

Methodische Entwicklung eines neuartigen Sortiersystems für Polybags

Methodical development of a new sorting system for polybags

Michael Schedler
Christian Landschützer

Institut für Technische Logistik (ITL)
Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften
Technische Universität Graz

Der Beitrag beschreibt die methodische Entwicklung einer Sortieranlage für den Sendungstyp Polybag. Die Notwendigkeit dafür ergibt sich aus Herausforderungen wie bspw. höhere Energieeffizienz bei gleichzeitiger Leistungssteigerung, aber vor allem aus dem starken Anstieg eines Sendungsanteils mit bisher nicht ausreichend beschriebenen physikalischen Eigenschaften - auch Polybag genannt. Diesen außergewöhnlichen Herausforderungen können State-of-the-Art Systeme derzeit nur bedingt gerecht werden. Der Beitrag zeigt dazu verschiedene Modelle zur Simulation des physikalischen Verhaltens von Polybags, wie dem biegeschlaffen Verhalten mittels Mehrkörpersimulation oder Strömungssimulationen, und integriert diese direkt in den Entwicklungsprozess. Der Entwurfsprozess konzentriert sich auf einen virtuellen Entwicklungsansatz (CAE) durch verschiedene Methoden, mit anschließender Validierung der Ansätze an einem Funktionsprototypen. Daraus resultiert die Konzeptstudie des neuartigen Sortiersystems speziell für Polybags.

[Schlüsselwörter: KEP, Polybag, Sortiersystem, methodische Konstruktion, Produktentwicklung]

The article describes the methodical development of a sorting system for the shipment type polybag. The need for this arises from challenges such as higher energy efficiency with a simultaneous increase in performance, but above all from the sharp increase in the proportion of items with physical properties that have not yet been adequately described - also known as polybags. State-of-the-art systems are currently only able to do justice to these extraordinary challenges to a limited extent. The article shows various models for simulating the physical behavior of polybags, such as limp behavior using multi-body simulation or flow simulations and integrates these directly into the development process. The design process focuses on a virtual development approach (CAE) through various methods, with subsequent validation of

the approaches on a functional prototype. This results in the concept study of the new sorting system especially for polybags.

[Keywords: CEP, Polybag, sortation systems, methodical design]

1 EINLEITUNG

Die KEP-Branche (Kurier-Express-Paket) zählt zu den am stärksten wachsenden Branchen weltweit und kann heutzutage durchaus als Treiber des modernen Konsumverhaltens und weiteres als Rückgrat von vielen Businessmodellen innerhalb des e-commerce angesehen werden. Bereits vor der Corona Krise konnte daher ein stetiges Wachstum der gesamten Branche beobachtet werden. Allein von 2014 bis 2019 wuchs die Branche in Wien um etwa 57% in nahezu allen Bereichen [Wi20]. Die Corona-Krise war ein zusätzlicher Treiber, wodurch laut dem deutschen Bundesverband Paket & Express Logistik allein in 2020 von einem Wachstum von 10,9% in Deutschland ausgegangen wird. Selbst die pessimistischsten Forecasts hinsichtlich des Wachstums bis 2025 deuten auf eine weitere durchaus positive Entwicklung der gesamten Branche hin [EK21].

Gleichzeitig kann beobachtet werden, dass die durchschnittliche physische Größe der Sendungen tendenziell kleiner wird und vermehrt Einzelartikel versandt werden [Mc19]. Die klassische Kartonage wird dabei zusehends von Kunststoffbeutel (auch Polybags genannt) als Verpackungsmaterial abgelöst. Polybags besitzen einige Eigenschaften, die sie hinsichtlich ihrer Handhabung grundlegend von Karton- und Papierverpackungen unterscheiden. Abhängig vom Inhalt können sie forminstabil und biegeschlaff oder auch biegesteif sein. Auch die Form richtet sich nach dem jeweiligen Sendungsinhalt und weist meist eine glänzend-reflektierende und unebene Oberfläche auf, was eine automatische Identifikation mit Barcodescannern oder anderen optischen Methoden erschwert [SSK21].

Durch ihre oft schwer zu definierende Gestalt und variierende Abmessungen, entstehen Probleme bei der automatisierten Verarbeitung, insbesondere bei der Sortierung, da Polybags meist zu groß für die Verarbeitung innerhalb von Briefsortern¹ und gleichzeitig jedoch zu klein für eine Sortierung auf Paketsortern ausfallen.

Die Sortierleistung von Paketsortern ist von vielen Parametern abhängig (bspw. Gutgewicht,- abmessungen) weshalb gleiche Sortertypen sehr unterschiedliche Leistungen in der Praxis erreichen können [JH12]. Dennoch lassen sich nach [JH12] die in Tabelle 1 gezeigten Leistungsbe- reiche identifizieren:

Tabelle 1. Leistungsklassen von Sortiersystemen [JH12]

Leistungsklasse	Durchsatz
Handsortierung	<1.000 [Stück/h]
Automatische Sortierung geringer Leistung (z.B. Abweiser, Puscher, Transfer)	1.000 - 5.000 [Stück/h]
Automatische Sortierung mittlerer Leistung (z.B. Dreharmsorter, Ringsorter)	5.000 - 10.000 [Stück/h]
Automatische Hochleistungssortierung (z.B. Kippschalen-, Schiebeschuh-, Quergurtsorter)	> 10.000 [Stück/h]

Die Sortierung von Sendungen nach betreiberspezifischen Kriterien (bspw. Sortierung nach Postleitzahl) ist der wesentliche Schritt im gesamten Sortiervorgang. Sie erfolgt in der Regel durch hochautomatisierte Anlagen, in denen die Sendung identifiziert und gemäß vordefinierter Kriterien auf verschiedene Endstellen (entsprechend den Postleitzahlen bzw. Postleitzahlengruppen) verteilt wird. Den herkömmlichen Förder- und Verteiltechnologien ist gemein, dass sie beträchtliche Flächen innerhalb eines Logistikzentrums einnehmen und nicht für die Verarbeitung von sehr leichten und kleinen Sendungen ausgelegt sind. Bei Tragelementen mit Spalten oder rotierenden Teilen besteht die Gefahr des Verklemmens oder des Einziehens von folienverpackten Sendungen in die Zwischenräume. Große Beschleunigungen und Geschwindigkeiten können ein Abheben von flachen und leichten Sendungen bewirken. Zudem müssen relativ große Massen an Fördertechnik (Totmassen) bewegt werden², was vor allem bei leichten

Sendungen zu einem Missverhältnis zulasten der Sendungsmasse führt. Dies spiegelt sich in hohen Investitions- und Betriebskosten der Gesamtanlage wider.

Megatrends, wie Urbanisierung und Individualisierung sowie das zunehmende Bewusstsein für grüne Technologien in der Gesellschaft führen auch bei immer mehr Logistikern zu unterschiedlichen Herausforderungen [Z_21]. Moderne Sortiersysteme weisen einen sehr hohen Platzbedarf auf und sind meistens in maximal zwei Ebenen realisiert. Aus den erwähnten Trends erwächst das bereits oben erwähnte stetige Wachstum der zu sortierenden Mengen, dem ein zusehends beschränkter Platz im urbanen Raum gegenübersteht. So sind Flächen für Logistikzentren nicht nur teuer und schwer verfügbar, sondern oft weit von den Stadtzentren entfernt, was wiederum zu erheblichen zusätzlichen Transportkosten auf der letzten Meile führt.

Vor dem Hintergrund der oben erwähnten Herausforderungen für die Sortierung von Kleinsendungen sind nun Technologien gefordert, welche energie- und platzeffizient, sowie zuverlässig und idealerweise auch skalierbar betrieben werden können. Eine solche Technologie stellt der am Institut für Technische Logistik (ITL) der TU Graz entwickelte FreeFallSorter (FFS) dar. Der neuartige Free-FallSorter arbeitet mit Hilfe eines einfachen und bewährten Fördertechnikprinzips – der Schwerkraftförderung. Unter Einwirkung der Gravitation bewegt sich das Sendungsgut von einer höherliegenden Einschleusung über vorgegebene Wege zu der geforderten Endstelle. Um diese zu erreichen, wird die Sendung durch spezielle mechanische Einrichtungen auf den entsprechenden Pfad gelenkt – die Grundidee folgt dem Prinzip des Entscheidungsbaums (s. dazu auch Abbildung 15). Dadurch soll der Sortiervorgang effizienter und für Sendungsarten wie den Polybags überhaupt erst zuverlässig möglich gemacht werden. Einen weiteren Vorteil stellt die vertikale Topologie dar, wodurch nur ein Bruchteil der Grundfläche bisheriger Sorterlösungen benötigt wird.

1.1 ENTWICKLUNG DER KEP – BRANCHE

In Zeiten der Globalisierung, Urbanisierung und Digitalisierung hat sich das Konsumverhalten innerhalb der breiten Masse der Bevölkerung immer weiter in Richtung e-commerce verlagert. Dazu kommt, dass mittlerweile der e-commerce sogar als Basis für sehr viele Geschäftsbereiche angesehen werden kann. Dies hat zur Folge, dass die

¹ Großbriefsortiermaschinen können Sendungen zwischen 10 und 1.100 g mit den Abmaßen einer Postkarte bis hin zu eingeschweißten Magazinen verarbeiten und erreichen Sortierleistungen von bis zu 27.000 #/h [JH12]. Mixed Mail Sorter sind geeignet für Sendungen in der Größe von 127 x 89 mm bis 355 x 254 mm bei Dicken von 0,19 bis 13 mm und Gewichten von bis zu einem Kilogramm [JH12].

² Verglichen mit dem durchschnittlichen Gewicht der Sendungen in Logistikzentren sind Sortiersysteme wie Quergurt- oder Kippschalensorter besonders spezifisch schwer (ca. 100 kg/m). Daher verbrauchen moderne Sortiersysteme einen Großteil der Energie nur zum Ausgleich der v.a. Reibungsverluste durch die Fahrbewegung innerhalb der Maschine (mehr als 95%) und nicht für die eigentliche Aufgabe des Transports der zu sortierenden Sendung.

Sendungsvolumina im aufstrebenden Internethandel die logistischen Prozesse und Objekte immer weiter vor neue Herausforderungen stellen [EK20].

Nicht zuletzt durch die vorherrschende Pandemie hat sich gezeigt, welchen Stellenwert die KEP - Branche für die Gesellschaft hat bzw. in Sonderfällen zusätzlich einnehmen kann bzw. muss. Durch die Schließung des Einzelhandels innerhalb der Lockdowns nahm der e-commerce stark zu, was sich dementsprechend auf die Sendungszahlen innerhalb der KEP - Branche (insbesondere der B2C Sparte) niederschlug. Bereits vor dem Krisenjahr 2020 konnte die KEP - Branche auf ein stetiges Wachstum zurückblicken (s. Abbildung 1). Innerhalb der KEP Studie 2020 [EK20] wurden verschiedenste Szenarien hinsichtlich der Entwicklung der Sendungszahlen für das Krisenjahr 2020 aufgezeigt. Dabei wurde innerhalb des optimistischsten Szenarios ein Wachstum des Sendungsvolumens in Deutschland von 4,2% vorausgesagt [EK20]. Das tatsächliche Wachstum 2020 beträgt nach [EK21] jedoch 10,9%, was alle Erwartung und Forecasts bei weitem übertrifft.

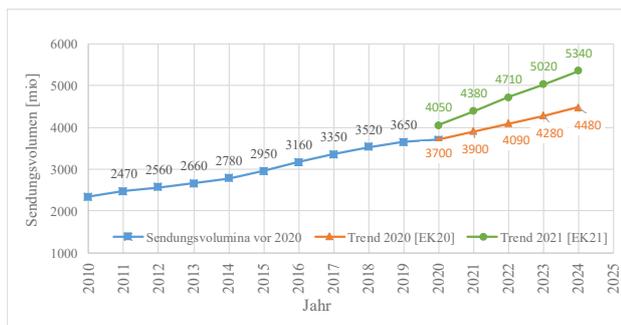


Abbildung 1. Szenarien für die Entwicklung der KEP-Versandmengen in Deutschland bis 2024 [EK20], [EK21]

Kurze Lieferzeit, kostenloser Versand und Retoure und das überbordende Angebot verschiedenster (schnelllebigere) Produkte führen zusehends zu Einzelartikelbestellungen. Viele davon sind zu groß für den klassischen Briefsorter, aber zu klein für die Sorter aus dem Paketbereich [Si21]. Statistiken, die einen Zusammenhang zwischen Eigenschaften der Sendungen (Größe) und deren Volumen am Markt aufzeigen, lassen sich nach derzeitigem Wissensstand nur über Umwege abschätzen. [SSK21] beschreibt, dass es unter anderem aufgrund der fehlenden Definition von Kleinsendungen, keine detaillierten Zahlen hinsichtlich deren Anteils in der KEP - Branche im deutschsprachigen Raum gibt. Einzig über die Einfuhrinformationen von Sendungen aus dem Ausland über den Zoll, sog. low value consignments³, lassen sich ungefähre Zahlen von möglichen Kleinsendungen, zu denen auch der Polybag gehört,

³ Da Sendungen aus dem e-commerce einen verhältnismäßig geringen Wert (44% unter 25€ [WI19]) besitzen, sind diese meist (noch) von Mehrwertsteuern befreit. Aus diesem Grund werden Sendungen dieser Art oft auch als „low value consignments“ bezeichnet. Um den Zoll von der Prüfung kleiner Pakete zu entlasten und damit den Transit von Waren mit geringem Wert, die per Post in die EU-Mitgliedstaaten eingeführt

abschätzen (s. Abbildung 2). Aus diesem Grund kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht exakt beziffert werden, wie hoch der Anteil der Kleinsendungen in Statistiken wie in Abbildung 1 tatsächlich ist.

