

Analyse und Optimierung der mechanischen Eigenschaften von Kunststoffverpackungen für den Transport von Getränken

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

M. Sc. Daniel Klein

Tag der mündlichen Prüfung: 17.08.2020

1. Gutachter: Prof. Dr. -Ing. Markus Stommel
2. Gutachter: Prof. Dr. -Ing. Hans-Peter Heim

Vorwort

Die vorliegende Dissertation ist während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Lehrstuhl für Kunststofftechnologie (LKT) der TU-Dortmund entstanden. Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des LKT sei hiermit ganz herzlich gedankt für fachliche Unterstützung und spannende Diskussionen, für die kreative Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre sowie für die bereichernden Momente über die Arbeit hinaus. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Univ. Prof. Dr.-Ing. Markus Stommel für die gewährte herausragende Chance zur beruflichen und zur persönlichen Weiterentwicklung, für seinen beispiellosen Einsatz, für seinen anhaltenden Ideenreichtum und seine Unterstützung mit kompetentem Rat.

Aufgrund der hervorragenden Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern des Product Technology Centre in Vittel habe ich mit dem Projektpartner Nestlé Waters meinen jetzigen Arbeitgeber gefunden. Mein herzlicher Dank gilt hier insbesondere Dr.-Ing. Murielle Vigny-Schmitt für die konstruktiven richtungsgebenden Diskussionen und ihren sachkundigen Rat, Dr.-Ing. Johannes Zimmer für seine vorbildliche Projektleitung und seine nicht nur fachkundige, sondern auch freundschaftliche Unterstützung. Bruno Mouthon möchte ich danken für die produktiven Gespräche und die tatkräftige Unterstützung bei meinen experimentellen Untersuchungen.

Ich danke meiner Lebensgefährtin, meiner Familie und meinen Freunden, die mir zu jeder Zeit die kräftigsten Stützen sind. Nicht zuletzt danke ich allen, die sich mit dem Inhalt dieser Arbeit kritisch auseinandergesetzt haben, sowie allen Leserinnen und Lesern, die im Begriff sind dies zu tun.

Bonne lecture!

Aachen, August 2020

Daniel Klein

Kurzzusammenfassung

Kunststoffverpackungen rücken zunehmend in den Fokus öffentlicher Diskussionen. Ein Minimalkonsens besteht darin, dass Verpackungsmüll durch die Minimierung des Materialeinsatzes für Kunststoffverpackungen vermieden werden muss. Der Zielkonflikt zwischen notwendigem Materialverbrauch einerseits und der mechanischen Stabilität von Verpackungsstrukturen andererseits kann nur durch eine materialgerechte Auslegung von Verpackungsgeometrien und von Verpackungsprozessen gelöst werden. Gerade bei schweren, aber flexiblen Strukturen, wie z.B. Getränken in leichten PET-Flaschen, ist die Stabilität beim Transport weltweit eine anspruchsvolle Herausforderung.

Die vorliegende Arbeit trägt zur Optimierung der Leichtbauweise von Verpackungskonzepten hinsichtlich ihrer Stabilität bei. Ein sehr verbreitetes Verpackungskonzept ist die Verteilung der Ware auf einer Palette, wobei eine Polyethylen (PE)-Stretchfolie die Leichtbaustruktur während des Transports stabilisiert. Im ersten Teil dieser Arbeit werden experimentelle Methoden entwickelt, die den Vergleich und die Bewertung von Verpackungsmaterialien und Verpackungsstrukturen in Bezug auf deren mechanische Eigenschaften während des LKW-Transportes erleichtern. Neben dem Streck-Wickelprozess werden auch die Transportbedingungen im LKW sowie deren Wirkung auf Getränkepaletten in Feldversuchen analysiert. Eine zeitraffende Prüfmethode für die mechanische Charakterisierung von Paletten im Labor wird entwickelt und angewendet.

Im zweiten Teil dieser Arbeit entsteht ein numerisches Modell des Streck-Wickelprozesses. Mit diesem Modell kann das Prozessergebnis auf der Grundlage von Material- und Prozessdaten berechnet werden. Einerseits hilft dieses Modell bei der Definition geeigneter Streck-Wickelprozesse, andererseits fließen die Ergebnisse des Prozessmodells ein in ein Finite Elemente (FE)-Modell der gesamten Palette. Anhand der numerischen Repräsentation der Palette lässt sich das mechanische Verhalten einer Getränkepalette noch detailreicher analysieren. Auf dieser Grundlage wird im dritten Teil der Arbeit ein optimiertes Verpackungskonzept entwickelt und experimentell verifiziert. Der Erfolg der FE-gestützten Optimierung validiert das numerische Modell der Palette und damit auch die zugrundeliegenden numerischen Methoden.

Abstract

Plastic packaging is increasingly becoming the focus of a public debate. A minimum consensus is that packaging waste can be avoided by minimising the use of materials for plastic packaging. Only a material-specific design of packaging geometries and packaging processes can resolve the conflict between the mechanical stability of the packaging structures on the one hand and the unavoidable material consumption on the other hand. Especially for heavy but flexible structures, such as beverages in lightweight PET-bottles, the stability during transportation has become a challenging requirement all over the world.

This thesis contributes to the optimization of lightweight packaging concepts regarding their stability. A widespread packaging concept is the distribution of goods on a pallet whereas a Polyethylene (PE) stretch film stabilizes the lightweight structure during transportation. In the first part of this thesis, experimental methods are developed that facilitate the comparison and the evaluation of packaging materials and packaging structures with regard to their mechanical properties during truck transportation. In addition to the stretch wrapping process, both the transport conditions in the truck and their effect on beverage pallets are analysed in field tests. A time-lapse test method for the mechanical characterisation of pallets in the laboratory is developed and applied.

In the second part of this thesis, a numerical model of the stretch wrapping process is developed. With this model, the process result can be calculated on the basis of material data and process data. On the one hand, this model helps to define suitable stretch-wrapping processes, on the other hand, the results of the process model are included in a numerical model of the whole pallet.

The numerical representation of the pallet allows to analyse the mechanical behaviour of the pallet with beverages more in detail. On this basis, an optimized packaging concept will be developed and experimentally verified in the third part of this thesis. The success of the Finite-Element (FE)-supported optimization validates the numerical model of the pallet and thus the underlying numerical methods.

1	Einleitung und Motivation	1
2	Werkstoff- und prozesstechnische Grundlagen	4
2.1	Werkstofftechnische Grundlagen zu PE	4
2.2	Der Streck-Wickelprozess	12
3	Mechanische Charakterisierung von Verpackungen	18
3.1	Mechanisches Verhalten der PE-Stretchfolie.....	20
3.1.1	Einfluss der Dehnungshistorie.....	21
3.1.2	Vergleichbarkeit und technische Bewertung von Stretchfolien	29
3.1.3	Prozessanalyse.....	36
3.2	Mechanische Charakterisierung von Verpackungsstrukturen	45
3.2.1	Mechanisches Verhalten des Kartoneinlegers.....	46
3.2.2	Mechanisches Verhalten der PET-Getränkeflasche	47
3.2.3	Mechanisches Verhalten eines Getränkepacks.....	51
3.2.4	Tribologische Untersuchungen am Verpackungssystem	56
3.3	Analyse der Palettenstabilität unter Transportbedingungen	57
3.3.1	Charakterisierung der Transportbelastungen	58
3.3.2	Entwicklung einer zeitraffenden stationären Prüfmethode	66
3.3.3	Dynamisch-mechanische Charakterisierung der Palette	73
4	Mechanische Modellierung des Verpackungssystems.....	82
4.1	Materialmodellierung	82
4.1.1	Stand der Technik	82
4.1.2	Mechanische Modellierung der Stretchfolie	83
4.2	Modellierung des Streck-Wickelprozesses	92
4.3	Strukturmodellierung.....	101
4.3.1	Vereinfachte mechanische Modellierung des Six-Packs.....	102
4.3.2	Mechanische Modellierung des Kartoneinlegers	107
4.3.3	Mechanische Modellierung der transportfertigen Palette	109
4.4	Experimentelle Verifikation des Palettenmodells	114
5	FE-gestützte Analyse und Optimierung	118
5.1	Modellbasierte mechanische Analyse der Verpackungsstrategie.....	118
5.2	FE-gestützte Konzeption einer mechanisch optimierten Palette.....	122
5.3	Experimentelle Validierung des Palettenmodells	124
6	Zusammenfassung und Ausblick	132
7	Literaturverzeichnis	135

