



Matthias Fritz, Dipl.-Ing.

Beitrag zur Simulation des Bewegungsverhaltens von Stückgütern im Pulk im Kontext der Vereinzelung

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer und Erstgutachter

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Jodin

Zweitgutachterin

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Katrin Ellermann

Institut für Technische Logistik

Graz, November 2016

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

Datum

Unterschrift

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Universitätsassistent am Institut für Technische Logistik der Fakultät Maschinenbau. Begleitet von verschiedenen Industrieprojekten vor dem Hintergrund einer wachsenden Logistikbranche entstanden im Rahmen meiner Tätigkeit verschiedene Ideen und Ansätze, von denen einzelne Eingang in die vorliegende Arbeit gefunden haben.

Neben einem Ansatz und einer Idee benötigt es zusätzlich Freiraum für Forschung und die dafür benötigte Zeit, wofür ich Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Jodin neben der Betreuung und den Ratschlägen ganz besonders danken möchte. Für die Übernahme des Zweitgutachtens danke ich Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Katrin Ellermann.

Einen großen Dank schulde ich auch den vielen Personen, die direkt oder indirekt einen Beitrag zur Erstellung dieser Arbeit geleistet haben. An dieser Stelle möchte ich Herrn Stefan Sturm, BSc. hervorheben, der mich bei der Durchführung der Versuche tatkräftig unterstützt hat, auch die vielen fachlichen Diskussionen im Kollegenumfeld sollen nicht unerwähnt bleiben.

Zuletzt möchte ich auch meiner Familie danken, die mich immer wieder motivierend unterstützt hat und neben der Arbeit für willkommene Abwechslung gesorgt hat.

Kurzfassung

Aufgrund steigender Sendungszahlen in der KEP-Branche (Kurier- Express- und Paketdienste) werden in den Verteilzentren der logistischen Netzwerke immer größere Durchsätze gefordert. Dies führt zusammen mit einem schwächer steigenden Sendungserlös zu einem Automatisierungsdruck in den Verteilzentren, um die Sortier- und Verteilprozesse mit noch größerer Effizienz bewältigen zu können. Neben der bereits hohen Automatisierung im Bereich der Identifikation und Sortierung überwiegen im Bereich der Entladung und Vereinzelung noch manuelle Abläufe. Ein neuer Ansatz in diesem Kontext ist die Betrachtung der Stückgüter als Schüttgut, wobei Entleerungsmethoden sowie Förder- und Vereinzelungsprinzipien der Schüttguttechnik in den Fokus rücken. Die vorliegende Arbeit greift diese Thematik auf, indem in einem ersten Schritt die Vereinzelung von Stückgütern im Pulk detailliert analysiert und hinsichtlich zugrundeliegender Wirkprinzipien untersucht wird. In einem weiteren Schritt wird eine geeignete (Simulations-)Methode zur Vorhersage des Bewegungsverhaltens großer Stückgutzahlen in Vereinzelungsprozessen identifiziert und über den Vergleich mit Prüfstandsergebnissen an Testszenarien hinsichtlich ihrer Eignung überprüft. Im abschließenden Teil erfolgt eine Zusammenführung, indem die aus dem Auswahlprozess hervorgegangene Diskrete-Elemente-Methode (DEM) auf ausgewählte Wirkprinzipien der Vereinzelung angewendet wird.

Abstract

Due to the increasing number of shipments in the CEP-industry (courier, express and parcel services) the demands for a higher throughput in distribution centres grow constantly. Together with a less increasing shipment revenue, this leads to the trend of automatizing processes in distribution centres to improve efficiency. While sortation processes and identification have already reached a high degree of automation, especially the remaining manual tasks like unloading and singulation have to be substituted by automated parcel handling equipment. A new approach in this context considers unit loads as bulk goods. The present work addresses this approach by analysing the singulation process and developing working principles to singulate a large quantity of unit loads. In a subsequent step, a simulation method to predict motion behaviour of unit loads in singulation processes is identified. The comparison between test stand results and simulation results enables an evaluation of the suitability of the discrete-element-method (DEM). Finally, the results of those two steps are combined by applying the discrete-element-method to selected working principles of singulation.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung.....	II
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis.....	VII
1 Einleitung	1
1.1 Die KEP-Branche als Innovationstreiber	1
1.2 Forschungsfrage	4
1.3 Gliederung und Aufbau der Arbeit.....	6
2 Stand von Wissenschaft und Technik	7
2.1 Einordnung der Vereinzelung in die Intralogistik.....	7
2.1.1 Materialflusssysteme	7
2.1.2 Sortier- und Verteilsysteme.....	9
2.2 Vereinzelung in Wissenschaft und Technik.....	13
2.2.1 Vereinzelung von Stückgütern im Fokus der Wissenschaft.....	13
2.2.2 Vereinzelung von Stückgütern: Technische Lösungen	18
2.3 Vereinzelungsobjekte: Stückgut in der KEP-Branche	23
2.4 Methodische Konstruktion	28
2.5 Statistische Versuchsplanung (DoE).....	30
2.5.1 System und wichtige Kenngrößen.....	31
2.5.2 Ablauf einer DoE-Studie	32
2.5.3 Versuchspläne	33
3 Entwicklung von Wirkprinzipien der Vereinzelung	35
3.1 Ziele und Anforderungen an die Vereinzelung	35
3.2 Abstraktion des Vereinzelungsprozesses – eine funktionsorientierte Darstellung	37
3.3 Wirkprinzipien der Vereinzelung.....	39
3.3.1 Vereinzelung durch Oberflächenkräfte	40
3.3.2 Vereinzelung durch Volumenkräfte	44
4 Methoden zur Modellbildung von Stückgütern im Pulk.....	48
4.1 Methoden der Mehrkörperdynamik/-systeme	49
4.2 Partikelbasierte Beschreibungsmethoden.....	50
4.3 Kontinuumsbasierte Methoden	53
4.4 Zelluläre Automaten.....	54
4.5 Vergleich und Auswahl geeigneter Beschreibungsmethoden	55
4.5.1 Abbildung der Stückgüter	56
4.5.2 Abbildung der Fördertechnik	57
4.5.3 Beschreibung des Interaktionsverhaltens (Kontaktverhalten).....	58
4.5.4 Ergebnisgrößen.....	58
4.5.5 Zusammenfassung.....	59
4.6 Diskrete-Elemente-Methode (DEM).....	62
4.6.1 Kontaktdetektion	62
4.6.2 Berechnung der Kontaktkräfte und -momente	64
4.6.3 Berechnung der Bewegungsgleichungen	65
4.6.4 Erweiterung der DEM auf nicht kugelförmige Partikel	67
4.7 Adaption der DEM für Simulationen von Stückgütern bei Fördervorgängen	69
4.7.1 Modellbildung der Stückgüter.....	69

4.7.2	Fördertechnik	72
4.7.3	Kontaktmodell	73
5	Virtuelle und reale Versuchsszenarien	77
5.1	Auswahl der Versuchsszenarien	77
5.2	Prüfstands Aufbau	80
5.2.1	Prüfstands Aufbau „Ebene Stückgutbewegung“	81
5.2.2	Prüfstands Aufbau „Fallversuch“	84
5.3	Versuchsplanung und Faktorauswahl	85
5.3.1	Auswahl der Faktoren	86
5.3.2	Erstellung der Versuchspläne	89
6	Auswertungen der experimentellen Untersuchungen	91
6.1	Szenario „Pakete klein“ mit einem Paket	91
6.1.1	Ergebnisse aus den Prüfstandsversuchen	91
6.1.2	Simulationsergebnisse und Abweichungsanalyse	93
6.2	Szenario „Pakete klein“ mit zwei Paketen	97
6.2.1	Ergebnisse aus den Prüfstandsversuchen	97
6.2.2	Simulationsergebnisse und Abweichungsanalyse	97
6.3	Szenario „Pakete groß“ mit zwei Paketen	103
6.3.1	Ergebnisse aus den Prüfstandsversuchen	103
6.3.2	Simulationsergebnisse und Abweichung zu Prüfstandswerten	104
6.4	Szenario „Fallversuch“ mit einem Paket	108
6.5	Szenario „Fallversuch“ mit zwei Paketen	111
6.6	Bewertung und Interpretation der Ergebnisse	115
6.6.1	Bewertung und Interpretation zur ebenen Stückgutbewegung	115
6.6.2	Interpretation und Bewertung der Fallversuche	117
7	Anwendung der DEM auf ausgewählte Vereinzlungsprinzipien	120
7.1	Vereinzlungsszenario „Geneigter Bandförderer“	121
7.2	Vereinzlungsszenario „Vertikal versetzte Bandförderer“	124
7.3	Vorgehensweise und Prozess für die Anwendung	126
8	Zusammenfassung und Ausblick	129
9	Symbolverzeichnis	132
10	Literaturverzeichnis	135
Anhang	VIII
A1	Datenblätter	VIII
A2	Versuchspläne	XII
A3	Ergebnisse der Versuchsläufe	XIII
A4	Ergebnisse der Simulationsläufe	XV
A5	Ergebnisse der Anwendungsszenarien	XVIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zuwächse der Umsätze in der KEP-Branche 2011 (in Anl. an [ATK16b], S.3)	2
Abbildung 2: Sendungserlös und -zahl (europäischer KEP-Markt, in Anl. an [ATK16a, S. 2])....	3
Abbildung 3: Vierstufiges Logistiksystem nach ([GUD10], S.20)	8
Abbildung 4: Netzwerke der KEP-Branche nach ([GUD10], S.940f)	9
Abbildung 5: Prozesskette eines Paketdienstleisters	9
Abbildung 6: Flussdiagramm eines Sortierprozesses (in Anl. an [ArF09], S.226)	10
Abbildung 7: Funktionsbereiche einer Sortieranlage nach ([JtH12], S.26)	11
Abbildung 8: Singulation von Objekten unterschiedlicher Form ([CSF12], S.3882)	14
Abbildung 9: Singulation von Sendungen ([FCA89], S.4)	14
Abbildung 10: Paketroboter [Quelle: Deutsche Post AG]	15
Abbildung 11: Ausrichtung polygonförmiger Objekte durch Hindernisse ([BGO98], S.250)	15
Abbildung 12: Ersatzmodell eines Stückgutes auf einem Bandförderer ([MÖH83], S.17ff)	16
Abbildung 13: Untersuchte Fördertechnik von Piatkowski	17
Abbildung 14: Simulation eines Wendelförderers für Schrauben mit der DEM ([DRN12], S.5)	17
Abbildung 15: Simulation der Stückgutförderung mit einem Peristaltikförderer ([CRR14], S.7)	18
Abbildung 16: Linear Parcel Singulator® von Fives Cinetic	19
Abbildung 17: Visicon Singulator® der Siemens AG (Quelle: www.siemens.com/presse)	20
Abbildung 18: Entladesystem RUBUS® der Siemens AG ([SIE13], S.5)	21
Abbildung 19: Accord Singulator® von Fives Cinetic, Patentzeichnung ([SCH14], S.1)	21
Abbildung 20: Automatic Parcel Singulator® der BEUMER Group	22
Abbildung 21: SSI Order Verifier® (Quelle: SSI Schäfer)	23
Abbildung 22: Anteil der quaderförmigen Pakete größer 100x50x20 mm (LxBxH)	25
Abbildung 23: Histogramme Paketeigenschaften	26
Abbildung 24: Verschiedene Funktionsstrukturen technischer Systeme	30
Abbildung 25: System, Ein- und Ausgangsgrößen in einer DoE-Studie ([SBH10], S.140)	31
Abbildung 26: Prozessschritte einer DoE-Studie (in Anlehnung an [SBH10] und [KLE13])	32
Abbildung 27: Versuchspläne	34
Abbildung 28: Nicht miteinander in Kontakt stehende Körper	35
Abbildung 29: Beispielkonfigurationen nicht vereinzelter Pakete	36
Abbildung 30: Gesamtfunktion der Vereinzelung	37
Abbildung 31: Teilfunktionen der Vereinzelung	38
Abbildung 32: Mehrkörpersystem (in Anl. an [WOE11], S.2)	49
Abbildung 33: Mögliche Kräfte auf ein Partikel (in Anl. an [ZZY+07], S.3380)	51
Abbildung 34: Modellierungsansätze für nicht kugelförmige Körper	52
Abbildung 35: Abweisvorgang zylindrischer Objekte ($t=3s$) (vgl. [GHS+14], S.3308)	54
Abbildung 36: Architekturen bei zellulären Automaten (vgl. [ChD98], S. 15)	55
Abbildung 37: Testszenario Containerentladung (vgl. [FWJ13])	61
Abbildung 38: Berechnungsschema DEM-Methode ([RAK12], S.99)	63
Abbildung 39: Zerlegung des Simulationsraums	64
Abbildung 40: Geometrische Interpretation der Störmer-Verlet Methode (vgl. [HLW06], S.8)	66
Abbildung 41: Kontaktmöglichkeiten einer Multisphere-Kugel (vgl. [KRW+08], S.157)	68
Abbildung 42: Einfluss der approximierten Kontur	70
Abbildung 43: Statischer Reibversuch	71
Abbildung 44: Modellierung der fördertechnischen Komponenten	73
Abbildung 45: Kontaktmodell	76
Abbildung 46: Versuchsszenarien „Ebene Stückgutbewegung“	78
Abbildung 47: Fallversuch	79

Abbildung 48: Aufbau Bandförderer mit Kamerasystem	81
Abbildung 49: Abmessungen und Paketpositionen (Szenarien „Pakete klein“).....	82
Abbildung 50: Abmessungen und Paketpositionen (Szenario „Pakete groß“)	82
Abbildung 51: Pakete mit Marker (Seitenlänge $a=100\text{mm}$)	83
Abbildung 52: Abmessungen und Paketpositionen (Szenarien „Fallversuch“).....	84
Abbildung 53: DoE-Systembeschreibung Simulationsstudie	85
Abbildung 54: $y(x)$ -Verlauf Szenario „Pakete klein“ (1 Paket).....	94
Abbildung 55: $x(t)$ -Verlauf Szenario „Pakete klein“ (1 Paket).....	94
Abbildung 56: $y(t)$ -Verlauf Szenario „Pakete klein“ (1 Paket).....	95
Abbildung 57: Winkelverlauf Szenario „Pakete klein“ (1 Paket).....	95
Abbildung 58: Paretodiagramm der Effekte Szenario „Pakete klein“ (1 Paket).....	96
Abbildung 59: $x(t)$ -Verlauf Szenario „Pakete klein“ (2 Pakete).....	98
Abbildung 60: $y(t)$ -Verlauf Szenario „Pakete klein“ (2 Pakete).....	99
Abbildung 61: Winkelverlauf Szenario „Pakete klein“ (2 Pakete)	99
Abbildung 62: $y(x)$ -Verlauf Szenario „Pakete klein“ (2 Pakete).....	100
Abbildung 63: Paretodiagramm der Effekte für Paket 1 (Szenario „Pakete klein“, 2 Pakete) ...	101
Abbildung 64: Paretodiagramm der Effekte für Paket 2 (Szenario „Pakete klein“, 2 Pakete) ...	102
Abbildung 65: $x(t)$ -Verlauf Szenario „Pakete groß“ (2 Pakete)	104
Abbildung 66: $y(t)$ -Verlauf Szenario „Pakete groß“ (2 Pakete)	105
Abbildung 67: Winkelverlauf Szenario „Pakete groß“ (2 Pakete).....	105
Abbildung 68: $y(x)$ -Verlauf Szenario „Pakete groß“ (2 Pakete).....	106
Abbildung 69: Paretodiagramm der Effekte (Szenario „Pakete groß“, 2 Pakete)	107
Abbildung 70: Winkelgeschwindigkeit um die y -Achse (Szenario „Fallversuch“, 1 Paket).....	108
Abbildung 71: Momentaufnahmen Bewegungsablauf (Szenario „Fallversuch“, 1 Paket).....	109
Abbildung 72: Paretodiagramm der Effekte (Szenario „Fallversuch“, 1 Paket).....	110
Abbildung 73: Winkelgeschwindigkeit Paket 2 (Szenario „Fallversuch“, 2 Pakete)	112
Abbildung 74: Momentaufnahmen Bewegungsablauf (Szenario „Fallversuch“, 2 Pakete)	112
Abbildung 75: Verschiedene Endlagen nach gleicher Simulationszeit	113
Abbildung 76: Paretodiagramme der Effekte (Szenario „Fallversuch“, 2 Pakete)	114
Abbildung 77: Vereinzlungsszenario "Geneigter Bandförderer"	122
Abbildung 78: Versuchsauswertung "Geneigter Bandförderer" (Auszug)	123
Abbildung 79: Vereinzlungsszenario "Vertikal versetzte Bandförderer"	124
Abbildung 80: Versuchsauswertung "Vertikal versetzte Bandförderer" (Auszug).....	125
Abbildung 81: Entwicklungsprozess für Vereinzlungstechnik	127

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Forschungsfragen	5
Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen der Paketabmessungen	27
Tabelle 3: Korrelationskoeffizienten nach Kendall der Paketeigenschaften	27
Tabelle 4: p-Values aus dem Hypothesentest zu Tabelle 3 mit der Software Matlab	28
Tabelle 5: Phasen des Entwicklungsprozesses nach [VDI93], [ROT00] und [PBF+07].....	29
Tabelle 6: Wirkprinzipien unter Nutzung von Reibkräften	41
Tabelle 7: Wirkprinzipien basierend auf Normalkräften durch Abweiser	42
Tabelle 8: Wirkprinzipien basierend auf Normalkräften durch Taschen und Mitnehmer	43
Tabelle 9: Wirkprinzipien basierend auf Normalkräften durch Druckunterschied.....	44
Tabelle 10: Wirkprinzipien basierend auf Volumenkräften.....	45
Tabelle 11: Anforderungen an die Beschreibungsmethode	48
Tabelle 12: Vergleich und Eignung der Beschreibungsmethoden	60
Tabelle 13: Vergleich der Simulationsmethoden MKS und DEM (vgl. [FWJ13])	61
Tabelle 14: Parameter zur Generierung eines Multisphere-Körpers in PFC3D.....	71
Tabelle 15: Modellierung der fördertechnischen Komponenten.....	73
Tabelle 16: Parameter der Versuchsszenarien „Ebene Stückgutbewegung“	83
Tabelle 17: Mögliche Steuergrößen für die DoE-Studie.....	86
Tabelle 18: Parameter zur Generierung der Multisphere-Körper	87
Tabelle 19: Faktorwerte Szenario „Pakete klein“ (1 Paket).....	88
Tabelle 20: Faktorwerte Szenario „Pakete klein“ (2 Pakete).....	88
Tabelle 21: Faktorwerte Szenario „Pakete groß“ (2 Pakete).....	88
Tabelle 22: Faktorwerte Szenario „Fallversuch“ (1 Paket).....	89
Tabelle 23: Faktorwerte Szenario „Fallversuch“ (2 Pakete).....	89
Tabelle 24: Abweichungsanalyse Szenario „Pakete klein“ (1 Paket)	93
Tabelle 25: Faktorstufen und -werte des Simulationslaufs (Szenario „Pakete klein“, 1 Paket) ..	93
Tabelle 26: Abweichungsanalyse Szenario „Pakete klein“ (2 Pakete)	97
Tabelle 27: Faktorstufen und -werte des Simulationslaufs (Szenario „Pakete klein“, 2 Pakete)..	98
Tabelle 28: Abweichungsanalyse Szenario „Pakete groß“ (2 Pakete).....	103
Tabelle 29: Faktorstufen und -werte des Simulationslaufs (Szenario „Pakete groß“, 2 Pakete)	104
Tabelle 30: Faktorstufen und -werte des Simulationslaufs (Szenario „Fallversuch“, 1 Paket) ..	108
Tabelle 31: Positionswerte der Paketendlage (Szenario „Fallversuch“, 1 Paket)	111
Tabelle 32: Faktorstufen und -werte des Simulationslaufs (Szenario „Fallversuch“, 2 Pakete).	111
Tabelle 33: Positionswerte der Paketendlage (Fallversuch mit zwei Paketen)	115
Tabelle 34: Paketparameter des Referenzspektrums.....	121
Tabelle 35: Parameter Vereinzelungsszenario "Geneigter Bandförderer"	122
Tabelle 36: Parameter Vereinzelungsszenario "Vertikal versetzte Bandförderer"	126

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Technische Logistik der TU Graz. Die Entwicklung des Paketmarktes kann als starker Motivator hinter dieser Arbeit gesehen werden, insbesondere in Bezug auf die notwendigen technischen Entwicklungen für den automatisierten Umschlag von Stückgütern.

Die folgenden Unterkapitel beleuchten die Hintergründe dieser Arbeit gefolgt von der Zielsetzung und dem Aufbau der Arbeit.

1.1 Die KEP-Branche als Innovationstreiber

Die KEP-Branche (Kurier-, Express- und Paketdienste) verzeichnet seit der Wirtschaftskrise 2008 konstant starke Zuwächse sowohl bei den Sendungsvolumina als auch bei den erzielten Umsätzen. Nach einer Studie des BIEK (Bundesverband Paket und Expresslogistik) stiegen die Sendungsvolumina in Deutschland seit dem Jahr 2000 um 64% auf 2,8 Mrd. Sendungen (vgl. [BIE16]; [WIK16]). Betrachtet man den ganzen europäischen Raum, so erkennt man, dass die Entwicklung in Deutschland keine Ausnahme darstellt, auch in vielen anderen europäischen Ländern gab es ähnliche Entwicklungen bei der Sendungszahl. [ATK16a] schätzt die Zahl der gesamten europäischen Sendungen im Jahr 2013 auf etwa 5,4 Mrd., [WIK16] auf 6,7 Mrd. im Jahr 2011¹. Je nach Einbeziehung verschiedener Sendungsarten geben unterschiedliche Studien dafür einen Gesamtumsatz von 37 bis 60 Mrd. Euro für die KEP-Branche im Jahr 2013 an, Tendenz steigend (vgl. [WIK16]; [ATK16a]). Abbildung 1 zeigt die Umsatzentwicklung einiger Länder für das Jahr 2011, wobei zwischen den nationalen (vertikale Achse) und internationalen Sendungen (horizontale Achse) unterschieden wird. Aus der Grafik lässt sich auch die Marktgröße ableiten, wobei insbesondere Deutschland, Frankreich und das Vereinigte Königreich hervorstechen. Nach [WIK16] repräsentieren allein diese drei Staaten mehr als die Hälfte des europäischen KEP-Marktes.

Schon jetzt stellt der Paketmarkt mit einem Anteil von über 50% des Umsatzes den größten Teil der gesamten KEP-Industrie in Deutschland dar (vgl. [BIE16]; [MRU16]). Starker Treiber dahinter ist der Onlinehandel, der von immer mehr Unternehmen und Konsumenten als Vertriebskanal genutzt wird. Gleichzeitig kämpfen aber die Unternehmen der KEP-Branche mit einem niedrigeren Sendungserlös, Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Entwicklung des Umsatzes und der Sendungsanzahl von 2011 bis 2013. Dabei wird deutlich, dass die Umsatzsteigerungen nicht mit dem

¹ Die unterschiedlichen Angaben sind insbesondere darauf zurückzuführen, dass den verschiedenen Studien bei der Marktanalyse unterschiedliche Definitionen hinsichtlich der einbezogenen Sendungen zugrunde liegen.

Anstieg der Sendungszahl mithalten konnten. Preiserhöhungen sind nach [ATK16c] nur schwer vermittelbar, daher müssen Wege gefunden werden, den Aufwand je Sendung zu minimieren, um die Preise halten zu können. Ein weiterer Trend nach [WIK16] und [ATK16a] ist die Verbesserung der Servicequalität im billigeren Standardsegment.

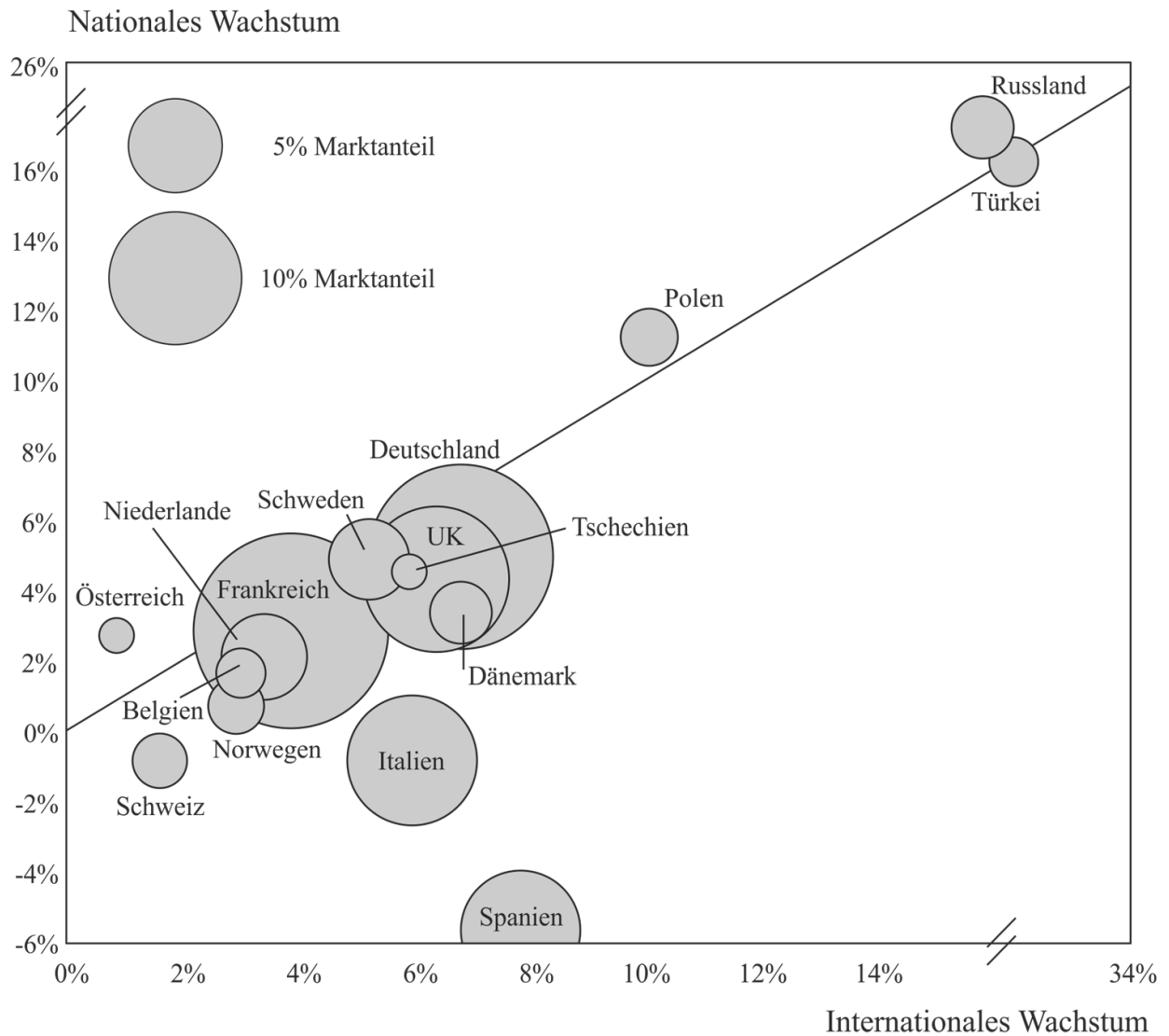


Abbildung 1: Zuwächse der Umsätze in der KEP-Branche 2011 (in Anl. an [ATK16b], S.3)

Die genannten Trends ziehen Konsequenzen nach sich: Durch die steigende Sendungszahl, kürzere Lieferfenster und bessere Servicequalität steigen in den Verteilzentren der KEP-Dienstleister in den Spitzenzeiten die Sendungsdurchsätze stark an. Gleichzeitig sind insbesondere im urbanen Raum verfügbare Flächen oft limitiert, was die Erweiterung von Flächen für Sortierzentren oder deren Neubau kostenintensiv gestaltet.

Bezieht man zusätzlich noch die Personalkosten von großen Distributionszentren mit ein, so kann der Trend zu immer höher automatisierten Verteilzentren leicht nachvollzogen werden. In vielen

Distributionszentren sind die zentralen Sorter bereits hochautomatisiert (vgl. [JoF14a]; [JtH12]), einige Bereiche sind aber weiterhin durch manuelle Handhabung der Pakete gekennzeichnet. Die Manipulation von Stückgütern bei der Be- und Entladung von Wechselbrücken mit gleichzeitiger Vereinzlung, Auflegen auf die Fördertechnik und vergleichbare Tätigkeiten durch das Personal sind mit Durchsätzen im Bereich von maximal 1.000 Einheiten/h limitiert.²

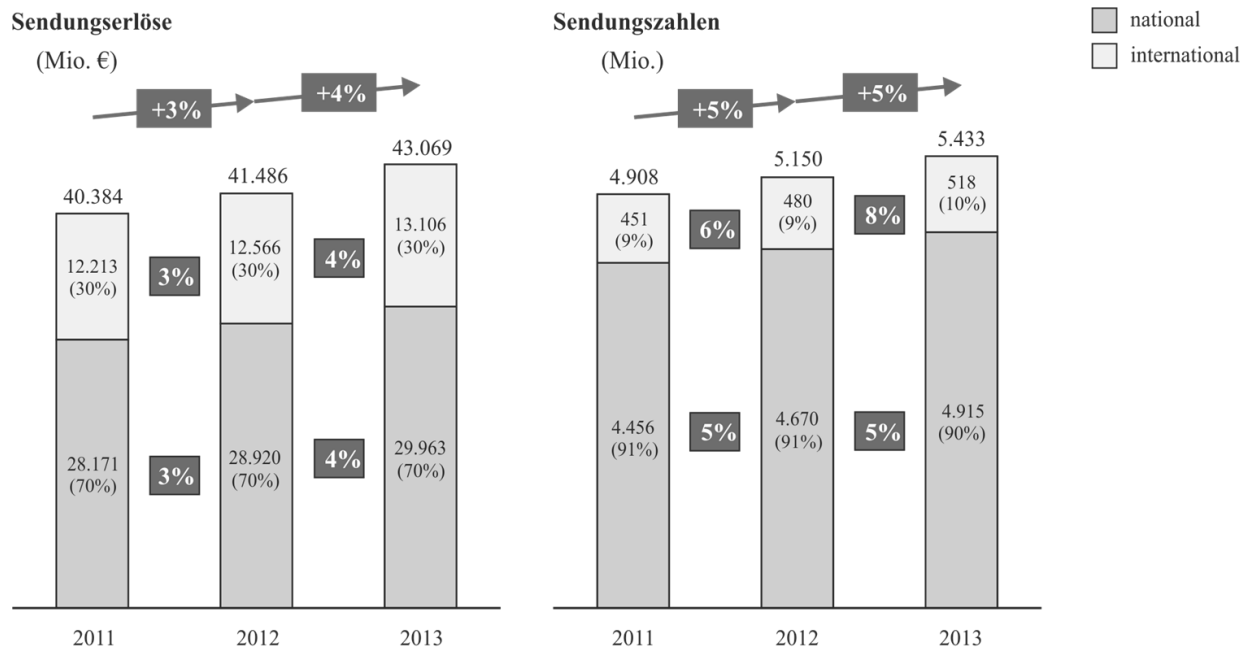


Abbildung 2: Sendungserlös und -zahl (europäischer KEP-Markt, in Anl. an [ATK16a, S. 2])

Vor diesem Hintergrund erscheint das Potential einer Automatisierung dieser Vorgänge sehr groß, wobei zwei unterschiedliche Trends abgeleitet werden können:

- **Automatisierung durch Roboter:** Das Ersetzen der menschlichen Arbeitskräfte durch Roboter ist in vielen Bereichen der Produktion Stand der Technik. In einigen Bereichen der Logistik hat sich dieser Trend ebenfalls manifestiert, man vergleiche beispielsweise automatisierte Vorgänge im Bereich der Kommissionierung oder Verpackung (vgl. [MQF+16]). Bei Produkten ähnlicher Beschaffenheit (Form, Material, Abmessungen, Gewicht) lassen sich Roboter sehr gut einsetzen. Sind diese Voraussetzungen nicht gegeben, müssen sowohl Greiftechnik als auch Bilderkennung hohe Anforderungen erfüllen. Durch die Fortschritte im Bereich der Bilderkennung wurden hier in der Vergangenheit neue Möglichkeiten eröffnet, wie der Paketroboter des Instituts BIBA zeigt (vgl. [SEW08] und Abbildung 10, S.15). Letzterer ist in der Lage, prinzipiell sortierfähiges Stückgut aus Wechselaufbaubrücken (WAB) zu entnehmen und vereinzelt auf nachfolgende Fördertechnik aufzulegen.

² Dieser Wert entstammt der Analyse eines Verteilzentrums, die im Rahmen eines Projekts vom Institut für Technische Logistik bei einem Paketdienstleister durchgeführt wurde

- Adaption von Methoden aus der Schüttguttechnik: Der Ansatz, eine große Anzahl an Stückgütern als Schüttgut zu betrachten, ist beispielsweise in einem Patent aus dem Jahr 2007 ersichtlich (vgl. [OSK08]). In diesem Kontext besteht die Möglichkeit, Entleerungsmethoden, Förderprinzipien oder Vereinzelungstechniken aus der Schüttguttechnik zu adaptieren.

1.2 Forschungsfrage

Durch die rapide Entwicklung des Onlinehandels ist die KEP-Branche gezwungen, den steigenden Durchsätzen mit geeigneter Technik zu begegnen, was insbesondere auch die Automatisierung noch manuell durchgeführter Vorgänge in logistischen Prozessen vorantreibt. Wie im Unterkapitel 1.1 beschrieben, stellt dabei eine Möglichkeit die Behandlung vieler Stückgüter als Schüttgut dar. Fördertechnik, die derartige Prozesse ermöglicht, ist dabei zuallererst zwei grundlegenden Anforderungen ausgesetzt:

- Die Funktionalität muss gewährleistet werden. Darunter ist zu verstehen, dass beispielsweise bei einer automatischen Entladung durch die Anordnung der technischen Gerätschaften alle Stückgüter entladen werden oder bei einer Vereinzelung von Stückgütern eine definierte Vereinzelungsqualität erreicht wird.
- Die Stückgüter müssen während des gesamten Vorgangs schonend manipuliert werden. Die Vorgaben, welchen Belastungswerten die Verpackung eines versendeten Stückgutes standhalten muss, ist bei einzelnen Paketdienstleistern genauer definiert (z.B. muss laut den Allgemeinen Geschäftsbedingungen der Dynamic Parcel Distribution GmbH & Co. KG (DPD) ein Paket eine Fallhöhe von 80cm auf jede Seite, Kante oder Ecke unbeschadet überstehen (vgl. [DPD16])). Zumeist wird aber nur durch Sätze wie *„Die Verpackung muss den Inhalt der Sendung gegen Belastungen, denen sie normalerweise während der Postbeförderung durch Druck, Stoß, Vibration und Temperatureinflüssen ausgesetzt ist, sicher schützen und hinreichend fest, druckstabil und ausreichend biegesteif sein“* [DHL16] auf den notwendigen Verpackungsschutz hingewiesen. Trotz dieser Absicherung bedeutet für jeden Paketdienstleister ein beschädigtes Paket einen Imageschaden und Zusatzaufwand bei einer Reklamation, daher sind schonende Prozesse zwingend erforderlich.

Da der Prototypbau im Zuge der Entwicklung geeigneter Fördertechnik kosten- und meist auch zeitintensiv ist, kann eine frühe Einschätzung hinsichtlich der Erfüllung der an das Produkt gestellten Anforderungen wie „Funktionalität“ oder „schonender Prozess“ Fehlentscheidungen und langwierige Versuche eindämmen. Auch in der methodischen Entwicklung wird diesem Umstand

große Bedeutung beigemessen, wobei die Simulation der zu entwickelnden Gerätschaft oder von Teilsystemen einen möglichen Weg darstellt (vgl. [VDI93]; [PBF+07]).

Vor diesem Hintergrund fokussiert der Kern der vorliegenden Arbeit auf zwei Themen:

1. Da in den Sortierprozessen von Distributionszentren in der KEP-Branche die Identifikation der Stückgüter eine saubere Vereinzelung voraussetzt, kommt letzterer bei der Betrachtung von Stückgütern als Schüttgut eine zentrale Rolle zu. In Abschnitt 3.3 dieser Arbeit wird daher eine Analyse und Klassifizierung von Vereinzelungsprinzipien beleuchtet, die zum Teil auch schon in verschiedenen Branchen technisch realisiert wurden.
2. Zur Beschleunigung des Entwicklungsprozesses und Reduktion der Prototypkosten ist eine geeignete Beschreibung der Prozesse vorteilhaft. Dabei stellt sich die Frage, mit welchen Beschreibungsmethoden eine Vorhersage des Bewegungsverhaltens von Stückgütern und der entstehenden Belastungen auf selbige bei Interaktion mit anderen Stückgütern und/oder der Fördertechnik möglich ist.

Das übergeordnete Ziel der Dissertation ist demnach die Schaffung einer Grundlage für eine effiziente und zielgerichtete Entwicklung von Vereinzelungstechnik für Stückgüter durch Identifikation zugrundeliegender Wirkprinzipien und Methoden zur Vorhersage des Bewegungsverhaltens während des Vereinzelungsprozesses.

Daraus abgeleitet ergeben sich die Forschungsfragen nach Tabelle 1:

Tabelle 1: Forschungsfragen

Forschungsfrage	Ergebnis
Wie kann Vereinzelung definiert werden? Wie sieht das zugrundeliegende Schema aus, das allgemein für Vereinzelung gültig ist?	Abstrahierter Vereinzelungsvorgang
Welche Methoden werden in verschiedenen Branchen zur Vereinzelung von Festkörpern eingesetzt? Welche physikalischen Prinzipien liegen ihnen zugrunde?	Wirkprinzipien zur Vereinzelung von Stückgütern
Welche Beschreibungsmethoden (analytische, numerische) eignen sich für die Simulation großer Stückgutmengen?	Geeignete Methoden zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens großer Stückgutmengen
Wie hoch ist die Genauigkeit der Simulation des Bewegungsverhaltens?	Validierte Beschreibungsmethode
Welche Parameter bestimmen wesentlich die Genauigkeit des Simulationsergebnisses?	Parameter mit den stärksten Effekten auf das Simulationsergebnis

1.3 Gliederung und Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Dissertation folgt dem im Abschnitt 1.2 beschriebenen Ziel der Arbeit, beginnend mit einer Einordnung der Vereinzelung in die Intralogistik. Dazu werden im Unterkapitel 2.1 die logistischen Prozesse in Materialflusssystemen beleuchtet, wobei einerseits auf die Netzwerkstrukturen (örtliche Betrachtung) als auch auf die Abläufe Vorlauf, Hauptlauf und Nachlauf (zeitliche Betrachtung) Bezug genommen wird. Dies ist insofern von Bedeutung, als dass das ansteigende Paketaufkommen bei den vorliegenden Strukturen und Abläufen jene Engpassproblematik hervorruft, die die Verteilzentren vor die Aufgabe eines hochautomatisierten und effizienten Paketumschlags stellt.

Unterkapitel 2.2 beschreibt den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik im Fokus der Vereinzelung, wobei auf Publikationen dieses Forschungsfeldes als auch auf Produkte und Erfindungen (Patente) eingegangen wird. In Unterkapitel 2.3 folgt eine Betrachtung der Stückgüter in der KEP-Branche, die die Vereinzelungsobjekte darstellen. Dazu wird das Paketaufkommen eines Paketdienstleisters analysiert sowie allgemeine Eigenschaften der Stückgüter nach der VDI-Richtlinie 3619 beschrieben (vgl. [VDI15]).

Als theoretische Grundlage für die nachfolgenden Kapitel 5 und 6 wird in Kapitel 2 auch auf die methodische Konstruktion (Unterkapitel 2.4) und die statistische Versuchsplanung (Unterkapitel 2.5) eingegangen.

Kapitel 3 fokussiert auf die Vereinzelung aus dem Blickwinkel der methodischen Konstruktion, hier erfolgt eine Beschreibung der Anforderungen an die Vereinzelung und eine Abstraktion des Vereinzelungsprozesses gefolgt von der Erarbeitung zugrundeliegender Wirkprinzipien. In Kapitel 4 werden mögliche Methoden zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens großer Stückgutzahlen beschrieben und verglichen, wobei jene Methode weiterverfolgt wird, die als die vielversprechendste aus dem Auswahlprozess hervorging. Die Adaption dieser Methode auf Förderprozesse von Stückgütern in der Intralogistik legt den Grundstein für Kapitel 5 und 6, in denen für ausgewählte Versuchsszenarien das Bewegungsverhalten von Stückgütern auf dem Prüfstand mit Simulationsergebnissen verglichen wird.

Kapitel 7 beschreibt die Anwendung der Simulationsmethode auf ausgewählte Vereinzelungsszenarien (Wirkprinzipien) aus Abschnitt 3.3 und gibt eine Handlungsempfehlung für den Entwicklungsprozess von Vereinzelungstechnik unter Nutzung der identifizierten Wirkprinzipien und der Simulationsmethode für große Stückgutmengen.

In Kapitel 8 werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und zukünftige Forschungsfelder aufbauend auf der vorliegenden Dissertation aufgezeigt.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Dieses Kapitel erläutert einerseits den aktuellen Stand der Vereinzelungstechnik und andererseits die Beschreibung der wissenschaftlichen Methoden, die in den einzelnen Teilen dieser Dissertation Grundlage sind.³ Dabei wird im Unterkapitel 2.1 auf die Einbettung der Vereinzelung in die Materialflusssysteme eingegangen gefolgt von einer Darstellung des Standes der Technik und Wissenschaft im Unterkapitel 2.2. Eine Analyse der in der KEP-Branche typischen Stückgüter erfolgt im Unterkapitel 2.3, wobei die Datensätze eines namhaften Paketdienstleisters als Grundlage dienen. Unterkapitel 2.4 befasst sich mit der methodischen Entwicklung nach VDI 2221 (vgl. [VDI93]) als Grundlage für zielgerichtete Entwicklung von Vereinzelungstechnik. Im Unterkapitel 2.5 werden die Grundlagen der statistischen Versuchsplanung erörtert, diese Methode wurde bei der Bestimmung der Effekte und Wechselwirkungen von ausgewählten Simulationsparametern auf die Simulationsergebnisse eingesetzt.

2.1 Einordnung der Vereinzelung in die Intralogistik

Vereinzelungsvorgänge sind in unterschiedlichen Produktions- und Dienstleistungsbranchen zu finden: Die Separation erzeugter Kleinteile wie Schrauben oder Federn nach deren Produktion, die Vereinzelung von Obst und Gemüse vor dem Sortiervorgang oder die Distributionsvorgänge in Waren- und Paketverteilzentren stellen nur einzelne Beispiele dar. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf den Vereinzelungsvorgängen in den Sortierzentren der KEP-Branche, demzufolge wird in den nachfolgenden Unterkapiteln die Einbettung der Vereinzelung in den gesamten Sortierprozess erläutert. Dabei liegt der Fokus sowohl auf einer allgemeinen Betrachtung der Materialflusssysteme in den logistischen Netzwerken der KEP-Branche als auch auf den Abläufen der Sortierprozesse in einem Verteilzentrum.

2.1.1 Materialflusssysteme

Nach ([GUD10], S.16ff) lassen sich Logistiksysteme entsprechend der Stufigkeit einer Lieferkette unterscheiden, letztere wird über die Anzahl der zwischen Quelle und Senke durchlaufenen Zwischenstationen bestimmt.

Eine N-stufige Lieferkette ist dabei über N-1 Zwischenstationen verbunden (vgl. Abbildung 3):

³ Eine Ausnahme stellen die Methoden zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens von Stückgütern im Pulk dar, diese werden in Kapitel 3 erläutert.

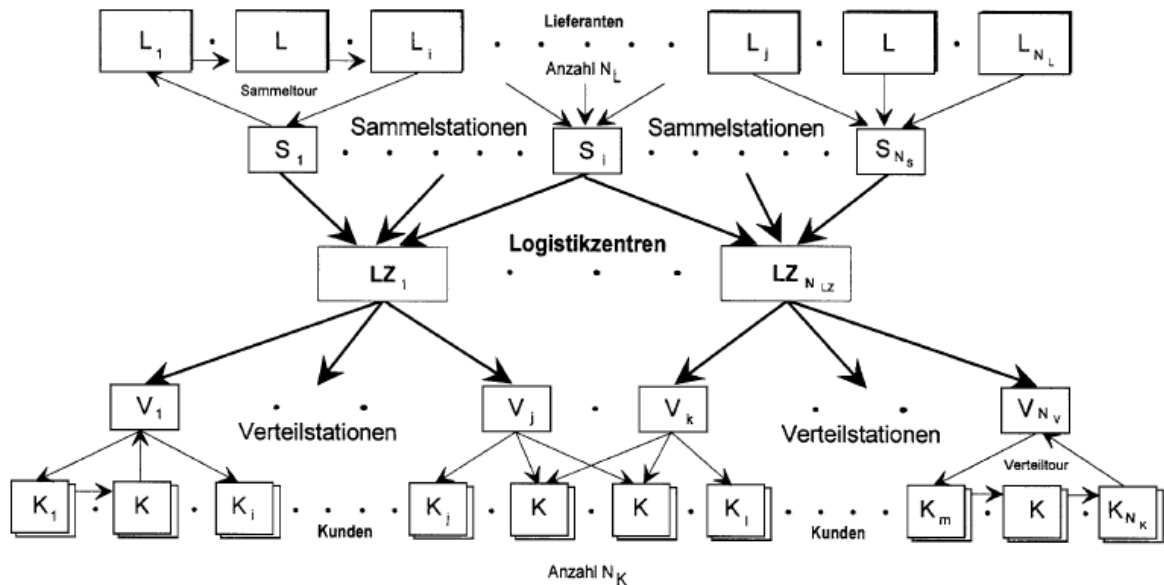


Abbildung 3: Vierstufiges Logistiksystem nach ([GUD10], S.20)

Netzwerke der KEP-Branche sind überwiegend mehrstufig ausgeführt, um Synergieeffekte durch Bündelung der Warenströme nutzen zu können. Dabei stellt die Form des Hub-and-Spoke-Netzwerks (engl. *Hub* für *Nabe* und *Spoke* für *Speiche*, vgl. Abbildung 4a) als zentrales Netz eine häufige Form dar (vgl. [GUD10], S.939ff). Diese Art von Netzwerk zeichnet sich zwar durch längere Entfernungen zwischen den zentralen Umschlagpunkten (ZU) aus, als es bei einem dezentralen Netzwerk der Fall ist, gleichzeitig können aber größere Transportmittel effizienter genutzt werden. Die Struktur der Hub-and-Spoke-Netzwerke bedingt aber auf Grund der zentralen Umschlagpunkte auch größere Sendungsmengen, was insbesondere bei kurzen Zeitfenstern für die Sortierung und Verteilung großen Einfluss auf die eingesetzte (Vereinzelungs-)Technik hat.

Neben zentralen Netzen werden auch dezentrale Netze nach Abbildung 4b bei KEP-Dienstleistern eingesetzt. Im Unterschied zu den zentralen Hub-and-Spoke-Netzen bestehen hier direkte Transportverbindungen zwischen mehreren regionalen Umschlagpunkten (RU), womit die Transportwege kürzer werden, die Anzahl an Relationen aber höher (vgl. [GUD10], S.939ff).

Der übliche Ablauf der logistischen Prozesse in der KEP-Branche besteht aus Vorlauf, Hauptlauf und Nachlauf, dies entspricht einer der Standardfrachtketten nach ([GUD10], S.943). In der Phase des Vorlaufs werden die einzelnen Sendungen in einem Gebiet eingesammelt, gefolgt von der Sortierung nach Zielgebieten in einem Verteilzentrum. Im nachfolgenden Hauptlauf werden die Sendungen in das Verteilzentrum des Zielgebiets transportiert. Nach der Sortierung auf Zustellbezirke werden in der Phase des Nachlaufs die Sendungen ausgeliefert und zugestellt (vgl. [KOE12], S.103). Typischerweise werden in der Vor- und Nachlaufphase kleinere Fahrzeuge eingesetzt, im

Hauptlauf kommen aufgrund der Bündelung der Sendungsströme größere Transportfahrzeuge zum Einsatz (Wechselladungsbauweise, LKW) (vgl. ([AIK+08], S.16); ([GUD10], S.943)).

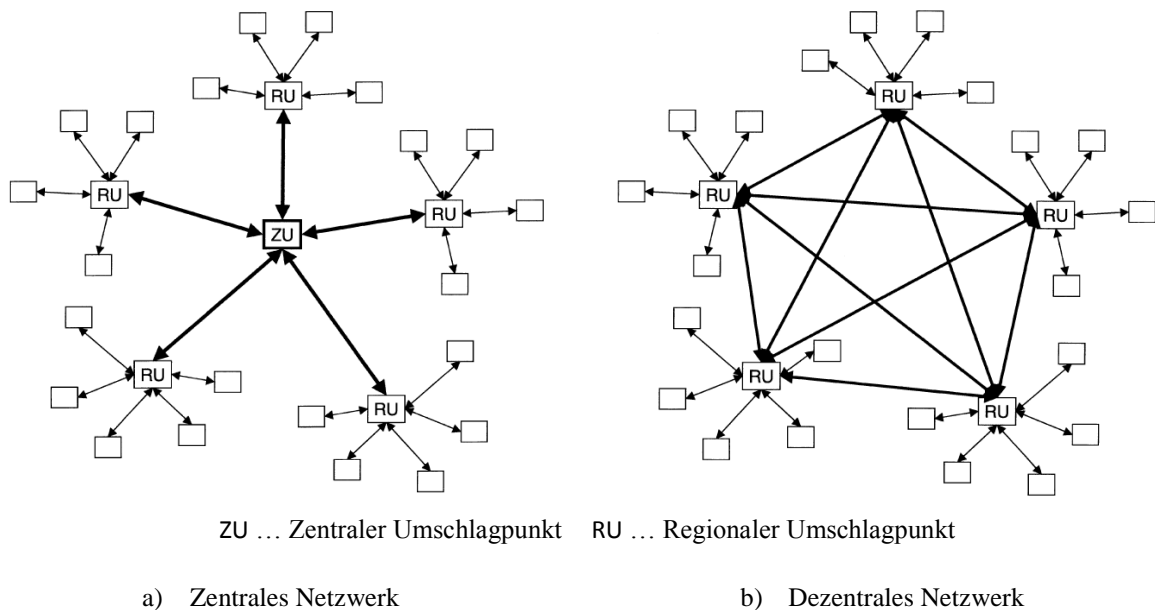


Abbildung 4: Netzwerke der KEP-Branche nach ([GUD10], S.940f)

Abbildung 5 zeigt am Beispiel eines Paketdienstleisters die Prozesskette von der Paketannahme bis zur Zustellung oder Hinterlegung mit entsprechenden Zeitfenstern. Aus der Prozesskette ist ersichtlich, dass insbesondere die Verteilzeitfenster zwischen Vorlauf und Hauptlauf bzw. zwischen Hauptlauf und Nachlauf nur vier bzw. zwei Stunden betragen. Damit sind die Zeiten für die Abarbeitung der gesamten Sendungsmenge sehr kurz, was gleichzeitig zu starken Auslastungsspitzen der Sortiertechnik in den Sortier- und Verteilzentren führt.

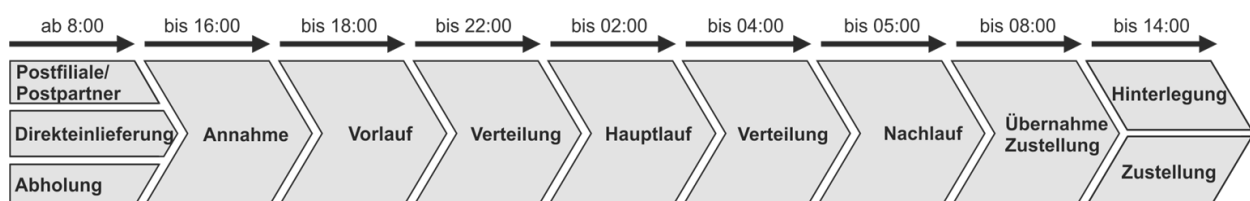


Abbildung 5: Prozesskette eines Paketdienstleisters

2.1.2 Sortier- und Verteilsysteme

In den regionalen oder zentralen Sortier- und Verteilzentren finden die Sendungsumschläge der KEP-Branche statt. Üblicherweise sind die Verteilzentren als Crossdocking-Umschlagpunkte ausgelegt, demzufolge findet keine geplante Lagerung der Sendungen statt, ankommende und abgehende Transportfahrzeuge müssen zur gleichen Zeit bedient werden (vgl. [KOE12], S.105).

Der Sortierprozess kann nach ([ArF09], S.226) als Flussdiagramm wie in Abbildung 6 dargestellt werden. Aus Sicht des Materialflusses werden dabei aus mehreren Quellen Q_i die Ladungseinheiten zusammengeführt (Z), identifiziert (I) und dann auf die entsprechenden Abgabestellen A_i und damit auf die Senken S_i verteilt (V), wobei auch mehrere Sortierstufen möglich sind. Unter einem Sortier- oder Verteilsystem versteht man nach ([JtH12], S.22) neben der Sortieranlage auch die Bestandteile Betriebsstrategie, Ablauforganisation und Anlagensteuerung, die aus dem Flussdiagramm nicht ersichtlich sind. Die Funktionsbereiche einer Sortieranlage nach [JtH12] entsprechend Abbildung 7 dagegen finden sich in der abstrakten Darstellung des Sortierprozesses aus Abbildung 6 wieder.

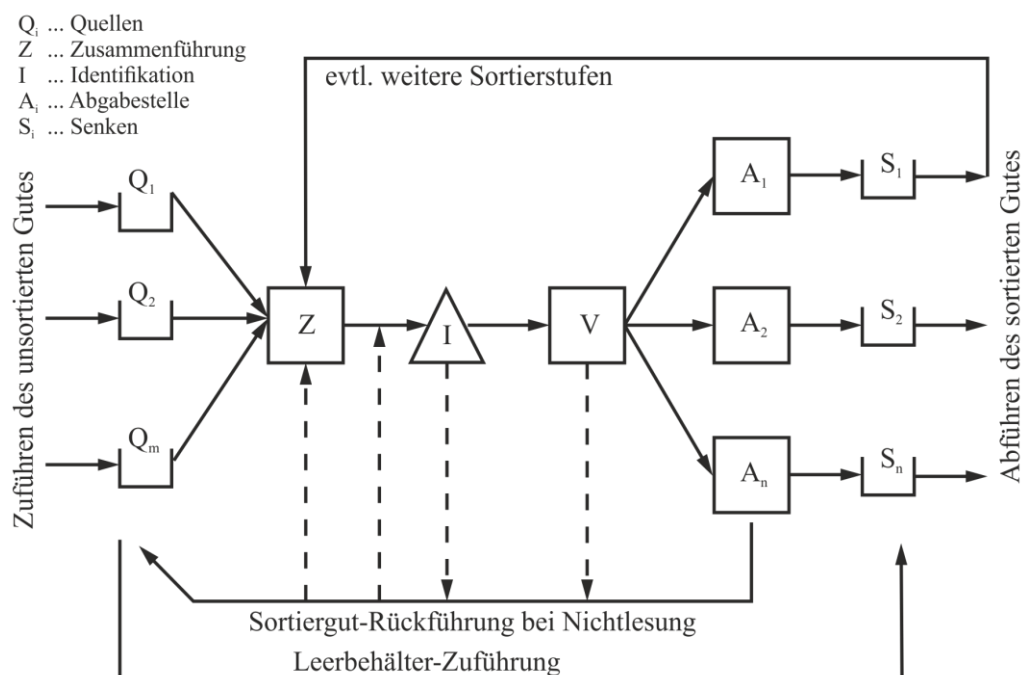


Abbildung 6: Flussdiagramm eines Sortierprozesses (in Anl. an [ArF09], S.226)

Die Sortieranlage eines Sortiersystems wird nach ([JtH12], S.25ff) in fünf Funktionsbereiche unterteilt, die je nach Ausführung der Sortieranlage zusammengefasst oder in einer anderen Reihenfolge als in Abbildung 7 realisiert sein können: Über die Zuförderung, die die Systemgrenze auf der einen Seite der Sortieranlage zur Außenwelt oder anderen logistischen Systemen darstellt, gelangen die Sortiergüter in das System. Hierbei kann die Zuförderung kontinuierlich erfolgen (beispielsweise über Stetigförderer) oder pulkförmig (beispielsweise Anlieferung einer Wechselaufbaubrücke). In diesem Funktionsbereich kann neben der Bestimmung der Sendungsabmessungen und des Sendungsgewichts auch eine Codierung erfolgen. Nach der Zuförderung gelangen die Sendungen in den Bereich der Vorbereitung. Die Vorgänge in diesem Bereich dienen einerseits

der Zusammenführung der Sendungen aus verschiedenen Senken (z.B. Eingangstoren) und andererseits der Vereinzelung sowie einer eindeutigen Ausrichtung der einzelnen Stückgüter. Diese Vorgänge haben das Ziel, eine sichere Einschleusung auf den Verteilförderer und eine eindeutige Identifizierung zu ermöglichen. Sofern die Identifizierung nicht erst auf dem Verteilförderer erfolgt, wird diese über Ein- oder Mehrseitenscanner vor der Einschleusung auf den Verteilförderer durchgeführt. Der Sorter, bestehend aus Einschleusung, Verteilförderer und Endstelle, repräsentiert das Herzstück einer Sortieranlage. Hier werden die einzelnen Stückgüter entsprechend ihrer Zielzuweisung verteilt, wobei unterschiedlich hoch automatisierte Technik zum Einsatz kommt. Von den Endstellen des Sorters gelangen die Stückgüter abschließend in den Bereich der Abförderung, die die Systemgrenze auf der Warenausgangseite darstellt.

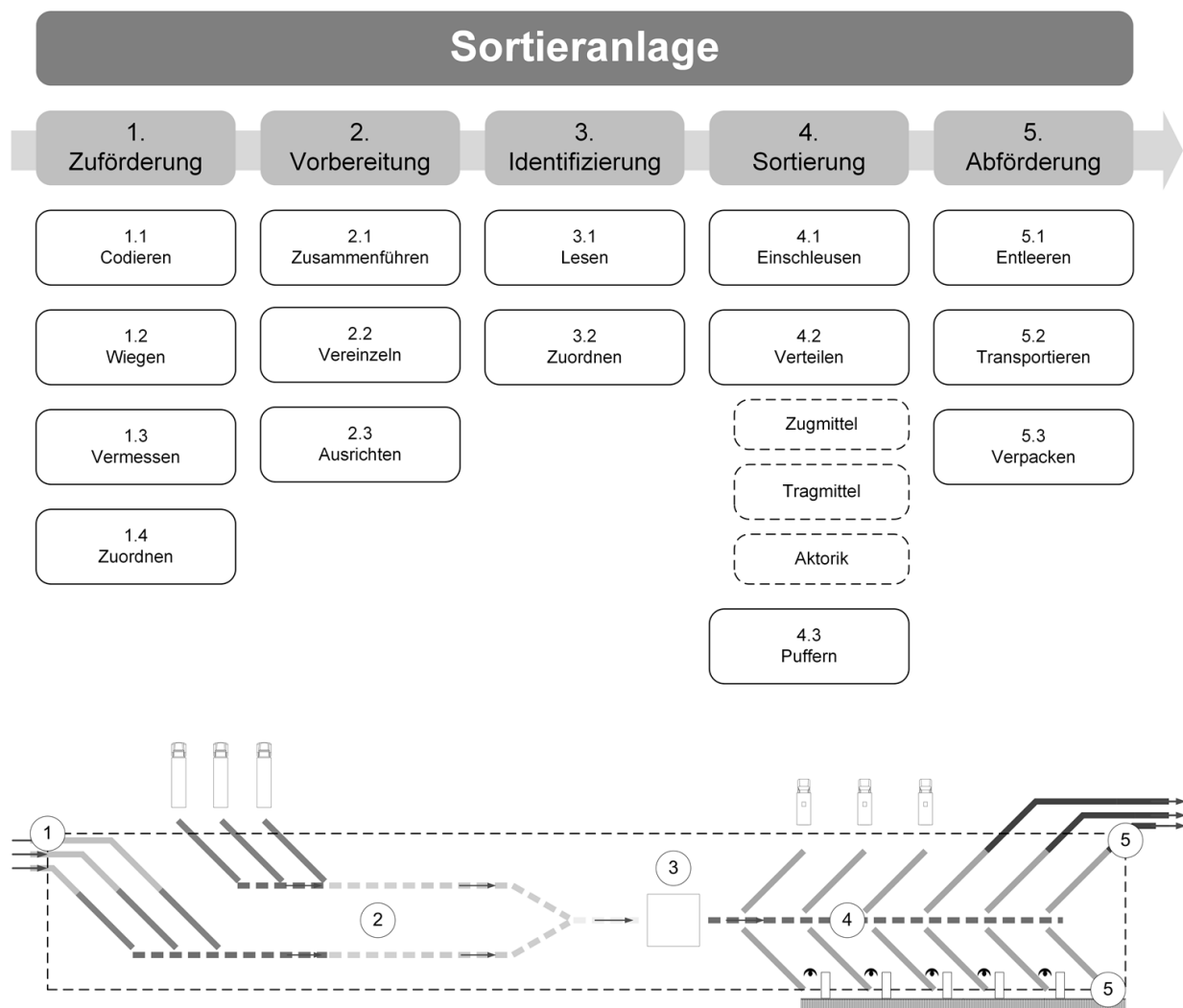


Abbildung 7: Funktionsbereiche einer Sortieranlage nach ([JtH12], S.26)

Der bisherige Fokus hinsichtlich Durchsatzoptimierung lag einerseits auf dem Sorter selbst und andererseits auf der Optimierung der Sortierstrategien. Der technische Fortschritt hat dazu geführt, dass moderne Hochleistungsverteilförderer mit Fördergeschwindigkeiten bis zu 3 m/s betrieben

werden und dabei Durchsätze von bis zu 15.000 1/s erreichen, abhängig von der Zusammensetzung des Stückgutspektrums (Gutabmessungen, Gutgewichte, sonstige Guteigenschaften) (vgl. [VDI15]; [JoF14a]; [JtH12]). Um diese Grenzleistungen auch nutzen zu können, wird der Verteilförderer meist mit mehreren Einschleusbereichen bedient, die richtige Wahl der Strategie erlaubt hier Durchsatzsteigerungen von bis zu 100%, limitiert durch die Grenzleistung des Verteilförderers (vgl. [JtH12], S.41ff; [FöF10]; [AIK+08], S.690ff). Eine der neuesten Arbeiten in diesem Kontext ist die Dissertationsschrift von K. Semrau, der sich in dieser Arbeit der Layoutgestaltung von Sortierkreisläufen in Loopstruktur widmet (vgl. [SEM15]). Neben dieser konkreten Betrachtung der Einschleusstrategien wurden auch zahlreiche Überlegungen zu allgemeinen Sortierstrategien angestellt, an dieser Stelle sei beispielsweise auf Untersuchungen von ([BoH05]; [EIM06]; [JOH98]; [KoW98]) verwiesen.

Die Leistungsfähigkeit eines Sortiersystems wird neben dem Sorter und der Betriebsstrategie auch ganz wesentlich durch die vor- und nachgelagerten Komponenten beeinflusst (vgl. [JoF14b]). Bezugnehmend auf Abbildung 6 wird dieser Umstand bei [ArF09] wie folgt beschrieben: „Der Grenzdurchsatz ... eines Sorters wird bestimmt durch die Grenzdurchsätze an den Zusammenführungen und den Verzweigungen“ ([ArF09], S.227ff). Da in den letzten Jahren das Sendungsaufkommen stark im Steigen begriffen war und dieser Trend voraussichtlich bestehen bleiben wird (vgl. Unterkapitel 1.1), müssen sich demzufolge die technischen Weiterentwicklungen von Sortieranlagen auch auf diese vor- und nachgelagerten Bereiche des Sorters konzentrieren. Sortieranlagen sind größtenteils langjährig abzuschreibende Investitionen, Um- oder Neubauten insbesondere bei Flächenknappheit im urbanen Raum sind kostspielig und mit mehrjährigem Planungshorizont verbunden. Bei bestehenden Anlagen ist daher die Erweiterung der Toranzahl (Wareneingang, Warenausgang) nur schwer oder gar nicht möglich, womit bezugnehmend auf Abbildung 6 die Anzahl an Quellen und Senken unverändert bleibt.

Aktuell wird bei der Entladung, der Vereinzelnung und der Endstellenentleerung in vielen Verteilzentren noch manuell gearbeitet (vgl. [SEW08]), entsprechend ergibt sich hier ein notwendiger Automatisierungsbedarf, um die in die Sortieranlage ein- oder auszubringende Sendungszahl je Quelle oder Senke erhöhen zu können. Aber auch bei Neuplanungen von Sortieranlagen werden die Anforderungen an den Zuförderungs-, Vorbereitungs- und Abförderungsbereich steigen, da die Grenzdurchsätze von zentralen Sortier- und Verteilzentren schon im mittleren fünfstelligen Bereich liegen werden (vgl. [DHL11]).

2.2 Vereinzelnung in Wissenschaft und Technik

Wie im vorigen Abschnitt 2.1.2 hervorgehoben, lag der Fokus der Durchsatzverbesserungen vorwiegend im Bereich der Sortierstrategien und auf dem Sorter selbst. Im Folgenden wird auf den aktuell noch wenig untersuchten Bereich der Vereinzelnung eingegangen, wobei insbesondere auch auf die damit verbundenen theoretischen Betrachtungen der Stückgutmanipulation und eingesetzte Vereinzelnungstechniken Bezug genommen wird. Die folgenden Ausführungen beschränken sich dabei nicht ausschließlich auf die Separation von Objekten, auch in Verbindung mit der Ausrichtung von Objekten stehende Betrachtungen und Lösungen werden beschrieben (man vergleiche dazu auch Unterkapitel 3.2 zu den verschiedenen Teilfunktionen der Vereinzelnung).

Da Vereinzelnungsvorgänge Teil vieler Prozesse in unterschiedlichen Sparten sind, werden aufgrund der Vielzahl an technischen Lösungen in diesen Branchen nachfolgend nur jene Vereinzelnungstechniken näher beschrieben, die innerhalb der KEP-Branche realisiert wurden. Eine Vertiefung dieser Thematik erfolgt im Unterkapitel 3.3, wo im Kontext der methodischen Konstruktion von Vereinzelnungstechnik eine Klassifizierung unterschiedlicher Vereinzelnungsprinzipien, die das Ergebnis einer Patentrecherche sind, vorgenommen wird.

