirkungen. Dazu wird das Taschenförderersystem in irreduzible Teilsysteme zerlegt (siehe Abbildung 3), um die Ursache einer dynamischen Wechselwirkung einem einzelnen Effekt zuordnen zu können.

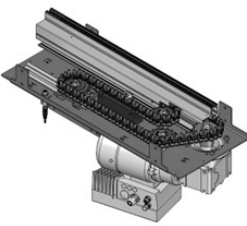
Teilsystem a)	Teilsystem b)	Teilsystem c)	Teilsystem d)
Carrier und Ladungsträger	Antriebsstation	Weichen	Führungsprofil
			

Abbildung 3: Systematische Aufteilung der Bestandteile des Taschensorters

Im Teilsystem a) wird das Verhalten des Carriers durch die Wechselwirkung zwischen der form-schlüssigen Krafteinleitung (beidseitig konvex gestaltete, reibungsbehaftete Kontaktpaarung) an der Oberseite, und der trägheitsbedingten Reaktion der Tasche an der Unterseite, dominiert. Durch – unter anderem durch den Stick-Slip-Effekt angeregte – rotatorische Schwingung um die Achse der Laufräder wird jedoch eine Schrägstellung entlang der vertikalen Carrierachse angeregt, welche ihrerseits zu einer alternierenden Änderung der Widerstandskraft führt, da die Schwingung entlang des Fahrprofils gebremst wird.

Teilsystem b) widmet sich den Einflüssen dynamischer Wechselwirkungen auf die Vorspanneinheit und bietet auch die Möglichkeit, Schwingungsphänomene durch den Polygoneffekt, zu untersuchen. Hierzu eignet sich die Kombination aus nicht geführten Kettenelementen und die Anordnung mehrerer Kettenräder in einem lokalen begrenzten Bereich um die Antriebsstation.

Untersuchungen im Teilsystem c) beinhalten die Weichen, welche für das Ein- und Ausschleusen der Ladungsträger verantwortlich sind. Diese werden passiv, per Zugmitteltrieb, über die Förderkette angetrieben. Der Antrieb bewirkt dabei eine alternierende lokale Krafterhöhung in der Förderkette.

Aufgrund der dreidimensionalen Raumführung der Förderkette durch die Führungsprofile sind Abstützkräfte zwischen Förderkette und Führungsprofil durch rein statische Überlegungen nicht immer nachvollziehbar. Daher wird das Teilsystem d) in die Untersuchung aufgenommen. Dabei werden gerade Führungsprofile sowie horizontale und vertikale Kurvenelemente berücksichtigt.

Abbildung 4 zeigt einen Auszug möglicher Effekte, durch die dynamische Wechselwirkungen entstehen können. Um jene Effekte in die Berechnungsvorschrift aufzunehmen, die einen signifikanten Einfluss auf den Gesamtwiderstand haben, wird eine Quantifizierung dieser durchgeführt. Als Hilfsmittel hierzu dienen analytische, empirische Kenngrößen und numerische Lösungsmöglichkeiten. Abbildung 4 zeigt in der ersten Spalte einen Auszug möglicher Effekte und in den weiteren Spalten die Beurteilung einer möglichen Quantifizierung der aus den Effekten entstehenden dynamischen Wechselwirkungen.

Effekt	Analytisch	Empirisch	Numerisch
Fliehkräfte	X	X	✓
Erhöhte Reibung durch Schwingungen	✓	X	✓
Zwangskräfte durch Toleranzabweichungen	✓	X	✓
Zwangskräfte durch suboptimale Laufeigenschaften	X	✓	✓
Magnetisierungseffekte	X	X	✓
Widerstandskräfte durch Reibung	✓	X	✓
Luftwiderstand	X	X	✓

Abbildung 4: Effekte und Möglichkeiten zur Quantifizierung der dynamischen Wechselwirkungen am Taschensorter (Auszug)⁶

Es ist anzumerken, dass analytische Lösungsmöglichkeiten für Effekte wie Fliehkraft, Magnetisierung und Luftwiderstand zwar existieren, jedoch können diese aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Systemkomponenten nicht zielführend angewandt werden und sind daher für diesen Anwendungsfall ausgeschlossen. Da diese Berechnungen auf quasistatischen Betrachtungen beruhen, sind sie auch nur bedingt in der Lage, dynamische Vorgänge wie Notbremsungen, Bremsvorgänge oder Anfahrmanöver abzubilden.

Für den speziellen Anwendungsfall des Taschensorters existieren keine empirischen Beschreibungsmodelle, die die gesamte Systemkomplexität berücksichtigen. Als Lösung für diese Herausforderung hat sich die numerische Simulation bewährt, da diese alle relevanten Effekte abbilden kann. Darüber hinaus ermöglicht die numerische Simulation auch die Simulation von Fahrmanövern wie Anfahren, Bremsen oder Notbremsungen. Die Auswahl und Anwendung der numerischen Simulation werden im nächsten Abschnitt behandelt.

