

Untersuchung der Dynamik von Stückgütern auf Stetigförderern – Analyse, Simulation und Laborversuche

Investigation of unit load dynamics on continuous conveyors – analysis, simulation and laboratory tests

Matthias Fritz
 Dirk Jodin

Institut für Technische Logistik
 Fakultät Maschinenbau
 Technische Universität Graz

Steigende Sendungszahlen in der KEP-Branche stellen die Paketlogistik vor die Herausforderung eines durchgängig automatischen Paketumschlags in den Verteilzentren. Neue Ansätze, bei denen die Stückgüter als Schüttgut betrachtet werden, erfordern im Hinblick auf die Vorhersage des Bewegungsverhaltens der Stückgüter in Prozessen wie der Vereinzelung anwendbare Simulationswerkzeuge. Im vorliegenden Beitrag wird diese Thematik aufgegriffen und die Eignung der Diskreten-Elemente-Methode (DEM) untersucht, wobei abschließend die Anwendung anhand eines Entlade- und Vereinzelungsszenarios dargelegt wird.

[Schlüsselwörter: Vereinzelung, Diskrete-Elemente-Methode (DEM), KEP-Branche, Paketlogistik, Verteilzentrum]

As a consequence of increasing shipments in the CEP-market, needs for automated processes in the distribution centres appear. In the light of new approaches considering unit loads as bulk solids, applicable simulation methods to predict the motion behaviour in processes like the singulation become important. This contribution takes up this issue by investigating the discrete-element-method (DEM) for those scenarios. Finally, the application of the DEM is shown in the simulation of an unloading and singulation process.

[Keywords: Singulation, Discrete-Element-Method (DEM), CEP-branche, parcel logistics, distribution centre]

1 EINLEITUNG

Betrachtet man die wirtschaftliche Entwicklung der KEP-Branche (Kurier-, Express- und Paketdienste) seit der Wirtschaftskrise 2008, so sind aus den entsprechenden Kennzahlen konstant starke Zuwächse feststellbar. Einer Studie des BIEK (Bundesverband Paket und Expresslogistik) zufolge stiegen die Sendungsvolumina in Deutschland seit dem Jahr 2000 um 64% auf 2,8 Mrd. Sendungen (vgl.

[BIE16]; [WIK16]). Die Entwicklung in Deutschland stellt dabei keine Ausnahme dar, auch in vielen anderen europäischen Ländern gab es ähnliche Entwicklungen bei der Sendungszahl (vgl. [ATK16a]; [WIK16]). Gleichzeitig sind aber die Unternehmen der KEP-Branche mit einem niedrigeren Sendungserlös konfrontiert, Abbildung 1 zeigt beispielhaft den Anstieg des Umsatzes und der zurechenbaren Sendungszahl in Europa von 2011 bis 2013:

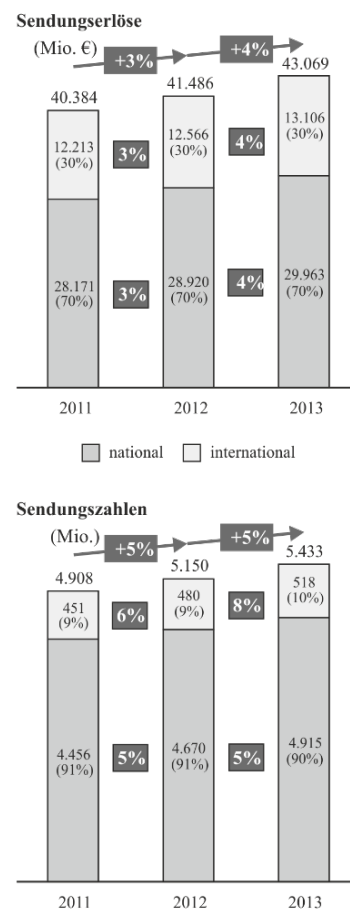


Abbildung 1. Entwicklung des europäischen KEP-Marktes

Es ist erkennbar, dass die Umsatzsteigerungen nicht in gleichem Maß wie die Sendungszahl ansteigen. Zusammen mit der Tendenz hin zu kürzeren Lieferzeitfenstern und besserer Servicequalität ergeben sich damit hohe Auslastungsspitzen hinsichtlich des Durchsatzes in den Verteilzentren.

In Abbildung 2 ist dazu die Prozesskette eines namhaften Paketdienstleisters von der Paketannahme bis zur Zustellung dargestellt, wobei insbesondere die Verteilzeitfenster zwischen Vor- und Hauptlauf bzw. Haupt- und Nachlauf als besonders stark ausgelastete hervorgehoben werden müssen.

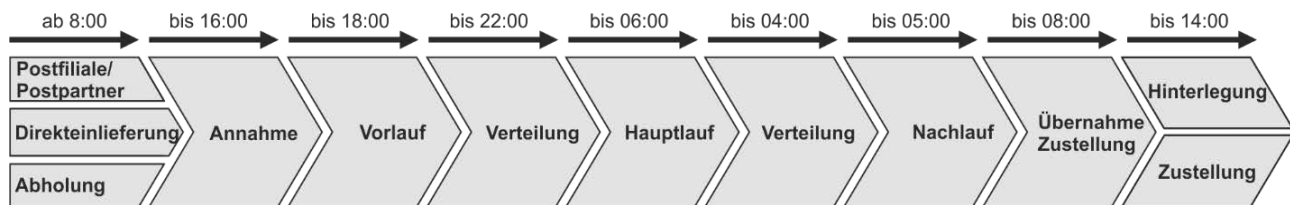


Abbildung 2. Prozesskette eines Paketdienstleisters

Eine Möglichkeit, um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist eine möglichst durchgängige Automatisierung der Verteilzentren. Einige Teilbereiche in den Verteilzentren wie beispielsweise die Identifikation und der Sorter zeichnen sich diesbezüglich schon durch einen hohen Standard aus, in anderen Bereichen wie der Entladung und der Abförderung sind manuelle Vorgänge dagegen noch stark vertreten (vgl. [JtH12]). Hinsichtlich einer Automatisierung dieser Bereiche können unterschiedliche Trends abgeleitet werden:

- Automatisierung durch Roboter: Zuzolge einer höheren Effizienz und Prozesssicherheit sind Roboter in vielen Bereichen der Produktion Stand der Technik. Auch in einigen Bereichen der Logistik werden Roboter eingesetzt, man vergleiche beispielsweise automatisierte Vorgänge im Bereich der Kommissionierung oder Verpackung (vgl. [MQF+16]). Der Einsatz von Robotern ist oft an Voraussetzungen wie ähnliche Beschaffenheit der Stückgüter (Form, Material, Abmessungen, Gewicht) geknüpft, wobei moderne Entwicklungen im Bereich der Greiftechnik und Bilderkennung auch mit in diesem Sinne ungünstigeren Gegebenheiten umgehen können (vgl. [SEW08]).
- Adaption von Methoden aus der Schüttguttechnik: Betrachtet man eine große Anzahl an Stückgütern als Schüttgut, besteht die Möglichkeit, Entleerungsmethoden, Förderprinzipien oder Vereinzelungstechniken aus der Schüttguttechnik zu adaptieren (vgl. [FWL+15]; [CRR14])

Der vorliegende Beitrag befasst sich in diesem Sinne mit der Betrachtung der Sendungen in Form von Bulkware. Unter einem (Stückgut-)Pulk wird dabei die lose Ansammlung von Stückgütern verstanden, die in Form, Abmessungen, Gewicht und Beschaffenheit (z.B. Oberfläche, Material) verschieden sein können. Die Position und Orientierung eines einzelnen Stückguts innerhalb des Stückgutpulk muss keiner definierten Anordnung fol-

gen. Ein einzelnes Stückgut kann zu einem oder mehreren anderen Stückgütern Kontakte aufweisen.

Die Entwicklung entsprechender Technik zur Verarbeitung von Stückgütern im Pulk kann dabei im Sinne eines methodischen Konstruktionsprozesses durch geeignete Simulationswerkzeuge unterstützt werden, um frühzeitig Aussagen hinsichtlich der Funktionalität sowie einer Optimierung des Prozesses tätigen zu können. Eine zentrale Aufgabe dabei stellt die Vorhersage des Bewegungsverhaltens der Stückgüter dar, wobei eine entsprechende Simulationmethode mit der Anforderung, eine große Anzahl an interagierenden Stückgütern beschreiben zu können, konfrontiert ist. Die folgenden Ausführungen befassen sich demzufolge mit dem Vergleich und der Eignung unterschiedlicher Simulationmethoden, wobei im Speziellen auf die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) eingegangen wird. Neben verschiedenen Untersuchungen zur Genauigkeit der Approximation des Bewegungsverhaltens wird insbesondere der Anwendungsbezug zu den Bereichen Entladung und Vereinzelung hergestellt, da dort die Verarbeitung von Stückgütern im Pulk eine zentrale Aufgabe darstellt.

2 ENTLADUNG UND VEREINZELUNG IM PAKETSORTIERPROZESS

Sortier- und Verteilzentren stellen die zentralen oder regionalen Umschlagpunkte in den logistischen Netzwerken der KEP-Branche dar. Um ankommende Sendungen ihrem Zielort entsprechenden Ausgangstoren zuweisen zu können, ist eine vollständige Vereinzelung der Sendungen Voraussetzung. In den nachfolgenden Unterkapiteln erfolgt dementsprechend eine Einordnung der Vereinzelung in die Funktionsbereiche eines Sortier- und Verteilzentrums sowie eine Betrachtung der Vereinzelungsprozesse selbst und deren zugrundeliegenden Wirkprinzipien im Kontext der methodischen Konstruktion.

2.1 FUNKTIONSBEREICHE VON SORTIER- UND VERTEILZENTREN

Sortier- und Verteilzentren lassen sich in fünf unterschiedliche Funktionsbereiche unterteilen (vgl. [JtH12] sowie Abbildung 3). Der Sortierprozess beginnt waren-eingangsseitig mit der Entladung der ankommenden Transportfahrzeuge. Im Bereich der Vorbereitung werden die Pakete vereinzelt (sofern nicht schon im Prozess der Entladung durchgeführt) und gegebenenfalls von mehreren Förderstrecken zusammengeführt, gefolgt von der Identifizierung. In der nachfolgenden Sortierung werden

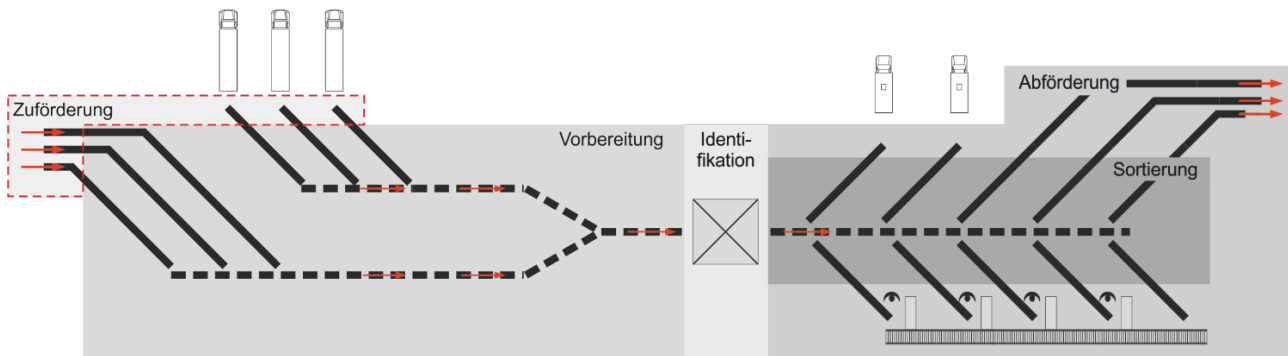


Abbildung 3. Funktionsbereiche in Sortier- und Verteilzentren

2.2 VEREINZELUNGSPROZESSE

In vielen Verteilzentren ist die manuelle Entladung der Stückgüter Stand der Technik, wobei der Prozess der Vereinzeln üblicherweise dem Mitarbeiter obliegt. Zieht man die automatische Entladung in Betracht, so kann von einer bei der Entladung erfolgten Vereinzelnung nicht ausgegangen werden. Die Vereinzelnung muss hierbei als zusätzlicher eigener Prozess gesehen werden, wobei nachfolgend von zwei unterschiedlichen Typen ausgegangen wird:

- Die 3D/2D-Vereinzelnung geht von einem dreidimensionalen Stückgutpulk aus (räumlich verteilte Stückgüter), als Ergebnis liegt nach dem Vereinzelnungsprozess ein flächig verteilter zweidimensionaler Stückgutpulk vor. Betrachtet man also die Projektion aller Stückgüter von oben auf die Förderfläche, so darf es nach der Vereinzelnung keine Überschneidungen der Paketumrisse geben (Konfiguration 1 in Abbildung 4).
- Die 2D/1D-Vereinzelnung setzt zu Beginn flächig verteilte Stückgüter voraus (Ergebnis des 3D/2D-Vereinzelnungsprozesses), das Ergebnis sind hintereinander angeordnete Pakete (eindimensionaler Stückgutstrom). Eine Projektion der einzelnen Stückgüter auf eine senkrecht zur Förderfläche und in Förderrichtung ausgerichtete Fläche darf somit keine Überschneidungen

die Stückgüter auf den Verteilförderer eingeschleust, verteilt und an der entsprechenden Zielstelle wieder eingeschleust. Im Bereich der Abförderung werden die Stückgüter dann den Endstellen des Sorters entnommen und für den Abtransport vorbereitet.

Für die Funktionsbereiche ab der Identifizierung ist das Vorliegen einzelner und gegebenenfalls ausgerichteter Stückgüter mit definierten Mindestabständen Voraussetzung. Demzufolge sind die vorgelagerten Bereiche gefordert, das angelieferte Paketspektrum diesen Anforderungen entsprechend zur Verfügung zu stellen.

der Paketumrisse aufweisen (Konfiguration 2 in Abbildung 4).

Zusätzlich zum eigentlichen Vereinzelnungsprozess werden oft auch Zusatzfunktionen wie die Ausrichtung der Stückgüter und die Erzeugung definierter Mindestabstände gefordert. Die Kombination beider Vereinzelnungstypen in einem Schritt führt zu einer 3D/1D-Vereinzelnung, beispielsweise kann eine manuelle oder über Roboter durchgeführte Entladung dazu gezählt werden.

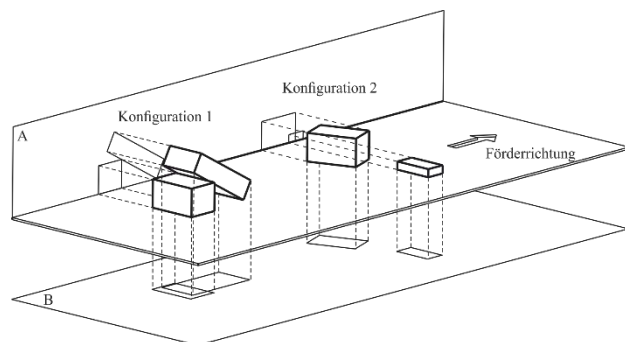


Abbildung 4. Nicht vereinzelter Anordnungen

2.3 WIRKPRINZIPIEN DER VEREINZELUNG

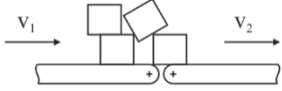
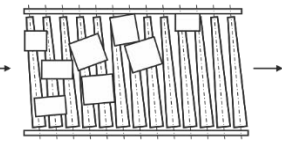
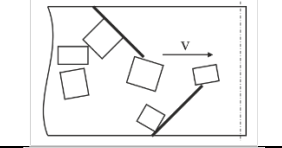
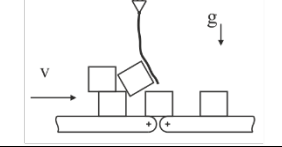
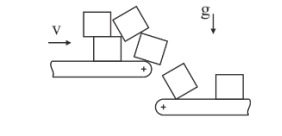
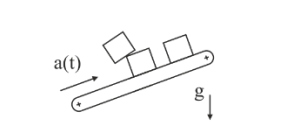
Betrachtet man die Vereinzelnung aus dem Blickwinkel der methodischen Konstruktion nach VDI 2221 oder Pahl/Beitz, so ist im Konstruktionsprozess nach der Ableitung einer funktionalen Struktur die Suche nach Wirkprinzipien wesentlich (vgl. [VDI93]; [PBF+07]). Tabelle 1 zeigt dazu einen Auszug verschiedener Wirkprinzipien mit dem Fokus auf die Vereinzelnung von Stückgütern der

KEP-Branche, der auf einer Patentrecherche von über 70 Patentschriften beruht. Die Wirkprinzipien sind unterschiedlichen Kriterien zugeordnet, wobei neben der Zuteilung zum Vereinzelungstyp auch das hinter dem Wirkprinzip liegende vorherrschende physikalische Prinzip dargelegt ist.

Aufbauend auf der Auswahl eines geeignet erscheinenden Wirkprinzips folgen im Prozess der methodischen

Konstruktion die detaillierte Ausgestaltung der Teillösungen und die Synthese zur Gesamtlösung. Zur Vermeidung hoher Kosten für den Prototypenbau kann diesem Schritt eine Überprüfung der Funktionalität sowie eine Optimierung der Gestaltungsparameter durch den Einsatz von Simulationen vorangestellt werden. Diese Thematik wird im folgenden Kapitel aufgegriffen, wobei unterschiedliche Simulationen hinsichtlich ihrer Eignung verglichen werden.

