

Modellierung von forminstabilen Kleinsendungen mittels Multi Flexible Body Dynamics

Gabriel LEITNER¹, Dominik STADLTHANNER¹ und Alexander ORTNER-PICHLER¹

¹Technische Universität Graz – Institut für Technische Logistik

DOI: 10.3217/978-3-85125-995-7-02

Abstract

In der Kurier-, Express- und Paketbranche (KEP-Branche) wird eine Veränderung des Sendungsspektrums hin zu forminstabilen Sendungen beobachtet. Diese Entwicklung stellt die Betreiber von Sortier- und Förderanlagen vor neue Herausforderungen, da das Bewegungsverhalten dieser Art von Sendungen noch nicht ausreichend verstanden wird. Bisher erforschte Simulationsansätze sind in ihrer Fähigkeit begrenzt, alle relevanten Wirkprinzipien abzubilden oder aufgrund langer Rechenzeiten derzeit nicht wirtschaftlich einsetzbar.

Um diese Lücke zu schließen, präsentiert die vorliegende Arbeit einen strukturierten Ansatz zur Entwicklung eines Simulationsmodells, das das Bewegungsverhalten von forminstabilen Kleinsendungen umfassend abbildet. Die entwickelte Methodik umfasst vier Hauptschritte, wobei diese Arbeit die ersten zwei Schritte behandelt. Im Rahmen einer Literaturrecherche wurde Schritt 1 durchgeführt, um die spezifischen Eigenschaften zu erheben. Schritt 2 behandelt die Modellierungsmöglichkeiten mittels Multi Flexible Body Dynamics (MFBD). Dieser beinhaltet die Bottom-Up-Modellierung von Verpackung und Inhalt zu einem Sendungsmodell. Das resultierende Modell zeigt eine Sendung mit starrem Inhalt und einer Verpackung aus Schalenelementen. Abschließend erfolgt eine Detailbetrachtung einzelner Sendungen hinsichtlich der Darstellbarkeit von Forminstabilitäten durch Stöße, wobei auch ein flexibler, durch Volumenelemente modellierter Inhalt, zum Einsatz kommt.

Als Ergebnis entsteht ein Simulationsmodell, das die Fähigkeit besitzt, forminstabile Sendungen in einer bemerkenswerter Detailtiefe abzubilden, ohne eine unökonomische Rechenleistung zu erfordern. Diese Arbeit trägt maßgeblich zur Weiterentwicklung der Simulation des Bewegungsverhaltens von forminstabilen Kleinsendungen im Sortierprozess bei und unterstützt somit die Entwicklung innovativer Sortier- und Fördertechnologien.

Keywords: KEP, Forminstabile Sendung, Polybag, Multi Flexible Body Dynamics (MFBD)

1 Einleitung

Die Kurier-, Express- und Paketdienstbranche (KEP) spielt angesichts des boomenden Onlinehandels eine entscheidende Rolle in der Gesellschaft. Diese Branche ist von äußerst hohen Wachstumsraten geprägt, welche nicht zuletzt durch die COVID-19-Pandemie weiter gestiegen sind. Zwischen 2000 und 2021 hat sich das KEP-Volumen in Deutschland um etwa 167 % erhöht (vgl. Abbildung 1).¹

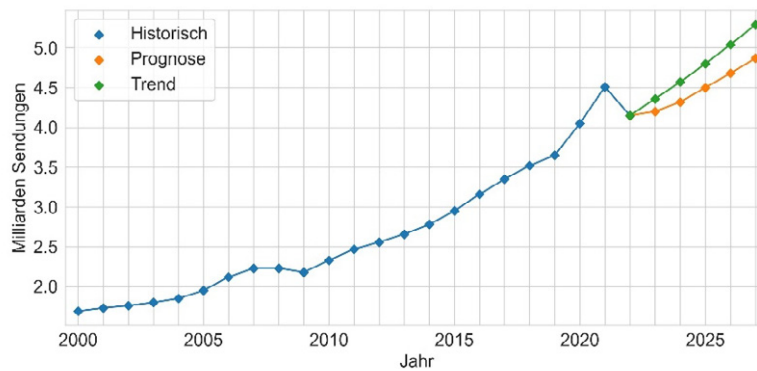


Abbildung 1: Entwicklung der historischen und prognostizierten Sendungszahlen in Deutschland [2], [3]

Der leichte Rückgang des Sendungsvolumens von 2021 auf 2022 lässt sich hauptsächlich auf den Ukraine-Konflikt und die hohen Inflationsraten in ganz Europa zurückführen und wird von Experten als temporäres Phänomen eingeschätzt [2], [3].

Neben diesen hohen Wachstumsraten war die KEP-Branche im letzten Jahrzehnt vor allem durch eine Veränderung im Sendungsspektrum geprägt, welche in erster Linie auf die steigende Bedeutung asiatischer Länder für den Onlinehandel zurückzuführen ist. So gaben laut einer von der International Post Corporation im Jahr 2023 durchgeführten Umfrage 37 % der weltweiten Teilnehmer China als Herkunftsland für ihren letzten grenzüberschreitenden Online-Einkauf an [4]. Als Gründe für dieses Konsumverhalten werden vor allem niedrigere Transportkosten und ein Mangel an lokaler Verfügbarkeit vieler Güter genannt [5]. Die dadurch bedingte Veränderung im Sendungsspektrum äußert sich durch die zunehmende Verdrängung klassischer quaderförmiger Kartonagen durch Kleinsendungen, häufig in Form von flexiblen Polybags (siehe Abbildung 2). Dieser Wandel ist noch nicht abgeschlossen und ständig finden neue, meist forminstabile Verpackungsformen, wie Kraftpapier, ihren Weg in den KEP-Markt.

¹ Dieser Trend zeigt sich weltweit noch deutlicher: Die Anzahl der Paketsendungen stieg von 64 Milliarden im Jahr 2016 auf 161 Milliarden im Jahr 2022, was einem Zuwachs von 150 % entspricht [1].

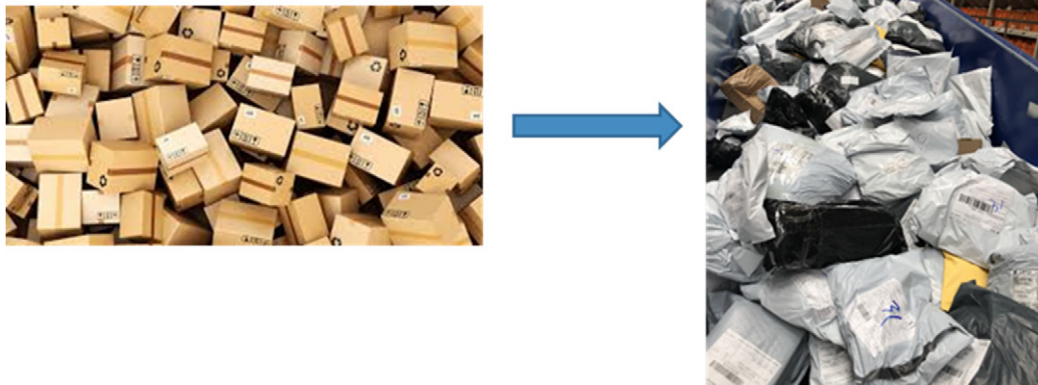


Abbildung 2: Die Veränderung des Sendungsspektrums vom klassischen Paket hin zur Kleinsendung [6].