⁶ Die Liste in Abbildung 4 präsentiert lediglich die übergeordneten Kategorien der Effekte. Im Zuge der Untersuchung wurden zudem spezifische Unterteilungen vorgenommen. Diese Tabelle bietet lediglich eine Übersicht über die betrachteten Effekte. Detaillierte Darstellungen werden aus Rücksicht gegenüber dem Projektpartner nicht veröffentlicht.

2.2 Simulationsstudie – numerische Simulation⁷

Die Auswahl für die geeignete Lösungsmöglichkeit und dem entsprechenden Simulationstool, für diese Modellierung, basiert auf der Morphologie zur Systemmodellierung gemäß [14]. Wie in Abbildung 5 ersichtlich, erweist sich die numerische Simulation durch Mehrkörpersimulation (MKS) als geeignetes Hilfsmittel. Grundlagen für diese Entscheidung bilden der Modellierungszweck, Abstraktionsgrad und die geforderte Modellinformation. Dabei ist zu beachten, dass jede Modellierungsentscheidung das reale Systemverhalten entsprechend vereinfacht. Diese Annahmen führen immer nur zu einer Näherung an das reale Systemverhalten. Dabei ist die Qualität der Ergebnisse maßgeblich von der getroffenen Vereinfachung der Modellierung abhängig. Neben der erforderlichen Expertise im Prozess der Modellierung, ist auch eine umfangreiche Fachkenntnis notwendig, um die Simulationsergebnisse zu bewerten, zu interpretieren und durch Versuche am realen System zu validieren.

Zusätzlich zu den zuvor genannten Herausforderungen ist anzumerken, dass es für die breite Palette technischer Anwendungen von Simulationen, insbesondere im Bereich der Sortier- und Verteilsysteme, nur begrenzt oder gar keine einschlägige Literatur gibt. [3]

Zur Umsetzung der Mehrkörpersimulation wird die Software Hexagon Adams verwendet. Die Modellierung gilt sowohl für quasistatische als auch für dynamische Analysen. Der Abstraktionsgrad der Geometrie wird dabei gering gehalten. Importierte CAD-Dateien der Versuchsanlagen dienen als Grundlage für die Modelle. Die Modellierung erfolgte anhand von Starrkörpern, wobei das elastische Verhalten der Bauteile durch Elastizitäten in Kontaktstellen und Kopplungselementen entsprechend berücksichtigt wird.

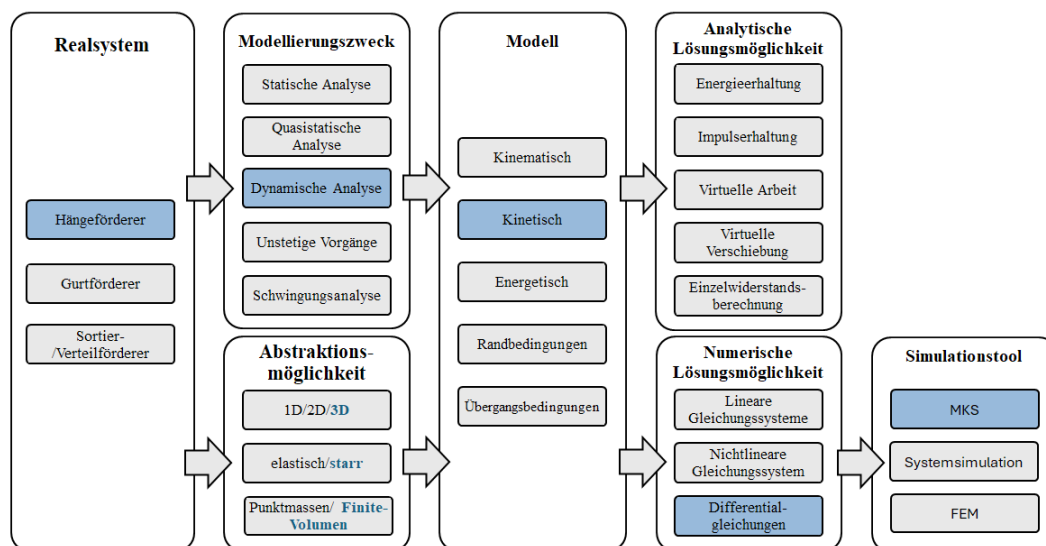


Abbildung 5: Morphologie zur Systemmodellierung von Stetigförderern mit geschlossenen diskreten Zugmitteln

⁷ Details zu den verwendeten Simulationsmodellen werden aus Rücksicht auf Beumer Group Austria GmbH nicht gezeigt.