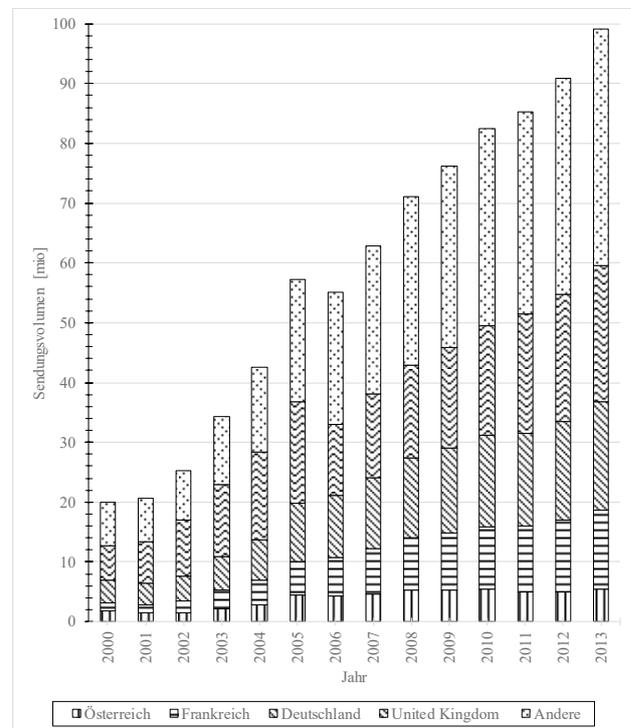


Abbildung 2. Gesamtvolmen der internationalen Kleinsendungen mit Ursprung außerhalb der EU [Eu15]

Endvergütungen, die von Postdienstleistern aus Schwellenländern zu entrichten sind, sind nach der Definition des Weltpostvereins (UPU) relativ niedrig im Vergleich zu den Vergütungen in den Zielländern [WI19]. Dieses Szenario hat zu einem erheblichen Wachstum des Volumens an Kleinsendungen aus dem Ausland in die EU-Mitgliedstaaten geführt, wie in Abbildung 2 dargestellt. Laut [WI19] landen die Importe aus dem e-commerce stets bei den jeweiligen nationalen Universaldienstleistern (USPs). Aufgrund des geringen Wertes dieser Sendungen kann der Schluss versucht werden, dass es sich beim Großteil der in Abbildung 2 dargestellten Volumina von eingeführten Sendungen um verhältnismäßig kleine geometrische Abmaße handelt.

Im Jahresbericht 2020 der Schweizer Post [Sc21] ist ein Gesamtvolumen von 95.000 verarbeiteten sogenannten Kleinwarensendungen pro Tag (~30 Mio. pro Jahr) angegeben, wobei dabei gut drei Viertel aus dem asiatischen Raum stammen. Alleine durch die Tatsache, dass die

werden, zu beschleunigen, gibt es bis Juli 2021 eine optionale Mehrwertsteuererleichterung. Die administrative Entlastung wird auch als low value consignments Relief (LVCR) bezeichnet und ist in der EU-Ratsrichtlinie 2009/132/EG Eu09 ausgeführt.

Schweizer Post rund 70 Mio. Franken in die Realisierung und Integrierung neuer Anlagen und Strukturen investiert um diesem enormen Wachstum von Kleinsendungen gerecht zu werden [Sc21], lässt sich erahnen, welche wichtige Rolle Kleinsendungen wie der Polybag mittlerweile für die Postdienstleister spielen. Obwohl innerhalb von [Sc21] nicht angegeben wird, welche Art von Sortiertechnik neu angeschafft wurde, kann dennoch aus dieser hohen Investition abgeleitet werden, dass die bestehenden Sortiersysteme für klassische Pakete diese Masse an Kleinsendungen nicht bewältigen können und somit neue, an die Eigenschaften der Kleinsendung angepasste Sortiertechnik angeschafft wird.

1.2 BESCHREIBUNG DES POLYBAGS

Für die Auswahl und auch für die Entwicklung eines Sortiersystems spielen gutspezifische Eigenschaften eine wesentliche Rolle, um die geforderte Performance (z.B. Durchsatz) erreichen zu können [JH12]. Diese müssen für ein zielführendes Requirements Engineering hinreichend bekannt sein.

Für Kartonpakete gibt es bereits zahlreiche Normen und technische Vorschriften wie bspw. [DIN05], welche die grundlegenden geometrischen Abmaße regelt. Des Weiteren gibt es eine Vielzahl an Quellen, welche sich mit dem Verhalten der Kartonpakete innerhalb der verschiedensten Verarbeitungsschritte beschäftigen. Relevant davon ist v.a. [Th96] hinsichtlich dem Reibverhalten von Kartontage.

Für Kleinsendungen in Kunststofftüten gibt es jedoch nur wenige relevante Vorschriften und Normen, die für die Geräteentwicklung bedeutsam sind⁴. Eine erste grobe Definition mit den dazugehörigen Beschreibungen der charakteristischen Eigenschaften dieses speziellen Sendungstyps beschreibt [SSK21] und führt zudem den Begriff Polybag als Überbegriff für kunststoffverpackte Kleinsendungen ein. Nachfolgend soll ein Auszug der grundlegendsten Eigenschaften von Polybags auf Basis der Erkenntnisse von [SSK21] aufgezeigt werden.

Als Polybag definiert [SSK21] forminstabile Verpackungen, wie sie oft im e-commerce verwendet werden. Die klaren Vorteile von Polybags sind die Briefkastentauglichkeit, ein höherer Raumnutzungsgrad im Pulk (s. Abbildung 3) und der geringe Stückpreis im Vergleich zu Kartonverpackungen.

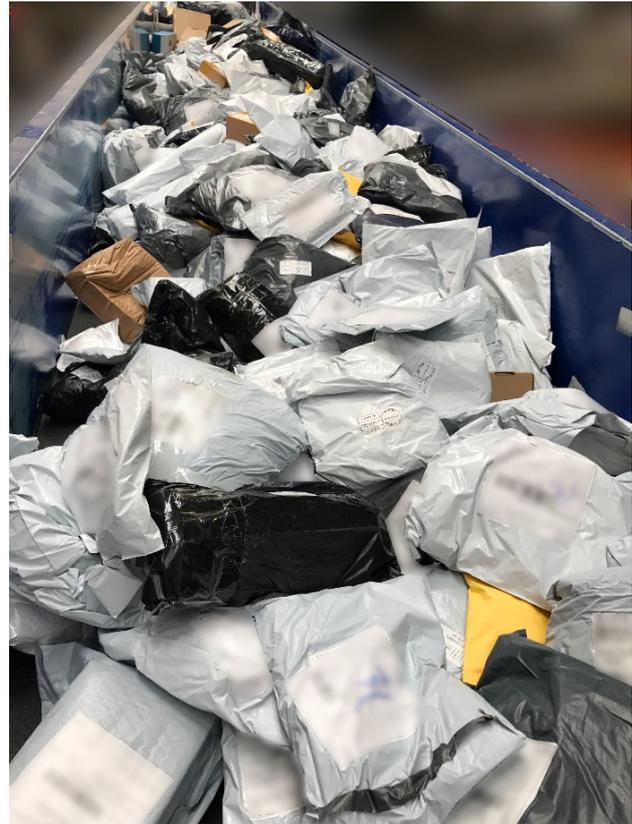


Abbildung 3. Polybags im Pulk vor der Vereinzelung [SSK21]

Einer der wesentlichsten Unterschiede zwischen Kartonpaketen und Polybags ist die Form- bzw. Lagestabilität. Formstabile Sendungen wie Kartonpakete verändern ihre Abmaße bei Kontakt mit logistischen Maschinenstrukturen nicht. Kommt es dennoch zu einer Formänderung eines sechsseitigen Kartonpaketes (bspw. Stauchung oder Quetschung), führt dies in den meisten Fällen zur Beschädigung der Sendung und eventuell des Inhaltes. Im Gegensatz dazu sind Polybags meist biegeschlaff (oft mit integrierter Luftpolsterfolie) und somit verformbar, wodurch sie durchaus als forminstabil beschrieben werden können. Des Weiteren führen Verformungen von Polybags meist nicht unbedingt zu einer Beschädigung der Sendung bzw. des Inhaltes. Polybags nehmen sehr oft die Form ihres Inhaltes an. Dadurch können geometrische Formen entstehen, welche zusätzliche Bewegungen wie Rollen oder Kippen innerhalb der Verarbeitung dieser Sendungen hervorrufen. Tabelle 2 zeigt Beispiele für verschiedene geometrische Formen [SSK21].

⁴ e-commerce – Sendungen, karton- oder kunststoffverpackt, einschließlich Sendungen mit geringem Wert, sind oft keine Briefsendungen und werden gelegentlich als Mischpost bezeichnet und sind damit weder als Brief noch als Paket definiert [Si21]. Tatsächlich gibt es nicht einmal einen durchgängigen eigenen Begriff für solche Sendungstypen. Dies

führt u.a. dazu, dass grundlegende Eigenschaften der Sendungen und deren Interaktion mit logistischen Maschinen und Geräten nur bedingt beschrieben sind.

Tabelle 2. Beispiele für mögliche geometrische Ausprägungen von Polybags [SSK21]

Form	Beispiele		
kubisch			
flach			
zylindrisch			
konvex/ konkav			
andere			

Neben der Untersuchung von Live-Mail⁵ wurden Daten aus den Ausschreibungen und Lastenheften von drei verschiedenen Logistikdienstleistern, die neue Sortiertechnologien anschaffen wollen, innerhalb der Untersuchungen von [SSK21] herangezogen. Diese beschreiben unter anderem die Sendungsgrößen und das Gewicht, die eine Maschine verarbeiten können muss. Die Daten beruhen auf mehr als 60 Millionen Sendungen, die zu diesem Zweck von den Maschinenherstellern selbst ausgewertet wurden [SSK21]

Tabelle 3. Übersicht der grundlegenden Eigenschaften der Polybags [SSK21]

Eigenschaft	Charakteristik					
	Minimum		Maximum		Durchschnitt	
Länge	60 mm		420 mm		240 mm	
Breite	60 mm		420 mm		180 mm	
Höhe	5 mm		200 mm		40 mm	
Gewicht	20 g		2000 g		300g	
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	

⁵ Sendungen, welche am Markt zwischen Sendern und Empfängern im Umlauf sind.

Die Daten werden zur weiteren Gegenprüfung und Feinabstimmung der Reichweite der einzelnen Eigenschaften verwendet. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht mit den Ergebnissen zu Abmessungen, Gewicht, den Eigenschaften der Verpackungsmaterialien und verschiedenen Formen von Polybags.

1.2.1 VERARBEITUNG VON POLYBAGS AM BEISPIEL DER ÖSTERREICHISCHEN POST AG

Aus den Angaben der Tarife der Österreichischen Post AG, lässt sich ein vorsichtiger Blick in die operative Behandlung der Sendungen ableiten. In jeder der drei Sendungstarkategorien (s. Tabelle 4) findet sich der oben definierte Polybag wieder. Es kann nun zum Beispiel durchaus angenommen werden, dass eine Sendung, welche als Brief aufgegeben wird, nicht unbedingt innerhalb eines Paketverteilzentrums verarbeitet wird. Dadurch lassen sich u.u. zumindest grob die Sendungsströme durch die Strukturen der Logistikanbieter abschätzen.

Tabelle 4. Zusammenfassung der Tarife der Österreichischen Post AG [Ös21]

Bezeichnung	zul. Abmaße	zul. Gewicht
Brief	L 235 x B 162 x H 5 mm	20 bis 75 g
Päckchen	L + B + H < 900 mm bei Rollen: L + 2 x D < 900 mm (max. Ausdehnung 500 mm)	bis 2 kg
Paket	L 100 x B 60 x H 60 cm	bis 31,5 kg

Daraus kann wiederum geschlossen werden, dass der Polybag mit Maschinenstrukturen innerhalb der Verarbeitung in Logistikzentren in Kontakt kommt, welche nicht annähernd auf die charakteristischen Eigenschaften dieses Sendungstyps ausgelegt sind bzw. existieren diese nach den Beobachtungen oben gar nicht. Praxisbeobachtungen der Sortierung von Polybags auf Quergurtsortern mittels Tablaren u.ä. untermauern diese Vermutung.