1 Einleitung und Motivation

Der weltweite Warenhandel ist seit 2008 laut WTO [1] um 26%, auf 19,67 Billionen US-Dollar in 2018, gestiegen. Davon entfallen 68% auf Industrieerzeugnisse. Mit diesem Wachstum steigt auch die Notwendigkeit immer weiter, Güter zu verpacken und zu transportieren. Allein im Straßenverkehr der EU-28 wurden im Jahr 2017 nach Eurostat [2] rund 14,7 Milliarden Tonnen Güter transportiert.

Nach Geyer et al. [3] wurden etwa 42% aller jemals produzierten unverstärkten Kunststoffe für Verpackungen eingesetzt, die derzeit überwiegend aus Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyethylenterephthalat (PET) bestehen. In erster Linie ist die Reduktion des Materialeinsatzes eine ständige Herausforderung der Verpackungsentwicklung. In zweiter Linie gewinnt aufgrund der erforderlichen Leichtbauweise auch die mechanische Stabilität der Verpackungen während des Transports an Bedeutung. Die Formstabilität des Verpackungssystems beeinflusst nämlich nicht nur die Qualität der Produkte, sondern auch die Sicherheit eines Transportes im Straßenverkehr. Die in der europäischen Richtlinie 2014/47 [4] definierten Grundsätze der Ladungssicherungen stellen Mindestanforderungen an die Formstabilität der Verpackungen, die vor allem die Getränkeindustrie vor technische Herausforderungen stellt. In Kombination mit der erforderlichen Leichtbauweise entstehen wissenschaftliche Fragestellungen, die aus der Komplexität des Materialverhaltens beteiligter Materialien, aus der Vielseitigkeit der möglichen Verpackungsstrukturen und aus der enormen Anzahl an Prozessparametern der zugrundeliegenden Verpackungsprozesse resultieren.

Ein sehr verbreitetes Verpackungskonzept ist die Verteilung von Waren auf einer Palette, während eine PE-Stretchfolie die Struktur während des LKW-Transports stabilisiert. Getränkeflaschen aus PET, die per Schrumpffolie zu Packs gruppiert und auf einer Palette gestapelt sind, stellen in diesem Zusammenhang eine besondere Herausforderung dar. Der oft niedrige Produktpreis rechtfertigt weder hohe Kosten noch einen hohen Materialeinsatz für die Verpackung. Folglich sind viele Getränkeflaschen bereits zu einem hohen Grad gewichtsoptimiert. Weltweit kommt dieser Kunststoffverpackungsanwendung eine enorm hohe ökologische und ökonomische Bedeutung zu, die auch eine weiter fortschreitende Optimierung hinsichtlich der Leichtbauweise motiviert, beispielsweise durch Reduktion des

Materialeinsatzes für die Transportverpackung. Allerdings begrenzt das hohe Gewicht des verpackten Produktes die Erfolgsaussichten, mit erfahrungsbasiertem Vorgehen und unter vertretbarem experimentellem Aufwand ein in Bezug auf Kosten und Materialeinsatz optimales und dennoch garantiert stabiles und damit verkehrssicheres Verpackungskonzept zu entwickeln.

Diese Arbeit verfolgt das Ziel, die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffverpackungen für den Transport von Getränken quantifizierbar und berechenbar zu machen, damit sowohl die Bewertung, als auch die Vorhersage der Formstabilität von gewichtsoptimierten Verpackungskonzepten mit geringem experimentellem Aufwand gelingt. Im Hinblick auf ein Anwendungsspektrum, welches über das diskutierte Beispiel einer Palette mit PET-Getränkeflaschen hinausgeht, entstehen sowohl experimentelle als auch numerische Methoden für die Analyse und für die Optimierung von Verpackungsstrukturen. Mit den entwickelten Methoden wird der Zielkonflikt zwischen maximaler Formstabilität eines Verpackungskonzeptes während LKW-Transporten und minimalem Materialeinsatz für dieses Konzept gelöst.

Der Streckblasformprozess von PET-Flaschen und die strukturmechanischen Eigenschaften der befüllten Flasche können vorhergesagt werden. Die hierfür verwendbaren numerischen Methoden sind in der Literatur [5–10] detailliert beschrieben und werden bereits im industriellen Alltag eingesetzt. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich deshalb auf die mechanische Modellierung des sekundären Packs, bestehend aus sechs Getränkeflaschen und der Schrumpffolie, sowie auf die mechanische Modellierung der mit Stretchfolie verpackten transportfertigen Palette. In der Regel wird diese Stretchfolie von einer Streck-Wickelmaschine auf die Palette aufgebracht. Die vorliegende Arbeit unterstützt die Verpackungsentwicklung mit einem numerischen Prozessmodell, welches das Ergebnis des Streck-Wickelprozesses basierend auf den Prozessparametern und basierend auf der mechanischen Charakterisierung der Stretchfolie vorhersagen kann. Dieses Prozessmodell wird angewendet, um ein Strukturmodell der transportfertigen Palette zu kalibrieren. Dieses Strukturmodell wird für die Optimierung eines Verpackungskonzeptes eingesetzt.

Nicht zuletzt erfordert die zielgerichtete Optimierung der Transportverpackung im Hinblick auf ihr Gewicht und auf ihre Stabilität auch die Kenntnis typischer

Transportbedingungen. Mit dem Anspruch, einen repräsentativen Transporttest zu entwickeln, anhand dessen Verpackungskonzepte bewertet und die numerischen Methoden verifiziert werden können, analysiert diese Arbeit LKW-Transporte auf der Straße. Außerdem wird die Wirkung extremer Fahrmanöver auf die Ladung untersucht und auf der Basis dieser experimentellen Daten wird ein Transporttest im Labor entwickelt. Der entwickelte Transporttest bietet Vorteile gegenüber den normierten Testmethoden [11–15] zur Überprüfung der Ladungsstabilität hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der im LKW auftretenden Beschleunigungen und ihren Wirkungen auf das Verpackungssystem. Mit dem entwickelten Transporttest kann die Optimierung des Verpackungssystems anhand realer Bedingungen, anstatt anhand genormter Teilbelastungen des Transportes, erfolgen.