Für die Simulationsstudie werden zwei Versuchsanlagen aus den Versuchshallen der Beumer Group Austria GmbH in der Simulationsumgebung nachgebildet. Ein Einblick in die dazugehörige Modellierung wird in Abbildung 6 gegeben. Die Modellierung des Carriers erfolgt dabei durch die Verbindung der Räder zum Grundkörper des Carriers über reibungsbehaftete Drehgelenke (a). Die Kopplung zwischen Carrier und Tasche ist mittels eines reibungsbehafteten Kugelgelenks (b) abstrahiert. Das Modellverhalten in der Interaktion von Führungsprofil & Kette (c), Rad & Schiene (d) und Kette & Carrier (e), ist durch reibungsbehaftete 3D-Kontakte definiert. Ein 3D-Kontakt ermöglicht die Erfassung und Beschreibung der kinetischen Wechselwirkung zwischen zwei beliebigen Körpern auf Basis ihrer Geometrie. Die Kontaktdetektion erfolgt durch eine geometrische Kollisionsüberprüfung, wobei der Abstand zwischen den einzelnen Flächen der entsprechenden Geometrien bestimmt wird. Sobald dieser Abstand einen bestimmten Schwellenwert unterschreitet, wird eine Kontaktkraft aktiviert und berechnet. Dieses Vorgehen beruht auf den Prinzipien der klassischen Newton'schen Mechanik und wird durch eine IMPACT-Funktion formuliert. Diese ist ein Spezifikum von Hexagon Adams, welche im Wesentlichen Gleichungen zur Beschreibung der Stoßvorgänge modelliert. Ein viskoelastisches, nichtlineares Feder-Dämpfer-Modell dient dazu, diese Interaktion zu beschreiben. [15] Für die Modellierung der Kette werden abwechselnd reibungsbehaftete Drehgelenke (f) und Bushings⁸ (g) verwendet. Dieser Ansatz ermöglicht es, die Bewegung in die dritte Raumrichtung der Kette, welche durch ihre Toleranzen zugelassen ist, abzubilden.

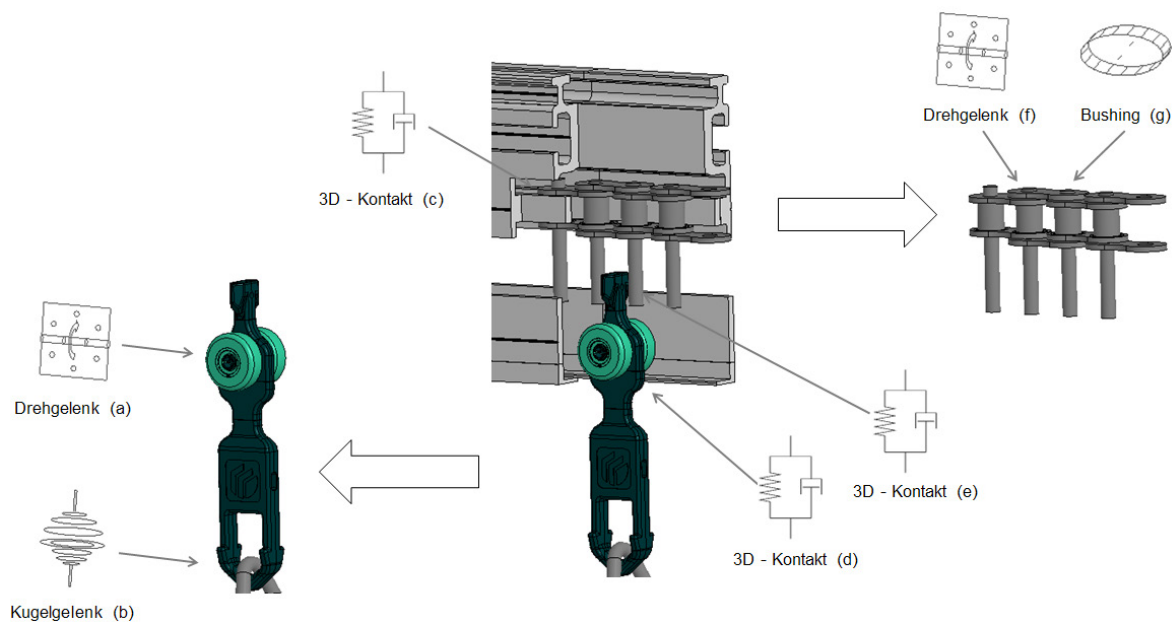


Abbildung 6: Modellierungsansatz für die Beschreibung des Taschenförderers

Der Schlüssel zur physikalisch-simulativen Modellierung des Taschenförderers liegt in der Fähigkeit, Simulationsmodelle mit einer Vielzahl an differential-algebraischen Gleichungen (DAEs) zu beherrschen. Diese ergeben sich aus der hohen Anzahl an Körpern, Kontaktstellen und Kopplungselementen. Abbildung 7 zeigt dabei die Anzahl, die für Simulationen mit dem erforderlichen Detaillierungs-