Man könnte vorsichtig vermuten, dass Postdienstleister derzeit noch keinen dezidierten Workflow hinsichtlich des Umgangs mit den Polybags besitzen, wodurch ebenfalls daraus geschlossen werden könnte, dass keine an die Eigenschaften des Polybags angepasste Maschinenstruktur existiert. V.a. die Neuartigkeit dieser Sendung, gepaart mit den langen Entwicklungs- und Betriebszyklen der Branche rechtfertigen diese Vermutungen.

1.3 BESONDERHEITEN INNERHALB DER VERARBEITUNG VON POLYBAGS

Aus den Darstellungen von [SSK21] lassen sich die grundsätzlichen Herausforderungen, welche bei der Verarbeitung von Polybags im Vergleich zu sechsseitigen Kartonpaketen entstehen in unterschiedliche Herausforderungen eingliedern, welche anschließend den jeweiligen verursachenden Merkmalen der Polybags zugeordnet werden können (s. Tabelle 5). Zusätzlich werden zu jeder Herausforderung beobachtbare Effekte mit angeführt, welche innerhalb der Verarbeitung von Polybags an bereits bestehenden Sortiersystemen beobachtet werden konnten. Aus diesem Pool an Herausforderungen können nun verschiedene Anforderungen an das zu entwickelnde Sortiersystem abgeleitet werden. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die derzeit beobachtbaren Effekte aus Tabelle 5 innerhalb einer Neuentwicklung bereits von Beginn an berücksichtigt werden (s. 2.1).

Tabelle 5. Abstrahierung der Systemanforderung auf Basis von bestehenden Herausforderungen

Herausforderungen	verursachendes Merkmal der Polybags	Beobachtbarer Effekt innerhalb der Verarbeitung	Anforderung an neues Sortiersystem
"Verlieren" der Sendung innerhalb der Verarbeitung	geringe Masse	Hängen bleiben in Maschinenteilen	Vermeidung von Zwischenräumen, Spalten, scharfen Kanten
	undefinierte geometrische Form	unkontrolliertes Abheben der Sendung	geschlossene Bauweise
		ungewolltes Rollen oder Kippen	keine Bewegungen des Systems welche einen stillen Stand der Sendung erfordern
	maschinelle Lesbarkeit der Label	undefinierte geometrische Form	keine definierten Außenkanten
unebene Oberfläche			
biegeschlaffes Verhalten		geringer Kontrast	
Kontrolle/Regelung Dynamik der Polybags	geringe Masse	unkontrolliertes Abheben der Sendung (z.B beim Beschleunigen)	keine Prozessschritte welche geregelt die Dynamik der Sendung beeinflussen
		undefinierte geometrische Form	

Wie in 1.4 angeführt, befindet sich einzig die „Verteilung“ innerhalb der Systemgrenzen der hier beschriebenen Entwicklung, wodurch die Herausforderung „Maschinelle Lesbarkeit der Labels“ nur bedingt eine Rolle spielt und somit derzeit nur die in Tabelle 5 angeführten Herausforderungen „Verlieren der Sendung innerhalb der Verarbeitung“ und „Kontrolle/Regelung Dynamik der Polybags“ weiter berücksichtigt werden. Auch wenn die Darstellung der Herausforderungen innerhalb der Verarbeitung von Polybags in dieser Arbeit sehr allgemein gehalten wurde, lässt sich aus den in Tabelle 5 abstrahierten Systemanforderungen erkennen, dass die Funktionsstruktur von State-of-the-Art Sortern, wie Quergurt- oder Kippchalensortern, nur bedingt diesen Anforderungen gerecht

werden kann, wodurch eine Neuentwicklung eines Sortiersystems für Polybags wiederum gerechtfertigt ist.

1.4 DEFINITION EINES SORTIERSYSTEMS – FESTLEGUNG DER SYSTEMGRENZE

Sortiersysteme lassen sich nach [JH12] grundsätzlich mittels fünf verschiedener Funktionen beschreiben (s. Abbildung 4). Diese Funktionen beschreiben genau genommen eigentlich die sogenannte Sortieranlage. Erst durch Hinzufügen von zusätzliche Funktionen wie Betriebsstrategie, Organisation und Steuerung entsteht nach [JH12] das Sortiersystem. Da diese Funktionen nur bedingt Einfluss auf die Entwicklung der neuen physischen Maschinenstrukturen haben, werden diese nicht weiter berücksichtigt. Des Weiteren werden die Systemgrenzen der Entwicklung um die Kernfunktion Verteilung gelegt, und von einer identifizierten und vereinzelt Sendung ausgegangen.

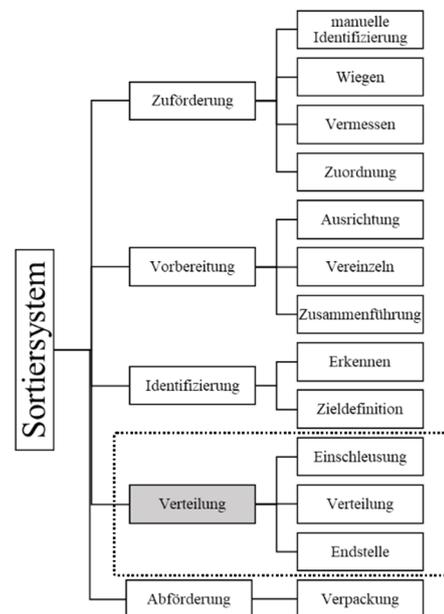


Abbildung 4. Funktionen eines Sortiersystems nach [JH12]

1.5 ÜBERGEORDNETE ZIELE

Aus den Darstellungen von [SSK21] und jenen von oben kann geschlossen werden, dass der Polybag eine Vielzahl an Herausforderungen (s. 1.3) mit sich bringt, welche im Detail bei den meisten State-of-the-Art Sortiersystemen innerhalb der Entwicklung nicht im Detail berücksichtigt werden. Ziel ist es daher die Entwicklung und Konstruktion

eines neuen Verteilförderers⁶ in einem Sortiersystem und die Ableitung der wesentlichsten Einsatzparameter für die Sortierung von sogenannten Polybags.

Des Weiteren werden folgende grundlegende Anforderungen, welche im Vergleich zu State-of-the-Art Systemen stehen, an die Entwicklung gestellt:

- geringer regelungstechnischer Aufwand
- geringer Flächenbedarf
- hohe Energieeffizienz bei niedrigem Gesamtenergieverbrauch
- breitestmögliche funktionale Absicherung der Entwurfsqualität durch virtuelle Produktentwicklung
- Bereitstellung von Konstruktions-Know-how durch methodische Konstruktion für anpassbare Variantenkonstruktionen und Ableitung einer anwenderfreundlichen analytischen Durchsatzberechnung

2 METHODEN

Das in Abbildung 5 angeführte Prozessschaubild zeigt die außerordentlich wichtige Rolle der analytischen und numerischen Werkzeuge innerhalb der Produktentwicklung und deren Eingliederung in den Entwicklungsprozess des Sortiersystems. Insbesondere durch den Einsatz der numerischen Werkzeuge entsteht ein zeitgemäßer (virtueller) Produktentwicklungsprozess.

2.1 METHODISCHE KONSTRUKTION DES SYSTEMS

Die Konstruktion des Systems lehnt sich an die [VDI 2221] an und verläuft auf Grund der Neuartigkeit der Lösung hochgradig innovativ. Die einzelnen Bearbeitungsschritte sind hier nicht dargestellt, um den virtuellen Methoden Raum zu überlassen.

Auf Basis der in 1. Dargestellten Erkenntnisse werden folgende Anforderungen für die Neukonstruktion definiert.

- Analyse bestehender Systeme und deren Schwachstellen (z.B. Quergurtsorter usw.) bei der Polybagverarbeitung auf Basis von Beobachtungen des laufenden Betriebs (s. Tabelle 5)

- Festlegung eines Durchsatzbereichs von 5.000 – 10.000 Stück/h (mittlerer Leistungsbereich) aufgrund der Erkenntnisse aus 1.1 ff und den Darstellungen von [JH12]
- Berücksichtigung der speziellen Eigenschaften von Polybags – Details in 1.2 mit Tabelle 2, Tabelle 3 und Tabelle 5
- Berücksichtigung der Ziele aus 1.5 und Überführung in bewertbare Kriterien

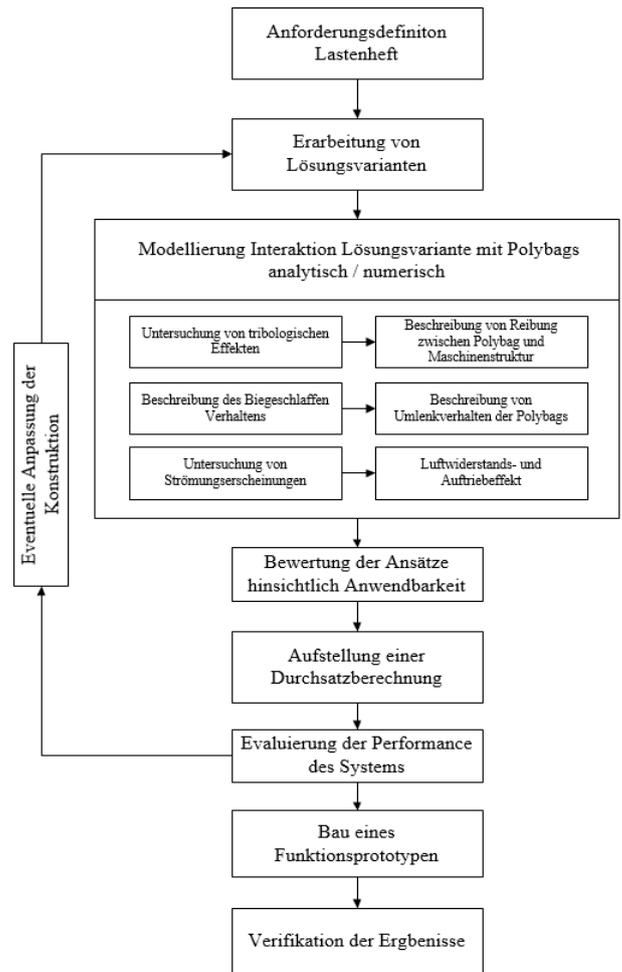


Abbildung 5. Ablaufdiagramm der methodischen Konstruktion des Sortiersystems

Die aus dem Entwicklungsprozess aus Abbildung 5 resultierenden Lösungsvarianten fokussieren alle einen Sortierprozess auf Basis des Grundprinzips Schwerkraftförderung. Insgesamt wurden vier Varianten mit unterschiedlicher Aktorik und Sensorik bei den Entscheidungspunkten des in Abbildung 15 dargestellten Entscheidungsbaums entwickelt. Iterationen bzw. Entscheidungen

⁶ Nach Definition von [JH12] handelt es sich bei dem zu entwickelnden System um einen Verteilförderer. Der Begriff „Sorter“ ist jedoch die in der Praxis geläufigere Bezeichnung.

hinsichtlich Weiterverfolgen bzw. Verwerfen von Lösungsvarianten werden auf Basis der Erkenntnisse aus Tabelle 5 und den Kriterien aus den in 1.5 dargestellten Zielen getroffen. Zur Bewertung des Durchsatzes einzelner Lösungsvarianten werden die minimal erreichbaren Schaltzeiten der im Entscheidungsbaum verbauten Mechanik herangezogen. Grundlage für diese Durchsatzberechnungen ist das in 4.2 beschriebene Betriebsszenario.

Folgend werden als Hauptteil der vorliegenden Arbeit die Ansätze und Ergebnisse der virtuellen Produktentwicklung dargestellt. Schwerpunkt ist dabei die Modellierung der signifikanten physikalischen Effekte welche aus der Interaktion des Polybags mit einer dementsprechenden Lösungsvariante⁷ resultieren.(s. Tabelle 6).

2.2 SIMULATION VON POLYBAGS

Um die durch die jeweilige Maschinenstruktur durchlaufende Sendung zielgerichtet beschreiben zu können, werden im ersten Schritt die wesentlichsten physikalischen Effekte ermittelt und dementsprechende Einflussparameter identifiziert (s. Tabelle 5).