2.2.1 Vereinzelnung von Stückgütern im Fokus der Wissenschaft

Die Mehrheit der wissenschaftlichen Arbeiten verschiedener Forschungseinrichtungen mit dem Fokus auf Ausrichtung und Vereinzelnung entstand im Bereich der Roboteranipulation. Die dabei ursächlichen Aufgabenstellungen sind überwiegend folgende:

- Separation einzelner Objekte aus einer ungeordneten Ansammlung an Objekten verschiedener Formen und Größen
- Ausrichten von Objekten, die in zufälliger Lage in den Arbeitsbereich des Roboters gelangen

Zur Lösung dieser Aufgabenstellungen gibt es unterschiedliche Ansätze, einer dieser Ansätze ist die Bestimmung von Ort und Lage eines einzelnen Objekts mit Bilderkennungsmethoden und nachfolgender Greifbewegung eines Roboterarms. Erste Arbeiten dazu wurden von [HoI84] und [YaK86] publiziert. Einer der Kernpunkte ist dabei die Identifikation eines freiliegenden, meist des obersten, Objekts. Weiterentwicklungen in diesem Kontext wurden von [FIT03], [KZS11] oder [CSF12] durchgeführt, Abbildung 8 zeigt beispielsweise die Bildfolge eines erfolgreichen Vereinzelnungsvorgangs mit einem Roboter.



Abbildung 8: Singulation von Objekten unterschiedlicher Form ([CSF12], S.3882)

In [LeG88] findet man ein erstes Review über Anwendungen der Robotertechnologie mit direktem Bezug zum postalischen Sektor. Abbildung 9 zeigt eine dieser Entwicklungen, die in [FCA89] ausführlich erklärt wird. Zur Singulation von Sendungen verschiedener Größe werden dabei auf einem Drehteller die Sendungen zuerst visuell erfasst, nachfolgend wird während der Weiterförderung der Sendungen in den Arbeitsbereich des Roboters die Bildverarbeitung durchgeführt und danach separiert ein Roboterarm mit pneumatischem Greiferprinzip die einzelnen Sendungen vom Rest des Spektrums.

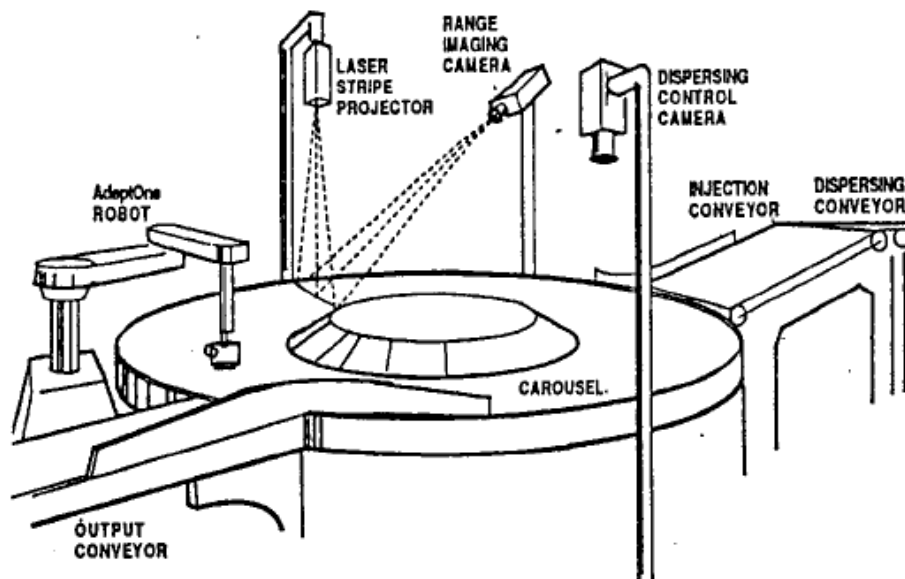


Abbildung 9: Singulation von Sendungen ([FCA89], S.4)

In [BAE91] wird ein Paketroboter mit einem Backengreifer vorgestellt, der für die Singulation von Paketen entworfen wurde. Das Konzept eines Paketroboters wurde einige Jahre später von [SEW08] wieder aufgegriffen und bis zu einem funktionsfähigen Prototyp (siehe Abbildung 10) weiterentwickelt, der auch bei der Deutschen Post AG in Bonn getestet wurde. Anpassungen dieser

Robotertechniken sollen auch das Entladen und Vereinzeln von Sackware ermöglichen (vgl. [KBE08]).



Abbildung 10: Paketroboter [Quelle: Deutsche Post AG]

Neben den Ansätzen roboterunterstützter Vereinzeln gab es auch Untersuchungen, Stückgüter ohne den Einsatz von Sensorik so zu manipulieren, dass sie nach dem Vorgang eine eindeutige Position haben, unabhängig von der ursprünglichen Orientierung (vergleiche dazu Abbildung 11). Einen guten Überblick zu diesen Forschungen gibt [MAS99], zumeist wird die Ausrichtung polygonförmiger Objekte in der Ebene behandelt, ein Vorgang, der auch in der KEP-Branche wichtig ist (vgl. Abschnitt 2.1.2). Die Vorgehensweise besteht dabei darin, durch sequentielle Stoßvorgänge und Verschieben der Objekte eine definierte Ausrichtung gegenüber dem Manipulator zu erreichen.

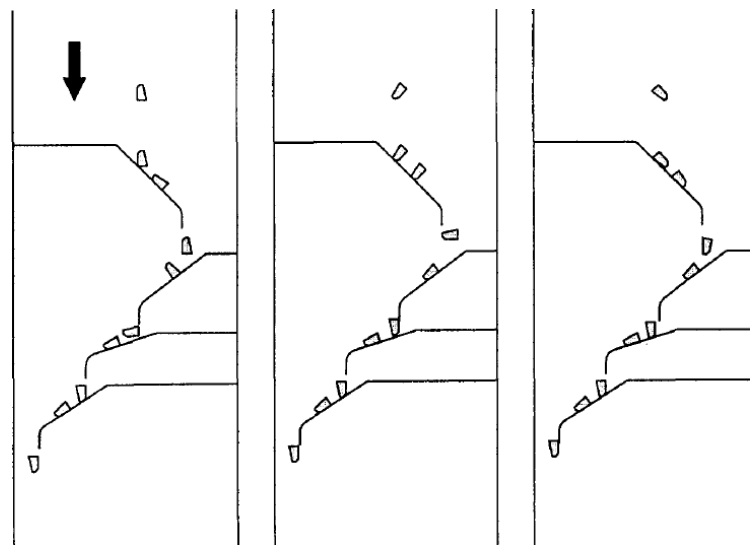
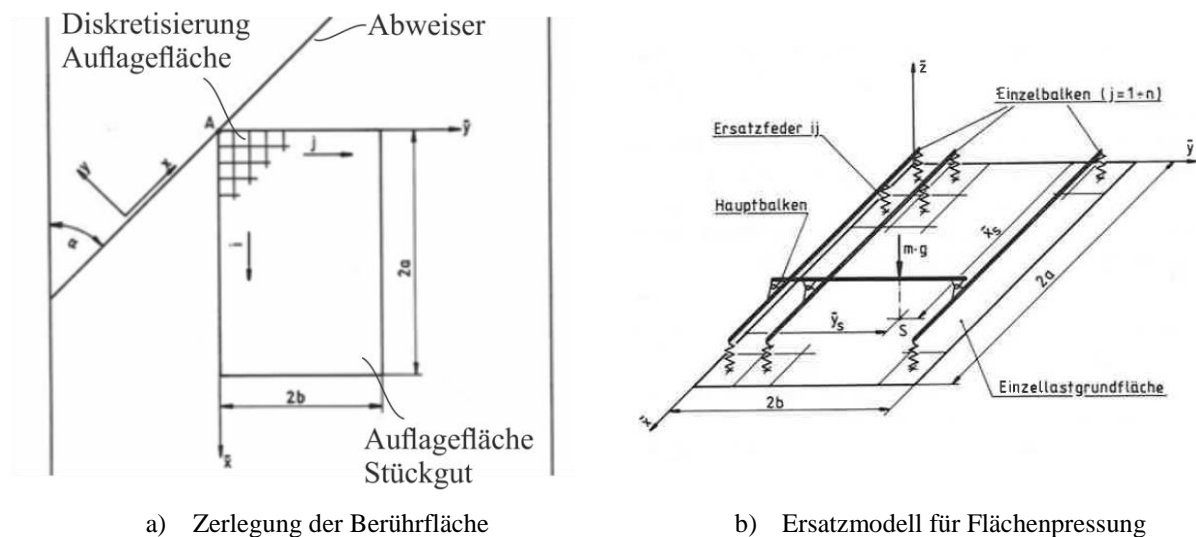


Abbildung 11: Ausrichtung polygonförmiger Objekte durch Hindernisse ([BGO98], S.250)

In den Dissertationen von [MÜL80], [MÖH83] und [SCH95] liegt der Fokus der Untersuchungen konkret auf der Gutbewegung auf Stetigförderern. [MÜL80] untersucht in diesem Zusammenhang die Gutbewegung beim Abweisvorgang mit einem starren Abweiser von einem Gurtförderer, wobei der Abweisvorgang in unterschiedliche charakteristische Phasen unterteilt und die jeweiligen Berechnungsvorschriften hergeleitet werden. Mit dem Blick auf die rechnergestützte Berechnung rückt dabei auch das Ziel der Vorhersage des Gutbewegungsverhaltens bei Fördervorgängen in den Mittelpunkt, die Qualität der Vorhersage wird durch den Vergleich mit einem Prüfstandsversuch untersucht. [MÖH83] erweitert aufbauend auf der Dissertation von [MÜL80] das Berechnungsmodell, indem auch allgemeine Lastverteilungen und unterschiedliche Berührflächen zwischen Gut und Förderband in das Modell integriert werden. Die Basis des Berechnungsmodells bildet dabei die Zerlegung der Berührfläche zwischen Gut und Förderband in finite Teilflächen (vgl. Abbildung 12a), die Resultierende der angreifenden Kräfte auf diese ermöglicht die Bestimmung der vollständigen wirkenden Gesamtkraft und damit die Lösung der Bewegungsgleichungen. Dabei können mit dem Ersatzmodell aus Abbildung 12b auch unterschiedliche Schwerpunktlagen, die zu unterschiedlichen Flächenpressungen in den einzelnen Berührelementen führen, abgebildet werden. Einige Jahre später wurde diese Vorgehensweise von [SCH95] wieder aufgegriffen und die Berechnungsmodelle für Stückgüter auf Gurtkurven erstellt.

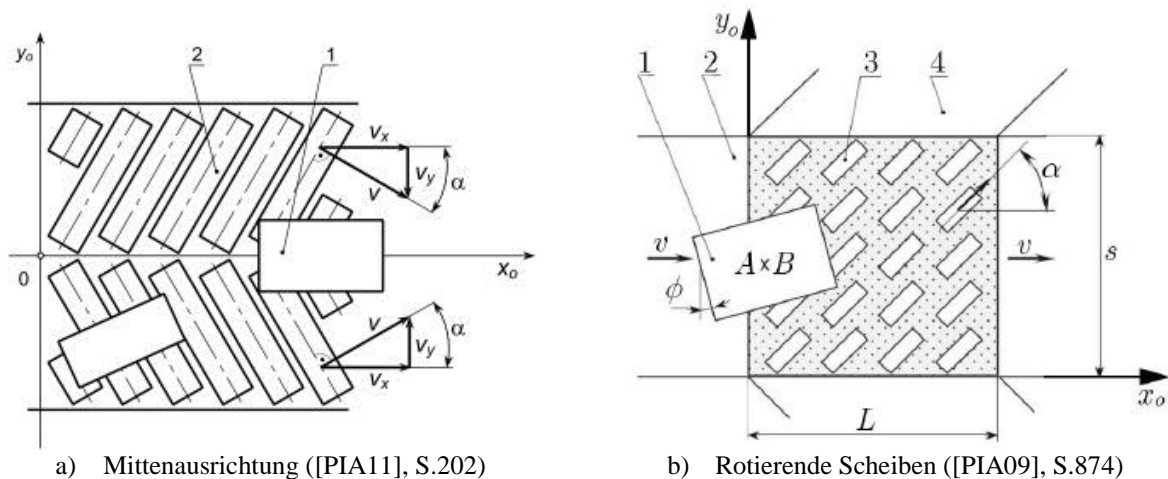


a) Zerlegung der Berührfläche

b) Ersatzmodell für Flächenpressung

Abbildung 12: Ersatzmodell eines Stückgutes auf einem Bandförderer ([MÖH83], S.17ff)

Die Arbeiten von [PIA09] und [PIA11] befassen sich mit der Manipulation von Objekten durch Einwirkung von Reibkräften. Abbildung 13a zeigt dazu einen Rollenförderer mit schräg angestellten Rollen zur Mittenausrichtung von Stückgütern, Abbildung 13b eine Anordnung zur Ablenkung von Stückgütern mit rotierenden Scheiben. Beides sind typische Beispiele von intralogistischer Vereinzelungs- und Ausrichtungstechnik.



a) Mittenausrichtung ([PIA11], S.202)

b) Rotierende Scheiben ([PIA09], S.874)

Abbildung 13: Untersuchte Fördertechnik von Piatkowski

Die bisher vorgestellten Arbeiten beschränken sich vorwiegend auf ebene Problemstellungen. Erweiterungen der Modellbildung auf räumliche Fördervorgänge unter Einbeziehung von Stoßprozessen zwischen den betrachteten Objekten können beispielsweise in [DRN12] und [CRR14] gefunden werden. Diese Arbeiten sind eng verknüpft mit einem Kernpunkt der vorliegenden Dissertation, da durch Einsatz der Diskreten-Elemente-Methode (DEM) ebene und räumliche Förder- und Vereinzlungsvorgänge von Stückgütern simuliert werden können (vgl. auch Unterkapitel 4.6). In [DRN12] wird dazu der Vereinzlungs- und Fördervorgang von Schrauben mit einem Wendelförderer vorgestellt. Die Außenkontur der Schrauben wird dabei durch fest verbundene Kugeln angenähert, die Geometrie des Förderers durch importierte Flächengeometrie (siehe auch Abbildung 14).

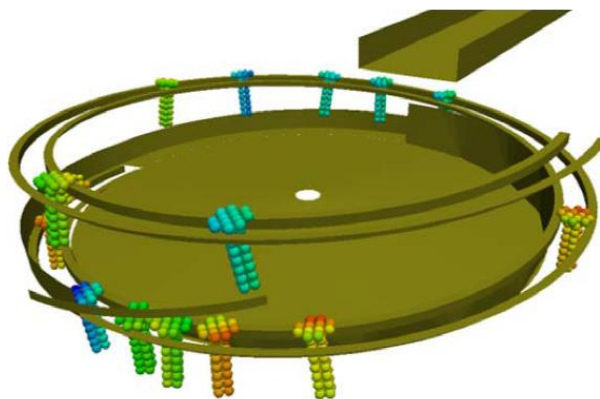


Abbildung 14: Simulation eines Wendelförderers für Schrauben mit der DEM ([DRN12], S.5)

Die Forschungsergebnisse von [CRR14] basieren auf dem Entwurf eines sogenannten Peristaltikförderers, der durch Bewegung kleinskaliger Elemente Stückgüter in Form von Wellenbewegun-

gen bewegt. Dabei kann die gezielte Ansteuerung der Elemente auch eine Ansammlung an Objekten auflösen. Diese Vorgänge wurden in einer gekoppelten DEM- und Mehrkörpersimulation (MKS) simuliert, man vergleiche dazu Abbildung 15.

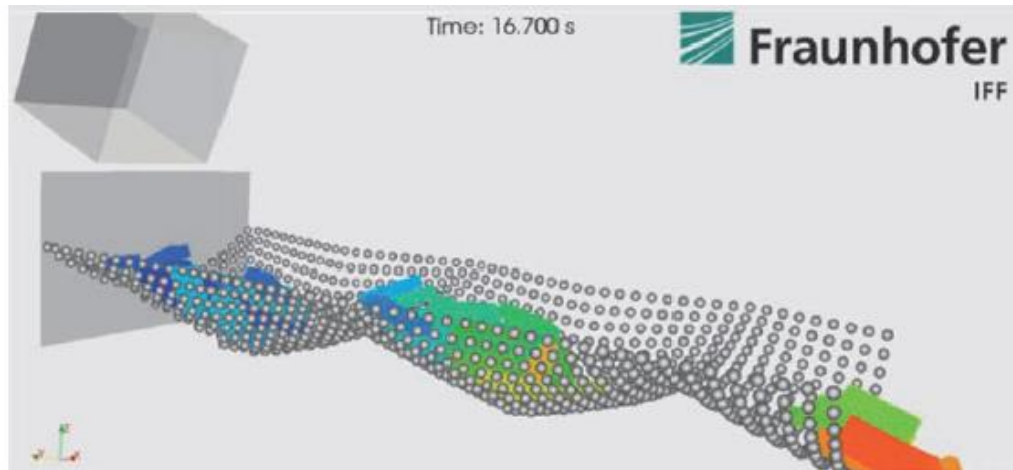


Abbildung 15: Simulation der Stückgutförderung mit einem Peristaltikförderer ([CRR14], S.7)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in den vorgestellten Ansätzen die theoretische Betrachtung des Bewegungsverhaltens einzelner Stückgüter schon intensiv erforscht wurde, wobei größtenteils ebene Bewegungsvorgänge im Fokus standen. Die Betrachtung großer Stückgutzahlen wurde erst in einzelnen Ansätzen vorgestellt, demzufolge ist auch der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit dieser Thematik gewidmet. Da die Beschreibung des Bewegungsverhaltens einer großen Anzahl interagierender Stückgüter auf analytischem Weg sehr aufwendig ist (man betrachte die Ausführungen von [MÜL80], [MÖH83] und [SCH95] allein für einen Körper), liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit auf Beschreibungsmethoden für das Bewegungsverhalten großer Stückgutzahlen, wobei auch räumliche Bewegungsvorgänge betrachtet werden.

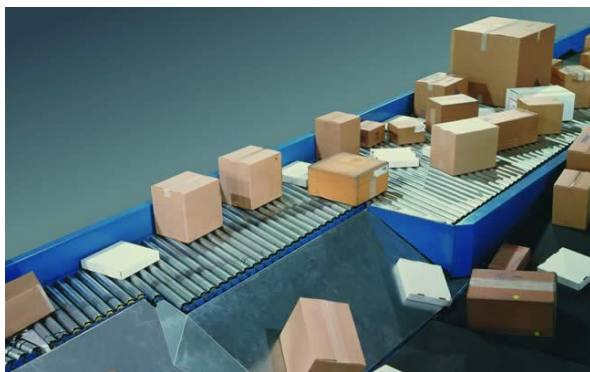
2.2.2 Vereinzelung von Stückgütern: Technische Lösungen

Werden bei der Zuförderung der Sendungen in der KEP-Branche die Transportfahrzeuge manuell entladen, erfolgt die Vereinzelung oft schon im Rahmen dieses Vorgangs, da die Sendungen sequentiell auf die nachfolgende Fördertechnik aufgelegt werden. Aufgrund der steigenden Durchsatzanforderungen (vgl. Unterkapitel 1.1) rücken aber immer mehr Lösungsansätze in den Fokus, die sich mit der Thematik Pulkmanipulation befassen.⁴ Dabei liegt entweder die Situation von flächig verteilten Paketen vor (im Weiteren als „2D-Paketpulk“ bezeichnet) oder von räumlich

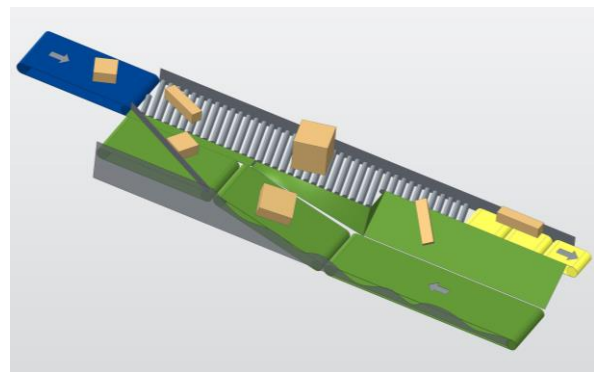
⁴ Zur Definition eines Paketpulks vergleiche man auch die Ausführungen im Unterkapitel 2.3

verteilten, größtenteils übereinanderliegenden Paketen (im Weiteren als „3D-Paketpulk“ bezeichnet). Zur Vereinzelung dieser verteilten Sendungsmengen wurden unterschiedliche Lösungen entwickelt, die in einzelnen Fällen schon im vorangegangenen Unterpunkt beschrieben wurden (beispielsweise der Paketroboter aus Abbildung 10, S.15).

Ein System zur Vereinzelung und Ausrichtung von Stückgütern eines 2D-Paketpulks wird von der Gruppe Fives Cinetic angeboten. Abbildung 16a zeigt eine Aufnahme des in Betrieb befindlichen Singulators, Abbildung 16b verdeutlicht das Funktionsprinzip: Die ankommenden Pakete werden über die Zuförderung (blauer Bandförderer) auf schräg gestellte Zylinderrollen (grau) übergeben, die die Pakete an einer Bande ausrichten. Sofern Pakete nebeneinander liegen, gelangt das der Bande entferntere Paket in die Rückführung (grüne Bandförderer). Zu dicht hintereinanderliegende Pakete werden mittels der gelben Bandförderer, die in Richtung Abförderung zunehmende Fördergeschwindigkeiten haben, auseinandergezogen. Rückgeführte Pakete gelangen erneut auf die Ausrichtungsstrecke (vgl. auch [JtH12]). Laut Fives Cinetic beträgt der maximale Durchsatz 7.500 Pakete/Stunde (vgl. [FIV15(a)]).



a) Betrieb [FIV15(a)]



b) Funktionsprinzip

Abbildung 16: Linear Parcel Singulator® von Fives Cinetic

Ein weiteres Produkt, das die Vereinzelung einer ebenen Anordnung von Paketen durchführt, ist der Visicon-Singulator® der Siemens AG. Im Gegensatz zu dem vorhergehend beschriebenen Produkt ist dieser Singulator mit einer leistungsfähigen Bilderkennung ausgestattet, die die Ausrichtung und Position jedes Paketes ermittelt. Durch zahlreiche, einzeln ansteuerbaren Rollen- oder Bandförderermodule kann jedes Paket in der Bewegung beeinflusst werden, wodurch eine Vereinzelung bei kleinem Flächenbedarf erreicht wird. Abbildung 17 zeigt die Vereinzelungsstrecke, die einzelnen ansteuerbaren Segmente sind gut erkennbar (vgl. [SIE08]).

Im Unterschied zur Vereinzelung von eben verteilten Stückgütern muss bei der Vereinzelung von 3D-Pulks auch die Separation übereinanderliegender Pakete erfolgen. Dies erfordert die Berücksichtigung zusätzlicher Randbedingungen wie z.B. die Sicherstellung einer geringen

Belastung auf die zu vereinzeln Pakete während des Vorgangs. Eine Möglichkeit stellt hier die automatisierte Entladung von Transportfahrzeugen durch Paketroboter dar, neben der beschriebenen Lösung nach Abbildung 10 auf Seite 15 bietet auch der Hersteller TEUN ein Entladesystem auf Roboterbasis an. Durch die Manipulation einzelner Pakete erfolgt gleichzeitig auch die Vereinzelung. Die Komplexität bei technischen Produkten dieser Art ist sehr hoch, insbesondere an die Bilderkennung und den Greifmechanismus werden hohe Anforderungen gestellt (vgl. [SEW08]).



Abbildung 17: Visicon Singulator® der Siemens AG (Quelle: www.siemens.com/presse)

Neben Paketrobotern gibt es auch technische Lösungen, die mit deutlich weniger Sensorik auskommen. Dabei wird meist eine spezifische Anordnung von üblicher Fördertechnik wie Band- und Rollenförderern erstellt, die den 3D-Paketpulk so beeinflussen, dass sich übereinanderliegende Pakete trennen. Der dann ebene Paketstrom kann nachfolgend mit der oben beschriebenen Technik zur Vereinzelung und Ausrichtung von 2D-Paketpulks weitervereinzel werden. Ein technisches Konzept dieser Art, das Entladung und Vereinzelung kombiniert, ist das Entladesystem RUBUS® der Siemens AG. Bei dieser Lösung liegt im Transportfahrzeug ein Gurt, auf dem sich der Paketpulk befindet. Das Entladegerät zieht sich zur Entladung an diesem Gurt in das Fahrzeug (in Abbildung 18 von links nach rechts), wobei die Pakete durch Bandförderer aus dem Transportfahrzeug bewegt werden. Um Beschädigungen zu vermeiden, sind Vorhänge angebracht, die stürzende Pakete bremsen (vgl. [SIE13]).

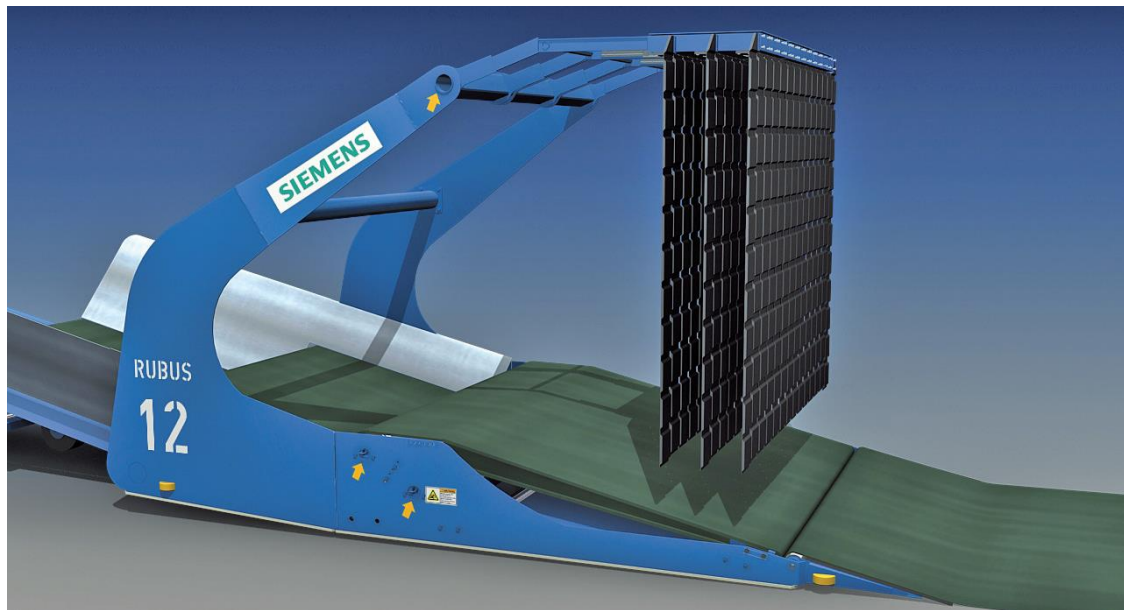


Abbildung 18: Entladesystem RUBUS® der Siemens AG ([SIE13], S.5)

Neben dem Linear Parcel Singulator® nach Abbildung 16 bietet Fives Cinetic auch eine zweite Lösung an, die die Bezeichnung „Accord Singulator®“ trägt. Dieser besteht aus mehreren Modulen, wobei das erste Modul zur Vereinzelung von 3D-Paketpulks eingesetzt wird. Dazu werden vertikal geneigte, sequentiell angeordnete Bandförderer eingesetzt, die mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und einem Start-Stopp-Betrieb den Pulk zu einer ebenen Anordnung vereinzeln (Nr. 43 in Abbildung 19). Danach folgen zwei Förderstrecken, bei denen Zylinderrollen in einem Fischgrätmuster angeordnet sind, wobei sich in der Mitte der Rollenförderer ein schmaler Bandförderer befindet (Nr. 25 in Abbildung 19).

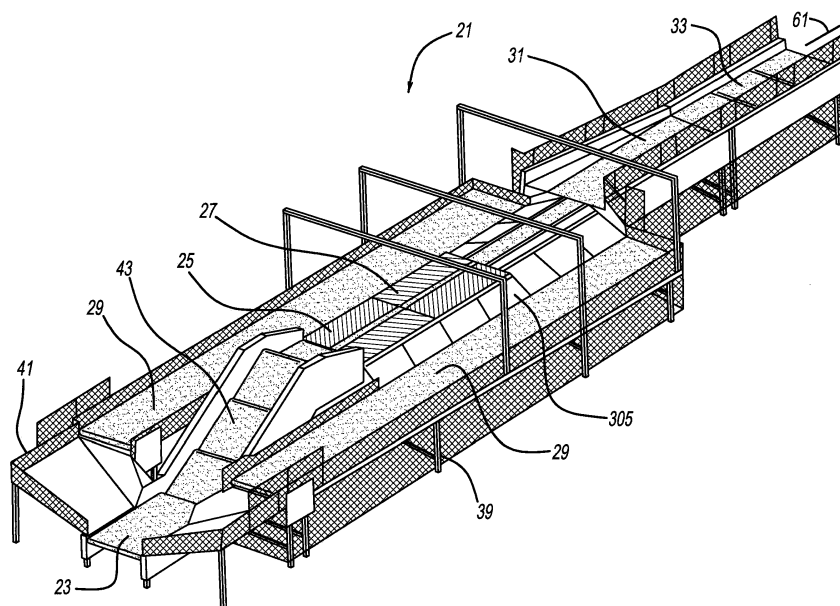
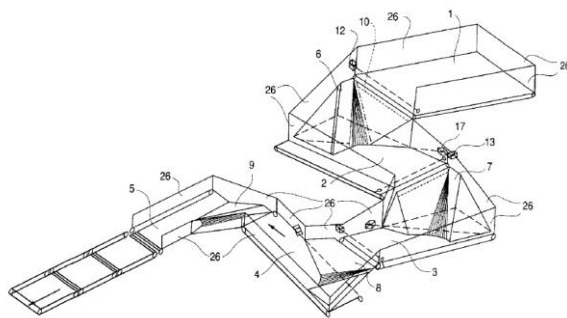


Abbildung 19: Accord Singulator® von Fives Cinetic, Patentzeichnung ([SCH14], S.1)

Im ersten Rollenfördererabschnitt werden die ankommenden Stückgüter in Richtung des mittigen Förderbandes bewegt. Die Rollen des zweiten Rollenfördererabschnittes bewegen noch nicht mittig orientierte Stückgüter in die Rückführstrecke, sodass am mittig laufenden Band nur mehr sequentiell angeordnete Stückgüter liegen, die durch nachfolgende Bänder (Nr. 33 in Abbildung 19) mit zunehmenden Fördergeschwindigkeiten auseinandergezogen werden. Entsprechend den Spezifikationen von Fives Cinetic eignet sich der Singulator nach Abbildung 19 für ein breites Gutspektrum in Form, Oberflächenbeschaffenheit und Abmessungen, die fördertechnische Leistung wird mit 6.000 Sendungen/Stunde angegeben (vgl. [FIV15(b)]).

Ein weiteres realisiertes Produktbeispiel ist der Automatic Parcel Singulator® der BEUMER Group. Das Konzept besteht dabei aus mehreren Stufen, wobei zu Beginn die Sendungen im 3D-Pulk vorliegen. Über speziell geformte Rutschen und Bandförderer, die vertikal zueinander versetzt sind, werden die Pakete auf eine 2D-Anordnung verteilt (Abbildung 20a).

Durch den nachfolgenden Vereinzelmehanismus (Abbildung 20b), der in einigen Teilen dem Singulator aus Abbildung 19 ähnelt, werden die Pakete dann in einen eindimensionalen Strom mit Lücken zwischen den Sendungen vereinzelt. Sofern Objekte sich am Ende des Vorgangs noch in Kontakt befinden, wird eine vertikale Weiche aus Bandförderern aktiviert und die entsprechenden Pakete werden rückgeführt. Der angegebene Durchsatz beträgt etwa 3.500 Pakete pro Stunde (vgl. [BEU16]).



a) Vereinzelnrutschen ([HBM01], S.1)



b) Ebene Vereinzelnung [BEU16]

Abbildung 20: Automatic Parcel Singulator® der BEUMER Group

Die SSI Schäfer GmbH bietet für kleine Produkte mit Abmessungen bis maximal 300x200x200 mm das System Order Verifier® an. Ziel dieser Gerätschaft ist die Überprüfung kommissionierter Aufträge, wobei jedes einzelne Produkt des Auftrags gescannt wird. Voraussetzung für eine korrekte Identifizierung ist eine vollständige Vereinzelnung des Auftrags vor dem Scanvorgang, wozu SSI Schäfer eine Kombination aus speziell ausgerichteten schmalen Bandförderern, Abweisern und vertikal versetzten Förderabschnitten nutzt (vgl. [SSI16]).



a) Gesamtansicht

b) Vereinzlungsstrecke

Abbildung 21: SSI Order Verifier® (Quelle: SSI Schäfer)

Zu den 3D-Singulatoren zählt auch der in Abbildung 15 auf Seite 18 dargestellte Peristaltikförderer, der durch geeignete Ansteuerung seiner Aktoren ebenfalls Paketpulks auflösen kann (vgl. [CRR14]).

2.3 Vereinzlungsobjekte: Stückgut in der KEP-Branche

Die Sendungen der KEP-Branche werden in der einschlägigen Literatur dem Stückgut zugeordnet (vgl. [AIK+08], [JtH12], [VDI15]). Entsprechend der Definition des Gabler Wirtschaftslexikons erscheint das auch gerechtfertigt: Unter Stückgut wird dabei eine „Güterart, die aus sich heraus, verpackt oder mit einer Ladeinheit verbunden so formbeständig ist, dass sie bei Transport-, Lagerungs- und Umschlagsvorgängen als Beförderungseinheit zu behandeln ist. Maximalgewicht üblicherweise bis 3 t.“ [SPR16] verstanden. Schüttgut wird im Gegensatz dazu in der FEM Richtlinie 2.581 wie folgt beschrieben: „Schüttgüter bestehen aus einer Mischung von mindestens zwei Phasen, Feststoff und Gas. Normalerweise sind auch noch Flüssigkeiten im Schüttgut enthalten, welche als Feuchtigkeitsgehalt bezeichnet werden. Die Feststoffe in einem Schüttgut bestehen aus feinen oder groben Partikeln oder aus größeren Stücken oder aus Mischungen davon.“ [FEM91] Im Duden kann dazu auch folgende Definition gefunden werden: Schüttgut ist „loses Gut, das zum Transport in den Laderaum eines Fahrzeugs geschüttet (und nicht verpackt) wird“ [BIB16].

Betrachtet man die Abläufe in der KEP-Branche näher, so hängt die Einordnung der Sendungen zu einer Gutart vom Betrachtungswinkel ab. Entsprechend der obenstehenden Definitionen erscheint die Beschreibung von Sendungen als Schüttgut durchaus gerechtfertigt. Als Beispiel kann hier der Transport von Sendungen in Wechselaufbaubrücken oder LKWs angegeben werden, gängige Praxis bei der Beladung letzterer ist eine lose Anordnung, oft gemischt mit gestapelten Paketverbänden. Auch erste Ansätze, die Sendungen als Pulk zu manipulieren (vgl. Unterkapitel 2.2), unterstützen diese Sichtweise.

Die vorliegende Arbeit befasst sich in diesem Sinne mit der Betrachtung der Sendungen in Form von Bulkware. Unter der Bezeichnung (Stückgut-)Pulk wird im Folgenden die lose Ansammlung von Stückgütern verstanden, die in Form, Abmessungen, Gewicht und Beschaffenheit (z.B. Oberfläche, Material) unterschiedlich sein können. Die Position und Orientierung eines einzelnen Stückguts innerhalb des Stückgutpulkts muss keiner definierten Anordnung folgen. Ein einzelnes Stückgut kann zu einem oder mehreren anderen Stückgütern Kontakte aufweisen.

Die Sendungen der KEP-Branche weisen ein breites Spektrum in Bezug auf Form, Gewicht, Abmessungen und Materialeigenschaften sowie Festigkeit auf. In der VDI-Richtlinie 3619 wird zwischen form- und lagestabilen Gütern, formstabilen und lageinstabilen Gütern, Sack- und Beuteln (forminstabil) und speziellen Sortiergütern grob unterschieden. Eine wesentlich detaillierte Beschreibung des Fördergutes kann anhand des Punktes 7.5 dieser Richtlinie vorgenommen werden, wobei neben Abmessungen, Gewicht und geometrischer Form auch spezielle Eigenschaften wie Oberflächenbeschaffenheit oder Zerbrechlichkeit zu bestimmen sind (vgl. [VDI15]). Auf die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit wird auch in der Dissertation von [SCH95] hingewiesen, in [JtH12] wird ebenfalls näher dazu ausgeführt. Insbesondere muss die Sortiertechnik in den Verteilzentren demzufolge neben Gütern mit dem Verpackungsmaterial Karton (Wellpappe) auch solche mit anderen Verpackungsmaterialien wie Kunststofffolien (Gefahr von Adhäsion, „Kleben“) oder Bändern und Schnüren (Gefahr des Verhängens) erfolgreich fördern und sortieren können.

Beispiele für Fördergut sind nach VDI 3619 Pakete, Polybeutel, Tüten, Großbriefe, Rollen aber auch z.B. Reifen, Teppiche oder spezielle Behälter (vgl. [VDI15]). Im Folgenden wird dieses Spektrum eingeschränkt auf jene Fördergüter, die auch in den weiteren Anlagenteilen eines Sortierzentrums automatisiert sortiert werden. Dies ist insbesondere dahingehend gerechtfertigt, da es schon jetzt übliche Praxis ist, nicht automatisch sortierbare Güter (sogenannte „non-conveyables“) von den sortierbaren zu trennen. Dies erfolgt zum Teil schon auf den Transportrouten, indem die nicht förderbaren Güter in eigenen Fahrzeugen transportiert werden. Sofern förderbare und nicht förderbare Güter mit demselben Transportfahrzeug bewegt werden, werden bei der Entladung die nicht förderbaren Güter zuerst entnommen. Konkret werden daher die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit auf folgende Fördergüter eingeschränkt:

- Quaderförmige Stückgüter innerhalb der bei den Paketdiensten üblichen Abmessungen und Gewichten
- Zylinderförmige Stückgüter innerhalb der bei den Paketdiensten üblichen Abmessungen und Gewichten

- Kegel- und kugelförmige Stückgüter innerhalb der bei den Paketdiensten üblichen Abmessungen und Gewichten
- Polybeutel
- Keine Berücksichtigung von Schlaufen, Bändern, Trays, Boxen etc.

Den größten Anteil stellen in der KEP-Branche die quaderförmigen Stückgüter (Pakete, Großbriefe) dar. Dies zeigt die Analyse von über 440.000 Datensätzen eines großen Paketdienstleisters, bei denen Abmessungen, Gewicht und weitere Attribute über eine Woche aufgezeichnet wurden. Alle Sendungen, die kleiner als das Mindestmaß von 100x50x20 mm (Länge x Breite x Höhe) waren oder auf der entsprechenden Anlage nicht automatisch sortierbar waren, wurden in Trays gelegt. Dazu gehörten in diesem Fall auch alle Sendungen, die nicht quaderförmig waren, da biegeschlaffe oder zylinderförmige Objekte auf dieser Anlage nicht automatisch sortierbar waren. Die Auswertung ergibt dabei, dass knapp 10% der Pakete in Trays gelegt wurden (vgl. Abbildung 22). Unter der Annahme, dass auch einige quaderförmige Pakete unterhalb der Mindestmaße darunter waren, stellt der Wert von 90,11% eine untere Grenze bezüglich der Anzahl an quaderförmigen Sendungen dar.

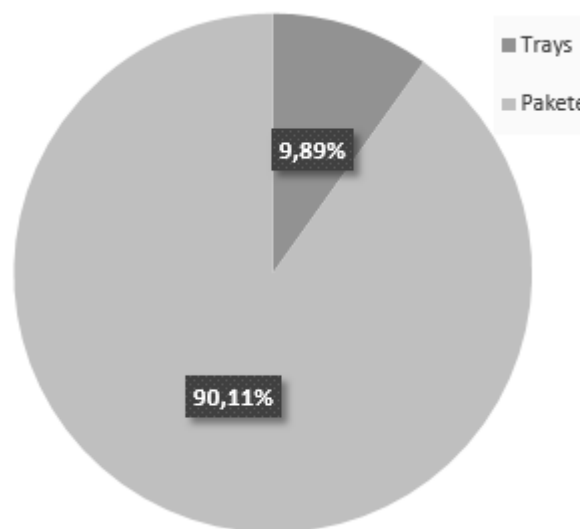
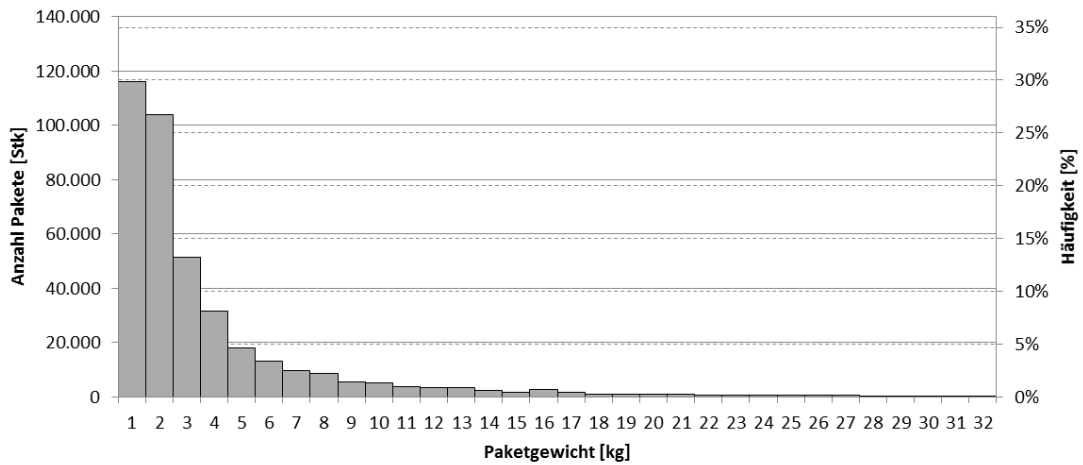


Abbildung 22: Anteil der quaderförmigen Pakete größer 100x50x20 mm (LxBxH)

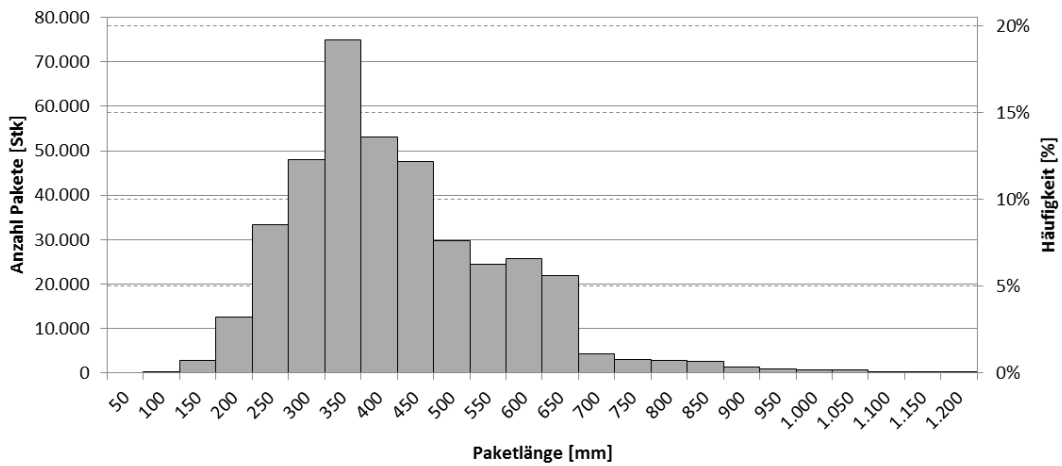
Die Analyse des Paketanteils größer den angegebenen Mindestmaßen (hellgraues Segment in Abbildung 22) ergibt die Häufigkeitsverteilungen nach Abbildung 23 bezüglich Länge, Breite, Höhe und Gewicht.

Histogramm Paketgewicht



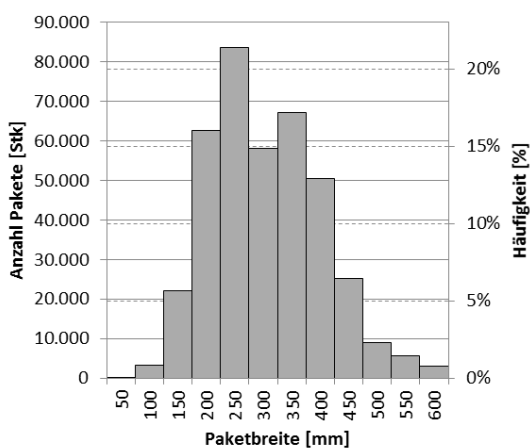
a) Paketgewicht

Histogramm Paketlänge



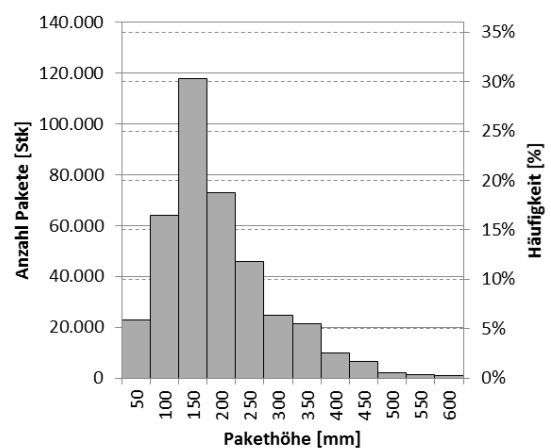
b) Paketlänge

Histogramm Paketbreite



c) Paketbreite

Histogramm Pakethöhe



d) Pakethöhe

Abbildung 23: Histogramme Paketeigenschaften

Die Histogramme „Paketlänge“ und „Paketbreite“ zeigen dabei eine zweigipflige Verteilung, zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch [SEW08], wobei dort stichprobenartig die Ladungen von Transportfahrzeugen untersucht wurden. Die Mittelwerte und Standardabweichungen können Tabelle 2 entnommen werden, zusätzlich sind auch die Werte für das Volumen angegeben.

Die Analyse hinsichtlich des Gewichts ergab einen Mittelwert von 3,29 kg bei einer Standardabweichung von 4,33 kg, die Verteilung kann Abbildung 23a entnommen werden.

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen der Paketabmessungen

	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Volumen [m ³]
Mittelwert	402	280	167	0,0246
Standardabweichung	148	98	96	0,0298

Um auch mögliche Korrelationen der Abmessungen, des Volumens und des Gewichts abschätzen zu können, muss für die Wahl der Berechnungsmethode die Hypothese auf Normalverteilung der Verteilungen nach Abbildung 23 geprüft werden. Bei allen Verteilungen ergab dabei ein durchgeführter chi²-Test (Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$), dass die Annahme einer Normalverteilung zu verwerfen ist. Demzufolge wird die Berechnung der Korrelationskoeffizienten nicht nach der Methode von Pearson durchgeführt (diese Methode setzt eine normalverteilte Grundgesamtheit voraus), sondern basierend auf Rangordnungsinformationen (vgl. [HEK09]). Dafür bieten sich die Rangkorrelationskoeffizienten von Spearman und Kendall an, im vorliegenden Fall wurden die Koeffizienten nach der Methode von Kendall berechnet. Die resultierende Korrelationsmatrix kann Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 3: Korrelationskoeffizienten nach Kendall der Paketeigenschaften

	Länge	Breite	Höhe	Volumen	Gewicht
Länge	1,0000	0,7060	0,3000	0,6486	0,4115
Breite	0,7060	1,0000	0,3161	0,6615	0,4119
Höhe	0,3000	0,3161	1,0000	0,6281	0,4818
Volumen	0,6486	0,6615	0,6281	1,0000	0,5413
Gewicht	0,4115	0,4119	0,4818	0,5413	1,0000

Die Korrelationskoeffizientenmatrix lässt vermuten, dass Abhängigkeiten zwischen den beobachteten Ausprägungen der Abmessungen, des Volumens und des Gewichts vorliegen. Daher wurde die Hypothese auf Unabhängigkeit der Werte getestet, die resultierenden Wahrscheinlichkeitswerte (p-Values) können Tabelle 4 entnommen werden. Diese Werte geben die Wahrscheinlichkeit an, dass Unabhängigkeit bei gegebenen Korrelationskoeffizienten nach Tabelle 3 vorliegt.

Entsprechend der Ergebnisse aus Tabelle 4 muss bei allen getesteten Reihen der Zufallsvariablen die Hypothese auf Unabhängigkeit verworfen werden.

Im Hinblick auf Tests von Vereinzlungstechnik oder Simulationen derselben ist daher festzuhalten, dass ein geeignetes Paket-Referenzspektrum die Korrelationen der oben angegebenen Parameter berücksichtigen sollte. Da aber die Vereinzlungstechnik auch in Extremfällen funktionieren muss (beispielsweise bei vorwiegend kleinen oder großen Paketen), sind diese Fälle ebenfalls zu untersuchen.

Tabelle 4: p-Values aus dem Hypothesentest zu Tabelle 3 mit der Software Matlab

	Länge	Breite	Höhe	Volumen	Gewicht
Länge	1	0	0	0	0
Breite	0	1	0	0	0
Höhe	0	0	1	0	0
Volumen	0	0	0	1	0
Gewicht	0	0	0	0	1

2.4 Methodische Konstruktion

Im Zuge der Vorgangsweise nach Unterkapitel 1.3 steht am Beginn des Entwicklungsprozesses von Vereinzlungstechnik die methodische Entwicklung von Lösungsprinzipien für die Vereinzlung. Die Literatur bietet für diese Aufgabestellung viele Anknüpfungspunkte, beispielsweise in den Werken von [PBF+07], [ROT00] oder auch in den VDI-Richtlinien 2221 und 2222 (vgl. [VDI93];[VDI97]). Auch wenn sich die Inhalte in einigen Punkten unterscheiden, gemeinsam haben sie einen mehrphasigen Entwicklungsprozess, bei dem zu Beginn der Entwicklung, nachdem das Problem ausreichend analysiert wurde, eine Abstrahierung der zu entwickelnden technischen Lösung durchgeführt wird. In Tabelle 5 sind die unterschiedlichen Phasen des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses aus Sicht der drei Quellen [VDI93], [ROT00] und [PBF+07] dargestellt. In der Konstruktionslehre von [PBF+07] wird zwischen Neu-, Anpassungs- und Variantenkonstruktion unterschieden. Insbesondere bei der Neukonstruktion kommt der Phase des Konzipierens große Bedeutung zu, da weder eine Funktions- noch eine Baustruktur vorhanden sind. Die vorliegende Arbeit fokussiert daher im Prozessschritt „Methodische Entwicklung von Lösungsprinzipien“ auf die informative und die prinzipielle Festlegung nach [PBF+07], wobei die Abstraktion des Problems in Form des funktionalen Zusammenhangs und mögliche Wirkstrukturen wichtige Kernpunkte darstellen.

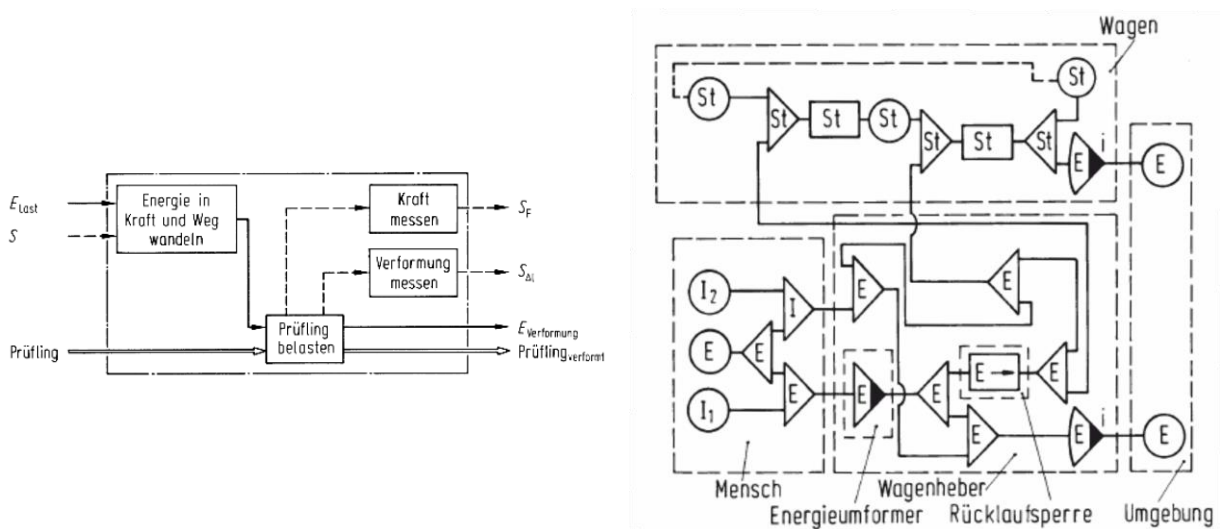
Für die Erstellung des funktionalen Zusammenhangs in der Konzeptphase wird die technische Aufgabe, die das zu entwickelnde System erfüllen soll, abstrakt dargestellt. Dabei wird der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen mit Hilfe von allgemeinen Größen in unterschiedlicher Detailtiefe (Hauptfunktion, Teilfunktionen) entwickelt (vgl. [PBF+07], S.44).

Tabelle 5: Phasen des Entwicklungsprozesses nach [VDI93], [ROT00] und [PBF+07]

	Pahl/Beitz (vgl. [PBF+07])	Roth (vgl. [ROT00])	VDI 2221 (vgl. [VDI93])
Phase des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses	Planen und Klären der Aufgabe (informative Festlegung)	Aufgabenformulierungsphase	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung
	Konzipieren (prinzipielle Festlegung)	Funktionelle Phase	Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen
		Prinzipielle Phase	Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen
	Entwerfen (gestalterische Festlegung)	Gestaltende Phase	Gliedern in realisierbare Module
			Gestalten der maßgeblichen Module
			Gestalten des gesamten Produkts
	Ausarbeiten (herstellungstechnische Festlegung)		Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben

Jedes technische System kann nach [ROT00] durch die allgemeinen Größen Stoff (St), Energie (E) und Information (I) beschrieben werden. Abbildung 24b zeigt beispielsweise die Funktionsstruktur eines Wagenhebers nach [ROT00], eine andere Darstellungsart am Beispiel einer Prüfmaschine zeigt Abbildung 24a nach [PBF+07]. Die abstrakte Darstellung der technischen Funktion aus der „Funktionellen Phase“ bildet die Basis für die „Prinzipielle Phase“, in der ein physikalischer Effekt durch „Festlegen von geometrischen und stofflichen Merkmalen in einen Wirkzusammenhang gebracht“ ([PBF+07], S.52) wird. Der Fokus liegt dabei auf der Realisierung der jeweiligen Funktion durch Festlegung von Wirkflächen (auch Wirklinien, Wirkräumen), Wirkbewegungen und Werkstoffen. Als Beispiel kann hier das Wirkprinzip einer Rollenkurve dargestellt werden: Durch die Rotation (=Wirkbewegung) von konischen Rollen (=Wirkfläche) in Verbindung

mit dem Coulombschen Reibungseffekt (=physikalischer Effekt) wird ein Stückgut so bewegt, dass eine Überlagerung von Translation und Rotation die Bewegungsbahn ergibt.



a) Funktionsstruktur einer Prüfmaschine (vgl. [PBF+07], S.249)

b) Funktionsstruktur eines Wagenhebers (vgl. [ROT00], S.89)

Abbildung 24: Verschiedene Funktionsstrukturen technischer Systeme

Im Unterkapitel 3.2 wird als Grundlage für die Konzipierung von Vereinzlungstechnik der Vereinzlungsvorgang abstrahiert und in einen funktionalen Zusammenhang gebracht. In weiterer Folge werden auch Wirkstrukturen vorgestellt, die bestimmte Vereinzlungsaufgaben lösen können.

2.5 Statistische Versuchsplanung (DoE)

Die statistische Versuchsplanung (engl.: *Design of Experiments* (DoE)) hat sich in vielen Bereichen der Forschung und Entwicklung als Methode etabliert, auch bei streuenden Versuchsergebnissen gezielt Parameter zu identifizieren, die das System signifikant beeinflussen (vgl. [SBH10], S.2ff). Dabei steht im Vordergrund nicht nur der Einfluss eines einzelnen Parameters, sondern insbesondere das Zusammenwirken mehrerer Parameter, das zu deutlich größeren Effekten auf eine Zielgröße führen kann, als wenn jeweils nur ein Parameter geändert wird („One-factor-at-a-time-Methode“) (vgl. [SBH10], S.6ff). Dabei werden Methoden der Statistik eingesetzt, die die Anzahl an notwendigen Versuchen minimieren, gleichzeitig aber den Einfluss und die Wechselwirkungen der geänderten Parameter sichtbar lassen.

Die Methode des DoE arbeitet innerhalb eines abgegrenzten Systems. Darunter ist eine Abgrenzung des Systems selbst, aber auch eine klare Festlegung des untersuchten Parameterspektrums in

Ausprägung und Wertebereich zu verstehen. Einflüsse nicht untersuchter Parameter bleiben unsichtbar, Extrapolationen des Beobachteten über die festgelegten Grenzen der Parameterwerte sind unzulässig.

2.5.1 System und wichtige Kenngrößen

Das in einer DoE-Studie untersuchte System wird als Funktion nach Abbildung 25 betrachtet, die den entsprechenden Eingangsgrößen eine oder mehrere Ausgangsgrößen zuweist. Die Ausgangsgrößen werden dabei entweder als Qualitätsmerkmale (auch als Zielgrößen oder erwünschte Ergebnisse bezeichnet) oder als Error States (unerwünschte Ergebnisse) festgelegt. Hinsichtlich der Einflussgrößen werden in einem ersten Schritt die zum System gehörenden Parameter von jenen außerhalb des Systems getrennt, wobei die Beeinflussbarkeit das Entscheidungskriterium darstellt. Die Menge der beeinflussbaren Einflussgrößen wird als Steuergrößen bezeichnet, die verbleibenden sind definiert als Stör- oder Signalgrößen.

Aus allen identifizierten Einflussgrößen wird eine Teilmenge ausgewählt, die untersucht werden soll. Die Parameter in dieser Auswahl werden Faktoren genannt, für die in weiterer Folge sogenannte Stufen festgelegt werden. Die Stufen entsprechen der konkreten Wahl von Faktorwerten aus dem betrachteten Wertebereich. Die Stufenwahl wird dabei vom Untersuchungsziel beeinflusst, wobei detailliertere Untersuchungen mehr Stufen voraussetzen als z.B. die Screening-Phase (vgl. Abschnitt 2.5.2), in der meist zwei Stufen je Faktor ausreichen. Als Konsequenz können dann entweder nur lineare Zusammenhänge (bei zwei Stufen je Faktor) ermittelt werden oder auch solche höherer Ordnung bei mehr als zwei Stufen (vgl. [KLE13]).

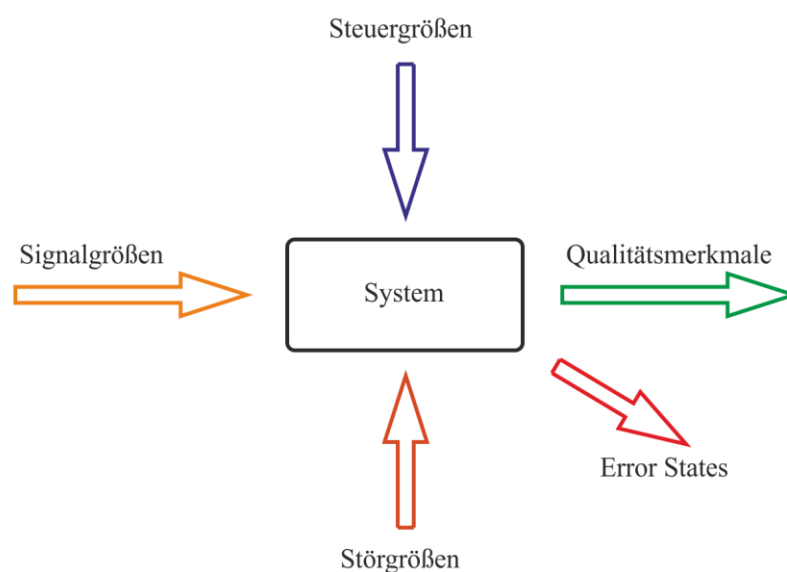


Abbildung 25: System, Ein- und Ausgangsgrößen in einer DoE-Studie ([SBH10], S.140)

Das Ziel einer DoE-Analyse ist in einer ersten Ausbaustufe die Ermittlung von Effekten und Wechselwirkungen. Unter dem Effekt wird die Wirkung eines Faktors auf das System bezeichnet, er „...quantifiziert ... die mittlere registrierte Veränderung des Qualitätsmerkmals, beim Wechsel der Faktoreinstellung...“ ([SBH10], S.12). Bei zwei Faktorstufen erfolgt die Berechnung durch die Bildung der Differenz der zwei Mittelwerte aus den eingestellten Stufen (mittlere Veränderung des Qualitätsmerkmals).

Die Wechselwirkung bezieht zusätzlich noch den Ausgangszustand mit ein. Mit der Wechselwirkung wird ermittelt, wie groß der Effekt eines Faktors in Abhängigkeit einer gegebenen Einstellung anderer Faktoren ist.

2.5.2 Ablauf einer DoE-Studie

Die Durchführung einer DoE-Studie beginnt nach (vgl. [SBH10], S.261 und [KLE13], S.328) mit der qualitativen Systembeschreibung. Dabei werden die Systemgrenzen festgesetzt, die Qualitätsmerkmale festgelegt und Einflussgrößen bestimmt. Danach folgt die Bestimmung der Faktoren, also jener Einflussgrößen, die in den Versuchen untersucht werden sollen. Sind alle Faktoren festgelegt, werden der Versuchsplan erstellt, die Versuche durchgeführt und ein Beschreibungsmodell ermittelt (siehe Abbildung 26).

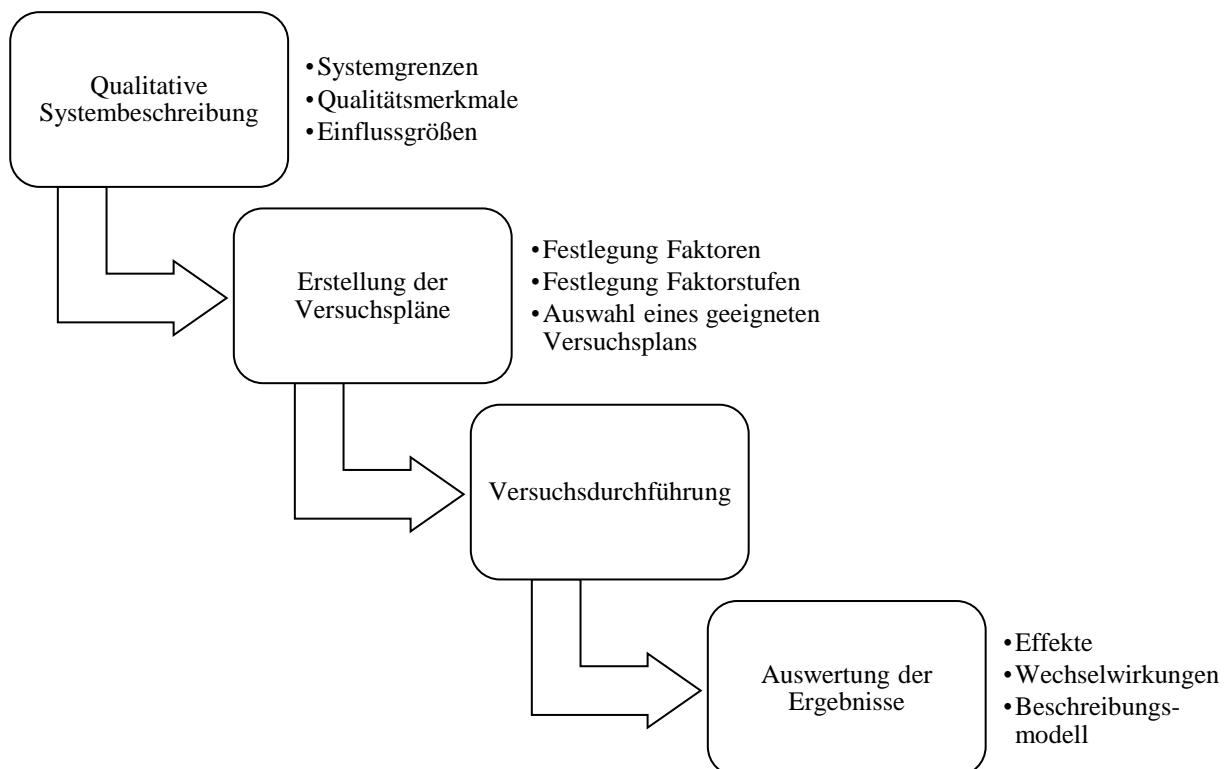


Abbildung 26: Prozessschritte einer DoE-Studie (in Anlehnung an [SBH10] und [KLE13])

Da in dieser Phase üblicherweise noch relativ viele Einflussgrößen als Faktoren in Betracht gezogen werden, zieht man sogenannte Screening-Pläne heran, mit denen die maßgeblich beeinflussenden Faktoren grob (meist nur lineare Abhängigkeiten) bestimmt werden. Die vielversprechendsten Faktoren (<6) können dann für eine genauere Untersuchung ausgewählt werden, in der auch nichtlineare Zusammenhänge zwischen Qualitätsmerkmalen und Faktoren ermittelt werden. In dieser Phase wird nach erfolgreicher Erstellung eines Beschreibungsmodells zum untersuchten System oft auch eine Optimierung angeschlossen, um optimale Einstellungsbereiche der Faktoren als Resultat zu erhalten.

2.5.3 Versuchspläne

Nach der Festlegung der Einflussgrößen, der Faktor- und Stufenwahl werden geeignete Versuchspläne für das Untersuchungsziel erstellt. Dabei werden die zu untersuchenden Kombinationen der Faktorstufen bestimmt, wobei Voraussetzungen wie Orthogonalität und Ausgewogenheit erfüllt sein sollen (vgl. [SBH10], S.7). Eine ausführliche Darstellung von einfachen bis zu komplexen Testfeldern wird in [SBH10], [BHH05] und [KLE13] gegeben, im Folgenden soll nur auf den Unterschied zwischen vollfaktoriellen und fraktionell faktoriellen Versuchsplänen eingegangen werden.