2 Werkstoff- und prozesstechnische Grundlagen

Der größte Anteil aller produzierten Kunststoffe wird zu Verpackungen verarbeitet [3]. Die Stabilität dieser Verpackungen wird von Kunden vorausgesetzt, jedoch selten als Mehrwert wahrgenommen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Zusammenhang zwischen den Prozessparametern von Verpackungsprozessen und der mechanischen Stabilität der Verpackung. Im Vordergrund steht dabei der Kunststoff Polyethylen (PE). PE kann petrochemisch sehr kostengünstig hergestellt werden. Seine Verfügbarkeit, seine Verarbeitbarkeit zu dünnen transparenten Folien sowie seine chemische Beständigkeit prädestinieren den Thermoplast als Verpackungsmaterial. Aus ökonomischen und zunehmend auch ökologischen Beweggründen entsteht selbst bei geringen Rohstoffpreisen die Anforderung, mit möglichst wenig Verpackungsmaterial eine stabile Verpackung zu realisieren. Trotz der Einfachheit seines Grundbausteines Ethylen (Ethen) entstehen, abhängig vom Herstellungsverfahren und der Prozessführung, während der Kettenpolymerisation verschiedene Typen des Polymers PE. Diese unterscheiden sich in ihren physikalischen Eigenschaften signifikant voneinander und weisen jeweils ein komplexes Materialverhalten auf. Der effiziente Einsatz von PE als Verpackungsmaterial erfordert deshalb weitreichende Kenntnisse zu dessen werkstofftechnischen Grundlagen sowie zu den Verpackungsprozessen, die eine PE-Folie zu einer effizienten Verpackung transformieren. Diese anwendungsbezogenen Grundlagen sind im vorliegenden Kapitel zusammengefasst.

2.1 Werkstofftechnische Grundlagen zu PE

Die verschiedenen PE-Typen unterscheiden sich nach Anzahl und Länge der Verzweigungen ihrer Makromolekülketten. Abbildung 2.1 veranschaulicht, wie PE-Kunststoffe nach ihrem molekularen Aufbau und der damit zusammenhängenden Dichte in drei Kategorien eingeteilt werden können. Je nach Anzahl und Länge der Verzweigungen der Molekülkette unterscheidet man Polyethylen hoher Dichte (PE-HD, engl. „high density“), Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD, engl. „low density“) und lineares Polyethylen niedriger Dichte (PE-LLD, engl. „linear low density“). Die Unterschiede im strukturellen Aufbau der PE-Typen resultieren in entsprechenden Vor- und Nachteilen für die Anwendung der Materialien innerhalb flexibler Verpackungen und für den Herstellungsprozess dieser Verpackungsmaterialien.

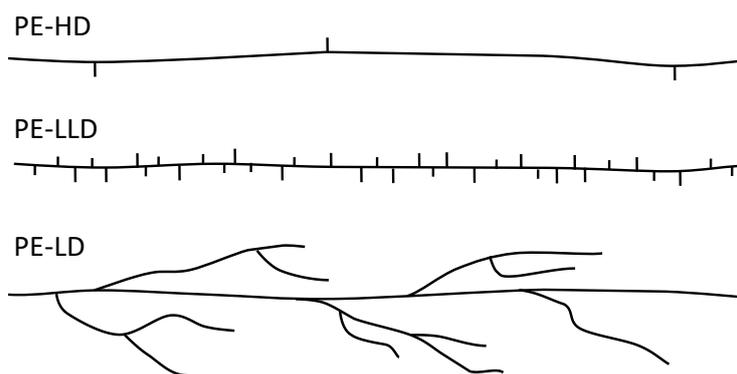


Abbildung 2.1: Molekülaufbau der verschiedenen PE-Typen nach Menges et al. [16].

PE-HD ist günstig in der Herstellung und bietet wegen der dichten Packung der linearen Makromolekülketten gute Barriere-Eigenschaften und gute Beständigkeit gegen die meisten Chemikalien. Weil die Makromoleküle von PE-LD eine hohe Anzahl langkettiger Verzweigungen aufweisen, verhält sich die PE-LD Schmelze ausgeprägt scherverdünnend. Deshalb und wegen der resultierenden hohen Anzahl an Verschlaufungen und der damit einhergehenden Schmelzfestigkeit ist PE-LD in (Folien)Extrusionsprozessen gut verarbeitbar [17]. Bei besseren optischen Eigenschaften (Transparenz) und höherer Duktilität unterscheidet sich PE-LD von PE-HD außerdem durch eine geringere Zug-, Reiß- und Abriebfestigkeit sowie eine geringere Spannungsrisssbeständigkeit und damit eine geringere Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen [17]. PE-LLD hingegen eignet sich wegen seiner hohen Zähigkeit, Reiß- und Schlagfestigkeit, sowie wegen der hohen Zugfestigkeit bei hoher Dehnung als flexibles Verpackungsmaterial [18]. Eine der wichtigsten und volumenstärksten Anwendungen von PE-LLD sind Stretchfolien, welche die Stabilität von Paletten gewährleisten [17]. Jedoch erweist sich die Abwesenheit langkettiger Verzweigungen in PE-LLD als Nachteil im Hinblick auf dessen Verarbeitbarkeit zu dünnen Folien [17, 18]. Ausreichende Schmelzfestigkeit und niedrigere Drehmomente während der Extrusion einer geforderten zähen PE-LLD Verpackungsfolie werden erst durch das Beimischen von PE-LD erzielt [17, 18]. Diese PE-LLD/PE-LD-Gemische werden außerdem für Müllsäcke, Schwerlastverpackungssäcke, Lebensmitteltaschen, Lebensmittel- und Tiefkühlverpackungen, für Laminierfolien, Stretchhauben sowie für Schrumpffolien verwendet [17]. Neben dem strukturellen Aufbau einzelner Makromoleküle beeinflusst auch die statistische Verteilung der Molekulargewichte sowie die Position- und die Längenverteilung der Verzweigungen die Eigenschaften eines Polymerwerkstoffes. Kaminsky et al. [19] entdecken 1980 die sogenannten

Metallocen/Methylaluminumoxan (MAO)-Katalysatorsysteme für die Olefin-Polymerisation [20]. Die in diesem Verfahren hergestellten Polymere werden häufig als Metallocen-PE (mPE) bezeichnet. Die MAO-Katalysatorsysteme haben, im Gegensatz zum Ziegler-Natta [21] oder zum Phillips [22] Katalysatorsystem nur ein aktives Zentrum (engl.: Single-Site-Catalyst, SSC). Deshalb kann mit SSC-Katalysatorsystemen, wie den MAO, die Mikrostruktur, speziell die Comonomerverteilung sowie die Stereo- und Regionalregularität von Polymeren gezielt angepasst werden, was mit den bis dato bekannten Verfahren [21–23] nicht möglich war [20]. SSC bieten nach Knuutila eine [24] bessere Kontrolle über die molekulare Architektur, wodurch die Synthese von Polymeren mit einer hochdefinierten Struktur gelingt und damit Produkte mit gegenüber den herkömmlichen Prozessen [21–23] verbesserten Eigenschaften hergestellt werden können [20]. Beispielsweise ist die Menge an Oligomeren im Vergleich zu den im Ziegler-Natta-Verfahren hergestellten PE geringer. Das mittels SSC gewonnene PE-LLD hat deshalb eine höhere Zugfestigkeit [20, 17]. mPE-Typen werden zunehmend in flexiblen Verpackungsanwendungen eingesetzt [17], da aus mPE-LLD Folien mit verbesserter Klarheit und Zähigkeit, mit verbesserten optischen und Barriereigenschaften sowie mit erhöhter Flexibilität und mit erhöhten Adhäsionskräften hergestellt werden können [20, 17, 24]. Für eine bessere Prozessierbarkeit wird PE-LD auch zu mPE-LLD beigemischt [17].