Tabelle 6. Auswahl der möglichen Modellierungsarten von verschiedenen physikalischen Effekten

		Mögliche Modellansätze	
Physikalischer Effekt	Einflussparameter	analytisch	numerisch
Reibung	Material der in Kontakt stehenden Körper	Coloumb [Po09]	Mehrkörpersimulation (MKS) mit MSC ADAMS
	Masse der Sendung	Hertz [Po09]	Diskrete Elemente Methode (DEM)
	Geometrie der Sendung/ Maschinenstruktur	Burger [CH20]	
Strömungseffekte	Geschwindigkeit Sendung	Standard Ansätze für Luftwiderstand, Auf- und Abtrieb	Strömungssimulation mittels CFD (Ansys fluent)
	Geometrie der Sendung/ Maschinenstruktur		
elastischer Stoß	Material der in Kontakt stehenden Körper	Standard Ansätze für elastischen Stoß	Mehrkörpersimulation mit MSC ADAMS
	Masse der Sendung		Flex-MKS
	Geschwindigkeit Sendung		Diskrete Elemente Methode (DEM)
	Geometrie der Sendung/ Maschinenstruktur		

Physikalische Effekte, denen bereits im Vorfeld eine geringe Relevanz zugesprochen werden kann, werden nicht weiterverfolgt (bspw. Adhäsion). Dadurch können verschiedene Modellierungsarten (analytisch und numerisch) verfolgt und weiteres hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf die Problemstellung evaluiert werden. Tabelle 5 zeigt den Zusammenhang zwischen physikalischem Effekt, den dazugehörigen Einflussparametern und den möglichen Modellierungsarten.

Die tatsächlich weiter verfolgten Modellansätze sind in Tabelle 6 dargestellt. In einigen Fällen können Ansätze aufgrund der hochvariablen Geometrie der Sendung nur exemplarisch umgesetzt werden, bzw. benötigten begleitende Laborversuche⁸.

2.2.1 GEOMETRIE - MODELLBILDUNG

Wie in Tabelle 5 gezeigt, stellen detaillierte Informationen hinsichtlich der Geometrie der Polybags oft einen wesentlichen Einflussfaktor auf verschiedene physikalische Effekte innerhalb der Verarbeitung dar. Aus diesem Grund können verschiedene 3D Modelle von Polybags insbesondere für CFD⁹ Simulationen als Basis angesehen werden. Es gibt eine Vielzahl an Möglichkeiten, reale Körper in virtuelle 3D Modelle überzuführen. Dennoch wurde versucht, möglichst einfach und effizient die Geometrie der Polybags zu bestimmen.

Dazu hat sich die Photogrammetrie als am besten geeignetes Werkzeug herausgestellt. Mit einfachem und breit verfügbarem Equipment (Handykamera und PC) und der Möglichkeit Freeware für die Erstellung und Nachbearbeitung zu verwenden, liefert diese sehr gute Ergebnisse für die Modellierung komplexerer Geometrien. Mit der Open-Source Software Meshroom von AliceVision [A120] und einer Handy-Kamera wird ein grobes Modell generiert und in der 3D Allrounder-Software Blender [B121] (ebenfalls Open Source) nachbearbeitet. Der finale Flächenkörper aus Blender wird im nächsten Schritt in PTC Creo Parametric [Pa21] importiert, skaliert und in einen Volumenkörper (Schale mit einer Dicke unter 1 mm) umgewandelt. Abschließend wird das Modell um einen Dummy-Körper in Form eines Quaders, der den Inhalt des Polybags darstellen soll, ergänzt. [Ha21]

⁷ Unter „Interaktion des Polybags mit einer Lösungsvariante“ wird das Durchlaufen der Sendung durch die Struktur der jeweiligen Lösungsvariante verstanden.

⁸ Beispiele dafür sind erweiterte Ansätze zur Beschreibung der vorherrschenden Tribologie (Ansatz nach Burger [CH20] oder Hertz [Po09]): All diese Ansätze benötigen eine detaillierte Beschreibung des Kontak-

tes, insbesondere der Oberfläche der Reibungspartner als auch der Kontaktfläche. Diese Parameter sind von einem biegeschlaffen Körper wie dem Polybag jedoch nur durch weitreichende Versuche ermittelbar. Aufgrund der großen Diversität der Polybags sind diese Ansätze nicht in einer verallgemeinerten Form anwendbar.

⁹ CFD...computational fluid dynamics

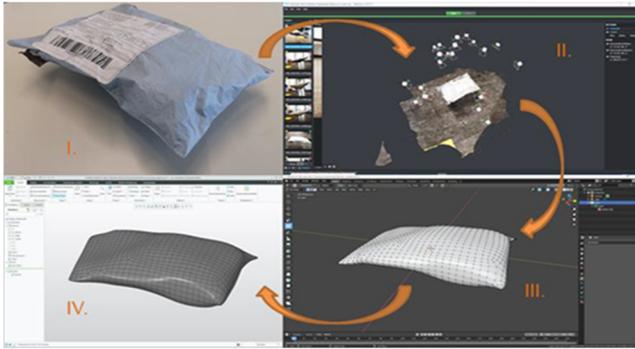


Abbildung 6. Ablauf der Erstellung von Polybaggometrien [Ha21]

In Abbildung 6 sind die einzelnen Prozessschritte von den ursprünglichen Fotos bis hin zum fertigen CAD-Modell dargestellt. Darin sind das Polybag I. als Foto, II. in alicivison Meshroom, III. in Blender und IV. in Creo dargestellt. Das daraus resultierende CAD-Modell ist zudem in Abbildung 7 als Gittermodell dargestellt.

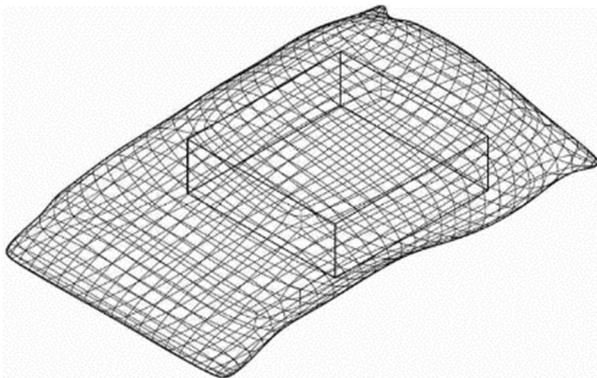


Abbildung 7. Gittermodell eines Polybags mit angedeutetem Inhalt [Ha21]

2.2.2 MKS – KUGELMODELL

Das biegeschlaife Verhalten von Polybags kann als wohl wesentlichste Charakteristik dieses Sendungstyps angesehen werden, welche gleichzeitig die größte Herausforderung innerhalb der Verarbeitung aber auch innerhalb der Modellierung und Simulation mit sich bringt. Physikalische Effekte wie Reibung hängen stark mit der jeweilig ausgebildeten Kontaktfläche und des damit verbundenen Kontaktdrucks ab, weshalb bspw. Reibung zwischen einem Polybag und einer Maschinenstruktur nicht ohne rechnergestützte Hilfsmittel im Detail beschrieben werden kann. Dynamische Effekte wie bspw. ein Stoß zwischen Polybag und Maschinenstruktur sind ebenfalls ohne numerische Hilfsmittel nur experimentell beschreibbar. Aus diesem Grund wird ein Weg verfolgt, das biegeschlaife Verhalten des Polybags unter Berücksichtigung der vorherrschenden Reibung und realitätsnahem Stoßverhalten sowie eines massebehafteten Sendungsinhalts zu modellieren.

Es wird ein Modell eines Luftpolster-Polybags vorgestellt. Dieses ist dadurch gekennzeichnet, dass das Grundmaterial, eine Luftpolsterfolie, aus einer Vielzahl aneinandergereihter, mit Luft gefüllter Ellipsen besteht. Auf Basis dieser Beobachtung wird der Modellierungsansatz abgeleitet, die Folie mittels Kugeln innerhalb einer MKS Umgebung nachzubilden. Das Modell selbst unterteilt sich weiteres in eine obere und untere Beutelschicht welche an den Kanten verbunden wird und so schlussendlich die Grundform des Beutels entsteht. In Abbildung 8 wird die Geometrie des Modells in Draufsicht dargestellt. Die matrixförmig angeordneten Kugeln repräsentieren die luftgefüllten Ellipsen und sind durch die drei Parameter r_{Sphere} , x_{Number} und y_{Number} definiert. Durch Modifikation der Werte dieser Variablen im Skript zur Generierung des Beutel-Modells kann somit eine rasche Skalierung auf verschiedene Sackgrößen erfolgen [Ro19].

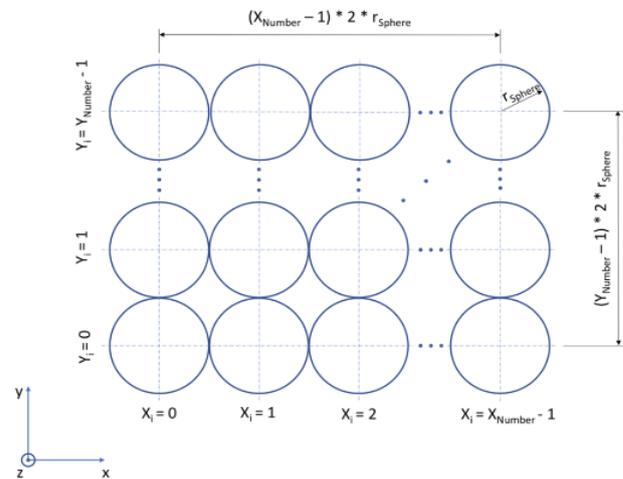


Abbildung 8. Modellaufbau einer Beutelschicht [Ro19]

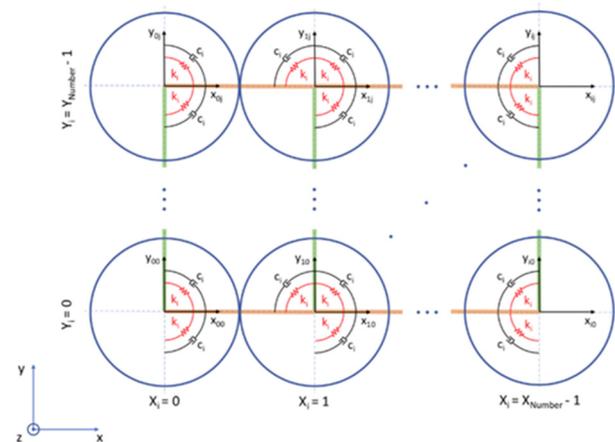


Abbildung 9. Modellierung des biegeschlaifen Verhaltens mit Hilfe von Bushing [Ro19]

Zur Modellierung des biegeschlaifen Verhaltens werden zwischen den Stäben und den einzelnen Kugeln sogenannte Bushings platziert. Mit Hilfe dieser Bushings kann eine sphärische Verbindung mit in allen Achsrichtungen

wirkenden rotatorischen Feder (k_i) – Dämpfer (d_i) Elementen implementiert werden (s. Abbildung 9). Durch eine auf physischen Versuchen basierender Parametrisierung dieser Feder - Dämpfer Elemente wird das biegeschlaaffe Verhalten in erzielt.

Um eine realitätsnahe Form des Polybags zu erhalten, wird das zuvor modellierte „leere“ Beutelmodell mit einem einfachen Quader befüllt. Zwischen Beutel und Inhalt werden reibungsbehaftete Kontaktbedingungen zwischen den Kugeln des Beutelmodells und dem Quader implementiert. Dadurch kann auch ein mögliches Verrutschen des Inhaltes während der Bearbeitung der Sendung realitätsnah simuliert werden. Des Weiteren entsteht daraus eine Geometrie des Polybags, die direkt mit der Geometrie des Inhaltes zusammenhängt (s. Abbildung 10). Aus diesem Grund sind keine Maßnahmen zur Bestimmung der Geometrie wie in 2.2.1 gezeigt notwendig, da sich die Geometrie durch die beschriebene Vorgehensweise innerhalb der Modellierung ergibt. [Ro19]

Neben einem Modellaufbau mit Hilfe einzelner Kugeln (s. Abbildung 10 oben) wurden auch Modelle aus Ellipsoiden (s. Abbildung 10 unten) nach derselben Vorgehensweise aufgebaut. Es hat sich jedoch gezeigt, dass ein reibungsbehafteter Kontakt zwischen den einzelnen Ellipsoiden zur Umwelt (bspw. der Rutsche) und zum Inhalt des Polybags die Simulationszeit um ein Vielfaches erhöht. Da die Abbildungsqualität bei beiden Ansätzen nahezu ident ist, wird das Ellipsoid Modell wieder verworfen. Die daraus entstandenen Polybag-Modelle werden anschließend in einem einfachen Umlenkversuch eingebettet (s. Abbildung 11). Zielgröße ist dabei die Durchlaufzeit (von Punkt A nach Punkt B des Polybags durch die Umlenkung. Validiert wurde der Versuch mittels eines einfachen Prüfstandaufbaus (s. Abbildung 13). Die Ergebnisse der MKS Simulationen des Kugelmodells sind in 3.2.1 ersichtlich.