Bei einem vollfaktoriellen Versuchsplan werden alle möglichen Kombinationen der Faktorstufen getestet. Entsprechend Abbildung 27a ergeben sich bei drei Faktoren A, B und C mit je zwei Stufen (-/+) acht verschiedene Kombinationen mit acht verschiedenen Merkmalsausprägungen y_i . Es ist unschwer zu erkennen, dass bei steigender Anzahl der Faktoren n_f und Stufen n_l ein vollfaktorieller Versuchsplan entsprechend der Beziehung

$$n_r = n_l^{n_f}$$

schnell zu einer Versuchsanzahl n_r führt, die insbesondere bei Realversuchen an Prüfständen nicht mehr sinnvoll ist (vgl. [SBH10], S.6f). Die statistische Versuchsplanung bietet für diese Fälle, die insbesondere in der Screening-Phase auftreten, fraktionell faktorielle Versuchspläne (Abbildung 27b). Dabei wird die Anzahl der untersuchten Faktorstufenkombinationen auf eine Auswahl beschränkt, wobei unter Berücksichtigung von statistischen Voraussetzungen eine hinreichend signifikante Erkennung von Effekten und Wechselwirkungen gewährleistet ist. Bei fraktionell faktoriellen Versuchsplänen kommt es dabei aber zu einer Vermischung von Haupteffekten (Effekt bei Änderung eines Faktors) mit Wechselwirkungen höherer Ordnung (in Abbildung 27b ist z.B. der Haupteffekt A mit der Dreifachwechselwirkung BCD vermischt). Da letztere aber zumeist nur eine

untergeordnete Rolle spielen, bleiben die Haupteffekte sichtbar. Den Preis für eine effizientere Versuchsdurchführung zahlt man im Beispiel nach Abbildung 27b durch eine Vermengung von Zweifachwechselwirkungen, womit eine eindeutige Zuordnung letzterer nicht mehr möglich ist (vgl. [KLE13], S.137ff).

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>y</i>	<i>A</i> <i>BCD</i>	<i>B</i> <i>ACD</i>	<i>AB</i> <i>CD</i>	<i>C</i> <i>ABD</i>	<i>AC</i> <i>BD</i>	<i>BC</i> <i>AD</i>	<i>ABC</i> <i>D</i>	<i>y</i>
-	-	-	<i>y</i> ₁	-	-	+	-	+	+	-	<i>y</i> ₁
+	-	-	<i>y</i> ₂	+	-	-	-	-	+	+	<i>y</i> ₂
-	+	-	<i>y</i> ₃	-	+	-	-	+	-	+	<i>y</i> ₃
+	+	-	<i>y</i> ₄	+	+	+	-	-	-	-	<i>y</i> ₄
-	-	+	<i>y</i> ₅	-	-	+	+	-	-	+	<i>y</i> ₅
+	-	+	<i>y</i> ₆	+	-	-	+	+	-	-	<i>y</i> ₆
-	+	+	<i>y</i> ₇	-	+	-	+	-	+	-	<i>y</i> ₇
+	+	+	<i>y</i> ₈	+	+	+	+	+	+	+	<i>y</i> ₈

a) vollfaktoriell
([SBH10], S.7)

b) fraktionell faktoriell
([SBH10], S.27)

Abbildung 27: Versuchspläne

Insbesondere für CAE-Analysen, bei denen automatisierte Berechnungen zahlreicher Faktorkombinationen möglich sind, kommen neben vollfaktoriellen Versuchsplänen auch zufallsgenerierte Versuchspläne zum Einsatz (z.B. Monte-Carlo-Methode) (vgl. [SBH10], S.168). Neben der Auswahl des geeigneten Versuchsplans muss auch die Unabhängigkeit der Versuche sichergestellt werden, entsprechend spielen Randomisierung und Versuchswiederholungen eine entscheidende Rolle.

3 Entwicklung von Wirkprinzipien der Vereinzelnung

Im Unterkapitel 2.2 wurden unterschiedliche Aspekte der Vereinzelnung aus wissenschaftlicher Sicht und bereits realisierte technische Lösungen vorgestellt. Bei den technischen Lösungen ist zu erkennen, dass diese ein breites Anwendungsfeld abdecken: Unterschiedliche Güter, unterschiedliche Ausgangssituationen (dreidimensionaler Stückgutpulk, flächig verteilte Pakete) oder zusätzliche Funktionen wie Ausrichtung und Entladung der Stückgüter sind mit diesen Lösungen beherrschbar. Für die folgenden Betrachtungen wird im Unterkapitel 3.1 eine Abgrenzung des Begriffes „Vereinzelnung“ vorgenommen, indem die grundsätzlichen Ziele der Vereinzelnung im Kontext der vorliegenden Dissertation festgelegt werden. Aufbauend auf dieser Definition wird im Unterkapitel 3.2 eine Funktionsstruktur für den Vereinzelnungsvorgang entwickelt, die die Basis für die Suche nach Wirkprinzipien darstellt (vgl. auch Unterkapitel 2.4). Die aus einer Patentrecherche identifizierten Wirkprinzipien werden nachfolgend entsprechend ihres physikalischen Prinzips klassifiziert.

3.1 Ziele und Anforderungen an die Vereinzelnung

Ziel der Vereinzelnung ist primär die Separation von in Kontakt befindlichen Objekten. Für die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit wird das Erreichen dieses Ziels so definiert, dass Objekte als vereinzelt gelten, wenn der kürzeste Abstand zwischen ihren Oberflächen größer null ist.

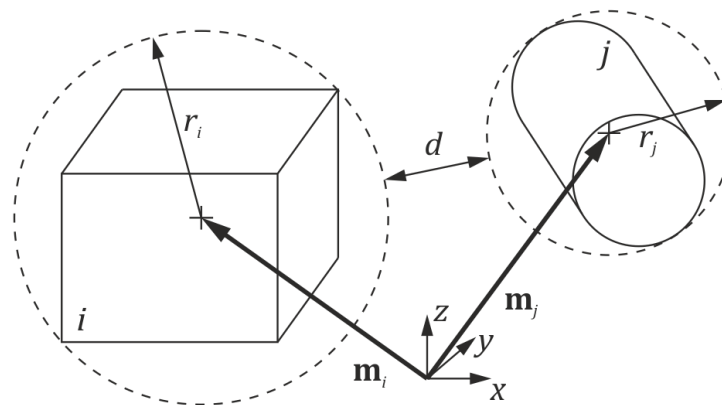


Abbildung 28: Nicht miteinander in Kontakt stehende Körper

Wenn die umhüllende Kugel eines allgemeinen Körpers den Mittelpunkt M und den Radius r hat, kann bei Gültigkeit der Beziehung

$$d = |\mathbf{m}_j - \mathbf{m}_i| - (r_i + r_j) > 0$$

mit Sicherheit angenommen werden, dass die Körper i und j nicht mehr miteinander in Kontakt stehen und somit vereinzelt sind (vgl. auch Abbildung 28). Diese Annahme ist konservativ, da Objekte unter Umständen auch schon vereinzelt sind, wenn diese Ungleichung nicht erfüllt ist.

Im Unterkapitel 2.2 wurden erstmals die Begriffe 3D-Paketpulk und 2D-Paketpulk eingeführt. Darauf beziehend wird im Folgenden auch zwischen 3D/2D-Vereinzelung und 2D/1D-Vereinzelung unterschieden. Dazu wird an dieser Stelle festgelegt, dass eine erfolgreiche 3D/2D-Vereinzelung dann stattgefunden hat, wenn die zwei folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Die Projektionen aller Körper auf die Förderfläche weisen keine Überschneidungen auf
- Alle Objekte liegen auf der Förderebene

Die Konfiguration 1 in Abbildung 29 zeigt eine in diesem Sinne nicht vereinzelt Anordnung: Die Projektion auf die Förderfläche B zeigt eine Überschneidung der zwei Pakete.

Bei einer erfolgreichen 2D/1D-Vereinzelung gilt zusätzlich folgende Bedingung:

- Die Projektionen aller Objekte auf eine Ebene senkrecht zur Förderebene und in Förderrichtung liegend weisen keine Überschneidungen auf und berühren sich nicht

Konfiguration 2 in Abbildung 29 zeigt eine in diesem Sinne nicht vereinzelt Anordnung: Die Projektion auf die Fläche A weist Überschneidungen auf.

Neben diesen Kriterien für die Vereinzelung können auch noch Zusatzanforderungen vorgegeben werden: Bei einer geforderten definierten Ausrichtung müssen alle Objekte entlang einer Ebene liegen und je nach Objektform eine definierte Lage des körperfesten Koordinatensystems haben, des Weiteren kann auch ein bestimmter Mindestabstand zwischen den Objekten erforderlich sein.

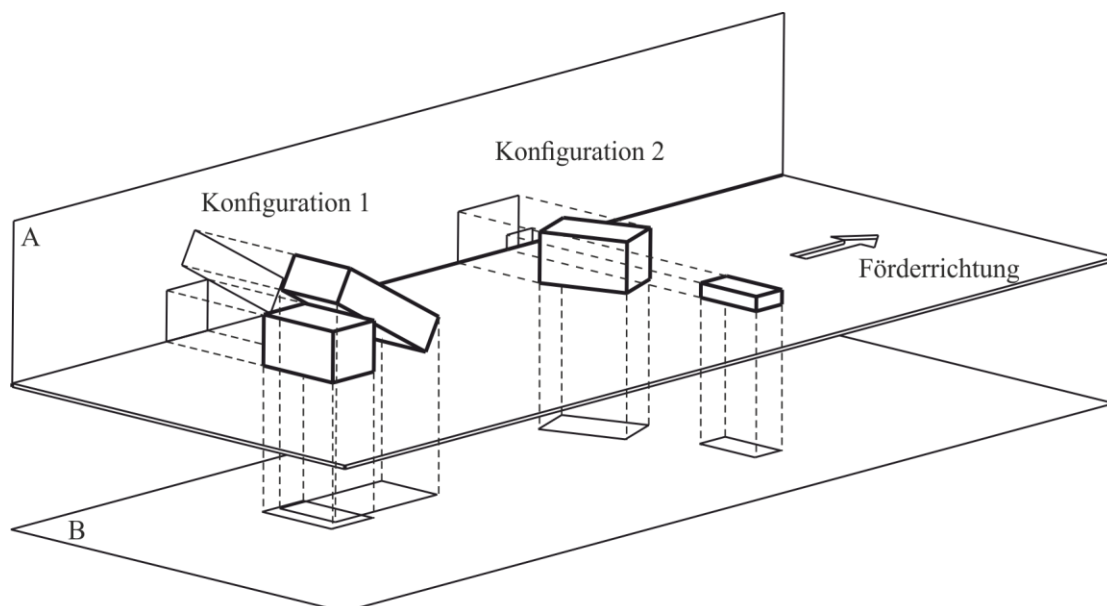


Abbildung 29: Beispielkonfigurationen nicht vereinzelter Pakete

Bei oben genannten Bedingungen ist für gerade Förderstrecken die Projektion als Parallelprojektion zu sehen, bei kurvenförmigen Förderstrecken als zentral von der Krümmungsachse ausgehende Projektion.

3.2 Abstraktion des Vereinzelungsprozesses – eine funktionsorientierte Darstellung

Eine Kernaufgabe in der Phase des Konzipierens im methodischen Konstruktionsprozess ist die Abstraktion der technischen Aufgabe, die die zu entwickelnde Technik lösen soll (vgl. auch Unterkapitel 2.4). Im vorliegenden Abschnitt wird dahingehend der Vereinzelungsprozess in eine funktionale Darstellung gebracht, wobei auch die Zusatzanforderungen nach Unterkapitel 3.1 berücksichtigt werden. Für die funktionale Darstellung gibt es unterschiedliche Darstellungsformen (vgl. [PBF+07]; [ROT00]; [KOL98]). Im Folgenden wird von der Blockdarstellung nach Pahl/Beitz Gebrauch gemacht, bei der die Funktion selbst als „Schwarzer Kasten“ abgebildet wird, d.h. die Vorgänge innerhalb des Blocks bleiben vorerst unberücksichtigt (vgl. [PBF+07]).

Die übergeordnete Gesamtfunktion wird nach Abbildung 30 mit „Pulk vereinzeln“ beschrieben, unabhängig, ob ein 2D- oder ein 3D-Pulk vorliegt. Die eingehenden Größen sind der Paketpulk (P), die Antriebsenergie (E) und die Steuersignale (S). Ausgangsgrößen sind vereinzelte sortierbare Stückgüter (VSG) und vereinzelte, nicht sortierbare Güter (NSG) sowie Prozessinformationen (z.B. Anzahl der vereinzelteten Stückgüter, Anteil der nicht sortierbaren Güter etc.). Als Hauptfluss wird der Stofffluss betrachtet.

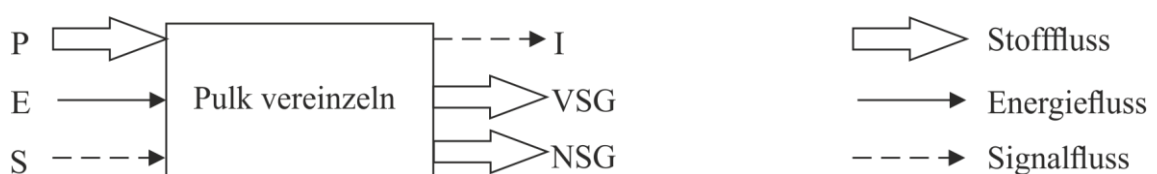


Abbildung 30: Gesamtfunktion der Vereinzelung

Die Verfeinerung dieser Gesamtfunktion ergibt zusammenhängende Teilfunktionen nach Abbildung 31. Dabei sind auch die Systemgrenzen dargestellt, die die Vereinzelung vom vorgelagerten Bereich der Zuförderung und dem nachfolgenden Identifikationsbereich abgrenzen. Den Ausgangspunkt stellt ein nicht vereinzelter Stückgutpulk dar, dem entspricht die (außerhalb der Systemgrenzen liegende) Funktion „Stückgüter speichern“. Ausgehend davon müssen die Stückgüter

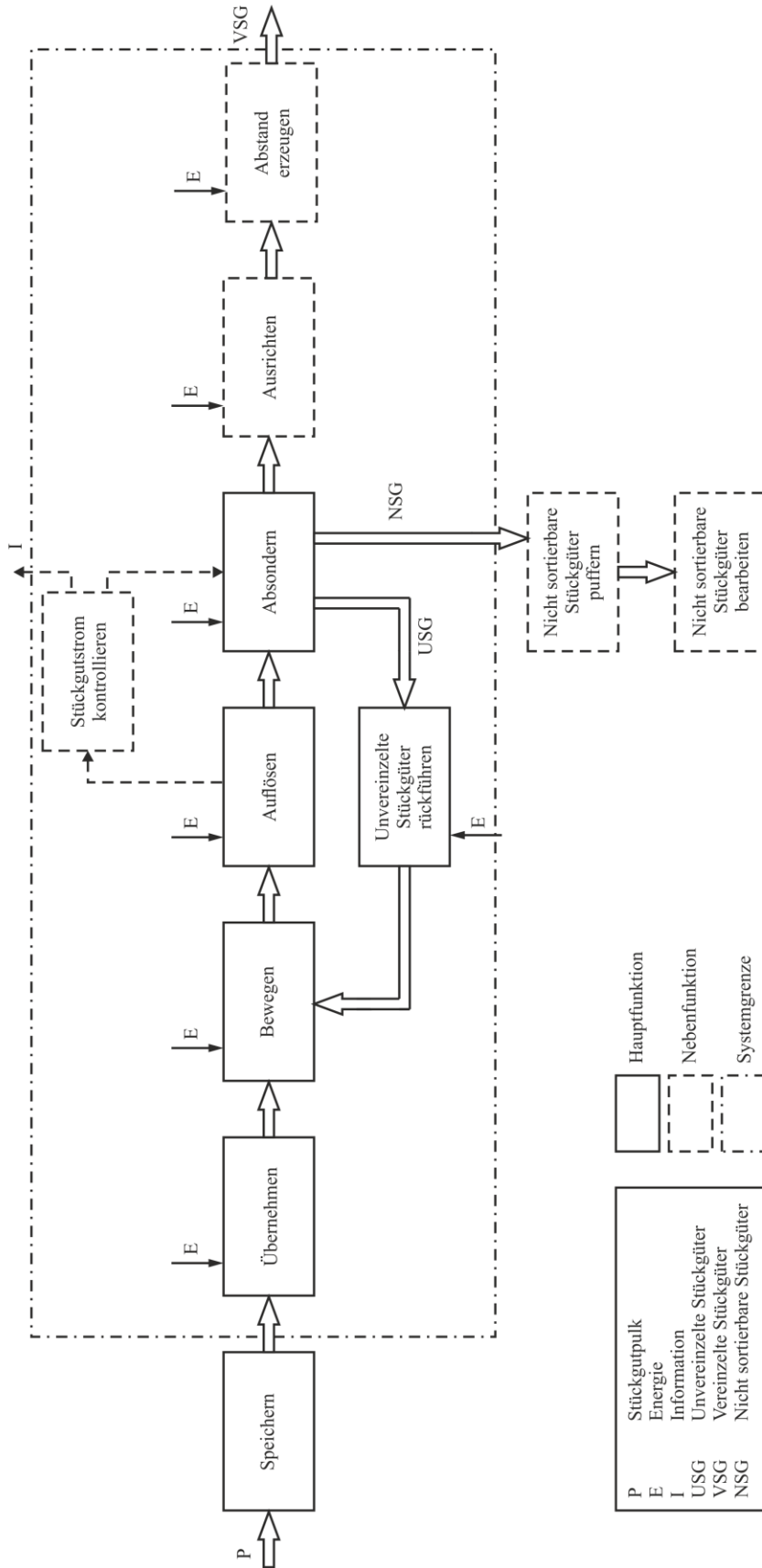


Abbildung 31: Teilfunktionen der Vereinzelung

übernommen und bewegt werden. Durch die Verringerung der Gutdichte⁵ und das Trennen von in Kontakt befindlichen Stückgütern erfolgt dann die Auflösung des Pulks. Die Auflösung des Stückgutpulks wird überwacht und gegebenenfalls wird dabei eine Rückführung nicht vollständig einzelner Stückgutansammlungen initiiert (in Abbildung 31 ist die Funktion „Stückgutstrom kontrollieren“ als Nebenfunktion dargestellt, da sie nur mittelbar für die Vereinzelung verantwortlich ist). Zusätzlich wird nach dem Auflösen des Pulks auch eine Überprüfung hinsichtlich automatischer Sortierbarkeit durchgeführt (z.B. Form, Oberflächenbeschaffenheit, Abmessungen, Gewicht), nicht für den weiteren Sortierprozess geeignete Stückgüter werden abgesondert und gelangen in einen Puffer bis zur weiteren Bearbeitung. Optional sind auch noch die Funktionen „Ausrichten“ und/oder „Abstand erzeugen“ gefordert (vgl. auch Unterkapitel 3.1).

Wenn die Ausgangssituation aus einem 3D-Paketpulk besteht, muss das Funktionsschema aus Abbildung 31 gegebenenfalls zweimal durchlaufen werden (3D/2D-Vereinzelungsstufe und 2D/1D-Vereinzelungsstufe).

3.3 Wirkprinzipien der Vereinzelung

Nach der „Funktionalen Phase“ folgt im methodischen Konstruktionsprozess die „Prinzipielle Phase“ (vgl. Unterkapitel 2.4), in der Wirkprinzipien als Kombination aus physikalischem Prinzip und geometrischen sowie stofflichen Merkmalen gesucht werden. Für die Betrachtung der Vereinzelung wurden über 70 Patente zu Vereinzelungslösungen herangezogen und die zugrundeliegenden Mechanismen gegliedert (Tabelle 6 bis Tabelle 10). Die Aufstellungen in diesen Tabellen stellen dabei konsequenterweise nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, sie sollen vielmehr im Prozess der methodischen Konstruktion einen Anknüpfungspunkt für mögliche Vereinzelungslösungen darstellen.

Die Wirkprinzipien wurden nach der vorherrschenden Krafteinwirkung gegliedert, da diese für eine Trennung von Objekten unumgänglich ist. Unterschieden wird dabei zwischen Normal-, Reib- und Volumenkräften, wobei aber festzuhalten ist, dass bei einigen Lösungen auch mehrere Krafteinwirkungen zur Gesamtlösung beitragen. Dies ist auch vor dem Hintergrund der Lösungssynthese wichtig, da in vielen Fällen die Kombination von zwei Prinzipien zu einer besseren Gesamtlösung beiträgt (beispielsweise geneigte sequentielle Bandförderer mit zunehmenden Bandgeschwindigkeiten). Zusätzlich wurde bei der Gliederung eine Zuordnung zum Vereinzelungstyp (3D/2D, 2D/1D, 3D/1D) vorgenommen.

⁵ Unter Gutdichte ist hier die durchschnittliche Anzahl der Stückgüter bezogen einen Laufmeter Fördertechnik zu verstehen.

3.3.1 Vereinzelung durch Oberflächenkräfte

Ein großer Teil der Vereinzelungslösungen in dieser Kategorie basiert auf der Einleitung von Reibkräften. Ein Beispiel hierzu sind unterschiedliche Geschwindigkeitsfelder, die die zu vereinzelnden Objekte definiert beeinflussen. Felder ansteigender Geschwindigkeiten werden dazu genutzt, die Gutdichte zu verringern und Abstände zu erzeugen (beispielsweise das Wirkprinzip „Sequentielle Geschwindigkeitszunahme“ aus Tabelle 6). Eine Ausrichtung der Band- oder Rollenförderer hin zu einer Begrenzung kann zusätzlich noch dazu genutzt werden, um die Objekte an einem vordefinierten Pfad auszurichten (Wirkprinzip „Angestellte konische Rollen“ oder „Angestellte Bandförderer“ in Tabelle 6). Rollen mit konischer Form bewirken aufgrund der größeren Umfangsgeschwindigkeit mit steigendem Durchmesser einen Überholvorgang der zu vereinzelnden nebeneinanderliegenden Objekte und eine Drehung derselben (Längsausrichtung an der Begrenzung). In hochtechnisierten Lösungen wie dem Visicon Singulator® der Siemens AG (Abbildung 17 auf Seite 20) wird das Prinzip unterschiedlicher Geschwindigkeitsfelder soweit verfeinert, dass über kleine angetriebene Bandförderer und ein Bilderfassungssystem jedes Objekt gezielt bewegt und ausgerichtet werden kann (Wirkprinzip „Bandförderer-Matrix“ in Tabelle 6).

Neben unterschiedlichen Geschwindigkeitsfeldern können aber auch nicht angetriebene Gleitebenen mit Bereichen unterschiedlicher Reibungskoeffizienten eine Vereinzelungsfunktion übernehmen, im Wirkprinzip „Verschiedene Reibbeläge“ aus Tabelle 6 wird gleichzeitig auch die Gravitationskraft genutzt. Die unteren Bereiche haben dabei einen geringeren Reibungskoeffizienten, der dazu führt, dass die Objekte schneller beschleunigen und so die Gutdichte geringer wird.

Insbesondere bei der Vereinzelung flacher Objekte werden oft Bandförderer genutzt, die aufgrund eines hohen Reibungskoeffizienten (dieser muss höher sein als jener zwischen den zu vereinzelnden Objekten) einzelne Objekte abziehen, während die anderen zurückgehalten werden (Wirkprinzip „Abzug mit Reibbarriere“ aus Tabelle 6). Auch einige Greifersysteme nutzen den Kraftschluss, wobei aber die Gutstabilität ausreichen muss, um Beschädigungen zu vermeiden.

Neben Reibungskräften wird auch die Aufprägung von Normalkräften auf die zu vereinzelnden Objekte genutzt. Wie in den Wirkprinzipien in Tabelle 7 dargestellt, kann dies beispielsweise durch Abweiser erfolgen, die starr oder flexibel in passiver oder aktiver Art auf die Stückgüter einwirken. Auch Taschen oder Mitnehmer (Tabelle 8) lösen durch Formschluss einzelne Objekte aus einem Pulk heraus. Der im Unterkapitel 2.2 beschriebene Peristaltikförderer kann ebenfalls zu dieser Art gezählt werden, wobei hier die Mitnehmer (Taschen) in Größe und Form sowie deren Fortbewegungsgeschwindigkeit individuell variabel erzeugt werden können.

Tabelle 6: Wirkprinzipien unter Nutzung von Reibkräften

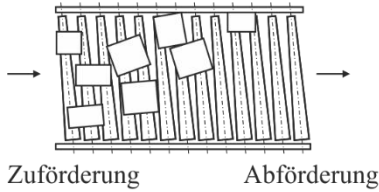
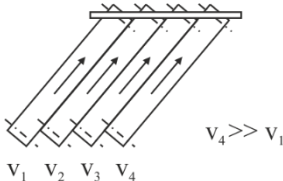
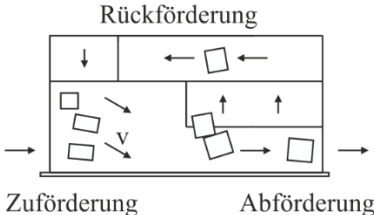
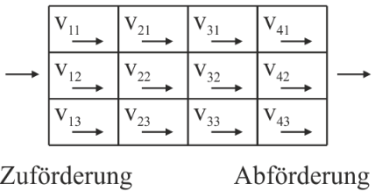
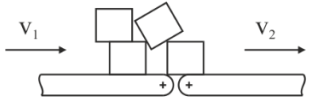
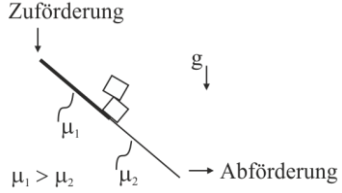
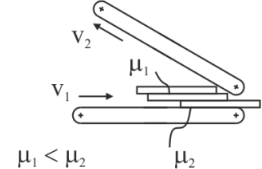
Wirkprinzip	Prinzipbild	Erklärung	Physikalisches Prinzip Subkategorie	Typ		
Angestellte konische Rollen		<p>Im Winkel angestellte Rollen bewegen die Stückgüter zu einem Anschlag und richten sie dort aus. Die zunehmende Umfangsgeschwindigkeit über die Rollenlänge bewirkt ein „Überholen“ nebeneinanderliegender Güter.</p>	Reibkraft Geschwindigkeitsfelder	2D/1D		
Angestellte Bandförderer		<p>Im Winkel angestellte Bandförderer bewegen die Stückgüter zu einem Anschlag unter Ausnutzung zunehmender Bandgeschwindigkeit</p>				
Umlauf mit Rückführung		<p>Über eine breite Zuführung werden die Stückgüter in Richtung einer engeren Abförderung bewegt. Nebeneinanderliegende Stückgüter gelangen in einen Rücklauf.</p>				
Bandförderer Matrix		<p>Einzelansteuerbare Bandförderer erzeugen ein variables Geschwindigkeitsfeld. Die Bewegung der Stückgüter kann so gezielt beeinflusst werden.</p>				
Sequentielle Geschwindigkeitszunahme		<p>Förderer mit sequentiell zunehmender Geschwindigkeit „ziehen“ den Stückgutpulk auseinander. Obenliegende Stückgüter können so freiwerdenden Platz einnehmen.</p>				
Verschiedene Reibbeläge		<p>Die Stückgüter passieren auf einer Rutsche Zonen mit unterschiedlichen Reibkoeffizienten. Dadurch lösen sich obenliegende Pakete.</p>	Reibkraft Verschiedene Reibkoeffizienten	3D/2D		
Abzug mit Reibbarriere		<p>Ein Abzugsband trennt Stückgüter von nachfolgenden. Gegenlaufendes Band bremst dabei obenliegende Güter.</p>				

Tabelle 7: Wirkprinzipien basierend auf Normalkräften durch Abweiser

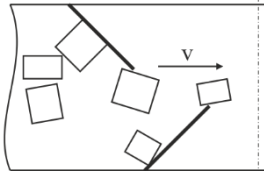
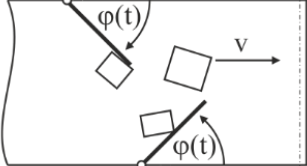
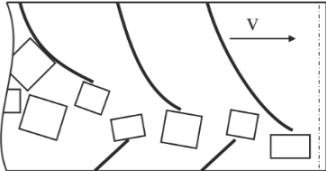
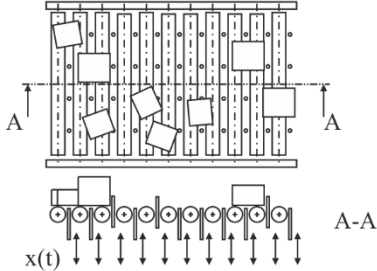
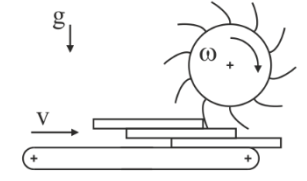
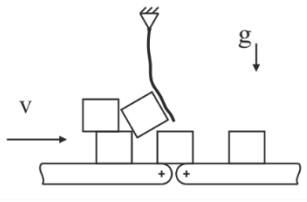
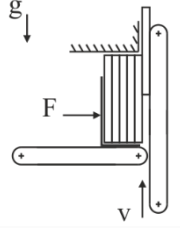
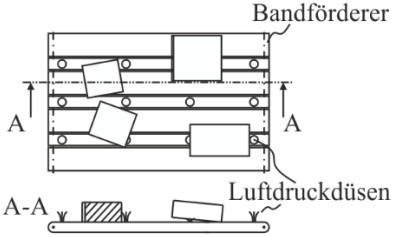
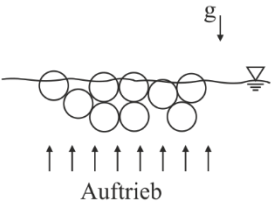
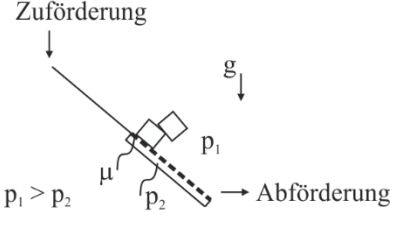
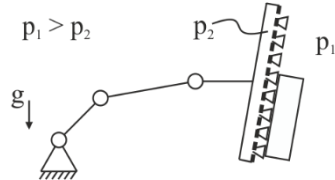
Wirkprinzip	Prinzipbild	Erklärung	Physikalisches Prinzip Subkategorie	Typ
Starre Abweiser		Starre Abweiser beeinflussen die Bewegung der Pakete auf dem Fördermittel		2D/1D
Gesteuerte Abweiser („Flipper“)		Aktiv gesteuerte Abweiser positionieren die Pakete neu		
Verengung		Zunehmende Verengungen auf dem Fördermittel ordnen Pakete neu an		
Gesteuerte Hindernisse („Stößel“)		Vertikal bewegbare Hindernisse (Stößel) beeinflussen gezielt die Bewegung der Stückgüter	Normalkraft Abweiser	3D/2D
Abzug mit rotierender Bürste		(Flexible) Abweiser auf einer rotierenden Bürste streifen übereinanderliegende Stückgüter ab		
Flexible Barriere („Vorhang“, „Lippe“)		Fest positionierte flexible Barriere streift übereinanderliegende Stückgüter ab		
Abzug mit starrer Barriere		Abzugsband trennt Stückgüter von nachfolgenden, Barriere blockiert letztere	Normalkraft Abweiser (Reibkraft)	2D/1D 3D/2D

Tabelle 8: Wirkprinzipien basierend auf Normalkräften durch Taschen und Mitnehmer

Wirkprinzip	Prinzipbild	Erklärung	Physikalisches Prinzip Subkategorie	Typ
Rotierende Drehteller mit Taschen		Rotierender innerer Drehteller bewegt Stückgüter nach außen, wo diese in die Taschen des Außenrings fallen.	Normalkraft <i>Taschen, Mitnehmer</i>	2D/1D
Gesteuerte Stufen		Aktiv gesteuerte Schieber bewirken das Umschlagen von Paketen		3D/2D
Vertikale Mitnehmer		Vertikal bewegte Mitnehmer lösen einzelne Stückgüter aus einem Pulk		2D/1D 3D/2D
Peristaltik (Flexible Taschen)		Aktive Änderung der Fördermitteloberfläche bewirkt neben der Vorwärtsbewegung auch eine Trennung der Stückgüter		2D/1D 3D/2D 3D/1D
Zangen- greifer		Stückgüter werden durch Schließen der Greifzange fixiert und können dann bewegt werden		

Zusätzlich zu den mechanischen Möglichkeiten, Normalkräfte zum Vereinzeln von Stückgütern zu nutzen, werden auch pneumatische oder hydrostatische/hydrodynamische Prinzipien genutzt (Tabelle 9). Greifer mit pneumatischem Aufnahmeprinzip finden sich in verschiedenen Bereichen der Warendistribution, sofern die Oberfläche der Stückgüter das Prinzip zulässt. Insbesondere bei der Depalettierung kommen derartige Roboter zum Einsatz. Das Prinzip des Auftriebs dagegen eignet sich in den meisten Bereichen nicht, da die Stückgüter resistent gegen die Flüssigkeit sein müssen. In der Obstsartierung ist das der Fall, wobei als zusätzlicher Nutzen auch die Reinigung zu sehen ist. Das Prinzip „Rutsche mit Unterdruck“ ist vergleichbar mit dem Prinzip „Verschiedene Reibbeläge“ aus Tabelle 6, wobei hier die Güter gebremst und nicht beschleunigt werden.

Tabelle 9: Wirkprinzipien basierend auf Normalkräften durch Druckunterschied

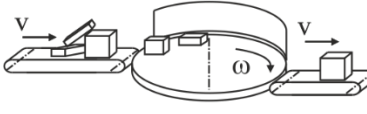
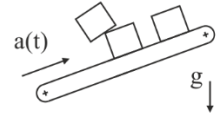
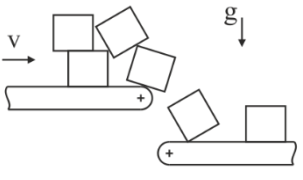
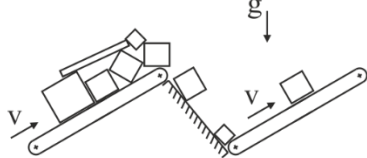
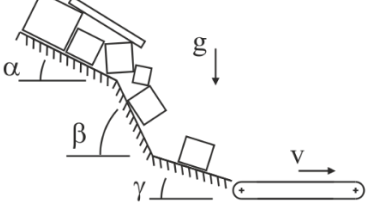
Wirkprinzip	Prinzipbild	Erklärung	Physikalisches Prinzip Subkategorie	Typ
Luftdruckdüsen		Düsen erzeugen einen Luftstrom, der die Bewegung und Position der Stückgüter beeinflusst	Normalkraft Druckunterschied	2D/1D 3D/2D
Auftrieb		Durch Auftriebskraft werden untenliegende Stückgüter nach oben bewegt, wobei obenliegende Objekte zur Seite gedrängt werden		3D/2D
Rutsche mit Unterdruck		Stückgüter auf einer Rutsche passieren eine Zone, in der durch Unterdruck eine Anpresskraft erzeugt wird. Durch die Geschwindigkeitsänderung lösen sich obenliegende Pakete.		3D/2D
Pneumatikgreifer		Unterdruck im Greifer bewirkt ein Anpressen des Stückguts an die Aufnahme		2D/1D 3D/2D 3D/1D

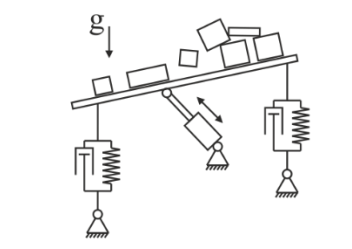
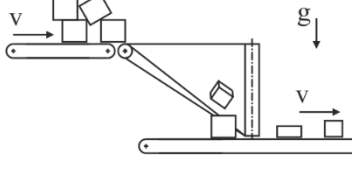
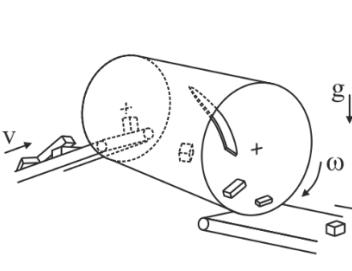
3.3.2 Vereinzelung durch Volumenkräfte

Der überwiegende Anteil an Lösungen in dieser Kategorie basiert auf der Ausnutzung der Gravitationskraft, wobei das Ziel meist eine 3D/2D-Vereinzelung, in Einzelfällen auch eine 3D/1D-Vereinzelung ist. Passive Ausprägungen sind beispielsweise die Wirkprinzipien „Rutsche mit variablen Winkeln“ und „Rutsche mit Grat“ aus Tabelle 10, bei denen durch speziell gestaltete Rutschenform die Separation und zum Teil auch die Ausrichtung der zu vereinzelnden Objekte bewirkt werden. Aktive Vertreter dieser Gruppe sind stufenförmig angeordnete Förderer (Wirkprinzip „Vertikal versetzte Bandförderer“), geneigte Förderer (Wirkprinzipien „Geneigter beschleunigter Bandförderer“ und „Gedrehter Bandförderer“), Schwingförderer oder langsam drehende

Trommeln. Eine Mischung aus aktiven und passiven Elementen findet man bei den Wirkprinzipien „Geneigte gestufte Bandförderer“ und „Rutsche mit Grat“, bei denen durch einen Grat übereinanderliegende Pakete voneinander gelöst werden.

Tabelle 10: Wirkprinzipien basierend auf Volumenkräften

Wirkprinzip	Prinzipbild	Erklärung	Physikalisches Prinzip Subkategorie	Typ
Rotierender Drehteller		Zugeführte Stückgüter werden von einem rotierenden Drehteller übernommen. Durch die Fliehkraft werden die Güter gegen eine Bande gedrückt und bei Erreichen des Abförderungsbandes abgegeben.	Volumenkraft <i>Fliehkraft</i>	2D/1D 3D/2D 3D/1D
Geneigter Bandförderer (beschleunigt)		Durch die Neigung des Bandförderers und die Beschleunigung des Gurtes lösen sich obenliegende Pakete aufgrund der Trägheits- und Gewichtskraft.	Volumenkraft <i>Trägheitskraft</i>	
Vertikal versetzte Bandförderer („Wasserfall“)		Vertikal versetzte Bandförderer führen zu einem Umschlag von übereinanderliegenden Stückgütern.		
Geneigte gestufte Bandförderer („Sägezahn“)		Prinzip ähnlich dem gestuften Bandförderer, durch die Neigung der Förderbänder ist es aber möglich, sequentielle Anordnungen aus mehreren Bändern ohne großen Höhenunterschied zu realisieren.	Volumenkraft <i>Schwerkraft</i>	3D/2D
Rutsche mit variablen Winkeln		Durch Rutschen mit verschiedenen Winkeln wird die Bewegung der Stückgüter dahingehend beeinflusst, dass sich obenliegende Stückgüter lösen können.		

Wirkprinzip	Prinzipbild	Erklärung	Physikalisches Prinzip Subkategorie	Typ
<i>Schwingförderer</i>		<p>Das Fördermittel wird zu Schwingungen ange-regt, wodurch ein „Ein-ebnen“ des Stückgut-pulks bewirkt wird. Die Schwerkraft bewegt obenliegende Stückgü-ter in sich bildende Lü-cken.</p>		
<i>Rutsche mit Grat</i>		<p>Über einen Zuförderer gelangen die Stückgüter auf eine Rutsche mit einem Grat. Der Grat führt unter Ausnutzung der Schwerkraft einer-seits zu einem Umschlagen der Stückgüter und andererseits zu einer Auftrennung auf zwei Abzugsförderer.</p>		
<i>Gedrehter Bandförderer</i>		<p>Ein in sich gedrehter Bandförderer führt zu einem Umschlag über-einanderliegender Stückgüter, die vom Abförderungsband übernommen werden.</p>	<p>Volumenkraft Schwerkraft</p>	<p>3D/2D 3D/1D</p>
<i>Trommel mit Mitnehmern</i>		<p>Über einen Zuförderer gelangen die Stückgüter in eine sich drehende Trommel mit Mitnehmern. Aufgrund der Drehung und der Schwerkraft lösen sich übereinanderliegende Stückgüter. Gleichzeit-ig bewirken die Mit-nehmer auch ein Aus-richten.</p>		

Neben der Gravitationskraft können auch Trägheitskräfte genutzt werden. Drehteller oder Trommeln zwingen die Objekte durch die Fliehkraft an eine Begrenzung oder die Trommelwand, mit Hilfe kleiner Zusatztechnik wie Bürsten können diese dann dort auch noch ausgerichtet werden (Wirkprinzip „Rotierender Drehteller“ aus Tabelle 10). Auch das Ausnutzen von Beschleunigungsrollen oder -bändern kann zur Vereinzelung genutzt werden: Werden übereinanderliegende Pakete mit einem Förderer beschleunigt und ist der Reibungskoeffizient zwischen den Objekten kleiner als zwischen dem untenliegenden Objekt und dem Förderer, entsteht durch die Massenträgheit eine Relativbewegung zwischen den Objekten und führt zu einer 3D/2D-Vereinzelung.

Dieser Effekt kann durch eine Neigung der Förderer noch verstärkt werden, da sich dann ein dem Neigungswinkel entsprechender Teil der Erdbeschleunigung der Beschleunigung des Förderers überlagert (Wirkprinzip „Geneigter beschleunigter Förderer“).

4 Methoden zur Modellbildung von Stückgütern im Pulk

Nach der Phase der Konzeptentwicklung kommt zur Beurteilung der Konzeptqualität sowie zur Optimierung dem Einsatz virtueller Methoden im Produktentwicklungsprozess eine immer größere Rolle zu. Der übliche Weg besteht dabei aus der Abstraktion der Realität zu einem Modell. Für den Modellbegriff gibt es unterschiedliche Beschreibungsformen, im Wesentlichen muss ein Modell aber in der Lage sein, an die Realität gestellte Fragen mit ausreichender Genauigkeit beantworten zu können (vgl. [VWB+09]). Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Identifikation einer geeigneten Beschreibungsmethode für das Bewegungsverhalten von Stückgütern im Pulk. Die Kernaufgabe besteht dabei darin, ein geeignetes Modell zu entwickeln, das die benötigten Komponenten - im Wesentlichen die Fördertechnik und die Stückgüter - ausreichend genau abbildet. Zusätzlich müssen bei der Auswahl Kriterien wie Rechengeschwindigkeit, erhaltbare Ergebnisgrößen etc. berücksichtigt werden. Tabelle 11 zeigt die Anforderungen an eine Beschreibungsmethode, um das Bewegungsverhalten bei Vereinzelungsvorgängen von Stückgütern im Pulk vorhersagen zu können.

Tabelle 11: Anforderungen an die Beschreibungsmethode

Kategorie	Anforderung
Stückgut	Große Anzahl ($>10^2$)
	Starrkörper
	Unterschiedliche Formen (Geometrie)
	Unterschiedliche Abmessungen
	Unterschiedliches Gewicht
	Verschiedene Oberflächenbeschaffenheiten (Wellpappe, Kunststoffolie u.a.)
Fördertechnik	Unterschiedliche Geschwindigkeitsfelder (Oberflächengeschwindigkeiten)
	Bewegte und ruhende Komponenten wie Rollen, Abweiser
Interaktion (Kontaktverhalten)	Stückgut-Stückgut
	Stückgut-Fördertechnik
Ergebnisse	Bewegungsgrößen (Wege, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen)
	Kräfte, Belastungen

Neben den Hauptanforderungen in Tabelle 11 können auch noch Faktoren wie eine nicht fixierte Schwerpunktlage (z.B. Paket mit beweglichem Inhalt), deformierbare Körper, inhomogene Masseigenschaften und Oberflächenbeschaffenheit in Betracht gezogen werden, für die vorliegende Arbeit zählen diese aber nicht zu den Mussanforderungen und werden deshalb nur peripher kommentiert.

Die Unterkapitel 4.1 bis 4.4 geben einen Überblick zu Beschreibungsansätzen und Simulationmethoden, die für den geforderten Zweck in Frage kommen. Im Unterkapitel 4.5 wird entsprechend ausgewählten Kriterien eine Methode bestimmt, die in Kapitel 4.6 detailliert ausgeführt wird und bei den weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen Anwendung findet. Kapitel 4.7 behandelt die Adaption der ausgewählten Methode auf den Anwendungszweck, wobei die Abbildung der Komponenten eines Vereinzlungssystems im Vordergrund steht.

4.1 Methoden der Mehrkörperdynamik/-systeme

Systeme aus gekoppelten Körpern können mit analytischen und numerischen Methoden der Mehrkörperdynamik beschrieben werden. Mehrkörpersysteme bestehen aus starren oder deformierbaren Einzelkörpern und Bindungen (Gelenke, Kontakte, Lagestellglieder, Stäbe, Seile) sowie Koppelungselementen (Federn, Dämpfer, Kraftstellglieder) (vgl. [WOE11]; Abbildung 32). Der Freiheitsgrad des Systems hängt von der Anzahl der Körper und der Anzahl der Bindungen ab, bei Systemen mit vielen freien Körpern im Raum mit je drei Freiheitsgraden in translatorischer und rotatorischer Richtung ist er dementsprechend hoch. Sofern die Bindungen überwiegend durch Kontakte repräsentiert werden und die resultierenden eingepprägten Kräfte auf die Einzelkörper das Bewegungsverhalten beeinflussen, kann die Berechnungsdauer mit Methoden der Mehrkörperdynamik exponentiell ansteigen (vgl. [FWJ13]).

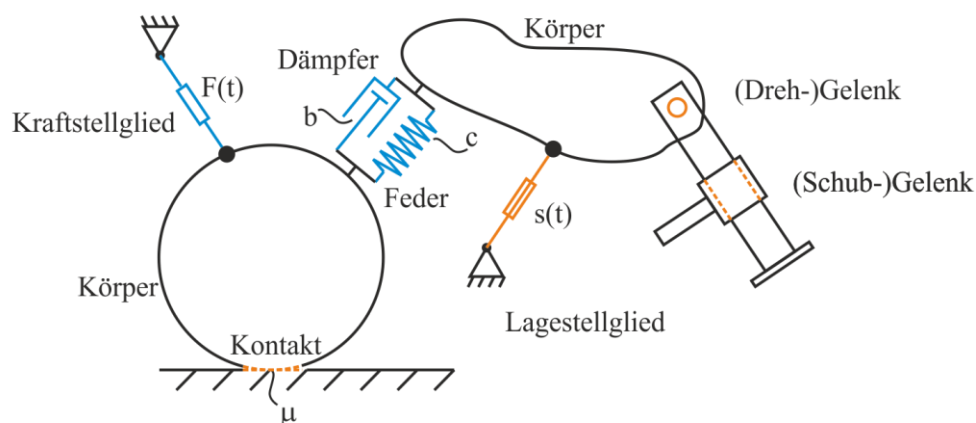


Abbildung 32: Mehrkörpersystem (in Anl. an [WOE11], S.2)

Durch Aufstellen der Bewegungsgleichungen und Zwangsbedingungen für ein System nach Abbildung 32 kann mit Hilfe der Mehrkörperdynamik das Systemverhalten von Fördertechnik beschrieben werden (auch von schwingfähigen Systemen), wie beispielsweise in [LFJ12], [JoW10] oder [CRR14] gezeigt wird. Übliche Methoden zur Aufstellung der Bewegungsgleichungen sind die Verfahren nach Newton-Euler, Lagrange oder Hamilton (vgl. [SHA05]; [WOE11]). Der Vorteil der letzteren beiden Verfahren liegt darin, dass das zu lösende Gleichungssystem nur mehr jene Anzahl an Bewegungsgleichungen besitzt, die dem Freiheitsgrad des Systems entspricht. Dies geht aber auf Kosten eines Aufwandes für die Rückrechnung auf Größen, die schon implizit in den Gleichungen enthalten sind.

Da schon bei wenigen Körpern eine analytische Berechnung der Bewegungsgleichungen schwer oder unmöglich wird, kommen numerische Berechnungen zum Einsatz, oft eingebettet in Simulatoren. Letztere variieren dabei hinsichtlich des Abstraktionsgrades, bei blockorientierten Werkzeugen muss der Anwender die Bewegungsgleichungen selbst ermitteln, bei objektorientierten übernimmt das Simulationswerkzeug selbst die Aufstellung derselben (vgl. [ERZ14]). Bei den Bewegungsgleichungen handelt es sich bei Mehrkörpersystemen im Allgemeinen um Differential-Algebro-Gleichungssysteme (engl.: DAE – *Differential-Algebraic Equations*) bestehend aus gewöhnlichen Differentialgleichungen

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{y}, \mathbf{z})$$

gekoppelt mit den ableitungsfreien Nebenbedingungen

$$\mathbf{0} = \mathbf{h}(t, \mathbf{y}, \mathbf{z})$$

wobei $\mathbf{z}(t)$ die algebraischen Variablen sind (vgl. [AsP98]). Die numerische Lösung dieses Gleichungssystems übernimmt in der Regel ein Solver, wobei eine große Bandbreite von expliziten oder impliziten Ein- und Mehrschrittverfahren zur Verfügung steht (vgl. [ScK09]).

Erzielbare Ergebnisse bei Anwendung der Methoden der Mehrkörperdynamik sind unter anderem Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Körper, auftretende Reaktionskräfte und Reaktionsmomente sowie Größen zur Beschreibung des Schwingungsverhaltens.

4.2 Partikelbasierte Beschreibungsmethoden

Neben den makroskopischen Beschreibungsformen (vgl. Unterkapitel 4.3) finden insbesondere auf dem Gebiet der Molekulardynamik und der Schüttgutmechanik partikelbasierte Beschreibungsmethoden Anwendung. Dabei werden die formalen Beschreibungen aus mikroskopischer Sicht aufgestellt, d.h. im Fokus stehen ein einzelnes Atom oder granulares Korn und seine Wech-

selwirkungen mit dem Umfeld (vgl. [ZZY+07]; [ZZY+08]; [SCH10]; [PöS05]). Je nach physikalischer Aufgabenstellung werden dabei einem Partikel, das auch eine räumliche Ausdehnung haben kann, verschiedene Eigenschaften aufgeprägt, die neben individuellen Eigenschaften (z.B. Masse) auch das Verhalten bei Interaktion mit anderen Partikeln oder Elementen bestimmen. Dazu gehören Stoßprozesse bei physischem Kontakt von Partikeln, aber auch Wechselwirkungseffekte, wenn die Partikel einen bestimmten Mindestabstand unterschreiten (z.B. Van-der-Waals-Kräfte, elektrische Potentiale). Im Gegensatz zur diskreten Molekulardynamik (DMD), wo diese Wechselwirkungseffekte mitunter große Bedeutung haben, sind letztere für das Anwendungsgebiet im Rahmen dieser Arbeit bedeutungslos, daher konzentrieren sich die weiteren Ausführungen auf das Gebiet der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) und die Kontaktmodellierung im Rahmen dieser (vgl. auch Unterkapitel 4.6). Abbildung 33 zeigt schematisch die Kräfte und Momente, die auf ein Partikel einwirken können.

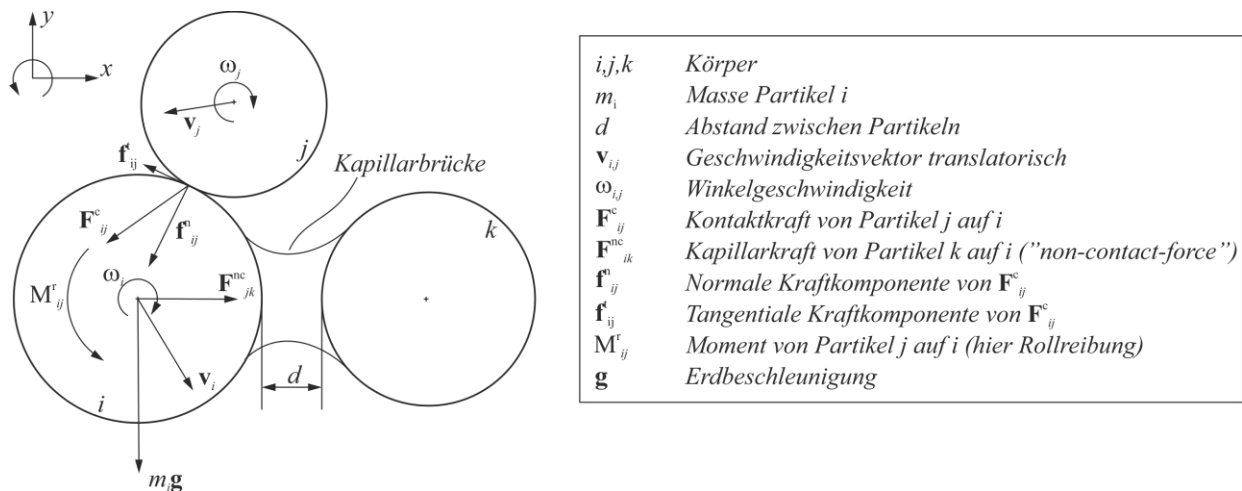


Abbildung 33: Mögliche Kräfte auf ein Partikel (in Anl. an [ZZY+07], S.3380)

Da es sich bei den Problemstellungen der partikelbasierten Methoden vorwiegend um große Anzahlen einzelner Körper handelt, sind Berechnungen in der Praxis nur rechnergestützt möglich (vgl. [ZZY+08]). Der Ansatz der partikelbasierten Methoden basiert auf der Lösung der Newton-Euler-Bewegungsgleichungen für jedes Partikel $i = 1, \dots, N$ mit den Masseneigenschaften m_i beziehungsweise Θ_i . Die Gleichungen sind dabei Funktionen der Positions- und Orientierungsvektoren \mathbf{r} und $\boldsymbol{\varphi}$ sowie der (Winkel-)Geschwindigkeitsvektoren \mathbf{v} und $\boldsymbol{\omega}$ aller auf dieses Partikel einwirkenden Partikel $j = 1, \dots, M$ (vgl. [PöS05]):

$$m_i \frac{\partial^2 \mathbf{r}_i}{\partial t^2} = \mathbf{F}_i(\mathbf{r}_j, \mathbf{v}_j, \boldsymbol{\varphi}_j, \boldsymbol{\omega}_j)$$

$$\Theta_i \frac{\partial^2 \boldsymbol{\varphi}_i}{\partial t^2} = \mathbf{M}_i(\mathbf{r}_j, \mathbf{v}_j, \boldsymbol{\varphi}_j, \boldsymbol{\omega}_j)$$

Allgemein läuft der Berechnungsprozess für jeden Zeitschritt dabei wie folgt ab (für eine detailliertere Ansicht vergleiche Unterkapitel 4.6 und [RAK12]):

- Kontaktdetektion: Partikel, deren Abstand unter einem bestimmten Wert liegt, werden ermittelt.
- Berechnung der Kontaktkräfte und -momente: Entsprechend den Eigenschaften der Partikel und dem gewählten Berechnungsmodell für die Kontaktkräfte/-momente werden die auf die Partikel wirkenden Reaktionskräfte und -momente bestimmt.
- Berechnung der (Winkel-)Beschleunigungen: Aus der Summe der auf ein Partikel wirkenden Kräfte und Momente sowie der Kenntnis der Masse bzw. des Massenträgheitsmoments können die (Winkel-)Beschleunigungen ermittelt werden.
- Bestimmung der neuen Lage: Durch zweimalige Integration und Berücksichtigung der Randbedingungen wird der neue Ort bestimmt.

Grundsätzlich sind beliebige Geometrien für Partikel mit finiter Ausdehnung möglich. Aufgrund der Einfachheit der Abstandsberechnung bei kugelförmiger Geometrie stellt diese Art eine häufige Modellierungsvariante dar (vgl. [ZZY+08]). Da aber nicht alle Problemstellungen mit dieser Geometrie zufriedenstellende Ergebnisse liefern, werden auch andere Formen in der Modellbildung zugrunde gelegt. Beispiele dafür sind sogenannte „Superquadrics“ nach Abbildung 34a, deren Oberflächen hinsichtlich ihrer mathematischen Formulierung vektoriell beschrieben werden können. Eine weitere Möglichkeit, um allgemeine Partikelgeometrie modellieren zu können, sind sogenannte „Multispheres“, die durch Verkettung von kugelförmigen Einzelpartikeln gebildet werden (vgl. [LTM15]). Auch Modelle mit scharfkantiger Partikelgeometrie finden sich in der Literatur, die Berechnungsdauer für die einzelnen Zeitschritte ist aber aufgrund der Fallunterscheidungen bei der Kontaktdetektion (Flächen, Kanten oder Ecken können miteinander in Kontakt stehen) ungleich aufwändiger (vgl. [PöS05], [SAR11]).



a) Superquadrics (vgl. [LTM15], S.431)



b) Multisphere (vgl. [KRW+08], S.157)

Abbildung 34: Modellierungsansätze für nicht kugelförmige Körper

Neben der Geometrie kommt bei den Berechnungsverfahren auch dem gewählten Kontaktmodell große Bedeutung zu. Detailliertere Ausführungen zu dieser komplexen wissenschaftlichen Thematik finden sich beispielsweise in [JOH03], [POP10] oder [WRI06], Auswirkungen auf die Rechenergebnisse im Kontext der DEM in [LTM15].

Erzielbare Ergebnisse bei der Anwendung partikelbasierter Methoden sind die Bewegungsgrößen der Partikel sowie die resultierenden Kräfte und Momente auf diese. Bei Multisphere-Ansätzen mit elastisch verbundenen Partikeln ist auch eine vereinfachte Berechnung der Spannungen, die in einem Partikel auftreten, möglich.

4.3 Kontinuumsbasierte Methoden

Kontinuumsmechanische Methoden finden in unterschiedlichen Disziplinen der Ingenieurwissenschaften Anwendung, Beispiele sind die Elastostatik, die Strömungsmechanik oder die Schüttgutmechanik (vgl. [BAT02], [LaO11], [SCH09]). Nach Altenbach wird der Begriff „Kontinuum“ wie folgt definiert: „*Ein Kontinuum ist eine Punktmenge, die den Raum oder Teile des Raumes zu jedem Zeitpunkt stetig ausfüllt. Den Punkten werden bestimmte Materialeigenschaften zugeordnet.*“ ([ALT12], S.8) Nach der Lehre der Physik hat alle Materie eine diskrete Struktur, das hypothetische Modell des Kontinuums basiert dagegen auf einer Mittelung der Materialeigenschaften. Dementsprechend muss bei der Anwendung kontinuumsmechanischer Methoden die Voraussetzung erfüllt sein, dass eine solche Mittelung auch zulässig ist.

Je nach Anwendungsfall werden zwei unterschiedliche Betrachtungsweisen gewählt:

- Bei der materiellen Betrachtungsweise (auch Lagrange Beschreibungsweise) folgt die Betrachtung einem speziellen Punkt während der zeitlichen Änderung
- Bei der Feldbeschreibungweise (auch Eulersche Beschreibungsweise) wird ein fester Ort gewählt und die Veränderungen an diesem Ort über der Zeit betrachtet

Die zentrale Aufgabe in der Kontinuumsmechanik bei mechanischen Aufgaben besteht darin, das Skalarfeld der Dichte in Abhängigkeit des Ortsvektors \mathbf{r} eines materiellen Punktes und der Zeit t

$$\rho = \rho(\mathbf{r}, t)$$

und das Vektorfeld der Bewegung

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{r}, t)$$

zu bestimmen. Dazu werden Bilanzgleichungen (z.B. Massenerhaltung, Impulsbilanz, Energiebilanz) aufgestellt, die zusammen mit den das Materialverhalten beschreibenden Konstitutivgleichungen ein lösbares Gleichungssystem ergeben. Ein Beispiel dafür sind die bekannten Navier-Stokes-Gleichungen zur Lösung strömungsmechanischer Aufgaben.

Aufgrund der zumeist analytisch nicht löslichen Gleichungen werden auch in der Kontinuumsmechanik numerische Methoden genutzt (vgl. [LaO11]). Dabei findet eine Diskretisierung des Kontinuums statt, bekannte Methoden dazu sind die Finite-Elemente-Methode (FEM), Finite-Volumen-Methode (FVM) und die Finite-Differenzen-Methode (FDM). Diese numerischen Methoden zeichnen sich durch unterschiedliche Genauigkeit und Flexibilität aus, wobei tendenziell flexibler einsetzbare Methoden eine geringere Genauigkeit der Ergebnisse liefern (vgl. [LaO11]).

Die Anwendung kontinuumsmechanischer Methoden auf die Problemstellungen der Materialflusslehre in der Logistik mag zwar nicht naheliegend sein, vereinzelte Anwendungsfälle lassen sich in der Literatur aber dennoch finden (vgl. [GHS+14], [KLU14]). Während bei [KLU14] der Fokus auf dem Materialfluss in der Supply Chain liegt, fokussieren die Ausführungen von [GHS+14] auf die Beschreibung eines konkreten Stroms von Stückgütern mit feldtheoretischen Methoden. Abbildung 35 zeigt einen Auszug dieser Forschungsarbeit, die Ergebnisse der Feldgleichungen zum Zeitpunkt $t = 3\text{s}$ (Abbildung 35c) werden den Ergebnissen einer partikelbasierten Methode (Abbildung 35b) und den Beobachtungen an einem Versuchsstand gegenübergestellt.

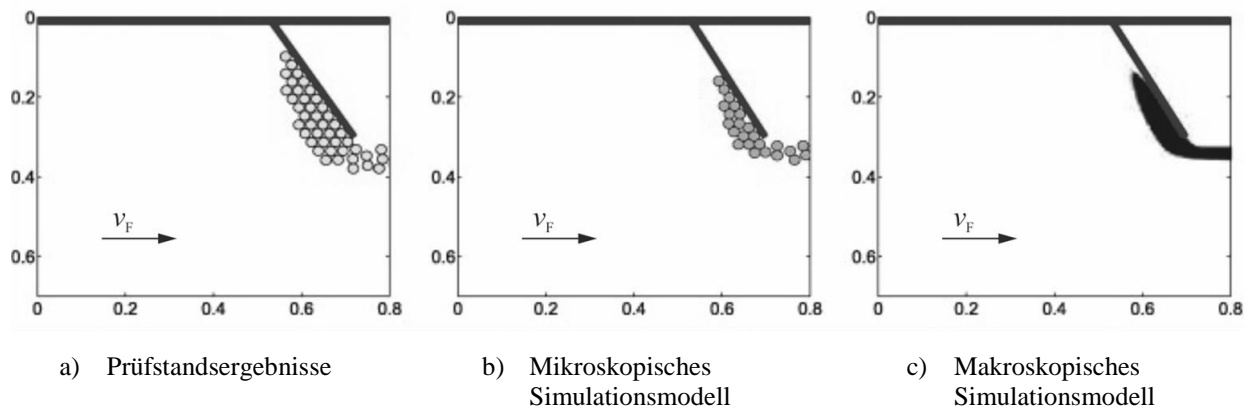


Abbildung 35: Abweisvorgang zylindrischer Objekte ($t=3\text{s}$) (vgl. [GHS+14], S.3308)

Erzielbare Ergebnisse mit den kontinuumsbasierten Methoden sind unter anderem die Massendichte und die Bewegungsvektoren an jedem Ort des betrachteten Kontinuums zu jedem Zeitschritt sowie die Variablen des Spannungstensors (Belastungsgrößen) (vgl. [ALT12]).

4.4 Zelluläre Automaten

Die Methode der zellulären Automaten wird in unterschiedlichen ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen genutzt, um komplexe Vorgänge auf Basis des zeitlich veränderlichen Zustands von Zellen, die in einem (mehrdimensionalen) Gitter angeordnet sind, zu beschreiben. Anwendung findet diese Methode u.a. in der Beschreibung von Gasströmungen (vgl. [HÄN04]), des Verhaltens

von granularen Zusammensetzungen (vgl. [BaB90], [LCG+06]) oder der Verkehrsdynamik (vgl. [TrK10]).

Die Methode der zellulären Automaten basiert auf dem einfachen Grundkonzept, dass jede Zelle in einem definierten Zellgitter einen booleschen Zustand annimmt, den sie in Abhängigkeit der Zustände bestimmter Nachbarzellen beibehält oder ändert. Die in die Entscheidung, ob sich der Zustand ändert oder nicht, einbezogene Nachbarschaft kann unterschiedlich aussehen, bekannte Beispiele sind die Architekturen von Von Neumann oder Moore (vgl. [ChD98] und Abbildung 36).

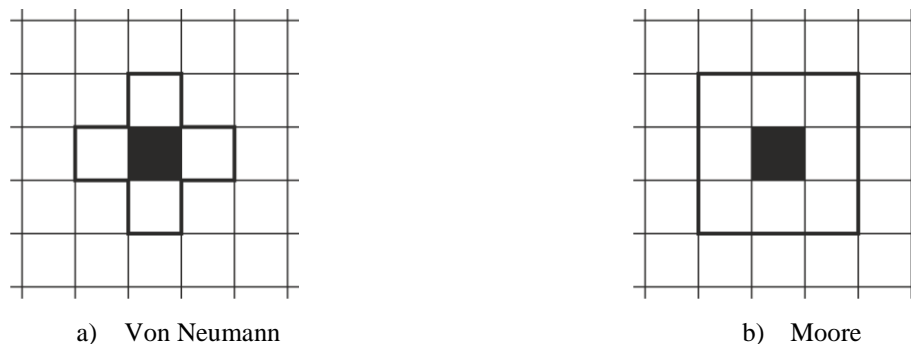


Abbildung 36: Architekturen bei zellulären Automaten (vgl. [ChD98], S. 15)

Das Zellgitter einer Simulation mit zellulären Automaten ist begrenzt, wobei bestimmte Randbedingungen den Zustand der Zellen im Randbereich mitbestimmen.

Um physikalische Aufgabenstellungen mit der Methode der zellulären Automaten lösen zu können, wurden unterschiedliche Modelle entwickelt, beispielhaft werden hier das FHP-Modell (Fluide) und das HPP-Modell (punktförmige Partikel) sowie das Sandpile-Modell zur Beschreibung granularer Schüttgüter genannt (vgl. [ChP98]).

4.5 Vergleich und Auswahl geeigneter Beschreibungsmethoden

In den Unterkapiteln 4.1 bis 4.4 wurden für die Beschreibung von Vereinzelungsvorgängen im Zuge des Paketsortierprozesses in Frage kommende Beschreibungsmethoden grob umrissen.⁶ Für die weiteren Untersuchungen wird eine dieser Methoden weiterverfolgt, wobei die Auswahl in einem zweistufigen Prozess erfolgt: In einem ersten Schritt erfolgt eine Beurteilung hinsichtlich der in Tabelle 11 auf Seite 48 formulierten Anforderungen an eine Methode zur Beschreibung des

⁶ Anm.: Die Auswahl der beschriebenen Methoden ist nicht als umfassend zu sehen. Neben den beschriebenen Methodengruppen gibt es noch andere Ansätze zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens von Körpern, die aber für den konkreten Anwendungszweck nur mit einer sehr stark abstrahierenden Herangehensweise anwendbar wären (z.B. Monte-Carlo-Algorithmus, Lattice-Boltzmann-Methode) und deshalb nicht verfolgt wurden.

Bewegungsverhaltens von Stückgütern im Pulk. Dabei werden die Methoden hinsichtlich der Modellierung

- der Stückgüter
- der Fördertechnik
- des Interaktionsverhaltens (Kontakte)
- und der erhaltbaren Ergebnisse

verglichen. Im zweiten Schritt werden die verbleibenden Beschreibungsmethoden näher betrachtet, wobei ein Vergleich von Rechenzeiten und die Kopplungsmöglichkeiten mit anderen Simulationen als Auswahlkriterien herangezogen werden.

Tabelle 12 auf Seite 60 gibt einen Überblick aller beschriebenen Methoden.