Tabelle 1. Ausgewählte Wirkprinzipien der Vereinzelung

Wirkprinzip	Prinzipbild	Vorherrschendes physikalisches Prinzip		Vereinzelungstyp
Sequentielle Geschwindigkeitszunahme		Oberflächenkraft	Reibkraft	3D/2D
Angestellte konische Rollen				2D/1D
Starre Abweiser			Normalkraft	2D/1D
Flexible Barriere				3D/2D
Vertikal versetzte (Band-)Förderer			Volumenkraft (Schwerkraft, Trägheitskraft)	3D/2D
Geneigter Bandförderer (beschleunigt)				

3 SIMULATION DES BEWEGungsverhaltens von STÜCKGÜTERN IM PULK

Im Hinblick auf eine Überprüfung der Funktionalität sowie einer Optimierung derselben können unterschiedliche Simulationen im Zuge des methodischen Konstruktionsprozesses unterstützend eingesetzt werden. Nachfolgend werden mit dem Fokus auf die Vereinzelung von einer großen Anzahl an Stückgütern unterschiedliche

Methoden verglichen und die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) als vielversprechendes Simulationswerkzeug detaillierter betrachtet.

3.1 VERGLEICH VERSCHIEDENER SIMULATIONSMETHODEN

Je nach Betrachtungsweise der Stückgüter kommen für die Simulation des Bewegungsverhaltens unterschiedliche Simulationen in Frage: Geht man von ein-

zelen Körpern aus, so erscheinen die Werkzeuge der Mehrkörpersimulation (im Folgenden mit MKS abgekürzt) als geeignet. Betrachtet man die Stückgüter im Pulk als Schüttgut, so ist auch die in der Schüttgutmechanik oft eingesetzte Diskrete-Elemente-Methode (DEM) miteinzubeziehen (vgl. [PöS05]; [ZZY+07]). Neben der DEM werden im Bereich der Schüttgutmechanik auch kontinu-

umsbasierte Methoden eingesetzt (vgl. [SCH09]), wobei für den vorliegenden Anwendungszweck die Zulässigkeit der Modellierung des Stückgutpulk als Kontinuum nicht gegeben sein muss. Tabelle 2 gibt einen kurzen Überblick zu den drei Simulationsmethoden MKS, DEM und CFD (FEM), ihren Eigenschaften und typischen Zielsystemen.

Tabelle 2. Vergleich verschiedener Simulationsmethoden (in Anl. an [VWB+09])

	MKS	DEM	CFD (FEM)
Modellelemente	Einzelkörper, Kopplungselemente, Bindungen	Einzelkörper, Kontaktdefinition, Bindungen	Finite Elemente, Knoten
Anzahl der Körper	$\leq 10^2$	$\leq 10^9$	~ 1
Anzahl der Freiheitsgrade des Modells	niedrig ($< 10^3$)	hoch ($< 6 \cdot 10^9$)	hoch ($< 10^9$)
Körperbewegung	groß (mehrere Meter)	groß (mehrere Meter)	klein (einige Millimeter)
Übertragung von Kräften	Kopplungselemente, Kontakte	Kontakt- und Bindungskräfte, elektrische und chemische Potenziale	Element-Knoten
Zielsystem	Gekoppelte mechanische Systeme	Nicht gekoppelte Vielkörpersysteme	Einzelkörper, Fluide
Anwendungszweck, Zielgrößen	Bewegungen, Kraftgrößen	Bewegungen, Kraftgrößen, Spannungen, Verformungen	Verformungen, Spannungen, Dichte- und Bewegungsfelder
Anwendungsbeispiel	Schwingungsanalyse eines Fahrwerks	Bunkeraustrag in der Schüttgutmechanik	Spannungsverteilung in Bauteilen, Strömungsuntersuchungen

Der Vorteil der MKS und der DEM liegt darin, dass der Fokus auf dem Einzelkörper liegt. Das Bewegungsverhalten und andere Größen wie einwirkende Kräfte können direkt zugeordnet werden. Diese Zuordnung geht bei Anwendung der FE-Methoden verloren, auch sind nicht homogene Materialflüsse schwer abzubilden (aufgrund der Mittelung der Stoffeigenschaften). Für den vorliegenden Beitrag wurden demzufolge die MKS und die DEM weiterverfolgt und verglichen, wobei insbesondere hinsichtlich der Eignung für große Stückgutzahlen für die DEM Vorteile auszumachen sind (vgl. dazu Abbildung 5 für einen Vergleich der Berechnungsdauer bei steigender Stückgutzahl sowie [FWJ13]). Dieser Vorteil beruht darauf, dass die MKS ihren Schwerpunkt auf Mehrkörpersystemen hat, bei denen der Freiheitsgrad des Gesamtsystems durch Bindungen (meist Gelenke) kleiner ist als die Summe der Freiheitsgrade über alle Körper. Bei der vorliegenden Problemstellung dagegen ist von vielen Körpern auszugehen, deren Freiheitsgrade nicht eingeschränkt

sind (die Bewegung wird vorwiegend durch Kontaktkräfte beeinflusst), was die typische Aufgabenstellung in DEM-Simulationen darstellt.

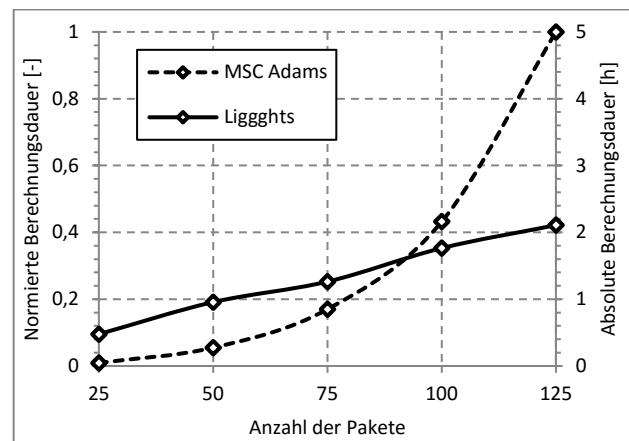


Abbildung 5. Berechnungsdauer MKS vs. DEM [FWJ13]

Auch hinsichtlich der Modellierung der Fördertechnik ist die DEM-Methode gut geeignet, was zahlreiche Anwendungen in der Schüttguttechnik zeigen (vgl. [ZZY+08]). In einzelnen Anwendungen wurde die DEM auch bei Stückgütern schon angewandt (vgl. [CRR14], [DRN11]). Vorteile bei der Modellierung mit der DEM sind dabei die Möglichkeiten, einer Geometrie Oberflächengeschwindigkeiten zu überlagern (beispielsweise zur Abbildung von „endloser“ Fördertechnik wie Bandförderern) und das Hinzufügen sowie Entfernen von Komponenten (Geometrie, Partikel/Körper) während der Simulation.