Weiteres wird ein Regressionsmodell auf Basis von Latin Hypercube Sampling¹⁰ aufgestellt und hinsichtlich seines Verhalten innerhalb des unstetigen Prozesses der Umlenkung untersucht. Das daraus entstehende Regressionsmodell schätzt auf Basis von bestehenden Simulationsergebnissen, Ergebnisse weiterer Parameterkombinationen mit Hilfe von Interpolationen ab, wodurch Simulationdurchläufe „gespart“ werden können und vor allem die langen Rechenzeiten vermieden werden. Dadurch kann mit Verhältnismäßig wenigen Simulationen der Erkenntnisgewinn stark gesteigert werden. Eine Anwendung dieses Modells findet sich in Sensitivitätsanalysen innerhalb des Konstruktionsprozesse. Weiteres ist es durchaus vorstell-

bar das Regressionsmodelle des FFS direkt in die Steuerung integriert werden, wodurch bereits vor dem tatsächlichen physischen Sortiervorgang das Verhalten der jeweiligen Sendung abgeschätzt werden kann („predictive sorting“). Dadurch könnten bspw. Sendungen welche u.u. Probleme in der Verarbeitung hervorrufen würden, bereits im Vorfeld ausgeschleust werden.

Die Ergebnisse der Durchlaufzeiten auf Basis des Regressionsmodells sind ebenfalls in 3.2.1 dargestellt.

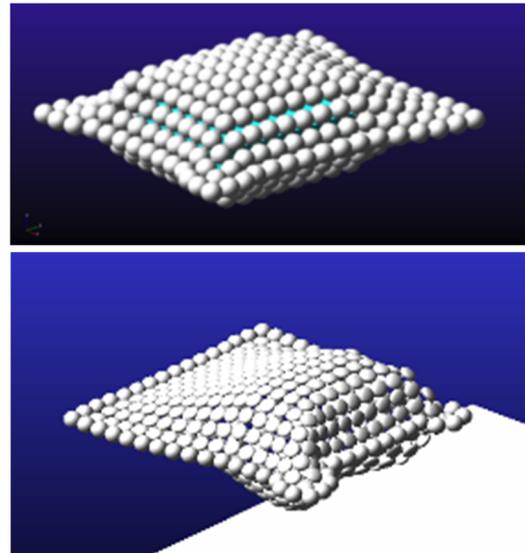


Abbildung 10. MKS Modell eines Polybags in MSC.Adams/View

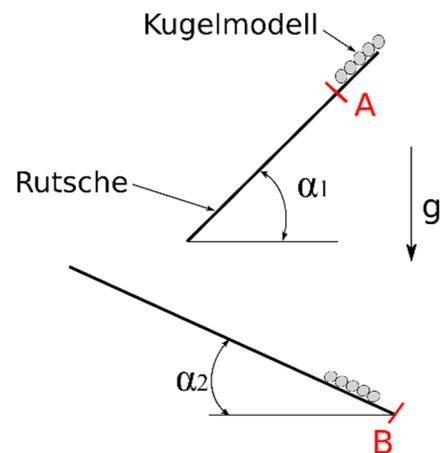


Abbildung 11. Darstellung des Gesamtmodells (Polybag + Umgebung) in Anlehnung an den Versuchsaufbau aus Abbildung 13 [Ro19]

¹⁰ Latin Hypercube Sampling ist eine Methode aus der Statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments) zur Erzeugung von mehrdimensionalen Versuchsplänen welche die Basis für die Erstellung von Regressionsmodellen darstellen [SBH17].

2.2.3 CFD – SIMULATION

Insbesondere bei dynamischen Vorgängen innerhalb der logistischen Verarbeitung vom Sendungstyp Polybag (bspw. Ein-/Ausschleusungen, Bewegungen auf Rutschen, usw.) kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der verhältnismäßig kleinen Masse der Sendung eine Beeinflussung aufgrund von Strömungserscheinungen auftreten kann. Um diese Beeinflussung im Detail bewerten zu können, wird ein CFD Model eines Polybags in Ansys fluent [AN21] aufgebaut und ausgewertet. Im Vordergrund stehen dabei nicht spezifische Ergebnisse von Luftwiderstand (drag) oder Auf- bzw. Abtrieb (lift) des Polybags, sondern vielmehr der Einfluss dieser Effekte bei Variierung grundlegender vom jeweiligen logistischen Prozess getriebener Parametern (bspw. Anströmrichtung). Die Ergebnisse werden in der analytischen Durchsatzberechnung des Systems berücksichtigt.

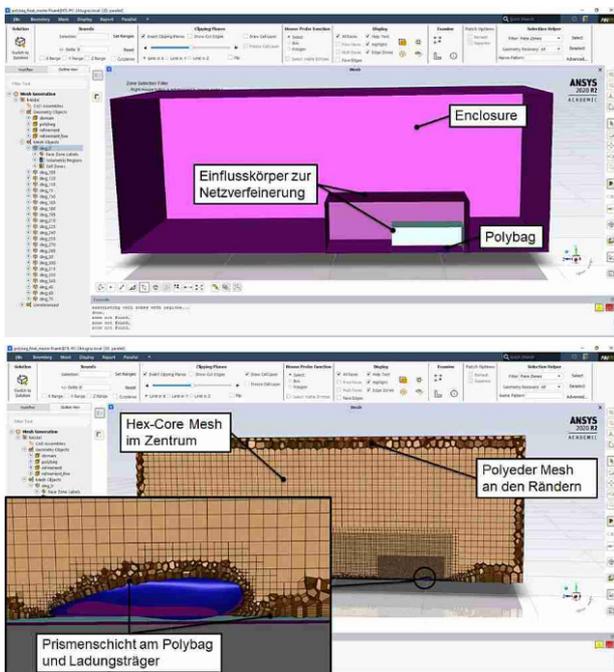


Abbildung 12. Modellaufbau der Strömungssimulation

Um ein Modell für eine CFD Simulation vorzubereiten, muss ein Mesh (Netz) auf Basis des mit Photogrammetrie erzeugten 3D-CAD-Modells des Polybags (s. 2.2.1) aufgebaut werden. Dabei wird das durchströmte Volumen in kleine Volumenelemente (finite Volumen) unterteilt. Neben dem Enclosure (Hüllkörper) und dem Polybag CAD-Modell werden weitere Einflusskörper benötigt, um das Netz in unmittelbarer Umgebung, besonders im Nachlauf (wegen Ablösungen etc.) des Polybags zu verfeinern (s. Abbildung 12 oben). Es hat sich bewährt die Größe des Hüllkörpers vor und um das angeströmte bzw. umströmte Objekt ca. drei bis fünf Mal und stromabwärts dahinter ca. acht bis zehn Mal dessen Länge auszuführen. Zusätzlich werden verschiedenen Prismenschichten oder boundary

layer direkt an der Oberfläche des Polybags und des Ladungsträgers (Boden der Enclosure) erzeugt, da dort die meisten Veränderungen der Zustandsgrößen (Reibungseinfluss der Grenzschicht) zu erwarten sind. [Ha21]

Das daraus entstandene Modell wird dann anschließend aus verschiedenen Richtungen angeströmt, um so den Verlauf der Strömungskoeffizienten bei veränderlichen Anströmrichtungen darstellen zu können. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse tragen wesentlich beim Aufbau einer analytischen Durchsatzberechnung bei, da sich zeigt, dass aufgrund der komplexen Geometrie keine konstanten Strömungskoeffizienten angenommen werden können und somit nicht auf Standardansätze aus der Literatur [Bs18] zurückgegriffen werden konnte. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in 3.2.2 dargestellt.

2.3 ANALYTISCHE DURCHSATZBERECHNUNG

Wesentliche physikalischen Einflussgrößen innerhalb der Interaktion des Polybags mit der Maschinenstruktur zur analytischen Berechnung des Durchsatzes sind:

- Reibung zwischen Polybag und Rutsche
- Strömungseffekte wie Luftwiderstand (drag) sowie Auf- bzw. Abtrieb (lift)
- Stoßeffekte, welche durch biegeschlaffes Verhalten von Polybags hervorgerufen werden

Insbesondere zwischen Reibungs- und Strömungseffekte entsteht bei höheren Rutschgeschwindigkeiten (>1 m/s) eine analytisch nicht darstellbare Wechselwirkung bei der Interaktion der sich bewegenden Sendung mit der jeweiligen Maschinenstruktur. Die geometrische Form von Polybags ähnelt in vielen Fällen einem stromlinienförmigen Körper, bei dem es entweder zu Auf- oder Abtriebsseffekten kommen kann, welche in weiterer Folge wiederum einen direkten Einfluss auf die Normalkraft und den Kontaktdruck zwischen Polybag und Maschinenstruktur haben. Eine analytische Beschreibung dieser Wechselwirkung ist jedoch aufgrund der komplexen und nur schwer „messbaren“ Geometrie der Polybags nur bedingt möglich. Die CFD Simulationen zeigen auch, dass die Strömungskoeffizienten mit der Anströmrichtung und durch die Geometrie selbst, stark variieren (s. 3.2.2). Daher kann nur bedingt eine allgemein gültige Berechnungsvorschrift mit Hilfe von Standardansätzen der Mechanik (Energieerhaltung, Drallsatz usw.) aufgebaut werden, wodurch verschiedene Näherungen durch versuchsbasierte Faktoren eingeführt werden mussten.

Es wird auf Basis der Coloumbischen Reibung ein erweiterter Reibungskoeffizient μ_{ERs} eingeführt, welcher die spezifischen Eigenschaften der Sendung (Materialeigenschaften der Verpackung n , Masse der Sendung m) sowie des Prozesses (mittlerer Rutschgeschwindigkeit der Sendung v_m) miteinander berücksichtigt.

$$a = g \cdot [\sin(\alpha) - \mu_{ErS}(n, m, v_m) \cdot \cos(\alpha)] \quad [1]$$

Formel 1 zeigt den qualitativen Berechnungsansatz für die Beschleunigung a eines Polybags auf einer unter einem Winkel α schräg gestellten Rutsche (s. Abbildung 11) und der Anwendung eines aus dem Versuch bestimmten Parameters μ_{ErS} . Die Formel wurde aus dem Energieerhaltungssatz hergeleitet. Verglichen mit Ansätzen für Kartonpakete, kann innerhalb von Berechnungsansätzen bei Polybags nicht auf Literaturwerte zurückgegriffen werden (vgl. Erkenntnisse der Untersuchungen des Reibverhaltens aus Arbeiten von [Bö96] für Kartonpakete). Des Weiteren sind insbesondere beim konstruktiven Aufbau des FFS weitere physikalische Effekte wie bspw. Luftwiderstand von großer Bedeutung, welche durch die Einführung des Parameters μ_{ErS} näherungsweise berücksichtigt werden können¹¹.

2.4 PRÜFSTAND

Für die Parametrierung der verschiedensten Simulationsmodelle ist eine Vielzahl an kleinen Versuchen notwendig. Dazu gehören bspw. Losreißversuche, Versuche zur Evaluierung des biegeschlaffen Verhaltens (bspw. Stöße). Die Simulationsmodelle der Gesamtstruktur (Polybag mit Umgebung) sind durch einen vereinfachten Prüfstand (Rutschen aus X6CR17) validiert (s. Abbildung 13).

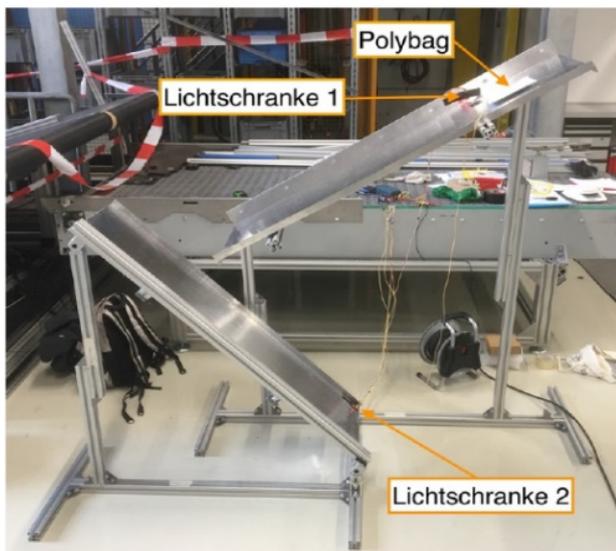


Abbildung 13. Aufbau eines Umlenkprüfstand

Messgröße dieses Versuchsaufbaus ist die Durchlaufzeit, welche über zwei Lichtschranken gemessen wird. Der Aufbau selbst ähnelt sehr stark dem Konzept des FFS. Zusätzlich ist in der Versuchshalle des ITL ein Funktionspro-

totyp aufgebaut, welcher zur Validierung weiterer Simulationsmodelle und insbesondere für die Validierung der analytischen Auslegungsberechnung dient. Dieser Funktionsprototyp beinhaltet bereits eine konstruktive Ausführung der mechanischen Umlenkung der Sendung im Entscheidungspunkt. Da diese Konstruktion die tatsächlich schützenswerte Eigenschaft (s. 4.4) des gesamten Konzeptes beinhaltet, wird aus strategischen Gründen zum jetzigen Zeitpunkt keine Detaildarstellung des Funktionsprototypen präsentiert.