⁸ Ein Bushing ist ein Kopplungselement, welches es ermöglicht Nachgiebigkeit und Dämpfung in allen sechs räumlichen Freiheitsgraden in einer Verbindung zu modellieren.



grad benötigt werden. Ein weiterer Bestandteil der Modellierung besteht darin, die geeignete Parametrisierung durchzuführen. Zudem sind Hilfskonstruktionen in der Modellierung, wie lokale Abschaltungen und die Unterdrückung nicht relevanter Phänomene, entscheidend für den Erfolg der Simulation. Dieser widerspiegelt sich in der Lösbarkeit und Stabilität der Simulation, der erforderlichen Rechenzeit und der benötigten Hardware um solche Modelle zu lösen. Das Institut für Technische Logistik betreibt derzeit Forschung im Hinblick auf mögliche Hilfskonstruktionen und plant, zu diesem Thema eine separate Publikationsserie zu veröffentlichen.

	Layout 1	Layout 2
Förderkettenlänge	17,75 m	25,09 m
Anzahl der Körper	1 118	1 580
Kinetische Kopplungselemente	1 208	1 670
Kinematische Kopplungselemente	7 946	11 180

Abbildung 7: Überblick über den Umfang der Simulationsmodelle

Die Modelle der beiden Versuchsanlagen bilden die Grundlage für die Simulationsstudien. Die Parametrisierung der Simulationsmodelle erfolgt mithilfe von Realversuchen (siehe Abschnitt 2.3). Die Simulationsstudie gliedert sich in zwei Hauptteile. Der erste Teil konzentriert sich auf die Untersuchung der Effekte und die entstehenden dynamischen Wechselwirkungen auf einzelne Baugruppen (siehe Abbildung 3). Der zweite Teil beschäftigt sich mit den Auswirkungen dieser dynamischen Wechselwirkungen auf das gesamte Anlagenverhalten.

Simulationsstudie 1 - Dynamische Wechselwirkungen einzelner Baugruppen:

Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen werden genutzt, um Effekte zu quantifizieren, welche die Interaktion der jeweiligen Komponenten hervorrufen. Dadurch wird auf die Auswirkungen der dynamischen Wechselwirkungen, durch die Untersuchung von Reaktionskräften in der Simulation, zurück geschlossen. Die Erkenntnisse der Simulationsstudie werden verwendet, um analytische Berechnungsmöglichkeiten der einzelnen Effekte und somit der Einflüsse der dynamischen Wechselwirkungen abzuleiten. Dadurch können folgende Wechselwirkungen berücksichtigt werden:

- Dynamisches Verhalten der Tragmittel (Pendeln und Verdrehen der Ladungsträger)
- Schwingungsinduzierte Erhöhung des Reibwiderstands
- Auswirkung lokaler Krafteinträge durch Weichen und Vorspannvorrichtung
- Reaktionskräfte aus der Abstützung der Kette am Führungsprofil in horizontalen und vertikalen Kurvenelementen

Simulationsstudie 2 - Dynamische Wechselwirkungen der gesamten Anlage:

Simulationsstudie 2 befasst sich mit der Auswirkung der dynamischen Wechselwirkungen auf die gesamte Anlage. Um beispielsweise die Überlagerung verschiedener Effekte und deren Auswirkungen auf die Antriebseinheit zu analysieren. Verschiedene Fahrmanöver wie Anfahren, Bremsen und Not-Stopp mit verschiedenen Beladungszuständen werden ebenfalls simuliert werden. Folgende Wechselwirkungen können durch diese Untersuchungen berücksichtigt werden:

- Auswirkungen von Überlagerung mehrerer dynamischer Effekte (Verstärkung/Abschwächung)
- Einflüsse verschiedener Fahrmanöver

2.3 Durchführung einer Messstudie

Die Messstudie an den Versuchsanlagen gliedert sich in zwei Teile. Zunächst dienen die Messungen zur Parametrisierung der Simulationsmodelle, während im zweiten Teil Messungen verschiedener Beladungszyklen zur Validierung der weiterentwickelten Berechnungsvorschrift verwendet werden. Die entsprechenden Versuchsanlagen werden mit Messtechnik adaptiert, um die erforderliche Antriebsleistung und den Motorstrom zu messen. Anhand dieser Parameter wird auf die resultierende Kettenkraft zurückgerechnet.