Schon auf molekularer Ebene gibt es, wie beschrieben, große Unterschiede der verschiedenen PE-Typen. Diese Vielfalt bildet sich auf der makroskopischen Ebene ebenfalls mit signifikanten Unterschieden der Materialeigenschaften ab. Wenn eine PE-Schmelze auf Raumtemperatur abkühlt, entsteht eine zweiphasige Mikrostruktur aus geordneten Bereichen, den Kristalliten, die wiederum durch amorphe Bereiche miteinander verbunden sind. Der Kristallisationsgrad hängt dabei nicht nur von der Art und dem Aufbau der Makromolekülketten, sondern auch von der Verarbeitungsprozessführung ab [25].

Unterhalb der Glasübergangstemperatur T_g verlieren die Makromoleküle der amorphen Phase ihre Beweglichkeit. Deshalb verhalten sich die amorphen Bereiche unterhalb von T_g glasartig spröde. Das mechanische Verhalten der kristallinen Phase unterscheidet sich grundlegend von dem der amorphen. Während sich die Mechanik der amorphen Bereiche mit dem Über- bzw. mit dem Unterschreiten von T_g ändert,

weisen die kristallinen Bereiche unterhalb ihrer Kristallitschmelztemperatur T_{kt} einen starken mechanischen Zusammenhalt auf [16]. In Tabelle 2.1 sind Bereiche für erreichbare Kristallisationsgrade und für die Dichte dargestellt, ebenso Richtwerte für die Bereiche einiger mechanischer Eigenschaften für die hier beschriebenen PE-Typen bei Normalbedingungen. Die in Tabelle 2.1 aufgelisteten Materialkennwerte quantifizieren die Bandbreite des mechanischen Verhaltens der verschiedenen PE-Typen.

	PE-LD		PE-LLD / mPE-LLD		PE-HD		Quelle
	von	bis	von	bis	von	bis	
Dichte in g/cm³	0,91	0,94	0,9 / 0,88	0,94 / 0,97	0,94	0,97	[17, 26]
Kristallisationsgrad in %	30	54	22	55	55	77	[26]
T_g in °C	-133	-85	-110 / -45	-50 / -30	-120	-50	[17]
T_{kt} in °C	105	118	120 / 110	126 / 115	125	135	[17]
Anfangssteifigkeit in MPa	172	345	262	896	1067	1379	[26]
Streckspannung in MPa	9	19	8	19	18	31	[26]
Bruchspannung in MPa	8	31	13	45	22	31	[26]
Bruchdehnung in %	100	650	100	950	10	1500	[26]

Tabelle 2.1: Eigenschaftsbereiche PE nach Splading et al. [17] und Peacock [12]

Die anhand Tabelle 2.1 nachvollziehbar hohen Bandbreiten mechanischer Eigenschaften verschiedener PE-Typen resultieren aus dem breiten Temperaturintervall zwischen den charakteristischen Temperaturen T_g und T_{kt} des teilkristallinen Polymers. Die Steifigkeit eines teilkristallinen Polymers, dessen T_g wie bei PE unterhalb der Raumtemperatur liegt, ist niedriger und wesentlich abhängiger vom Kristallisationsgrad als bei einem teilkristallinen Polymer, wie beispielsweise PET, dessen amorphe Phase bei Raumtemperatur im glasartigen Zustand vorliegt [17]. Die amorphen Bereiche von PE liegen bei Raumtemperatur demnach in einem gummiartigen thermoelastischen bis plastischen Zustand vor, während die kristallinen Bereiche unterhalb T_{kt} einen starken Zusammenhalt aufweisen. Bei Raumtemperatur unterscheiden sich die Steifigkeiten beider Bereiche nach Bonnet [25] mit etwa 500MPa für die amorphe Phase und bis zu 5000MPa für die kristallinen Bereiche um eine Größenordnung. Die Bandbreite möglicher Mikrostrukturen und die Bandbreite möglicher, vom Verarbeitungsprozess abhängiger, Kristallisationsgrade verursachen signifikante Unterschiede des mechanischen Verhaltens innerhalb der Werkstoffgruppe der Polyethylene. Sie bilden daher sehr vielseitige Polymere mit

einem sehr breiten Eigenschaftsspektrum, das je nach Kristallinitätsgrad von steif/spröde über duktil/zäh bis hin zu gummiartig reicht [17].

Die vorliegende Arbeit betrachtet PE-Folien bei mit den Verpackungsprozessen einhergehenden hohen Dehnungen. Die in Tabelle 2.1 aufgeführten Materialdaten sind Ein-Punkt-Werte, die, je nach Umgebungs- und Deformationsbedingungen des realen Verpackungsprozesses, ihre Gültigkeit verlieren können. Zusätzlich zur Kenntnis dieser Werte erfordert die zielgerichtete Steuerung der Verpackungsprozesse ein grundlegendes Verständnis der mechanischen Reaktion von PE auf große Deformationen. Trotz der genannten Unterschiede der beschriebenen PE-Typen gibt es Gemeinsamkeiten in ihrer mechanischen Antwort. In Abbildung 2.2 ist die für PE-Kunststoffe typische mechanische Antwort in Form eines nominellen Spannungs-Dehnungsdiagrammes exemplarisch skizziert.

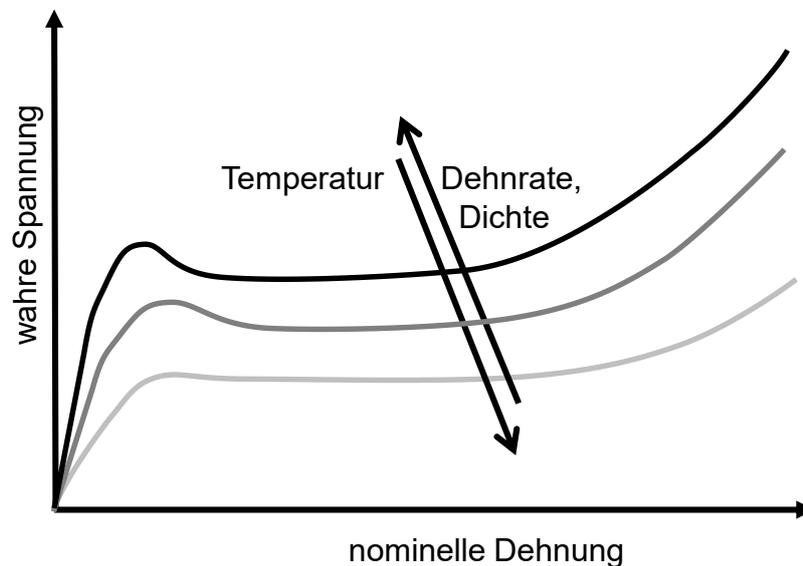


Abbildung 2.2: Einfluss der Dichte, der Dehnrates und der Temperatur auf die Form der Spannungs-Dehnungskurve für Polyethylen nach Gilbert [27].