4.5.1 Abbildung der Stückgüter

Die Abbildung der Stückgüter im Rahmen der Mehrkörperdynamik als getrennte Einzelkörper (Volumenkörper) ist für den vorliegenden Fall sehr gut geeignet. Sowohl die Geometrie als auch die Dichte sind weitestgehend frei definierbar, in den meisten Mehrkörpersimulationsprogrammen ist jedoch eine Einschränkung hinsichtlich eines zeitlich veränderbaren Schwerpunkts und bei inhomogener Massenverteilung zu erwarten.

Bei den partikelbasierten Methoden muss hinsichtlich der Modellierung der Stückgüter zwischen unterschiedlichen Varianten unterschieden werden, wobei zwei gegenläufige Trends bestimmend sind: Die Qualität der Abbildung der Form des Stückgutes ist bei konvexen Hüllen aus Facetten besser als bei einer Darstellung in Form von Superquadrics (vgl. Unterkapitel 4.2), die ungenaueste Approximation ist bei einer Abbildung der realen Geometrie durch verbundene Kugeln (Multisphere-Ansatz) gegeben. Gleichzeitig ist der Berechnungsaufwand aufgrund der Fallunterscheidungen bei der Kontaktdetektion bei den konvexen Hüllen größer als bei der Berechnung des Bewegungsverhaltens von Superquadrics oder Multisphere-Approximationen (vgl. [LTM15]). Hinsichtlich des zeitlich veränderbaren Schwerpunkts und der inhomogenen Massenverteilung können die partikelbasierten Methoden mit der Mehrkörperdynamik verglichen werden, wobei aber der Multisphere-Ansatz die Zuweisung einer spezifischen Dichte zu jeder Kugel erlaubt und damit die Abbildung einer inhomogenen Massenverteilung möglich ist.

Die Beschreibung eines Stückgutpulks durch kontinuumsbasierte Methoden stellt einen deutlich höheren Abstraktionsgrad dar, als das bei der Mehrkörperdynamik und den partikelbasierten Methoden der Fall ist. Insbesondere kann eine Zulässigkeit dieser Methoden nur dann angenommen werden, wenn die Abmessungen der betrachteten Fördertechnik deutlich größer als

die der Stückgüter sind (vgl. Unterkapitel 4.3). Unterschiedlich schwere Stückgüter sowie die verschiedenen Stückgutformen und -abmessungen sind nicht mehr unmittelbar abbildbar, d.h. für den vorliegenden Anwendungszweck würde ein Paketpulk durch ein stetig verteiltes Dichte- und Bewegungsfeld abgebildet werden.

Die größte Abstraktionsstufe in Bezug auf die Modellierung stellt die Beschreibung mittels zellularer Methoden dar. Die Abbildung der Stückgüter kann allein durch Zustände von Zellen in einem zwei- oder dreidimensionalen Raum erfolgen, wobei zur Abbildung der Geometrie bei unterschiedlichen Stückgutabmessungen mehrere Zellen einem Körper zugewiesen werden müssen. Auch die Abbildung der Masseneigenschaften (insbesondere des Massenträgheitsmoments) erscheint als sehr komplex, da bei Abbildung eines Körpers über mehrere Zellen unter Umständen nicht nur die unmittelbare Nachbarschaft einfließt.

4.5.2 Abbildung der Fördertechnik

Die Beschreibung der Fördertechnik in der Mehrkörperdynamik kann gleich wie bei den Stückgütern durch Volumenkörper erfolgen, denen ein definiertes Bewegungsverhalten zugewiesen wird. Bei einfachen Komponenten wie beispielsweise bei Rollen von Rollenförderern stellt diese Vorgehensweise kein Problem dar, ungünstig gestaltet sich aber die Abbildung „endloser“ Fördertechnikkomponenten wie z.B. der Gurt eines Bandförderers, da dann die Abmessungen der zur Modellierung heranzuziehenden bewegten Volumenkörper sehr groß werden (vgl. auch [FWJ13], [FWL+15]).

Die partikelbasierten Beschreibungsmethoden weisen dahingehend eine optimierte Modellierungsart auf: Fördertechnik wird dabei durch Flächen abgebildet, die entweder bewegt sind oder denen eine Oberflächengeschwindigkeit überlagert ist. Dadurch kann „endlose“ Fördertechnik einfach modelliert werden. Aufgrund der Tatsache, dass aber Flächen keine Masseneigenschaften besitzen, ist eine Rückwirkung der Stückgüter auf die Fördertechnik nur eingeschränkt durch Kopplung mit anderen Simulationsmethoden abbildbar (vgl. [CRR14]). Ein weiterer positiver Aspekt ist die Möglichkeit, dass einzelne Komponenten während eines Simulationslaufs aus dem Modell entfernt oder in dieses eingefügt werden können.

Kontinuumsbasierte Methoden nutzen Randbedingungen in Form statischer Geschwindigkeitsfelder, um Fördertechnik wie Bandförderer oder auch Abweiser zu modellieren. Je nach zu modellierender Fördertechnik kann sich diese Vorgehensweise als komplex erweisen, insbesondere im Hinblick auf die numerische Berechnung ist hier hinsichtlich Unstetigkeiten besondere Aufmerksamkeit geboten (vgl. [GHS+14]).

Im Rahmen der zellulären Automaten sind wie bei der Modellbildung der Stückgüter wieder Zustände bestimmten Zellen zuzuweisen, die die Eigenschaften der Fördertechnik nachbilden. Analog zu Abschnitt 4.5.1 ist die Abstraktionsstufe in Bezug auf die Modellierung bei diesen Methoden als sehr hoch zu bewerten.

4.5.3 Beschreibung des Interaktionsverhaltens (Kontaktverhalten)

In der Mehrkörperdynamik und bei den partikelbasierten Methoden wird üblicherweise ein Kontakt durch Detektion einer Überlappung zweier Körper (bzw. Körper und Fläche) ermittelt. Entsprechend einem zuvor festgelegten Kontaktmodell kann dann eine resultierende Kontaktkraft in normaler und/oder tangentialer Richtung ermittelt werden. Auch die Berücksichtigung von Reibung ist bei dieser Vorgangsweise möglich. Zur Abbildung vieler Kontakte eignen sich die partikelbasierten Methoden besser, was auch deren häufiger Einsatz in Schüttgutsimulationen zeigt (vgl. [ZZY+08]).

Die Modellbildung von Kontakten mit kontinuumsbasierten Methoden kann durch Überlagerung eines dynamischen Geschwindigkeitsfeldes erfolgen. Durch die sogenannte Heaviside-Funktion sorgt dieses Geschwindigkeitsfeld bei Erreichen der maximalen Packungsdichte dafür, dass die „Stückgüter“ eine Kraft in Richtung einer geringeren Dichte erfahren (vgl. [GHS+14]). Problematisch sind dabei die Definition einer maximalen Packungsdichte, die bei unterschiedlichen Stückgutformen schwer definierbar ist, sowie die Reibungsthematik, deren Beschreibung nur schwer möglich erscheint.

Die Kontaktformulierung bei physikalischen Systemen mit Hilfe zellulärer Methoden ist in der Literatur nur vereinzelt vertreten. In [ChD98] und [DZX+13] wird eine Möglichkeit beschrieben, bei der durch geeignete Formulierung von Zustandsänderungsregeln eine Geschwindigkeitsänderung benachbarter Zellen erfolgt, wenn diese aufgrund ihres Zustandes Teil eines physikalischen Objektes sind und sich aufeinander zubewegen. Dabei wird aber das Kontaktverhalten nur durch Reduktion aller Eigenschaften wie Steifigkeit, Dämpfung oder Reibung zu einem Parameter abgebildet.

4.5.4 Ergebnisgrößen

Die in Betracht gezogenen Beschreibungsmethoden weisen auch hinsichtlich der erhaltbaren Ergebnisse signifikante Unterschiede auf, insbesondere im Kontext der Simulationsumgebungen. Während bei der Mehrkörperdynamik und den partikelbasierten Methoden die Bewegungsgrößen

und Kräfte bzw. Momente für jeden Körper ausgegeben werden können, sind bei den kontinuumsbasierten Methoden den Einzelkörpern zuordenbare Bewegungsgrößen und Kräfte nicht greifbar. Bei den zellulären Automaten erscheint die Zuordnung der Bewegungsgrößen zu den einzelnen Körpern prinzipiell denkbar, indem auf die Zustände der einzelnen Zellen zugegriffen wird. Es muss aber festgehalten werden, dass mehrere Zellen einen Körper definieren und damit die Bewegungsgrößen für den ganzen Körper nur über eine Rückrechnung berechenbar wären.

4.5.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Beschreibungsmethoden der Mehrkörperdynamik und die partikelbasierten Methoden dem vorliegenden Anwendungszweck besser entsprechen als die kontinuumsbasierten und zellulären Methoden. Dies insbesondere im Hinblick darauf, dass bei ersteren der Fokus auf den einzelnen Stückgütern liegt, womit unterschiedliche Abmessungen, Gewichte und Oberflächeneigenschaften der Stückgüter einfacher abgebildet werden können. Auch bei der Modellierung der Fördertechnik ist der Grad der Abstraktion bei diesen Methoden geringer (man vergleiche beispielsweise den hohen Aufwand zur Modellierung und Parametrierung eines einfachen Abweisers nach [GHS+14]). Bei dem in der KEP-Branche stark heterogenen Stückgutspektrum ist zudem zu erwarten, dass die Annahme eines Kontinuums nicht oder nur mit starken Einschränkungen zulässig ist. Auch bei den zellulären Automaten schmälert diese Heterogenität das Anwendungspotential, da der Aufwand für die Erstellung der Zustandsübergangsregeln stark ansteigen würde.

In Tabelle 12 sind die unterschiedlichen Beschreibungsmethoden nochmals zusammengefasst und hinsichtlich ihrer Eignung zur Abbildung von Stückgutfördervorgängen qualitativ bewertet. Dazu sei festgehalten, dass es sich dabei um eine qualitative (subjektive) Einschätzung des Verfassers dieser Arbeit handelt und eine schlechtere Bewertung nicht darauf schließen lässt, dass die entsprechende Methode ungeeignet ist.

Zusätzlich zu den einzelnen Modellbildungsaspekten und deren Bewertung für den vorliegenden Anwendungszweck ist in Tabelle 12 auch die Art der mathematischen Formulierung der jeweiligen Methodengruppe zugeordnet.

Aufgrund des geringeren Abstraktionsgrades bei der Modellierung der Stückgüter und der Fördertechnik mit den partikelbasierten Methoden und den Methoden der Mehrkörperdynamik (in Tabelle 12 unterstrichen) werden im nächsten Schritt nur mehr diese beiden weiterverfolgt und anhand eines Testszenarios näher verglichen.

Tabelle 12: Vergleich und Eignung der Beschreibungsmethoden

Beschreibungsmethode (Simulationsmethode)	Modellierung Stückgutpulk	Modellierung Fördertechnik	Interaktionsverhalten (Kontaktverhalten)	Erhaltbare Ergebnisse	Mathematische Formulierung
<u>Methoden der Mehrkörperdynamik</u>	Volumenkörper ++	Volumenkörper +	Mathematisches Kontaktmodell ++	Bewegungsgrößen, Kräfte ++	Differential- Algebro- Gleichungen
	Volumenkörper; starr oder flexibel verbundene Grundkörper ++	Flächen mit überlagerter Oberflächen- geschwindigkeit ++	Mathematisches Kontaktmodell ++	Bewegungsgrößen, Kräfte ++	Gewöhnliche Differential- gleichungen
<u>Kontinuumsbasierte Methoden</u>	Kontinuum -	Randbedingungen +	Begrenzung der maximalen Dichte -	Dichte- und Geschwindigkeitsfeld +	Feldgleichungen
	Boolescher Zustand --	Boolescher Zustand +	Zustandsübergangsregel --	Zustandsgitter/Zustände -	Zustandsgleichung
<u>Zelluläre Automaten</u>					

In [FWJ13] wurde durch die Simulation einer fiktiven Containerentladung mit unterschiedlichen Paketzahlen verglichen, wie sich eine ansteigende Zahl von Stückgütern in der Simulation auf die Berechnungsdauer auswirkt. Abbildung 37 zeigt einen Ausschnitt des Testszenarios und die zugehörigen Ergebnisse, es ist klar erkennbar, dass sich bei der Diskreten-Elemente-Methode (DEM) ein annähernd linearer Anstieg der Berechnungszeit ergibt während sich bei der Mehrkörpersimulation (MKS) ein exponentiell ansteigender Verlauf einstellt.

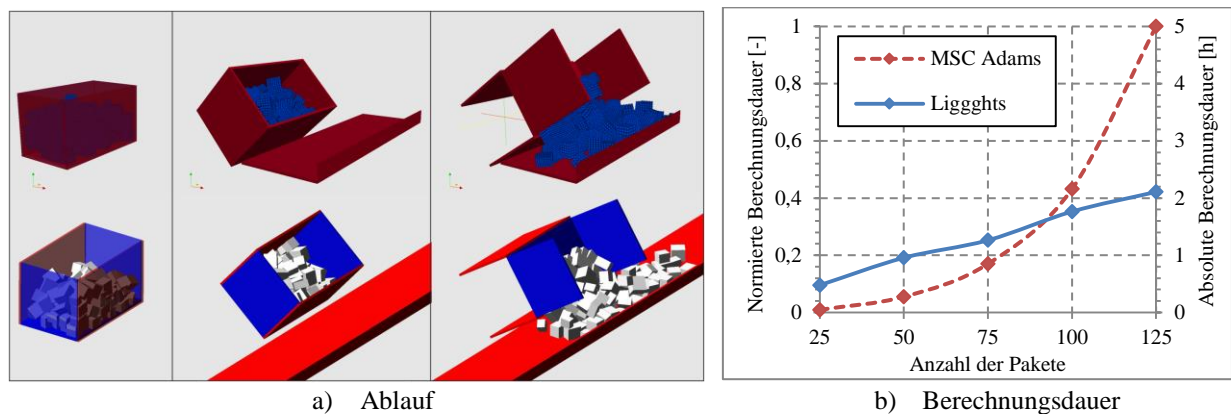


Abbildung 37: Testszenario Containerentladung (vgl. [FWJ13])

Tabelle 13 vergleicht abschließend die beiden Methoden der engeren Auswahl nach unterschiedlichen Kriterien. Es ist erkennbar, dass die beiden Methoden in vielen Bereichen als gleichwertig angesehen werden können, aufgrund der besseren Eignung für große Stückgutzahlen (Rechenzeit) und die Spezialisierung auf die Kontaktbeschreibung wird aber nur mehr die DEM weiterverfolgt.

Tabelle 13: Vergleich der Simulationsmethoden MKS und DEM (vgl. [FWJ13])

	MKS	DEM
Modellelemente	Einzelkörper, Kopplungselemente, Bindungen	Einzelkörper, Kontaktdefinition, Bindungen
Anzahl der Körper	$\leq 10^2$	$\leq 10^9$
Anzahl der Freiheitsgrade des Systems	niedrig ($< 10^3$)	hoch ($< 6 \cdot 10^9$)
Körperbewegung	groß (mehrere Meter)	groß (mehrere Meter)
Übertragung von Kräften	über Kopplungselemente, Kontakte	über Kontakt- und Bindungskräfte, elektrische und chemische Potenziale
Zielsystem	Gekoppelte mechanische Systeme	Nicht gekoppelte Vielkörpersysteme
Anwendungszweck, Zielgrößen	Bewegungen, Kraftgrößen	Bewegungen, Kraftgrößen, Spannungen, Verformungen
Anwendungsbeispiel	Schwingungsanalyse eines Fahrwerks	Bunkeraustrag in der Schüttgutmechanik

4.6 Diskrete-Elemente-Methode (DEM)

Da sich nach Unterkapitel 4.5 die DEM-Methode als gut geeignet für den Anwendungszweck der vorliegenden Arbeit herausgestellt hat, werden an dieser Stelle die grundlegenden Prinzipien der DEM detaillierter erläutert, insbesondere wird auf die Modellierungsspezifika (Körper/Flächen, Kontaktformulierung), das zugrundeliegende mathematische Modell und numerische Aspekte Bezug genommen.

Die DEM-Methode wurde von [CuS79] im Jahr 1979 erstmals vorgestellt und wird nach zahlreichen Weiterentwicklungen bis heute oft eingesetzt (vgl. [ZZY+08]). Die grundlegende Idee besteht darin, dass sich in einem betrachteten zwei- oder dreidimensionalen Berechnungsraum massebehaftete Partikel mit finiter Ausdehnung befinden, die zu Beginn der Berechnung initiale Positionen und gerichtete Geschwindigkeiten besitzen. Das Bewegungsverhalten der Partikel ändert sich bei Interaktion, wobei diese für den vorliegenden Fall auf mechanische Kontakte beschränkt ist (elektrostatische Kräfte und ähnliche werden nicht berücksichtigt). Dazu müssen zu jedem diskreten Zeitschritt jene Partikelpaare detektiert werden, die miteinander in Kontakt stehen. Für diese Paarungen werden dann die resultierenden Kontaktkräfte entsprechend einem ausgewählten Modell bestimmt und in weiterer Folge kann über die Beschleunigungen durch zweimalige Integration auf die neuen Positionen der Partikel geschlossen werden.

Abbildung 38 zeigt schematisch den Ablauf einer DEM-Berechnung. Die folgenden Abschnitte 4.6.1 bis 4.6.4 gehen auf die einzelnen Phasen dieses Ablaufs näher ein, gefolgt von einer Ausführung zur Erweiterung der DEM auf nicht kugelförmige Partikel.

4.6.1 Kontaktdetektion

Im ersten Schritt (nach einer eventuellen Initialisierung) erfolgt die Detektion der Kontakte. In den heute verwendeten Softwaretools werden dazu Listen geführt, die jene Partikel beinhalten, die innerhalb eines (vorgegebenen) Minimalabstandes zweier Partikel liegen. Bei kugelförmigen Partikeln ist ein Kontakt vorhanden, wenn gilt

$$d \leq r_i + r_j$$

wobei d der Abstand zwischen den Kugeln ist und mit r die Radien der Kugeln i und j bezeichnet werden (vgl. [PöS05]).

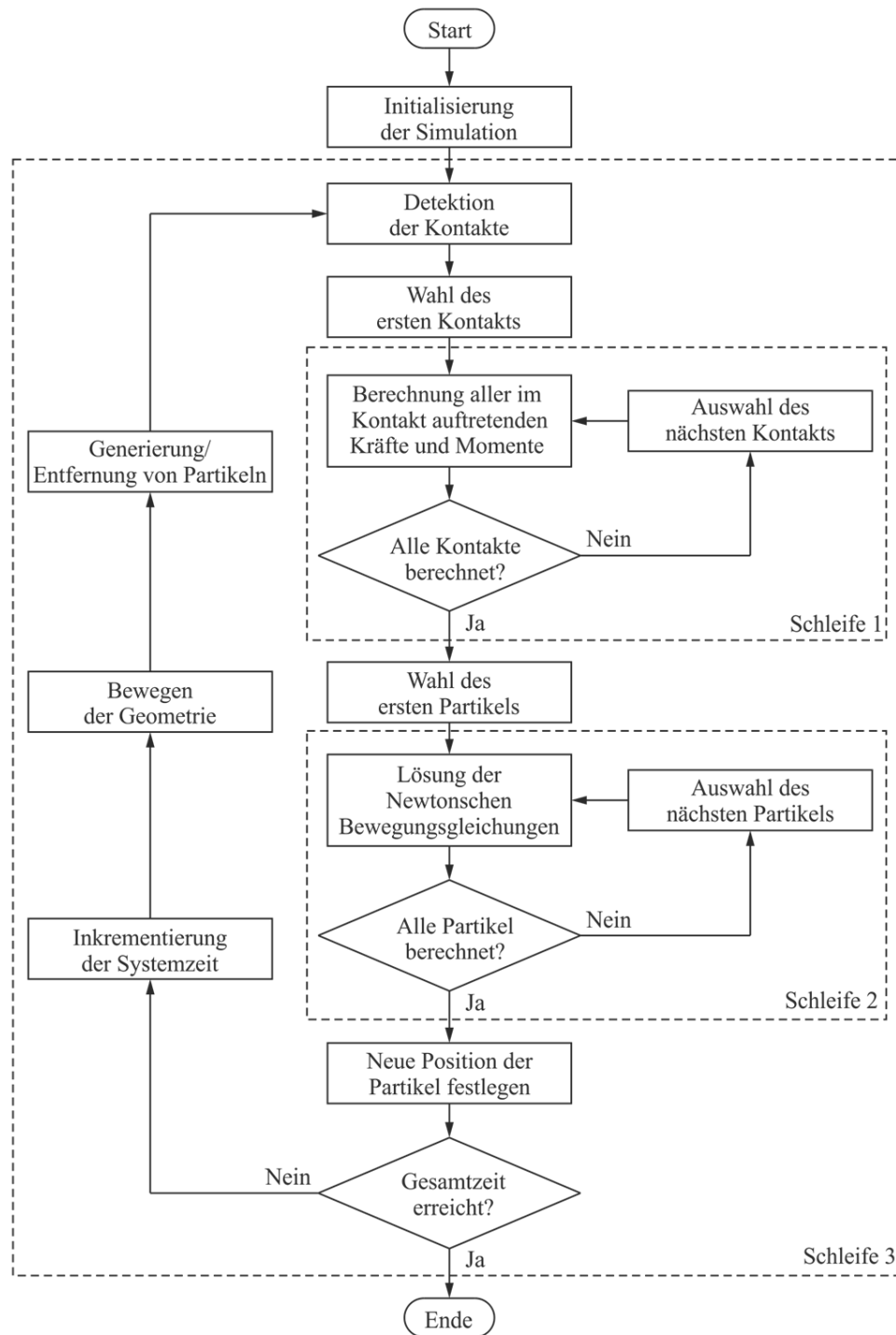


Abbildung 38: Berechnungsschema DEM-Methode ([RAK12], S.99)

Um die Kontaktpartner zu identifizieren werden zwei Methoden verwendet, z.T. auch in kombinierter Form (vergleiche Abbildung 39 auf Seite 64):

- Methode 1: Der betrachtete zwei- oder dreidimensionale Raum wird in Subzellen zerlegt und jede Zelle kontrolliert, ob sich das Zentrum eines Partikels P_i darin befindet (mittlere Zelle in Abbildung 39a). Anschließend wird in den angrenzenden Zellen nach potentiellen Kontaktpartnern gesucht.

partnern gesucht, wobei wie in Abbildung 39a nicht alle angrenzenden Zellen untersucht werden müssen (nur die einfach schraffierten Zellen) (vgl. [PöS05]). Bei Verwendung von sogenannten „linked lists“ zur Erstellung der Kontaktlisten kann dabei der Berechnungsaufwand für die Kontaktdetektion so optimiert werden, dass sich die Berechnungsdauer proportional zur Anzahl der Partikel verhält, was sich auch in Abbildung 37 auf Seite 61 zum Testszenario aus Unterkapitel 4.5 zeigt (vgl. [MUN04]).

- Methode 2: Jedem Partikel wird ein „Beobachtungsradius“ zugewiesen, innerhalb liegende potentielle Kontaktpartner werden in „Nachbarlisten“ geführt (Abbildung 39b). Der Berechnungsaufwand bei dieser Methode ist von der Größe $O(n^2)$, was bei großen Partikelzahlen n zu einem entsprechend höheren Berechnungsaufwand führt als Methode 1 (vgl. [MME+07])

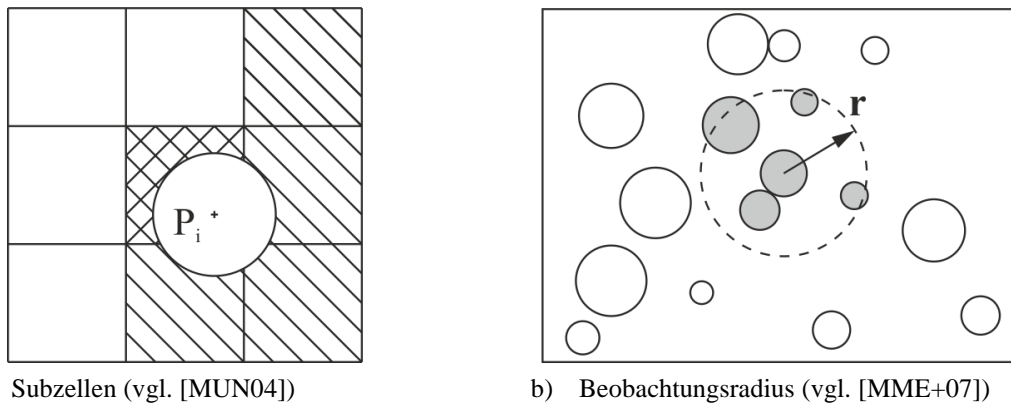


Abbildung 39: Zerlegung des Simulationsraums

4.6.2 Berechnung der Kontaktkräfte und -momente

Nach Abschluss der Kontaktdetektion werden für alle Partikel i die Kräfte \mathbf{F}_{ij}^c und Momente \mathbf{M}_{ij}^c , die aus den Berührungen angrenzender Partikel j auf bzw. um den Schwerpunkt entstehen sowie nicht durch Kontakte verursachte Kräfte \mathbf{F}_{ik}^{nc} von Partikeln k (z.B. Wechselwirkungskräfte) und die Gewichtskraft \mathbf{F}_i^g , aufsummiert:

$$\mathbf{F}_i = \sum_j \mathbf{F}_{ij}^c + \sum_k \mathbf{F}_{ik}^{nc} + \mathbf{F}_i^g$$

$$\mathbf{M}_i = \sum_j \mathbf{M}_{ij}^c$$

Die so resultierenden Kräfte \mathbf{F}_i und Momente \mathbf{M}_i führen dann auf die translatorischen und rotatorischen Beschleunigungen der Partikel:

$$m_i \frac{\partial^2 \mathbf{r}_i}{\partial t^2} = \mathbf{F}_i(\mathbf{r}_j, \mathbf{v}_j, \boldsymbol{\varphi}_j, \boldsymbol{\omega}_j)$$

$$\Theta_i \frac{\partial^2 \boldsymbol{\varphi}_i}{\partial t^2} = \mathbf{M}_i(\mathbf{r}_j, \mathbf{v}_j, \boldsymbol{\varphi}_j, \boldsymbol{\omega}_j)$$

wobei m_i die Masse und Θ_i der Trägheitstensor des Partikels i sind.

Der Berechnung der paarweisen Kräfte \mathbf{F}_{ij}^c und Momente \mathbf{M}_{ij}^c liegt ein Kontaktmodell zugrunde, wobei in der Literatur (insbesondere im Kontext der Schüttgutmechanik) zahlreiche Varianten entwickelt wurden (eine gute Übersicht dazu findet sich in [ZZY+07], [ReM04] und [StH05], detaillierte Ausführungen zur Kontaktmechanik z.B. in [JOH03], [POP10] oder [WRI06]). Generell wird in der DEM zwischen dem sogenannten Hard-Sphere- und dem Soft-Sphere-Ansatz unterschieden, beide gehen grundsätzlich von einem starren Partikel aus⁷. Der Hard-Sphere-Ansatz ist nur anwendbar, wenn die Annahme zulässig ist, dass zu jedem Zeitpunkt maximal zwei Partikel miteinander in Kontakt stehen beziehungsweise die Dauer zwischen zwei aufeinander folgenden Kollisionen im Mittel deutlich größer ist, als die Dauer der Kollision selbst (vgl. [PöS05]). Im vorliegenden Fall kann von diesen Annahmen nicht ausgegangen werden (in einem dichten Stückgutpulk ist zu erwarten, dass ein Objekt mehr als einen Kontaktpartner hat), daher wird auf den Soft-Sphere-Ansatz zurückgegriffen (vgl. auch Unterkapitel 4.7). Bei diesem Ansatz wird die Deformation durch ein Kontaktkraftmodell ersetzt, die Partikel bleiben aber geometrisch starr (vgl. [StH05]). Die resultierenden Kontaktkräfte entstehen demnach durch Überlappung der Partikel, wobei die Überlappung analog zur Hertzschen Kontaktkraftberechnung nur klein gegenüber der Ausdehnung der Partikel sein darf (vgl. [POP10]). Eine detaillierte Beschreibung verschiedener Kontaktmodelle an dieser Stelle würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit überschreiten, das für die Simulationen eingesetzte Kontaktmodell ist in Kapitel 4.7 näher ausgeführt.

4.6.3 Berechnung der Bewegungsgleichungen

Nachdem alle Kontaktkräfte berechnet sind, werden die Bewegungsgleichungen für alle Partikel gelöst, wobei verschiedene numerische Integrationsverfahren zum Einsatz kommen können (einen guten Überblick zu numerischen Verfahren gibt [HLW06]). Dabei ist insbesondere hervorzuheben, dass bei der DEM die Kontaktdauer im Allgemeinen meist sehr kurz ist, gleichzeitig aber große Gradienten der Kraftverläufe entstehen. Dadurch sind einerseits kleine Schrittweiten notwendig und andererseits werden hohe Anforderungen an die Stabilität des Lösungsverfahrens gestellt (vgl. [PöS05]).

⁷ Anm.: Die Simulation von deformierbaren Partikeln wird als Finite-Discrete-Element-Method bezeichnet, hierbei ist jeder Partikel analog zur Finiten-Elemente-Methode vernetzt (vgl. [MUN04]).

Ein häufig verwendeter Integrator, der auch bei den Simulationen im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt wurde, ist das Velocity-Verlet-Verfahren (basierend auf dem Störmer-Verlet-Verfahren nach Abbildung 40) (vgl. [HLW06]). Bei der Integration mit dem Velocity-Verlet-Verfahren wird aus der Beschleunigung die Geschwindigkeit über zwei Stufen ermittelt. Zuerst wird eine Geschwindigkeit bei der Hälfte des Zeitschritts Δh bestimmt:

$$\dot{x}_{t+\Delta h/2} = \dot{x}_t + \frac{1}{2} \ddot{x}_t \Delta h$$

Damit kann die Position zum Zeitpunkt $t + \Delta h$ über

$$x_{t+\Delta h} = x_t + \dot{x}_{t+\Delta h/2} \Delta h$$

approximiert werden. Für diesen Zeitschritt wird die Beschleunigung aktualisiert, wodurch dann über

$$\dot{x}_{t+\Delta h} = \dot{x}_{t+\Delta h/2} + \frac{1}{2} \ddot{x}_{t+\Delta h} \Delta h$$

die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt $t + \Delta h$ bestimmt ist.

Selbstverständlich muss diese Berechnung für alle Koordinaten durchgeführt werden, sowohl in translatorischer als auch in rotatorischer Richtung.

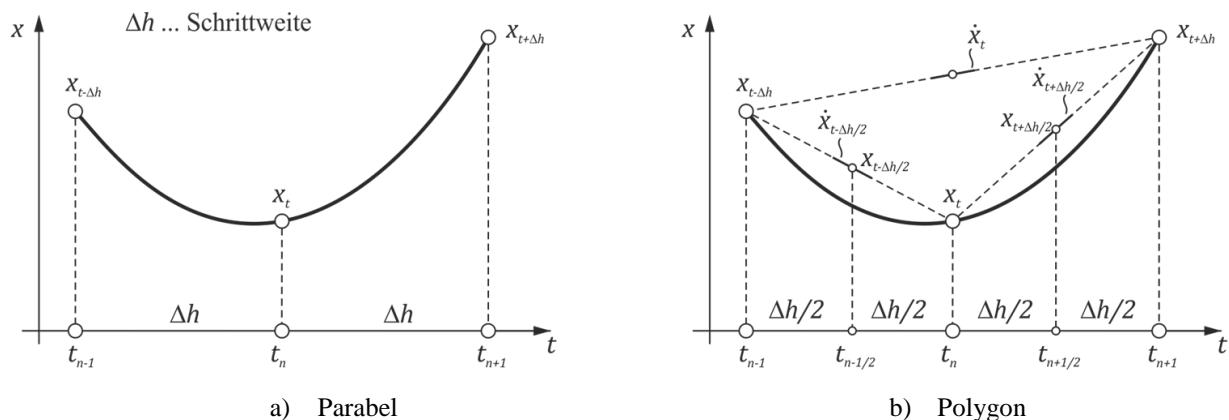


Abbildung 40: Geometrische Interpretation der Störmer-Verlet Methode (vgl. [HLW06], S.8)

Der Velocity-Verlet-Algorithmus wird im Bereich der Molekulardynamik oft angewandt, da er nicht besonders rechenintensiv ist (explizites Einschrittverfahren) und numerisch eine gute Stabilität aufweist. Gegenüber dem Störmer-Verlet-Verfahren liefert er die Berechnung der Geschwindigkeit gleich mit. Der Algorithmus kann zwar nicht die Gesamtenergie des berechneten Systems konservieren, jedoch ist die Änderung letzterer nur innerhalb bestimmter Grenzen möglich und das berechnete System somit numerisch stabil. Der Fehler hinsichtlich der Gesamtenergie (globaler Fehler) sinkt um den Faktor 4 bei einer Halbierung der Schrittweite (Integrator 2. Ordnung) (vgl. [HLW06]).

4.6.4 Erweiterung der DEM auf nicht kugelförmige Partikel

Aufgrund der Notwendigkeit insbesondere im Bereich der Schüttguttechnik wurden zahlreiche Erweiterungen der DEM entwickelt, die auch nicht kugelförmige Partikel abbilden (sogenannte „Non-spherical particles“ oder „Clumped particles“). Dabei gibt es unterschiedliche Ansätze, die vom Verketteten kugelförmiger Partikel bis hin zu vektoriellen Beschreibungen geometrischer Körper reichen (vgl. Unterkapitel 4.2). An dieser Stelle wird nur auf die Multisphere-Methode eingegangen, da diese die am häufigsten eingesetzte darstellt und in den marktüblichen Softwaretools zur Verfügung steht (vgl. [LTM15]).

Das Grundprinzip der Multisphere-Methode ist ein Verketteten einzelner kugelförmiger Partikel, sodass eine vorgegebene Geometrie (Hülle) möglichst genau angenähert wird (vgl. beispielsweise [AFG+12]). Die Partikel können dabei starr verbunden sein, aber auch flexible Verbindungen (sogenannte „Bonds“) sind möglich, die zusätzlich bei vorgegebenen Grenzbelastungen aufgelöst werden können („Zerbrechen“ von „Clumps“). Verkettete Partikel können unterschiedliche Größen haben, auch Überlappungen sind möglich.

Bei der Berechnung der Kugeleigenschaften wird meist die Masse m_i des zu approximierenden Körpers den n_k kugelförmigen Partikeln zu gleichen Teilen m_{ik} zugewiesen, es gilt

$$m_i = \sum_{k=1}^{n_k} m_{ik}$$

Durch diese Vorgehensweise entstehen zwei Abweichungen zur analytisch korrekten Berechnung der Masse

$$m_i = \int_M dm_i$$

1. Überall dort, wo ein Teil des Volumens des zu approximierenden Körpers nicht durch eine Kugel ausgefüllt ist, ist die Dichte gleich null
2. Überall dort, wo sich zwei oder mehrere Partikel überlappen, ist die Dichte des Multisphere-Körpers um den entsprechenden Faktor höher als beim Originalkörper

Die Konsequenz daraus betrifft zwar nicht die Gesamtmasse des vereinfachten Körpers (diese ist nach obiger Beziehung ja gleich der des zu approximierenden Körpers), jedoch den Trägheitstensor Θ_i insofern, dass die ungleiche Dichteverteilung die Trägheitseigenschaften entsprechend ändert. Dies hat bei fehlender Korrektur Auswirkungen auf die rotatorischen Bewegungsgrößen in der Simulation (vgl. [PAR13], [LXM15]). Die Berechnung des Trägheitstensors erfolgt über

$$\Theta_i = \begin{bmatrix} \sum_k I_{ik} + \sum_k m_{ik}(s_{Yik}^2 + s_{Zik}^2) & -\sum_k m_{ik}s_{Xik}s_{Yik} & -\sum_k m_{ik}s_{Xik}s_{Zik} \\ -\sum_k m_{ik}s_{Xik}s_{Yik} & \sum_k I_{ik} + \sum_k m_{ik}(s_{Xik}^2 + s_{Zik}^2) & -\sum_k m_{ik}s_{Yik}s_{Zik} \\ -\sum_k m_{ik}s_{Xik}s_{Zik} & -\sum_k m_{ik}s_{Yik}s_{Zik} & \sum_k I_{ik} + \sum_k m_{ik}(s_{Xik}^2 + s_{Yik}^2) \end{bmatrix}$$

wobei mit I_{ik} die Trägheitsmomente der kugelförmigen Partikel bezeichnet werden; s_{Xik} , s_{Yik} und s_{Zik} sind die Abstände zu den jeweiligen Hauptträgheitsachsen des approximierten Körpers.

Die Berechnung der resultierenden Kräfte und gegebenenfalls Momente auf einen Multisphere-Körper erfolgt durch Aufsummieren der an den n_M kugelförmigen Partikeln wirkenden n_N Teilkräften⁸ und -momente (vgl. [KRW+08]):

$$\mathbf{F}_i = \sum_k^{n_M} \sum_l^{n_N} (\mathbf{F}_{ikl}^{cn} + \mathbf{F}_{ikl}^{ct})$$

$$\mathbf{M}_i = \sum_k^{n_M} \sum_l^{n_N} (\mathbf{s}_{ikl} \times \mathbf{F}_{ikl}^{ct})$$

mit \mathbf{s}_{ikl} als Abstandsvektor vom Schwerpunkt des Körpers zum Kraftangriffspunkt.

[KRW+08] führt am Beispiel der Approximation einer Kugel durch Verkettung von kugelförmigen Partikeln aus, dass Fehler in der Momentenberechnung entstehen können, wenn die Normale auf die Kontaktfläche nicht durch den Schwerpunkt der approximierten Kugel verläuft und damit ein zusätzliches Moment induziert wird.

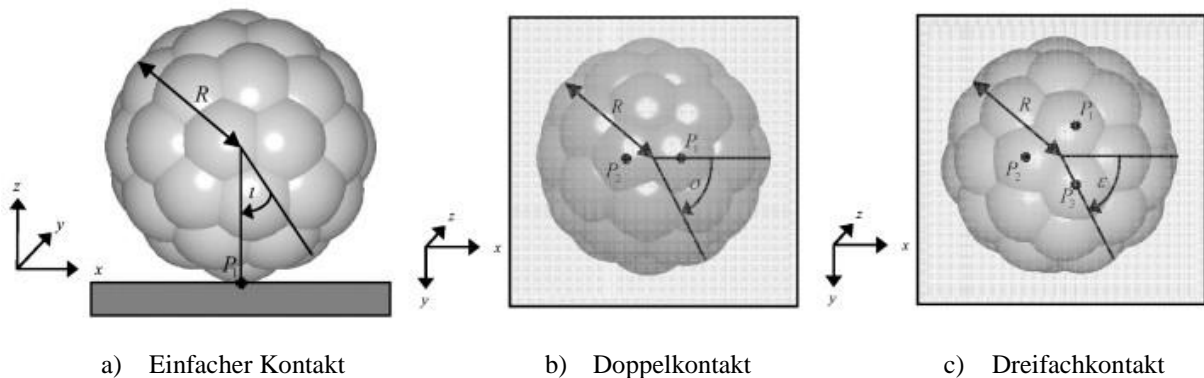


Abbildung 41: Kontaktmöglichkeiten einer Multisphere-Kugel (vgl. [KRW+08], S.157)

⁸ Die Indizes n für Normalenrichtung und t beziehen sich auf den Schwerpunkt des Körpers

Zusätzliche Beachtung muss auch jenen Fällen geschenkt werden, bei denen zwei oder mehrere Partikel eines Multisphere-Körpers gleichzeitig in Kontakt sind (Abbildung 41), um das vorgegebene Kontaktverhalten korrekt abzubilden.⁹

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch folgende Vereinfachungen Abweichungen im Bewegungsverhalten des approximierten Körpers gegenüber der Realität zu erwarten sind:

- *Geometrie*: Die approximierte Oberfläche bewirkt gegenüber der Realität Kräfte und Momente, die durch Abweichung von Wirkungslinien zustande kommen. Insbesondere ist bei der Relativbewegung von zwei Paketen darauf zu achten, dass durch die Modellbildung mit Multisphere-Körpern nicht zwei ebene Flächen aneinander abgleiten, sondern zwei wellige Oberflächen. Dies kann zu einem von der Theorie der trockenen Reibung (Coulomb'sche Reibung) abweichenden Gleitverhalten führen, da Formschlusseffekte entstehen können.
- *Massenverteilung*: Die Trägheitseigenschaften des approximierten Körpers sind nicht ident.
- *Kontaktmodell*: Eine vereinfachte Beschreibung der Kontakteigenschaften bewirkt ein abweichendes Kontaktverhalten.

4.7 Adaption der DEM für Simulationen von Stückgütern bei Fördervorgängen

Für die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit wurden mit der DEM verschiedene Bewegungsvorgänge simuliert und mit Messungen eines Prüfstandes verglichen (vgl. Kapitel 5). Als Software wurde das Programm PFC3D (Version 5.0) des Herstellers Itasca eingesetzt, die Modellierung der fördertechnischen Komponenten und der Stückgüter wird nachfolgend detailliert erläutert.

4.7.1 Modellbildung der Stückgüter

Die Stückgüter wurden als Multisphere-Körper approximiert. Wie in Unterkapitel 4.6 beschrieben, ist bei der Approximation von Körpern durch starr verkettete Kugeln die Auswirkung auf die Geometrie und damit verbundene Abweichungen im Bewegungsverhalten gegenüber „glatten“ Oberflächen zu berücksichtigen. Abbildung 42 zeigt dazu am Beispiel des Grenzwinkels zwei unterschiedliche Kontaktsituationen zweier aufeinander abgleitender approximierter Multisphere-Körper: Die Konstellation nach Abbildung 42a führt zum selben Gleitverhalten wie bei zwei ebenen

⁹ [KRW+08] gibt bei der Berechnung der resultierenden Kräfte zusätzlich einen Divisor j_{ikl} an, der als Korrekturfaktor zur Erhaltung der richtigen Kontakteigenschaften eingesetzt wird.

Oberflächen, da die Tangentialebene zwischen den Kugeln denselben Grenzwinkel α zur Horizontalen aufweist wie die Gleitebene. In Abbildung 42b ist der obere Körper zum unteren verschoben, was dazu führt, dass sich ein Gleitwinkel β einstellt, der kleiner als der Winkel α ist. Dies führt auf eine abweichende Kraftsituation: Um denselben Gleichgewichtszustand wie in Abbildung 42a zu erreichen, ist eine zusätzliche Kraft F notwendig, demzufolge würde der obere Körper bei einer kleinen Vergrößerung von α nicht sofort zu gleiten beginnen. Die in Abbildung 42b dargestellte Situation tritt insbesondere dann auf, wenn die Körper durch gleiche, regelmäßig verteilte Kugeln approximiert werden, geringe Überlappungen der Kugeln verstärken den Effekt noch. Um diesem Problem zu begegnen muss daher das Ziel sein, durch viele Kugeln verschiedener Radien, zufällige Positionierung der Kugeln und Überlappungen der Kugeln den Fall in Abbildung 42 zu vermeiden. Gleichzeitig wird bei einer dichteren Packungsdichte auch das Problem der abweichenden Wirkungslinien der Kontaktkräfte im Vergleich zu einer ideal ebenen Fläche reduziert (vgl. auch Unterkapitel 4.6).

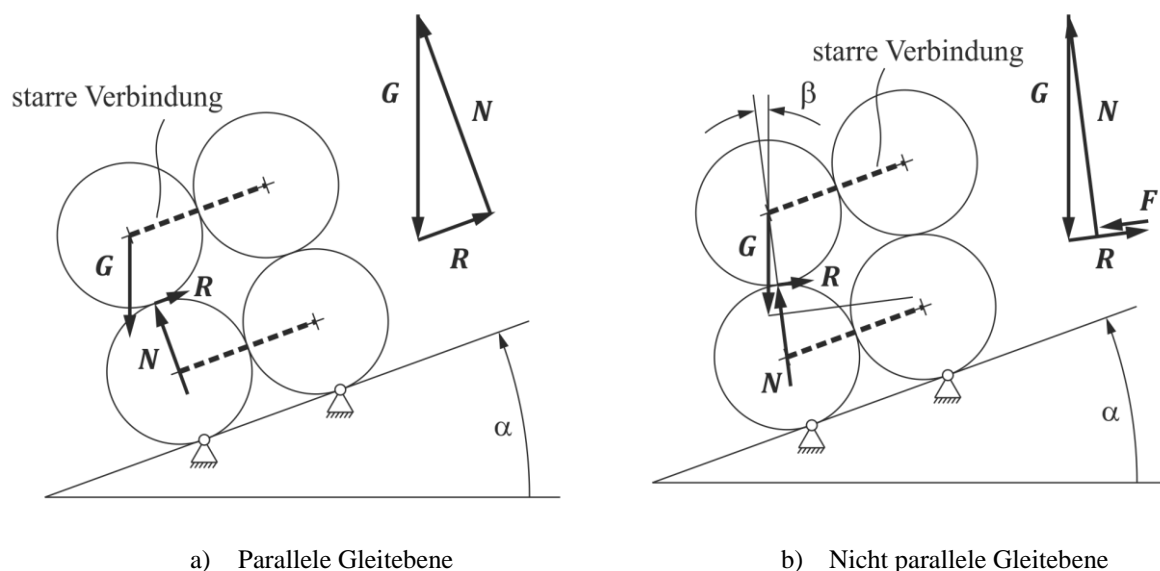
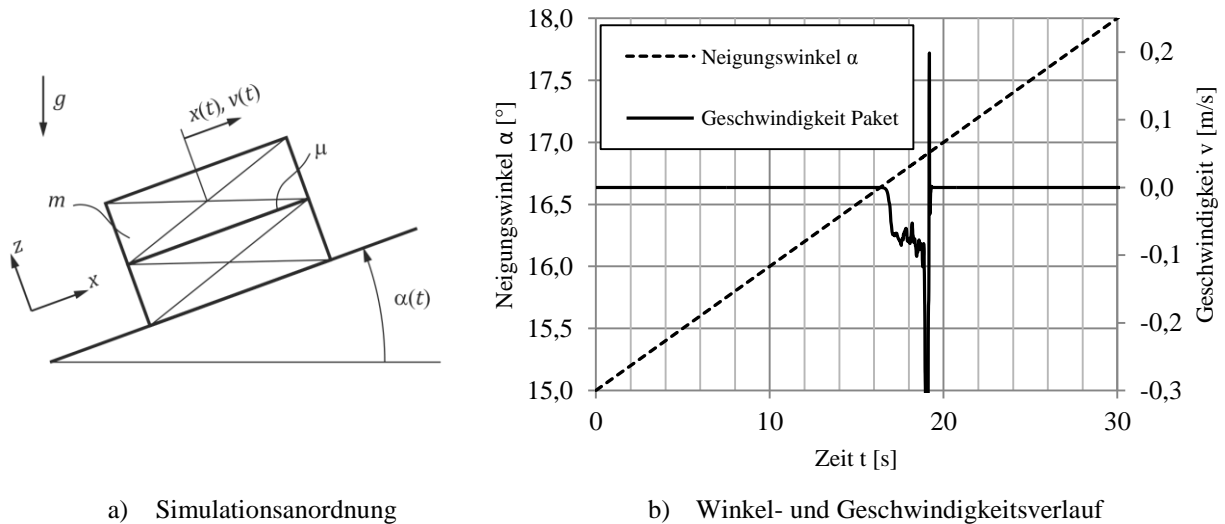


Abbildung 42: Einfluss der approximierten Kontur

Die Software PFC3D bietet für die Generierung eines Multisphere-Körpers dazu einen Algorithmus an (vgl. auch [TAG11]), der das Volumen eines geometrisch vorgegebenen Körpers mit kugelförmigen Partikeln füllt. Im Wesentlichen sind drei Einstellungsparameter nach Tabelle 14 für die Größe der einzelnen Kugeln, deren Überlappung und die Genauigkeit der Approximation zu setzen. Für den vorliegenden Anwendungszweck wurden für die Approximation der Stückgüter verschiedene Einstellungen getestet, wobei das primäre Ziel war, den Grenzwinkel zwischen Haften und Gleiten gegenüber dem theoretisch berechneten Grenzwinkel möglichst wenig abweichen zu lassen. Dazu wurden in der Simulation zwei quaderförmige Multisphere-Körper übereinander

in Ruhelage platziert (der untere Körper wurde fixiert) und anschließend der Neigungswinkel vergrößert. Die Ausgabe der Geschwindigkeit über der Zeit gibt darüber Aufschluss, bei welchem Winkel der Gleitvorgang einsetzt (Abbildung 43).



a) Simulationsanordnung

b) Winkel- und Geschwindigkeitsverlauf

Abbildung 43: Statischer Reibversuch

Für die virtuelle Versuchsanordnung wurde der Reibkoeffizient $\mu = 0,3$ gesetzt, was einem Grenzwinkel von $\alpha = 16,7^\circ$ entspricht. Wie aus Abbildung 43b ersichtlich ist, wird dieser Wert bei den entsprechenden Parametern für die Generierung des Multisphere-Körpers mit guter Näherung erreicht.

Tabelle 14: Parameter zur Generierung eines Multisphere-Körpers in PFC3D

Bezeichnung	Wertebereich	Beschreibung und Eigenschaften
$\rho_{min} = \frac{r_{min}}{r_{max}}$	$0 < \rho_{min} < 1$	Kleinstes zulässiges Verhältnis des kleinsten zum größten Kugelradius. Je kleiner das Verhältnis, desto größere Unterschiede zwischen den Kugelradien sind möglich.
ϕ	$0^\circ < \phi < 180^\circ$	Größter zulässiger Winkel zwischen den Tangentenflächen im Schnittpunkt der Kugeloberflächen. Ein Winkel von 0° lässt keine Überlappung zu, bei 180° können die Kugeln vollständig überlappen.
$e = \frac{r_i}{d_{min}}$	$e > 1$	Verhältnis des Kugelradius r_i zum kürzesten Abstand d_{min} des Kugelmittelpunkts zur Oberfläche des Körpers. Je kleiner der Wert, desto geringer ist die Überlappung der außenliegenden Kugeln mit der Oberfläche des approximierten Körpers.

Aus den unterschiedlichen getesteten Parameterkombinationen ergeben sich folgende qualitative Schlussfolgerungen für die Generierung eines Multisphere-Körpers¹⁰:

- Werden bei der Erzeugung des Multisphere-Körpers sehr kleine Kugelradien zugelassen, führt dies zu einer besseren Abbildung von scharfen Kanten. Nachteilig ist aber die Eigenschaft, dass kleine Kugeln an der Oberfläche im Kontaktfall wie Widerhaken wirken können, was zu einem abweichenden Verhalten beim Abgleiten zweier Multisphere-Körper führt.
- Eine Approximation mit gleichen Abständen zwischen den Kugeln bei gleichen Kugelradien führt zu dem in Abbildung 42 auf Seite 70 beschriebenen ungünstigen Effekt eines höheren Widerstandes gegen Gleiten. Um dem vorzubeugen, sind unterschiedlich große Kugeln bei zufällig erzeugten Positionen von Vorteil.
- Je größer die zulässige Überlappung der Kugeln ist, desto genauer wird die Oberfläche approximiert. Nachteilig dabei ist die Zunahme der Kugelanzahl je Körper, was sich auf die Berechnungsdauer auswirkt.
- Hinsichtlich der Trägheitseigenschaften sind moderne Software-Produkte in der Lage, entweder aufgrund der durch die verketteten Kugeln gebildeten Körperhülle eine Berechnung durchzuführen, alternativ können die Trägheitseigenschaften auch vom Benutzer festgesetzt werden. Dies bietet sich insbesondere bei einfachen Grundkörpern wie beispielsweise Kugel, Zylinder oder Quader an, da in diesem Fall der Realität entsprechende Werte eingegeben werden können (die Vereinfachung des Körpers reduziert sich so auf dessen geometrische Form).

4.7.2 Fördertechnik

Die fördertechnischen Komponenten wurden durch facettierte Flächen approximiert (meist Triangulation der Flächen). Prinzipiell sind hier weitreichende Gestaltungsmöglichkeiten gegeben, sowohl ebene als auch gekrümmte Flächen können erzeugt werden. Hinsichtlich der Eigenschaften der Flächen sind je nach modellierter Fördertechnikkomponente unterschiedliche Varianten einsetzbar, Tabelle 15 gibt dazu einen Überblick und zeigt mögliche Anwendungsfälle.

Abbildung 44 zeigt die Modellierung eines Bandförderers mit Abweisern, wobei auch die Triangulation der Flächen dargestellt ist.

¹⁰ An dieser Stelle werden bewusst keine Empfehlungen für konkrete Parameterwerte gegeben, da es unterschiedliche Methoden und Algorithmen zur Generierung von Multisphere-Körpern gibt. Dagegen sollen Erkenntnisse, die übergreifend gelten, für eine günstige Approximation als Empfehlung gegeben werden.

Tabelle 15: Modellierung der fördertechnischen Komponenten

Bezeichnung	Beschreibung	Anwendungsfall
Statische Flächen	Nicht bewegte Fläche mit Kontakteigenschaften	Feststehende Abweiser Leitbleche Rutschen
Bewegte Flächen	Translatorisch und/oder rotatorisch bewegte Fläche mit Kontakteigenschaften (Bewegungsgrößen werden als Funktion der Zeit vorgegeben)	Rollen eines Rollenförderers Umlenkrollen von Bandförderern Bewegte Abweiser Taschen/Schaufeln
Statische Flächen mit überlagerter Geschwindigkeit	Statische Fläche mit überlagerter Oberflächengeschwindigkeit	„Endlose“ Fördertechnik (beispielsweise Bandförderer)

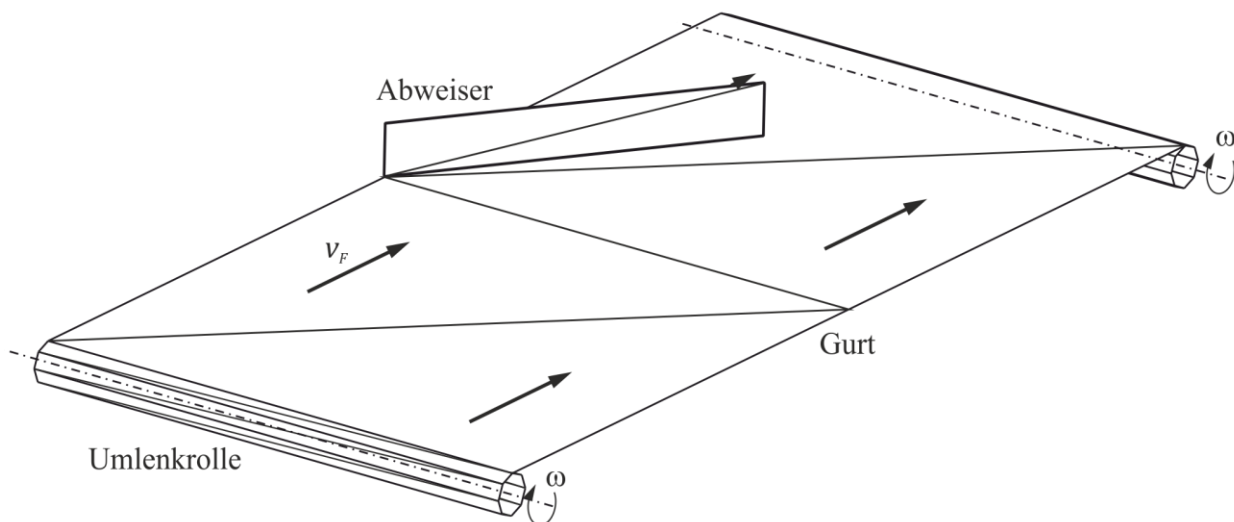


Abbildung 44: Modellierung der fördertechnischen Komponenten

4.7.3 Kontaktmodell

Das in der vorliegenden Arbeit verwendete Modell basiert auf der Theorie von [MiD53], lässt aber auch die Modellierung von dissipativen Kontakteigenschaften zu (vgl. [ITA15]). An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass die allgemeinen Voraussetzungen für die Gültigkeit des Hertz-Mindlin Modells (z.B. linear-elastisches und isotropes Material) nicht als gegeben angenommen werden können. Da das Außenmaterial eines typischen Pakets meist aus Wellpappe besteht, ist anzunehmen, dass das reale Kontaktverhalten nur mit einem komplexen Modell abbildbar ist. Das Modell nach Hertz und Mindlin ist daher als vereinfachtes Modell zu sehen, das die realen Kontakteigenschaften soweit abbilden kann, dass das makroskopische Bewegungsverhalten der Pakete vorhergesagt werden kann. Dies wurde im Rahmen der Arbeit an verschiedenen Testszenarien

überprüft, die die wesentlichen im Rahmen des Fördervorgangs zu erwartenden Anordnungen und Situationen abdecken (vgl. Kapitel 5).

Das Kontaktmodell, das in der vorliegenden Arbeit verwendet wurde, berechnet für die Dauer des Kontakts eine resultierende Kontaktkraft \mathbf{F}_{ij}^c , die sich aus einem nichtlinear elastischen Term \mathbf{F}_{ij}^{hc} nach den Betrachtungen von [MiD53] und einem dissipativen Term \mathbf{F}_{ij}^{dc} zusammensetzt. Die Übertragung von Momenten in der Kontaktfläche wird vernachlässigt.

$$\begin{aligned}\mathbf{F}_{ij}^c &= \mathbf{F}_{ij}^{hc} + \mathbf{F}_{ij}^{dc} \\ \mathbf{M}_{ij}^c &= \mathbf{0}\end{aligned}$$

Sowohl der nichtlinear elastische Term als auch der dissipative Term beinhalten eine Komponente normal zur fiktiven Kontaktfläche und eine tangential dazu.¹¹

$$\begin{aligned}\mathbf{F}_{ij}^{hc} &= -F_n^{hc} \mathbf{n}_c + \mathbf{F}_t^{hc} \\ \mathbf{F}_{ij}^{dc} &= -F_n^{dc} \mathbf{n}_c + \mathbf{F}_t^{dc}\end{aligned}$$

Die Ermittlung der Größe von F_n^{hc} erfolgt über die Beziehung

$$F_n^{hc} = \begin{cases} -h_n |g_c|^\alpha & \text{für } g_c < 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

wobei g_c der Oberflächenabstand der beiden kugelförmigen Partikel ist und $\alpha = 1,5$. Die Größe h_n berechnet sich aus mechanischen und geometrischen Parametern zu

$$h_n = \frac{2\bar{G}\sqrt{2\bar{R}}}{3(1-\bar{\nu})}$$

mit dem effektiven Schubmodul \bar{G} , dem effektiven Radius \bar{R} und der effektiven Poissonzahl $\bar{\nu}$ aus den Beziehungen

$$\begin{aligned}\bar{G} &= \frac{1}{2}(G_i + G_j) \\ \bar{\nu} &= \frac{1}{2}(\nu_i + \nu_j) \\ \frac{1}{\bar{R}} &= \frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j}\right)\end{aligned}$$

¹¹ Die Lage der Kontaktfläche wird über die Überlappung der Partikel bestimmt, siehe auch in [ITA15]

Die tangential zur Kontaktfläche wirkende Größe \mathbf{F}_t^{hc} wird entsprechend der Unter- oder Überschreitung der Reibkraft¹² wie folgt ermittelt:

$$\mathbf{F}_t^{hc} = \begin{cases} \mathbf{F}_t & \text{für } |\mathbf{F}_t| \leq F_t^\mu \\ F_t^\mu \frac{\mathbf{F}_t}{|\mathbf{F}_t|} & \text{sonst} \end{cases} \quad F_t^\mu = \mu F_n^{hc}$$

Der in der Kontaktfläche liegende elastische Kraftanteil \mathbf{F}_t (Schubkraft) wird inkrementell berechnet, ausgehend von der Schubkraft \mathbf{F}_t^0 zu Beginn des Zeitschritts wird ein Inkrement proportional zur Schubsteifigkeit k_t und der Verschiebung in tangentialer Ebene hinzuaddiert:

$$\mathbf{F}_t = \mathbf{F}_t^0 + k_t \Delta \boldsymbol{\delta}_t$$

Der Steifigkeitswert k_t errechnet sich aus der Beziehung ($\alpha = 1,5$ analog zur Berechnung von F_n^{hc})

$$k_t = \frac{2(1 - \bar{\nu})}{2 - \bar{\nu}} \alpha h_n (F_n^{hc})^{\frac{\alpha-1}{\alpha}}$$

Der dissipative Term F_n^{dc} in Normalenrichtung wird über

$$F_n^{dc} = 2\beta_n \sqrt{\bar{m} k_n} \dot{\delta}_n$$

berechnet, wobei die Normalsteifigkeit k_n aus

$$k_n = \alpha h_n \delta_n^{\alpha-1}$$

gebildet wird und $\dot{\delta}_n$ der Betrag der Normalgeschwindigkeit zwischen den Kontaktpartnern ist.

Die Größe \bar{m} wird aus den Massen m_i und m_j der beiden Kontaktpartner errechnet¹³:

$$\bar{m} = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}$$

Für die Bestimmung des tangentialen dissipativen Anteils \mathbf{F}_t^{dc} gilt die Berechnungsvorschrift

$$\mathbf{F}_t^{dc} = 2\beta_t \sqrt{\bar{m} k_t} \dot{\boldsymbol{\delta}}_t$$

sofern zwischen den Kontaktpartnern kein Reibungszustand vorliegt. Die Dämpfungskennwerte β_n und β_t geben den Dämpfungsgrad¹⁴ an, wobei im verwendeten Simulationsprogramm Werte zwischen 0 (ungedämpftes System) und 1 (aperiodischer Grenzfall) wählbar sind.

¹² Anm.: Bei dem in der vorliegenden Arbeit eingesetzten Kontaktmodell wird für Haft- und Gleitreibung derselbe Wert herangezogen.

¹³ Anm.: Sofern ein Partikel mit einer Fläche in Kontakt steht, wird für \bar{m} nur die Masse des einen Partikels eingesetzt.

¹⁴ $\beta = \frac{b}{b_k}$ mit b als Dämpfungskonstante und $b_k = 2\sqrt{km}$ als kritischer Dämpfungskonstante (k ...Federkonstante, m ...Masse)

Die Skizze nach Abbildung 45 zeigt eine schematische Sicht des Kontaktmodells mit Feder- und Dämpfungskomponenten sowie einer Reibstelle:

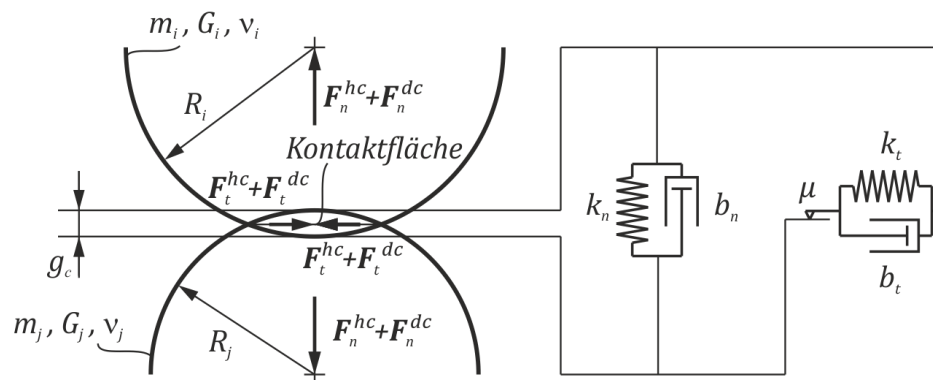


Abbildung 45: Kontaktmodell

5 Virtuelle und reale Versuchsszenarien

Bei dem Einsatz von Simulationsmodellen ist deren Gültigkeit durch die Prozesse der Verifikation und Validierung zu überprüfen. In [VWB+09], [RSW08] oder [VDI14] sind diese beiden Prozesse erläutert, wobei zusammenfassend unter Verifikation die korrekte Transformation eines Modells (z.B. konzeptionelles Modell) in ein anderes (z.B. Simulationsmodell) verstanden wird, unter Validierung die Überprüfung, ob ein Modell das Originalsystem hinreichend genau abbildet. Hinsichtlich der Verifikation wurde die Adaption der DEM (vgl. Unterkapitel 4.7) auf den vorliegenden Anwendungsfall insoweit durchgeführt, dass eine korrekte Implementierung des Programmcodes überprüft wurde. Dazu wurden im Vorfeld der Versuche einzelne Tests durchgeführt (z.B. Nachverfolgung einzelner Stückgüter, Kontrolle von Variablen wie Abmessungen, Positionen, Geschwindigkeiten, Überprüfung der korrekten Übernahme von Kontaktparametern u.a.).

Zur Validierung des Simulationsmodells wurden die im Unterkapitel 5.1 dargestellten Versuchsszenarien konzipiert und nachfolgend sowohl auf dem Prüfstand realisiert sowie in der Simulationsumgebung PFC3D implementiert. Der Vergleich von Prüfstands- und Simulationsergebnissen (siehe Kapitel 6) gibt dabei Aufschluss über die Genauigkeit, die von den Simulationsergebnissen erwartet werden kann. Da Prüfstandsuntersuchungen mit einer Vielzahl von Stückgütern nur mit erheblichem Aufwand durchzuführen sind, wurde ein induktiver Ansatz gewählt. Dabei soll auf Basis der Ergebnisse mit kleinen Paketzahlen und der Untersuchung von einzelnen Interaktionen (Paket – Fördertechnik, Paket – Paket) ein Rückschluss auf die Anwendbarkeit der DEM auf größere Systeme ermöglicht werden.

Bei der Konzeption der Versuchsszenarien wurde darauf geachtet, mögliche Interaktionen und Bewegungsabläufe von Stückgütern abzubilden, die bei Vereinzlungsvorgängen von Stückgütern im Pulk zu erwarten sind. Einerseits wurde dabei der Fokus auf ebene Fördervorgänge gelegt (Stückgutbewegungen parallel zur Förderebene) und andererseits auf Bewegungsvorgänge, wie sie beispielsweise beim Fall von Paketen zu erwarten sind. Unabhängig von der Art der Bewegung wurden sowohl Interaktionen von Paketen untereinander abgebildet als auch Interaktionen zwischen Paketen und Fördertechnik.