Gründe für den breitflächigen Einsatz meist forminstabiler Kleinsendungen sind niedrige Produktionskosten sowie eine deutlich effizientere Raumnutzung im Vergleich zu herkömmlichen Kartonverpackungen. Jedoch stellen Kleinsendungen Hersteller und Betreiber von Sortieranlagen vor große Herausforderungen. Neben der Forminstabilität erschweren vor allem die hohe Heterogenität der verwendeten Verpackungsmaterialien und die damit verbundenen physikalischen Eigenschaften wie Reibungskoeffizienten sowie die unzähligen geometrischen Erscheinungsformen, die sich überwiegend aus dem Sendungsinhalt ergeben, eine effiziente und beschädigungsfreie Handhabung. Aufgrund dieser Umstände existieren gegenwärtig nur wenige automatisierte Lösungen für die postalische Verarbeitung von Kleinsendungen, welche wiederum Einschränkungen aufweisen. Im Gegensatz zu den traditionellen quaderförmigen Kartons gibt es für Kleinsendungen aktuell keine Vorschriften. Die einzige Definition, die bisher vorliegt, ist die von Schadler et al., welche Kleinsendungen und insbesondere Polybags anhand ihrer physikalischen Eigenschaften definiert [6]². In einer weiteren darauf aufbauenden Publikation, welche sich zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Papers im Review-Prozess befindet, wurden relevante physikalische Eigenschaften von forminstabilen Kleinsendungen (z. B. Abmessungen, Masse, Verpackungsmaterial, Beschaffenheit des Inhalts) aus dem laufenden Betrieb eines Paketverteilzentrums erhoben und statistisch mittels Clustering in Sendungsklassen eingeteilt. Diese Klassen stellen häufig auftretende Kombinationen der physikalischen Eigenschaften dar und reduzieren somit die Komplexität der mannigfaltigen Erscheinungsformen von Kleinsendungen [7].

Die Entwicklung neuer speziell für die Verarbeitung von forminstabilen Kleinsendungen entwickelter Förder- und Sortiertechnik erfordert den Bau teurer Prototypen. Eine Möglichkeit die Entwicklungskosten zu senken, Entwicklungszyklen zu beschleunigen und die Entwicklungsqualität zu erhöhen ist der Einsatz virtueller Prototypen mittels Simulation. Dafür bedarf es jedoch leistungsfähiger Simulationsmodelle, welche möglichst realitätsnahe Ergebnisse liefern, und geringe Rechenzeiten aufweisen. Während Physiksimulationen bei der Entwicklung von Sortieranlagen in der Industrie bereits erfolgreich eingesetzt werden, sind diese aktuell auf die Simulation von klassischen als Starrkörper modellierte Kartonagen limitiert. Durch die eingangs beschriebenen veränderten Marktanforderungen

² Diese Publikation liefert auch einen Überblick über zahlreiche Probleme, die in diversen Handhabungsprozessen von Kleinsendungen auftreten können.

in der KEP-Branche, verlieren diese Modelle jedoch zunehmend an Relevanz. Modelle für die Simulation forminstabiler Kleinsendungen existieren derzeit nur bedingt. Im Rahmen von Vorstudien³ wurden diverse Modellierungsansätze hinsichtlich Plausibilität untersucht. Unter anderem wurden Lumped-Mass-Ansätze zur Modellierung der Verpackung von biegeschlaffen Kleinsendungen eingesetzt. Die Modellierung erfolgte in einem Fall als Mehrkörpersimulation (MKS) mittels durch Feder-Dämpfer-Elemente verbundene Ellipsoide (vgl. Abbildung 3) [8]. In einer weiteren Vorstudie wurde ein Lumped-Mass-Modell mittels Diskreter Elemente Methode simuliert, wobei Kugelpartikel mittels flexibler Balken-Elemente verbunden wurden. Beide Ansätze lieferten unter gewissen Bedingungen plausible Ergebnisse, jedoch traten aufgrund der Diskretisierung Verzahnungseffekte⁴ bei der Simulation mehrerer miteinander in Kontakt stehender Kleinsendungen, bzw. bei der Simulation einzelner Sendungen im Kontakt mit scharfkantigen Elementen der Fördertechnik auf.

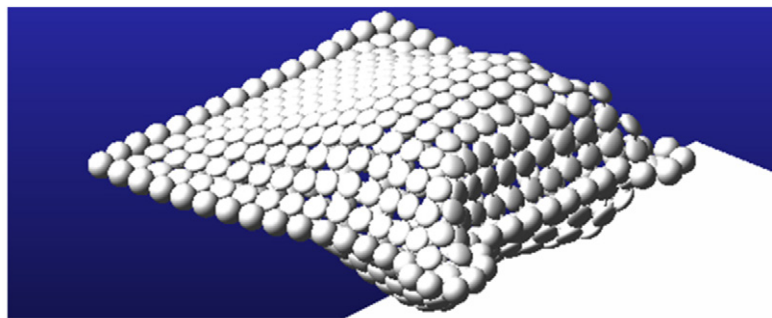


Abbildung 3: Modellierung einer forminstabilen Kleinsendung als Lumped-Mass-Modell mittels Mehrkörpersimulation. Hierbei sind Ellipsoid-förmige Partikel durch Feder-Dämpfer-Elemente flexibel miteinander verbunden [8].

Ein weiteres Problem dieser Ansätze ist die nicht intuitive Wahl der Feder- und Dämpfungsparameter, welche von der Vernetzungsstruktur der Partikel abhängt. Zuletzt sind auch die Rechenzeiten dieser beiden Ansätze äußerst hoch.

Somit gibt es aktuell keinen Ansatz, der das Bewegungsverhalten forminstabiler Kleinsendungen in diversen postalischen Verarbeitungsprozessen realitätsnah abbildet und gleichzeitig geringe Rechenzeiten aufweist. Um diese Lücke zu schließen, soll ein Multi Flexible Body Dynamics (MFBD) Ansatz angewendet werden. MFBD kombiniert die Mehrkörperdynamik (MKD) und die Finite-Elemente-Methode (FEM), um Bewegung, Spannungen und Verformungen flexibler Körper zu analysieren. Dieser Ansatz stellte sich in einer ersten Vorstudie der Autoren [9] als genauer und zudem performanter als die eingangs beschriebenen Methoden heraus. Für die Modellierung wird die kommerzielle Software RecurDyn⁵ verwendet, welche eine inkrementelle Finite-Elemente-Formulierung implementiert, die auf der Co-Rotationsmethode basiert [10]. Das Hauptaugenmerk der vorliegenden Publikation liegt auf der Überprüfung der Machbarkeit dieses Ansatzes anhand diverser Benchmark-Versuche und der Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Modellierung von Kleinsendungen mittels MFBD.