3 ERGEBNISSE / DISKUSSION

3.1 DARSTELLUNG DER FUNKTIONSSTRUKTUR – DER ENTSCHEIDUNGSBAUM ALS BASIS DES FFS

Aus der methodischen Konstruktion des Systems entsteht das nachfolgende Konzept des FFS, welches im ersten Schritt als stark vereinfacht angesehen werden soll:

Der FreeFallSorter (FFS) ist eine Vorrichtung zum Sortieren von Stückgütern ($L+B+H < 900\text{mm}$), insbesondere Polybags. Sein Aufbau ist an den klassischen Entscheidungsbaum angelehnt (s. Abbildung 15). Dieser wird dabei in Ebenen (E1...En) in vertikaler Richtung und in Abschnitte (A1...An) in horizontaler Richtung unterteilt. Dadurch ergibt sich ein Raster, welches das System in Quadranten einteilt. Jeder Quadrant kann dabei als eigenständiges Modul betrachtet werden, wobei diese Module über die jeweiligen Abschnittsachsen gespiegelt werden können, um so den Baum zu erweitern. In den Schnittpunkten von Ebenen und Abschnitten (also den Entscheidungspunkten) sind mechanische Vorrichtungen angeordnet, welche die Umlenkung der durchlaufenden Sendungen zwischen zwei oder mehr Pfaden realisieren. Diese Pfade werden dabei offen und mit wannenförmigen Blechkonstruktionen ausgebildet. Je höher die Anzahl der geforderten Sortierziele (CHU1-CHU16), desto höher muss die Anzahl an Ebenen und Abschnitten ausfallen. Das gesamte Konstrukt steht vertikal im Raum. Dadurch wird die Forderung nach vorwiegend Schwerkraftförderung erfüllt. Da eine Variation der Anzahl an Endstellen gefordert wird, jedoch nur eine begrenzte Bauhöhe zur Verfügung steht, müssen die Pfadsteigungen dementsprechend flacher ausfallen, wodurch keine Bewegung aufgrund von Gravitation sichergestellt werden kann. In diesen Fällen wird innerhalb dieser flachen Pfade ein (Stetig)förderelement vorgesehen, um den stetigen Fluss der Sendungen durch den Sorter gewährleisten zu können. Im Vordergrund soll jedoch anforderungsgemäß die Bewegung aufgrund Gravitation stehen.

¹¹ Eine detaillierte Darstellung der noch in Ausarbeitung befindlichen (Validierung) analytischen Durchsatzberechnung würde abermals den Rahmen dieser Veröffentlichung sprengen und wird daher in einer folgenden Publikation im Detail veröffentlicht.

Da die Anzahl an Einschleusungen direkt mit dem Sorterdurchsatz korreliert, besteht die Möglichkeit mehrere Einschleusungen im System anzuordnen, um so den Durchsatz aber auch die Verfügbarkeit und somit die Stabilität des Prozesses zu steigern. Das Layout muss sich dabei anpassen, wobei dies immer an das Layout eines Entscheidungsbaumes angelehnt wird. Das in Abbildung 15 dargestellte Sorterlayout stellt dabei das einfachste Layout beispielhaft in zwei Dimensionen dar. Erste realisierte CAD-Entwürfe berücksichtigen für eine effiziente Sortierung natürlich die dritte (Tiefen)dimension.

Abbildung 14 zeigt das Prozessschaubild bzw. den Zusammenhang zwischen den einzelnen Arbeitsschritten des FFS. Zusätzlich ist ersichtlich, dass zum jetzigen Entwicklungsstand einzig die Funktion der Verteilung im Vordergrund steht. Funktionen wie Vorbereitung oder Identifizierung werden zwar mit angedacht, jedoch aufgabengemäß nicht weiter im Detail verfolgt. Auf Basis der in 1.4 festgelegten Systemgrenzen ergibt sich daraus folgender Prozessablauf:

1. Die Sendung wird am „Infeed“ dem Sorter zugeführt.
2. Nun bewegt sich die Sendung über den vorher bestimmten Pfad, entweder durch Einfluss der Gravitation oder durch ein Förderelement zum nächsten Entscheidungspunkt.
3. Bevor die Sendung die mechanische Vorrichtung im Entscheidungspunkt erreicht, muss diese eine Umlenkung auf den geforderten Pfad sicherstellen.

4. Dieser Ablauf wiederholt sich nun zwischen jedem Entscheidungspunkt bis die Sendung die geforderte Endstelle (bspw. Infeed bis CHU3) erreicht.
5. Die nachfolgende Sendung wird in den Sorter eingeführt sobald die vorhergehende Sendung den ersten Entscheidungspunkt (Ebene E3) passiert hat; Rücksprung zu Prozessschritt 2.

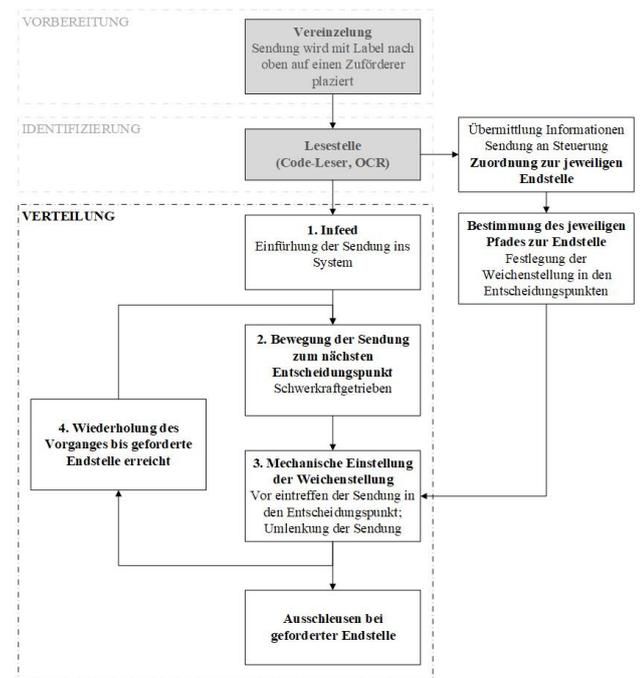


Abbildung 14. Prozessschaubild des FFS

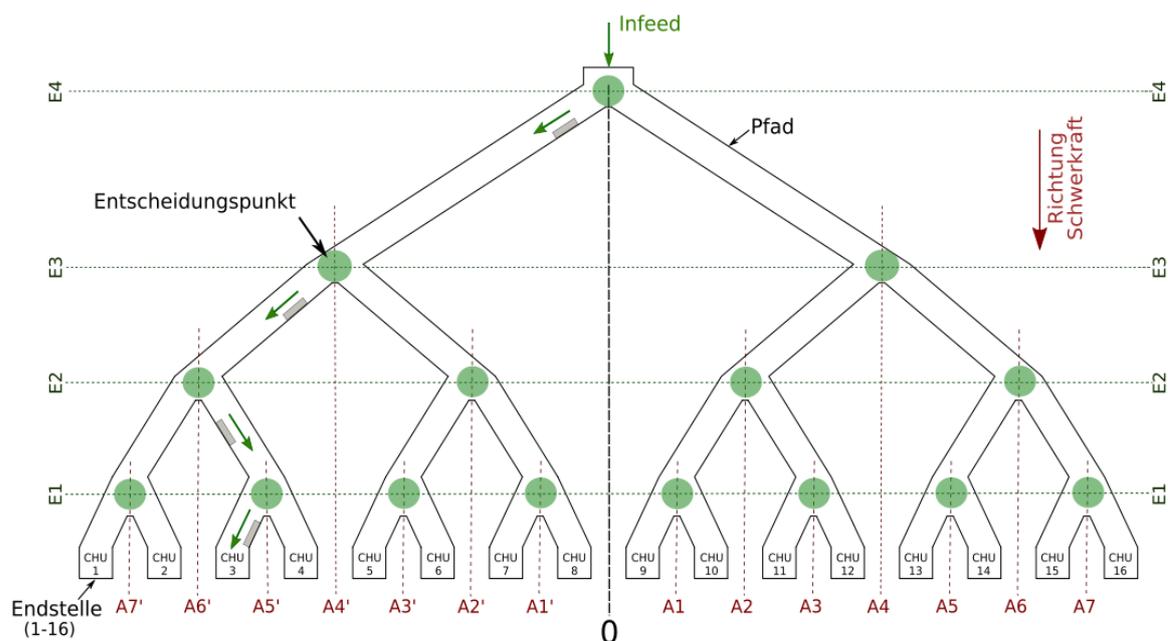


Abbildung 15. Prinzipskizze des FFS

3.2 ERGEBNISSE DER SIMULATIONSSTUDIEN

3.2.1 ERGEBNISSE MKS – KUGELMODELL

Die Ergebnisse der Simulationsstudie zum Aufbau in Abbildung 11 beziffern die erreichbaren Durchsatzzeiten aus Simulation und Regressionsmodell. Diese werden dem Mittelwert aus 15 Einzelversuchen aus dem in Abbildung 13 gezeigten Versuchsaufbau gegenübergestellt. Bei Betrachtung der Ergebnisse in Tabelle 7 ist ersichtlich, dass die Abweichung bei acht von neun getesteten Kombinationen des Prüfaufbaus kleiner als 11 % ist und somit die zu erzielende Genauigkeit des Simulationsmodells bestätigt ist.

Nr	Faktoren		Realversuch		Regressionsmodell		Simulaion	
	α_1 [°]	α_2 [°]	Zeit t_{Vers} [s]	STAW [%]	Zeit t_{predict} [s]	Fehler [%]	Zeit t_{sim} [s]	Fehler [%]
1	30	45	1,4468	5,5%	1,3908	3,9%	1,3552	6,3%
2	36	45	1,3192	4,2%	1,3296	0,8%	1,3392	1,5%
3	43	45	1,2497	6,0%	1,2944	3,6%	1,2234	2,1%
4	53	45	1,1205	2,9%	1,0896	2,8%	1,1178	0,2%
5	53	38	1,3293	3,5%	1,2567	5,5%	1,2068	9,2%
6	36	38	1,4221	5,7%	1,394	2,0%	1,2748	10,4%
7	30	45	1,5063	5,1%	1,6631	10,4%	1,6584	10,1%
8	38	45	1,3796	4,9%	1,5295	10,9%	1,4012	1,6%
9	25	36	3,7808	10,8%	1,8127	52,1%	2,0818	44,9%

Tabelle 7. Ergebnisse und Validierung der MKS Simulationen

Lediglich beim letzten Testpunkt tritt eine unvertretbar hohe Abweichung auf. Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse dieses Punkts fällt jedoch auch die im Vergleich zu den anderen Punkten höhere Streuung der einzelnen Zeitmessungen auf. Diese ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf Stick-Slip Effekte des Reibungsverhaltens zwischen Polybag und Umgebung zurückzuführen, welche im Modell nur unzureichend nachgebildet werden. [Ro19]

In Tabelle 7 erfolgt weiteres eine Auflistung der vom Regressionsmodell geschätzten Zeiten und der prozentuellen Fehler im Vergleich mit den Mittelwerten der physischen Versuche. Daraus ist erkenntlich, dass das Regressionsmodell sehr gut in der Lage ist, das Ergebnis vorherzusagen. Die Abweichung liegt bis auf den letzten Messpunkt im Bereich von etwa 10 % und beweist somit auch, dass das Regressionsmodell im betrachteten Parameterbereich bedenkenlos verwendet werden kann. [Ro19]

3.2.2 ERGEBNISSE CFD

Abbildung 16 zeigt das Ergebnis einer CFD Simulation eines aus Z-Richtung mit 2,5 m/s umströmten Polybags (mit der Geometrie aus Abbildung 7) in Form von Stromliniendiagrammen. Insbesondere bei der axonometrischen Darstellung (Abbildung 16 unten) fällt auf, dass die Stromlinien in nahezu alle Richtungen abgelenkt werden, wodurch angenommen werden kann, dass mit einem konstanten Strömungskoeffizienten, nur bedingt gerechnet werden kann.