3.2 VERGLEICH VON PRÜFSTANDS- UND SIMULATIONSERGEBNISSEN

Aufgrund der vielversprechenden Eigenschaften der DEM für die Simulation des Bewegungsverhaltens einer großen Anzahl an Stückgütern wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, um Aussagen über die Qualität der Vorhersage des Bewegungsverhaltens zu erhalten. Dazu wurde das Bewegungsverhalten von Stückgütern auf einem Prüfstand mit Simulationsergebnissen verglichen, wobei die Pakete in der Simulation als sogenannte Multisphere-Körper (Körper aus starr verketteten Kugeln) approximiert wurden (vgl. Abbildung 6). Dabei ergibt sich bei ebenen Oberflächen des zu approximierenden Körpers eine wellige Oberfläche im Modell, wobei Vorversuche gezeigt haben, dass insbesondere eine unregelmäßige Anordnung von sich überlappenden Kugeln unterschiedlicher Durchmesser vorteilhaft ist (dabei wird beim Abgleiten zweier welliger Oberflächen aneinander ein möglicher Formschluss vermieden).

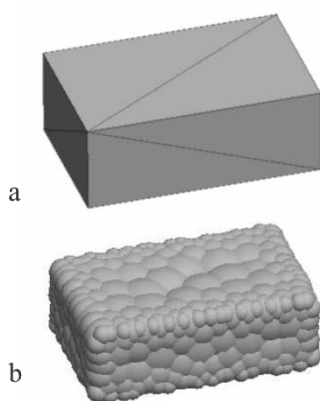


Abbildung 6. Multisphere-Approximation (b) des Paketes (a)

Das Versuchsdesign wurde dahingehend gestaltet, dass die zu erwartenden Bewegungsvorgänge und Interaktionen in einem Stückgutpulk mit den Teilversuchen abgedeckt sind. Die Versuche umfassten dabei sowohl ebene Bewegungsvorgänge wie sie beispielsweise auf einem Bandförderer zu erwarten sind als auch Fallversuche in Bezug auf die Bewegungsvorgänge bei der 3D/2D-Vereinzelung. Die Versuchsszenarien wurden so konzipiert, dass sowohl Interaktionen der Pakete mit der För-

dertechnik (Bandförderer, Abweiser) erfolgten als auch Interaktionen zwischen den Paketen. Die Versuchsparameter umfassten unterschiedliche Fördergeschwindigkeiten und Paketeigenschaften (Abmessungen, Gewicht). Hinsichtlich des Paketspektrums wurde dabei auf die Analyse der Aufzeichnungen eines Paketverteilzentrums zurückgegriffen. Der Fördergeschwindigkeitsbereich variierte zwischen 0,3 m/s und 0,7 m/s, da im Bereich der Vereinzelung die Fördergeschwindigkeiten üblicherweise deutlich unter jenen der Verteilförderer liegen (letztere betragen oft 2,5 m/s und darüber). Die steuernden Parameter im Simulationsmodell wurden über die statistische Versuchsplanung dahingehend angepasst und optimiert, dass die Abweichungen zu den Prüfstandsergebnissen minimale Werte erreichten.

Im Folgenden werden auszugsweise einzelne Ergebnisse dieser Versuche dargestellt. Abbildung 7 zeigt einen Auszug der Ergebnisse zu einem Abweiserszenario (dieses Szenario bezieht sich auf eine 2D/1D-Vereinzelung nach dem Wirkprinzip „Starre Abweiser“ aus Tabelle 1). Dargestellt sind die Bewegungsverläufe und die Verdrehungen der Pakete über der Zeit. Die Gegenüberstellung von Versuchs- und Simulationsergebnissen zeigt dabei Abweichungen im Bereich innerhalb von 3 cm (translatorisch) bzw. 5° (Verdrehungswinkel der Pakete).

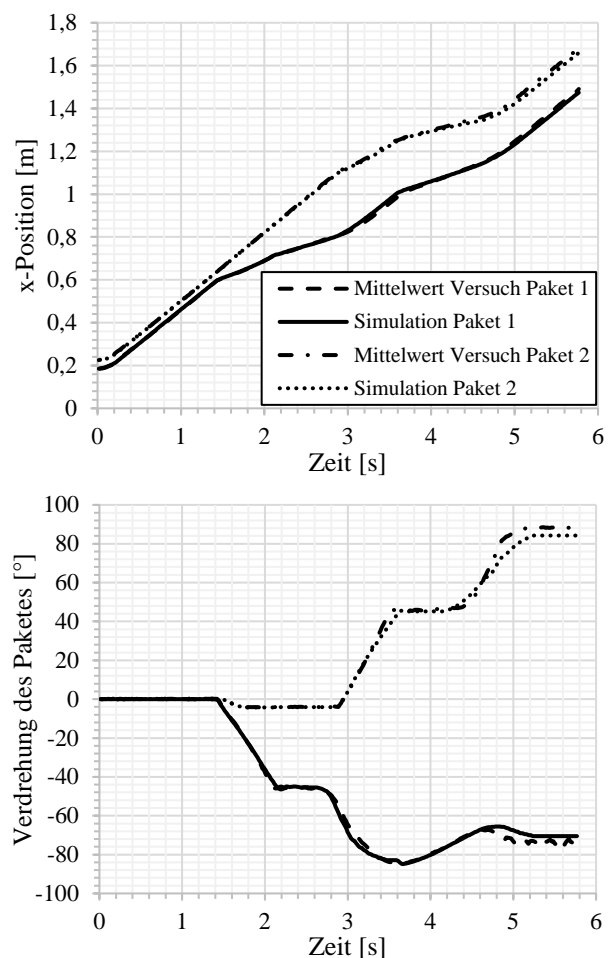


Abbildung 7. Bewegungs- und Winkelverläufe der Pakete (Simulation und Versuch)

Abbildung 8 zeigt zusätzlich zu den Bewegungsverläufen und den Verdrehungen der Pakete die Bewegungsbahnen während des Abweisvorgangs, wobei in den Momentaufnahmen die Paketpositionen und -orientierungen zu ausgewählten Zeitpunkten ersehen werden können.