Nach Spalding et al. [17] ist das Spannungs-Dehnungsverhalten von PE unterhalb einer Dehnung von 2% bis maximal 5% linear. Die Steigung der Spannungs-Dehnungskurve in diesem Bereich hängt, wie in Abbildung 2.2 skizziert, maßgeblich von der Dichte und damit auch vom Kristallisationsgrad des PE ab. Mit zunehmender Deformation verhält sich der Thermoplast auch zunehmend nichtlinear, sodass auf die lineare Region bei kleinen Dehnungen nach Kannan [28], je nach Comonomeranteil des PE, ein oder, wie in den Experimenten von Jordan et al. [29] und Lucas et. al [30], zwei Fließpunkte folgen. Wenn die Belastung vor Erreichen der Fließgrenze stoppt und die Probe entlastet wird, kann der Entlastungspfad zum Ursprung zurückkehren. Mit

dem Überschreiten eines Fließpunktes treten im Material jedoch mechanisch irreversible Änderungen auf. Diese irreversiblen Änderungen wiederum haben weitreichende Folgen für das mechanische Verhalten einer deformierten PE-Folie. Nach Bonnet [25] resultiert die plastische Verformung teilkristalliner Polymere aus dem Mikromechanismus sich abspulender, vorher gefalteter Ketten, wie in Abbildung 2.3 dargestellt. Das Verformungsmodell nach Petermann [31] erklärt, wie mit dem Überschreiten der Fließspannung ein Einschnüren und damit, wegen der Querschnittsabnahme, eine geometrische Entfestigung eintritt, die im technischen Spannungs-Dehnungsdiagramm in Abbildung 2.2 durch den Abfall der technischen Spannung auf ein Plateau sichtbar wird. Hingegen fällt die Wahre Spannung, also die gemessene Kraft bezogen auf den aktuellen Probenquerschnitt, nicht ab. Die beschriebene plastische Verformung der lamellaren kristallinen Bereiche wird nach Bonnet [25] dabei generell von der Dehnung der amorphen Bereiche überlagert.

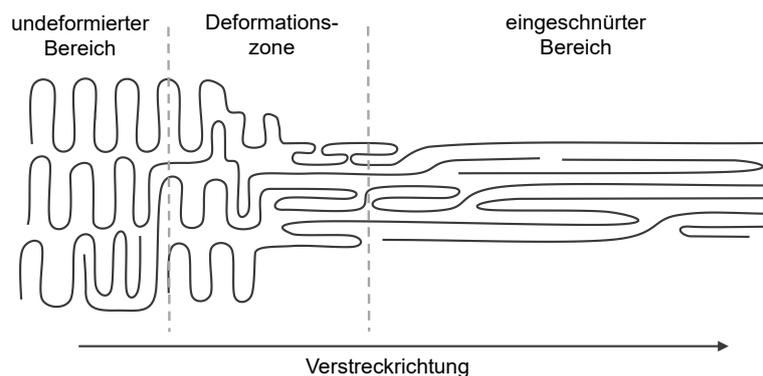


Abbildung 2.3: Verformungsmodell nach Petermann et al. [31].

Die Anwesenheit eines zweiten Fließpunktes deutet jedoch auf einen komplexeren Mikromechanismus der plastischen Deformation hin, als ihn das in Abbildung 2.2 skizzierte Verformungsmodell nach Petermann [31] erklären kann. Nach Kida et al. [32] finden während dieser dualen plastischen Verformungen großflächige Transformationen der teilkristallinen Morphologie statt. Dazu gehören nach Kida et al. [32] der Zusammenbruch von Sphärolithstrukturen sowie die Neuordnung sowohl lamellarer Kristalle als auch der Polymerketten. Diese Deformationsmechanismen wurden bereits in zahlreichen Studien untersucht [30, 32–35]. Dennoch sind diese komplizierten Veränderungen in den hierarchischen Strukturen teilkristalliner Polymere laut Kida et al. [32] und Makki et al. [36] nach wie vor umstritten und damit weiterhin Gegenstand aktueller Forschung [37–41].

Hingegen sind die Erklärungen für den nichtlinearen Anstieg der Spannung am Ende des Plateaubereiches in der Literatur [16, 25, 42–44] im Einklang miteinander. Einige Molekülketten der amorphen Bereiche reichen bis in einen oder mehrere kristalline Bereiche hinein. Diese sogenannten „tie-chains“ verbinden nach Menges et al. [16] die kristallinen Bereiche zu einem Netzwerk. Dieses Netzwerk wird mit fortschreitender Deformation gestreckt, indem sich die kristallinen Bereiche immer weiter in Belastungsrichtung ausrichten. Schlaufen der einzelnen Molekülketten in den amorphen Bereichen können sich nach Bonnet [25] ausstrecken, Verschlaufungen können sich entschlaufen oder aneinander abgleiten, sofern die Temperatur T oberhalb T_g liegt. Allerdings können diese Verschlaufungen während des Kristallisationsprozesses nach Menges et al. [16] auch eingefangen werden. Diese sogenannten „trapped entanglements“ wirken sich ebenfalls wie die Vernetzungen eines Elastomers aus und begrenzen nach Beerbaum [42] die Deformation der amorphen Phase. Der Widerstand dieses Netzwerkes bewirkt den nichtlinearen Anstieg der Spannung. Dabei führt die zunehmende molekulare Ausrichtung zu einer anisotropen Dehnungsverfestigung [43]. In diesem Bereich treten nach Bonnet [25] Kettenbrüche auf, da die „tie-chains“ bis zu ihrer maximalen Belastbarkeit gestreckt werden.

Makki et al. [36] beobachten den für Elastomere bekannten Mullins-Effekt [45, 46] auch bei verschiedenen PE-Typen. Dieser Effekt steht ebenfalls mit dem Brechen einzelner Ketten der Mikrostruktur in Zusammenhang. Die Phänomene des Mullins-Effektes sind eine durch die Deformation verursachte Erweichung des Materials, das Auftreten einer Hysterese in Form eines vom Belastungspfad abweichenden Entlastungspfad sowie eine Restdehnung, die nach vollständiger Entlastung übrigbleibt. Makki et al. [36] erklären diese Phänomene damit, dass einzelne Ketten bei erstmaliger Dehnung auf ein bestimmtes Niveau ihre Elastizitätsgrenze erreichen und brechen, sodass die Entlastung der Probe in einem neuen Gleichgewichtszustand endet. Die zu beobachtende Hysterese führen Makki et al. [36] darauf zurück, dass während der Belastung hauptsächlich kürzere Ketten aktiv sind, während die mechanische Antwort des Entlastungsvorgangs hauptsächlich von längeren Ketten des Netzwerkes bestimmt wird. Die in Abbildung 2.4 exemplarisch dargestellten Messergebnisse für einen uniaxialen Laststeigerungsversuch für das Material einer kommerziell erhältlichen PE-Stretchfolie veranschaulichen und stützen die genannten Beobachtungen von Makki et al. [36].

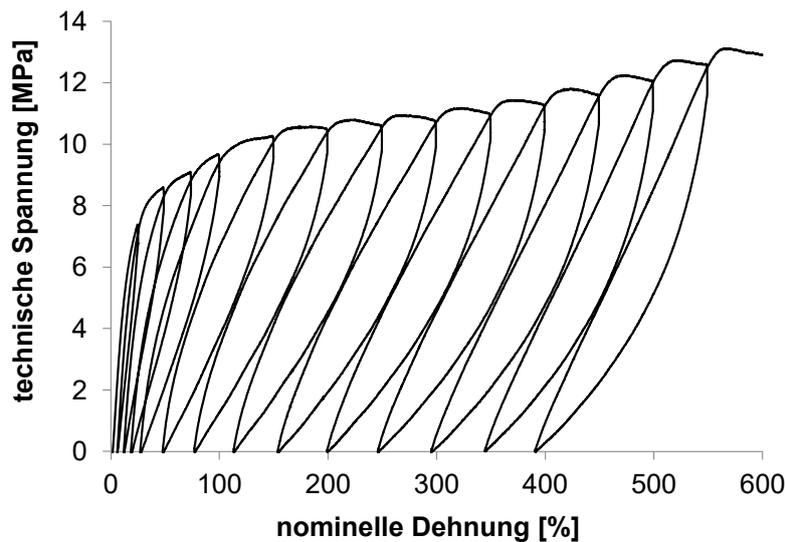


Abbildung 2.4: uniaxialer Laststeigerungsversuch für eine kommerzielle Stretchfolie