5.1 Auswahl der Versuchsszenarien

Zur Überprüfung ebener Fördervorgänge wurden die beiden Szenarien nach Abbildung 46 erstellt. Dabei wurde eine Anordnung zur 2D/1D-Vereinzlung gewählt, die sich gut für Stückgüter eignet (vgl. Unterkapitel 3.3). Das Versuchsszenario nach Abbildung 46a mit einem Paket deckt dabei

die Interaktion eines Paketes mit der Fördertechnik ab, die sowohl statische Komponenten (Abweiser) als auch bewegte Komponenten (Gurt) umfasst. Das Versuchsszenario nach Abbildung 46b beinhaltet zusätzlich auch die Interaktion der Stückgüter untereinander, was den Grad der Komplexität erhöht. Bei der Festlegung des Szenarios mit zwei Paketen wurde darauf geachtet, hinsichtlich Fördergeschwindigkeit eine Bandbreite zu wählen, die für Vereinzlungsvorgänge passend ist. Im Gegensatz zu reinen Transportprozessen von Stückgütern, bei denen die Fördergeschwindigkeiten bis 2,5 m/s und darüber betragen können, sind für die Vereinzlung deutlich geringere Geschwindigkeiten unter 1 m/s üblich.¹⁵ Innerhalb dieser Bandbreite wurde für das Szenario „Pakete klein“ der ebenen Stückgutbewegung eine im unteren Bereich liegende Bandgeschwindigkeit von 0,3 m/s gewählt, für das Szenario „Pakete groß“ eine aus dem höheren Bereich mit 0,7 m/s.

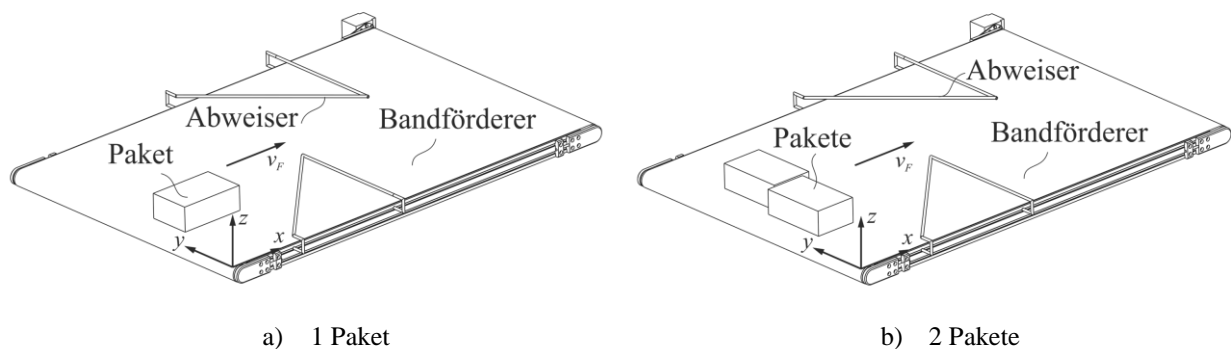


Abbildung 46: Versuchsszenarien „Ebene Stückgutbewegung“

Neben der Geschwindigkeit wurden auch die Abmessungen der Pakete und das Paketgewicht variiert, um die Eignung der DEM zur Simulation von Fördervorgängen für eine größere Bandbreite zu zeigen. Die Pakete des Szenarios „Pakete groß“ wurden so ausgewählt, dass deren Abmessungen in der Nähe der Durchschnittswerte der Analyse aus Unterkapitel 2.3 liegen. Als Füllmaterial wurden Stoffreste ausgewählt, die zu einem Paketgewicht von etwa 4 kg führten¹⁶. Der Wert für das Szenario „Pakete klein“ wurde entsprechend der Analyse des Paketspektrums aus Unterkapitel 2.3 aus jenem Bereich gewählt, in dem ein Großteil der Pakete liegt (das Histogramm aus Abbildung 23 auf Seite 26 lässt erkennen, dass das Gewicht der meisten Pakete unter 2 kg liegt). Da Volumen und Gewicht korrelieren (vgl. Unterkapitel 2.3), wurden mit 270x170x100 mm (LxBxH) entsprechend kleinere Abmessungen gewählt. Um die Masse gleichmäßig auf das Paketvolumen

¹⁵ Anm.: Dies ergibt sich schon durch die Tatsache, dass eine geringere Gutdichte nach dem Vereinzlungsvorgang bei gegebener Fördergeschwindigkeit eine deutlich geringere Fördergeschwindigkeit bei höherer Gutdichte vor und während des Vereinzlungsvorgangs bedingt, um den Durchsatz konstant zu halten.

¹⁶ Dieser Wert liegt etwas über dem Durchschnittswert, da auch die Abmessungen mit 385x305x205 mm (LxBxH) des gewählten Paketes zu einem leicht über dem Durchschnitt liegenden Volumen führten.

verteilen zu können, wurden als Füllmaterial Holzpellets eingesetzt, deren Dichte auf ein Paketgewicht von 1,84 kg führte.

Die Winkel der Abweiser und deren Abstand wurden durch Vorversuche so eingestellt, dass es bei dem Vereinzlungsprozess zu keiner Verklausung der Pakete an der Engstelle kommt.

Bei Beginn des Versuchs wird der Gurt des Bandförderers aus der Ruhelage in Förderrichtung (Pfeil) beschleunigt bis die gewählte Fördergeschwindigkeit erreicht wird. Diese wird nachfolgend bis zum Ende des jeweiligen Laufs konstant beibehalten. Die genauen Abmessungen und Positionen der einzelnen Komponenten aus Abbildung 46 sowie die gewählten Parameterwerte können Abschnitt 5.2.1 entnommen werden.

Für den Fallversuch wurden zwei Szenarien konzipiert, bei denen ein beziehungsweise zwei Paket(e) von einem Aufbau auf den ruhenden Fördergurt fallen. Diese Szenarien sind im Kontext der Vereinzlung durch das Wasserfallprinzip¹⁷ (vgl. Unterkapitel 3.3) zu sehen, das in einigen technischen Lösungen Anwendung findet (vgl. Unterkapitel 2.2). Für den Versuch werden die Pakete auf dem Aufbau so positioniert, dass sie sich in einer instabilen Lage befinden. Der Schwerpunkt der Pakete liegt dabei knapp vor der vorderen Kante des Aufbaus, nach Lösen der Fixierung beginnt zufolge der Schwerkraft ein Fallvorgang der Pakete auf den Bandförderer. Die Szenarien wurden sowohl mit einem Paket als auch mit zwei Paketen durchgeführt, womit einerseits die Interaktion Paket – Fördertechnik und andererseits auch die Interaktion Paket-Paket erfasst wird.

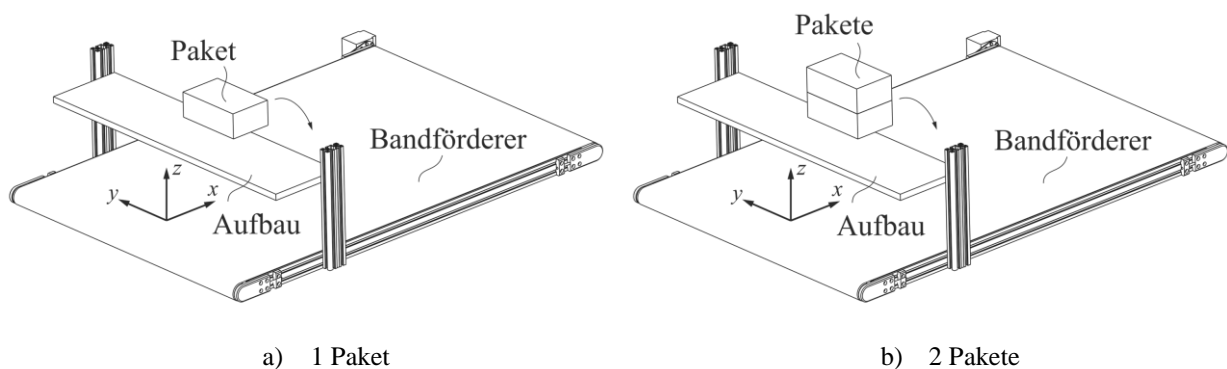


Abbildung 47: Fallversuch¹⁸

Der Wert für das Paketgewicht wurde analog zu den Szenarien der ebenen Stückgutbewegung so festgelegt, dass er im Wertebereich der Pakete unter 2 kg liegt (Bereich großer Häufigkeit nach

¹⁷ Bei der üblichen Anwendung des Wasserfallprinzips ist das tiefer gelegene Abförderband angetrieben, im vorliegenden Versuch wurde darauf aber verzichtet, um die Lage der Pakete nach dem Fall dokumentieren zu können.

¹⁸ Anm.: Der Ursprung des eingezeichneten Koordinatensystems liegt aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht an der korrekten Position. Die genaue Position kann Abschnitt 5.2.2 entnommen werden.

Abbildung 23 auf Seite 26). Hinsichtlich des Füllmaterials bestand die Anforderung, dass der Gyrosensor fest im Paket platziert ist. Demzufolge wurden als Material Weichfaserplatten gewählt, die eine solche Fixierung ermöglichen und gleichzeitig auch aufgrund ihrer Dichte auf den angestrebten Wertebereich hinsichtlich des Paketgewichtes führten.

Die Höhe des Aufbaus über dem Bandförderer und die Paketabmessungen wurden so gewählt, dass die Pakete zuerst mit der Kante auf dem Bandförderer auftreffen und nachfolgend mit der zu Beginn des Versuchs oberliegenden Fläche auf dem Bandförderer zu liegen kommen. Damit werden sowohl der Kontakt einer Paketkante mit dem Bandförderer als auch der Kontakt der Paketfläche mit dem Bandförderer in dem Versuch abgebildet. Bei jenem Versuchsszenario mit zwei Paketen führt die gewählte Fallhöhe zu einer Ruhelage der Pakete, bei der ein Paket mit der zu Beginn oberliegenden Fläche auf einer Kante des zweiten Pakets zu liegen kommt. Nachdem zu Beginn des Versuches die Pakete flächig übereinanderliegen, werden damit die Kontakte Paketfläche – Paketkante und Paketfläche – Paketfläche (inklusive Abgleitvorgang während des Versuchsablaufs) abgedeckt.

Die genauen Abmessungen und Positionen der einzelnen Komponenten aus Abbildung 47 sowie die gewählten Parameterwerte können Abschnitt 5.2.2 entnommen werden.

5.2 Prüfstandsaufbau

Zur Untersuchung der im Unterkapitel 5.1 beschriebenen Versuchsszenarien wurde ein Prüfstand nach Abbildung 48 realisiert, der es ermöglicht, das Bewegungsverhalten der Pakete aufzuzeichnen. Der Prüfstand besteht aus einem Bandförderer sowie einem Kamerasystem. Bei den Szenarien nach Abbildung 47 wurden zusätzlich auch ein Beschleunigungs- und Gyrosensor eingesetzt.

Die Oberfläche des Bandes H-6EHDT des Herstellers Habasit AG besteht aus thermoplastischem Polyurethan (TPU) (weitere Daten dazu können dem Datenblatt im Anhang A1 entnommen werden). Der Antrieb erfolgt über einen Getriebemotor, über einen Frequenzumrichter kann die Bandgeschwindigkeit stufenlos eingestellt werden.

Das Kamerasystem besteht aus einer monochromen Flächenkamera AVT PIKE F-100B mit einem Kompaktobjektiv PENT C814-5M sowie einem Messrechner zur Auswertung der Bilder. Die institutseigene Auswertungssoftware ermöglicht basierend auf am Zielobjekt aufgeklebten Markern die Ermittlung von Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung in den drei Freiheitsgraden der Ebene (x- und y-Koordinate sowie Winkel um die Vertikalachse) zu jedem Zeitschritt.

Der unterschiedliche Aufbau für die Szenarien „Ebene Stückgutbewegung“ (Abschnitt 5.2.1) und „Fallversuch“ (Abschnitt 5.2.2) wird nachfolgend dargestellt.

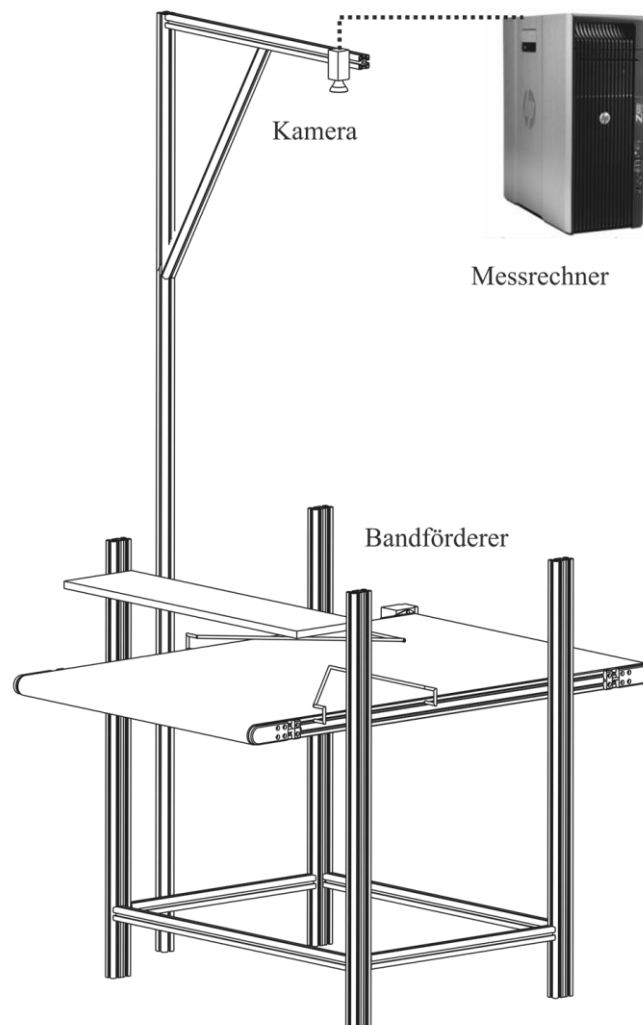


Abbildung 48: Aufbau Bandförderer mit Kamerasystem

5.2.1 Prüfstandsaufbau „Ebene Stückgutbewegung“

Eine schematische Darstellung mit den zugehörigen Abmessungen der Versuchsszenarien kann Abbildung 49 und Abbildung 50 entnommen werden. Die angegebenen Startpositionen der Pakete und die Abweiserlage sowie -orientierung wurden durch Vorversuche dahingehend festgelegt, dass einerseits sowohl Kontakte zwischen Paketen und Abweisern als auch zwischen den Paketen während der Versuche auftreten und andererseits Verkläuserungen an der Endstelle vermieden werden¹⁹. Die Gleitflächen der zwei Abweiser bestehen aus hartem Kunststoff.

¹⁹ Bei dem Versuch mit einem Paket wurden die Winkel der Abweiser und die Startposition so abgestimmt, dass das Paket von beiden Abweisern abgelenkt wird.

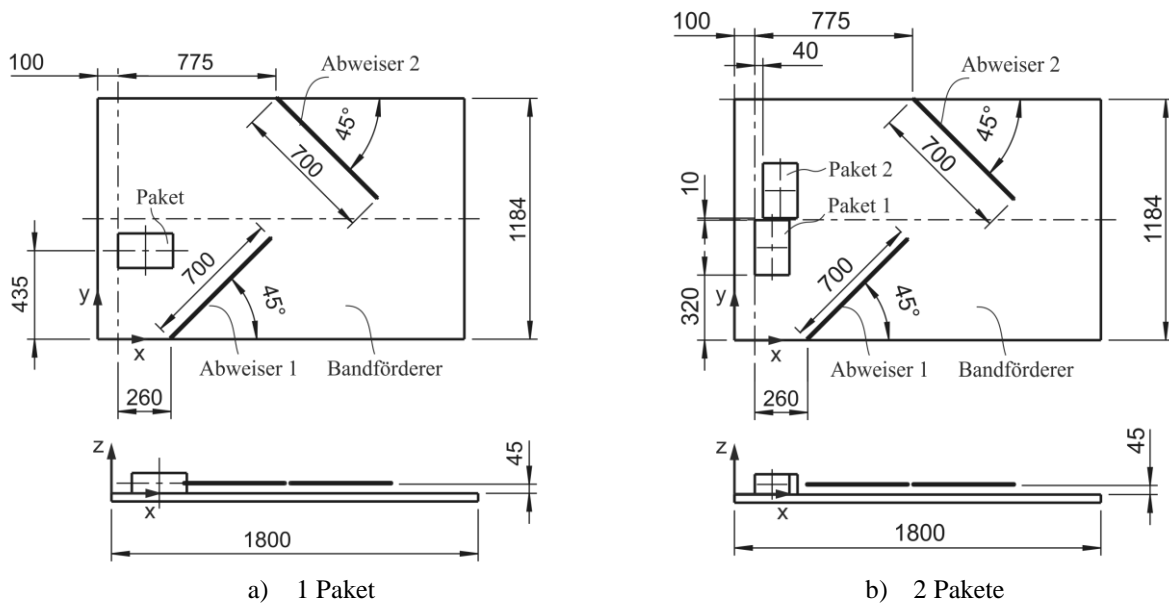


Abbildung 49: Abmessungen und Paketpositionen (Szenarien „Pakete klein“)

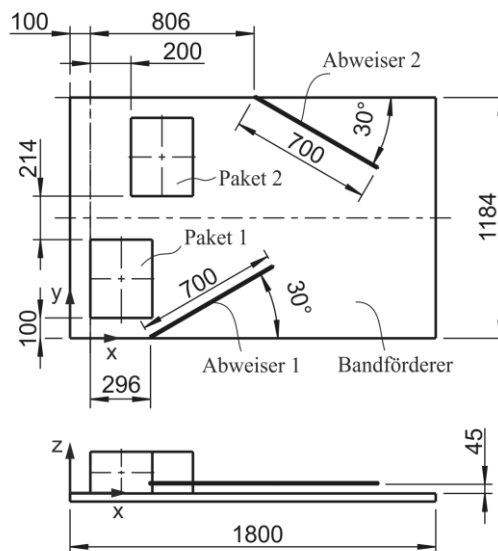


Abbildung 50: Abmessungen und Paketpositionen (Szenario „Pakete groß“)

Die Versuche wurden mit zwei unterschiedlichen Paketgrößen und -gewichten durchgeführt (vgl. Unterkapitel 5.1 und Abbildung 51), die Oberfläche besteht aus Wellpappe²⁰. Auf der obenliegenden Seite der Pakete wurde auf jedem Paket mittig ein Marker mit der Seitenlänge $a=100$ mm aufgeklebt, der vom Kamerasystem erkannt und verfolgt werden kann. Das Füllmaterial der Pakete wurde gleichmäßig im Paketinneren verteilt, wobei jeweils das ganze Volumen ausgefüllt wurde.

²⁰ Anm.: Die Oberfläche der kleineren Pakete war bedruckt, jene der größeren nicht. Dieser mögliche Einfluss auf den Reibungskoeffizienten ist bei der Simulation zu beachten.

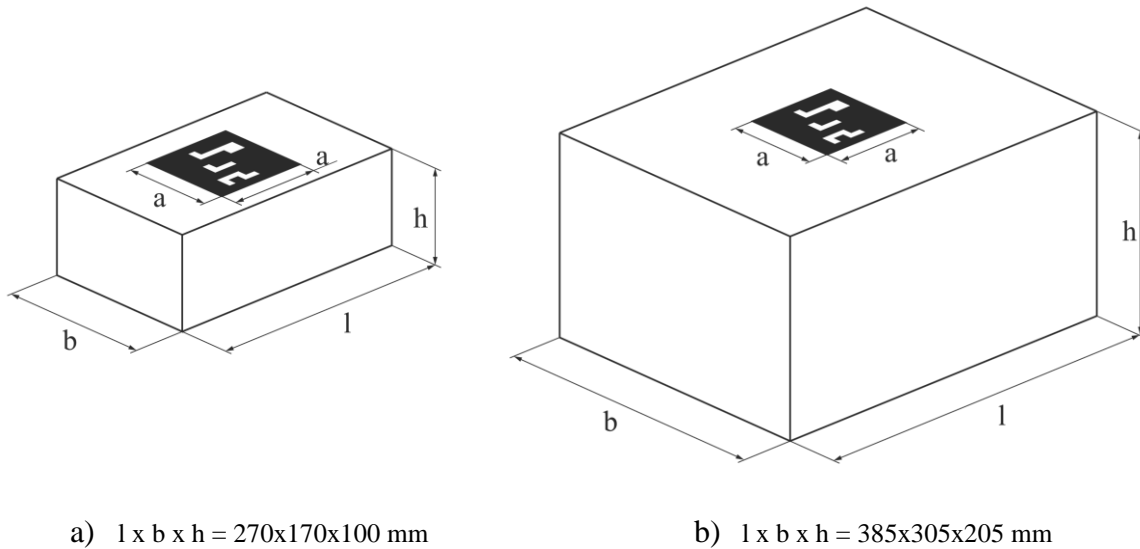


Abbildung 51: Pakete mit Marker (Seitenlänge a=100mm)

Zu Beginn der Versuche befinden sich die Pakete in Ruhelage, nach der Beschleunigungsdauer (vgl. Tabelle 16) bewegt sich der Gurt mit konstanter Fördergeschwindigkeit v_F .

Wie im Unterkapitel 5.1 beschrieben, zielen die Versuchsszenarien darauf ab, die Eignung der DEM als Simulationemethode für Vereinzelungsvorgänge von Stückgütern zu zeigen. Dementsprechend wurde bei der Konzeption der Szenarien neben den Paketabmessungen und -gewichten auch die Bandgeschwindigkeit innerhalb des für Vereinzelungsvorgänge charakteristischen Wertebereichs variiert, die Parametereinstellungen können Tabelle 16 entnommen werden.

Tabelle 16: Parameter der Versuchsszenarien „Ebene Stückgutbewegung“

Szenario	Paket	Abmessungen (l x b x h) [mm]	Gewicht [kg]	Füll- material	Förder- geschwindigkeit v_F [m/s]	Beschleuni- gungsdauer ($a_F = konst.$) [s]
„Pakete klein“	Paket 1	270x170x100	1,84	Holz- pellets	0,31	0,25
	Paket 2					
„Pakete groß“	Paket 1	385x305x205	4,08	Stoffreste	0,7	0,2
	Paket 2		3,94			

Vor der Durchführung der Versuche wurde eine Kalibrierung des Kamerasystems vorgenommen, sodass die Längenabweichung zweier in einem Meter Abstand positionierten Pakete in x- und y-Richtung kleiner 5mm betrug. Zusätzlich wurde die Winkelbestimmung der Kamera mit einem am fest montierten Abweiser anliegenden Paket durchgeführt, wobei der vom Kamerasystem ausge-

gebene Wert zum fest eingestellten Winkel des Abweisers weniger als $0,5^\circ$ abwich. Die Abweichung der vom Kamerasystem ausgegebenen Positionswerte zu unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten bei einem ruhenden Marker betrug weniger als 0,1 mm.

Nach der Kalibrierung wurde die Aufnahme gestartet und der Antriebsmotor eingeschaltet und nach Verlassen der Pakete am anderen Ende des Bandes wieder gestoppt.

5.2.2 Prüfstands Aufbau „Fallversuch“

Die Versuche zu den Szenarien nach Abbildung 47 wurden mit einem abgeänderten Aufbau im Vergleich zu den Versuchen mit ebener Stückgutbewegung durchgeführt. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass über dem Band ein Aufbau montiert wurde, auf dem die Pakete für die Fallversuche zu Beginn positioniert wurden. Die Skizzen und Abmessungen können Abbildung 52 entnommen werden.

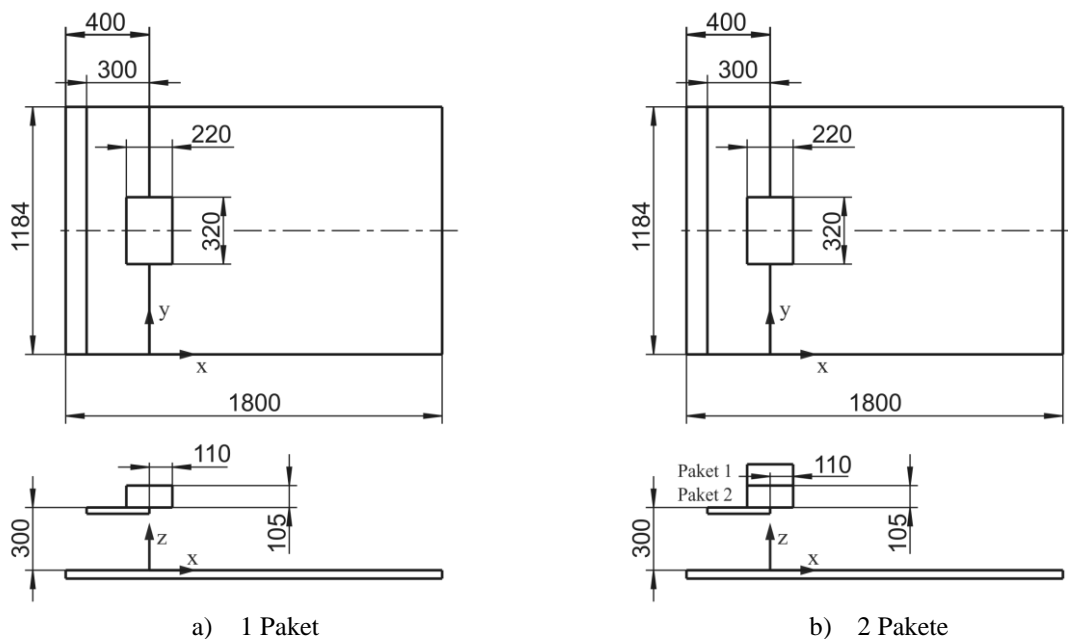


Abbildung 52: Abmessungen und Paketpositionen (Szenarien „Fallversuch“)

Die Versuche wurden bei ruhendem Band durchgeführt, um neben den Bewegungsgrößen auch die definierten Endlagen nach dem Fall der Pakete aufnehmen zu können. Da das Kamerasystem nur Marker detektieren kann, die parallel zur Bandoberfläche ausgerichtet sind, wurde bei diesen Versuchen auch der Gyrosensor eines Mobiltelefons genutzt, um eine kabellose Aufzeichnung der Bewegungsgrößen durchführen zu können. Der Beschleunigungs- und Gyrosensor (Datenblätter siehe Anhang A1) zeichnet dabei mit einer Frequenz von 100 Hz die räumlichen Bewegungsgrößen auf, für die Auswertung wurde die Winkelgeschwindigkeit um die y-Achse herangezogen.

Das Mobiltelefon wurde im Paket mittig positioniert, wobei die Füllung aus Weichfaserdämmplatten bestand, um die Lage des Gyrosensors relativ zum Paket zu fixieren und ein realistisches Paketgewicht zu erzeugen. Die Pakete dieser Versuchsreihe bestanden aus bedruckter Wellpappe, die Abmessungen können Abbildung 52 entnommen werden. Das Gewicht beider Pakete betrug 1,74 kg²¹. Bei dem Versuch mit zwei übereinanderliegenden Paketen (Abbildung 52b) war der Gyrosensor im untenliegenden Paket 2 untergebracht.

Zusätzlich wurden auch Bildaufnahmen von oben gemacht, um den Bewegungsablauf visuell zu dokumentieren. Nach Erreichen der Ruhelage der Pakete wurden die zugehörigen Endpositionen dokumentiert.

5.3 Versuchsplanung und Faktorauswahl

In Unterkapitel 2.5 wurde die statistische Versuchsplanung als Methode zur Ermittlung des Einflusses einzelner Faktoren auf die Zielgröße(n) von Systemen vorgestellt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die DoE-Methode eingesetzt, um relevante Simulationsparameter und deren Wechselwirkungen auf die Bewegungsabläufe von Stückgütern im Förderprozess zu identifizieren, wobei als zu optimierende Zielgrößen die Abweichungen zu den am Prüfstand ermittelten Größen herangezogen wurden.

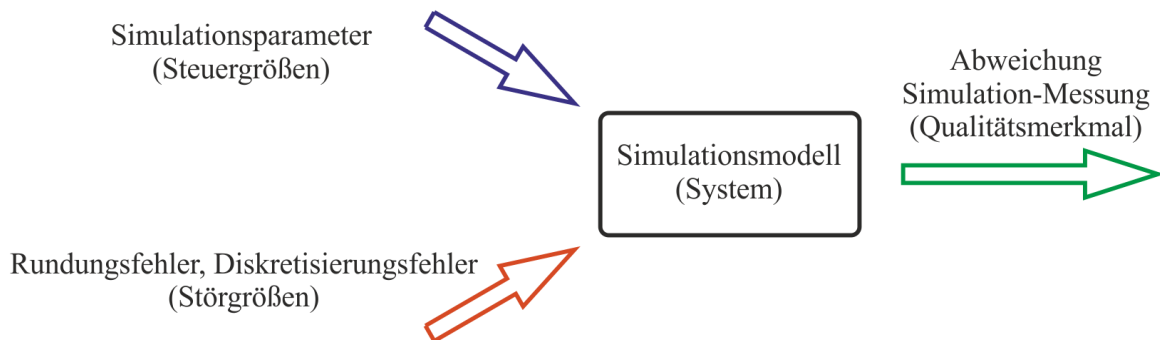


Abbildung 53: DoE-Systembeschreibung Simulationsstudie

Abbildung 53 konkretisiert bezugnehmend auf die Darstellung in Abbildung 25 auf Seite 31 das untersuchte System, repräsentiert durch das Simulationsmodell. Den Qualitätsmerkmalen oder Zielgrößen sind ausgewählte Abweichungen der Bewegungsgrößen zwischen Prüfstandsmessungen und Simulationsergebnissen zugeordnet. Die Steuergrößen finden sich im Bereich der Simu-

²¹ Anm.: Für die Einbringung des Mobiltelefons in das eine Paket musste ein entsprechender Teil der Weichfaserplatten entnommen werden, was dazu führte, dass sich die Gewichte der beiden Pakete nicht unterschieden.

lationsparameter wieder, wobei bestimmte Parameter zu Faktoren erklärt werden (vgl. auch Unterkapitel 2.5). Störgrößen können numerische Fehler innerhalb der Fehlerschranken des Solvers (Velocity-Verlet-Integrator mit variabler Schrittweitevorgabe) sein, wobei aber angemerkt wird, dass entsprechend den Ausführungen des Softwareherstellers die Simulationen in einem deterministischen Modus durchgeführt werden, d.h. gleiche Simulationseinstellungen führen zu gleichen Ergebnissen (vgl. [ITA15]). Signalgrößen (nicht beeinflussbare Einstellungen des Systems) finden sich in dieser Systembeschreibung nicht wieder.

5.3.1 Auswahl der Faktoren

Tabelle 17 gibt einen Überblick über mögliche Einflussgrößen (vgl. auch Kapitel 4.7). Je nach durchgeführtem Versuch wurden unterschiedliche Parameter aus dieser Menge ausgewählt, die dann den Faktorraum bilden.

Tabelle 17: Mögliche Steuergrößen für die DoE-Studie

Kategorie	Parameter	Bezeichnung	
Kontaktmodell	Art des Kontaktmodells	linear hertz hysteretic	
	Reibwerte		μ
	Steifigkeit ²²	normal	k_n
		tangential	k_s
	Dämpfungswert ²³	normal	β_n
		tangential	β_s
Approximation Körpergeometrie	Verhältnis der Kugelradien	ρ_{min}	
	Größter zulässiger Winkel zwischen den Tangentenflächen	ϕ	
	Zulässige Überlappung Kugeln mit Idealgeometrie	e	
Solveinstellungen	Zeitschrittgröße	h	
	Schrittweitensteuerung	variabel fix	
	Simulationsmodus	deterministisch nicht deterministisch	

²² Anm.: Bei den Kontaktmodellen „hertz“ und „hysteretic“ werden diese Werte über den Schubmodul G und die Poissonzahl ν gesteuert

²³ Anm.: Beim Kontaktmodell „hysteretic“ tritt an die Stelle des Dämpfungswertes in Normalenrichtung der Restitutionskoeffizient, eine tangentielle Dämpfung entfällt

Da eine große Anzahl an Faktoren in einer statistischen Versuchsplanung zu großem Aufwand führt, ist es nach [SBH10] und [KLE13] üblich, die Menge an Parametern auf vermutlich relevante Parameter zu reduzieren und die anderen dabei konstant zu halten. Bezogen auf Tabelle 17 werden daher die Parameter der Kategorien „Kontaktmodell“, „Approximation Körpergeometrie“ und „Solvereininstellungen“ nicht als Faktoren in Betracht gezogen, wobei die folgenden Ausführungen begründend sind:

- Die Solvereininstellung „variable Schrittweite“ führt zum genauesten möglichen Berechnungsergebnis bei akzeptabler Rechenschrittweite (eine fixe Schrittweite sollte nur bei genauer Kenntnis des Systemverhaltens und mit größter Sorgfalt gewählt werden). Der Simulationsmodus wird als deterministisch festgelegt, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.
- Der Einfluss verschiedener Kontaktmodelle auf die Simulationsergebnisse wurde im Vorfeld anhand eines Testszenarios untersucht. Dabei wurde dieselbe Anordnung mit unterschiedlichen Kontaktmodellen simuliert, wobei die Parameter der einzelnen Kontaktmodelle nach Möglichkeit aufeinander abgestimmt wurden (gleiche Reibwerte, Dämpfungswerte etc.).²⁴ Der Vergleich der Simulationsergebnisse zeigte, dass der Einfluss des gewählten Kontaktmodells nur sehr geringe Auswirkungen auf das makroskopische Bewegungsverhalten der Pakete hatte verglichen mit der Änderung anderer Parameter wie beispielsweise der Reibwerte. Demzufolge wurde der Parameter „Art des Kontaktmodells“ konstant gehalten, wobei der im Abschnitt 4.7.3 näher beschriebene Typ „hertz“ eingesetzt wurde.
- Hinsichtlich der Approximation der Körpergeometrie wurden im Vorfeld ebenfalls Testsimulationen durchgeführt (vgl. auch Kapitel 4.7). Anhand dieser Ergebnisse wurden Werte gewählt, die ein gutes Verhältnis zwischen angenäherter Geometrie und der Anzahl der dafür notwendigen Kugeln ergaben, um die Dauer von Versuchsläufen auch im Hinblick auf große Stückgutzahlen in einem akzeptablen Rahmen zu halten (vergleiche Tabelle 18). Da Wechselwirkungen zwischen den die Geometrie definierenden Parametern und denen des Kontaktmodells unwahrscheinlich erschienen, wurden die Werte für die Geometrie konstant gehalten.

Tabelle 18: Parameter zur Generierung der Multisphere-Körper

Parameter	ρ_{min} [-]	ϕ [°]	e [-]
Wert	0,2	145	1,01

²⁴ Anm.: Bei bestimmten Parametern war eine exakte Abstimmung nicht möglich, beispielsweise werden bei dem Kontaktmodell des Typs „linear“ die Kontaktsteifigkeiten als konstante Werte eingegeben, beim Typ „hertz“ erfolgt dagegen laufend eine neue Bestimmung dieser Werte in Abhängigkeit der Überlappung der Kontaktpartner.

Die verbleibenden Parameter, die im Wesentlichen das Kontaktverhalten bestimmen, wurden für die Versuchsläufe als Faktoren festgelegt, wobei je nach Versuch unterschiedliche Werte relevant sind (die Bandbreite wurde über Vorversuche bestimmt). Tabelle 19 bis Tabelle 23 listen die gewählten Faktoren und deren Stufeneinstellungen auf.

Tabelle 19: Faktorwerte Szenario „Pakete klein“ (1 Paket)

		Stufenwert -1	Stufenwert +1
A	Steifigkeit Paket – Abweiser (Schubmodul)	$G_{PA} = 4$ [GPa]	$G_{PA} = 9$ [GPa]
B	Kritisches Dämpfungsverhältnis (normal zur Kontaktfläche) Paket - Abweiser	$\beta_{PA} = 0,1$ [-]	$\beta_{PA} = 0,2$ [-]
C	Reibungskoeffizient Paket - Abweiser	$\mu_{PA} = 0,25$ [-]	$\mu_{PA} = 0,35$ [-]
D	Reibungskoeffizient Paket - Bandförderer	$\mu_{PB} = 0,3$ [-]	$\mu_{PB} = 0,4$ [-]

Tabelle 20: Faktorwerte Szenario „Pakete klein“ (2 Pakete)

		Stufenwert -1	Stufenwert +1
A	Steifigkeit Paket – Abweiser/Paket²⁵ (Schubmodul)	$G_{PA} = 4$ [GPa]	$G_{PA} = 9$ [GPa]
B	Kritisches Dämpfungsverhältnis (normal zur Kontaktfläche) Paket – Abweiser/Paket²⁵	$\beta_{PA} = 0,1$ [-]	$\beta_{PA} = 0,2$ [-]
C	Reibungskoeffizient Paket - Abweiser	$\mu_{PA} = 0,25$ [-]	$\mu_{PA} = 0,35$ [-]
D	Reibungskoeffizient Paket - Bandförderer	$\mu_{PB} = 0,3$ [-]	$\mu_{PB} = 0,4$ [-]
E	Reibungskoeffizient Paket - Paket	$\mu_{PP} = 0,2$ [-]	$\mu_{PP} = 0,3$ [-]

Tabelle 21: Faktorwerte Szenario „Pakete groß“ (2 Pakete)

		Stufenwert -1	Stufenwert +1
A	Steifigkeit Paket – Abweiser/Paket²⁵ (Schubmodul)	$G_{PA} = 4$ [GPa]	$G_{PA} = 9$ [GPa]
B	Kritisches Dämpfungsverhältnis (normal zur Kontaktfläche) Paket – Abweiser/Paket²⁵	$\beta_{PA} = 0,08$ [-]	$\beta_{PA} = 0,2$ [-]
C	Reibungskoeffizient Paket - Abweiser	$\mu_{PA} = 0,15$ [-]	$\mu_{PA} = 0,30$ [-]
D	Reibungskoeffizient Paket - Bandförderer	$\mu_{PB} = 0,3$ [-]	$\mu_{PB} = 0,7$ [-]
E	Reibungskoeffizient Paket - Paket	$\mu_{PP} = 0,2$ [-]	$\mu_{PP} = 0,4$ [-]

²⁵ Anm.: Bei den Versuchen mit zwei Paketen wurden sowohl die Steifigkeiten Paket-Abweiser und Paket-Paket als auch das Dämpfungsverhältnis in je einen Parameter zusammengefasst.

Tabelle 22: Faktorwerte Szenario „Fallversuch“ (1 Paket)

		Stufenwert -1	Stufenwert +1
A	Steifigkeit Paket – Bandförderer (Schubmodul)	$G_{PB} = 0,7$ [MPa]	$G_{PB} = 4$ [MPa]
B	Kritisches Dämpfungsverhältnis (normal zur Kontaktfläche) Paket - Bandförderer	$\beta_{PB} = 0,12$ [-]	$\beta_{PB} = 0,16$ [-]
C	Reibungskoeffizient Paket – Tisch (Aufbau)	$\mu_{PT} = 0,18$ [-]	$\mu_{PT} = 0,25$ [-]
D	Reibungskoeffizient Paket - Bandförderer	$\mu_{PB} = 0,35$ [-]	$\mu_{PB} = 0,5$ [-]

Tabelle 23: Faktorwerte Szenario „Fallversuch“ (2 Pakete)

		Stufenwert -1	Stufenwert +1
A	Normalsteifigkeit Paket – Bandförderer/Paket ²⁶	$G_{PB} = 1$ [MPa]	$G_{PB} = 40$ [MPa]
B	Kritisches Dämpfungsverhältnis (normal zur Kontaktfläche) Paket – Bandförderer/Paket	$\beta_{PB} = 0,08$ [-]	$\beta_{PB} = 0,20$ [-]
C	Reibung Paket – Tisch (Aufbau)	$\mu_{PT} = 0,18$ [-]	$\mu_{PT} = 0,25$ [-]
D	Reibung Paket - Bandförderer	$\mu_{PB} = 0,38$ [-]	$\mu_{PB} = 0,42$ [-]
E	Reibung Paket - Paket	$\mu_{PP} = 0,2$ [-]	$\mu_{PP} = 0,4$ [-]

5.3.2 Erstellung der Versuchspläne

Zweistufige Versuchspläne lassen Rückschlüsse auf ein lineares Verhalten der Zielgröße (Qualitätsmerkmal) in Abhängigkeit von Parameteränderungen zu, Abhängigkeiten höherer Ordnung können nur mit mehrstufigen (≥ 3 Stufen) Plänen festgestellt werden. Üblicherweise werden zweistufige Versuchspläne zu Beginn in der Screeningphase eingesetzt, um die Anzahl der Versuche zu begrenzen. In einer nachfolgenden Optimierungsphase kann dann der Einfluss ausgewählter Parameter mit Versuchsplänen, die mehr Faktorstufen beinhalten, genauer untersucht werden.

Bei der Durchführung der verschiedenen Simulationsläufe wurden bei den Versuchen mit einem Paket zweistufige vollfaktorielle Versuchspläne (sogenannte 2^k -Pläne) angewandt, bei jenen mit zwei Paketen zweistufige teilfaktorielle (auch als fraktionell faktorielle oder 2^{k-p} -Pläne bezeichnet)

²⁶ Anm.: Bei den Versuchen mit zwei Paketen wurden sowohl die Steifigkeiten Paket-Bandförderer und Paket-Paket als auch das Dämpfungsverhältnis in je einen Parameter zusammengefasst.

net), da hier bei vollfaktoriellen Versuchsplänen eine zu große Anzahl an Simulationsläufen entstanden wäre.²⁷ Demzufolge sind bei den Versuchen mit einem Paket alle Effekte und Wechselwirkungen unverfälscht als Ergebnis erhältlich, bei den Versuchen mit zwei Paketen sind Effekte mit Mehrfachwechselwirkungen (die üblicherweise sehr klein sind) vermischt, auch Zweifachwechselwirkungen sind nur vermengt mit Mehrfachwechselwirkungen erkennbar.

Die Anzahl der notwendigen Simulationsläufe ergibt sich bei zweistufigen vollfaktoriellen Versuchsplänen aus der Vorschrift

$$n_r = 2^{n_f}$$

mit n_r als der Anzahl der notwendigen Versuchsläufe und n_f als Anzahl der Faktoren. Bei den zweistufigen teilfaktoriellen Versuchen reduziert sich diese Anzahl entsprechend n_p Zuordnungen, wobei die Anzahl durch

$$n_r = \frac{1}{2^{n_p}} 2^{n_f} = 2^{n_f - n_p}$$

berechnet werden kann (vgl. [KLE13]). Im vorliegenden Fall wurden Pläne der Stufe V gewählt, d.h. Haupteffekte sind mit Vierfachwechselwirkungen vermengt und Zweifachwechselwirkungen mit Dreifachwechselwirkungen. Ein Versuchsplan dieser Stufe ist nach [SBH10] geeignet, ein ausreichend genaues lineares Beschreibungsmodell zu erhalten.

Die vollfaktoriellen Simulationsstudien des ebenen Fördervorgangs und des Fallversuchs mit einem Paket führen auf 16 Simulationsläufe. Für die fraktionell faktoriellen Simulationsstudien des ebenen Fördervorgangs mit zwei Paketen sowie des Fallversuchs mit zwei Paketen wurden ebenfalls 16 Läufe durchgeführt ($n_p = 1$).

Maßnahmen wie Blockbildung, Randomisierung oder Wiederholung gleicher Faktoreinstellungen sind bei deterministischen Simulationen im Gegensatz zu DoE-Studien mit reinen Messergebnissen nicht notwendig, auch eine Residuenanalyse (Normalverteilung und Unabhängigkeit der Fehler, gleiche Varianzen) fallen bei rechnergestützten Versuchen weg (vgl. [SBH10]).

Die Versuchspläne für die vier untersuchten Szenarien befinden sich im Anhang A2.

²⁷ Anm.: In den Versuchsplanbezeichnungen ist k gleichbedeutend mit der Anzahl n_f an Faktoren (vgl. Abschnitt 2.5.3)

6 Auswertungen der experimentellen Untersuchungen

Wie in der Einleitung des Kapitels 5 beschrieben, ist beim Umgang mit Modellen die Betrachtung deren Gültigkeit und Genauigkeit wesentlich. Dementsprechend werden in diesem Kapitel die Messergebnisse aus den im Unterkapitel 5.1 beschriebenen Versuchsszenarien ausgewertet und den Ergebnissen der Simulationsläufe entsprechend der Versuchsplanung aus Unterkapitel 5.3 gegenübergestellt. Ein wesentliches Ziel dabei ist die Identifikation jener Simulationsparameter, die alleine oder in Wechselwirkung mit einem anderen Parameter großen Einfluss auf das Bewegungsverhalten der Stückgüter in der Simulation haben. Durch die Minimierung der Zielgrößen (Abweichungen zwischen Simulations- und Messergebnissen) können dann nachfolgend optimale Parameterkombinationen gefunden werden.

Die Unterkapitel 6.1 bis 6.3 behandeln das Bewegungsverhalten von Stückgütern bei ebenen Fördervorgängen. In den Unterkapiteln 6.4 und 6.5 werden die Fallversuche analysiert. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse umfassen bei jedem Szenario die aufgezeichneten Bewegungsverläufe der einzelnen Versuchsläufe, die simulierten Bewegungsverläufe für jede Faktorstufenkombination nach Unterkapitel 5.3 sowie die Auswertung von Effekten und Wechselwirkungen entsprechend der Abweichungsanalyse. Exemplarisch ist dies am Beispiel des Szenarios „Pakete klein“ mit einem Paket im Anhang A3 dokumentiert, bei den weiteren Szenarien wurde in gleicher Weise vorgegangen, die nachfolgenden Ausführungen aber auf die wesentlichen Ergebnisse beschränkt.

Die Darstellungen der Unterkapitel 6.1 bis 6.5 folgen folgendem Aufbau: Im ersten Schritt werden die Messergebnisse beschrieben, die am Prüfstand ermittelt wurden. Dabei wird insbesondere auch eine Abweichungsanalyse durchgeführt, um Aussagen treffen zu können, wie nahe der Mittelwert der Messungen am realen Verlauf liegt. Im zweiten Schritt werden die Mittelwerte der Messungen den Ergebnissen der DoE-Simulationsstudie gegenübergestellt und die Effekte der einzelnen Faktoren auf die Abweichungen ermittelt.

6.1 Szenario „Pakete klein“ mit einem Paket

6.1.1 Ergebnisse aus den Prüfstandsversuchen

Abbildung 55 bis Abbildung 57 in Abschnitt 6.1.2 zeigen die Auswertungen der Kameraverfolgung des Pakets in x- und y-Richtung (Wegverlauf in Absolutwerten vom Nullpunkt nach den

Abbildungen aus Abschnitt 5.2.1 gemessen) sowie die Winkelauslenkung gegenüber der Anfangsstellung des Pakets. Die strichlierte Linie zeigt dabei den Mittelwert aus allen Versuchsläufen, die durchgezogene Linie entspricht den Simulationsergebnissen²⁸. Zusätzlich wurde in Abbildung 54 auch eine $y(x)$ -Darstellung erstellt, aus der man unter Verlust des zeitlichen Bezugs die Bewegungsbahn auf dem Bandförderer ersehen kann.

Um ein besseres Verständnis des Bewegungsablaufes zu ermöglichen, sind in Abbildung 54 auch die unterschiedlichen Phasen eingezeichnet sowie Momentaufnahmen der Paketlage zu unterschiedlichen Zeitpunkten abgebildet:

- Phase I: Bewegung vom Startpunkt bis zum Kontakt mit Abweiser 1
- Phase II: Gleitbewegung entlang des Abweisers 1
- Phase III: Drehung um die Spitze des Abweisers 1
- Phase IV: Bewegung zwischen Abweiser 1 und 2
- Phase V: Gleitbewegung entlang des Abweisers 2
- Phase VI: Drehung um die Spitze des Abweisers 2
- Phase VII: Bewegung des Pakets nach Beendigung des Kontakts zu Abweiser 2

Um das Maß der Abweichungen bestimmen zu können, wurden die Standardabweichungen σ_i der einzelnen Verläufe gegenüber dem Mittelwert zu jedem Aufnahmezeitpunkt t_i ermittelt. Sowohl der Maximalwert der Standardabweichung σ_{max} aus allen Werten als auch das arithmetische Mittel σ_m (aus allen Aufnahmezeitpunkten t_i) repräsentieren daraus ein Maß für die Genauigkeit der Messungen und sind in Tabelle 24 dokumentiert.

Die Messunsicherheit σ_μ des Mittelwerts zum realen Wert hängt von der Anzahl der Versuche n und der Standardabweichung σ_i der einzelnen Versuche wie folgt ab:

$$\sigma_\mu = \frac{\sigma_i}{\sqrt{n}}$$

Entsprechend dieser Beziehung erhält man durch Einsetzen der Versuchszahl und der maximalen Standardabweichung σ_{max} die Werte nach Tabelle 24.

Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Bewegungsabläufe am Prüfstand. Im Intervall von $\pm 2\sigma$ vom Mittelwert liegen 95,45% aller Messergebnisse, in Absolutwerten demzufolge innerhalb $\pm 8,2$ mm ($x(t)$ -Position), $\pm 2,8$ mm ($y(t)$ -Position) sowie $\pm 2,4^\circ$.

Bei den Messergebnissen ist davon auszugehen, dass sie aufgrund der zufälligen Abweichungen einer normalverteilten Grundgesamtheit entsprechen, zur Absicherung wurden stichprobenartig

²⁸ Anm.: Für den Vergleich wurden die Simulationsergebnisse mit jener Parametrierung herangezogen, die zu den geringsten Abweichungen gegenüber den Messergebnissen führten.

bei mehreren Zeitschritten Kolmogorov-Smirnov-Tests durchgeführt, wobei bei allen Stichproben der Größe $n = 10$ die Hypothese H_0 auf normalverteilte Werte nicht zu verwerfen war²⁹.

Tabelle 24: Abweichungsanalyse Szenario „Pakete klein“ (1 Paket)

	Standardabweichung (Maximalwert)	Standardabweichung (Mittelwert)	Messunsicherheit (Standardabweichung des Mittelwerts)	Anzahl der Versuche
	σ_{max}	σ_m	σ_μ	n
$x(t)$ -Verlauf	4,1 mm	1,9 mm	1,3 mm	10
$y(t)$ -Verlauf	1,4 mm	0,6 mm	0,4 mm	
$\varphi(t)$ -Verlauf	1,2°	0,4°	0,4°	

6.1.2 Simulationsergebnisse und Abweichungsanalyse

Durch die durchgeführten Simulationsläufe wurden entsprechend der Versuchsplanung aus Unterkapitel 5.3 für jede Faktoreinstellung Vergleichsergebnisse zu den Messwerten ermittelt. In Abbildung 54 bis Abbildung 57 werden jene Simulationsergebnisse den Mittelwerten der Versuchsergebnisse gegenübergestellt, die letzteren am nächsten lagen. Die bei diesen Verläufen zugrundeliegenden Parametereinstellungen können Tabelle 25 entnommen werden.

Tabelle 25: Faktorstufen und -werte des Simulationslaufs (Szenario „Pakete klein“, 1 Paket)

	A	B	C	D
Faktorstufe	1	-1	1	-1
Wert	9,0 [GPa]	0,1 [-]	0,35 [-]	0,3 [-]

Die Gegenüberstellung von Versuchs- und Simulationsergebnissen zeigt für den ebenen Fördervorgang mit einem Paket und Abweisern in allen Verläufen eine gute Übereinstimmung. Aus Abbildung 54 ist zu erkennen, dass insbesondere in der ersten Hälfte des Bewegungsverlaufs nahezu keine Abweichung feststellbar ist, in der zweiten Hälfte erreicht dann das Paket in der Simulation einen y -Wert quer zur Förderrichtung, der um etwa 4 cm vom Mittelwert der Versuchsergebnisse abweicht. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass sich bei der Drehung um den Abweiser 2 (Phase VI) ein etwa 12° von den Messergebnissen abweichender Verdrehungswinkel einstellt, der zu einer abweichenden y -Position am Bandförderer führt. Diese Tatsache spiegelt sich auch in den zeitlichen Verläufen (Abbildung 55 bis Abbildung 57) wider.

²⁹Anzumerken ist, dass dies keinen Beleg für eine Normalverteilung darstellt, da beim Kolmogorov-Smirnov-Test insbesondere bei kleinen Stichproben erst bei großen Abweichungen von der Normalverteilung die Hypothese H_0 zu verwerfen ist.

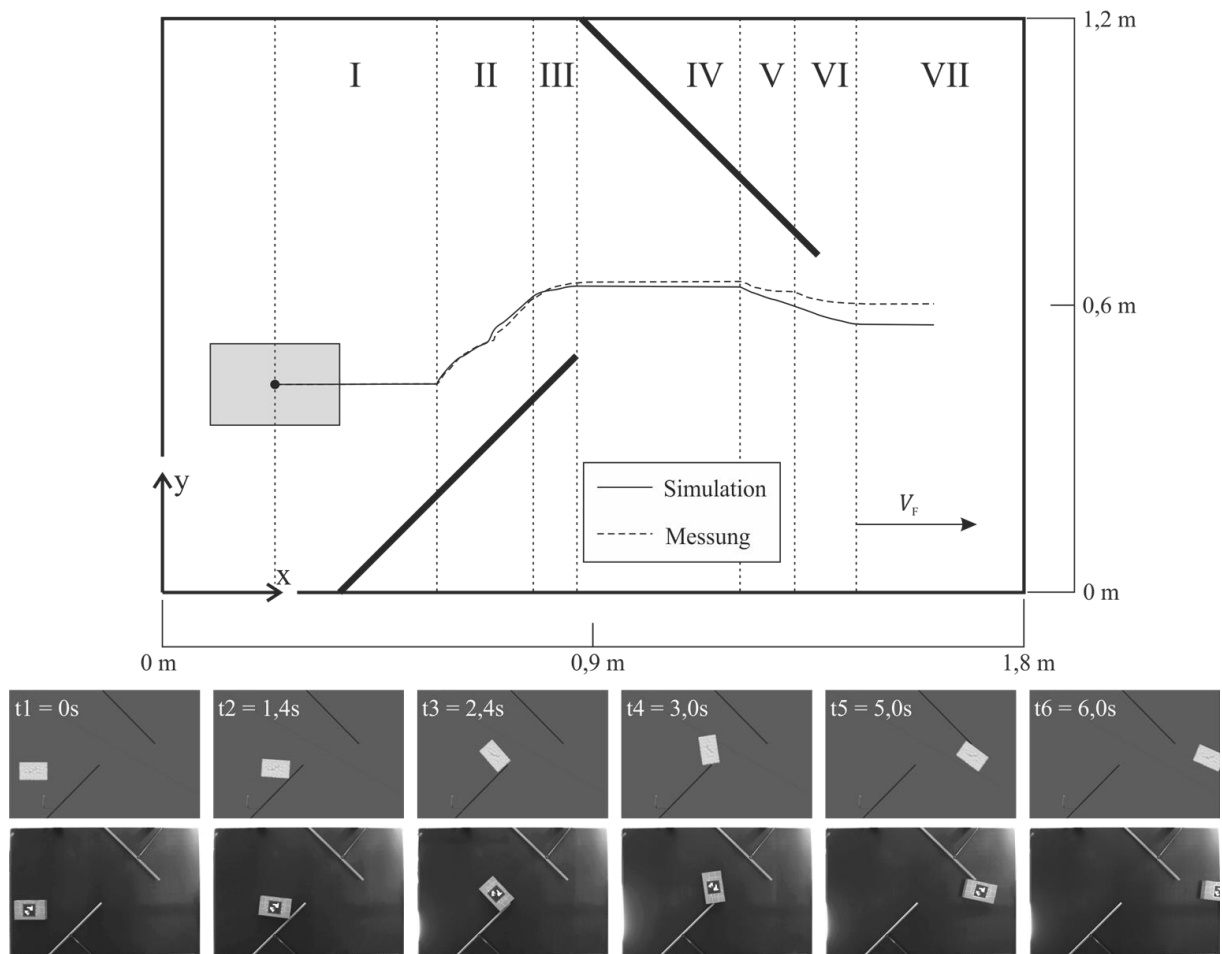


Abbildung 54: $y(x)$ -Verlauf Szenario „Pakete klein“ (1 Paket)³⁰

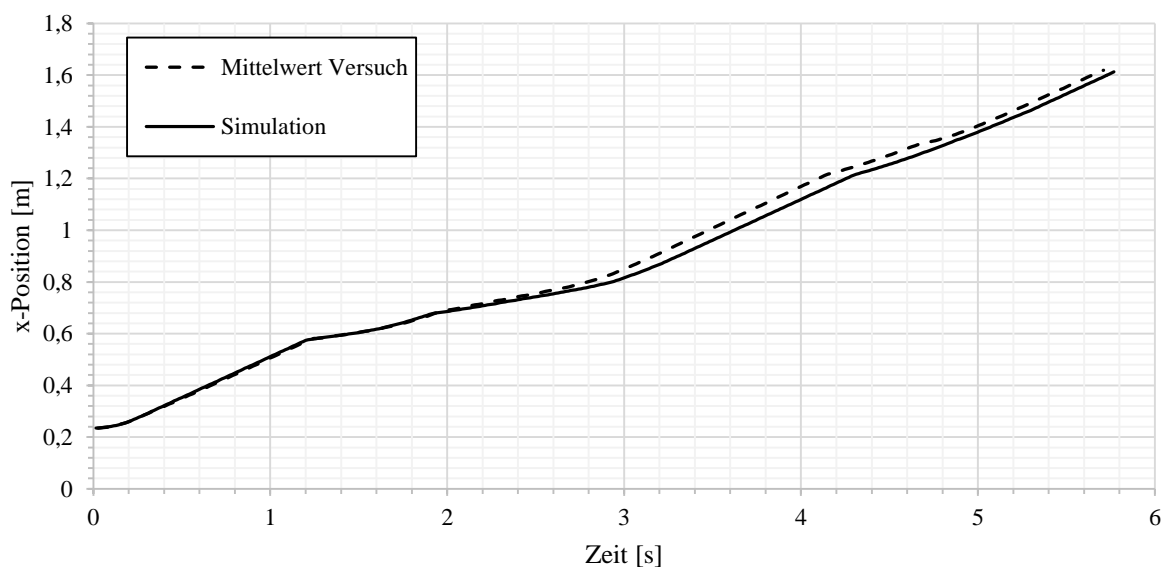


Abbildung 55: $x(t)$ -Verlauf Szenario „Pakete klein“ (1 Paket)

³⁰ Anm.: Die Aufnahmen aus den Prüfstandsversuchen entstammen einer Versuchsreihe, die zwangsläufig nicht mit dem Mittelwert gleichzusetzen ist. Daher können die Paketlagen in den Momentaufnahmen von den Werten aus Abbildung 55 bis Abbildung 57 abweichen.

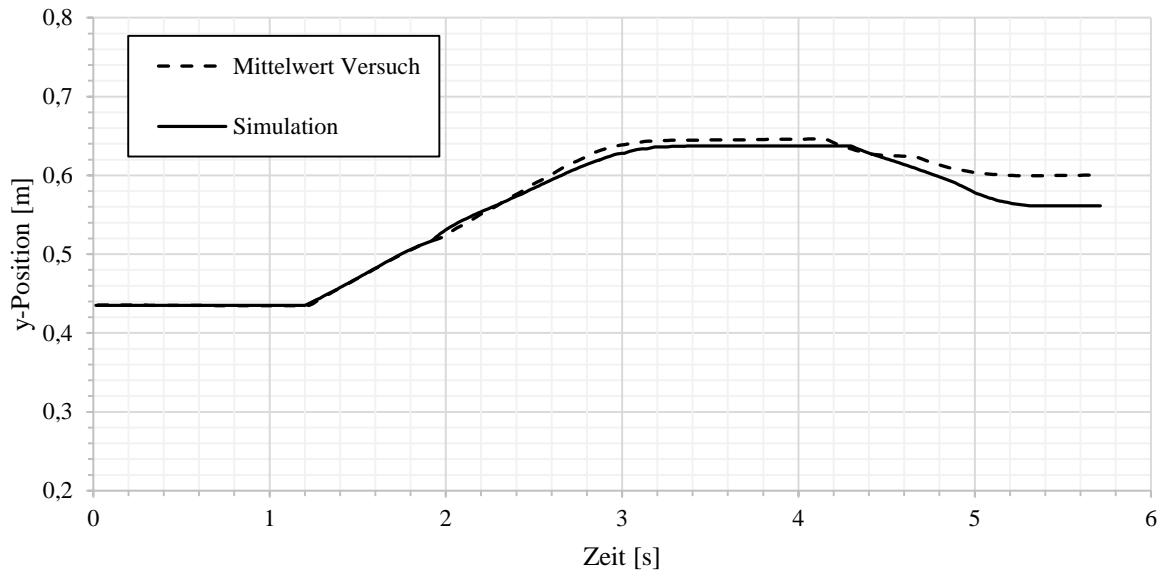


Abbildung 56: $y(t)$ -Verlauf Szenario „Pakete klein“ (1 Paket)

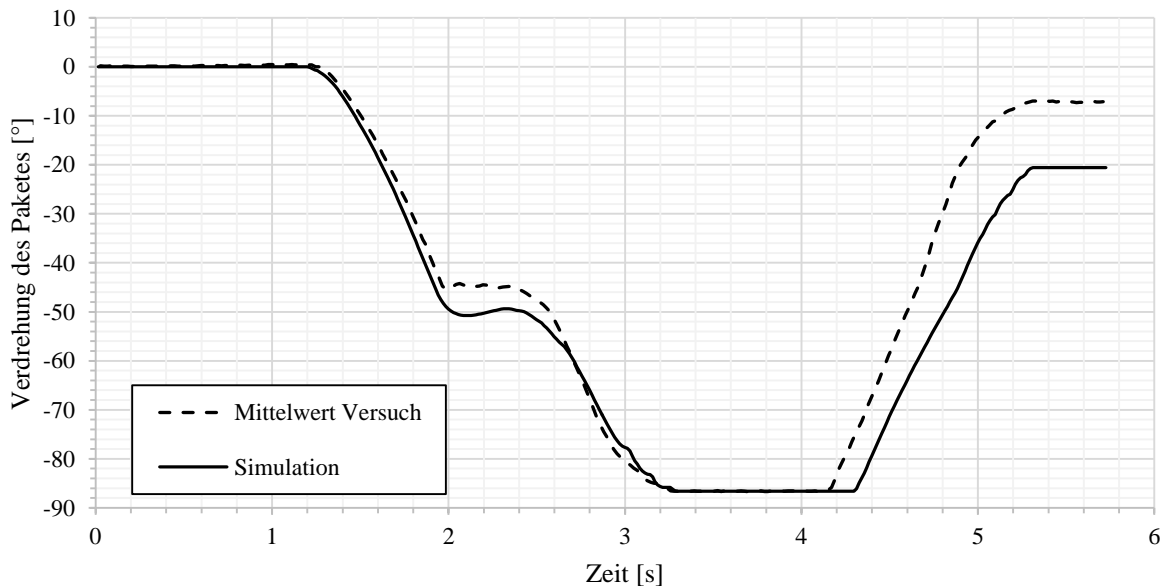


Abbildung 57: Winkelverlauf Szenario „Pakete klein“ (1 Paket)

Betrachtet man die Ergebnisse aus den Simulationsläufen im Fokus der DoE-Methodik, sind in Bezug auf die Zielgrößen (im vorliegenden Fall entsprechen diese den Abweichungen) auch der Einfluss der Faktoren und deren Wechselwirkungen von besonderem Interesse. Abbildung 58 zeigt diesbezüglich die maßgeblichen Einflussparameter in einem Pareto-Diagramm, das über das Softwarepaket Minitab® erstellt wurde. Daraus lassen sich jene Effekte und Wechselwirkungen ableiten, die als statistisch signifikant erkannt werden (Werte rechts der strichlierten Linie). Die gezeigten Darstellungen beziehen sich dabei auf den Zeitpunkt $t = 5$ s und zeigen die Effekte und Wechselwirkungen auf die Abweichungen zu diesem Zeitpunkt.

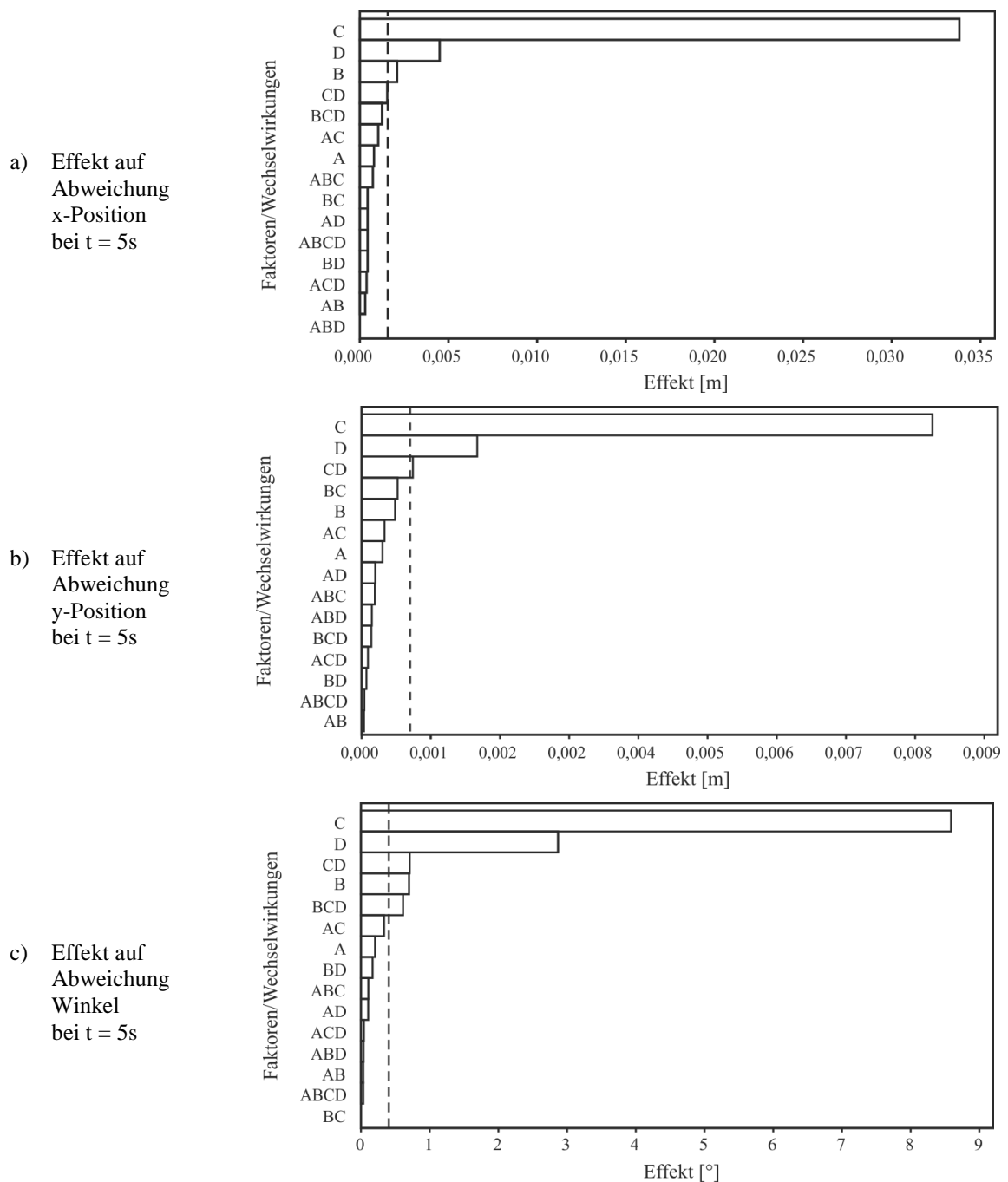


Abbildung 58: Paretdiagramm der Effekte Szenario „Pakete klein“ (1 Paket)

Wie man erkennen kann, ist der Reibungskoeffizient zwischen Paket und Abweiser (Faktor C) der bestimmende Parameter. Daneben gehören auch die Reibung zwischen Paket und Gurt (Faktor D) und die Wechselwirkung der Reibungskoeffizienten zu den signifikanten Einflüssen auf die Abweichungen.