³ z. B. in Form von Abschlussarbeiten betreut durch Mitarbeiter des Instituts für Technische Logistik an der Technischen Universität Graz.

⁴ Dieser Verzahnungseffekt entsteht aufgrund der nicht kontinuierlichen Oberfläche der Körper, was dazu führt, dass sich die Geometrien ineinander verhaken und unerwünschten Widerstand verursachen.

⁵ <https://functionbay.com/en>



2 Definition des Sendungstyps Kleinsendung

Dieses Paper befasst sich mit Kleinsendungen, welche eine maximale Masse von 2 kg nicht überschreiten. Im Jahr 2021 stellte dieser Sendungstyp 83 % der grenzüberschreitenden Online-Einkäufe dar. Über ein Drittel dieser Kleinsendungen wog zwischen 0,2 kg und 0,5 kg [11]. Neben dem Gewicht stellen auch die Verpackungsmaterialien, die Form und der Inhalt der Sendungen entscheidende Faktoren dar, welche das Sendungsverhalten beeinflussen.

2.1 Verpackungsmaterial

Als Verpackungsmaterialien für Kleinsendungen werden vorwiegend Kartonagen, Kraftpapier, Kunststofffolien mit Luftpolster und Kunststofffolien ohne selbstverstärkende Struktur verwendet. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit forminstabilen Kleinsendungen, weshalb Kartonagen aufgrund ihrer vergleichsweise starren Eigenschaften nicht näher betrachtet werden⁶. Im Gegensatz dazu sind, wie in Abbildung 4 dargestellt, Kunststofffolien hochflexibel und daher besonders relevant für folgende Untersuchungen [6].

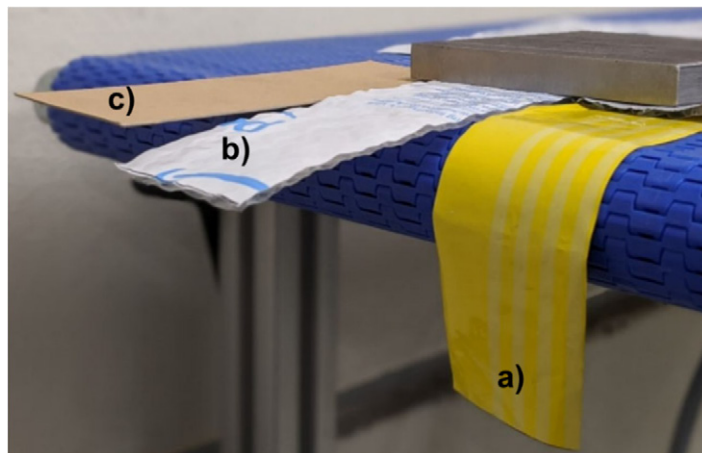


Abbildung 4: Flexibles Verhalten: a) Polybeutel ohne selbsttragende Struktur, b) mit selbsttragender Struktur (Luftpolster), c) Karton als Referenz [6]

2.2 Form und Dimensionen

Im Vergleich zu konventionellen Paketen, deren Außenabmessungen im Regelfall zeitinvariant und unabhängig vom Inhalt sind, ist die Kategorisierung von forminstabilen Kleinsendungen aufgrund ihrer vielfältigen Formen und Größen, die auf den Inhalt angepasst sind, erheblich schwieriger. Zudem kann sich die Form der Kleinsendungen im Laufe des Sortierprozesses wesentlich verändern. Schadler et. al. [6] haben 2022 mögliche Ausprägungen anhand von Live-Mail⁷ Kleinsendungen klassifiziert (siehe Tabelle 1).

⁶ Obwohl Kartonagen an sich nicht starr sind, kann ihr Verhalten gut durch die Annäherung an Starrkörper beschrieben werden. Dieser Ansatz ist jedoch nicht auf Polybags anwendbar.

⁷ Sendungen, welche am Markt zwischen Sendern und Empfängern im Umlauf sind [12].

Tabelle 1: Mögliche Formen von Sendungen [6]

Form	Beispiele		
kubisch			
flach			
zylindrisch			
konvex/ konkav			
andere			

Im Rahmen der Untersuchungen von Schadler et. al. [6] wurde nicht nur Live-Mail analysiert, sondern auch Ausschreibungen und Lastenhefte von drei verschiedenen Logistikdienstleistern betrachtet. Die genannten Dokumente enthalten detaillierte Angaben über die Größe und das Gewicht von Sendungen, die von den Sortieranlagen verarbeitet werden sollen. Diese Informationen basieren auf der Analyse von über 60 Millionen Sendungen, die von den Herstellern der Maschinen selbst ausgewertet wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Überblick über die Eigenschaften von Kleinsendungen. In Anlehnung an [6]

Eigenschaft	Charakteristik					
	Minimum		Maximum		Durchschnitt	
Länge [mm]	60		420		240	
Breite [mm]	60		420		180	
Höhe [mm]	5		200		40	
Masse [g]	20		2000		300	
Verpackungsmaterial	Kunststoff Folie, dünn, matt	Kunststoff Folie, dick, matt	Kunststoff Folie, glatt, glänzend	Papier, dünn	Papier, dick	Kartonage
Form	quaderförmig	flach	zylindrisch	konvex, konkav		formstabil

3 Methodik

In diesem Kapitel wird eine Methodik vorgestellt, die eine systematische Untersuchung von Sendungen ermöglicht, um Erkenntnisse über ihr Bewegungsverhalten zu erlangen. Die beschriebene Methodik zur Modellierung von forminstabilen Kleinsendungen umfasst die folgenden vier Schritte (siehe hierzu auch Abbildung 5):

1. Erhebung der spezifischen Eigenschaften:

Vor der eigentlichen Modellierung werden die spezifischen Eigenschaften der forminstabilen Kleinsendungen erhoben. Dieser Schritt wurde bereits in einer früheren Forschungsarbeit von Schädler et. al. [6] abgehandelt. Hierbei wurden die relevanten Parameter wie Größe, Form, Gewicht, Materialzusammensetzung identifiziert und dokumentiert. Diese Informationen dienen als Ausgangspunkt für die Modellierung und ist in Abschnitt 2 auf das Wesentlichste zusammengefasst.

2. Beschreibung der Modellierungsmöglichkeiten:

In diesem Schritt werden die verschiedenen Modellierungsmöglichkeiten für forminstabile Kleinsendungen abstrakt beschrieben. Dabei wird eine Bottom-Up Modellierung verfolgt, um eine schrittweise Modellierung von Verpackung und Inhalt zur Sendung zu vollziehen. Es wird analysiert, wie der MFBD-Ansatz angewendet werden kann, um die Bewegung und Verformungen flexibler Körper zu simulieren. Potenzielle Szenarien werden betrachtet, um das Verhalten der Kleinsendungen unter verschiedenen Bedingungen zu modellieren.