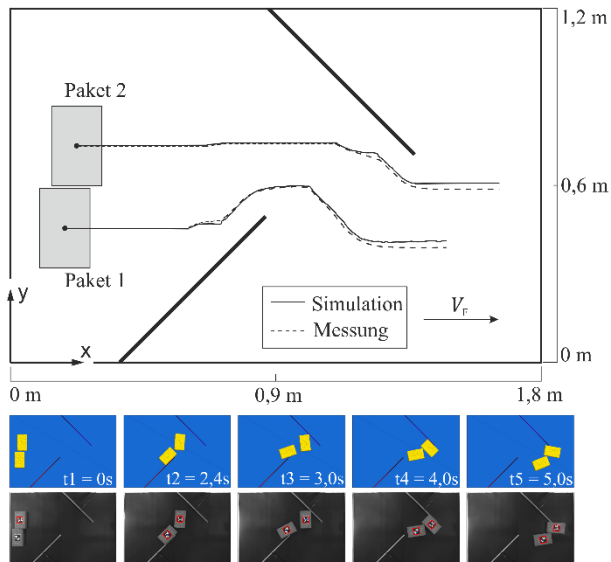


Abbildung 8. $y(x)$ -Vergleich (Simulation und Prüfstand)

Ein weiteres Szenario, bei dem das Fallen eines Paketes auf einen ruhenden Bandförderer untersucht wurde, führte auf die Ergebnisse nach Abbildung 9.

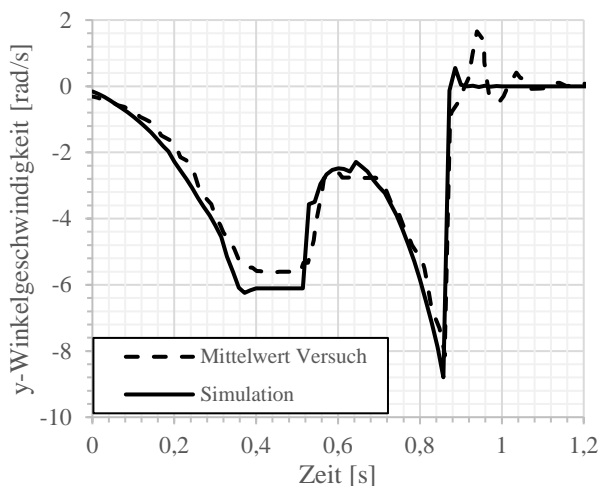
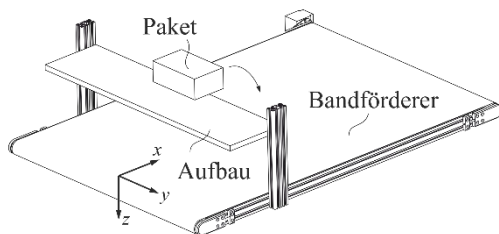


Abbildung 9. Fallversuch: Versuchsszenario und Verlauf der Winkelgeschwindigkeit

Die dargestellten Verläufe zeigen die Winkelgeschwindigkeiten aus Versuch und Simulation um die Horizontalachse (y-Achse aus der zugehörigen Versuchsskizze), um die sich das Paket während des Fallvorgangs dreht. Zuerst erfolgt ein Kippen des Pakets um die Vorderkante des Aufbaus. Dabei steigt die Winkelgeschwindigkeit absolut betrachtet auf etwa 6 rad/s an, gefolgt vom Abgleiten des Pakets an der Vorderkante des Aufbaus und einer kurzen Phase des freien Falls zwischen $t = 0,35s$ und $t = 0,52s$. Danach trifft das Paket mit einer Kante auf dem Bandförderer auf, die Winkelgeschwindigkeit verringert sich auf etwa 2,5 rad/s. Danach kippt das Paket weiter nach vorne, wobei die Winkelgeschwindigkeit wieder ansteigt. Kurz nachdem das Paket mit der beim Start oben liegenden Seite flach auf dem Bandförderer auftrifft, erreicht das Paket die Ruhelage.

Allgemein zeigen die Ergebnisse eine gute Übereinstimmung bezogen auf beabsichtigte Anwendung zur Vorhersage des Bewegungsverhaltens in einer frühen Konstruktionsphase. Maßgeblich bestimmend für diese Qualität sind im Wesentlichen die in das Simulationsmodell implementierten Reibkoeffizienten, die statistische Versuchsplanung weist hier die größten Effekte auf.

4 ANWENDUNG DER ADAPTIERTEN DEM ZUR OPTIMIERUNG DER VEREINZELUNG WÄHREND EINES AUTOMATISIERTEN ENTLADEPROZESSES

Aufbauend auf den Ergebnissen des vorhergehenden Kapitels wurde die DEM zur Vorhersage der Vereinzelungsqualität bei einem automatisierten Entladevorgang aus einem Container angewendet. Die Simulationen wurden im Zuge eines geförderten FFG-Projektes am Institut für Technische Logistik durchgeführt, dessen Projektinhalt die Konstruktion eines automatischen Entladesystems für Pakete ist. Das virtuelle Versuchsszenario besteht aus einer Containerladung von 50 Paketen, die auf einem horizontalen Bandförderer ruhen (vgl. Abbildung 10). Das Paketspektrum besteht dabei aus einem reduzierten Versuchsspektrum verschiedener Abmessungen und Gewichte, das auf den Daten eines Paketdienstleisters basiert, die Platzierung erfolgte zufallsgesteuert.