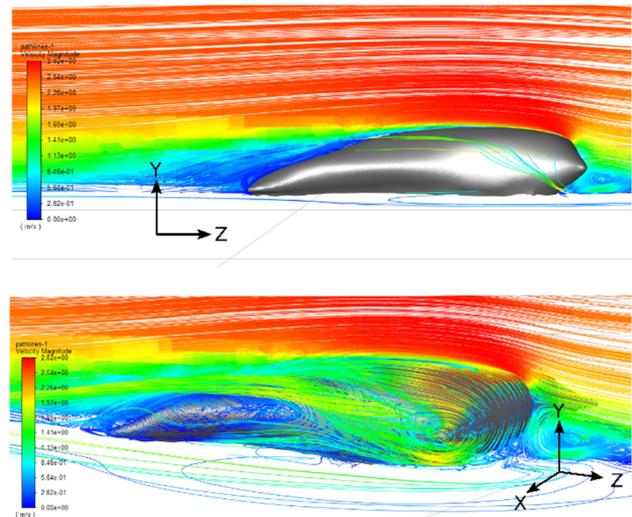


Abbildung 16. Darstellungen der Stromlinien eines umströmten Polybags [Ha21]

Aus den in Abbildung 16 dargestellten Stromlinienverläufen geht mit Abbildung 17 gemeinsam hervor, dass die Strömungskoeffizienten in allen Koordinatenrichtungen (CD_x , CL_y , CD_z) auch bei geringen Anströmwindänderungen¹² zum Teil starken Änderungen unterliegen. Es ist ersichtlich, dass bereits bei kleinen Änderungen der Anströmrichtung große Veränderungen der Strömungskoeffizienten in den drei Achsrichtungen auftreten. Dies geht sogar so weit, dass der Strömungskoeffizient in x-Richtung sein Vorzeichen ändert und somit die resultierende Kraft ihre Wirkrichtung ändert. Zudem sind am Verlauf der Strömungskoeffizienten die Auswirkungen der asymmetrischen Geometrie des Polybags gut ersichtlich. Auch wenn die Verläufe bei einer 180° Rotation der Anströmung eine gewisse Ähnlichkeit aufweisen, so sind diese keinesfalls gespiegelt oder symmetrisch. Ebenfalls aus dieser Abbildung geht hervor, dass der Strömungskoeffizient in y-Richtung (CL_y) sein Vorzeichen nie verändert. Daraus lässt sich ableiten, dass es nur zu Auftriebs- und nicht zu Abtriebs-Effekten bei der untersuchten Polybagform kommt. Ein

¹² Die Anströmrichtung von Polybags ändert sich bei klassischer linearer Bewegung (auch bei Kreisbögen wie bspw. auf liniengebundenen Verteilförderern) nur geringfügig. Allerdings dienen die Erkenntnisse dazu, die Orientierung des Polybags auf dem Förderer zu bewerten bzw. im

Kontext des FFS den Strömungseinfluss bei Richtungsänderung zu bewerten. Zudem wird die Sendung in einer nicht definierten und somit unbekanntem Orientierung dem FFS zugeführt.

Abtrieb bei anderen Polybaggeometrien ist generell jedoch nicht auszuschließen. [Ha21]

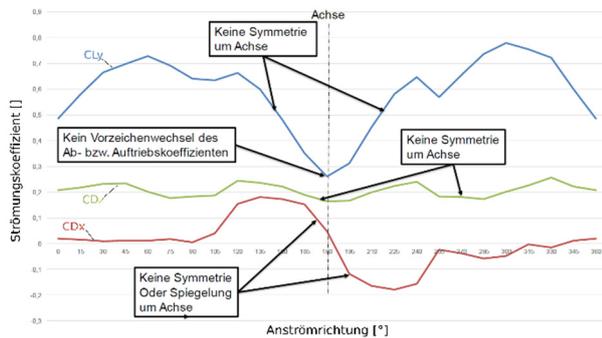


Abbildung 17. Verlauf der Strömungskoeffizienten bei veränderlicher Anströmrichtung [Ha21]

Die CFD Simulation einer Polybaggeometrie kann durchaus als sehr herausfordernd und zeitintensiv festgehalten werden. Durch die Simulationsmethode CFD muss jeder untersuchte Körper separat vernetzt werden, wobei das resultierende Netz weitreichenden Kriterien genügen muss, um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten. Das bedeutet, dass keine Scripts oder ähnliche Maßnahmen zur automatisierten Durchführung von Strömungssimulationen von Polybags verwendet werden können. Dies wäre jedoch notwendig um eine strömungstechnische Untersuchung von weitreichenden veränderlichen Polybaggeometrien zu ermöglichen. Des Weiteren können ohne Zugang zu Windkanälen und ähnlichen Einrichtungen nur indirekt Validierungsmaßnahmen getroffen werden.

4 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

4.1 DISKUSSION DER PRAKTISCHEN ANWENDBARKEIT DER SIMULATIONEN

Innerhalb des Aufbaus, der Berechnung und Auswertung der verschiedenen Simulationen hat sich gezeigt, dass die grundlegenden physikalischen Eigenschaften von Polybags wie biegeschlaffes Verhalten, Reibung zur Maschinenstruktur und auch Einflüsse aus Strömungserscheinungen durchaus innerhalb von verschiedenen Modellen darstellbar sind. Dennoch ist aufgrund des doch sehr hohen Aufwandes innerhalb der Modellierung der Polybags und den damit verbundenen hohen Rechenzeiten (mehrere Stunden für die gezeigten Modelle) bis dato kein wirtschaftlicher Einsatz dieser Methoden möglich. Eine Verknüpfung der Simulationsdomänen (v.a. Dynamik mit CFD) erscheint aus selbigen Überlegungen wenig sinnvoll und ist nur mit hohem Aufwand möglich. Dazu kommt, dass nahezu kein Polybag dem anderen „gleich“ weshalb eine enorme Anzahl an verschiedenen Simulationsmodel-

len notwendig wäre, um tatsächlich zielgerichtet die Performance von Systemen wie dem FFS abschätzen zu können.

Dies ist gesamt die Begründung, weshalb bereits in einem sehr frühen Stadium die in 2.2.2 erwähnten Untersuchungen hinsichtlich des Einsatzes von Regressionsmodellen durchgeführt werden. Nur durch den gezielten Einsatz dieser statistisch basierten Modelle wird es bis auf weiteres möglich sein, den außergewöhnlich großen Parameterraum, welcher aufgrund der Diversität der Polybags aufgespannt wird, erfassen zu können.

Weiteres sei angemerkt, dass durchaus andere Modellierungsformen (bspw. modale Reduktion) bzw. weitere Domänen zur Simulation (bspw. DEM - Diskrete Elemente Methode) eine Möglichkeit bieten könnten, die nötige Bewertungen von neuartigen Maschinenstrukturen wie dem FFS in einer wirtschaftlichen Art und Weise durchführen zu können.

Aus diesen Gründen sind v.a. analytische Näherungsberechnungen mit einer anschließenden Validierung durch physische Versuche zumindest derzeit noch der vielversprechendste Weg. Nichtsdestotrotz können aus den Simulationsmodellen absolut wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich des spezifischen Verhaltens von Polybags gewonnen werden¹³, welche die Basis der noch zu detaillierenden analytischen Näherungsberechnung bilden (s. 2.3).

4.2 ABSCHÄTZUNG DER PERFORMANCE DES SYSTEMS FFS

Je nach verfügbarer Raumhöhe bzw. Anzahl an geforderten Endstellen kann sich die Gestalt des FFS stark verändern. Nicht zuletzt durch die Veränderung der einzelnen Winkel der Pfade ist daher eine generelle Bewertung der Performance durch die Angabe eines Durchsatzes nur schwer möglich und muss somit für jedes Layout bzw. für jede Betriebsstrategie gesondert ermittelt werden. Dies wäre insbesondere dann der Fall, wenn sich mehr als eine Sendung zwischen zwei Entscheidungspunkten befinden würden. Aus diesem Grund soll auf Basis des einfachsten Betriebsszenarios (s. Abbildung 14) und anhand des in Abbildung 15 gezeigten beispielhaften Layout nachfolgend eine Abschätzung des Durchsatzes erfolgen:

Es wird davon ausgegangen, dass sich zwischen Infeed und dem ersten Entscheidungspunkt in Ebene E3 nur eine Sendung befindet und die jeweils darauffolgende Sendung erst dann ins System eingebracht wird, wenn die vorhergehende Sendung den Entscheidungspunkt verlässt (s. Prozessschritte 3.1). Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass kein stark variatives Verhalten der Sendungen

(bspw. stark verschiedene Reibung zwischen unterschiedlichen Sendungen und Maschinenstruktur) auftritt. Auf Basis dieser Prämisse kann ein theoretischer Durchsatz mit Hilfe der Reaktionszeit (Zeit, welche notwendig ist, um zwischen verschiedenen Pfaden umzuschalten) der mechanischen Struktur innerhalb des Entscheidungspunktes getroffen werden, da alle Sendungen bei diesem vereinfachten Layout den obersten Entscheidungspunkt passieren müssen und dieser daher als Bottleneck angesehen werden kann.

Die Konstruktion der mechanischen Struktur der Umlenkung unterliegt derzeit einem Patentverfahren, da diese das Kernelement des FFS darstellt und somit das eigentlich schützenswerte Element des gesamten Konzeptes darstellt. Aus diesem Grund kann innerhalb der vorliegenden Publikation kein detaillierter Aufbau dieses Elementes aufgezeigt werden. Die Konstruktion wurde jedoch vollständig von den Autoren durchgeführt und prototypisch realisiert, wobei eine minimale Reaktions- bzw. Schaltzeit von 0,164 s ermittelt wurde. Daraus ergibt sich ein theoretischer Durchsatz von etwa 22.000 Stück/h. Dieser Wert muss jedoch als sehr optimistisch angesehen werden, da von idealem Verhalten von Polybags ausgegangen wird. Des Weiteren stellt die Reaktionszeit von 0,164 s das absolute Leistungsmaximum dar, welches auf Dauer aufgrund von Verschleiß, etc. nicht erstrebenswert ist. Daher wurde bei der Abschätzung des Durchsatzes beim Funktionsprototypen von einer Reaktionszeit von 0,3 s ausgegangen. Daraus ergibt sich ein abgeschätzter

Leistungsbereich von 10.000 - 12.000 Stück/h, der die avisierte Produktlücke in der Sortierleistung für Polybags für die KEP Branche ideal adressiert.

4.3 ANFORDERUNGS- UND ZIELERFÜLLUNG DURCH DAS GEWÄHLTE VORGEHEN

Aus den in 1.5 und 2.1 definierten Ziele und Anforderungen soll nachfolgend die Erfüllung dieser diskutiert werden:

Ziel „Geringer Flächenbedarf“: Aufgrund der vertikalen Ausrichtung des Systems und der vergleichsweise kompakten Bauweise wird angenommen, dass durch den Einsatz des FFS etwa 50-75 % des Flächenbedarfs im Vergleich zu State-of-the-Art Systemen eingespart werden kann. Des Weiteren entstehen keine nicht nutzbaren Leerflächen wie bspw. oft bei Loop-Sortern.

Ziel „Hohe Energieeffizienz“: Beim Konzept des FFS bewegt sich einzig der Polybag (im Optimalfall schwerkraftgetrieben) durch eine feststehende Maschinenstruktur. Bis auf die mechanische Umlenkung in den Entscheidungspunkt sind somit keine Maschinenteile in Bewegung und dafür Antriebe nötig. Ein direkter Vergleich mit State-of-the-Art Systemen ist aufgrund noch nicht verfügbarer Daten hinsichtlich des Energiebedarfs von State-of-the-Art Anlagen derzeit noch nicht im Detail möglich. Wenn man jedoch berücksichtigt, dass bei den meisten Loopsorten ein Sorterwagen zwischen 80 und 100kg schwer ist, so ist das Einsparungspotential an Energie durch den Einsatz des FFS durchaus als signifikant einzustufen und beträgt ca. 20%¹⁴.

¹⁴ Gegenüberstellung Energieverbrauch eines Quergurtsorter – FFS

Szenario:

- kleines Sortierzentrum mit 125 Endstellen und gefordertem Durchsatz von 10.000 Stück/h
- Durchschnittliche Sendungsmasse $m_s = 300$ g (aus Tabelle 3)

Vorgehensweise:

- Rechnung auf Basis von Bewegungswiderständen und anderer Verluste zur Bestimmung der notwendigen Energie zur Sortierung einer Sendung.