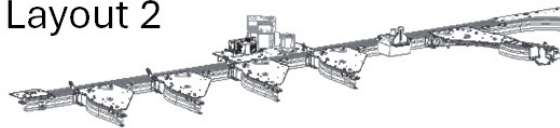
Für die Auswahl geeigneter Versuchsanlagen dient eine spezifisch erstellte Anforderungsliste als Hilfestellung:

- Alle im Taschensorter verbauten Systemkomponenten müssen unabhängig voneinander in der Anlage getestet werden können, was eine mechanische Entkopplung von Weichen und Antrieben erfordert.
- Die Versuchsanlage muss alle Layoutvarianten⁹ des Taschensorters enthalten, einschließlich gerader Förderstrecken in horizontaler und vertikaler Ausführung sowie Kurven.
- Die Anlagensteuerung muss Fahrmanöver wie Anfahren, Bremsen und Not-Stopp ermöglichen.
- Die Versuchsanlage muss mit einer Drehmomentenmessung und einer Motorstrommessung ausgestattet sein.
- Es müssen dieselben Standardkomponenten in allen Versuchsanlagen verbaut sein, um zusätzliche Einflüsse im System zu vermeiden.
- Betrieb sowohl mit beladenem als auch mit leerem Förderer muss möglich sein, einschließlich definierter Beladungen für Ein- und Ausschleusungen.

Gemäß dieser Anforderungsliste haben sich zwei Versuchsanlagen (siehe Abbildung 8) als geeignet erwiesen. Layout 1 wird verwendet, um die Grundfunktion des horizontalen Förderns zu untersuchen, wobei verschiedene Weichenstellungen und Beladungszustände berücksichtigt werden. Layout 2 dient der Untersuchung von horizontalen und vertikalen Kurvenfahrten.

⁹ Als Layoutvarianten sind die Kombinationen aus Profilführungen gerade Förderstecke, steigende und fallende Förderstecke und vertikale wie auch horizontale Förderstrecken bezeichnet.

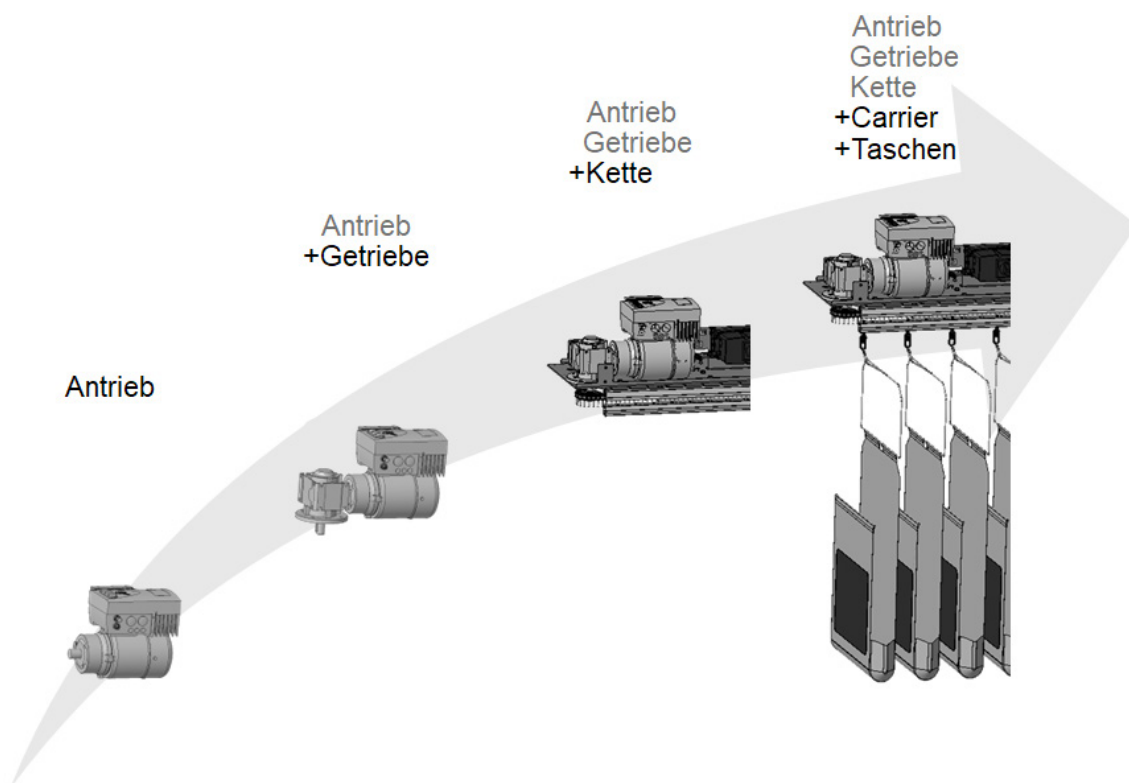
Layout 2



Layout 1

**Abbildung 8:** Verwendete Versuchsanlagen für die Messstudie

Im ersten Teil der Messstudie werden die jeweiligen Layouts nach dem Prinzip der inkrementellen Messung untersucht. Dabei erfolgt gemäß eines festgelegten Messplans eine schrittweise Vermessung vom alleinigen Antrieb bis hin zum gesamten Förderer. Zunächst wird das System auf den Antrieb reduziert, danach wird das Getriebe hinzugefügt und in weiterer Folge die Anlage mit leerer Förderkette (d.h. das System wird ohne Carrier betrieben) messtechnisch erfasst. Anschließend werden verschiedene Einstellungen von Weichenstellungen und Beladungszyklen untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung dienen der Parametrisierung der Simulationsmodelle. Eine schematische Darstellung dieses Vorgehens ist in Abbildung 9 dargestellt.