Die Pakete werden bei dem Entladevorgang durch den Bandförderer aus dem Container bewegt ($v_1 = 0,01$ m/s) und von einem nachfolgenden ansteigenden Bandförderer übernommen. Letzterer besitzt eine höhere Geschwindigkeit als der im Container befindliche Bandförderer, womit sich eine Anordnung nach den Wirkprinzipien „Sequentielle Geschwindigkeitszunahme“ und „Geneigter Bandförderer“ zur 3D/2D-Vereinzelung ergibt (vgl. Tabelle 1). Am Ende des geneigten Bandförderers wurde in der Simulation ein virtueller Kontrollbereich implementiert, der die Anzahl über-

einander liegender Pakete über die ganze Breite des Bandförderers zu jedem Zeitschritt ausgibt.

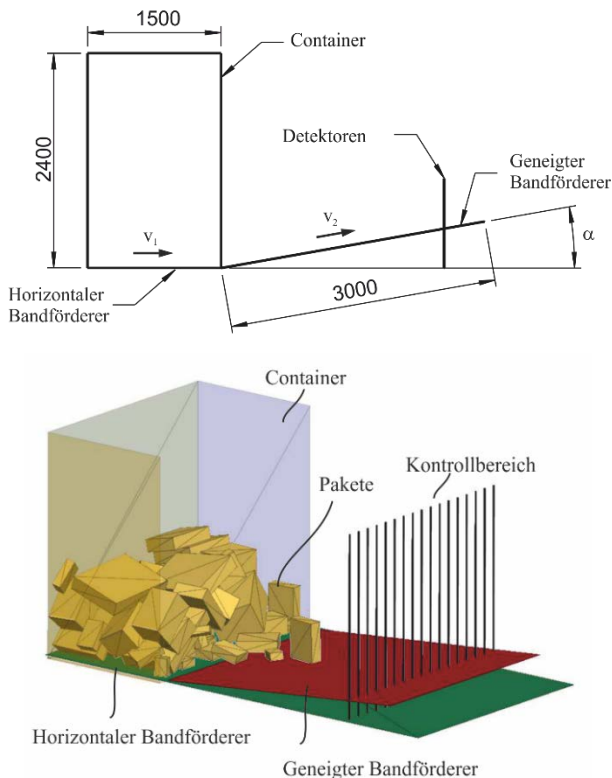
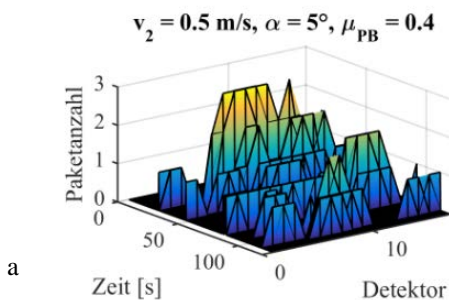


Abbildung 10. Simulationsszenario „Paketentladung mit Vereinzelung“

Die variablen Parameter des Szenarios waren die Geschwindigkeit des geneigten Bandförderers v_2 , dessen Winkel α und der Reibkoeffizient μ zwischen Gurt und Paketen. Mit je 3 Stufen ergeben sich damit 27 verschiedene Parameterkombinationen, Abbildung 11 zeigt zwei ausgewählte Ergebnisse mit unterschiedlicher Vereinzelungsqualität.



$v_2 = 1.0 \text{ m/s}, \alpha = 15^\circ, \mu_{PB} = 0.4$

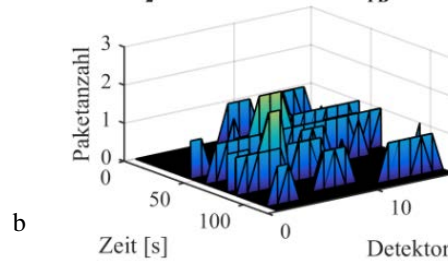


Abbildung 11. Vereinzelungsqualität bei unterschiedlichen Parameterkombinationen

Eine gute Vereinzelung zeigt sich in den Grafiken durch eine durchgehend flache Topologie (wenig übereinanderliegenden Pakete), bei hohen Spitzen kann auf eine entsprechend schlechtere Vereinzelung rückgeschlossen werden. Allgemein war aus den Ergebnissen der Versuchsläufe ersichtlich, dass eine höhere Geschwindigkeit des geneigten Bandförderers zu einer deutlich besseren Vereinzelung führte, ein größerer Winkel dieses Bandes zur Horizontalen wirkte sich ebenfalls positiv aus.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Vor dem Hintergrund steigender Sendungszahlen in der KEP-Branche wurde im vorliegenden Beitrag die Manipulation von Stückgütern im Pulk behandelt. Der Schwerpunkt lag dabei auf dem Bereich der Entladung und Vereinzelung, wobei unterschiedliche Wirkprinzipien für die Vereinzelung aufgezeigt wurden. Im Hinblick auf eine Optimierung der zu entwickelnden Vereinzelungstechnik im Zuge des methodischen Konstruktionsprozesses wurde die DEM als Simulationemethode mit anderen Simulationemethoden verglichen. Die vielversprechenden Eigenschaften der DEM zur Vorhersage des Bewegungsverhaltens von Stückgütern im Pulk führte auf eine detaillierte Untersuchung der Vorhersagequalität, wobei Prüfstands- und Simulationsergebnisse in verschiedenen Szenarien verglichen wurden. Abschließend wurde die DEM beispielhaft auf ein Entladungs- und Vereinzelungsszenario angewendet, wobei für die Vereinzelungsqualität günstige Parameterkombinationen identifiziert wurden.

Betrachtet man die Entwicklung des KEP-Marktes, so lassen die wirtschaftlichen Kennzahlen auf einen weiteren Anstieg der Sendungszahlen schließen. Dementsprechend bieten jene Prozesse, bei denen Stückgüter im Pulk verarbeitet werden, großes Potential für eine möglichst durchgehende Automatisierung der Sortierprozesse in den Verteilzentren. Die DEM kann in diesem Sinne als Werkzeug genutzt werden, um die Entwicklung von Vereinzelungstechnik zu beschleunigen und zu optimieren. Die in diesem Beitrag dargestellten Ergebnisse bestätigen dies an ausgewählten Szenarien, dennoch muss festgehalten werden, dass weitere Validierungsschritte, die das Verhalten eines Stückgutpulses größeren Maßstabs im Fokus haben, die DEM als geeignete Methode weiter absichern müssen.