6.2 Szenario „Pakete klein“ mit zwei Paketen

6.2.1 Ergebnisse aus den Prüfstandsversuchen

Abbildung 59 bis Abbildung 61 zeigen die Auswertungen der Kameraverfolgung der Pakete in x- und y-Richtung (Wegverläufe in Absolutwerten vom Nullpunkt nach den Abbildungen aus Kapitel 5.2.1 gemessen) sowie die Winkelauslenkungen gegenüber den Anfangsstellungen der Pakete. Die Verläufe entsprechen dabei den Mittelwerten der Versuchsläufe. Zusätzlich wurde in Abbildung 62 auch eine $y(x)$ -Darstellung mit Momentaufnahmen der Paketlagen erstellt, aus der die Bewegungsbahnen der Pakete auf dem Bandförderer ersehen werden können³¹.

Die Ergebnisse der Abweichungsanalyse zu den Messwerten analog zu Abschnitt 6.1.1 sind in Tabelle 26 dokumentiert. Die Ergebnisse zeigen wieder eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Bewegungsabläufe am Prüfstand im Intervall von $\pm 2\sigma$ vom Mittelwert liegen 95,45% aller Messergebnisse. Zusätzlich muss auch noch die bei der Kalibrierung zugelassene Abweichung berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 5.2.1).

Tabelle 26: Abweichungsanalyse Szenario „Pakete klein“ (2 Pakete)

		Standard- abweichung (Maximalwert)	Standard- abweichung (Mittelwert)	Messunsicherheit (Standardabweichung des Mittelwerts)	Anzahl der Versuche
		σ_{max}	σ_m	σ_μ	n
Paket 1	$x(t)$-Verlauf	6,6 mm	2,2 mm	2,1 mm	10
	$y(t)$-Verlauf	8,7 mm	1,7 mm	2,7 mm	
	$\varphi(t)$-Verlauf	4,8°	1,1°	1,5°	
Paket 2	$x(t)$-Verlauf	13,9 mm	3,5 mm	4,4 mm	
	$y(t)$-Verlauf	1,7 mm	0,8 mm	0,5 mm	
	$\varphi(t)$-Verlauf	3,6°	0,5°	1,1°	

6.2.2 Simulationsergebnisse und Abweichungsanalyse

Analog zu dem Szenario „Pakete klein“ mit einem Paket wurden entsprechend der Versuchsplanung aus Unterkapitel 5.3 für jede Faktoreinstellung die Bewegungsverläufe simuliert. In einem Folgeschritt wurde eine Optimierung der Parameter auf Basis einer Abweichungsminimierung zu bestimmten Zeitschritten durchgeführt, die auf die Parametereinstellungen aus Tabelle 27 führt. In

³¹ Anm.: Auf eine Phaseneinteilung wie in Abbildung 54 wurde hier verzichtet, da die einzelnen Phasen für jedes Paket unterschiedliche Bereiche aufweisen.

Abbildung 59 bis Abbildung 62 werden die mit diesem Parameterset erhaltenen Simulationsergebnisse den Mittelwerten der Versuchsergebnisse gegenübergestellt.

Tabelle 27: Faktorstufen³² und -werte des Simulationslaufs (Szenario „Pakete klein“, 2 Pakete)

	A	B	C	D	E
Faktorstufe	1	-	-	1	1
Wert	9,0 [GPa]	0,1717 [-]	0,2803 [-]	0,4 [-]	0,3 [-]

Die Gegenüberstellung von Versuchs- und Simulationsergebnissen zeigt für den ebenen Fördervorgang mit zwei Paketen in allen Verläufen eine gute Übereinstimmung. Trotz der Interaktion Paket-Paket als zusätzlicher möglicher Fehlerquelle sind die Abweichungen zum Teil sogar geringer als im Szenario mit einem Paket. Analog zu dem Versuch mit einem Paket entstehen deutlicher sichtbare Abweichungen erst in der zweiten Hälfte des Bewegungsverlaufs, die Positionsabweichungen liegen hier innerhalb von 3 cm. Die Abweichungen beider Bewegungsverläufe haben ähnliche Größenordnungen, was aufgrund gleicher Pakete auch erwartet wurde. In der zweiten Hälfte des Bewegungsablaufs weisen auch die Verläufe des Verdrehungswinkels über der Zeit Abweichungen auf, hier stellt sich gegen Ende der Bewegungsbahn bei beiden Paketen ein Wert von etwa 5° ein. Die Abweichung resultiert dabei aus der Drehung des Paketes 2 um die Spitze des Abweisers 2 bei gleichzeitigem Kontakt zu Paket 1.

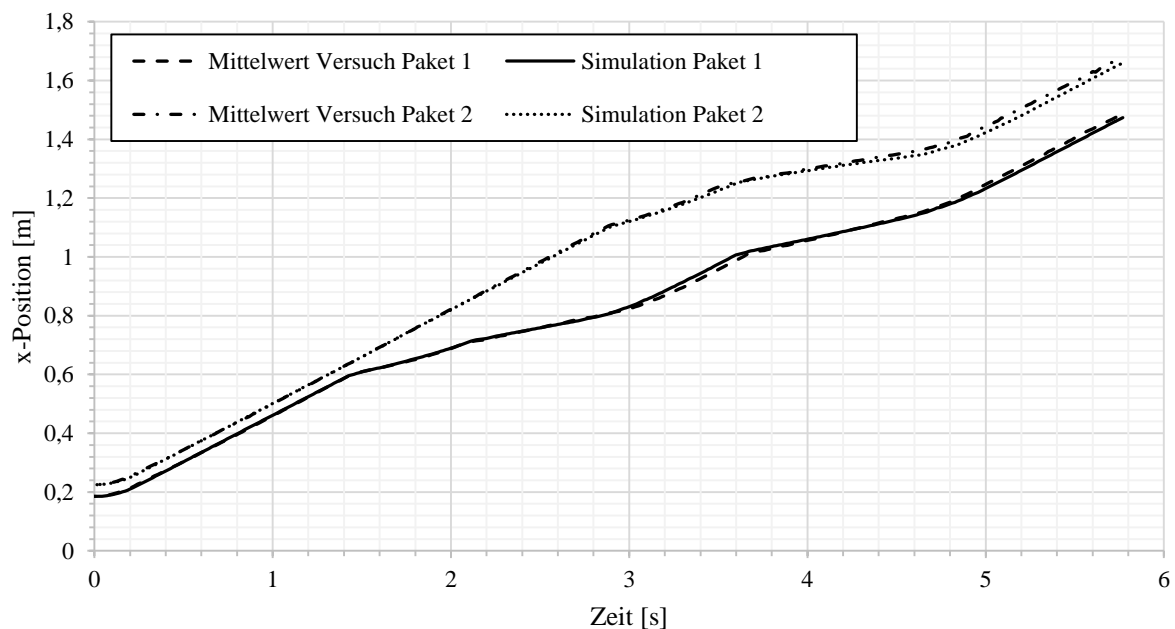


Abbildung 59: x(t)-Verlauf Szenario „Pakete klein“ (2 Pakete)

³² Anm.: Die erhaltenen Parameterwerte entsprechen zufolge der Optimierung z.T. nicht mehr einem konkreten Stufenwert, sondern liegen dazwischen. Dementsprechend kann für die Parameter B und C kein Stufenwert angegeben werden.

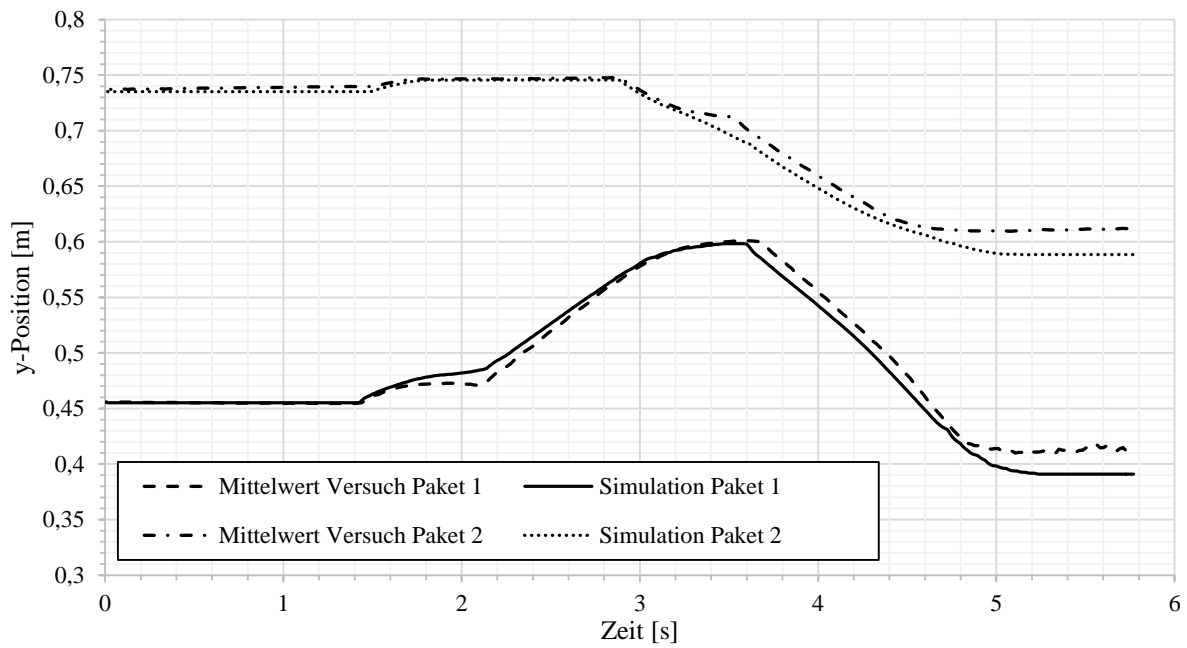
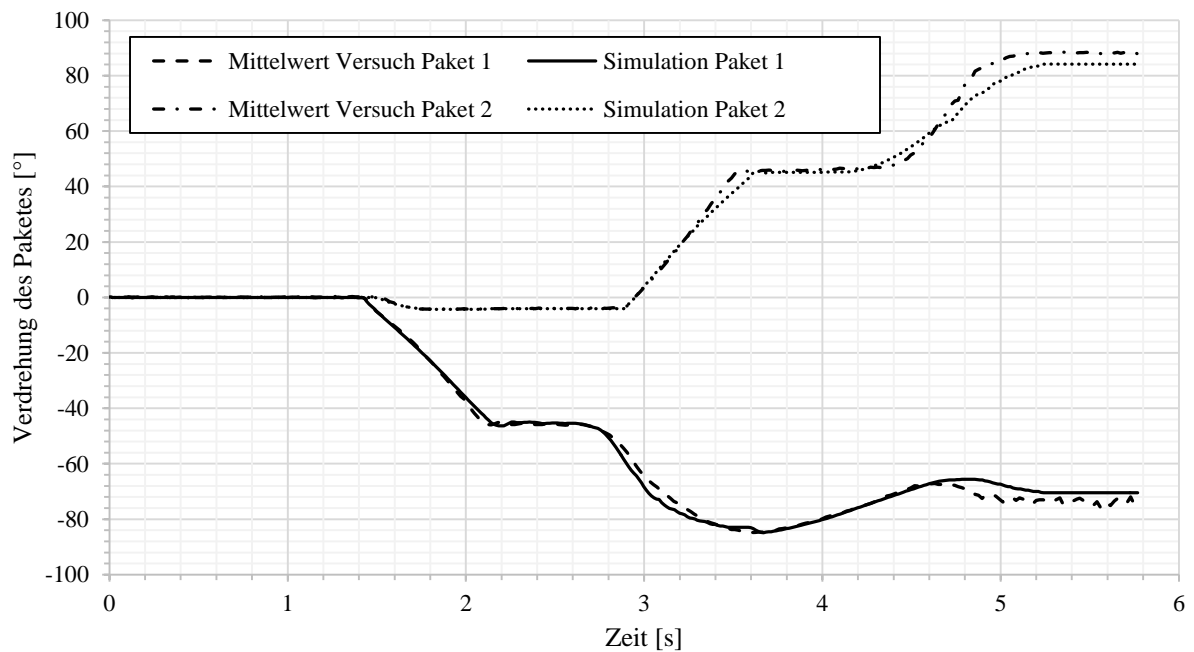
Abbildung 60: $y(t)$ -Verlauf Szenario „Pakete klein“ (2 Pakete)

Abbildung 61: Winkelverlauf Szenario „Pakete klein“ (2 Pakete)

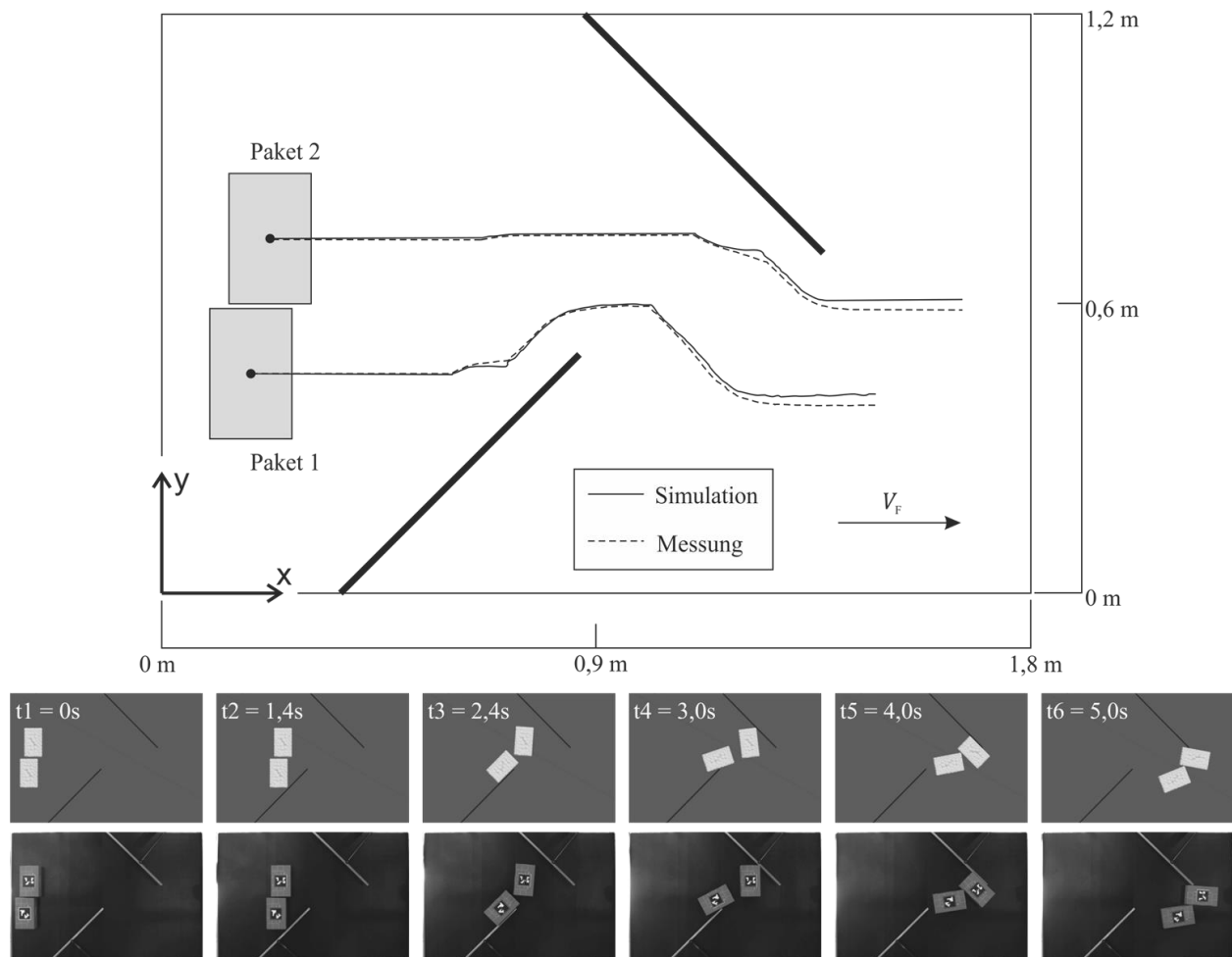
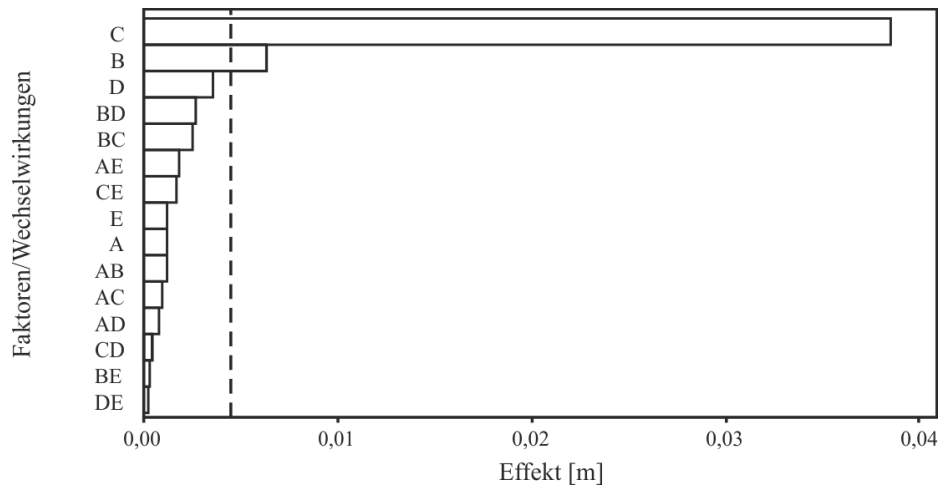


Abbildung 62: $y(x)$ -Verlauf Szenario „Pakete klein“ (2 Pakete)³³

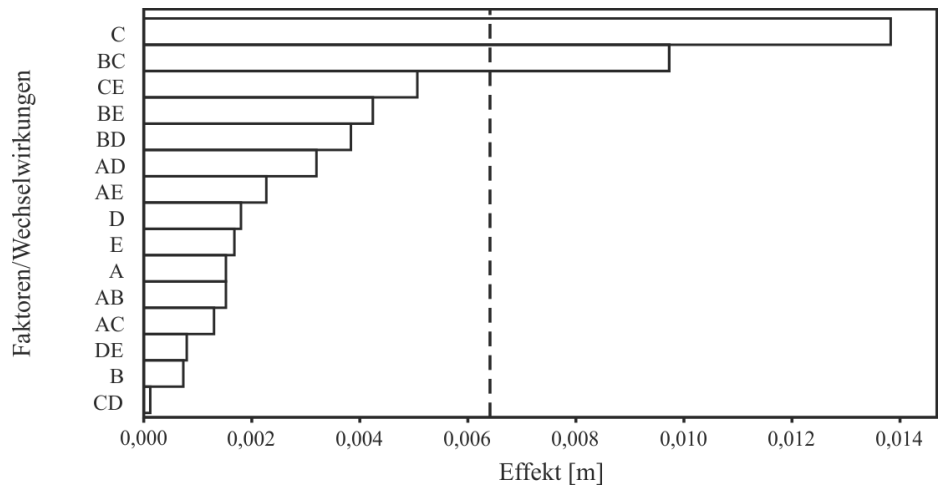
Die Auswertung der Ergebnisse im Sinne der statistischen Versuchsplanung ergab die Effekte und Wechselwirkungen der Simulationsparameter hinsichtlich der Abweichung zu den Prüfstandsergebnissen nach Abbildung 63 (Paket 1) und Abbildung 64 (Paket 2). Als Zeitpunkt wurde analog zum Szenario mit einem Paket $t = 5 \text{ s}$ gewählt, da in diesem Bereich die Abweichungen größer waren als in der ersten Hälfte der Bewegungsverläufe und somit die Effekte deutlicher ausfallen. Es dominiert der Effekt des Faktors C (Reibungskoeffizient Paket-Abweiser), zusätzlich hat auch Faktor B (Dämpfungsverhältnis) bzw. die Wechselwirkung BC signifikanten Einfluss. Der Effekt von Faktor C auf die Abweichung liegt bei den $x(t)$ -Verläufen und den $y(t)$ -Verläufen im Bereich von einigen Millimetern, wobei er bei den Abweichungen der y -Position größer ist. Starken Einfluss hat Faktor C auf die Abweichung der Winkelstellung der Pakete, insbesondere bei Paket 1 liegt er hier bei über 45° .

³³ Anm.: Die Aufnahmen aus den Prüfstandsversuchen entstammen einer Versuchsreihe, die zwangsläufig nicht mit dem Mittelwert gleichzusetzen ist. Daher können die Paketlagen in den Momentaufnahmen von den Werten aus Abbildung 59 bis Abbildung 61 abweichen.

a) Effekt auf Abweichung x-Position des Paketes 1 bei $t = 5s$



b) Effekt auf Abweichung y-Position des Paketes 1 bei $t = 5s$



c) Effekt auf Abweichung Winkel des Paketes 1 bei $t = 5s$

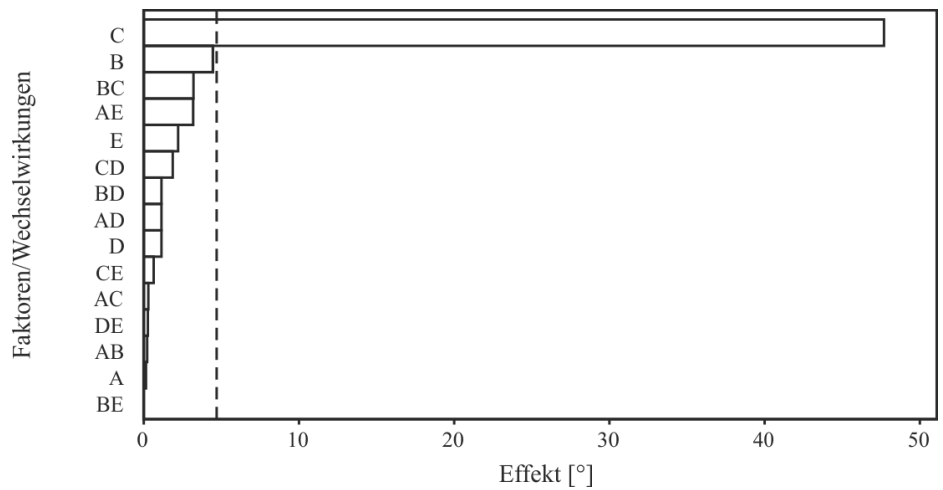
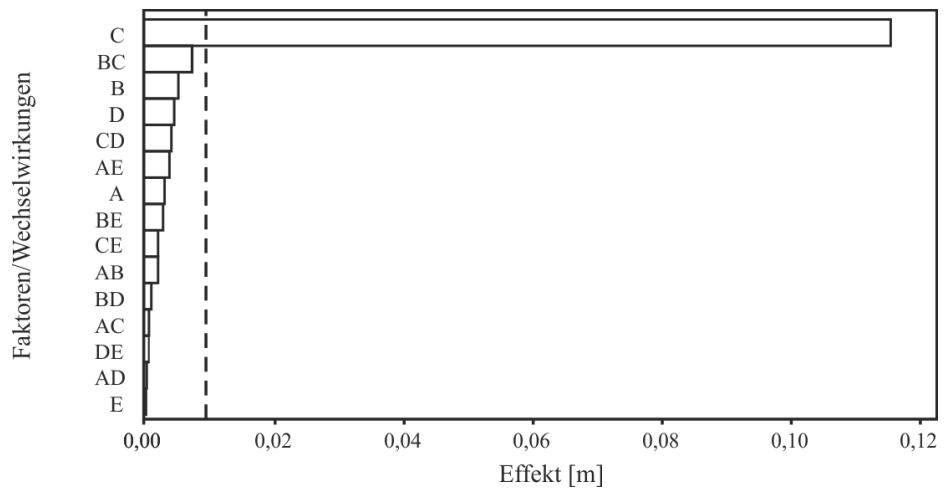
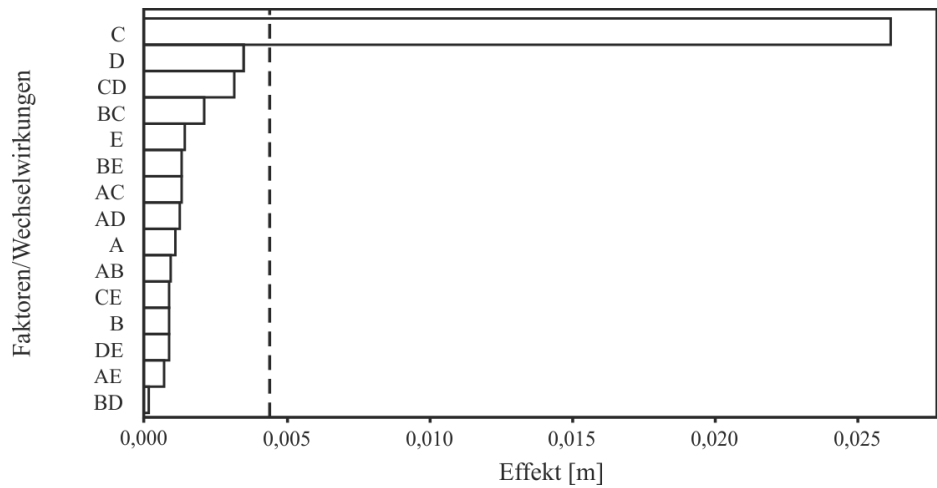


Abbildung 63: Paretodigramm der Effekte für Paket 1 (Szenario „Pakete klein“, 2 Pakete)

a) Effekt auf Abweichung x-Position des Paketes 2 bei t = 5s



b) Effekt auf Abweichung y-Position des Paketes 2 bei t = 5s



c) Effekt auf Abweichung Winkel des Paketes 2 bei t = 5s

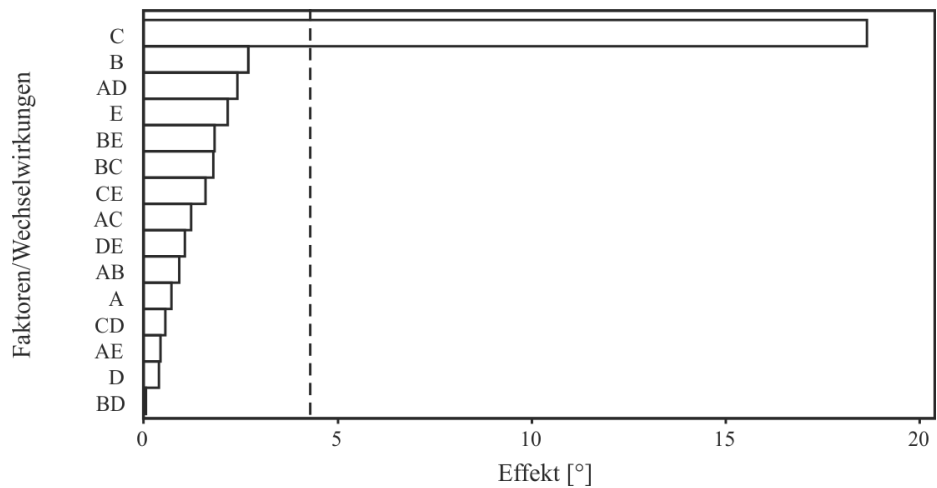


Abbildung 64: Paretdiagramm der Effekte für Paket 2 (Szenario „Pakete klein“, 2 Pakete)

6.3 Szenario „Pakete groß“ mit zwei Paketen

6.3.1 Ergebnisse aus den Prüfstandsversuchen

Abbildung 65 bis Abbildung 67 zeigen die Auswertungen der Kameraverfolgung der Pakete in x - und y -Richtung (Wegverläufe in Absolutwerten vom Nullpunkt nach den Abbildungen aus Abschnitt 5.2.1 gemessen) sowie die Winkelauslenkungen gegenüber den Anfangsstellungen der Pakete. Die Verläufe entsprechen dabei den Mittelwerten der Versuchsläufe. Zusätzlich wurde in Abbildung 68 auch eine $y(x)$ -Darstellung mit Momentaufnahmen der Paketlagen erstellt, aus der die Bewegungsbahnen der Pakete auf dem Bandförderer ersehen werden können³⁴.

Die Ergebnisse der Abweichungsanalyse zu den Messwerten sind in Tabelle 28 dokumentiert, sie zeigen eine etwas schlechtere Reproduzierbarkeit als im Szenario „Pakete klein“ (man vergleiche dazu auch die Ausführungen im Abschnitt 6.6.1). Insbesondere bei den Drehungen der Pakete um die Abweiserspitzen zeigen die Auswertungen eine höhere Streuung des $x(t)$ -Bewegungsverlaufs, in Tabelle 28 durch größere Maximalwerte σ_{max} erkennbar. Die Abweichungen des $y(t)$ -Bewegungsverlaufs sind ebenfalls höher als beim Szenario „Pakete klein“, wenn auch in deutlich geringerem Ausmaß. Die Verläufe des Verdrehungswinkels konnten in ähnlich guter Qualität reproduziert werden wie bei dem Szenario „Pakete klein“ (was angesichts der die Lage der Pakete definierenden Abweiser nachvollziehbar ist).

Tabelle 28: Abweichungsanalyse Szenario „Pakete groß“ (2 Pakete)

		Standard- abweichung (Maximalwert)	Standard- abweichung (Mittelwert)	Messunsicherheit (Standard- abweichung des Mit- telwerts)	Anzahl der Versuche
		σ_{max}	σ_m	σ_μ	n
Paket 1	$x(t)$ -Verlauf	49,6 mm	13,6 mm	15,7 mm	10
	$y(t)$ -Verlauf	15,3 mm	3,2 mm	4,9 mm	
	$\varphi(t)$ -Verlauf	4,7°	1,4°	1,5°	
Paket 2	$x(t)$ -Verlauf	35,0 mm	9,2 mm	11,1 mm	
	$y(t)$ -Verlauf	11,9 mm	4,6 mm	3,8 mm	
	$\varphi(t)$ -Verlauf	4,1°	1,1°	1,3°	

³⁴ Anm.: Auf eine Phaseneinteilung wie in Abbildung 54 wurde hier verzichtet, da die einzelnen Phasen für jedes Paket unterschiedliche Bereiche aufweisen.

6.3.2 Simulationsergebnisse und Abweichung zu Prüfstandswerten

Entsprechend der Versuchsplanung aus Kapitel 5.3 liegen für jede Faktoreinstellung die simulierten Bewegungsabläufe vor, in Abbildung 65 bis Abbildung 68 werden jene Simulationsergebnisse den Mittelwerten der Versuchsergebnisse gegenübergestellt, die letzteren am nächsten lagen. Die diesen Verläufen zugrundeliegenden Parametereinstellungen können Tabelle 29 entnommen werden³⁵.

Tabelle 29: Faktorstufen und -werte des Simulationslaufs (Szenario „Pakete groß“, 2 Pakete)

	A	B	C	D	E
Faktorstufe	1	-1	1	1	-1
Wert	9,0 [GPa]	0,08 [-]	0,3 [-]	0,7 [-]	0,2 [-]

Die Gegenüberstellung von Versuchs- und Simulationsergebnissen zeigt für das Szenario „Pakete groß“ in allen Verläufen eine gute Übereinstimmung. Aus Abbildung 68 ist erkennbar, dass Versuch und Simulation bei der Drehung des Paketes 1 um die Spitze des Abweisers 1 bei gleichzeitigem Kontakt zu Paket 2 etwas stärker abweichen als in den anderen Bereichen. Die Abweichung der Bewegungsbahnen liegt hier im Bereich von 2,5 cm in y-Richtung. Ähnliches lässt sich bei der Drehung von Paket 2 um Abweiser 2 beobachten, hier beträgt der Wert etwa 4,5 cm (y-Richtung).

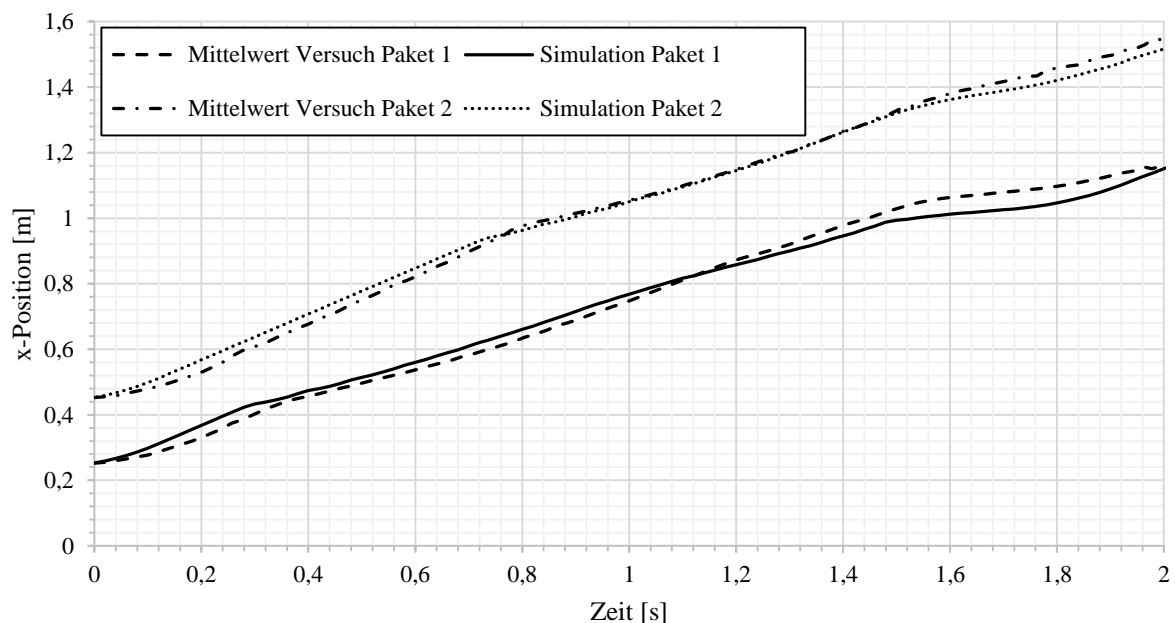


Abbildung 65: x(t)-Verlauf Szenario „Pakete groß“ (2 Pakete)

³⁵ Im Gegensatz zum Szenario „Pakete klein“ brachte eine Abweichungsoptimierung der Stellparameter zu ausgewählten Zeitschritten keine Verbesserung, daher entsprechen alle Werte aus Tabelle 29 einem konkreten Stufenwert.

Betrachtet man die Bewegungsverläufe über der Zeit, so lassen sich die maximalen Abweichungen zwischen Mittelwert Versuch und Simulation (Absolutwerte) mit 8 cm ($x(t)$ -Verlauf Paket 1), 4 cm ($y(t)$ -Verlauf Paket 2) und $4,4^\circ$ (Verdrehungswinkel Paket 1) festhalten.

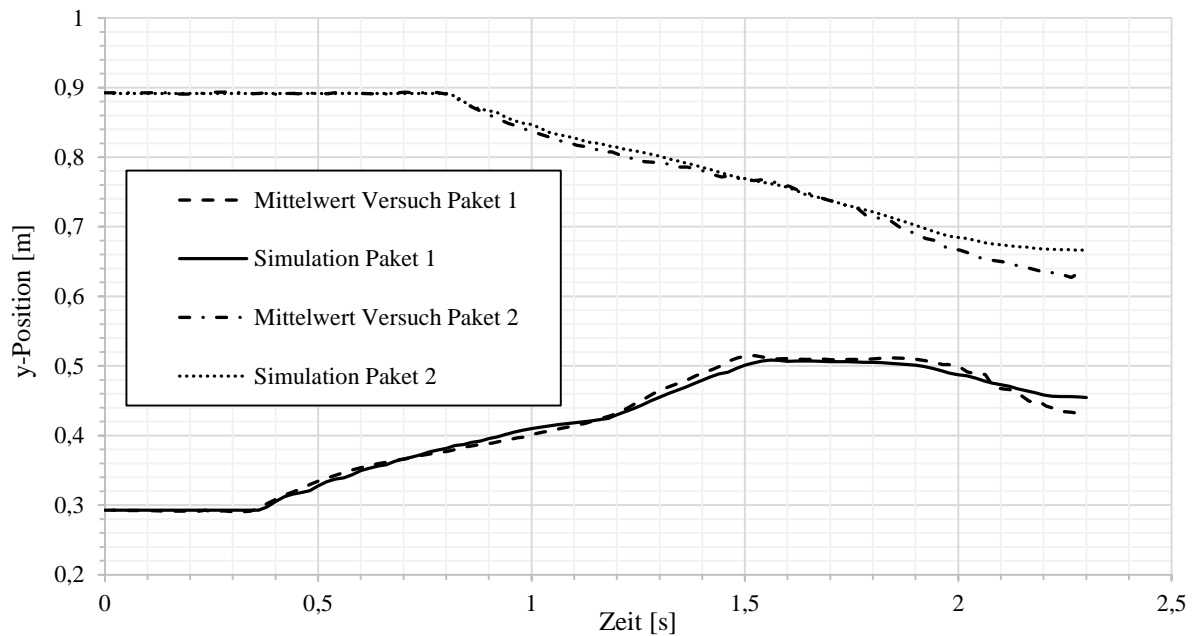


Abbildung 66: $y(t)$ -Verlauf Szenario „Pakete groß“ (2 Pakete)

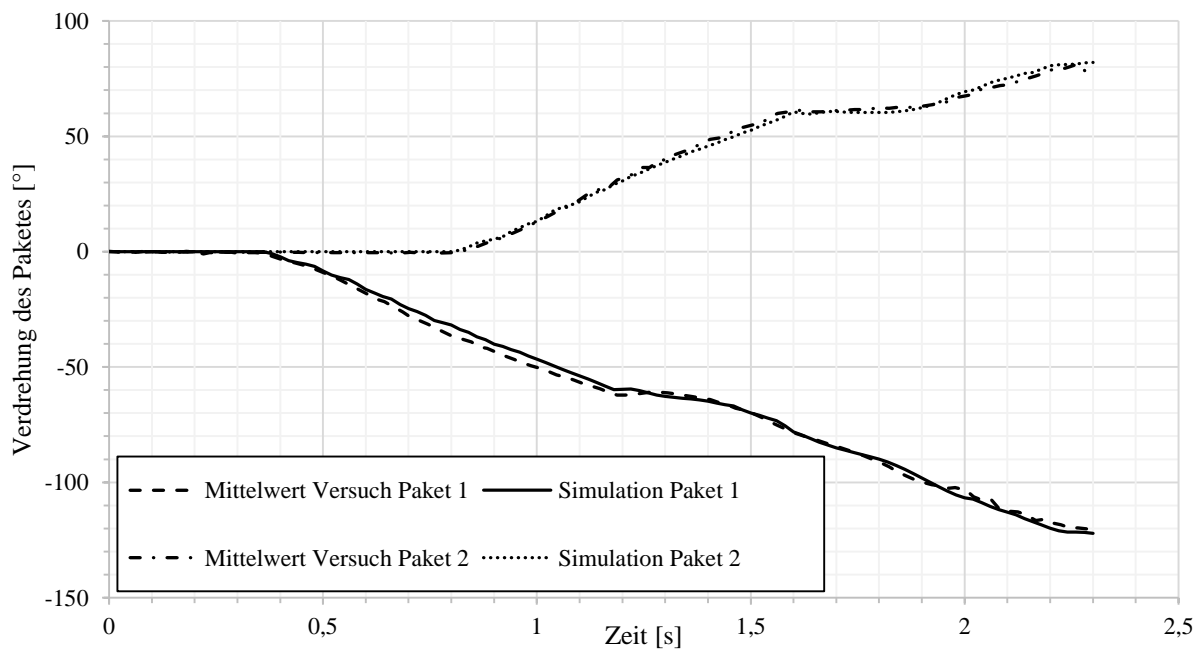


Abbildung 67: Winkelverlauf Szenario „Pakete groß“ (2 Pakete)

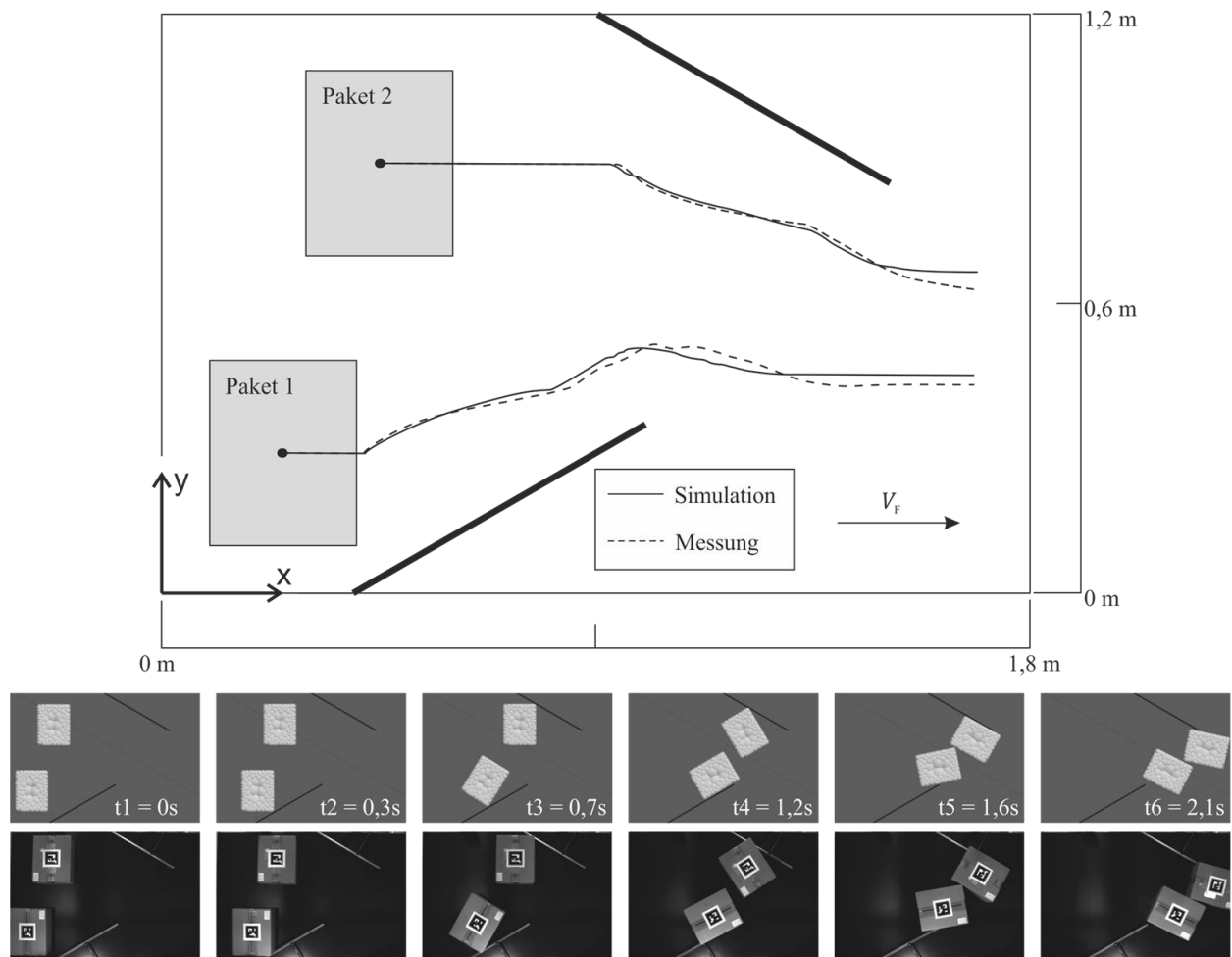


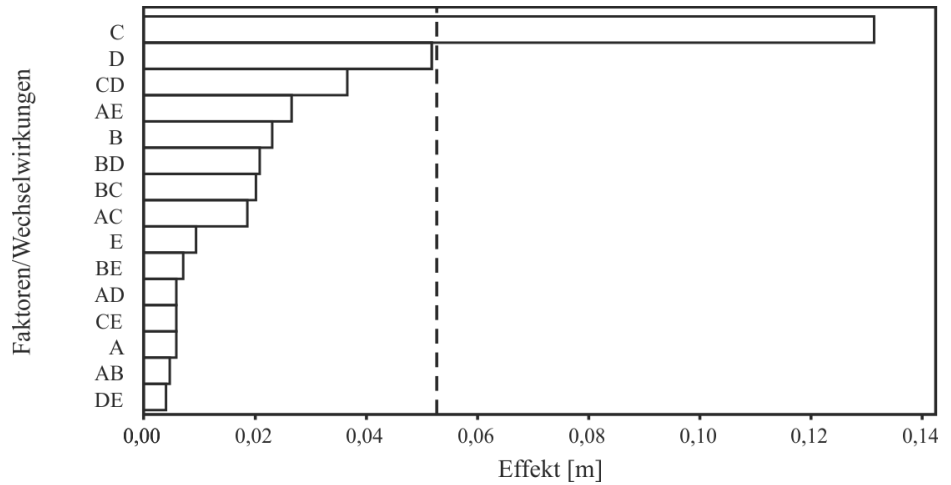
Abbildung 68: $y(x)$ -Verlauf Szenario „Pakete groß“ (2 Pakete)³⁶

Die Ergebnisse der DoE-Studie ergaben die Effekte und Wechselwirkungen für Paket 2 nach Abbildung 69³⁷. Hinsichtlich der Abweichung des $x(t)$ - und $y(t)$ -Verlaufes von Paket 2 bei $t = 2s$ dominiert der Effekt des Faktors C (Reibungskoeffizient Paket-Abweiser). Zusätzlich hat auch die Wechselwirkung CD (Reibung Paket-Abweiser mit Reibung Paket-Bandförderer) signifikanten Einfluss. Die Abweichung des Verdrehungswinkels wird maßgeblich von Faktor D (Reibung Paket-Bandförderer) und der Wechselwirkung BC (Dämpfungsrate mit Reibung Paket-Abweiser) beeinflusst. Ähnlich wie bei den bisher beschriebenen Szenarien beträgt die Effektgröße bei den translatorischen Bewegungsverläufen wenige Millimeter ($<14\text{mm}$), hinsichtlich der Abweichung des Winkels annähernd 10° .

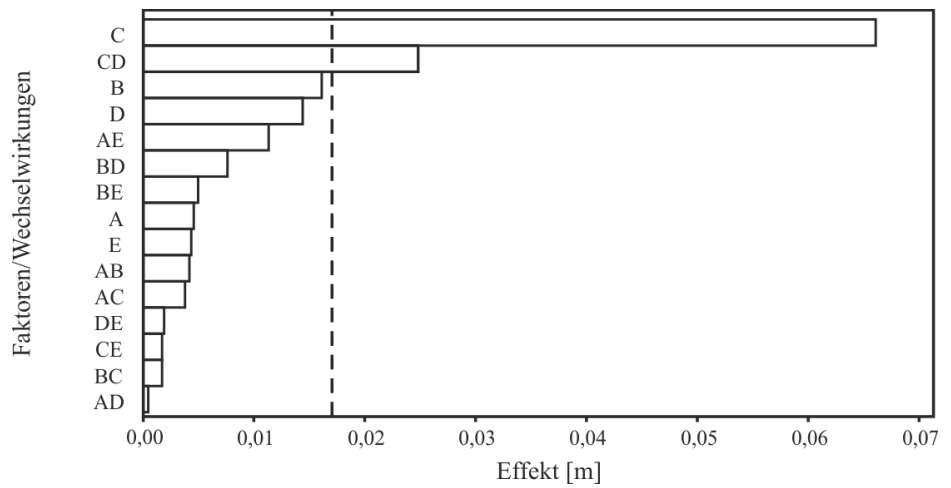
³⁶ Anm.: Die Aufnahmen aus den Prüfstandsversuchen entstammen aus einer Versuchsreihe, die zwangsläufig nicht mit dem Mittelwert gleichzusetzen ist. Daher können die Paketlagen in den Momentaufnahmen von den Werten aus Abbildung 65 bis Abbildung 67 abweichen.

³⁷ Anm.: Für die Abweichungen des Paketes 1 konnten keine signifikanten Effekte und Wechselwirkungen der Simulationsparameter festgestellt werden, daher wurde auf eine Darstellung verzichtet.

a) Effekt auf Abweichung x-Position des Paketes 2 bei $t = 2s$



b) Effekt auf Abweichung y-Position des Paketes 2 bei $t = 2s$



c) Effekt auf Abweichung Winkel des Paketes 2 bei $t = 2s$

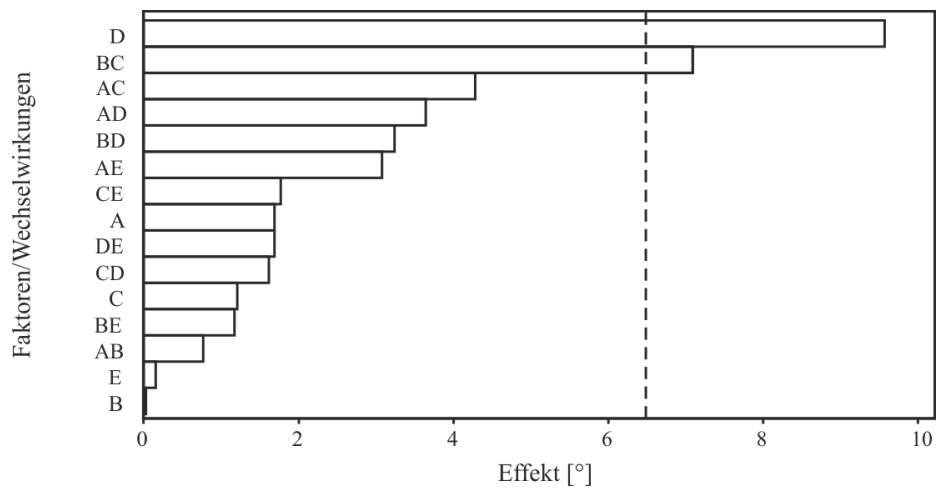


Abbildung 69: Paretdiagramm der Effekte (Szenario „Pakete groß“, 2 Pakete)

6.4 Szenario „Fallversuch“ mit einem Paket

Abbildung 70 zeigt die Auswertung der Mittelwerte der mit dem Gyrosensor aufgenommenen Winkelgeschwindigkeiten um die y-Achse³⁸. Die strichlierte Linie zeigt dabei den Mittelwert aus den zugehörigen Versuchsläufen.

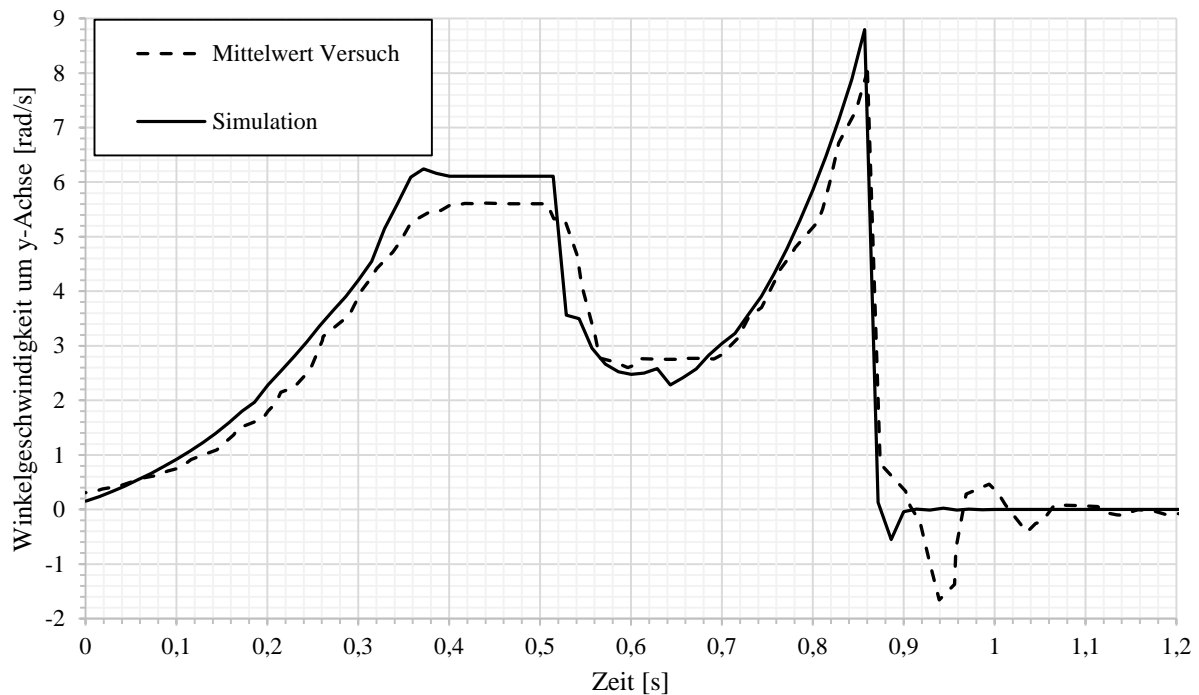


Abbildung 70: Winkelgeschwindigkeit um die y-Achse (Szenario „Fallversuch“, 1 Paket)

Der Verlauf der Winkelgeschwindigkeit um die y-Achse aus der Simulation ist in Abbildung 70 als durchgezogene Linie dargestellt, wobei jener Simulationslauf für den Vergleich herangezogen wurde, der mit den Faktorwerten aus der Optimierung (Minimierung der summierten Abweichungen zu den Zeitschritten $t = 0,5s$, $t = 0,7s$, $t = 0,85s$) der DoE-Studie generiert wurde. Diese Werte sind in Tabelle 30 dokumentiert.

Tabelle 30: Faktorstufen³⁹ und -werte des Simulationslaufs (Szenario „Fallversuch“, 1 Paket)

	A	B	C	D
Faktorstufe	-	-1	-	1
Wert	3,83 [MPa]	0,12 [-]	0,2 [-]	0,5 [-]

³⁸ Anm.: Jene um die x- und z-Achse sollten im Idealfall den Wert 0 aufweisen, aufgrund der Vereinfachungen bei der Modellbildung (Simulation) beziehungsweise der nicht ideal möglichen Versuchsdurchführung wurden aber sowohl bei den Versuchen als auch in der Simulation Werte abweichend von null aufgezeichnet, vgl. Anhang A3.

³⁹ Anm.: Die erhaltenen Parameterwerte entsprechen zufolge der Optimierung z.T. nicht mehr einem konkreten Stufenwert, sondern liegen dazwischen. Dementsprechend kann für die Parameter A und C kein Stufenwert angegeben werden.

Betrachtet man zusätzlich zu den Geschwindigkeitsverläufen die Kameraaufnahmen sowie die Schnappschüsse aus der Simulation (Abbildung 71), so lässt sich der Bewegungsablauf des Paketes nachvollziehen: Zuerst erfolgt ein Kippen des Pakets um die Vorderkante des Aufbaus über dem Bandförderer. Dabei nimmt die Winkelgeschwindigkeit zu, gefolgt vom Abgleiten des Pakets an der Vorderkante des Aufbaus und einer kurzen Phase des freien Falls zwischen $t = 0,35$ s und $t = 0,52$ s. Danach trifft das Paket mit einer Kante auf dem Bandförderer auf, gleichzeitig verringert sich die Winkelgeschwindigkeit auf etwa $\omega_y = 2,5$ rad/s. Danach kippt das Paket um die Kante, mit der es auf dem Bandförderer aufgetroffen ist, weiter nach vorne, wobei die Winkelgeschwindigkeit wieder ansteigt. Kurz nachdem das Paket mit der beim Start obenliegenden Seite flach auf dem Bandförderer auftrifft, stellt sich nach einem kurzen Abheben der dem Aufbau näheren Paketkante die Ruhelage ein.

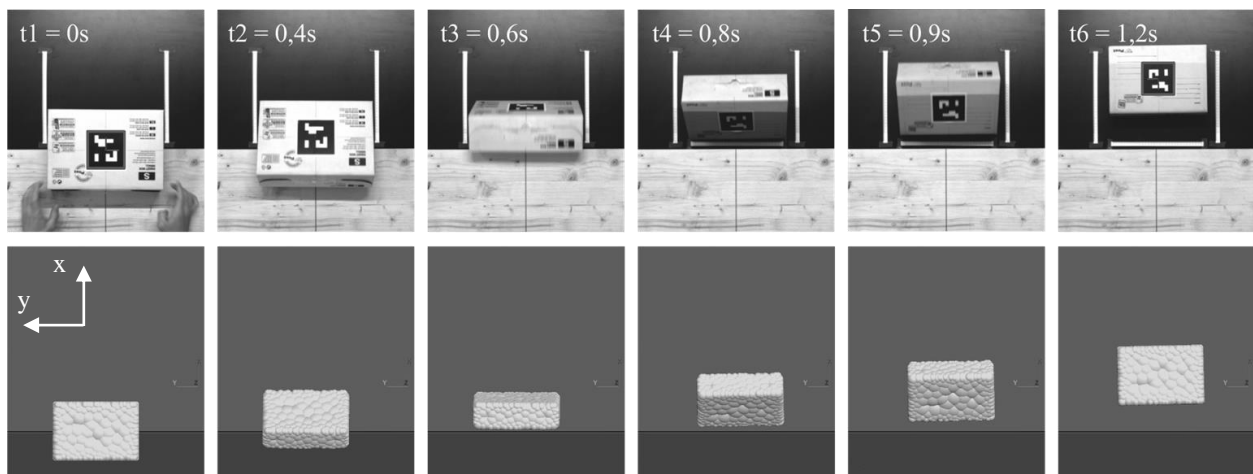
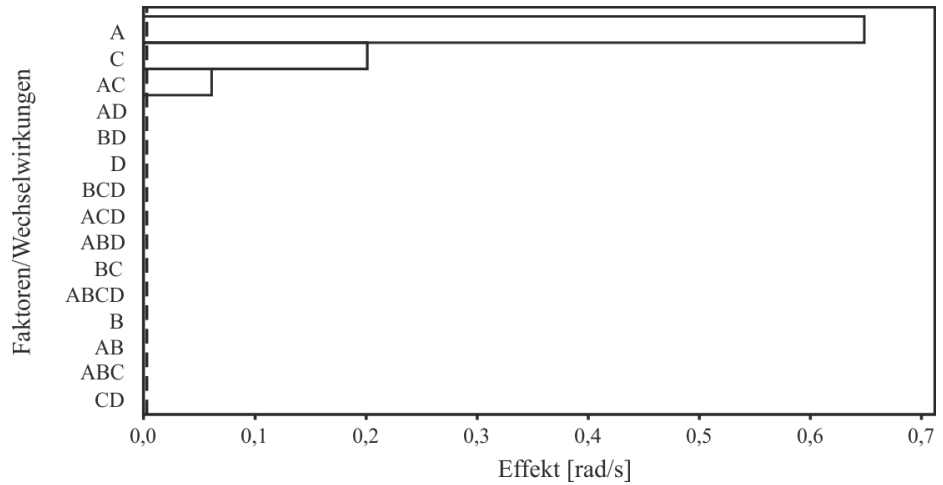


Abbildung 71: Momentaufnahmen Bewegungsablauf (Szenario „Fallversuch“, 1 Paket)⁴⁰

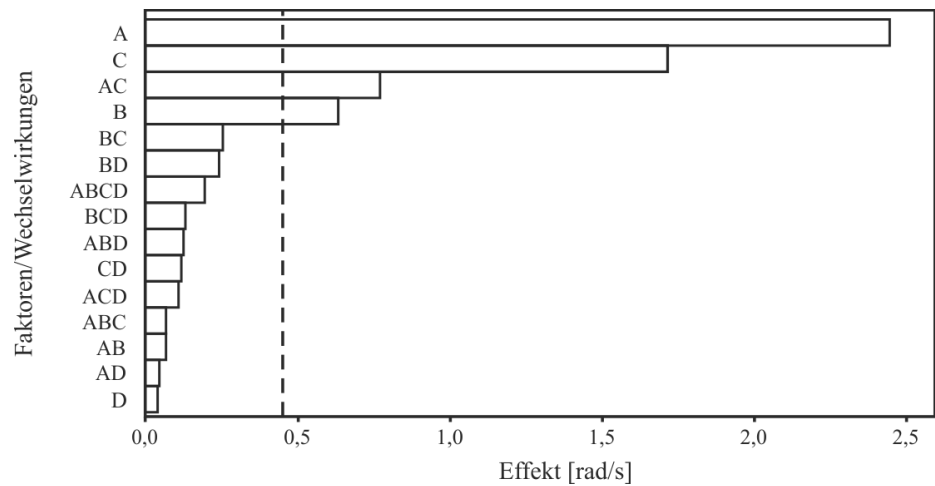
Die Ergebnisse der DoE-Studie ergaben die Effekte und Wechselwirkungen nach Abbildung 72, als Analysezeitpunkte wurden Werte herangezogen, bei denen keine hohen Gradienten („Sprünge“) im Winkelgeschwindigkeitsverlauf auftraten. Der erste Zeitpunkt wurde mit $t = 0,5$ s festgelegt, da hier der Kippvorgang um die Kante des Aufbaus schon abgeschlossen ist. Der zweite Analysezeitpunkt ($t = 0,7$ s) erfasst die Winkelgeschwindigkeit nach dem Auftreffen des Paketes auf dem Bandförderer und der dritte Zeitpunkt die Phase kurz bevor das Paket auf dem Bandförderer zu liegen kommt ($t = 0,85$ s). Bei allen drei Analysezeitpunkten dominieren die Effekte der Faktoren A (Steifigkeit) und C (Reibungskoeffizient Paket-Tisch) sowie deren Wechselwirkung. Zusätzlich hat auch Faktor B (Dämpfungswert) signifikanten Einfluss auf die Abweichung zum Zeitpunkt $t = 0,7$ s.

⁴⁰ Anm.: Die Aufnahmen aus den Prüfstandsversuchen entstammen aus einer Versuchsreihe, die zwangsläufig nicht mit dem Mittelwert gleichzusetzen ist.

a) Effekt auf Abweichung Winkelgeschwindigkeit bei $t = 0,5$ s



b) Effekt auf Abweichung Winkelgeschwindigkeit bei $t = 0,7$ s



c) Effekt auf Abweichung Winkelgeschwindigkeit bei $t = 0,85$ s

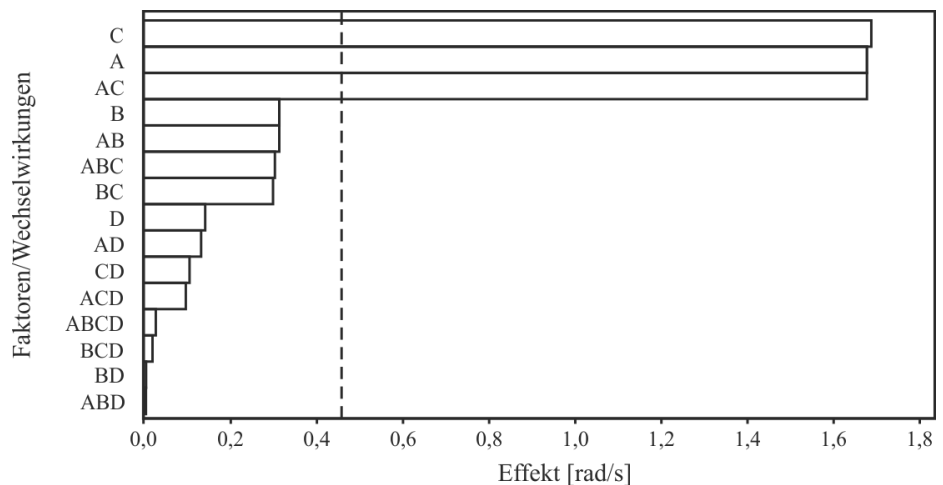


Abbildung 72: Paretdiagramm der Effekte (Szenario „Fallversuch“, 1 Paket)

Da die Geschwindigkeitsverläufe der einzelnen Versuche Stellen mit hohen Gradienten aufweisen, die zeitlich um kleine Beträge zueinander verschoben sind, ist eine statistische Auswertung der Standardabweichungen der gemessenen Geschwindigkeiten nur bedingt sinnvoll. Daher wurde als

zusätzliche Vergleichsmöglichkeit die Ruhelage des Pakets nach Beendigung des jeweiligen Fallversuchs aufgezeichnet. Die entsprechenden Werte können Tabelle 31 entnommen werden, wobei Δx und Δy die Abstände der Endlage des Pakets zur Anfangslage (Projektion auf die Oberfläche des Bandförderers, vgl. auch Abbildung 52 auf Seite 84) sind und $\Delta\varphi$ die Verdrehung um die z-Achse ausgehend von der Startposition.

Tabelle 31: Positionswerte der Paketendlage (Szenario „Fallversuch“, 1 Paket)

		Δx [mm]	Δy [mm]	$\Delta\varphi$ [°]
Versuch	Mittelwert	233,8	4,9	-1,6
	Standardabweichung	2,9	2,7	1,4
Simulation		223,9	0,1	0,5
Abweichung Mittelwert Versuch zu Simulation		9,9	4,8	2,1
Grafische Darstellung				

6.5 Szenario „Fallversuch“ mit zwei Paketen

Abbildung 73 zeigt die Auswertung der mit dem Gyrosensor aufgenommenen Winkelgeschwindigkeit (bei Versuchsstart untenliegendes Paket) um die y-Achse. Die strichlierte Linie zeigt dabei den Mittelwert aus den zugehörigen Versuchsläufen. Der Verlauf der Winkelgeschwindigkeit aus der Simulation ist als durchgezogene Linie dargestellt, wobei jener Simulationslauf für den Vergleich herangezogen wurde, der die beste Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen aufweist. Die zugehörigen Faktorstufen und -werte können Tabelle 32 entnommen werden.

Tabelle 32: Faktorstufen und -werte des Simulationslaufs (Szenario „Fallversuch“, 2 Pakete)

	A	B	C	D	E
Faktorstufe	-1	-1	1	1	1
Wert	1,0 [MPa]	0,08 [-]	0,25 [-]	0,42 [-]	0,40

Vergleicht man die beiden Verläufe der Winkelgeschwindigkeit, so ist erkennbar, dass in der ersten Phase des Kippens um die Vorderkante des Aufbaus bis hin zum Abgleiten an der Kante bei $t = 0,5$ s eine gute Übereinstimmung vorhanden ist. Auch im nachfolgenden freien Fall stimmen die Absolutwerte der Winkelgeschwindigkeiten gut überein, wobei das lokale Minimum bei $t =$

0,64 s (Auftreffen des Paketes auf dem Bandförderer), das im Ergebnis des Simulationslaufs gut erkennbar ist, vom Gyrosensor nicht detektiert wurde. Hier muss aber in Betracht gezogen werden, dass die Abtastrate des Gyrosensors mit 100 Hz beschränkt war, womit die Möglichkeit besteht, dass das lokale Minimum nicht erfasst wurde.