3. Modellierung realer Sendungen:

Dieser Schritt beinhaltet die Modellierung realer Sendungen mithilfe des MFBD-Ansatzes. Nach Auswahl der realen Sendungen werden die abstrakten Modellierungsmöglichkeiten aus Schritt 2 in diesen konkreten Beispielen umgesetzt. Dabei wird erneut eine Bottom-Up-Modellierung verfolgt, die zu einem realistischen Abbild der realen Sendungen in der Simulationsumgebung führt.

4. Parametrierung der Sendungsmodelle:

Der letzte Schritt umfasst die Parametrierung der in Schritt 3 entwickelten Sendungsmodelle. Diese Modelle werden Untersuchungen unterworfen, um die Einflüsse der Parameter auf das Verhalten der Sendung herauszufinden. In Realversuchen werden Zielwerte bestimmt, anhand derer die Modellparameter angepasst werden, um ein realistisches Bewegungsverhalten der Sendungsmodelle zu erreichen.

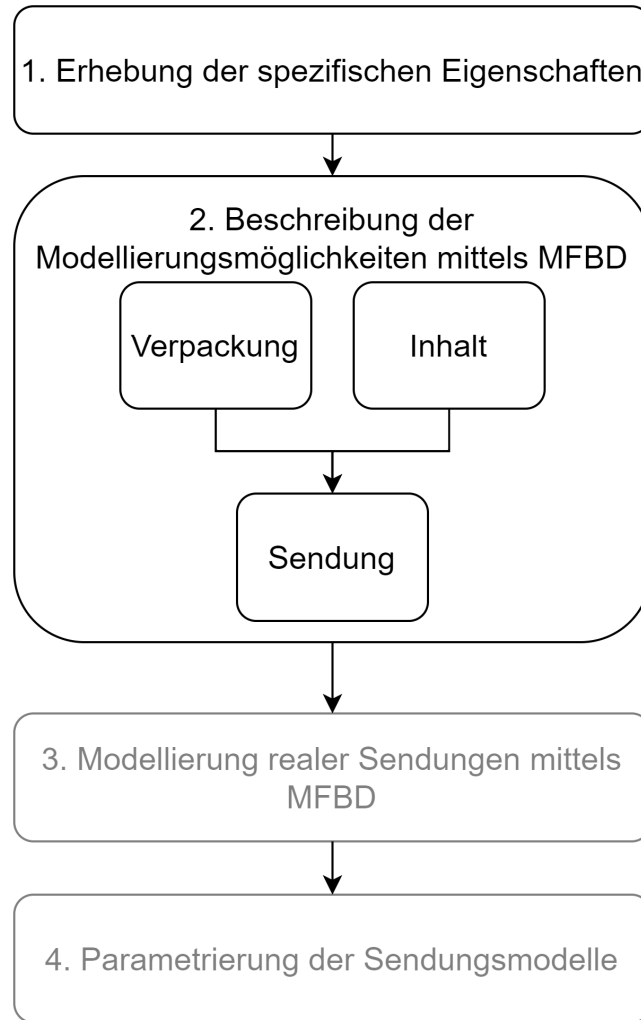


Abbildung 5: Methodik

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit dem zweiten Schritt: der Beschreibung der Modellierungsmöglichkeiten. Hauptaugenmerk liegt auf der Demonstration der Forminstabilität und nicht auf einer detaillierten Betrachtung der eingesetzten Parameter. Die Modellierung von realen Sendungen samt deren Parametrierung soll in zukünftigen Forschungsvorhaben behandelt werden.

3.1 Modellierung der Verpackung

In der grundlegenden Betrachtung besteht die Verpackung einer Sendung aus mindestens zwei Schichten, die den Inhalt umgeben. Eine Schicht kann wiederum aus mehreren Lagen bestehen, um die Vorteile verschiedener Verpackungsmaterialien zu kombinieren, wobei diese Lagen in der Regel fest miteinander verbunden sind. Ein in der Praxis häufig auftretendes Beispiel für mehrlagige Verpackungen ist die Kombination von Kraftpapier (außen) und Luftpolsterfolie (innen) (siehe Abbildung 6). Die Verbindung der Schichten erfolgt an deren Rändern und bildet damit die grundlegende Struktur der Verpackung.



Abbildung 6: Aufbau einer Verpackung aus Kraftpapier und Luftpolsterfolie

Aufgrund ihrer geringen Dicke im Verhältnis zur Fläche ist es sinnvoll und zweckmäßig die Verpackung mit finiten Schalenelemente zu modellieren. Im Vergleich dazu würden Volumenelemente zu einem starken Anstieg der Elemente und Knotenpunkte führen, was zu größeren Gesamtmatrizen und erfahrungsgemäß etwa der 8-fachen Rechenzeit führt. Scheibenelemente hingegen würden nur Kräfte in der Scheibenebene übertragen können, während Platten die Belastung senkrecht zur mittleren Ebene übertragen [13], [14].

Schalenelemente

Durch die Kombination der Eigenschaften von Scheiben- und Plattenelementen können Schalenelemente modelliert werden (siehe Abbildung 7) [13], [14].

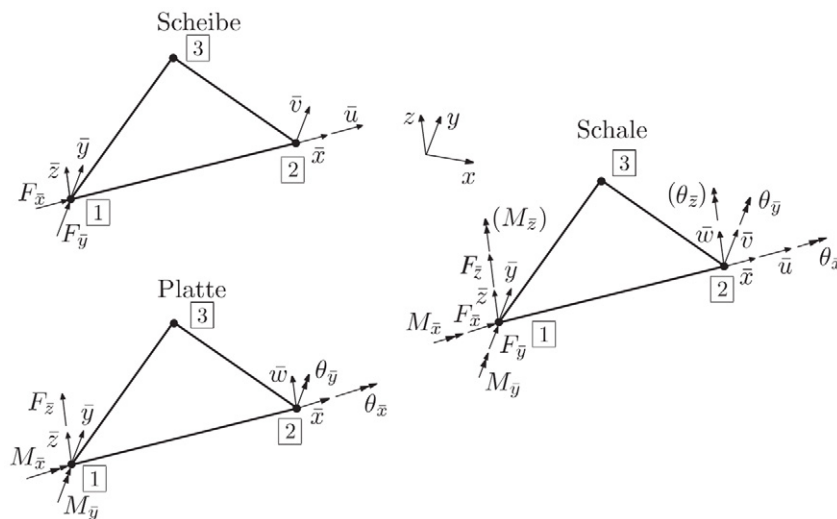


Abbildung 7: Überlagerung von Scheibe und Platte zur Schale [14]

Für die Vernetzung mittels Schalen sollen idealerweise gleichseitige Dreieckselemente oder quadratische Elemente verwendet werden. Unregelmäßige Elemente, wie lang gestreckte nadelförmige Elemente oder stark außermittige Zwischenknoten, können zu numerischen Problemen führen. Im Vergleich zu Dreieckselementen liefern Viereckselemente bei gleicher Netzfeinheit erfahrungsgemäß

genauere Ergebnisse. Zusätzlich sollten alle Elementkantenlängen ungefähr gleich und deutlich größer als die Schalendicke sein [15].