Abbildung 2.2 und Abbildung 2.4 verdeutlichen außerdem die extrem nichtlineare mechanische Antwort von PE. Neben der beschriebenen stark ausgeprägten Plastizität ändert sich das mechanische Verhalten von PE, wie bei den meisten teilkristallinen Thermoplasten, zeit- und temperaturabhängig. Diese auch als Viskoelastizität bezeichnete Eigenschaft äußert sich in Spannungsrelaxation und in Kriechvorgängen sowie in der in Abbildung 2.2 dargestellten temperatur- und dehnratenabhängigen Verschiebung der Spannungs-Dehnungsbeziehung. Die Ursache dieser Temperatur- und Zeit- bzw. Dehnratenabhängigkeit liegt an der Tatsache der mit der Temperatur zunehmenden Beweglichkeit der Molekülketten der amorphen Bereiche. Weil T_g für die meisten PE-Typen, wie in Tabelle 2.1 genauer spezifiziert, um -100°C liegt, ist diese Beweglichkeit bereits bei Raumtemperatur relativ hoch, sodass die mechanische Antwort des Festkörpers von der mechanischen Antwort einer Flüssigkeit mit temperaturabhängiger Viskosität überlagert wird.

Die wichtigste Anforderung an PE-Verpackungsfolien in der Getränkeindustrie ist es, dem Verpackungssystem der schweren Produkte Steifigkeit und damit Stabilität zu verleihen. Abbildung 2.4 verdeutlicht, dass der Begriff der Steifigkeit für eine solche Folie nicht eindeutig definiert ist. Vielmehr ist es erst der Verpackungsprozess, der das mechanische Verhalten der Folie im Einsatz festlegt. Technische Verpackungsfolien werden darüber hinaus häufig als mehrschichtige Verbundfolien coextrudiert, um die Anforderungen des individuellen Anwendungsbereiches mit einer gezielten Kombination der verschiedenen PE-Typen zu erfüllen. Deshalb und aufgrund der

beschriebenen Vielseitigkeit der Polyethylene kann eine verlässliche Vorhersage der Stabilität einer Verpackung gegenüber mechanischen Belastungen während des Transportes nur auf Basis der Kenntnis der Prozessabläufe und auf Basis einer prozessnahen Charakterisierung der Verpackungsmaterialien erfolgen. Im nachfolgenden Kapitel werden deshalb Grundlagen des Streck-Wickelprozesses erörtert. Die mechanische Charakterisierung und der Vergleich verschiedener Verpackungsfolien erfolgt im Hauptteil der vorliegenden Arbeit.

2.2 Der Streck-Wickelprozess

Die Verteilung von Produkten auf Paletten ist ein sehr verbreitetes Konzept. Häufig wird hierbei eine PE-Stretchfolie, wie in Abbildung 2.5 dargestellt, mithilfe einer Streck-Wickelmaschine um die gestapelten Produkteinheiten gewickelt, um die Stabilität des Verbundes während der Lagerung und während des Transportes zu gewährleisten.

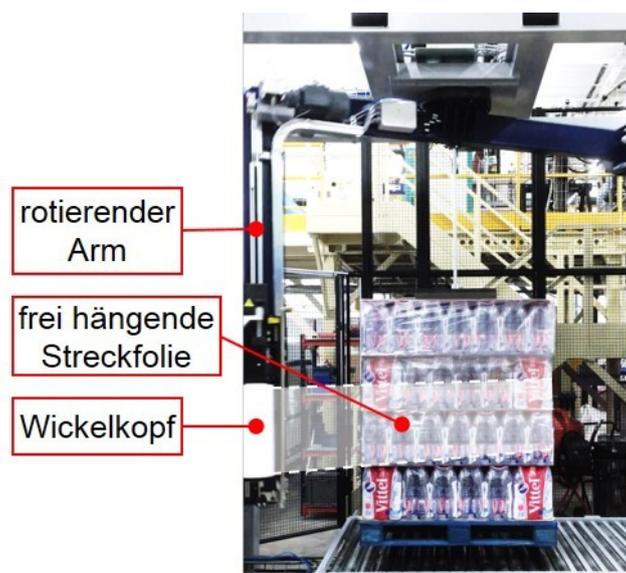


Abbildung 2.5: Der Streck-Wickelprozess zur tertiären Verpackung von Getränken

Nach dem Schrumpfprozess, der im untersuchten Beispiel dieser Arbeit sechs PET-Flaschen zu einem Getränkepack konsolidiert, formen die Kartoneinleger sowie die Stretchfolie eine tertiäre Verpackung. Die Stretchfolie stellt dabei sicher, dass sich die gestapelten Waren im Lager und während der Verteilung als eine kompakte Einheit verhalten. Wenn der Streck-Wickelprozess nicht zum Flaschenhals der Produktion werden soll, ist die Menge der Stretchfolie, die auf die gefüllten Paletten abgelegt werden kann, durch die maximale Ablagegeschwindigkeit der Streck-Wickelmaschine begrenzt. Für schwere aber sensible Produkte, wie Getränke in leichten PET-Flaschen, besteht die Herausforderung des Wickelprozesses darin, der Palette mit

minimalem Materialeinsatz eine ausreichende Stabilität zu geben, ohne dabei übermäßige Kräfte auf die Ladung auszuüben. In der Regel halten daher weniger als ein Kilogramm Stretchfolie Waren mit einem Gesamtgewicht von bis zu einer Tonne zusammen. Die gegebenen Randbedingungen stellen hohe Anforderungen an die Folie und an den Prozess, sodass ein stabiler Zusammenhalt eine optimale Materialausnutzung erfordert.

Die Verteilung der Folie auf der Palette kann zu diesem Zweck bei den meisten am Markt verfügbaren Streck-Wickelmaschinen über mehrere Parameter, die ein sogenanntes Wickelmuster beschreiben, flexibel definiert und so an die Geometrie der gestapelten Produkte angepasst werden. Die einzelnen Parameter des Wickelmusters können sich je nach Maschinentyp unterscheiden, jedoch sind sie auf die in Tabelle 2.2 aufgeführten Parameter zurückzuführen. Für jede Folienlage kann neben ihrer vertikalen Position H auf der Palette auch ihre Steigung ΔH pro Umlauf definiert werden. Außerdem bieten viele Streck-Wickelmaschinen die Möglichkeit eines sogenannten Ropings. Hierbei wird die Folie, meist partiell, durch eine vertikal verfahrenende Rolle am Austritt des Wickelkopfes zu einem Seil aufgewickelt. Das entstandene PE-Seil wird dazu genutzt, lokal einen starken Zusammenhalt zu kreieren um beispielsweise eine bessere Verbindung zwischen den Produkten und der Holzpalette zu schaffen. Der Durchmesser des entstandenen Seiles hängt ab von der Dicke der Folie und dem Weg R , den die vertikal verfahrenende Rolle zwischen Folienkante und ihrer Endposition während des Ropings verfährt.