**Abbildung 9:** Darstellung der Abstraktion der inkrementellen Messung

Um die Messungen beider Anlagen vergleichbar zu gestalten, werden vor Beginn der Messungen beide Antriebe mit den jeweiligen Getrieben vermessen, um einen Abgleich der Standardkomponenten zu erreichen. Der Messplan umfasst eine Rahmenplanung, die die Kalibrierung der Messtechnik, die Einhaltung bestimmter Messdauern und die Aufnahme von Umgebungsparametern wie Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit vorsieht¹⁰.

Im zweiten Teil der Messstudie erfolgt die Validierung der Berechnungsvorschrift. Dabei werden verschiedene Betriebsszenarien und Beladungen der Anlage gemessen, um die Berechnungsergebnisse mit den empirischen Daten zu vergleichen. Dieser Validierungsprozess ist ein iterativer Prozess, wie in Abbildung 1 dargestellt. Bei signifikanten Abweichungen der Berechnungsvorschrift gegenüber den Messergebnissen, erfolgt eine Anpassung der Approximation der Berechnungsmöglichkeiten oder eine erneute Systemanalyse.

3 Ergebnisse und Ausblick

Das vorgestellte Projekt zur Weiterentwicklung der Berechnungsvorschrift für Taschensortersysteme zeigt, dass neben der Präzisierung der mechanischen Auslegung weitere Mehrwerte durch eine systematische und methodische Analyse hinreichend komplexer Systeme generiert, werden können. So können die Lebensdauern solcher Anlagen gesteigert und die Energiebedarfe gesenkt werden, wodurch die Nachhaltigkeitsziele in greifbare Reichweite gelangen. Angesichts des Trends zu immer größeren und komplexeren Anlagen bildet diese Arbeit einen Grundstein für zukünftige Ziele der Beumer Group Austria GmbH.

Die erweiterte Berechnungsvorschrift bietet die Möglichkeit, bereits während der Anlagenplanung das Layout so zu gestalten, dass die zu verbauenden Komponenten optimal platziert werden, um den Gesamtwiderstand der Anlage zu minimieren. Eine optimale Platzierung der Antriebseinheit und die Anordnung von Ein- und Ausfahrweichen im Layout spielen dabei die entscheidende Rolle. Die Berücksichtigung dieser Faktoren führt zu einem geringeren Energieverbrauch der Anlage, was wiederum den Nachhaltigkeitszielen der Beumer Group Austria GmbH entspricht. Darüber hinaus trägt ein reduzierter Gesamtwiderstand der Anlage zur erhöhten Lebensdauer der verbauten Komponenten bei, was zu einer höheren Anlagenverfügbarkeit führt. Diese positiven Effekte lassen sich allein durch die Anwendung der Informationen aus der Berechnungsvorschrift erzielen. Erkenntnisse aus den dynamischen Wechselwirkungen können zudem für zukünftige Entwicklungen herangezogen werden, um die Einflüsse während der Konzeptionierung möglichst gering zu halten und die Effizienz der Anlagen weiter zu steigern.

Als Beispiel für das Ergebnis der Weiterentwicklung der Berechnungsvorschrift wird der Freischnitt des Carriers herangezogen. In Abbildung 10 sind in der linken Spalte der Tabelle alle Reaktionskräfte basierend auf quasistatischen Überlegungen für den Idealbetrieb dargestellt. Dabei wird der Carrier von der Rollenkette angetrieben und erfährt als Widerstand die Rollreibung der Räder, Lagerreibung und den Luftwiderstand. Auf der rechten Seite von Abbildung 10 wird die Erweiterung um dynamische Wechselwirkungen dargestellt. Durch die Unterstützung der Mehrkörpersimulation ist es nun möglich,

¹⁰ Weitere Details werden aus Rücksicht des Projektpartners nicht genannt.

Abweichungen vom Idealbetrieb und somit die gesamte Dynamik des Systems abzubilden. Dies ergibt eine Überlagerung von Roll- und Gleitreibung der Carrierräder, sobald sich der Carrier um die Y-Achse verdreht. Auch das Pendeln der Carrier um die Y- und Z-Achse und die entsprechenden Reaktionskräfte können abgebildet werden. Abhängig vom Layout treten zudem Effekte der Zentrifugalkraft auf, die sich in einer Pendelbewegung um die X-Achse manifestieren.