Zur Auswahl der Netzfeinheit muss stets ein Kompromiss aus Genauigkeit und Recheneffizienz gemacht werden. Aufgrund der durchschnittlichen Dimensionen von 240 x 180 mm in Länge x Breite, wie in Tabelle 2 dargestellt, wird für die folgenden Modellierungsschritte eine Elementgröße von 10 mm gewählt, die es bei vertretbaren Rechenzeiten erlaubt Verformungen ausreichend genau abzubilden. Folgend wird demonstriert, wie eine derartige Modellierung einer Verpackung welche aus zwei Schichten besteht, mit der Software RecurDyn, durchgeführt werden kann.

Das Verpackungsmodell wird mittels eines FE-Netzes mit 10 mm großen quadratischen Schalenelementen modelliert (siehe Abbildung 4). Konkret geschieht dies durch eine Oberfläche, die im Mesher in ein FE-Netz umgewandelt und durch Schalenelemente diskretisiert wird. Dieser Körper stellt eine Schicht oder eine Verpackungshälfte dar, die anschließend dupliziert wird, um die zweite Hälfte abzubilden. Durch das Überlappen und anschließende Vereinigen der Randknoten⁸ beider Körper entsteht ein Gesamtkörper bestehend aus zwei Verpackungshälften. Die Entstehung dieses Modells ist in Abbildung 8 dargestellt. Das entstandene Verpackungsmodell fungiert lediglich als eine vereinfachte Darstellung der Realität und verzichtet dabei auf die Berücksichtigung spezifischer Elemente wie Laschen oder ähnlicher Feinstrukturen.

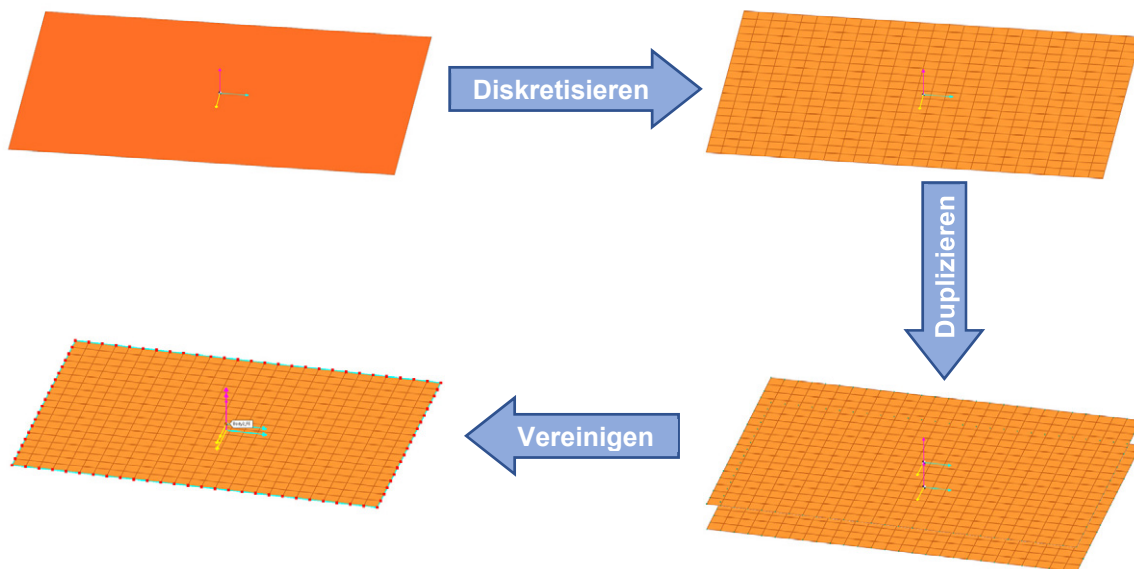


Abbildung 8: Vorgehen zum Erstellen des Verpackungsmodell

Diese simple Form der Verpackung mag zwar den häufigsten Zustand darstellen, wie Verpackungen für formstabile Kleinsendungen vor der Befüllung mit dem Inhalt aussehen, jedoch sind auch diverse andere Formen, wie Tabelle 1 zeigt, zu beobachten. Auch solche komplexeren Formen können durch die Erweiterung um weitere Schichten und deren geeignete Verknüpfung modelliert werden. Wenn Schichten aus mehreren Lagen bestehen, kann es aus Gründen der Recheneffizienz sinnvoll sein,

⁸ Die dazugehörigen Elemente teilen sich die Knoten des Zielkörper, während die Knoten des Quellkörper gelöscht werden.



diese Lagen trotzdem als eine Einheit zu modellieren und die Materialparameter entsprechend anzupassen, um ihr Verhalten adäquat abzubilden.

3.2 Modellierung des Inhaltes

Der Inhalt einer Verpackung kann vielfältige Eigenschaften aufweisen. Ein zentraler Unterschied liegt zwischen starren und flexiblen Inhalten. Starre Inhalte, wie beispielsweise quaderförmige Kartonagen oder andere feste Gegenstände behalten im Allgemeinen ihre Form während des Transports bei und reagieren auf Belastungen steif. Diese Art von Inhalten kann somit als Starrkörper modelliert werden. Beispielhaft kann ein derartiges Modell wie in Abbildung 9 aussehen. Dieses Modell besteht aus einem Quader mit abgerundeten Kanten und erfordert neben den Geometrieparametern lediglich die Anpassung der Dichte und gegebenenfalls der Schwerpunkteigenschaften bei einer dezentralen Schwerpunktlage.



Abbildung 9: Modell des Inhalts als Starrkörper

Im Gegensatz dazu können flexible Inhalte eine breite Palette von Eigenschaften aufweisen. Dies können beispielsweise Textilien, Verpackungsmaterialien und lose Füllstoffe wie Schaumstoffkugeln sein. Während des Transports können sich diese flexiblen Materialien verformen und an die Konturen der Verpackung anpassen oder sich gegenseitig beeinflussen. Um solche flexiblen Inhalte zu modellieren sind Schalen, aufgrund der im Regelfall vergleichsweise großen Dicke, ungeeignet⁹. Hier ist die Verwendung finiter Volumenelemente ein geeigneterer Ansatz. Finite Volumen Elemente ermöglichen es, die Flexibilität von Materialien zu simulieren, wodurch die Verformungen und Bewegungen flexibler Inhalte unter verschiedenen Belastungen präzise nachgebildet werden können. Abbildung 10 zeigt wie ein derartiges Modell aus finiten Volumen Elementen aussehen kann.