Umlauf Nr. n	Parameter der Umformung		Parameter des Wickelmusters		
	Vordehnung ε_1	sekundäre Dehnung ε_2	vertikale Position H	Steigung ΔH	Roping R
1	$\varepsilon_1(n=1)$	$\varepsilon_2(n=1)$	$H(n=1)$	$\Delta H(n=1)$	$R(n=1)$
2	$\varepsilon_1(n=2)$	$\varepsilon_2(n=2)$	$H(n=2)$	$\Delta H(n=2)$	$R(n=2)$
...
N	$\varepsilon_1(n=N)$	$\varepsilon_2(n=N)$	$H(n=N)$	$\Delta H(n=N)$	$R(n=N)$

Tabelle 2.2: grundlegende Prozessparameter einer Streck-Wickelmaschine

Neben dem Wickelmuster wird die Materialverteilung maßgeblich durch die Dicke der Folie beeinflusst. Die Dicke wiederum hängt einerseits vom Folientyp ab, andererseits aber auch von der Deformationshistorie, die die Folie während des Streck-Wickelns erfährt. Unabhängig vom Typ der Streck-Wickelmaschine durchläuft die Stretchfolie, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, zwei Verformungsschritte, bevor sie auf die Palette aufgelegt wird. In einem ersten Schritt, der Vordehnung ε_1 , wird die Folie zwischen

zwei Walzen über ihre Streckgrenze hinaus und über den Plateau-Bereich hinaus gedehnt, um den in der Literatur [28] beschriebenen und in Abbildung 2.2 dargestellten Verfestigungsbereich zu erreichen. Die vorgestreckte Folie wird um die Palette gewickelt, wobei die Länge des Foliensegments, das von der Streck-Wickelmaschine bereitgestellt wird, von der Länge des auf der Palette zu bedeckenden Abschnitts abweichen kann. Dies führt zu einer zweiten Dehnung ε_2 der Folie, die positiv oder negativ sein kann. Weil während der ersten Deformation ein wesentlich kürzeres Foliensegment gedehnt wird als während der zweiten, unterscheiden sich die Lastfälle dieser Deformationshistorie. Im zweiten Deformationsschritt ist, wie für eine uniaxiale Belastung üblich, eine Abnahme der Folienbreite beobachtbar. Im ersten Deformationsschritt ist diese Breitenabnahme durch die Haftreibung an den gummierten Walzen begrenzt. Der Lastfall kommt hier einer sogenannten „simple shear“ Belastung näher.

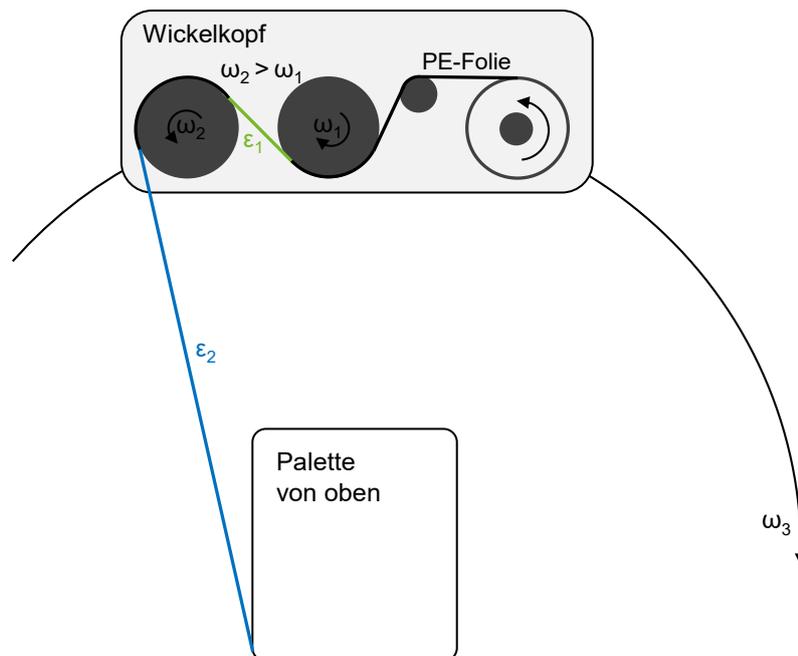


Abbildung 2.6: schematische Darstellung des Wickelkopfes und der Deformationszonen beim Streck-Wickeln

Die Deformationshistorie und das Wickelmuster resultieren im Zusammenspiel mit dem in Abbildung 2.4 dargestellten mechanischen Verhalten einer PE-Stretchfolie auf komplexe Weise in einem Prozessergebnis des Streck-Wickelns. Insgesamt kann dieses Prozessergebnis einerseits durch die lokale Verteilung der Wickelkraft der Folie auf den Produkten und andererseits durch das mechanische Verhalten der entstandenen Folienverpackung charakterisiert werden. Das mechanische Verhalten des geschaffenen Folienpaketes hängt wiederum nicht nur von der lokalen

Wanddickenverteilung und damit von der Geometrie der umgeformten Folie und vom Wickelmuster, sondern auch vom Arbeitspunkt der Folie in deren Spannungs-Dehnungsbeziehung und damit auf komplexe Weise erneut von den Parametern der Umformung ab. Diese komplexen wechselseitigen Zusammenhänge der Prozessparameter auf das Prozessergebnis des Streck-Wickelns verursachen im Produktionsalltag eine erhebliche Unsicherheit bei der Beurteilung der Qualität einer solchen Transportverpackung.

Darüber hinaus entsteht aus dem prinzipiell einfachen technischen Problem, ein rechteckiges Objekt zu umwickeln, eine Herausforderung an die Regelungstechnik der Streck-Wickelmaschinen. Alle Streck-Wickelmaschinen haben gemeinsam, dass entweder ein Wickelkopf, wie der in Abbildung 2.6 dargestellte, eine Kreisbahn um den Mittelpunkt der rechteckigen Paletten beschreibt oder dass sich eine Palette um ihre Hochachse dreht, während der Wickelkopf nur auf der Vertikalen verfährt. Anhand Abbildung 2.7 kann nachvollzogen werden, dass die Länge $l(t)$ des frei hängenden Foliensegmentes zwischen Palette und Wickelkopf wegen der rechteckigen Form der Palette von der Position des Wickelkopfes relativ zur Palette abhängt.

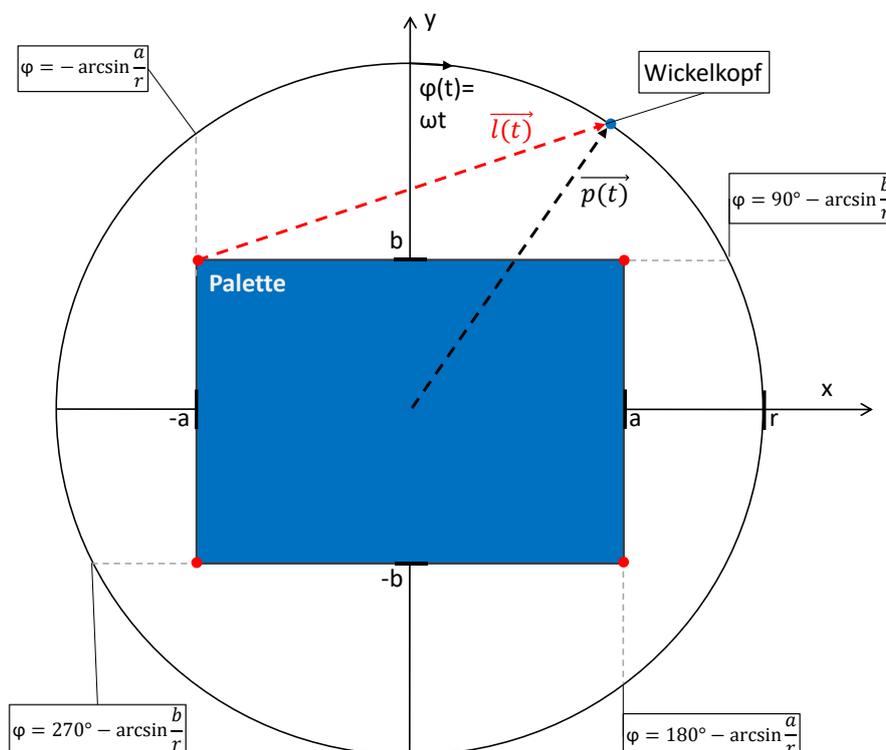


Abbildung 2.7: Schematische und idealisierte Ansicht einer Streck-Wickelmaschine aus der Vogelperspektive.