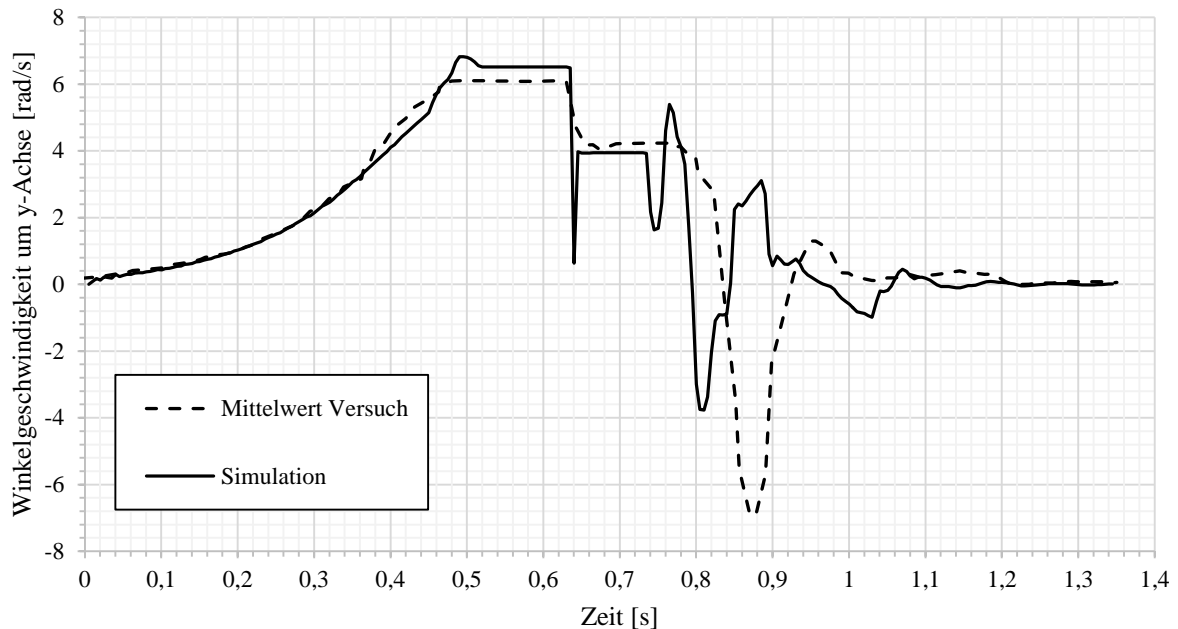


Abbildung 73: Winkelgeschwindigkeit Paket 2 (Szenario „Fallversuch“, 2 Pakete)

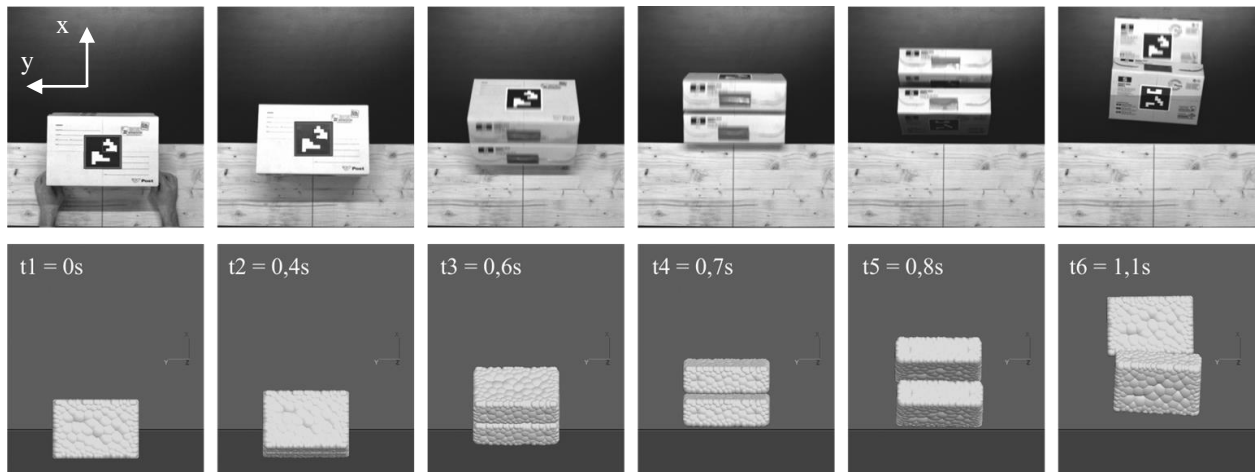


Abbildung 74: Momentaufnahmen Bewegungsablauf (Szenario „Fallversuch“, 2 Pakete)⁴¹

Hinsichtlich des nachfolgenden absoluten Minimums der Winkelgeschwindigkeit fällt auf, dass dieses in den Simulationsergebnissen früher auftritt als im Versuchslauf. Aus den Kameraaufnah-

⁴¹ Anm.: Die Aufnahmen aus den Prüfstandsversuchen entstammen aus einer Versuchsreihe, die zwangsläufig nicht mit dem Mittelwert gleichzusetzen ist.

men und der Visualisierung der Simulation ist erkennbar, dass dieses Minimum durch einen Kontakt der Pakete nach dem Zurückspringen der Pakete vom Bandförderer hervorgerufen wird. Dabei kippt das zu Beginn des Fallversuchs obenliegende Paket 1 nach vorne und berührt dabei mit der dem Aufbau näherliegenden oberen Kante das Paket 2, sodass dieses kurz die Drehrichtung ändert. Nachfolgend kippt dann das zu Beginn des Versuchslaufes untenliegende Paket nach vorne und kommt in schräger Stellung auf dem anderen Paket zur Ruhe (siehe auch Abbildung 74).

Festzuhalten ist, dass die Ergebnisse der einzelnen Simulationsläufe mit den verschiedenen Faktoreinstellungen eine starke Variabilität aufweisen, was sich auch in den verschiedenen Ruhelagen der Pakete nach dem Fall zeigt: Bei allen Versuchsläufen am Prüfstand lag das zu Beginn untenliegende Paket nach Versuchsende mit der Grundfläche auf einer Kante des zweiten Pakets (siehe auch Abbildung 74), bei den verschiedenen Simulationsläufen wurde diese Position je nach Parametereinstellung nur in 5 von 16 Fällen erreicht. Die unterschiedlichen Endlagen zu ausgewählten Simulationsläufen können auch aus Abbildung 75 ersehen werden.

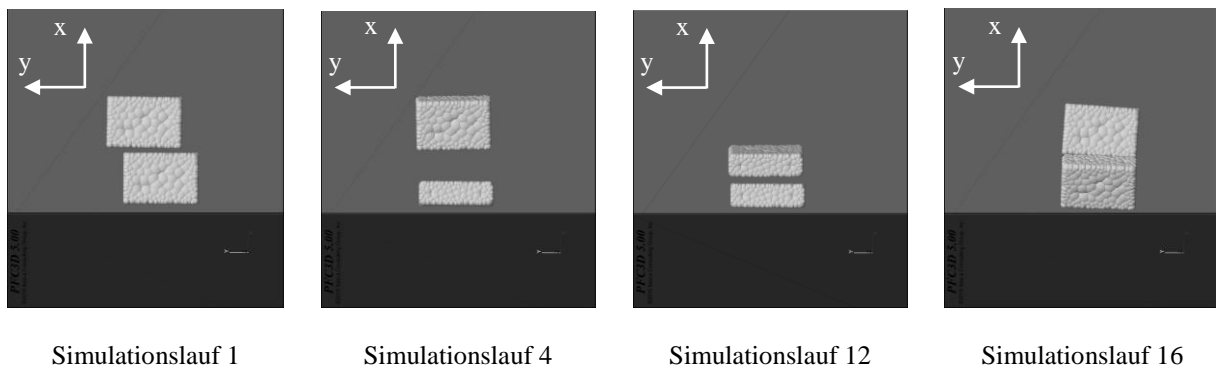


Abbildung 75: Verschiedene Endlagen nach gleicher Simulationszeit

Die Analyse des Versuchsplans mit der DoE-Methodik wurde analog zu den bisher dargestellten Versuchen mit dem Fokus auf minimale Abweichungen zwischen den Winkelgeschwindigkeitsverläufen zu bestimmten Zeitpunkten durchgeführt. Dazu wurde ein Zeitpunkt ausgewählt, bei dem ein Vergleich auch unter Berücksichtigung einer etwaigen kleinen zeitlichen Verschiebung gut durchführbar ist, konkret wurde der Zeitpunkt $t = 0,55$ s (Ableiten der Pakete vom Tisch bzw. freier Fall bei annähernd konstanter Winkelgeschwindigkeit) ausgewählt. Zusätzlich wurde auch noch der Einfluss der Parameter auf das absolute Minimum untersucht, das nur in jenen Simulationsläufen deutlich ausgeprägt war, bei denen die Pakete weit genug von der Oberfläche des Bandförderers zurücksprangen. Aus Abbildung 76 ist gut erkennbar, dass für ein Erreichen der maximalen Winkelgeschwindigkeit die Kontaktsteifigkeit (Faktor A) und die Reibung zwischen

Paket und Tisch (Faktor C) sowie deren Wechselwirkung maßgeblichen Einfluss haben. Das Minimum der Winkelgeschwindigkeit wird signifikant durch die Wechselwirkung zwischen Steifigkeit und kritischem Dämpfungsverhältnis (Faktor B) beeinflusst.

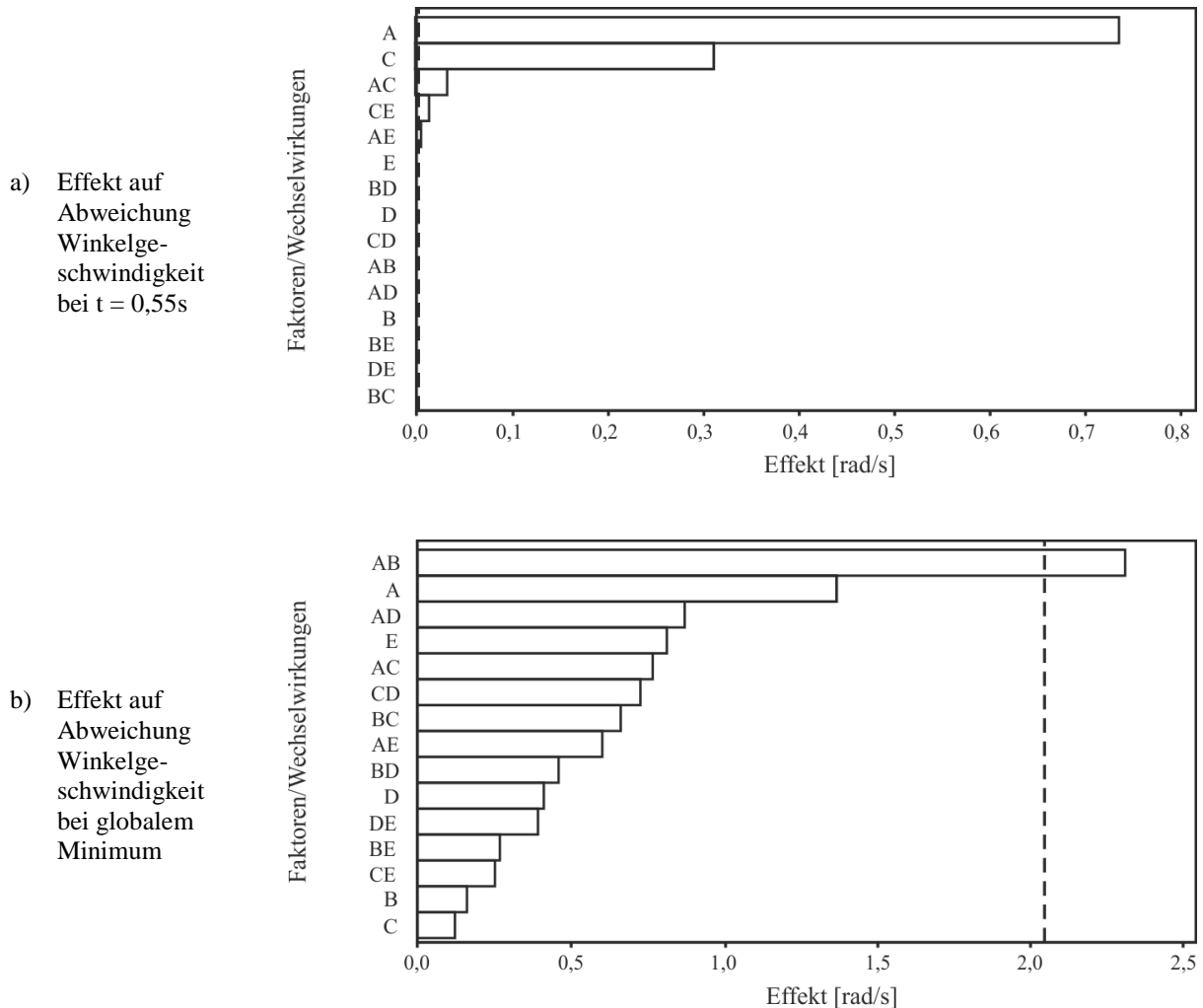


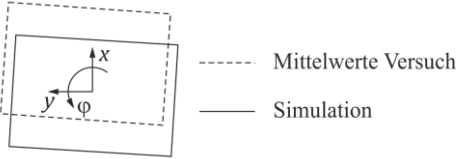
Abbildung 76: Paretodigramme der Effekte (Szenario „Fallversuch“, 2 Pakete)

Analog zu Unterkapitel 6.4 wurden als zusätzliche Vergleichsmöglichkeit die Ruhelagen der Pakete nach Beendigung des jeweiligen Fallversuchs aufgezeichnet. Die entsprechenden Werte können Tabelle 33 entnommen werden, wobei Δx und Δy die Abstände der Endlage der Pakete vom Nullpunkt aus Abbildung 52 auf Seite 84 gemessen sind und $\Delta\varphi$ die Verdrehung um die z-Achse ausgehend von der Startposition⁴². Im Vergleich zum Fallversuch mit einem Paket zeigt sich, dass die Abweichungen hier deutlich höher sind, was auf die zusätzliche Interaktion zwischen den Paketen während des Fallversuchs zurückzuführen ist. Insbesondere der Kontakt der Pakete während

⁴² Anm.: Aufgrund der Schrägstellung von Paket 2 nach dem Fall wurden nur Δx und Δy ermittelt. Zu Paket 2 wird aus diesem Grund in Tabelle 33 auch keine grafische Darstellung gezeigt.

des Zurückspringens in der Luft führt zu einer zusätzlichen Drehbewegung der Pakete um die x- und z-Achse, was sich auf die Endlage deutlich auswirkt. Bei detaillierter Betrachtung des Bewegungsvorganges ist hier hervorzuheben, dass einseitige punktuelle Berührungen der Pakete (begünstigt durch die durch Kugeln approximierte Oberfläche) in der Simulation diese zusätzlichen Drehbewegungen hervorrufen.

Tabelle 33: Positionswerte der Paketendlage (Fallversuch mit zwei Paketen)

		Paket 1			Paket 2	
		Δx [mm]	Δy [mm]	$\Delta \varphi$ [°]	Δx [mm]	Δy [mm]
Versuch	Mittelwert	442,2	15,5	-3,5	252,9	2,5
	Standardabweichung	3,7	1,8	1,1	5,2	4,2
Simulation		378,7	0,5	-4,1	154,4	0,5
Abweichung Mittelwert Versuch zu Simulation		63,5	15,0	0,6	98,5	2,0
Grafische Darstellung					k.A. ⁴²	

6.6 Bewertung und Interpretation der Ergebnisse

Aufbauend auf den Ergebnissen der Unterkapitel 6.1 bis 6.5 werden an dieser Stelle die wesentlichen Erkenntnisse aus den Versuchen und dem Vergleich mit den Simulationsergebnissen dargestellt.

6.6.1 Bewertung und Interpretation zur ebenen Stückgutbewegung

Allgemein ist aus den Standardabweichungen der Versuche erkennbar, dass die Reproduzierbarkeit der Prüfstandsergebnisse gegeben ist. Bei den Versuchsläufen mit einem Paket liegen die mittleren Standardabweichungen aus Tabelle 24 auf Seite 93 für die zeitlichen Bewegungsverläufe $x(t)$ und $y(t)$ innerhalb von 2 mm, selbst die maximale Standardabweichung (diese entspricht der Standardabweichung zu jenem Zeitpunkt, bei dem die größte Streuung auftrat) liegt noch unter 5 mm. Unter Berücksichtigung der Anzahl der durchgeführten Versuche kann festgehalten werden, dass die Abweichung des errechneten Mittelwerts vom realen Mittelwert zu jenem Zeitpunkt, bei dem die größte Streuung auftrat, bei 95,5% der Fälle innerhalb von $\pm 2,6$ mm lag.⁴³

⁴³ Dies entspricht einem Abstand von 2σ

Die Streuung der Verdrehung des Paketes bei den einzelnen Versuchen lag im Mittel bei $0,4^\circ$, der Maximalwert der Streuung bei $1,2^\circ$. Hinsichtlich der Messunsicherheit kann erwartet werden, dass 95,5% der gemessenen Mittelwerte innerhalb von $\pm 0,8^\circ$ liegen, bezogen auf den Zeitpunkt mit der größten Streuung.

Abgesehen von der statistischen Auswertung wird an dieser Stelle aber darauf hingewiesen, dass bestimmte Paketanordnungen sehr sensibel reagieren, das heißt kleine Änderungen der Ausgangslage können zu großen Abweichungen bei Versuchswiederholungen führen. Insbesondere ist das dann der Fall, wenn die Wirkungslinie einer Reaktionskraft (z.B. durch Auftreffen des Pakets auf die Kante eines anderen Pakets) parallel und in geringem Abstand zu einer Schwerlinie des Pakets liegt. Dann reicht eine kleine Änderung der Ausgangslage aus, dass sich das Paket entweder in die eine oder andere Richtung dreht und dadurch große Abweichungen hinsichtlich des Verdrehungswinkels entstehen.

Bei den Versuchen mit zwei Paketen waren die Abweichungen tendenziell etwas größer als bei den Versuchen mit einem Paket (vgl. auch Tabelle 26, S.97 und Tabelle 28, S.103). Dies ist insbesondere deshalb nachvollziehbar, da mit der Interaktion Paket-Paket ein weiteres Fehlerpotential hinzukommt, dennoch liegt die Streuung der Mittelwerte bei dem Szenario „Pakete klein“ innerhalb von 4,4 mm (x-Richtung), 2,7 mm (y-Richtung) sowie $1,5^\circ$ (Verdrehung). Die Streuungen der Bewegungsverläufe des zweiten Szenarios „Pakete groß“ erreichen höhere Werte. Die Analyse zeigt, dass dieser Umstand der Engstelle zwischen den zwei Abweisern geschuldet ist. Im Unterschied zum Szenario „Pakete klein“ kommt es im vorliegenden Fall zu einer Stausituation in der Engstelle, bei der das Paket 1 das Paket 2 gegen den Abweiser drückt. Die Stausituation löst sich dadurch auf, dass das Paket 2 während dem Entlanggleiten an Abweiser 2 eine Ecke des Paketes 1 „mitzieht“ und so eine Drehung von Paket 1 um den Abweiser 1 ermöglicht. Während dieses Vorgangs kommt es gleichzeitig zu mehreren Kontakten der Versuchsobjekte (Paket-Abweiser, Paket-Paket und Paket-Bandförderer), was in einem sensibleren Verhalten der Bewegungsverläufe resultiert.

Bei allen Versuchen ist zusätzlich zu den angegebenen Streuungswerten auch noch der bei der Kalibrierung zugelassene Fehler von 5 mm Abweichung auf einen Paketabstand von 1 m zu berücksichtigen sowie ein Winkelfehler von $0,5^\circ$ (vgl. Kapitel 5.2). In Summe ist damit zu erwarten, dass die Abweichungen bei den Versuchen mit den kleinen Paketen im Bereich von $\pm 1-2$ cm (translatorisch) und $\pm 3,5^\circ$ (rotatorisch) vom Mittelwert für 95,5 aller Fälle liegen. Bei dem Szenario „Pakete groß“ ist der Bereich für die translatorische Abweichung mit 1-5 cm etwas größer anzugeben.

Die Vergleiche mit den Simulationsergebnissen zeigen insbesondere in der ersten Hälfte des Bewegungsverlaufs bei allen Szenarien eine sehr gute Übereinstimmung, größere Abweichungen zu den Mittelwerten der Versuchsläufe entstehen erst im letzten Drittel des Fördervorgangs (vgl. Abschnitte 6.1.2, 6.2.2 und 6.3.2). Bezugnehmend auf die Position des Paketes/der Pakete auf dem Bandförderer in diesem Zeitbereich kann den Bildern der Kameraverfolgung entnommen werden, dass hier zuerst die Drehung um den Abweiser 1 und dann um die Spitze des Abweisers 2 stattfindet. Eine mögliche Ursache für die Abweichungen liegt darin, dass die Oberfläche der Pakete nicht ideal glatt ist, sondern aufgrund der Wellpappenstruktur ein gewisses Profil aufweist. Obwohl über dem gewellten Teil eine Schicht glatter Karton aufgeklebt ist, kann die scharfkantige Spitze des Abweisers ein kleines Stück in die Oberfläche eindringen und gleitet dann der wellenförmigen Struktur entlang. Im Simulationsmodell ist die reale Paketoberfläche nicht in diesem Detailgrad abgebildet.

Die über die statistische Versuchsplanung ermittelten Effekte und Wechselwirkungen zeigen, dass für die Minimierung der Abweichungen zwischen Versuch und Simulation im Wesentlichen die Reibparameter Einfluss haben. Die meisten Wechselwirkungen sind statistisch nicht als signifikant zu werten, ausgenommen die Zweifachwechselwirkung der Reibungskoeffizienten Paket-Bandförderer und Paket-Abweiser sowie die Zweifachwechselwirkung Reibung Paket-Abweiser mit der Dämpfungsrate.

6.6.2 Interpretation und Bewertung der Fallversuche

Hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Prüfstandsversuche ist hervorzuheben, dass die Winkelgeschwindigkeitsverläufe der einzelnen Versuchsläufe (sowohl bei den Versuchen mit einem Paket als auch mit zwei Paketen) einzeln betrachtet Spitzen aufweisen, die in den Verläufen der Mittelwerte aus Abbildung 70 und Abbildung 73 nicht ersichtlich sind. Dies folgt aus der glättenden Eigenschaft der Mittelwertbildung, bei der zeitlich verschoben auftretende Amplituden sich zum Teil gegenseitig aufheben. Gleichzeitig können aufgrund der Auflösungsgenauigkeit von 100 Hz (Abtastrate des Gyrosensors) keine Frequenzen abgebildet werden, die über einer Frequenz von 50 Hz liegen.⁴⁴ Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass sowohl die Absolutwerte der Geschwindigkeiten in den Bereichen hoher Gradienten als auch die höherfrequenten Schwingungsanteile mit Vorsicht betrachtet werden müssen. In den Bereichen langsamerer Geschwindigkeits-

⁴⁴ Dies folgt aus dem Abtasttheorem (siehe z.B. [WEN05]), das besagt, dass eine eindeutige Detektion eines Signals über zeitdiskrete Abtastung nur für Frequenzen möglich ist, die halb so groß sind wie die Frequenz der Abtastrate.

änderungen dagegen kann der Geschwindigkeitsverlauf als relevanter Vergleich zu den Simulationsergebnissen gesehen werden, beim Fallversuch mit einem Paket zeigt sich in diesen Bereichen auch eine gute Überdeckung der Geschwindigkeitsprofile aus Simulation und Versuchsmittelwert. Eine schlechtere Übereinstimmung findet man bei der Versuchsreihe mit zwei Paketen (siehe Abbildung 73), hier weist die Simulation einen zeitlich komprimierten Geschwindigkeitsverlauf gegenüber dem Verlauf der Mittelwerte aus den Versuchen auf. Da insbesondere das Auftreffen der beiden Pakete mit einer stärkeren Verformung der Pakete im Bereich der auftreffenden Kanten einhergeht, ist hier die Schlussfolgerung zu ziehen, dass das in der Simulation eingesetzte vereinfachte Kontaktmodell nicht in der Lage ist, das reale Kontaktverhalten genauer abzubilden.

Hinsichtlich der Endlage der Pakete muss beachtet werden, dass sowohl die Versuche am Prüfstand als auch die Simulationsergebnisse eine Abweichung von der theoretischen Idealbewegung aufweisen, wenn man ideale Symmetrie voraussetzt (Paketgeometrie, Massenverteilung, Startposition etc.). Entsprechend einer solchen idealen Betrachtung müssten alle Winkelgeschwindigkeiten außer jener um die y-Achse gleich null sein, was aber sowohl bei den Versuchen als auch in der Simulation nicht der Fall ist. Bezogen auf die Prüfstandsversuche liegt die Ursache darin, dass die idealen Voraussetzungen nicht gegeben sind. Unter anderem

- weist die Geometrie der Pakete teilweise nicht ideal ebene Flächen und Kanten auf
- sind die Kontakteigenschaften der Pakete nicht homogen über das gesamte Paket
- besitzt der Bandförderer aufgrund des Unterbaus unterschiedliche Steifigkeiten an der Oberfläche

Betrachtet man das Simulationsmodell, so sind hier die Ursachen insbesondere in der Außenkontur der Pakete zu suchen: Da das Paket durch zufällig platzierte Kugeln mit unterschiedlichen Radien aufgebaut ist, kann es beim Auftreffen eines Körpers auf einen anderen vorkommen, dass eine Kontaktpaarung an einer bestimmten Stelle zeitlich vor anderen Kontaktpaarungen aktiv wird. Dadurch entsteht an dieser Stelle eine Reaktionskraft, die je nach Position ein von der Idealbewegung abweichendes Bewegungsverhalten verursacht.

Aus oben genannten Gründen wird die Auswertung der Endlage daher nur insofern beurteilt, als dass die Größenordnungen der Abweichungen in Versuch und Simulation bewertet werden. Diese liegen im Bereich $<5^\circ$ bezogen auf den Verdrehungswinkel bei den untersuchten Szenarien. Hinsichtlich der Endlage der Pakete in x- bzw. y-Koordinaten liegt die Abweichung zwischen Simulation und Versuchsmittelwert bei dem Szenario mit einem Paket unter 10mm, bei dem Szenario mit zwei Paketen aber schon bei annähernd 100 mm, was einen doch erheblichen Genauigkeitsverlust darstellt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Bewegungsverhalten in der Simulation jenes aus den Versuchen gut abbilden kann, wenn auch festgehalten werden muss, dass aufgrund der Vereinfachungen bei der Modellbildung Abweichungen im dokumentierten Größenbereich zu erwarten sind.

7 Anwendung der DEM auf ausgewählte Vereinzelnungsprinzipien

Zufolge den Ergebnissen aus Kapitel 6, in dem die Anwendung der DEM-Simulationsmethode als Vorhersageinstrument für das Bewegungsverhalten von Stückgütern bei Fördervorgängen überprüft wurde, wird in diesem Kapitel die DEM zur Simulation des Bewegungsverhaltens einer größeren Anzahl an Stückgütern in ausgewählten Vereinzelnungsprozessen (Wirkprinzipien vergleiche Kapitel 3.3) eingesetzt. Die beschriebenen Szenarien sind aus der Kategorie „3D/2D-Vereinzelnung“, da insbesondere bei dieser Vereinzelnungsstufe üblicherweise eine große Anzahl an Paketen durch den Prozess geführt wird und damit an ein Simulationswerkzeug auch die Anforderung gestellt wird, eine größere Anzahl an Paketen abbilden zu können. Bei den ausgewählten Szenarien handelt es sich um zwei Wirkprinzipien, die häufig in der KEP-Branche angewendet werden (vgl. dazu auch Unterkapitel 2.2 sowie 3.3):

- In Unterkapitel 7.1 wird die Vereinzelnung durch sequentiell angeordnete Beschleunigungsbänder bei gleichzeitiger Neigung dieser Bänder zur Horizontalen untersucht, wobei ein Stückgutpulk in einem Container die Ausgangslage darstellt. Das Prinzip der sequentiell angeordneten Bandförderer mit ansteigenden Bandgeschwindigkeiten wird auch oft zur Erzeugung von Abständen zwischen Stückgütern (Nebenfunktion der Vereinzelnung nach Unterkapitel 3.2) eingesetzt, im vorliegenden Fall wird das Prinzip zur Verringerung der Gutdichte eingesetzt. Dadurch wird in der untersten Ebene Raum geschaffen, damit obenliegende Stückgüter auf die Förderfläche gelangen können. Der Geschwindigkeitsunterschied am Übergang von einem zum nächsten Bandförderer bewirkt zusätzlich auch eine Beschleunigung der auf der Bandoberfläche befindlichen Stückgüter, aufgrund der Massenträgheit führt dies zu einem Abrutschen der obenliegenden Stückgüter. Die Neigung der Bandförderer begünstigt diesen Vorgang. Abbildung 19 auf Seite 21 zeigt eine Anwendung dieses Prinzips im ersten Teil der dargestellten Vereinzelnungsstrecke.
- In Kapitel 7.2 wird ebenfalls ausgehend von einem Stückgutpulk in einem Container eine Vereinzelnung durch sequentielle Bandförderer mit Höhenunterschied („Wasserfall“) simuliert. Dieses Prinzip wird analog zu dem oben beschriebenen Szenario häufig in Vereinzelnungsprozessen eingesetzt, wobei der durch den Höhenunterschied ausgelöste Kippvorgang übereinanderliegender Stückgüter dazu führt, dass sich obenliegenden Stückgüter lösen und auf die Förderfläche fallen. Die Anwendung dieses Prinzips kann in den technischen Lösungen aus Abbildung 18 (S.21) und Abbildung 21 (S.23) ersehen werden.

Zur Modellierung des Stückgutpulks wurden die Daten aus Kapitel 2.3 herangezogen, wobei aber ein reduziertes Spektrum an Paketgrößen und -gewichten erstellt wurde. Dazu wurde der sogenannte „k-Means“-Algorithmus angewendet, um ausgehend vom vollständigen Datensatz eine Cluster-Bildung durchzuführen, die auf ein kleineres Paketspektrum führt. Der „k-Means“-Algorithmus sucht dabei die Zentren einer vorgegebenen Anzahl i von Clustern, wobei die Summe der quadratischen Abweichungen der Einzelwerte x_j von den Cluster-Mittelwerten μ_i minimiert wird. Dadurch erfolgt eine Gruppierung ähnlicher Pakete, die Werte der Zentren dieser Gruppen wurden als maßgebliche Größen für die Pakete des Referenzspektrums herangezogen (vgl. Tabelle 34, die Werte wurden auf 5 mm gerundet). Das Referenzspektrum umfasst 50 Pakete, die Häufigkeit spiegelt sich in der Anzahl des jeweiligen Paketes wider.

Tabelle 34: Paketparameter des Referenzspektrums

Paket	Gewicht [kg]	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Anzahl [-]
1	1,75	325	430	120	7
2	10,4	475	665	360	3
3	6,45	355	475	270	4
4	1,20	215	310	95	9
5	2,30	370	600	135	6
6	2,95	260	350	190	6
7	0,75	135	195	80	6
8	0,65	90	435	40	2
9	2,65	600	820	150	4
10	10,85	500	650	150	3

7.1 Vereinzelnungsszenario „Geneigter Bandförderer“

Die nachfolgend beschriebene Vereinzelnungssimulation basiert auf den Wirkprinzipien „Sequentielle Geschwindigkeitszunahme“ und „Geneigter Bandförderer“ (vgl. Unterkapitel 3.3). Die Ausgangssituation besteht aus einer Containerladung von 50 Paketen (Platzierung zufallsgesteuert), die auf einem horizontalen Bandförderer ruhen. Abbildung 77b zeigt eine Darstellung der Versuchsanordnung, die zugehörigen Hauptabmessungen können Abbildung 77a entnommen werden. Bei Beginn der Simulation wird dem ersten Bandförderer eine Geschwindigkeit von $v_1 = 0,012 \text{ m/s}$ zugewiesen⁴⁵, die Geschwindigkeit des nachfolgenden geneigten Bandförderers v_2 wird je nach Versuchslauf mit den Werten nach Tabelle 35 festgelegt.

⁴⁵ Anm.: Der angegebene Geschwindigkeitswert basiert auf Tests, die am Institut f. Technische Logistik an einem Prototyp zur automatischen Entladung von Paketen durchgeführt wurde.

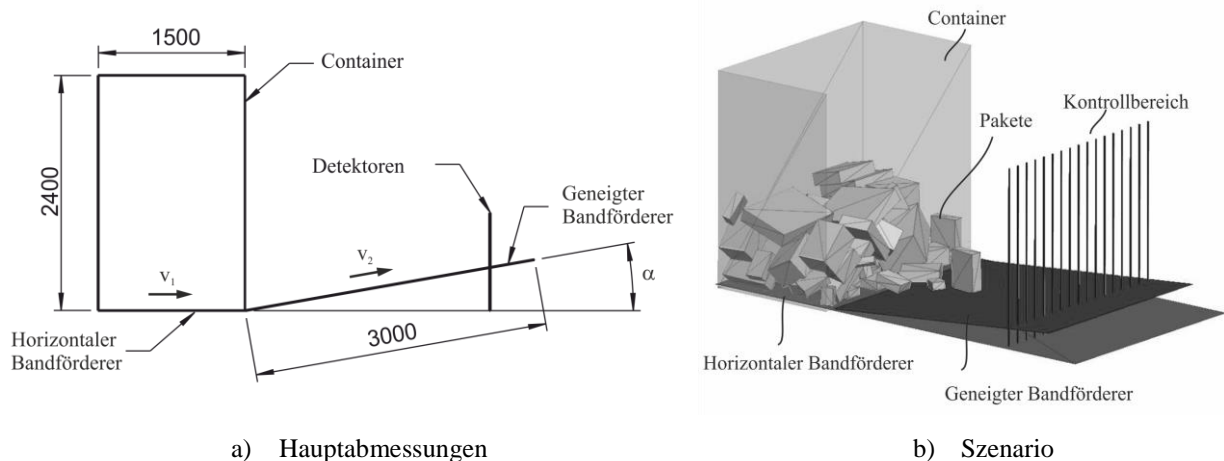


Abbildung 77: Vereinzlungsszenario "Geneigter Bandförderer"

Die variablen Parameter der Simulation sind die Geschwindigkeit v_2 des geneigten Bandförderers, dessen Neigungswinkel α und der Reibkoeffizient μ_{PB} zwischen Paket und beiden Bandförderern. Die unterschiedlichen Stufen dieser Parameter können Tabelle 35 entnommen werden. Ziel der Simulation ist die Identifikation jener Parameterwerte, die zu einem optimalen Vereinzlungsergebnis führen. Um letzteres beurteilen zu können, wird im Simulationsmodell ein Kontrollbereich implementiert, der aus nebeneinander angeordneten virtuellen Kontrollzylindern (Detektoren) besteht, die die Anzahl der Pakete in vertikaler Richtung (übereinanderliegende Pakete) zu jedem Zeitschritt ausgeben. Über diesen Kontrollbereich kann somit die Qualität der 3D/2D-Vereinzlung über der Zeit bestimmt werden.

Tabelle 35: Parameter Vereinzlungsszenario "Geneigter Bandförderer"

	Geschwindigkeit v_2 [m/s]	Steigung α [°]	Reibung μ_{PB} [-]
Stufe 1	0,50	5	0,2
Stufe 2	0,75	10	0,4
Stufe 3	1,00	15	0,6

In der Versuchsreihe wurde jede mögliche Parameterkombination als Simulationslauf durchgeführt, die Ausgabe des Kontrollbereichs kann Abbildung 78 entnommen werden. Dargestellt sind die Ergebnisse von jenen 9 Versuchsläufen mit der höchsten Geschwindigkeit v_2 , die der anderen 18 Läufe können dem Anhang A5 werden. In den einzelnen Abbildungen ist die Anzahl der übereinanderliegenden Pakete über der Zeit je Detektor dargestellt, für eine gute Vereinzlung sollte diese so klein als möglich sein. Dementsprechend führen jene Parameterkombinationen, bei denen die Ergebnisgrafiken eine flache Topologie aufweisen, zu einer guten Vereinzlungsqualität, hohe Spitzen zeigen eine ungünstige Kombination an.

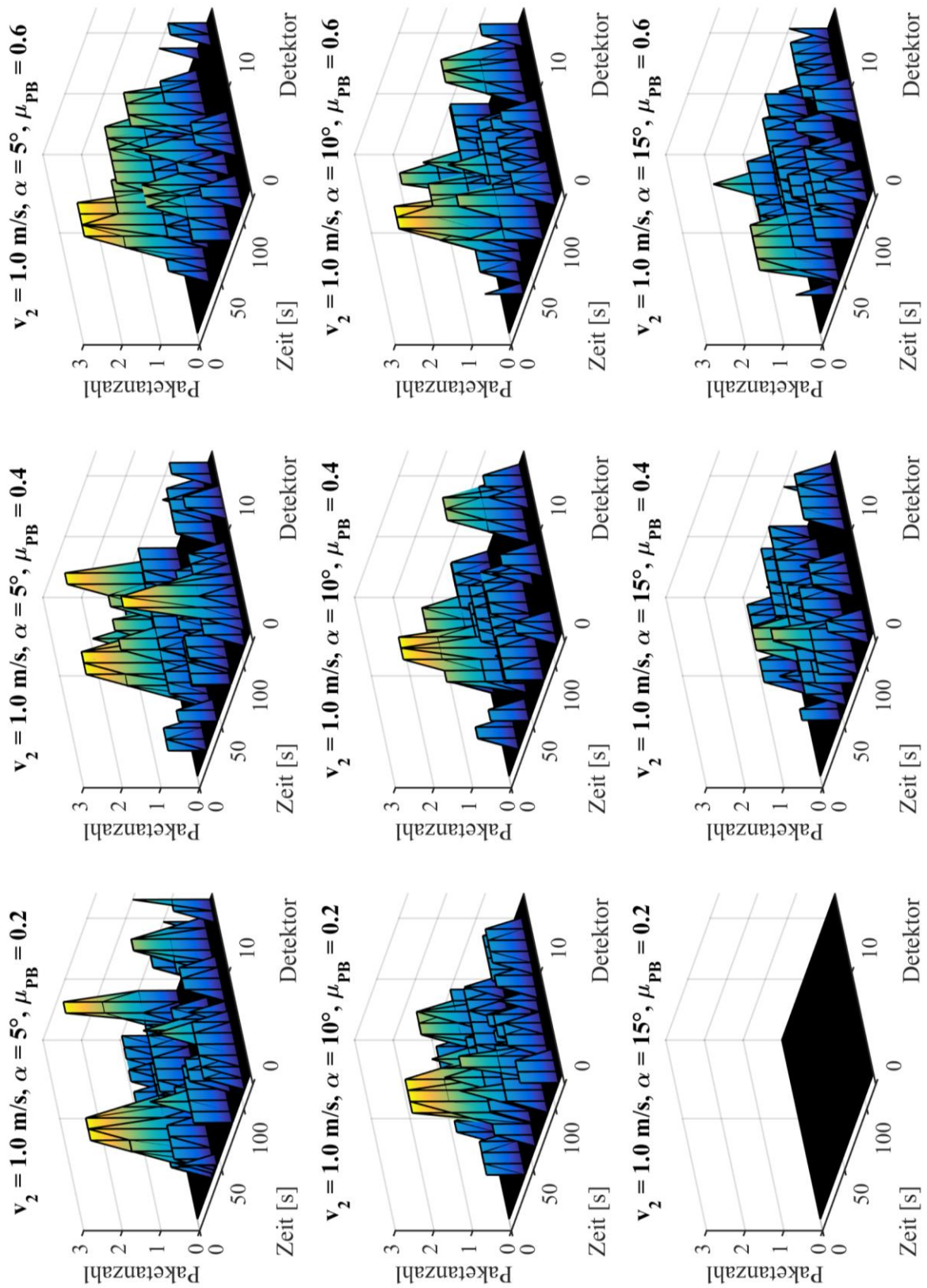


Abbildung 78: Versuchsauswertung "Geneigter Bandförderer" (Auszug)

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass sich insbesondere ein höherer Neigungswinkel positiv auf die Vereinzelnungsqualität auswirkt. Bei jener Abbildung, bei der die Paketanzahl über der gesamten Simulationszeit null ist, war die Reibung zwischen Paketen und Bandförderer nicht hoch genug, um einen Abtransport über das Steigband zu ermöglichen.⁴⁶

7.2 Vereinzelnungsszenario „Vertikal versetzte Bandförderer“

Die Anordnung dieses Vereinzelnungsszenarios stimmt in weiten Teilen mit jener aus Unterkapitel 7.1 überein, die Vereinzelnung selbst erfolgt aber durch zwei sequentiell angeordnete Bandförderer mit ansteigender Geschwindigkeit, wobei der in Förderrichtung zweite Bandförderer gleichzeitig um eine Höhe h vertikal nach unten versetzt ist, sodass eine Stufe beim Übergang entsteht. Dieses Szenario baut somit auf den Wirkprinzipien „Sequentielle Geschwindigkeitszunahme“ und „Vertikal versetzte Bandförderer“ auf (vgl. Unterkapitel 3.3). Die Geschwindigkeit des Bandförderers 1 beträgt bei allen Simulationsläufen $v_1 = 0,5 \text{ m/s}$, jene von Bandförderer 2 wird je nach Versuchslauf entsprechend Tabelle 36 zugewiesen. In Abbildung 79b ist die Versuchsanordnung dargestellt, wobei die Seitenwände, die ein seitliches Herunterfallen der Pakete verhindern, ausgeblendet sind. Die zugehörigen Hauptabmessungen können Abbildung 79a entnommen werden.

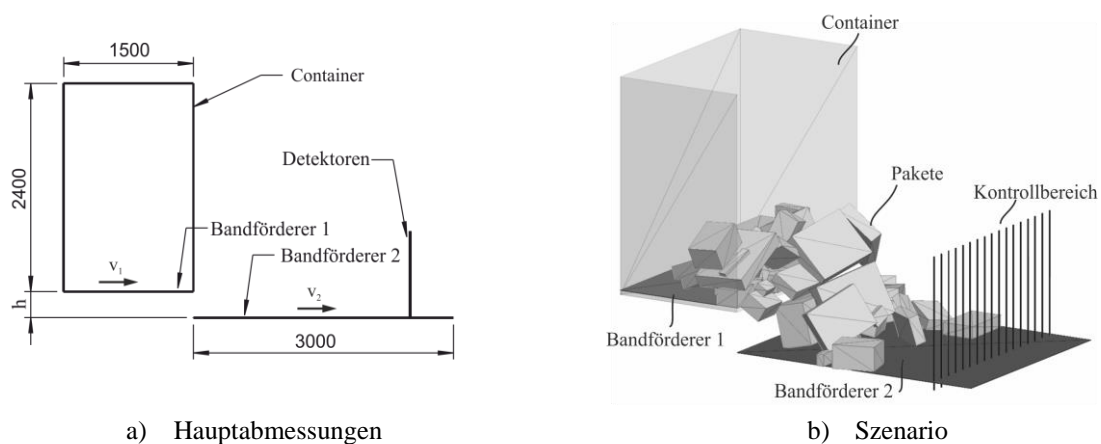


Abbildung 79: Vereinzelnungsszenario "Vertikal versetzte Bandförderer"

Die variablen Parameter der Simulation wurden mit der Geschwindigkeit v_2 des Bandförderers 2, dem Höhenunterschied h zwischen den Bandförderern und dem Reibkoeffizienten μ_{PB} zwischen Paket und Bandförderern festgelegt. In der Versuchsreihe wurde jede Parameterkombination als Simulationslauf durchgeführt, zufolge Tabelle 36 ergeben sich daraus 27 Simulationsläufe. Die Ausgabe des Kontrollbereichs für jene 9 Simulationsläufe mit der höchsten Geschwindigkeit v_2 sind in Abbildung 80 dargestellt, die der anderen 18 Läufe im Anhang A5.

⁴⁶ Entsprechend der Beziehung $\alpha_G = \text{atan}(\mu_{PB})$ für den Grenzreibungswinkel ergibt sich bei $\mu_{PB} = 0,2$ ein Wert von $\alpha_G = 11,31^\circ$, der Winkel des Steigbandes betrug in diesem Fall aber 15° .

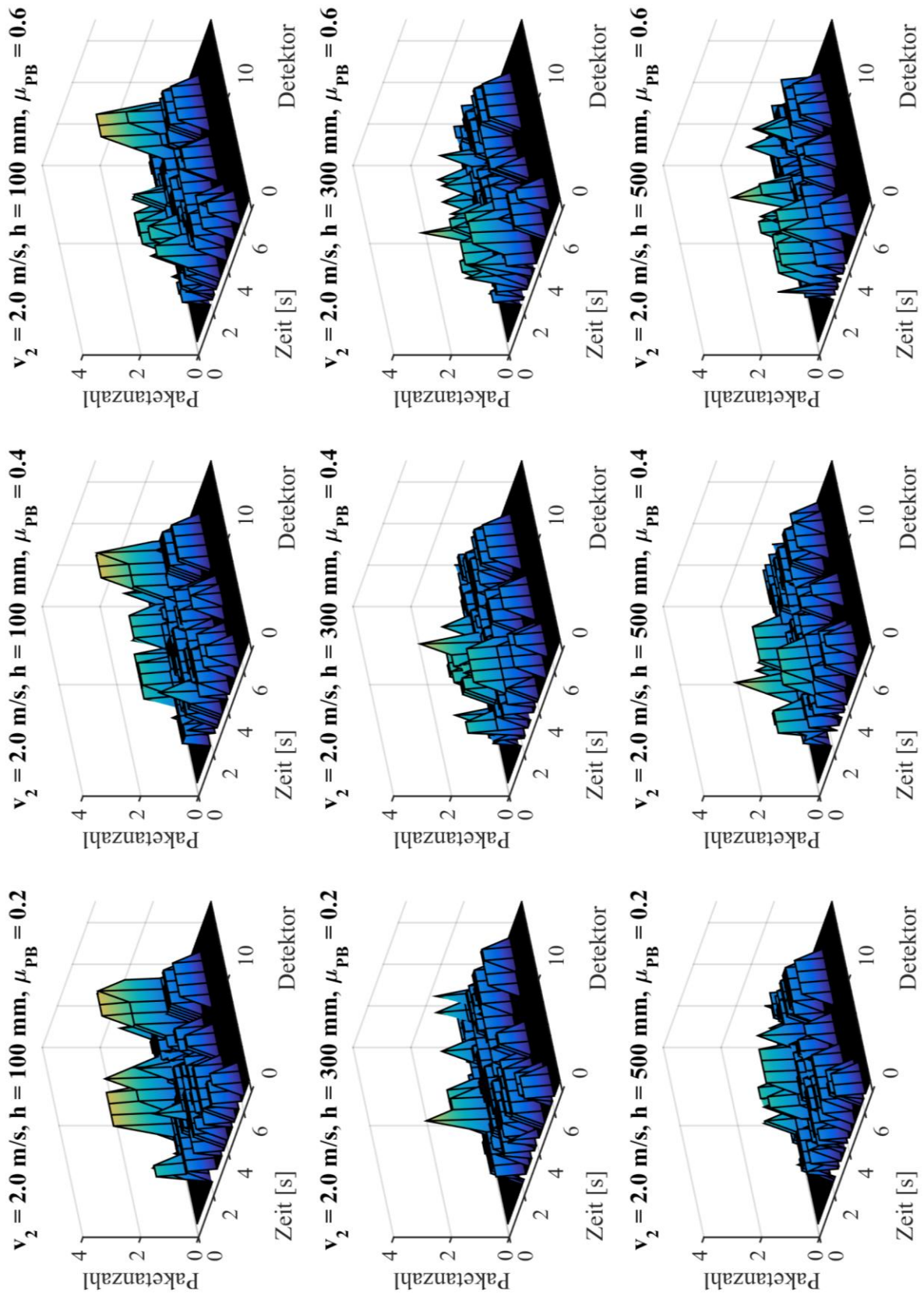


Abbildung 80: Versuchsauswertung "Vertikal versetzte Bandförderer" (Auszug)

Tabelle 36: Parameter Vereinzelnungsszenario "Vertikal versetzte Bandförderer"

	Geschwindigkeit v_2 [m/s]	Höhe h [m]	Reibung μ_{PB} [-]
1 Stufe	1,0	0,1	0,2
2 Stufe	1,5	0,3	0,4
3 Stufe	2,0	0,5	0,6

Interpretiert man die erhaltenen Ergebnisse, so kann festgehalten werden, dass eine Geschwindigkeit von $v_2 = 1 \text{ m/s}$ zu keinem optimalen Vereinzelnungsergebnis führt (vgl. auch Anhang A5). Bei der höchsten Geschwindigkeitsstufe dagegen liegt schon bei der mittleren Stufe des Höhenunterschieds h ein gutes Vereinzelnungsergebnis vor. Hinsichtlich des Höhenunterschieds ist hervorzuheben, dass der Wert von $h = 0,1 \text{ m}$ deutlich schlechtere Ergebnisse bewirkt, als die beiden anderen Stufen. Zwischen letzteren ist nur bei der langsamsten Geschwindigkeit des Bandförderers 2 ein Unterschied in der Vereinzelnungsqualität auszumachen, bei den beiden höheren Geschwindigkeitsstufen dagegen nicht. Ein eindeutiger Einfluss des Reibungskoeffizienten μ_{PB} zwischen Bandförderer und Paket ist nicht zu erkennen.

7.3 Vorgehensweise und Prozess für die Anwendung

Zurückgreifend auf die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit wird an dieser Stelle eine abschließende Handlungsempfehlung für einen effizienten und zügigen Entwicklungsprozess von Vereinzelnungstechnik gegeben, wobei die Integration der vorgestellten Simulationsmethode eine Optimierung vor der eigentlichen Konstruktion ermöglicht.

Abbildung 81 zeigt in einem Flussdiagramm die einzelnen Prozessschritte in der Phase der Konzeptentwicklung (vgl. auch Unterkapitel 2.4). Im ersten Schritt der Anforderungsdefinition ist die zu lösende Vereinzelnungsaufgabe (3D/2D-, 2D/1D- oder 3D/1D-Vereinzelnung) zu definieren. Zusätzlich sind jene Voraussetzungen zu definieren, die den Vereinzelnungsprozess maßgeblich beeinflussen. Dazu können insbesondere die Zusammensetzung des zu vereinzelnenden Stückgutpulks in Form, Abmessungen, Gewicht und (Oberflächen-)Beschaffenheit gezählt werden als auch Layoutaspekte wie der zur Verfügung stehende Bauraum. Entsprechend den definierten Anforderungen ist in einem zweiten Schritt ein Wirkprinzip zur Vereinzelnung der Stückgüter zu bestimmen.⁴⁷ Dabei kann auf Konstruktionskataloge allgemein oder auch auf die identifizierten Wirkprinzipien dieser Arbeit (vgl. Unterkapitel 3.3) zurückgegriffen werden.

⁴⁷ Anm.: In der methodischen Konstruktion (vgl. Unterkapitel 2.4) ist diesem Schritt die Erarbeitung eines funktionalen Zusammenhangs vorangestellt. Eine mögliche Darstellung dieses Prozesses findet sich in Unterkapitel 3.2.



Abbildung 81: Entwicklungsprozess für Vereinzelungstechnik

Nach einer ersten groben Dimensionierung der zu entwickelnden Vereinzelungstechnik und der Festlegung auf ausgewählte Fördertechnikkomponenten kann mit der in Unterkapitel 4.6 vorgestellten Diskreten-Elemente-Methode eine erste Abschätzung hinsichtlich der Funktionserfüllung bei gleichzeitiger Optimierung bestimmender Parameter durchgeführt werden. Dazu ist ein Simulationsmodell zu erstellen, wobei für die Parametrisierung (beispielsweise Reibungskoeffizienten,

Steifigkeiten, Dämpfungskennwerte, Massenkennwerte) Ergebnisse aus Vorversuchen heranzuziehen sind. Diese Vorversuche können einerseits die direkte Bestimmung von Parametern sein als auch eine indirekte Ermittlung durch „Trimmen“ des Simulationsmodells über Vergleiche mit einfachen Prüfstandsversuchen wie in Kapitel 6 dargestellt. Bei der Modellierung der Stückgüter und der Fördertechnik sei auf die detaillierten Betrachtungen aus Unterkapitel 4.7 verwiesen.

Für eine Optimierung sind nach der Erstellung des Simulationsmodells die variablen Parameter festzulegen. Diese können Neigungswinkel, Höhenunterschiede, Geschwindigkeiten etc. sein, wobei für die Versuchsreihen auch die zugehörigen Stufenwerte definiert werden müssen. Danach können die Simulationsläufe durchgeführt werden, wobei optional eine Versuchsplanerstellung nach der DoE-Methode (vgl. Kapitel 2.5) vorangestellt werden kann.

Die Bewertung der Vereinzelnungsqualität bestimmt dann das weitere Vorgehen: Bei zufriedenstellenden Ergebnissen kann mit der eigentlichen Konstruktionsphase fortgesetzt werden. Ist das Gegenteil der Fall, müssen entweder andere Parameter bzw. deren Stufenwerte gewählt werden oder ein gänzlich anderes Wirkprinzip.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wurde mit den ergriffenen Maßnahmen der Grundstein für eine effiziente und zielgerichtete Entwicklung von Vereinzelungstechnik in der Konzeptionierungsphase gelegt. Dies erfolgte mit dem Fokus auf die der Vereinzelung zugrundeliegenden Wirkprinzipien verbunden mit einer vorangehenden Abstraktion und Verallgemeinerung des Vereinzelungsprozesses von Stückgütern. In Unterkapitel 3.3 sind dazu die über eine umfassende Patentrecherche identifizierten Wirkprinzipien dokumentiert, wobei auch eine Zuordnung zum zugrundeliegenden physikalischen Prinzip und zur Eignung für verschiedene Vereinzelungsarten vorgenommen wurde.

Um schon in der Konzeptphase eine Überprüfung hinsichtlich Funktionalität und eine Optimierung durchführen zu können, wurden in der vorliegenden Arbeit verschiedene Methoden zur Beschreibung und Simulation des Bewegungsverhaltens von Stückgütern bei Förderprozessen verglichen und die daraus hervorgegangene Diskrete-Elemente-Methode auf den Anwendungszweck adaptiert. Zur Überprüfung der Eignung der Simulationsmethode wurden in Kapitel 5 Versuchsszenarien entwickelt, die die wesentlichen Interaktionen (Stückgut-Fördertechnik, Stückgut-Stückgut) beinhalten, wobei auch hinsichtlich der Paketparameter (Abmessungen, Gewicht) und der Fördergeschwindigkeit innerhalb üblicher Bereiche bei Vereinzelungsvorgängen variiert wurde. Der Vergleich von Prüfstandsergebnissen und Simulationsergebnissen ermöglichte eine Abweichungsanalyse, wobei mittels der statistischen Versuchsplanung der Einfluss der bestimmenden Simulationsparameter und deren Wechselwirkungen untersucht wurden. Die Ergebnisse zeigen in weiten Teilen eine gute Übereinstimmung von Versuchs- und Simulationsergebnissen, wobei aber darauf hinzuweisen ist, dass insbesondere bei Vorgängen mit starken Verformungen der Stückgüter die Abweichungen im Bewegungsverhalten größer sind und sehr sensibel auf Änderungen der Parameterwerte des Kontaktmodells reagieren. Auch der Einfluss der Approximation realer Stückgüter durch verkettete Kugeln (Multisphere-Ansatz) hat einen wesentlichen Einfluss, von großer Bedeutung ist hier die Vermeidung einer kontraproduktiven Anordnung von Kugeln gleicher Größe an einem Gitter mit konstanter Teilung.

Im abschließenden Teil der Arbeit wurde die Simulationsmethode auf konkrete Vereinzelungsszenarien angewendet, im Fokus stand dabei der Einfluss ausgewählter Parameter auf die Qualität der Vereinzelung.

Ausblick

Betrachtet man den aktuellen Stand der Technik im Bereich der Intralogistik mit besonderem Fokus auf die KEP-Branche, so ist erkennbar, dass auch die großen Hersteller von Fördertechnik vorwiegend mit ähnlichen Ansätzen die Vereinzelungstechnik gestalten. Die vorliegende Arbeit soll hier als Grundlage gesehen werden, auf Basis der vielen verschiedenen Wirkprinzipien der Vereinzelung zukünftige (abweichende) Ansätze in der Entwicklung mitzuberücksichtigen. Ein wesentliches Forschungsfeld in diesem Zusammenhang ist die Entwicklung von Vereinzelungstechnik und -prozessen bei gleichzeitig sparsamem Einsatz von Sensorik und Aktorik, um kostenseitig Einsparungen vornehmen zu können.

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene mögliche Methoden zur Vorhersage des Bewegungsverhaltens von Stückgütern im Pulk vorgestellt, weiterverfolgt wurde die Diskrete-Elemente-Methode. Die Auswahl dieser Methode schließt die Anwendung anderer Methoden nicht aus, dementsprechend können zukünftige Forschungsaktivitäten den Einsatz beispielsweise von kontinuumsbasierten Methoden untersuchen. Erste Schritte auf diesem Gebiet wurden wie in Unterkapitel 4.3 erwähnt vorgestellt, wobei sich die Arbeiten von [GHS+14] auf Zylinder gleicher Durchmesser beschränken. Diese Voraussetzung ermöglichte eine mathematische Beschreibung der maximalen Packungsdichte für den Pulk im Falle eines Aufstauens der Objekte. Ob eine ähnliche Vorgangsweise auch auf einen Pulk aus Objekten unterschiedlicher Formen und Abmessungen übertragbar ist, wurde nicht überprüft. Der Einsatz von Methoden der Mehrkörperdynamik erscheint ebenfalls zielführend, wie in dieser Arbeit auch am Beispiel einer Containerentladung gezeigt wurde (vgl. Unterkapitel 4.5). Einschränkungen sind hinsichtlich des Berechnungsaufwandes bei großen Stückgutzahlen zu erwarten, auch die Modellierung insbesondere der „endlosen“ Fördertechnik (beispielsweise umlaufende Bandförderer) bietet noch Optimierungspotential.

Im Hinblick auf die in dieser Arbeit adaptierte und eingesetzte Diskrete-Elemente-Methode können verschiedene Erweiterungen zu einem breiteren Anwendungsgebiet beitragen:

- Die Approximation der Stückgüter durch den Multisphere-Ansatz wurde in der vorliegenden Arbeit in der Form starr verketteter Kugeln genutzt. Eine Erweiterung dieses Ansatzes auf flexible Verbindungen zwischen den Kugeln (sogenannte „Bonds“) ermöglicht auch die Modellierung biegeweicher Stückgüter. Dabei können die einzelnen Kugeln zueinander definierte Bewegungen ausführen, wobei translatorische und rotatorische Federelemente zwischen den Kugeln die Steifigkeit des Körpers nachbilden.
- Neben dem Multisphere-Ansatz wurden in Unterkapitel 4.2 auch andere Ansätze zur Modellierung nicht kugelförmiger Objekte vorgestellt, die Modellierung eines Stückgutpulk

beispielsweise durch sogenannte „Superquadrics“ erscheint im Hinblick auf eine Reduktion des Berechnungsaufwandes als interessant.

- Die Diskrete-Elemente-Methode ist grundsätzlich offen für verschiedene Kontaktmodelle. Hinsichtlich einer Optimierung der Vorhersage des Bewegungsverhaltens insbesondere bei Fallvorgängen, die zu größeren Verformungen der Stückgüter führen, stellt sich die Frage nach einem Kontaktmodell für Pakete, das in der Lage ist, das reale Bewegungsverhalten möglichst exakt abzubilden. Auch die Erweiterung des Kontaktmodells in Bezug auf Stückgüter, die mit Plastikfolie umhüllt sind (adhäsiver Kontakt), kann in Betracht gezogen werden.
- Sofern Rückwirkungen der Fördervorgänge großer Stückgutzahlen auf die eingesetzte Fördertechnik von Interesse sind, bietet sich hier die Kopplung der DEM mit der Mehrkörpersimulation an. Bei dieser Herangehensweise kann die Fördertechnik als schwingfähiges System modelliert werden mit einer Schnittstelle zur DEM, die zur Abbildung des Stückgutpulses herangezogen werden kann.

Eine weitere Validierung der DEM zur Vorhersage des Bewegungsverhaltens von Stückgütern erscheint ebenfalls sinnvoll: Die Validierungsszenarien dieser Arbeit gehen von einem induktiven Ansatz aus, die bei Förderprozessen vorkommenden Interaktionen Stückgut-Fördertechnik und Stückgut-Stückgut wurden betrachtet. Weitere Validierungsszenarien, die das Verhalten eines Stückgutpulses größeren Maßstabs im Fokus haben, würde die DEM als geeignete Methode weiter absichern. Problematisch erscheint in diesem Zusammenhang der zu erwartende Aufwand, die Nachverfolgung von 100 und mehr Paketen ist sicher nur mit Einschränkungen möglich.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass entsprechend den Ergebnissen dieser Arbeit der Einsatz der DEM zur Vorhersage des Bewegungsverhaltens großer Stückgutzahlen vielversprechend ist. Weitere Untersuchungen können dazu beitragen, das Anwendungsgebiet zu erweitern und den Einsatz der Methode zu optimieren.

9 Symbolverzeichnis

b	Dämpfungskonstante
b_k	Kritische Dämpfungskonstante
d	Abstand zwischen zwei Körpern/Partikeln
d_{min}	Kürzester Abstand Kugelmittelpunkt zur Oberfläche des approximierten Körpers
e	Verhältnis Kugelradius r_i zu kürzestem Abstand d_{min}
g_c	Oberflächenabstand (Kontaktmodell)
\mathbf{g}	Vektor der Gravitationsbeschleunigung
G	Schubmodul
\bar{G}	Effektiver Schubmodul
\mathbf{f}_{ij}^n	Anteil der Kontaktkraft \mathbf{F}_{ij}^c in normaler Richtung
\mathbf{f}_{ij}^t	Anteil der Kontaktkraft \mathbf{F}_{ij}^c in tangentialer Richtung
F_n^{dc}	Dissipativer Term zur Berechnung von \mathbf{F}_{ij}^{dc} in Normalenrichtung
F_n^{hc}	Nichtlinear elastischer Term zur Berechnung von \mathbf{F}_{ij}^{hc} in Normalenrichtung
F_t^μ	Reibkraft (Skalar)
\mathbf{F}	Kraftvektor (allgemein)
\mathbf{F}_{ij}^c	Vektor der Kontaktkraft von Partikel j auf i
\mathbf{F}_t^{dc}	Tangentialer Anteil von \mathbf{F}_{ij}^{dc}
\mathbf{F}_{ij}^{hc}	Nichtlinear elastischer Anteil der Kontaktkraft \mathbf{F}_{ij}^c
\mathbf{F}_t^{hc}	Tangentialer Anteil von \mathbf{F}_{ij}^{hc}
\mathbf{F}_{ij}^{dc}	Dissipativer Anteil der Kontaktkraft \mathbf{F}_{ij}^c
\mathbf{F}_{ik}^{nc}	Vektor der nicht durch Kontakt verursachten Kraft von Partikel k auf i („non-contact-force“)
\mathbf{F}_i^g	Gewichtskraft (Vektor)
h	Schrittweite (numerischer Löser)
h_n	Konstante zur Berechnung von F_n^{hc}
I	Massenträgheitsmoment (Skalar)
i, j, k, l	Ganzzahliger Index, Zählvariable, Exponent
k	Federsteifigkeit
k_n	Normale Kontaktsteifigkeit
k_t	Tangentiale Kontaktsteifigkeit
m	Masse
\bar{m}	Effektive Masse
\mathbf{m}	Ortsvektor zum Kugelmittelpunkt

M_{ij}^r	Rollreibungsmoment von Partikel j auf i
\mathbf{M}	Momentenvektor (allgemein)
\mathbf{M}_{ij}^c	Vektor der Momente, die durch den Kontakt von Partikel j auf i wirken
n	Anzahl (allgemein)
n_f	Anzahl der Faktoren (DoE)
n_k	Anzahl Körper
n_l	Anzahl der Stufen (DoE)
n_M	Anzahl der Partikel (Multisphere-Körper)
n_N	Anzahl der auf einen Partikel wirkenden Teilkräfte (Multisphere-Körper)
n_p	Anzahl der Zuordnungen (DoE)
n_r	Anzahl der Versuchsläufe (DoE)
\mathbf{n}_c	Normalvektor auf die Kontaktfläche
p	Exponent
r	Radius
\mathbf{r}	Ortsvektor zu einem Punkt
R	Radius
\bar{R}	Effektiver Radius
s	Abstand zu Schwerpunkt
\mathbf{s}	Abstandsvektor zum Schwerpunkt
t	Zeit
$(\dots)_t$	Index Zeitschritt
Θ	Trägheitstensor
v	Geschwindigkeit (Skalar)
v_F	Fördergeschwindigkeit
\mathbf{v}	Vektor der Geschwindigkeit
x	Koordinate des kartesischen Koordinatensystems, Variable
\mathbf{x}	Vektorfeld der Bewegung
$(\dots)_X$	Index x-Koordinatenrichtung
y	Koordinate des kartesischen Koordinatensystems, Variable
$(\dots)_Y$	Index y-Koordinatenrichtung
z	Koordinate des kartesischen Koordinatensystems, Variable
$(\dots)_Z$	Index z-Koordinatenrichtung
α	Konstante, Exponent
β_n	Dämpfungsgrad in normaler Richtung
β_t	Dämpfungsgrad in tangentialer Richtung

δ_n	Verschiebung zwischen den Kontaktflächen in normaler Richtung (Skalar)
δ_t	Verschiebung zwischen den Kontaktflächen in tangentialer Richtung (Vektor)
μ	Reibungskoeffizient
ν	Poissonzahl
$\bar{\nu}$	Effektive Poissonzahl
ρ	Dichte
ρ_{min}	Kleinstes zulässiges Verhältnis des kleinsten zum größten Kugelradius
φ	Vektor der Orientierungswinkel (z.B. Eulerwinkel)
ϕ	Größter zulässiger Winkel zwischen den Tangentenflächen im Schnittpunkt der Kugeloberflächen
σ	Standardabweichung
σ_m	Mittlere Standardabweichung aus allen Messpunkten
σ_{max}	Maximale Standardabweichung aus allen Messpunkten
σ_μ	Messunsicherheit (Standardabweichung des Mittelwerts)
ω	Winkelgeschwindigkeit (Skalar)
$\boldsymbol{\omega}$	Vektor der Winkelgeschwindigkeit (Pseudovektor)

10 Literaturverzeichnis

- [AFG+12] Amberger, Stefan; Friedl, Michael; Goniva, Christoph: *Approximation of objects by spheres for multisphere simulations in DEM*. In: *Proceedings of European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012)*, Wien, Österreich (2012), S.1-13.
- [AIK+08] Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel; et al. (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. 3.Aufl., Berlin/Heidelberg : Springer, 2008. - ISBN 978-3-540-72928-0.
- [ALT12] Altenbach, Holm: *Kontinuumsmechanik – Einführung in die materialunabhängigen und materialabhängigen Gleichungen*. 2.Aufl., Berlin/Heidelberg : Springer, 2012. - ISBN 978-3-642-24118-5.
- [ArF09] Arnold, Dieter; Furmans, Kai: *Materialfluss in Logistiksystemen*. 6.Aufl., Heidelberg/Dordrecht/London : Springer, 2009. - ISBN 978-3-642-01404-8.
- [AsP98] Ascher, Uri M.; Petzold, Linda R.: *Computer Methods for Ordinary Differential Equations and Differential-Algebraic Equations*. Philadelphia, PA, USA : Society for Industrial and Applied Mathematics, 1998. – ISBN 978-0-89871-412-8
- [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
- [ATK16b] AT Kearney (Hrsg.): *Europe's CEP Market: Growth on New Terms*. URL: <https://www.atkearney.com/documents/10192/649916/Europe%27s+CEP+Market+-+Growth+on+New+Terms+%283%29.pdf/6613e0d5-1620-4694-b52c-26f8ef1b4ead> - Abrufdatum: 07.03.2016
- [ATK16c] AT Kearney (Hrsg.): *KEP-Markt-Studie 2013*. URL: <https://www.atkearney.de/documents/856314/2609776/KEP+Markt+Studie+2013.pdf/2f3a1459-c804-4c78-9eb6-ac7f69631772> - Abrufdatum: 07.03.2016
- [BaB90] Baxter, G.William; Behringer, R.P.: *Cellular automata models for granular flow*. In: *Physical Review A*, Volume 42, Number 2 (1990), S.1017-1020.
- [BAE91] Baerveldt, Albert-Jan: *Singulation of Parcels with a Sensor-Based Robot-System*. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, Osaka, Japan (1991), S. 523-528.