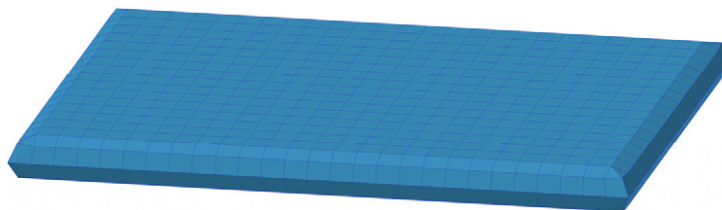


Abbildung 10: Modell des Inhalts als FE-Körper

Durch die Kombination von Starrkörpermodellen für biegesteife Inhalte und Finite-Elemente-Modelle für flexible Inhalte können auch mehrteilige Inhalte unterschiedlichster Kombinationen realistisch abgebildet werden.

⁹ Würde auch der Inhalt eine geringe Dicke im Verhältnis zur Fläche aufweisen könnte auch hier die Modellierung mittels Schalen geeignet sein.

3.3 Zusammenfügen zu einer Sendung

Die beiden Verpackungshälften müssen auseinandergezogen werden, um den Inhalt in die Verpackung einfüllen zu können.

Dies erfolgt durch eine externe gleichverteilte Kraft an den Knoten, die für die jeweiligen Hälften gegengerichtet und gleich groß ist (siehe Abbildung 11). Diese Kraft wirkt, bis die gewünschte Öffnungshöhe in der Mitte der Verpackung erreicht wird.

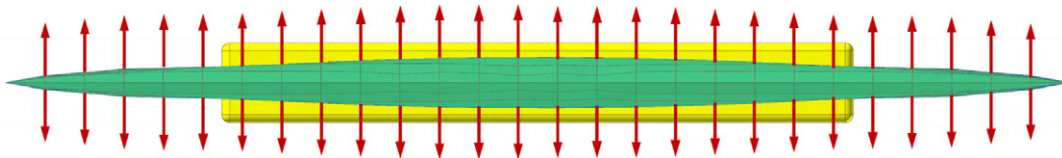


Abbildung 11: Kräfte an den Knoten zum Öffnen der Verpackung

Damit sich die Verpackung um den Inhalt schmiegt müssen Kontakte eingefügt werden. Diese wirken zwischen der Innenseite der Verpackung und Außenseite des Inhaltes. Hierbei muss besonders auf die Normalrichtung der einzelnen Patches¹⁰ geachtet und gegebenenfalls angepasst werden. Diese Kontakte sollen erst aktiviert werden, nachdem die Öffnungshöhe groß genug ist, um hohe Kontaktkräfte zu vermeiden¹¹. Dies wird erreicht, indem die Kontakte im Zuge eines Simulationsvorganges deaktiviert und wieder aktiviert werden. Das bedeutet, nachdem die Öffnungshöhe erreicht wurde, werden die Kontakte aktiviert und die Öffnungskraft reduziert sich auf null. Dadurch passt sich die Verpackung an die Kontur des Inhaltes an und vollendet das Sendungsmodell.

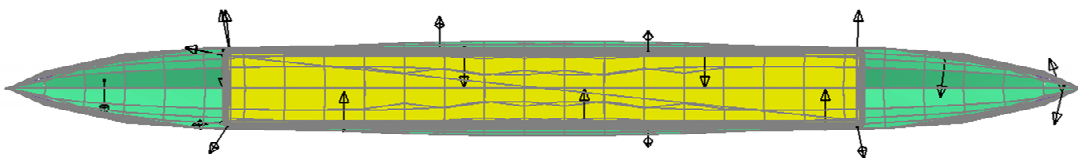


Abbildung 12: Kontakt zwischen Verpackung und Inhalt

Dieses Sendungsmodell kann exportiert und in ein neues Modell importiert werden, ohne dass Informationen über dessen Zustand¹² verloren gehen. Dies ist wichtig, damit der elastische Ausgangszustand des FEM-Modells nicht verändert wird. Abbildung 13 zeigt das daraus resultierende Sendungsmodell.

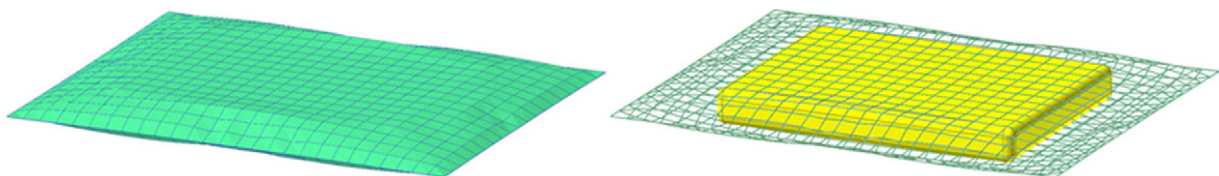


Abbildung 13: Sendungsmodell (links schattiert, rechts Verpackung in Drahtdarstellung)

¹⁰ Ein Patch stellt die (Teil-)Oberfläche eines Elementes dar, welches im Fall einer Schale dieselben Dimensionen einnimmt. Diese Patches besitzen Normalrichtungen die zur Kontaktenerkennung von Flächen nötig sind. Im Verbund werden sie als PatchSets genutzt um als Kontaktbereich zu fungieren wie es am Beispiel des Verpackungsmodells die gesamte Oberfläche ist.

¹¹ Kontaktkräfte sind abhängig von der Durchdringungstiefe – in diesem Fall jene zwischen dem Knoten der Verpackung und der Oberfläche des Inhaltes

¹² Insbesondere Spannungen

4 Ergebnisse

Die in den Abschnitten 3.1-3.3 vorgestellte Modellierungsart lässt sich auch für die effiziente Erstellung verschiedener Sendungen automatisieren. Dies erfolgt durch die RecurDyn interne Entwicklungsumgebung ProcessNet. Dort werden alle manuell durchgeführten Befehle im Programmcode hinterlegt und an geeigneter Stelle parametrisiert. Durch Eingabe der entsprechenden Parameter im Eingabefenster wird in wenigen Sekunden die gewünschte Sendung generiert (siehe Abbildung 14).