Die für den Carrier geltende Dynamik erfährt auch die Beladung der Tasche. Da die aus der Beladung resultierende Kraft der Ausgangspunkt für die Widerstandsberechnung der Lagerreibung, des Radwiderstandes und somit der Normalkraft des Carriers sind, wirken sich diese wiederum auf die weiteren Berechnungen aus.

Als Ergebnis der Berechnung der resultierenden Kraft auf die Kette ergibt sich nun keine rein statische Kraftreaktion, sondern eine alternierende Kraft, die durch die beschriebenen Wechselwirkungen entsteht. Dieses Beispiel verdeutlicht die Möglichkeiten, die die neue Berechnungsvorschrift bietet. Anhand des Beispiels des Carriers wird gezeigt, wie tiefgreifend das erlangte Systemverständnis ist. Entsprechend der neu erlangten Detailtiefe werden auch die restlichen Systemkomponenten beschrieben. Aus Rücksichtnahme gegenüber dem Projektpartner werden Ableitungen der Analytik und weitere Details jedoch nicht veröffentlicht.

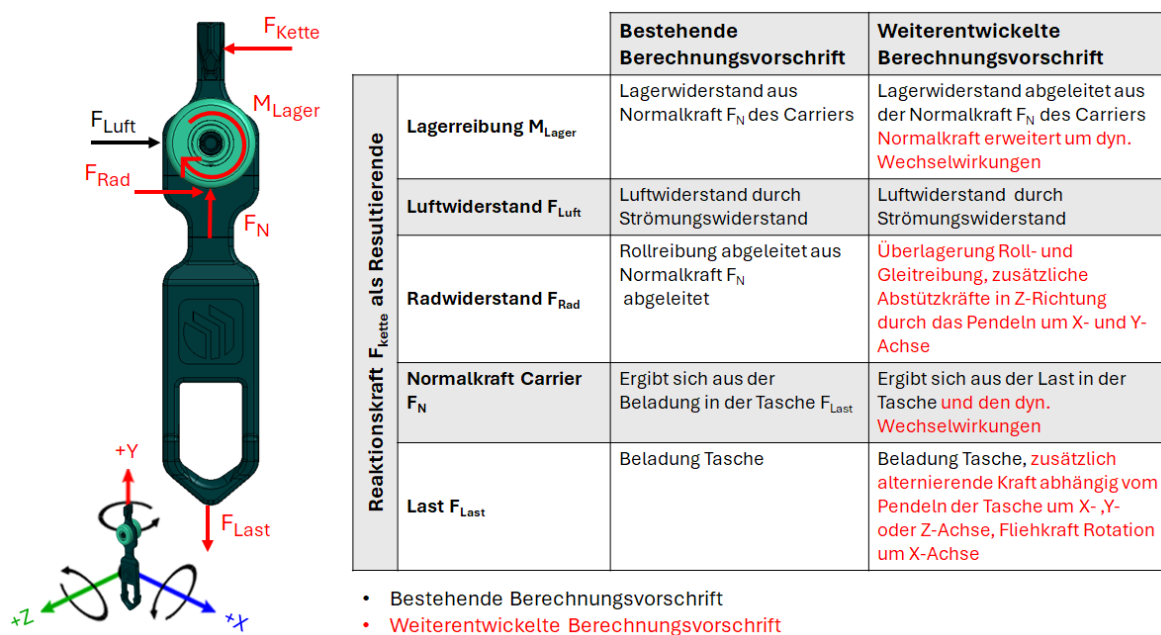


Abbildung 10: Vergleich der Berechnungsmöglichkeiten der bestehenden und weiterentwickelten Berechnungsvorschrift

Obwohl die numerische Simulation im Maschinen- und Anlagenbau weit verbreitet ist, stellt ihr Einsatz in diesem Bereich der Analyse hochkomplexer Systeme der Technischen Logistik ein Novum dar. Viele Anlagen und Auslegungen in der Branche stützen sich nach wie vor auf analytische Näherungsberechnungen, die in Kombination mit empirischen Daten zumeist zu ausreichend guten Ergebnissen führen. [3]

Diese Forschungsarbeit hat das Potenzial der numerischen Simulation in diesem Bereich aufgezeigt und bietet somit Impulse für weitere Anwendungen. Die Nutzung numerischer Simulationen kann dazu beitragen, die Anzahl realer Versuche zu reduzieren, was nicht nur nachhaltiger, sondern auch kostengünstiger ist. Es ist jedoch zu beachten, dass trotz aller Verbesserungen die Berechnungsvorschrift weiterhin gewissen Abweichungen unterliegt, da die Simulationen nur so genau parametrisiert werden können, wie es die Genauigkeit der Messdaten zulässt. Aufgrund der Größe und Komplexität solcher Anlagen sowie der Vielzahl von Einflussfaktoren auf die Messungen können Genauigkeiten von etwa 15% erreicht werden. Eine höhere Genauigkeit der Messtechnik könnte das Ergebnis möglicherweise noch verbessern, jedoch ist die derzeitige Genauigkeit angesichts der hohen Komplexität und der vielen variablen Einflüsse auf die Messungen sehr zufriedenstellend.