Quergurtsorter:

Annahmen:

- Je Meter Sorter werden zwei Endstellen (links u. rechts) mit je 1 m breite platziert \rightarrow Sorterlänge $L_S = 62,5$ m
- Fahrwagenteilung $t = 1$ m
- Für Sortierung einer Sendung muss Sorterwagen die komplette Sorterlänge durchfahren. (Leerfahrt)
- Der Quergurtsorter befindet sich bereits in transientscher Fahrt.
- Masse eines Sorterwagens wird mit $m_w = 80$ kg angenommen.
- Je Sorterwagen sind zwei Führungsrollen verbaut ($n_F = 2$).
- Es werden nur Fahrwiderstände betrachtet.
- Rollreibungskoeffizient für Kunststoffrollen: $\mu = 0,01$ (nach [Po09])

Berechnung Quergurtsorter:

- Reibungswiderstand je Wagen bzw. je Meter: $F_R = F_N \cdot \mu$
- Normalkraft auf eine Führungsrolle des Sorterwagens:

$$F_N = \frac{(m_w + m_s) \cdot g}{n_F} = 394 \text{ N}$$
- Reibkraft für einen Sorterwagen: $F_R = F_N \cdot \mu \cdot n_F = 7,8 \text{ N}$
- Reiarbeit für die Sortierung einer Sendung:

$$W_R = F_R \cdot L_S = 487,5 \text{ J}$$

FFS:

Annahmen:

- Potentialunterschied Einschleusung - Endstelle: $H = 20$ m
- Schaltung der Mechanik in jedem Entscheidungspunkt notwendig.
- Anzahl Entscheidungspunkte von Einschleusung bis Endstelle $n = 7$.
- Verluste im Steigförderer zur Einschleusung werden dem Fahrwiderstand des Quergurtsorters gleichgesetzt ($F_R = 7,8 \text{ N/m}$).
- Beschleunigungsarbeit der Umlenkmechanik in den Entscheidungspunkten aus Konstruktion des ITL übernommen $W_U = 25 \text{ J}$
- Wirkungsgrad der Umlenkmechanik $\eta = 90\%$

Berechnung FFS

- Hubarbeit für eine Sendung: $W_H = m_s \cdot g \cdot H = 58,8 \text{ J}$
- Verluste Steigförder: $W_S = F_R \cdot H = 156 \text{ J}$
- Arbeit in den Umlenkungen: $W_{U, \text{Ges}} = n \cdot W_U \cdot \eta = 157,5 \text{ J}$
- Gesamtarbeit für Sortierung einer Sendung: $W = 372,5 \text{ J}$

Ziel „Betriebsstabilität bei der Verarbeitung von Polybags“: Eine Sortierung von Polybags mit dem FFS erfordert keine geregelten dynamischen Vorgänge (wie bspw. das kritische Aufschleusen bei Quergurtsortern) und die Zuförderung und v.a. Einschleusung ist durch einfache getaktete Verfahren (auch rein mechanisch) möglich. Die durchlaufende Sendung wird einzig durch die mechanische Umlenkung beeinflusst, wobei diese Beeinflussung als Zwangsbedingung angesehen werden kann, wodurch die Sendung keine andere Möglichkeit hat, als dem eingestellten Weg zu folgen. Ein hängen bleiben der Sendung innerhalb der Pfade oder Umlenkung kann weitestgehend durch konstruktive Anpassungen bzw. durch die Vermeidung von Spalten und Ritzen verhindert werden. Dadurch werden alle in Tabelle 5 aufgezeigten Anforderungen innerhalb des Entwicklungsprozesses berücksichtigt, wodurch von einer hohen Betriebsstabilität bei gleichzeitig geringerem steuerungstechnischen Aufwand ausgegangen wird.

Anforderung „Durchsatz“: Der geforderte Durchsatz von 5.000 – 10.000 Stück/h kann wie in 4.2 gezeigt bereits mit einer Einschleusung und einem verhältnismäßig einfachen Betriebsszenario abgedeckt werden. Die mechanische Konstruktion in den Entscheidungspunkten ist dabei noch nicht am Leistungsmaximum angelangt. Dennoch wird davon ausgegangen, dass bei schnelleren Schaltzeiten aufgrund der Eigenschaften des Polybags und der damit verbundenen physikalischen Grenzen, keine signifikante Erhöhung des Durchsatzes bei gleichbleibender Betriebsstabilität erzielt werden kann.

4.4 SCHÜTZENSWERTE ELEMENTE

Das Konzept des FFS kann als Neuheit am Markt angesehen werden, weshalb das Autorenteam bestrebt ist, Elemente des Systems in Form von Patenten zu schützen. Eine Patentrecherche hat ergeben, dass einzig die mechanische Umsetzung der Umlenkung in den Entscheidungspunkten tatsächlich schützenswert ist und das wesentliche Merkmal des Erfindungsgegenstandes darstellt. Grund dafür ist die Tatsache, dass nur wenn die Interaktion zwischen spezifischem Layout, Eigenschaften der jeweiligen Sendung und konstruktive sowie regelungstechnische Umsetzung der Umlenkung in „Einklang“ gebracht werden können, ein schutzwürdiges System entsteht, welches tatsächlich mit konkurrenzfähigen Durchsätzen bei gleichzeitiger Einhaltung der maximal zulässigen Sendungsbelastungen arbeiten kann. Der charakteristische entscheidungsbaumähnliche Aufbau ist somit kein schützenswertes Element und wurde teilweise in seinen Grundzügen bereits in anderen Anwendungen (bspw. [Fe75], [An75]) angewendet.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Der Beitrag beschreibt eine methodische Neukonstruktion, Auslegung und Simulation eines Verteilförderers für die KEP - Branche für den Sendungstyp Polybag. Die

Notwendigkeit zur Neuentwicklung ergibt sich aus den großen Herausforderungen innerhalb der grundsätzlichen Systemanforderungen (bspw. höhere Energieeffizienz) und darüber hinaus aus dem starken Anstieg eines Sendungsanteils mit bisher nicht ausreichend beschriebenen physikalischen Eigenschaften - auch Polybag genannt. Der Beitrag zeigt weiters verschiedene Modelle zur Simulation des physikalischen Verhaltens von Polybags, wie bspw. dem biegeschlaffen Verhalten, mit Hilfe verschiedener Simulationswerkzeuge. Daraus resultiert eine Konzeptstudie für ein neuartiges Sortiersystem speziell für Polybags – der FreeFallSorter (FFS). Der Entwurfsprozess konzentriert sich auf einen virtuellen Entwicklungsansatz (CAE) durch verschiedene Methoden, mit anschließender Validierung der Ansätze an einem Funktionsprototypen.

Das gezeigte Konzept des FFS beschränkt sich unter anderem auf eine zweidimensionale Ausbreitung im Raum und nur auf die in 1.4 beschriebenen Systemgrenzen. Innerhalb von weiterführenden Untersuchungen werden derzeit auch Layouts im dreidimensionalen Raum entwickelt und dementsprechende Anpassungen der hier dargestellten analytischen Berechnungsschemata erarbeitet.



Abbildung 18. Konzeptstudie eines Endstellen-Designs mit bewegten Endstellen (KLT und ähnliches)

Dadurch ist eine höhere Anzahl an Endstellen und somit eine weitere Steigerung des Flächennutzungsgrades möglich. Zusätzlich werden neben der grundlegenden Funktion „Verteilen“ von Sortiersystemen, auch alle anderen Funktionen (Zuförderung, Vorbereitung, Identifikation und Abförderung) in die Untersuchungen miteinbezogen. Dabei spielt insbesondere die Integration des Konzeptes in bestehende Strukturen von Logistikzentren eine wesentliche Rolle. Ein Beispiel ist die konstruktive Ausgestaltung der Endstellen am System FFS.



Abbildung 19. Gegenüberstellung von manuell- und automatisch beschickten Endstellenkonzepten

Ein erstes Ergebnis eines Endstellen Konzeptes für kleine Ladungsträger zeigt Abbildung 18, wobei nur der Endstellenbereich abgebildet wird. Dabei konnten fünf Endstellen auf einer Breite von 3 m platziert werden, welche alle automatisiert mit Behältern beschickt werden können. Abbildung 19 zeigt zudem ein Konzept für eine manuelle Beschickung der Endstellen in Vergleich zur automatischen Zu- und Abförderung aus Abbildung 18. Ähnliche Untersuchungen werden noch im Bereich der Einschleusung und Integration des Konzeptes in die Struktur von bestehenden Logistikzentren durchgeführt.

Neben weiterer konstruktiver Detaillierung strebt das Autorenteam eine Weiterentwicklung der gezeigten Simulationsansätze zum Polybag an. Im Zuge dessen ist eine weitere Dissertation geplant, welche sich intensiv mit Modellierungsmöglichkeiten von Polybags und der Performancebewertung beschäftigen wird.

Hauptziel des Autorenteam ist es jedoch, an die Erfolgsgeschichte des Rapidunloaders und dem daraus entstandenen Start-Up PHS [ph20] anzuknüpfen und aus dem Konzept des FFS ebenfalls ein marktfähiges Produkt zu entwickeln.

1 LITERATURVERZEICHNIS

[A120] AliceVision: Meshroom. <https://alicevision.org/#meshroom>, Stand: 27.07.2021.

[AN21] ANSYS, I.: Ansys Fluent. Fluid Simulation Software. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>, Stand: 27.07.2021.

[An75] Anton, B., 1975: Dokumentenspeicher. DT 25 13 450 B1. Deutschland.

[Bl21] Blender Foundation: 3D Allround Software. <https://www.blender.org/>, Stand: 27.07.2021.

[Bö96] Böcker, T.: Auslegung von Rutschen an Sortierendstellen unter besonderer Berücksichtigung der Gleitreibungsbedingungen

von Stückgütern. Dissertation, Dortmund, 1996.

[Bs18] Bschorer, S.: Technische Strömungslehre. Lehr- und Übungsbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018.

[CH20] Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2020.

[DIN05] DIN 55510-3:2005-11, Packaging – Dimensional coordination in the field of Packaging.

[EK20] Esser, K.; Kurte, J.: KEP-Studie 2020 – Analyse des Marktes in Deutschland. Eine Untersuchung im Auftrag des Bundesverbandes Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK), Cologne, 2020.

[EK21] Esser, K.; Kurte, J.: KEP-Studie 2021 – Analyse des Marktes in Deutschland. Eine Untersuchung im Auftrag des Bundesverbandes Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK), Cologne, 2021.

[Eu09]: Richtlinie 2009/132/EG des Rates vom 19. Oktober 2009 zur Festlegung des Anwendungsbereichs von Artikel 143 Buchstaben b und c der Richtlinie 2006/112/EG hinsichtlich der Mehrwertsteuerbefreiung bestimmter endgültiger Einfuhren von Gegenständen. RL 2009/132/EG, 2009.

[Eu15] Assessment of the application and impact of the VAT exemption for importation of small consignments. Final report, Brussels, 2015.

[Fe75] Feudis, S. d. N., 17.21.1975: Sortieranlage für Güter, insbesondere Stückgüter. DT 25 01 803 A1. Schweden.

[Ha21] Hafner, F.: Prozess zur Beschreibung des Fly-Out Verhaltens von Polybags innerhalb eines Sortiersystems. Masterarbeit, Graz, 2021.

[JH12] Jodin, D.; Hompel, M. ten: Sortier- und Verteilsysteme. Grundlagen, Aufbau, Berechnung und Realisierung. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2012.

[Mc19] McCloughan, P.: Study of Online Consumer Sales: The Economic Impacts of Online Consumer Sales on Additional Packaging and Its Cost in Ireland. Prepared

- for Repak Limited by PMCA Economic Consulting, 2019.
- [Ös21] Österreichische Post: Neu und Übersicht-lich: Die Tarife der Post. Tarifbroschüre, Wien, 2021.
- [Pa21] Parametric Technology GmbH: Creo Parametric. CAD Software.
<https://www.ptc.com/de/products/creo>, Stand: 27.07.2021.
- [ph20] phs Logistiktechnik GmbH: Rapdiunloader.
<https://de.phsolutions.at/rapid-unloader>, Stand: 27.07.2021.
- [Po09] Popov, V. L.: Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Ro19] Roth, S.: Simulation von flexiblen Polybags und Untersuchung deren Umlenkverhaltens mittels Mehrkörper-Simulations- Modellen. Diplomarbeit, Graz, 2019.
- [SBH17] Siebertz, K.; Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [Sc21] Schweizer Post AG: Wir sind der Motor für eine moderne Schweiz. Jahresbericht 2020, Bern, 2021.
- [Si21] Siemens Logistics GmbH: Creating new business with mixed-mail automation. Integrating small parcel processing into mail sorting centers. <https://www.siemens-logistics.com/en/news/whitepaper/creating-new-business-with-mixed-mail-automation>, Stand: 2021-05-12.
- [SSK21] Schadler, M., Schedler, M., Knödl, M., Prims, D., Landschützer, C., Katterfeld, A.: Characteristics of ‘polybags’ used for low value consignments (small packets) in the mail, courier, express and parcel industry. Logistic Journal, submitted July 2021.
- [Th96] Thorsten Böcker: Auslegung von Rutschen an Sorterendstellen. unter besonderer Berücksichtigung der Gleitreibungsbedingungen von Stückgütern, Dortmund, 1996.
- [VDI 2221] VDI 2221:05.1993, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.
- [WI19] WIK Consult: Development of Cross-border E-commerce through Parcel Delivery. Study for the European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs.
- [Wi20] KEP-Branchenreport 2020 - Wien, Wien, 2020.
- [Z_21] Z_punkt GmbH, The Foresight Company: MEGATRENDS UPDATE. UNDERSTANDING THE DYNAMICS OF GLOBAL CHANGE, Köln, 2021.

DI Michael Schedler, BSc.,

Universitätsassistent am Institut für Technische Logistik, TU Graz.

E-Mail: m.schedler@tugraz.at

Assoc.Prof. DI Dr.techn. Christian Landschützer,

stellv. Institutsleiter am Institut für Technische Logistik, TU Graz.

E-Mail: landschuetzer@tugraz.at