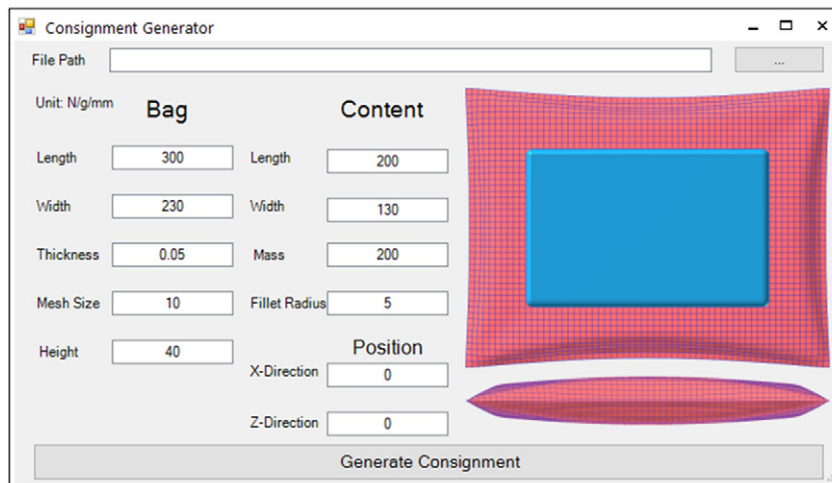


Abbildung 14: Sendungsgenerator

Zur Demonstration der Wirksamkeit dieses Simulationsansatzes werden einfache Szenarien genutzt, um die Abbildbarkeit der Forminstabilität nachzuweisen. Hierfür werden Fallversuche durchgeführt, bei denen die Sendung aus einer Höhe von einem halben Meter unter Einwirkung der Erdbeschleunigung auf den Boden fällt. Dabei steht das Stoßverhalten der Sendung im Fokus. Stöße treten während des Sendungsumschlags an einer Vielzahl an Stellen auf und sind Hauptgrund für die Verformung von Sendungen. Aufgrund des gewählten Szenarios werden neben dem Kontakt zwischen Verpackung und Inhalt weitere Kontakte implementiert: ein Flächenkontakt zwischen der Außenseite der Verpackung und der Oberfläche des Bodens (siehe Abbildung 15, links) und ein Linienkontakt zwischen dem Rand der Verpackung und der Oberfläche des Bodens¹³ (siehe Abbildung 15, rechts).

¹³ Dieser Linienkontakt ist notwendig, da beim vertikalen Auftreffen der Sendung auf den Boden ansonsten kein Kontakt erkannt werden würde. Dies liegt daran, dass der Kontaktalgorithmus bei einem Winkel von mehr als 80° zwischen den beiden Kontaktflächen keinen Kontakt erkennt. Diese Linienkontakte nutzen im Gegensatz zu Flächenkontakten keine PatchSets sondern LineSets, welche eine Aneinanderkettung an Knoten darstellt, wie in diesem Fall den Rand der Verpackung.

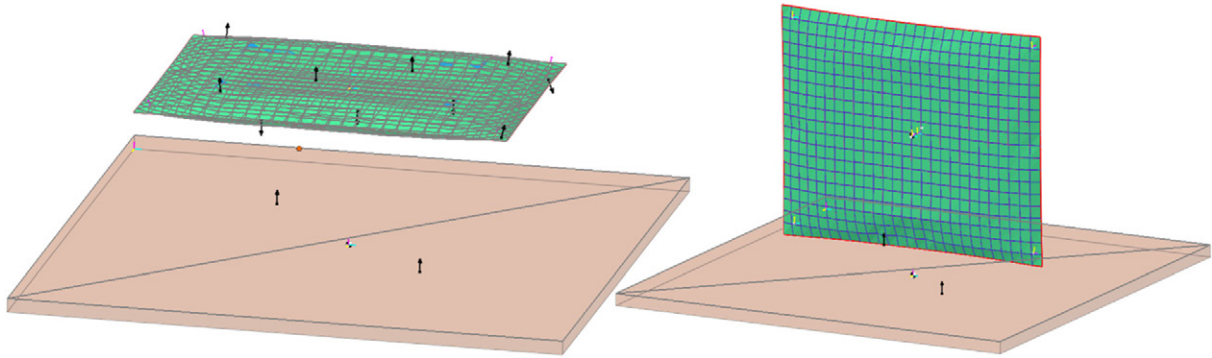


Abbildung 15: Kontakte zwischen Sendung und Boden

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen die Abbildbarkeit der Forminstabilität durch diese Art der Modellierung, wie in

Abbildung 16 ersichtlich wird. Die Momentaufnahmen des Aufpralls zeigen, wie sich die Verpackung durch den Stoß verformt und sogar einknicken kann. Die Versuche hatten eine Rechenzeit von 175 (links) und 201 (rechts) für Simulationsdauer von 0,35 Sekunden.

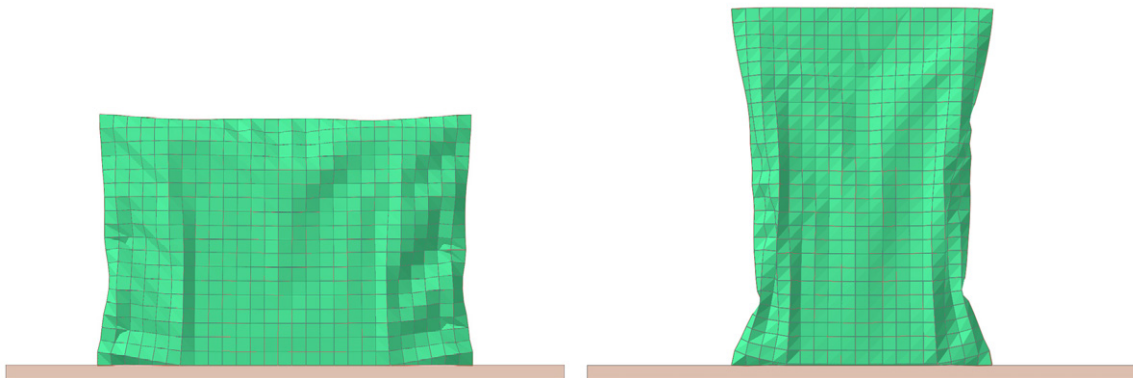


Abbildung 16: Fallversuch beim Auftreffen der Sendung auf den Boden

Weitere Versuche mit flexiblem Inhalt zeigen auch die Wirksamkeit von Volumenelementen als Mittel zur Modellierung flexibler Inhalte. Dies wird anhand Fallversuche demonstriert welche auf die Kante einer Platte auftreffen. Die Rechenzeit beträgt dabei eine von 343 Sekunden für eine Simulationsdauer von 0,4 Sekunden. Die Verformung des Inhaltes beim Auftreffen ist mit den Momentaufnahmen in Abbildung 17 dargestellt. Die Vorteile von MFBD im Vergleich zu einem Lumped-Mass-Modell werden besonders deutlich, insbesondere bei Bewegungen entlang von Kanten, da der unerwünschte Verzahnungseffekt durch die Modellierungsart des Lumped-Mass-Modells vermieden wird.