Zukünftige Forschungsarbeiten können hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten, auch die Erweiterung der DEM für biegeweiche Güter und die Kopplung mit anderen Simulationsmethoden stellen mögliche Forschungsgebiete dar.

LITERATUR

- [ATK16a] AT Kearney (Hrsg.): *Europe's CEP Market: Steady Growth Begins to Shift*. URL: <https://www.atkearney.com/documents/10192/5544202/Europes+CEP+Market%E2%80%B9Steady+Growth+Begins+to+Shift.pdf/b63e4b9e-8979-4d54-a7bb-0ee9cf6008df> - Abrufdatum: 07.03.2016
- [BIE16] Bundesverband Paket und Expresslogistik e.V. (BIEK) (Hrsg.): *KEP-Studie 2015 – Analyse des Marktes in Deutschland*. URL: http://www.biek.de/tl_files/biek/pressemitteilungen/2015/BIEK_KEP-Studie_2015.pdf - Abrufdatum: 07.03.2016
- [CRR14] Cao, Liu; Richter, Klaus; Richter, Christian et al.: *Simulation der peristaltischen Förderung von Stückgütern als Schüttgut*. In: *Logistics Journal: Referierte Veröffentlichungen*, Volume 2014. URL: http://www.logistics-journal.de/not-reviewed/2014/09/3995/cao_2014.pdf - Abrufdatum: 11.03.2016
- [DRN12] Dallinger, Niels; Risch, Thomas; Nendel, Klaus: *Simulation von Förderprozessen bei Vibrationsförderanlagen*. In: *Logistics Journal: Proceedings*, Volume 2012. URL: <http://www.logistics-journal.de/proceedings/2012/3426/04-dallinger-wgtl2012.pdf> - Abrufdatum: 11.03.2016
- [FWJ13] Fritz, Matthias; Wolfschluckner, Andreas; Jodin, Dirk: *Simulation von Paketen im Pulk*. In: *Logistics Journal: Referierte Veröffentlichungen*, Volume 2013. URL: http://www.logistics-journal.de/not-reviewed/2013/11/3813/fritz_2013.pdf - Abrufdatum: 20.04.2016
- [FWL+15] Fritz, Matthias; Wolfschluckner, Andreas; Landschützer, Christian et al.: *Simulation of parcel singulation processes - a DEM approach*. In: Kartnig, G.; Zrnic, N.; Bosnjak, S. (Hrsg.): *Proceedings of the XXI International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics*, Wien (2015), S.151-156.

- [JtH12] Jodin, Dirk; ten Hompel, Michael: *Sortier- und Verteilsysteme - Grundlagen, Berechnung und Einsatz*. 2.Aufl., Berlin/Heidelberg/New York : Springer, 2012. – ISBN 978-3-642-31289-2.
- [MQF+16] Molzow-Voit, Frank; Quandt, Moritz; Freitag, Michael; et al.: *Robotik in der Logistik – Qualifizierung für Fachkräfte und Entscheider*. Wiesbaden : Springer Gabler, 2016. - ISBN 978-3-658-08574-2.
- [PBF+07] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; et al.: *Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung*. 7.Aufl., Berlin/Heidelberg/New York : Springer, 2007. - ISBN 978-3-540-34060-7.
- [PöS05] Pöschel, Thorsten; Schwager, Thomas: *Computational Granular Dynamics – Models and Algorithms*. Berlin/Heidelberg/New York : Springer, 2005. – ISBN 978-3-540-21485-4.
- [SCH09] Schulze, Dietmar: *Pulver und Schüttgüter – Fließeigenschaften und Handhabung*. Berlin/Heidelberg : Springer, 2009. - ISBN 978-3-540-88448-4.
- [SEW08]. Scholz-Reiter, B.; Echelmeyer, W.; Wellbrock, E.: *Development of a Robot-Based System for Automated Unloading of Variable Packages out of Transport Units and Containers*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Qingdao, China (2008), S.2766-2770. – ISBN 978-1-4244-2503-7.
- [VDI93] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): *VDI-Richtlinie 2221 - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin : Beuth Verlag, 1993.
- [VWB+09] Vajna, Sandor; Weber, Christian; Bley, Helmut et al.: *CAX für Ingenieure – Eine praxisbezogene Einführung*. 2.Aufl., Berlin/Heidelberg : Springer, 2009. - ISBN 978-3-540-36038-4.
- [WIK16] WIK-Consult (Hrsg.): *Main Developments in the Postal Sector (2010-2013)*. URL: http://ec.europa.eu/growth/sectors/postal-services/studies/index_en.htm - Abrufdatum: 07.03.2016
- [ZZY+07] Zhu, H.P.; Zhou, Z.Y.; Yang, R.Y.; Yu, A.B.: *Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments*. In: *Chemical Engineering Science*, Volume 62 (2007), S.3378-3396.
- [ZZY+08] Zhu, H.P.; Zhou, Z.Y.; Yang, R.Y.; Yu, A.B.: *Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings*. In: *Chemical Engineering Science*, Volume 63 (2008), S.5728-5770.

Dipl.-Ing. Matthias Fritz, geb. 1983, studierte zwischen 2004 und 2010 Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau an der TU Graz. Aktuell arbeitet er als Universitätsassistent am Institut für Technische Logistik an der TU Graz, Forschungsschwerpunkte sind Simulation in der Entwicklung und Materialflusstechnik.

Tel: +43 316 873-7324, Fax: +43 316 873-7827, E-Mail: matthias.fritz@tugraz.at

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Jodin, geb. 1958, arbeitete nach seinem Maschinenbaustudium drei Jahre bei der Firma Agiplan, um dann 1991 an der Universität Dortmund zu promovieren. Er forschte und lehrte von 1991 bis 2009 als Oberingenieur am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen und leitet seit 2009 das Institut für Technische Logistik an der TU Graz.

Tel: +43 316 873-7320, Fax: +43 316 873-107320, E-Mail: dirk.jodin@tugraz.at

Adresse: Institut für Technische Logistik, TU Graz, Infeldgasse 25e, 8010 Graz, Österreich.