Author Contributions:

Conceptualization: P.K., A.O-P., C.L., A.S., J.N.; Methodology: P.K., A.O-P., C.L.; Software: P.K., A.S.; Validation: P.K.; A.S.; Formal analysis: P.K.; Investigation: P.K., A.O-P., A.S.; Resources: C.L., J.N.; Writing – Original; Draft: P.K., A.O-P.; Writing – Review & Editing: P.K., A.O-P., C.L., A.S., J.N.; Visualization: P.K., A.S.; Supervision: A.O-P., C.L., J.N.; Project administration: A.O-P., C.L., J.N.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

4 References

- [1] K. Esser and J. Kurte, "KEP-Studie 2023 – Analyse des Marktes in Deutschland: Eine Untersuchung im Auftrag des Bundesverbandes Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK)," 2023.
- [2] BEUMER Group, *FÜR EINE EFFIZIENTE RETOURENABWICKLUNG*. [Online]. Available: [https://www.beumergroup.com/de/p/fuer-eine-effiziente-retourenabwicklung/#:~:text=F%C3%BCr%20eine%20effiziente%20Retourenabwicklung,-E%2DCommerce&text=Mit%20ihrem%20Taschensortersystem%20erf%C3%BChlt%20die,Direktversand%20an%20Verbraucher%20und%20Filialen](https://www.beumergroup.com/de/p/fuer-eine-effiziente-retourenabwicklung/#:~:text=F%C3%BCr%20eine%20effiziente%20Retourenabwicklung,-E%2DCommerce&text=Mit%20ihrem%20Taschensortersystem%20erf%C3%BChlt%20die,Direktversand%20an%20Verbraucher%20und%20Filialen.). (accessed: Apr. 18 2024).
- [3] C. Landschützer, *Methoden und Beispiele für das Engineering in der Technischen Logistik*. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2018.
- [4] D. Jodin and M. ten Hompel, *Sortier- und Verteilsysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [5] R. Griemert and P. Römisch, *Fördertechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [6] M. Heinrich, *Transport und Lagerlogistik: Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit*, 10th ed. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [7] F. Will, *Auslegung und Gestaltung von Antriebssystemen für Stückgut-Sortieranlagen*. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 1997. Düsseldorf: VDI-Verl., 1998.
- [8] H.-G. Rachner, *Stahlgelenkketten und Kettentriebe*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1962.
- [9] C. Landschützer, "Methods for efficient use of simulation in logistics engineering," *Conference Proceedings of the 17th ITI Symposium*, no. 17, pp. 195–203, 2014.



- [10] C. Haberer, A. Wolfschluckner, and C. Landschützer, "Auslegung und Simulation einer Kettenfahrrwerkes," *Konstruktion*, pp. 76–82, 2016.
- [11] T. Stöhr and C. Landschützer, "Simulation Models for Material Handling Equipment Design - Evaluation Criteria, Methods and Application," *Proceedings in Manufacturing Systems*, no. 12, pp. 65–71, 2017.
- [12] A. Ortner-Pichler, M. Schedler, and C. Landschützer, "Beitrag zur Bestimmung der Zugkräfte an Umschlingungsgetrieben mit diskreten Zugmitteln," *Proceedings Schweizer Maschinenelemente Kolloquium 2018*, pp. 129–144, 2018.
- [13] A. Siegl, "Analyse der Kettenausfallszenarien von Kreisförderern mit Hilfe mechanischer Systemsimulation," Institut für Technische Logistik, TU Graz, 2023 (gesperrt).
- [14] P. Kröpfl, "Systemmodellierung zur Komplexitätsbeherrschung von Stetigförderern mit geschlossenen diskreten Zugmitteln: Wie Wissenschaft und Wirtschaft Impulse für Nachhaltigkeit in all ihren Dimensionen geben können : Logistikwerkstatt Graz 2023, 09.-10.05.2023," (in ger), 2023, doi: 10.3217/978-3-85125-951-3.
- [15] Hexagon AB, *Impact Function*. [Online]. Available: file:///C:/PROGRA~1/MSC~1.SOF/Adams/2023_1/help/master.htm#page/adams_solver/cfunc_impact.html (accessed: Apr. 4 2024).