- [BAT02] Bathe, Klaus-Jürgen: *Finite-Elemente-Methoden*. 2.Aufl., Berlin/Heidelberg : Springer, 2002. – ISBN 3-540-66806-3.
- [BEU16] Beumer Group: *Automatic Parcel Singulator*. Firmenschrift. URL: https://www.beumergroup.com/uploads/tx_bbbrochures/Crisplant_Automatic_Parcel_Singulator.pdf - Abrufdatum: 11.03.2016
- [BGO98] Beretty, Robert-Paul; Goldberg, Ken; Overmars, Mark H. et al.; *Computing fence designs for orienting parts*. In: *Computational Geometry*, Volume 10 (1998), S. 249-262.
- [BHH05] Box, George E.P.; Hunter, J.Stuart; Hunter, William J.: *Statistics for Experimenters – Design, Innovation, and Discovery*. 2.Aufl., Hoboken (New Jersey) : John Wiley & Sons, 2005. - ISBN 978-0471-71813-0.
- [BIB16] Bibliographisches Institut GmbH (Dudenverlag) (Hrsg.): *Schüttgut – Bedeutungsübersicht*. URL: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Schuettgut> - Abrufdatum 14.03.2016, Stichwort: Schüttgut.
- [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/pressemittelungen/2015/BIEK_KEP-Studie_2015.pdf - Abrufdatum: 07.03.2016
- [BoH05] Bozer, Yavuz A.; Hsieh, Ying-Jiun: *Throughput performance analysis and machine layout for discrete-space closed-loop conveyors*. In: *IIE Transactions*, Volume 37, Issue 1, 2005, S.77-89.
- [ChD98] Chopard, Bastien; Droz, Michel: *Cellular Automata Modeling of Physical Systems*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1998. – ISBN 0-521-46168-5.
- [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
- [CSF12] Chang, Lillian; Smith, Joshua R.; Fox, Dieter: *Interactive singulation of objects from a pile*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Paul, Minnesota, USA (2012), S. 3875 – 3882.
- [CuS79] Cundall, P.A.; Strack, O.D.L.: *A discrete numerical model for granular assemblies*. In: *Géotechnique*, Volume 29 (1979), S.47-65.

- [DHL11] DHL International GmbH: *Paketkonzept 2012*. Präsentation, URL: http://www.dpdhl.com/de/presse/pressemitteilungen/2011/deutsche_post_dhl_erweitert_paketnetz/_jcr_content/mainpar/cols2_1/rightcolpar/downloadarticle/dai-tems/downloadarticleitem_2.download - Abrufdatum: 10.03.2016
- [DHL16] DHL International GmbH: *Versandbedingungen DHL Paket national und international*. URL: <http://www.dhl.de/content/dam/dhlde/downloads/paket/agb-2016/dhl-infoblatt-versandbedingungen-122015.pdf> - Abrufdatum: 08.03.2016
- [DPD16] Dynamic Parcel Distribution GmbH&Co KG (DPD): *Allgemeine Geschäftsbedingungen*. URL: <http://www.dpd.com/de/home/siteutilities/agb> - Abrufdatum: 08.03.2016
- [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
- [DZX+13] Dong, Yin-Feng; Zhang, Guang-Cai; Xu, Ai-Guo et al.: *Cellular Automata Model for Elastic Solid Material*. In: *Communication in Theoretical Physics*, Volume 59 (2013), S.59-67.
- [EIM06] Eldemir, F.; Malmborg, C.J.: *Earliest Completion Rule: An Alternative Order Sortation Strategy*. In: Meller, R. et al. (Hrsg.): *Progress in Material Handling Research*, Charlotte : Material Handling Institute, 2006, S.147-155.
- [ERZ14] Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R. (Hrsg.): *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Berlin/Heidelberg : Springer, 2014. - ISBN 978-3-662-43815-2.
- [FCA89] Frederick, Brian; Carrell, R. Michael; Alexander, Eugene M. et al.: *Handling of Irregular-Sized Mailpieces by Adaptive Robotics*. In: *IEEE Control Systems Magazine*, Volume 9, Issue 2 (1989), S. 3-8.
- [FEM91] Federation Europeenne de la Manutention (Hrsg.): *FEM-Richtlinie 2.581 – Schüttguteigenschaften*. Frankfurt : VDMA-Verlag, 1991. - Deutsche Ausgabe
- [FIT03] Fitzpatrick, Paul: *First Contact: An Active Vision Approach to Segmentation*. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, USA (2003), S. 2161-2166.
- [FIV15(a)] Fives (Hrsg.): *Linear Parcel Singulator*. Firmenschrift. URL: <http://intralogistics.fivesgroup.com/solutions-products/products/singulators/linear-parcel-singulator.html> - Abrufdatum: 24.07.2015

- [FIV15(b)] Fives (Hrsg.): *Accord Singulator*. Firmenschrift. URL: <http://intralogistics.fives-group.com/solutions-products/products/singulators/accord.html> - Abrufdatum: 24.07.2015
- [FöF10] Föllner, Jörg: *Steigerung der Sorterauslastung durch optimale Nutzung der Zuführkapazitäten*. In: Föllner, Jörg; Furmans, Kai (Hrsg.): *Wege zu einer verantwortlichen Ressourcenverwendung in der Logistik*, Tagungsband zum VDI-IFL Sommerseminar 2010, Karlsruhe : Verlag Karlsruhe IFL, S. 99-124. - ISSN 2190-6599.
- [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.
- [GHS+14] Göttlich, Simone; Hoher, Simon; Schindler, Patrick et al.: *Modeling, simulation and validation of material flow on conveyor belts*. In: *Applied Mathematical Modeling*, Volume 38 (2014), S.3295-3313.
- [GUD10] Gudehus, Timm: *Logistik – Grundlagen, Strategien, Anwendungen*. 4.Aufl., Heidelberg/Dordrecht/London : Springer, 2010. - ISBN 978-3-540-89388-2.
- [HÄN04] Hänel, Dieter: *Molekulare Gasdynamik – Einführung in die kinetische Theorie der Gase und Lattice-Boltzmann-Methoden*. Berlin/Heidelberg : Springer, 2004. – ISBN 3-540-44247-2.
- [HBM01] Hartlepp, Karl Heinz; Bruun, Brian; Matanin, Christopher Robert (Erfinder): *Parcel Singulation System*. Patentschrift US 6259967, 2001.
- [HEK09] Hartung, Joachim; Elpelt, Bärbel; Klösener, Karl-Heinz: *Statistik - Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. 15.Aufl., München : Oldenbourg, 2009. – ISBN 978-3-486-59028-9.
- [HLW06] Hairer, Ernst; Lubich, Christian; Wanner, Gerhard: *Geometric Numerical Integration – Structure-Preserving Algorithms for Ordinary Differential Equations*. 2.Aufl., Berlin/Heidelberg : Springer, 2006. – ISBN 978-3-540-30663-4.
- [HoI84] Horn, Berthold K.P.; Ikeuchi, Katsushi: *The Mechanical Manipulation of Randomly Oriented Parts*. In: *Scientific American*, Volume 251, No. 2 (1984), S. 100-109.

- [ITA15] Itasca Consulting Group (Hrsg.): *PFC 5.0 Documentation*. Software-Version 5.00.23. – Produktdokumentation. URL: <http://www.itascacg.com/software/pfc>
- [JoF14a] Jodin, Dirk; Fritz, Matthias: *Planungs- und Einsatzkriterien für Sortiersysteme – Teil I*. In: *f+h*, Nr. 4 (2014), S.12-15.
- [JoF14b] Jodin, Dirk; Fritz, Matthias: *Planungs- und Einsatzkriterien für Sortiersysteme – Teil II*. In: *f+h*, Nr. 5 (2014), S.18-21.
- [JOH03] Johnson, K.L.: *Contact Mechanics*. 9.Aufl., Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2003. – ISBN 0-521-34796-3.
- [JOH98] Johnson, M. Eric: *The impact of sorting strategies on automated sortation system performance*. In: *IIE Transactions*, Volume 30, Issue 1, 1998, S.67-77.
- [JoW10] Jodin, Dirk; Wolfschluckner, Andreas: *Merge problems with high speed sorters*. In: Ellis, Kimberley; Meller, Russel; Ogle, Michael K. et al. (Hrsg.): *Progress in Material Handling Research 2010*, Charlotte, NC, USA : MHIA Material Handling Industry of America, 2010, S.186-196. – ISBN 978-1-882780-16-7.
- [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.
- [KBE08] Kirchheim, Alice; Burwinkel, Matthias; Echelmeyer, Wolfgang: *Automatic Unloading of Heavy Sacks from Containers*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Qingdao, China (2008), S.946-951. - ISBN 978-1-4244-2502-0.
- [KLE13] Kleppmann, Wilhelm: *Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren*. 8.Aufl., München/Wien : Carl Hanser, 2013. - ISBN 978-3-446-43752-4.
- [KLU14] Klug, Florian: *Modelling and analysis of synchronised material flow with fluid dynamics*. In: *Physica A*, Volume 393 (2014), S.404-417.
- [KOE12] Koether, Reinhard: *Distributionslogistik – Effiziente Absicherung der Lieferfähigkeit*. Wiesbaden : Springer Gabler, 2012. - ISBN 978-3-8349-2897-9.
- [KOL98] Koller, Rudolf: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau*. 4.Aufl., Berlin/Heidelberg : Springer, 1998. - ISBN-13:978-3-642-80418-2.
- [KoW98] Koster, René de; Wijnen, R.: *How to obtain maximum capacity on high-capacity sorters*. In: Graves, R.J. (Hrsg.): *Progress in Material Handling Research*, Charlotte : Material Handling Institute, 1998, S.143-158.

- [KRW+08] Kruggel-Emden, H.; Rickelt, S.; Wirtz, S. et al.: *A study on validity of the multi-sphere Discrete Element Method*. In: *Powder Technology*, Volume 188 (2008), S.153-165.
- [KZS11] Kopicki, Marek; Zurek, Sebastian; Stolkin, Rustam et al.: *Learning to predict how rigid objects behave under simple manipulation*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China (2011), S. 5722-5729.
- [LaO11] Laurien, Eckart; Oertel, Herbert: *Numerische Strömungsmechanik - Grundgleichungen und Modelle - Lösungsmethoden - Qualität und Genauigkeit*. 4.Aufl., Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2011.
- [LCG+06] LaMarche, Keirnan R.; Conway, Stephen L.; Glasser, Benjamin J. et al.: *Cellular automata model of gravity-driven granular flows*. In: *Granular Matter*, Volume 9, Issue 3 (2007), S.219-229.
- [LeG88] Lee, Jay; Glickman, Frederick: *Applying Intelligent Robotics and Vision to Mail Processing*. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Arlington, Virginia, USA (1988), S. 724-729.
- [LFJ12] Landschützer, C.; Fritz, M.; Jodin, D.: *Knowledge Based Engineering and Modern CAE for Sorting Systems*. In: *Proceedings in Manufacturing Systems*, Volume 7, Issue 1 (2012), S.69-76. - ISSN 2067-9238.
- [LTM15] Lu, G.; Third, J.R.; Müller, C.R.: *Discrete element models for non-spherical particle systems: From theoretical developments to applications*. In: *Chemical Engineering Science*, Volume 127 (2015), S.425-465.
- [LXM15] Li, Cheng-Qing; Xu, Wen-Jie; Meng, Qing-Shan: *Multi-sphere approximation of real particles for DEM simulation based on a modified greedy heuristic algorithm*. In: *Powder Technology*, Volume 286 (2015), S.478-487.
- [MAS99] Mason, Matthew T.: *Progress in Nonprehensile Manipulation*. In: *The International Journal of Robotics Research*, Volume 18, No. 11 (1999), S.1129-1141.
- [MiD53] Mindlin, R.D.; Deresiewicz, H.: *Elastic spheres in contact under varying oblique forces*. In: *Journal of Applied Mechanics*, Volume 75 (1953), S.327-344.
- [MME+07] Muth, B.; Müller, M.-K.; Eberhard, P. et al.: *Collision Detection and Administration Methods for Many Particles with Different Sizes*. In: *CD Proceedings of 4th International Conference on Discrete Element Methods (DEM 07)*, Brisbane, Australia (2007), S.1-18.

- [MÖH83] Möhle, Bernd: *Zum Bewegungsverhalten von Stückgütern auf Gurtförderern beim Ausrichten und Abweisen*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1983.
- [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.
- [MRU16] MRU GmbH (Hrsg.): *Marktuntersuchung und Entwicklungstrends von Kurier-, Express- und Paketdienstleistungen 2015*. URL: http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Post/Unternehmen_Institutionen/Marktbeobachtung/NichtLizenzpflichtigePDL/Marktuntersuchung2015.pdf?__blob=publicationFile&v=2 - Abrufdatum: 07.03.2016
- [MÜL80] Müller, Heinz: *Untersuchungen zum Bewegungsverhalten von Einzellasten auf Gurtförderern beim Abweisvorgang*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1980.
- [MUN04] Munjiza, Ante: *The Combined Finite-Discrete Element Method*. Chichester, UK : John Wiley & Sons, 2004. – ISBN 0-470-84199-0.
- [OSK08] Ott, Rainer; Schmatz, Johann Josef; Kremer, Erwin (Erfinder): *Vorrichtung und Verfahren zum Entladen von Gegenständen aus einem Behälter*. Patentoffenlegungsschrift DE 10 2007 024 670 A1, 2007.
- [PAR13] Parteli, Eric J.R.: *DEM simulation of particles of complex shapes using the multi-sphere method: application for additive manufacturing*. In: *AIP Conference Proceedings*, Volume 1542 (2013), S.185-188.
- [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.
- [PIA09] Piatkowski, Tomasz: *Model and Analysis of the Process of Unit-Load Stream Sorting by a Manipulator with Torsional Disks*. In: *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Volume 47, No. 4 (2009), S. 871-896.
- [PIA11] Piatkowski, Tomasz: *Analysis of translational positioning of unit loads by directionally-oriented friction force fields*. In: *Mechanism and Machine Theory*, Volume 46, Issue 2 (2011), S. 201-217.
- [POP10] Popov, Valentin L.: *Kontaktmechanik und Reibung - Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik*. 2.Aufl., Berlin/Heidelberg/London : Springer, 2010. - ISBN 978-3-642-13301-5.

- [PöS05] Pöschel, Thorsten; Schwager, Thomas: *Computational Granular Dynamics – Models and Algorithms*. Berlin/Heidelberg/New York : Springer, 2005. – ISBN 978-3-540-21485-4.
- [RAK12] Rakitsch, Stefan: *Dimensionierung und Auslegung stark geneigter Schneckenförderer*. Dissertation, Technische Universität München, 2012.
- [ReM04] Di Renzo, Alberto; Di Maio, Francesco Paolo: *Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes*. In: *Chemical Engineering Science*, Volume 59 (2004), S.525-541.
- [ROT00] Roth, Karlheinz: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band 1: Konstruktionslehre*. 3.Aufl., Berlin/Heidelberg : Springer, 2000. - ISBN 978-3-642-62099-7.
- [RSW08] Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik – Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin/Heidelberg : Springer, 2008. - ISBN 978-3-540-35281-5.
- [SAR11] Schneider, B.; D’Addetta, G.A.; Ramm, E.: *On Material Modeling by Polygonal Discrete Elements*. In: Onate, Eugenio; Owen, Roger (Hrsg.): *Particle-Based Methods – Fundamentals and Applications*, Dordrecht/Heidelberg/London : Springer, 2011, S.159-185. - ISBN 978-94-007-0734-4.
- [SBH10] Siebertz, Karl; van Bebber, David; Hochkirchen, Thomas: *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. Berlin/Heidelberg : Springer, 2010. - ISBN 978-3-642-05492-1.
- [SCH09] Schulze, Dietmar: *Pulver und Schüttgüter – Fließigenschaften und Handhabung*. Berlin/Heidelberg : Springer, 2009. - ISBN 978-3-540-88448-4.
- [SCH10] Schlick, Tamar: *Molecular Modeling and Simulation*. In: Antman, S.S.; Marsden, J.E.; Sirovich, L.: *Interdisciplinary Applied Mathematics*. 2nd Edition, New York/Dordrecht/Heidelberg : Springer, 2010. - ISBN 978-1-4419-6350-5.
- [SCH14] Schroader (Erfinder): *Singulator Conveyor*. Patentoffenlegungsschrift US 2014/0262686 A1, 2014.
- [SCH95] Schlüter, Jörg M.: *Untersuchungen zum Bewegungsverhalten von Stückgütern auf kurvengängigen Stetigförderern*. Dissertation, Dortmund : Verlag Praxiswissen, 1995. – ISBN 3-929443-43-0
- [ScK09] Schwarz, Hans Rudolf; Köckler, Norbert: *Numerische Mathematik*. 7. Aufl., Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009. - ISBN 978-3-8348-0683-3.

- [SEM15] Semrau, Kai F.: *Leistungsermittlung und Layoutgestaltung von Stückgut-Sortiersystemen*. Dissertation, Dortmund : Verlag Praxiswissen, 2015. – ISBN 978-3-86975-111-5.
- [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.
- [SHA05] Shabana, Ahmed A.: *Dynamics of Multibody Systems*. 3.Aufl., Cambridge : Cambridge University Press, 2005. – ISBN 978-0-521-85011-7.
- [SIE08] Siemens AG (Hrsg.): *More Intelligence and Less Space – Singulator Visicon*. Firmenschrift E10001-PA-A28-V1-7600, 2008.
- [SIE13] Siemens AG (Hrsg.): *Mitarbeiter sind 15 Mal schneller als bisher*. In: Siemens AG (Hrsg.): *SILOG News – Automation für Post, Kurier-, Express- und Paket-Service*. Ausgabe 2 (2013), S. 5. - Firmenschrift
- [SPR16] Springer Gabler Verlag (Hrsg.): *Gabler Wirtschaftslexikon* (Onlineversion). URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/83495/stueckgut-v7.html> - Abrufdatum: 14.03.2016, Stichwort: Stückgut.
- [SSI16] SSI Schäfer GmbH (Hrsg.): *SSI Order Verifier*. Firmenschrift Nr. 080311de. URL: http://media.ssi-schaefer.de/fileadmin/ssi/documents/main_brochures/de/order-verifier_de.pdf - Abrufdatum: 21.07.2016
- [StH05] Stevens, A.B.; Hrenya, C.M.: *Comparison of soft-sphere models to measurements of collision properties during normal impacts*. In: *Powder Technology*, Volume 154 (2005), S.99-109.
- [TAG11] Taghavi, Reza: *Automatic clump generation based on mid-surface*. In: Sainsbury, David; Hart, Roger; Detournay, Christine et al. (Hrsg.): *Continuum and Distinct Element Modeling in Geomechanics* (CD Proceedings), Minneapolis, USA (2011), S.791-797.
- [TrK10] Treiber, Martin; Kesting, Arne: *Verkehrsdynamik und –simulation – Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Berlin/Heidelberg : Springer, 2010. - ISBN 978-3-642-05227-9.
- [VDI14] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): *VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 – Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen*. Berlin : Beuth Verlag, 2014.

- [VDI15] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): *VDI-Richtlinie 3619 – Sortier- und Verteilsysteme für Stückgut (Entwurf)*. Berlin : Beuth Verlag, 2015.
- [VDI93] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): *VDI-Richtlinie 2221 - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin : Beuth Verlag, 1993.
- [VDI97] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): *VDI-Richtlinie 2222 – Konstruktionsmethodik – Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Berlin : Beuth Verlag, 1997.
- [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.
- [WEN05] Wendemuth, Andreas: *Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung – ein mathematischer Zugang*. Berlin/Heidelberg : Springer, 2005. – ISBN 3-540-21885-8.
- [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
- [WOE11] Woernle, Christoph: *Mehrkörpersysteme-Eine Einführung in die Kinematik und Dynamik von Systemen starrer Körper*. Berlin/Heidelberg : Springer, 2011. - ISBN 978-3-642-15981-7.
- [WRI06] Wriggers, Peter: *Computational Contact Mechanics*. 2.Aufl., Berlin/Heidelberg : Springer, 2006. – ISBN 978-3-540-32608-3.
- [YaK86] Yang, H.S.; Kak, A.C.: *Determination of the Identity, Position and Orientation of the Topmost Object in a Pile: Some further Experiments*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, California (1986), S. 293-298.
- [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.

Anhang

A1 Datenblätter

Gurt Bandförderer

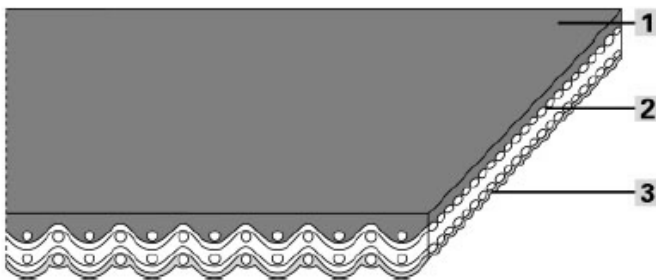
Habasit Produktdatenblatt H-6EHDT



Produktbezeichnung

Produktgruppe:	Hochleistungstransport- und Prozessbänder
Produktuntergruppe:	TPU-Transport- und Prozessbänder
Anwendungsbereich:	Innerbetrieblicher Materialfluss; Metallbearbeitung; Verpacken
Bandanwendungen:	Verpackungsband; Prozessband; Z-conveyor (goose/swan neck)
Besondere Merkmale:	Abriebfest; Längsbiegefähigkeit und Querstabilität; Ölbeständig
Transportart:	Horizontal; Steigtransport

Produktzeichnung (vergrößert)



Produktkonstruktion

1	Transportseite (Beschichtung):	Thermoplastisches Polyurethan (TPU)
1	Transportseite (Oberfläche):	Fein
1	Transportseite (Eigenschaften):	Mittlere Adhäsion
1	Transportseite (Farbe):	Dunkelgrün
2	Zugschicht (Material):	Polyester (PET)
	Anzahl der Gewebelagen:	2
3	Laufseite (Material):	Polyester (PET) Gewebe
3	Laufseite (Oberfläche):	Imprägniertes Gewebe
3	Laufseite (Farbe):	Hellgrau

Produkteigenschaften

Geeignet für Gleitunterlage:	Ja
Geeignet für Tragrollen:	Ja
Geeignet für gemuldete Installation:	Nein
Geeignet als Kurvenband:	Nein
Messerkantentauglich:	Nein
Geräuscharme Anwendungen:	Nein
Antistatisch ausgerüstet:	Ja
Einsatz in Metalldetektoren:	Ja
Schwer entflammbar:	Klassifiziert nach UL94HB (USA); HB = horizontale Verbrennung.
Lebensmittelzulässigkeit FDA:	Verwendung nicht vorgesehen No use intended
Lebensmittelzulässigkeit USDA:	Keine Anwendung vorgesehen
Lebensmittelzulässigkeit EU:	Nein
Sonstige Zulassungen:	JFRL bestanden

Technische Daten

Dicke:	1.7 mm	0.07 in.
Bandgewicht:	1.7 kg/m ²	0.35 lbs./sq.ft.
Kantenradius (min.):	NA mm	NA in.
Rollendurchmesser (min):	24 mm	0.9 in.
Trommel-/Rollendurchmesser bei Gegenbiegung (min.):	32 mm	1.3 in.
Zugkraft für 1 % Dehnung (k1% statisch) pro Breitereinheit (Habasit Standard SOP3-155 / EN ISO21181):	6 N/mm	34 lbs./in.
Zugkraft für 1% Dehnung nach Relaxation (k1% relaxiert) pro Breitereinheit (Habasit Standard SOP3-155 / EN ISO 21181):	4.4 N/mm	25 lbs./in.
Zulässige Zugkraft pro Breitereinheit:	10 N/mm	57 lbs./in.
Zulässige Betriebstemperatur (dauernd):	Min -30 °C Max 80 °C	Min -22 °F Max 176 °F
Reibwert gegen Gleitunterlage aus Stahlblech gebeizt (dekapiert):	0.20 [-]	0.2 [-]
Fabrikationsbreite:	4000 mm	157 in.

Alle Angaben sind approximative Werte unter gleichmässigen klimatischen Bedingungen: 23°C/73°F, 50% relative Feuchtigkeit (DIN 50005/ISO 554) und basieren auf der Master-Endverbindungs-methode.

Zusätzliche Technische Daten

Chemische Beständigkeit:	Verknüpfung zu "Chemikalienbeständigkeit": http://www.habasit.com/de/chemikalienbestaendigkeit.htm
	Für weitergehende Unterstützung wenden Sie sich bitte an Ihren Habasit Partner.
Montage und Bedienungsanweisungen:	Die Auflegedehnung (epsilon) ~ 0.3% nicht unterschreiten; Das Band locker montieren und anschliessend spannen bis es bei voller Bandbelastung tadellos läuft.
Einschränkungen:	Bei Erhitzung des Bandes bleiben Sägemehl oder Fasern haften!; Bei Verwendung eines Hochfrequenzsystems (HF) Erhitzung des Bandes kontrollieren!; Nicht geeignet für Nassbetrieb kombiniert mit höheren Temperaturen!; Dieses Produkt ist nicht nach den ATEX Richtlinien (EU-Richtlinie ATEX 95 bzw. 94/9 für die Verwendung in explosionsgefährdeten Atmosphären) geprüft.

Lagerung

Für Details siehe 'Anforderungen an die Lagerung und Handhabung von Bändern und Riemen' oder kontaktieren Sie Habasit. Bänder und Riemen sind vor Sonnenlicht/UV-Strahlen/Staub und Verschmutzung zu schützen. Ersatz-Bänder und -Riemen sind kühl und trocken und wenn möglich in der Original-Verpackung aufzubewahren.

Legende

*	Kein kalkulatorischer Wert
2)	Produkte mit verschiedenen Überzugsmaterialien wie Elastomer/Naturfaser/Silikon usw. unterliegen nicht der europ. Richtlinie 2002/72/EC
3)	CLA: Coordination of the centre line-average value Ra (in the US also Arithmetical Average (AA)) to the maximum peak to valley height Rt for surfaces manufactured by chip removal.
8)	Wegen des hohen Reibwerts der Lauf-/Scheibenseite nur eingeschränkt für den Einsatz mit Gleitunterlagen geeignet.
	Bundesinstitut fuer Risikobewertung
EEC	European Economic Community (Europäische Wirtschaftsgemeinschaft)
EU	Europäische Union (Richtlinie 2002/72/EC)
FDA	Food and Drug Administration
NA	Nicht verfügbar
NAP	Nicht zutreffend
USDA	United States Department of Agriculture = US-Landwirtschaftsministerium (für Nahrungsmittelsicherheit und -überprüfung - Washington D.C.)
JFRL	Japan Food Research Laboratory

Kameraobjektiv PENT C814-5M

Technical Specification:

Designation	C814-5M (KP)	C1614-5M (KP)	C2514-5M (KP)
Focal Length	8 mm	16 mm	25 mm
F-Stop	1.4-16	1.4 - 16	1.4 - 16
Format	2/3"	2/3"	2/3"
Mount	C	C	C
Angle of View, horiz.	57.8°	30.8°	19.9° *
MOD	0.1m - ∞	0.1m - ∞	0.1m - ∞ *
Filter Thread	58 mm	40.5 mm	40.5 mm *
Iris	manual	manual	manual
Dimensions	60.8 (D) x 64 (L) mm	43 (D) x 47 (L) mm	43 (D) x 44 (L) *
Weight	260 g	140 g	130 g *

* = reserved right to change

Kamera PIKE F-100B

Camera Specifications

	PIKE F-100 B/C	PIKE F-100 B/C fiber
Image device	Type 2/3 (diag. 10.5 mm) progressive scan, KODAK CCD	
Effective picture elements	1004 (H) x 1004 (V)	
Picture size	1000 (H) x 1000 (V) (all modes and color formats)	
Cell size	7.4 µm x 7.4 µm	
Resolution depth	8 bit / 10 bit / 12 bit / 14 bit / 16 bit (High SNR mode)	
Lens mount	C-Mount	
Digital interface	IEEE1394b, 2xbilingual(daisy chain)	IEEE1394b, 1 x bilingual, 1 x GOF connector (2 x optical fiber on LCLC)
Transfer rate	100 Mbit/s, 200 Mbit/s, 400 Mbit/s, 800 Mbit/s	
Frame rates	Up to 60 fps (Mono8, Raw8), 43 fps (YUV 4:1:1), 33 fps (YUV 4:2:2, Raw16), 22 fps (RGB8)	
Gain control	mono: Manual 0-22 dB, auto gain;	color: Manual 0-20 dB, auto gain
Shutter speed	43 µs ...~ 67 s, auto shutter (select. AOI)	
External trigger shutter	Programmable, trigger level control single trigger, bulk trigger, programmable trigger delay	
Smart features	AGC/AEC/AWB with autofunction AOI; only color: AWB/color correction/hue/saturation; real-time shading correction, LUT, 64 MB image memory, mirror, binning, sub-sampling, High SNR, storable user sets, 2 progr. inputs, 4 progr. outputs, RS-232 port, SIS [secure image signature], sequence mode, anti-smear mode, 4x/8x binning, 12-bit speed increase mode	
Power requirements	DC 8 V - 36 V (via IEEE 1394 cable or 12-pin HIROSE)	
Power consumption	Typ. 5 watt (@ 12 V DC)	fiber: Typ. 5.75 watt (@ 12 V DC)
Dimensions	96.8 mm x 44 mm x 44 mm (L x W x H); incl. connectors, w/o trippod and lens	
Mass	250 g (without lens)	
Operating temperature	+5 ...+ 50° Celsius housing temperature (without condensation)	
Storage temperature	-10 ...+ 60° Celsius ambient temperature (without condensation)	
Regulations	EN 55022, EN 61000, EN 55024, FCC Class B, DIN ISO 9022, RoHS (2002/95/EC)	
Options	IR cut/pass filter (mono), protection glass (color), host adapter card, angled head, power out (HIROSE), AVT FirePackage/Direct FirePackage/Fire4Linux	

Gyrosensor L3G4200D

Table 4. Mechanical characteristics @ Vdd = 3.0 V, T = 25 °C, unless otherwise noted⁽¹⁾

Symbol	Parameter	Test condition	Min.	Typ. ⁽²⁾	Max.	Unit
FS	Measurement range	User-selectable		±250		dps
				±500		
				±2000		
So	Sensitivity	FS = 250 dps		8.75		mdps/digit
		FS = 500 dps		17.50		
		FS = 2000 dps		70		
SoDr	Sensitivity change vs. temperature	From -40 °C to +85 °C		±2		%
DVOff	Digital zero-rate level	FS = 250 dps		±10		dps
		FS = 500 dps		±15		
		FS = 2000 dps		±75		
OffDr	Zero-rate level change vs. temperature ⁽³⁾	FS = 250 dps		±0.03		dps/°C
		FS = 2000 dps		±0.04		dps/°C
NL	Non linearity ⁽⁴⁾	Best fit straight line		0.2		% FS
DST	Self-test output change	FS = 250 dps		130		dps
		FS = 500 dps		200		
		FS = 2000 dps		530		
Rn	Rate noise density	BW = 50 Hz		0.03		dps/ sqrt(Hz)
ODR	Digital output data rate			100/200/ 400/800		Hz
Top	Operating temperature range		-40		+85	°C

1. The product is factory calibrated at 3.0 V. The operational power supply range is specified in Table 5.
2. Typical specifications are not guaranteed.
3. Min/max values have been estimated based on the measurements of the current gyros in production.
4. Guaranteed by design.

Beschleunigungssensor LIS331DLH

Table 3. Mechanical characteristics @ Vdd = 2.5 V, T = 25 °C unless otherwise noted⁽¹⁾

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ. ⁽²⁾	Max.	Unit
FS	Measurement range ⁽³⁾	FS bit set to 00		±2.0		g
		FS bit set to 01		±4.0		
		FS bit set to 11		±8.0		
So	Sensitivity	FS bit set to 00 12 bit representation	0.9	1	1.1	mg/digit
		FS bit set to 01 12 bit representation	1.8	2	2.2	
		FS bit set to 11 12 bit representation	3.5	3.9	4.3	
TCSO	Sensitivity change vs temperature	FS bit set to 00		±0.01		%/°C
TyOff	Typical zero-g level offset accuracy ^{(4),(5)}	FS bit set to 00		±20		mg
TCO#	Zero-g level change vs temperature	Max delta from 25 °C		±0.1		mg/°C
An	Acceleration noise density	FS bit set to 00		218		µg/√Hz
Vst	Self-test output change ^{(6),(7),(8)}	FS bit set to 00 X axis	120	300	550	LSb
		FS bit set to 00 Y axis	120	300	550	LSb
		FS bit set to 00 Z axis	140	350	750	LSb
Top	Operating temperature range		-40		+85	°C
Wh	Product weight			20		mgram

1. The product is factory calibrated at 2.5 V. The operational power supply range is from 2.16 V to 3.6 V.
2. Typical specifications are not guaranteed
3. Verified by water level test and measurement of Initial offset and sensitivity
4. Typical zero-g level offset value after MSL3 preconditioning
5. Offset can be eliminated by enabling the built-in high pass filter
6. The sign of "Self-test output change" is defined by CTRL_REG4 STsign bit (Table 28), for all axes.
7. Self-test output changes with the power supply. "Self-test output change" is defined as $OUTPUT[LSb]_{CTRL_REG4\ ST\ bit=1} - OUTPUT[LSb]_{CTRL_REG4\ ST\ bit=0}$: 1LSb=4g/4096 at 12bit representation, ±2 g Full-scale
8. Output data reach 99% of final value after 1/ODR- 1 ms when enabling self-test mode, due to device filtering

A2 Versuchspläne

Vollfaktorieller Versuchsplan (Versuche mit einem Paket)

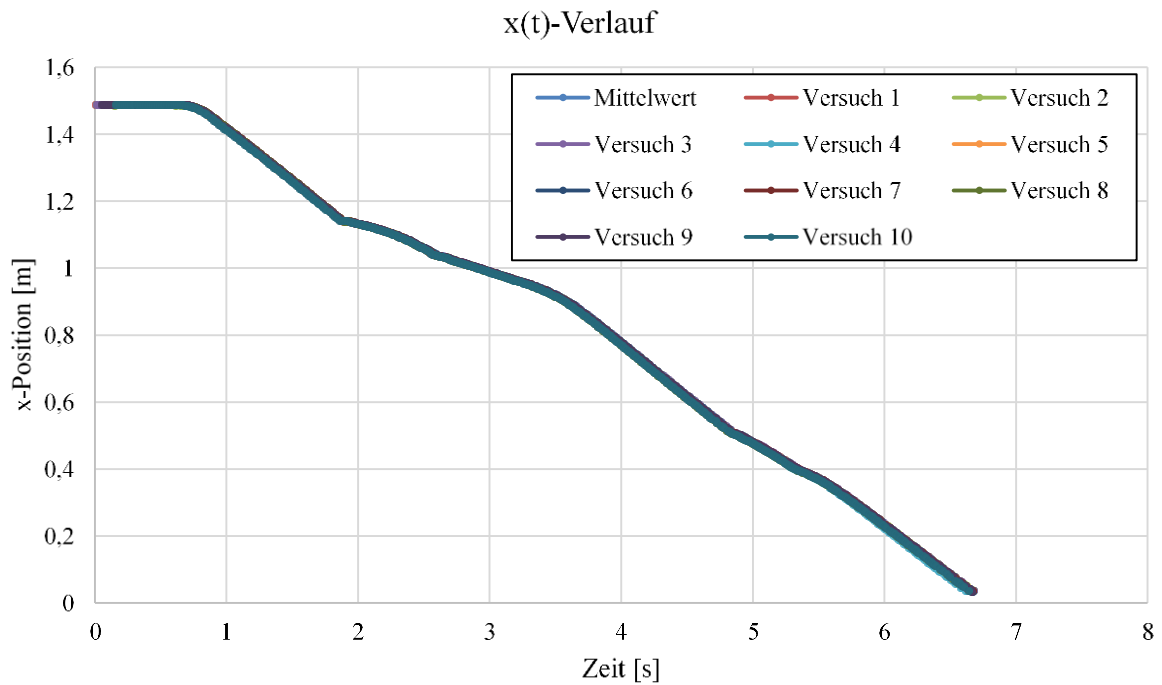
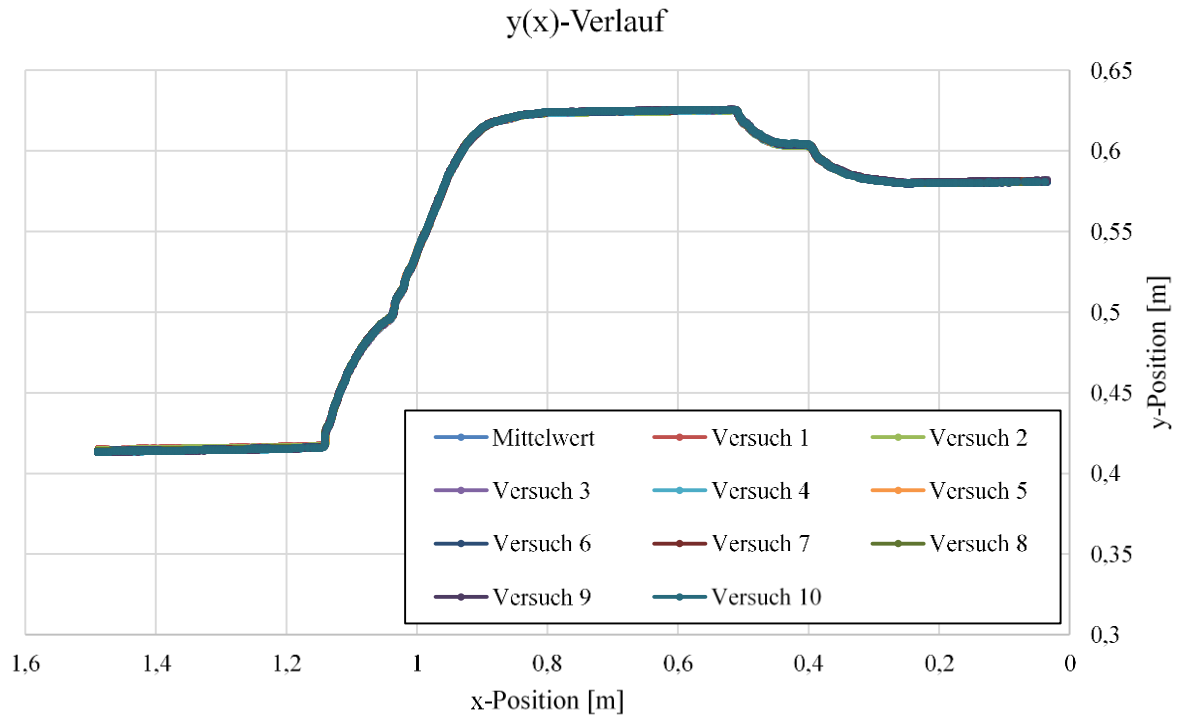
Versuchsnummer	Faktorstufe			
	A	B	C	D
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1

Fraktionell faktorieller Versuchsplan (Versuche mit zwei Paketen)

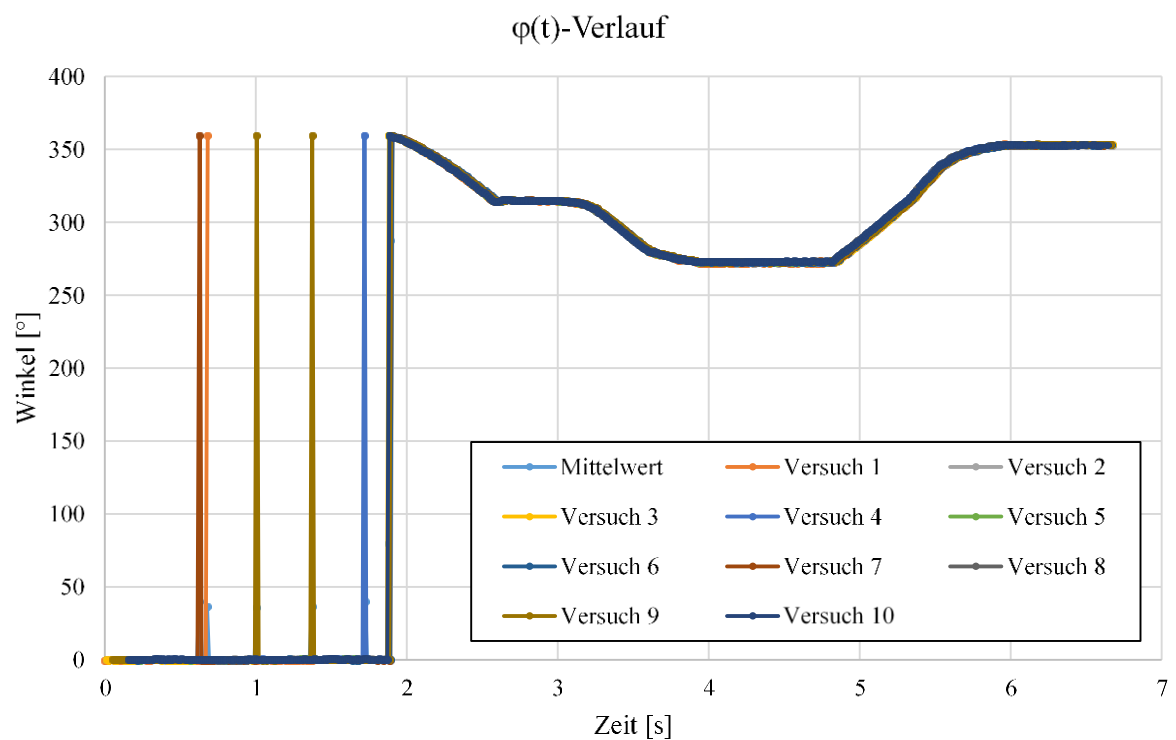
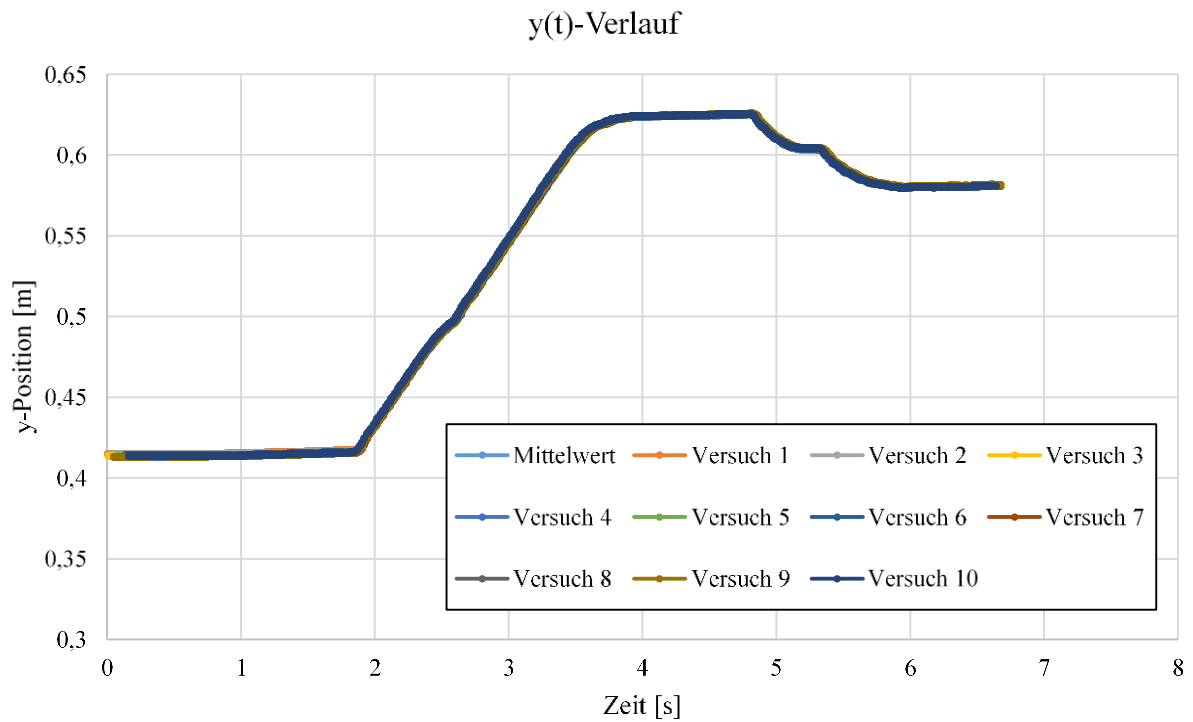
Versuchsnummer	Faktorstufe				
	A	B	C	D	E
1	-1	-1	-1	-1	1
2	1	-1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1	-1
4	1	1	-1	-1	1
5	-1	-1	1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	1
7	-1	1	1	-1	1
8	1	1	1	-1	-1
9	-1	-1	-1	1	-1
10	1	-1	-1	1	1
11	-1	1	-1	1	1
12	1	1	-1	1	-1
13	-1	-1	1	1	1
14	1	-1	1	1	-1
15	-1	1	1	1	-1
16	1	1	1	1	1

A3 Ergebnisse der Versuchsläufe

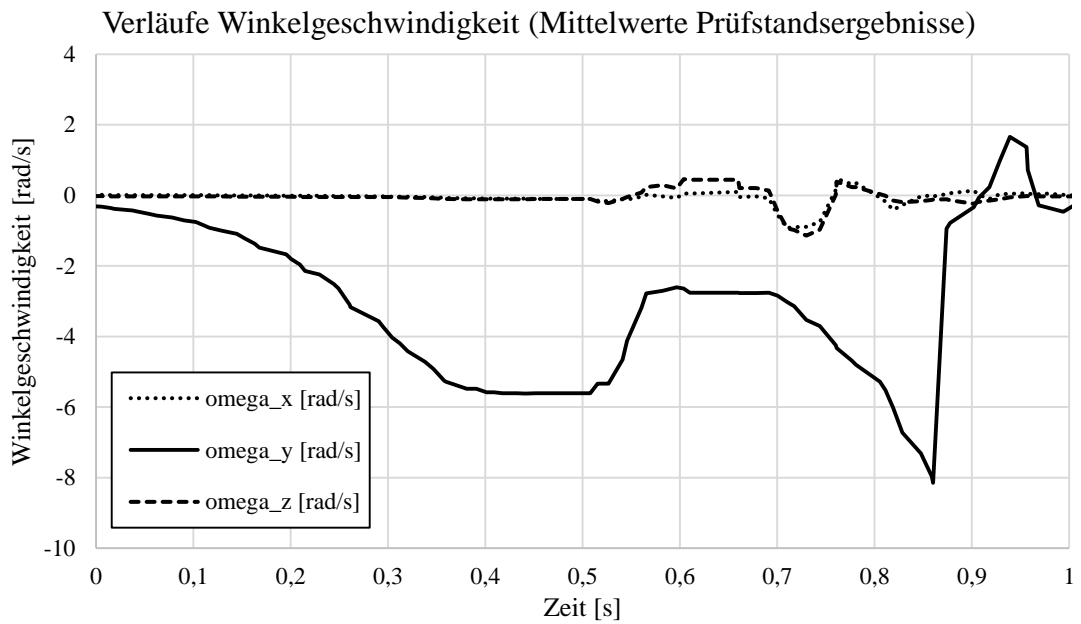
Szenario „Pakete klein“ (1 Paket)⁴⁸



⁴⁸ Die dargestellten Ergebnisse entsprechen den realen Auswertungen, die für die Ausführungen in Kapitel 6 durch einen Offset bereinigt wurden.

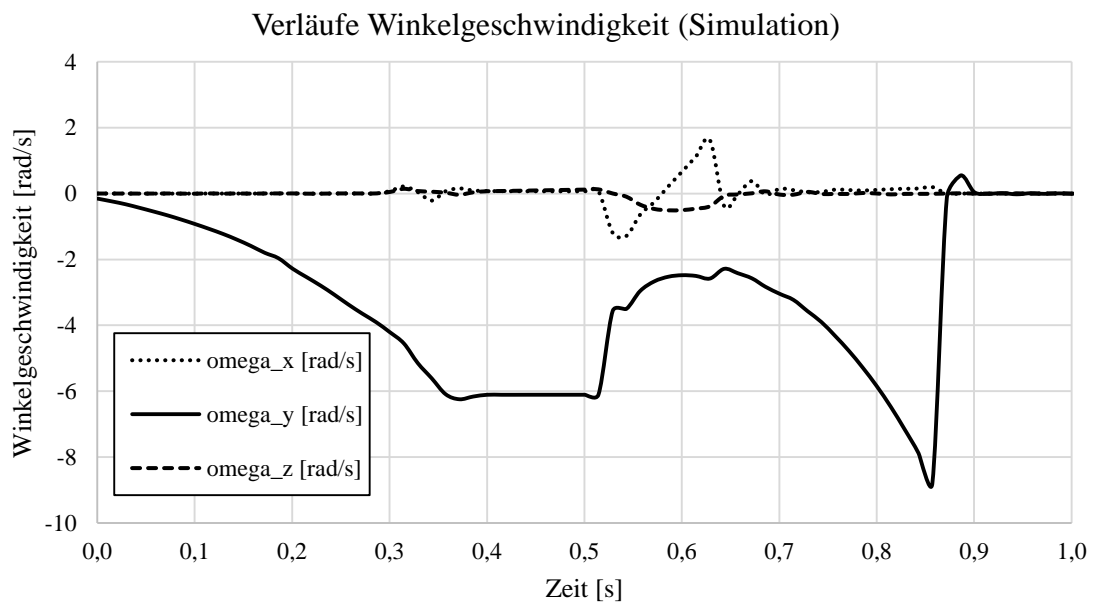


Szenario „Fallversuch“ (1 Paket)

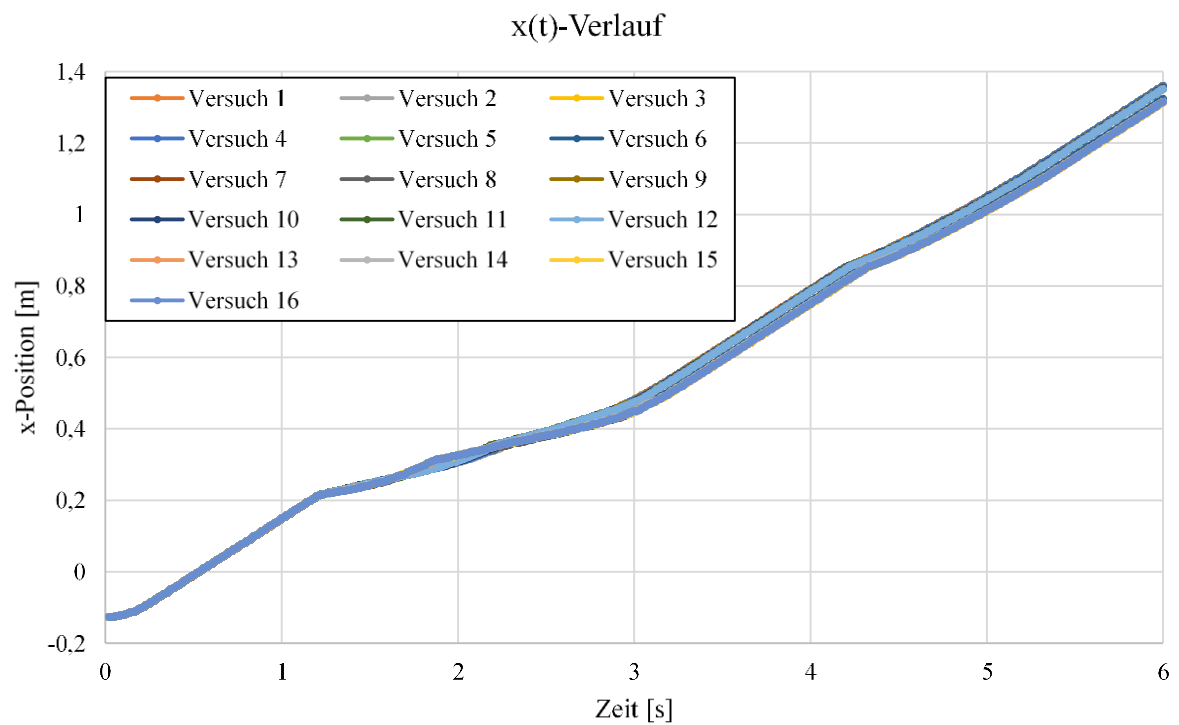
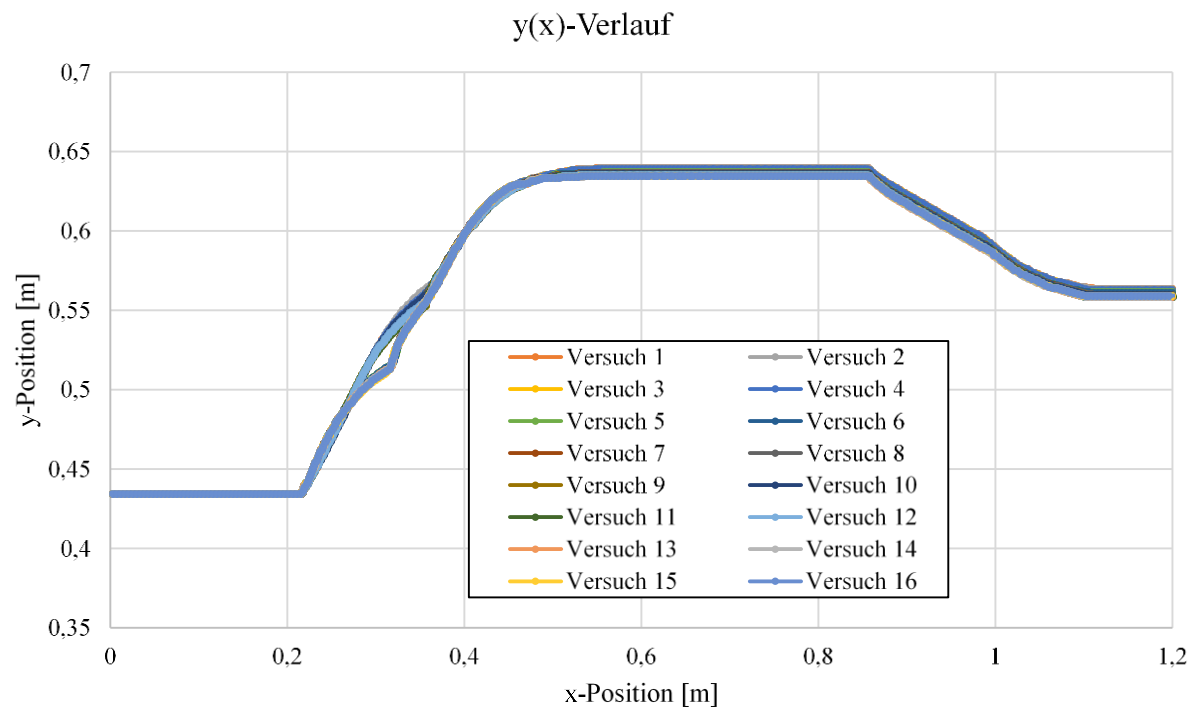


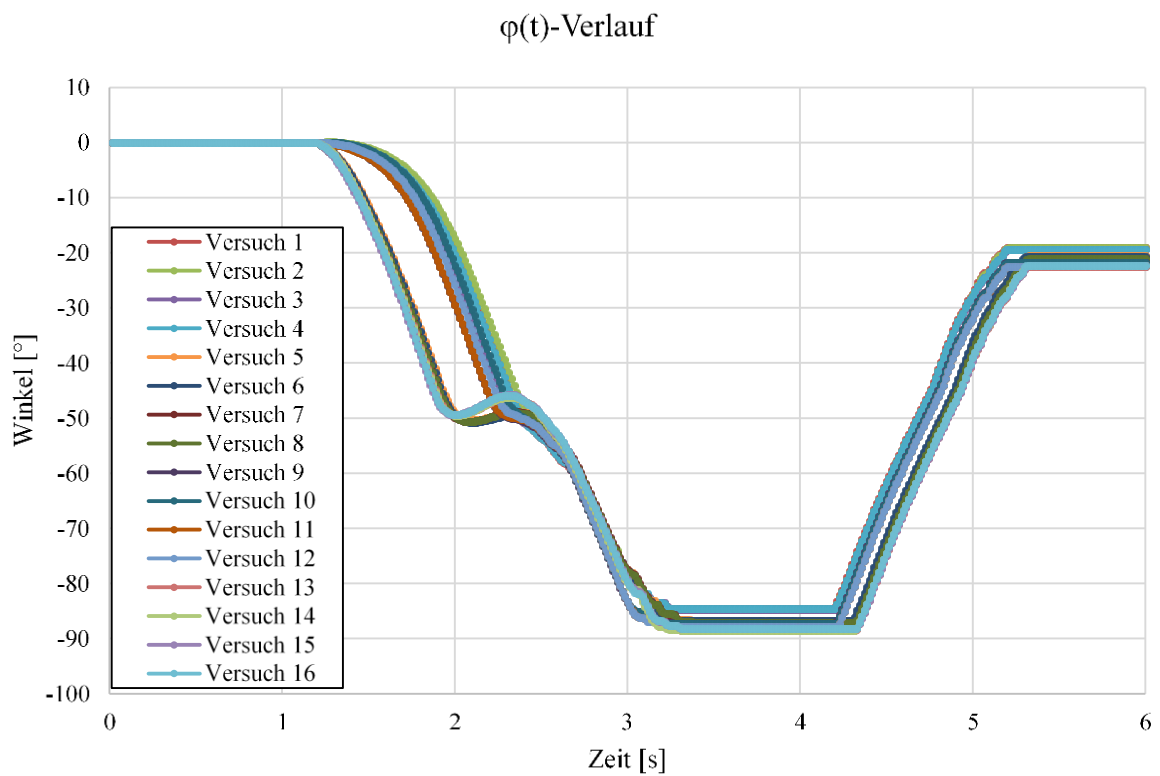
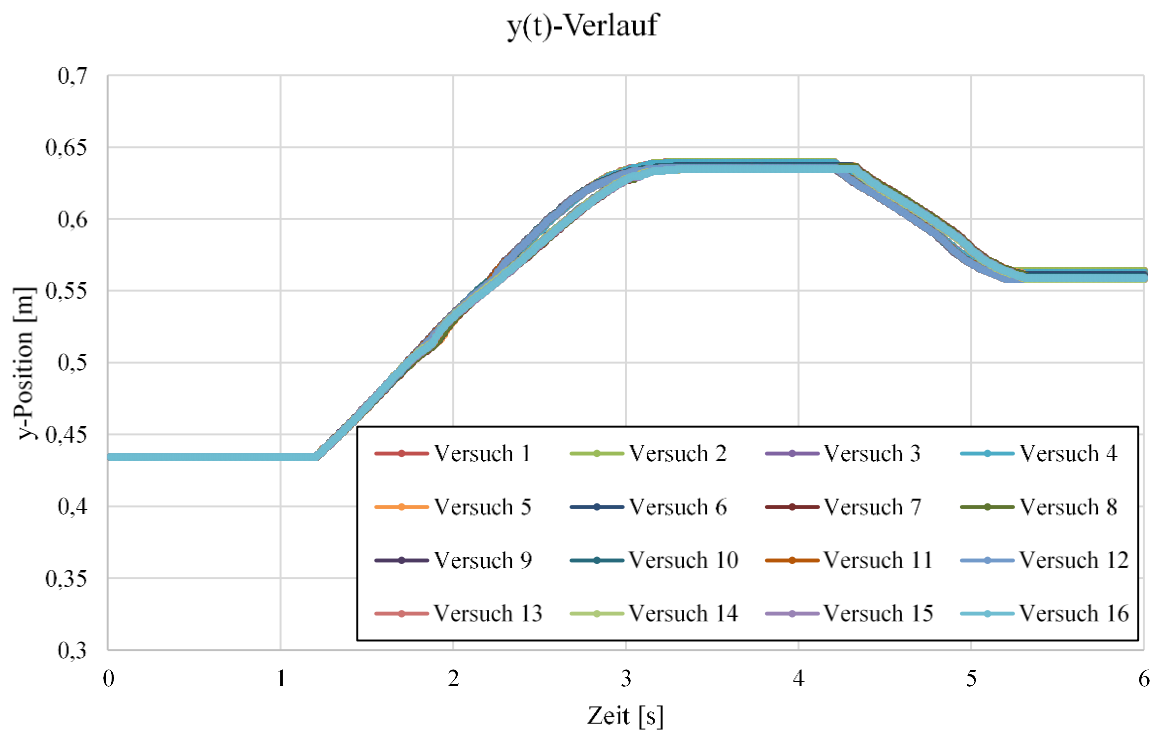
A4 Ergebnisse der Simulationsläufe

Szenario „Fallversuch“ (1 Paket)



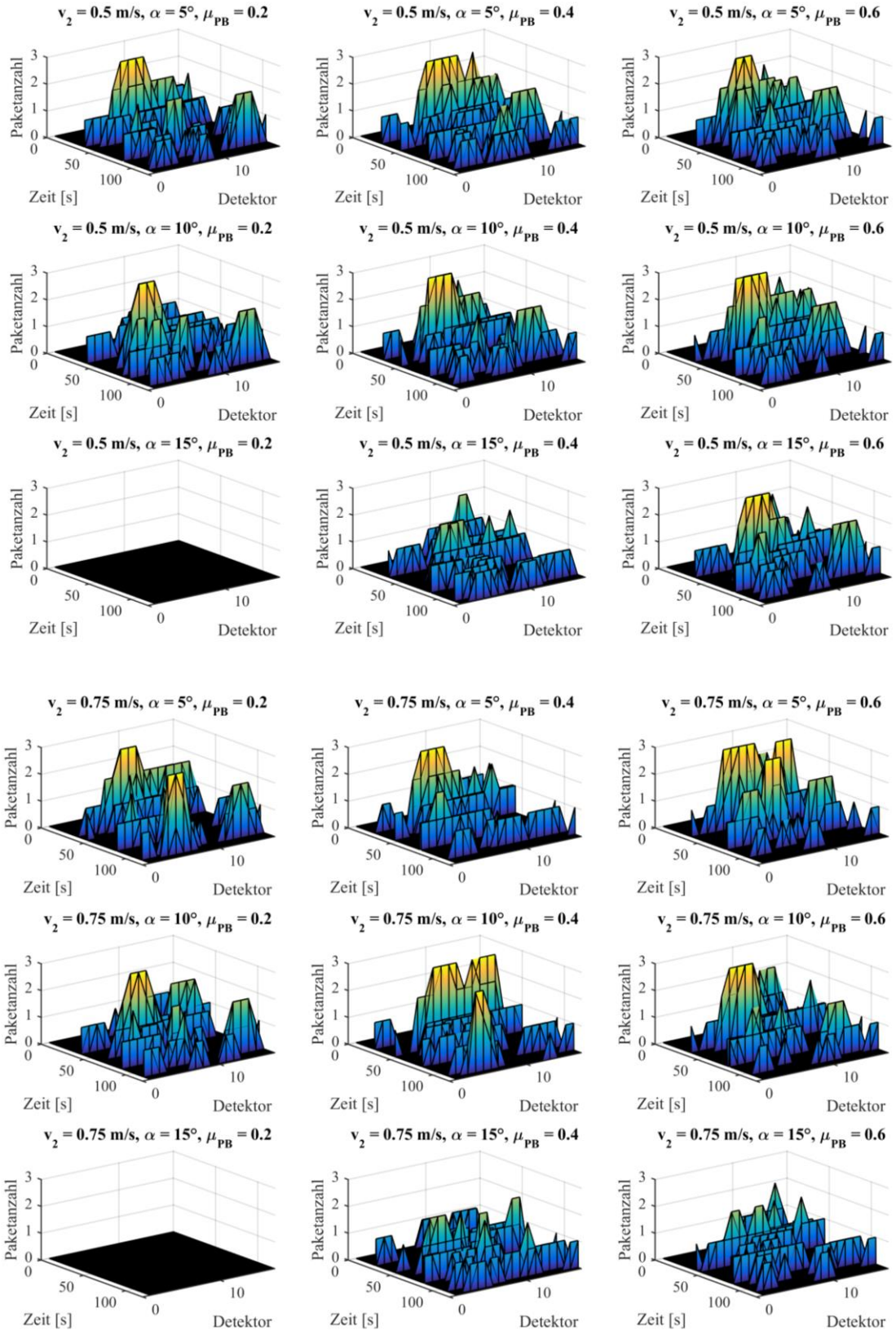
Szenario „Pakete klein“ (1 Paket)





A5 Ergebnisse der Anwendungsszenarien

Szenario „Geneigter Bandförderer“



Szenario „Vertikal versetzte Bandförderer“