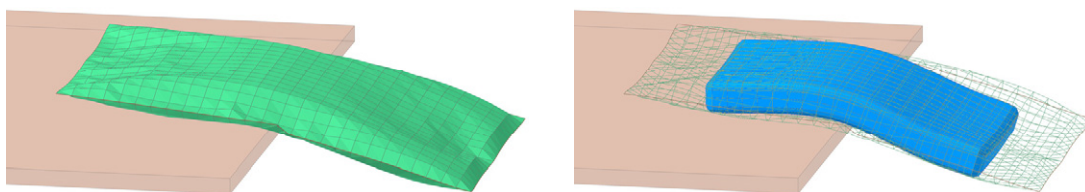


Abbildung 17: Fallversuch beim Auftreffen einer Sendung mit flexiblem Inhalt auf eine Kante

Die Rechenzeiten der verschiedenen Versuche sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 3: Rechenzeiten der durchgeführten Versuche

Versuchstyp	Rechenzeit [s] (siehe Fußnote 13)	Simulationsdauer [s]
Vertikaler Fallversuch (lange Seite)	201	0,35
Vertikaler Fallversuch (kurze Seite)	175	0,35
Fallversuch auf Kante	343	0,4

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit verfolgte einen strukturierten Ansatz zur Entwicklung eines Simulationsmodells für die Abbildung des Bewegungsverhaltens von forminstabilen Kleinsendungen. Es wurde eine Methodik vorgestellt, die mit der Charakterisierung der Eigenschaften von Kleinsendungen begann, gefolgt von der Beschreibung der Modellierungsmöglichkeiten und ihrer konkreten Anwendung auf Sendungen sowie deren Parametrierung.

Das Paper befasst sich insbesondere mit Teil 2 der systematischen Bottom-Up-Modellierung von Verpackung und Inhalt bis hin zur Sendung. Es wurde prototypisch gezeigt, wie eine solche Sendung mithilfe der Multi Flexible Body Dynamics Methode in der Simulationssoftware RecurDyn modelliert werden kann und ein Tool zur automatisierten Modellgenerierung vorgestellt.

Das Verpackungsmodell wurde aus Schalenelementen aufgebaut und um den Inhalt als Starrkörper erweitert, um das Sendungsmodell zu erstellen. Dieses wurde anschließend in Fallversuchen auf seine Qualität und Fähigkeit zur Abbildung der Verformungen von flexiblen Sendungen überprüft. Im Vergleich zu bisherigen Ansätzen wie Lumped-Mass-Modellen konnte ein höherer Detaillierungsgrad, bei vertretbaren Rechenzeiten und ohne unerwünschte Verzahnungseffekte erreicht werden.

Zukünftige Forschungsarbeiten werden sich mit Schritt 3 und 4 der Methodik befassen, bei denen reale Sendungen nachmodelliert und anhand von Realversuchen parametrieren werden.

Die Autoren sind zuversichtlich, dass der Simulationsansatz Multi Flexible Body Dynamics auch die Simulation von forminstabilen Sendungen mit begrenzter Stückzahl im Pulk ermöglichen kann. Dabei könnte es notwendig sein, die Diskretisierung der Modelle gröber zu gestalten, um die Rechenzeit in einem vertretbaren Rahmen zu belassen.

Die Fähigkeit, forminstabile Sendungen in dieser Detailtiefe abzubilden, unterstreicht das Potenzial der vorgestellten Methodik und von MFBD. Insgesamt leistet diese Arbeit wichtige Fortschritte zur Simulation des Bewegungsverhaltens von forminstabilen Kleinsendungen im Sortierprozess und trägt somit zur Entwicklung innovativer Sortier- und Fördertechnologien bei.

Förderung:

Dieser Beitrag entstand im Zuge des Projekts "ISAAK – Entwicklung eines Simulationsansatzes zur Analyse von Kleinsendungen" aus Mitteln der österreichischen Förderagentur für wirtschaftsnahe Forschung, Entwicklung und Innovation im Rahmen des Programms BRIDGE.

Author Contributions:

Conceptualization: G.L., D.S., A.O-P.; Methodology: G.L., D.S., A.O-P.; Software: G.L.; Validation: G.L.; Investigation: G.L., D.S.; Writing - Original Draft: G.L., D.S.; Writing - Review & Editing: G.L., A.O-P.; Visualization: G.L.; Supervision: D.S., A.O-P.; Project administration: G.L., D.S.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Pitney Bowes, „Parcel shipping index 2023“, 2023. Zugegriffen: 15. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pitneybowes.com/content/dam/pitneybowes/us/en/shipping-index/22-pbcs-04529-2021-global-parcel-shipping-index-ebook-web-002.pdf>
- [2] K. Esser und J. Kurte, „KEP-Studie 2019 – Analyse des Marktes in Deutschland. Eine Untersuchung im Auftrag des Bundesverbandes Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK)“, Juni 2019.
- [3] K. Esser und J. Kurte, „KEP-Studie 2023 – Analyse des Marktes in Deutschland. Eine Untersuchung im Auftrag des Bundesverbandes Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK)“, Juni 2023.
- [4] International Post Corporation, „Cross-border e-commerce shopper survey 2023“, Survey, 2024.
- [5] International Post Corporation, „Cross-border e-commerce shopper survey 2019“, International Post Corporation, Brüssel, Jan. 2019.
- [6] M. Schadler, M. Schedler, M. Knödl, D. Prims, C. Landschützer, und A. Katterfeld, „Characteristics of ‚polybags‘ used for low-value consignments in the mail, courier, express and parcel industry“, *Vol. 2022*, S. Issue 01, 2022.
- [7] D. Stadlthanner, H. Steinkellner, C. Landschützer, und D. Kaefer, „Hierarchical Density-Based Clustering of Mixed-Mail in Austria“, eingereicht 2023.
- [8] S. Roth, „Simulation von flexiblen Polybags und Untersuchung deren Umlenkverhaltens mittels Mehrkörper-Simulations-Modellen“, Masterarbeit, 2019.
- [9] G. P. Leitner, D. Stadlthanner, und H. Steinkellner, „Simulation des Bewegungsverhaltens von forminstabilen Kleinsendungen im Sortierprozess mittels Multi Flexible Body Dynamics“, gehalten auf der Logistikwerkstatt Graz 2023, 2023.
- [10] J. Choi und J. H. Choi, „Analysis method for multi-flexible-body dynamics solver in RecurDyn“, *Trans. KSME C Technol. Educ.*, Bd. 3, Nr. 2, S. 107–115, 2015.
- [11] Bundesverband Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK), KE-CONSULT Kurte&Esser GbR, „IPC Online Shopper Survey 2021 reports“, *Int. Post Corp.*, Zugegriffen: 24. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ipc.be/services/markets-and-regulations/cross-border-shopper-survey/2021>
- [12] M. Schedler und C. Landschützer, „Methodische Entwicklung eines neuartigen Sortiersystems für Polybags“, *Vol. 2021*, S. Issue 17, 2021.
- [13] B. Klein, *FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*, 10., verb. Aufl. in Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. doi: 10.1007/978-3-658-06054-1.
- [14] P. Steinke, *Finite-Elemente-Methode: Rechnergestützte Einführung*, 4., neu Bearb. u. erg. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg Imprint Springer, 2012.
- [15] S. Vajna, C. Weber, K. Zeman, P. Hehenberger, D. Gerhard, und S. Wartzack, *CAX für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018. doi: 10.1007/978-3-662-54624-6.