Bewegt sich der Wickelkopf, wie in Abbildung 2.7 idealisiert dargestellt, mit konstanter relativer Winkelgeschwindigkeit ω um die Palette, so variiert l nach Gleichung (2.1) mit der Prozesszeit t wie folgt:

$$\begin{aligned}
 l(t) = |\vec{l}(t)| &= \sqrt{(r\sin\omega t + a)^2 + (r\cos\omega t - b)^2} \text{ für } \left(\arcsin\frac{a}{r} \right) < \varphi \leq \left(90^\circ \arcsin\frac{b}{r} \right) \\
 l(t) = |\vec{l}(t)| &= \sqrt{(r\sin\omega t - a)^2 + (r\cos\omega t - b)^2} \text{ für } \left(90^\circ \arcsin\frac{b}{r} \right) < \varphi \leq \left(180^\circ \arcsin\frac{a}{r} \right) \\
 l(t) = |\vec{l}(t)| &= \sqrt{(r\sin\omega t - a)^2 + (r\cos\omega t + b)^2} \text{ für } \left(180^\circ \arcsin\frac{a}{r} \right) < \varphi \leq \left(270^\circ \arcsin\frac{b}{r} \right) \\
 l(t) = |\vec{l}(t)| &= \sqrt{(r\sin\omega t + a)^2 + (r\cos\omega t + b)^2} \text{ für } \left(270^\circ \arcsin\frac{b}{r} \right) < \varphi \leq \left(360^\circ \arcsin\frac{a}{r} \right)
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Hierin beschreiben die Werte a und b , wie in Abbildung 2.7 skizziert, die Geometrie der Palette und r den Radius des Kreises, den der Wickelkopf im Bezugssystem der Palette um deren Mittelpunkt beschreibt. Folglich variiert auch der Folienbedarf mit t , wenn die Folie durch das Wickeln eine konstante sekundäre Dehnung ε_2 erfahren soll. Die dazu benötigte Umfangsgeschwindigkeit v der Walze 2 des Wickelkopfes ergibt sich nach Gleichung (2.2) einerseits aus dem sekundären Verstreckgrad $\lambda_2 = 1 + \varepsilon_2$ und andererseits aus der Ableitung von $l(t)$:

$$\begin{aligned}
 v(t) = |\vec{v}(t)| &= \frac{\omega r (b\sin\omega t + a\cos\omega t)}{\sqrt{(r\sin\omega t + a)^2 + (r\cos\omega t - b)^2}} \div \lambda_2 \text{ für } \left(\arcsin\frac{a}{r} \right) < \varphi \leq \left(90^\circ \arcsin\frac{b}{r} \right) \\
 v(t) = |\vec{v}(t)| &= \frac{\omega r (b\sin\omega t - a\cos\omega t)}{\sqrt{(r\sin\omega t - a)^2 + (r\cos\omega t - b)^2}} \div \lambda_2 \text{ für } \left(90^\circ \arcsin\frac{b}{r} \right) < \varphi \leq \left(180^\circ \arcsin\frac{a}{r} \right) \\
 v(t) = |\vec{v}(t)| &= -\frac{\omega r (b\sin\omega t + a\cos\omega t)}{\sqrt{(r\sin\omega t - a)^2 + (r\cos\omega t + b)^2}} \div \lambda_2 \text{ für } \left(180^\circ \arcsin\frac{a}{r} \right) < \varphi \leq \left(270^\circ \arcsin\frac{b}{r} \right) \\
 v(t) = |\vec{v}(t)| &= -\frac{\omega r (b\sin\omega t - a\cos\omega t)}{\sqrt{(r\sin\omega t + a)^2 + (r\cos\omega t + b)^2}} \div \lambda_2 \text{ für } \left(270^\circ \arcsin\frac{b}{r} \right) < \varphi \leq \left(360^\circ \arcsin\frac{a}{r} \right)
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Gleichung (2.2) beschreibt das in Abbildung 2.8 exemplarisch skizzierte periodische Geschwindigkeitsprofil $v(t)$. Die Genauigkeit, mit der ε_2 eingestellt werden kann, hängt demnach von der Güte der Approximation der tatsächlichen Umfangsgeschwindigkeit $v(t)^*$ der zweiten Walze des Wickelkopfes an das geforderte Profil $v(t)$ ab.

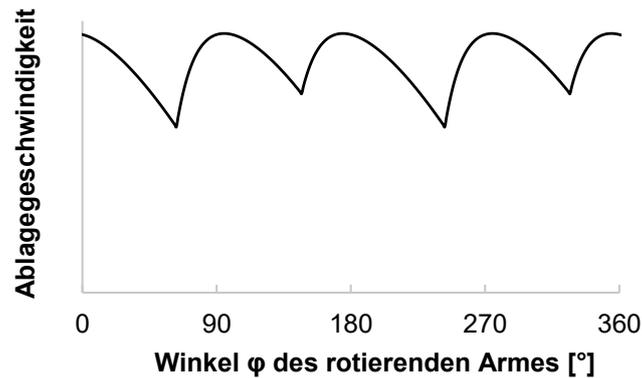


Abbildung 2.8: geforderter Verlauf der Ablagegeschwindigkeit der Folie

Demnach bleibt nicht nur zu untersuchen, inwiefern die Prozessparameter des Streck-Wickelns das Prozessergebnis beeinflussen und wie sich das Prozessergebnis auf die Stabilität der Palette gegenüber deren Belastungen beim Transport im LKW auswirkt, sondern auch, inwiefern die durch die Parameter ε_1 und ε_2 eingestellte Dehnungshistorie tatsächlich realisiert werden kann. Die meisten am Markt erhältlichen Stretchfolien sind mehrlagige Verbundfolien die, wie in Kapitel 2.1 erörtert, neben PE-LLD auch PE-LD und PE-HD enthalten können. Wegen der resultierenden Komplexität und Variabilität des mechanischen Verhaltens der Stretchfolien ist eine kritische Auseinandersetzung mit der Übertragbarkeit von Ergebnissen erforderlich. Selbst wenn die mechanische Charakterisierung einer Stretchfolie anhand prozessnaher Experimente erfolgt, bleibt zu überprüfen, in welchem Maß gefundene Zusammenhänge auf andere PE-Stretchfolientypen übertragbar und damit verallgemeinerbar sind.

3 Mechanische Charakterisierung von Verpackungen

Die Herausforderung in der Entwicklung von gewichtsreduzierten Verpackungen liegt in deren Formstabilität. Die Verpackung muss den mechanischen Belastungen während des Transportes und der Lagerung standhalten, ohne dabei unzulässige Deformationen oder Schäden davonzutragen. Die individuell zulässigen Deformationen unterscheiden sich, je nach Qualitätskriterien der Abnehmer der Ware. Mit zunehmender Automatisierung in der Lagerhaltung werden die Toleranzen hinsichtlich der Form der bepackten Paletten kleiner. Ragen die gestapelten Produkte mehr als 5cm [47] über den Rand der Holzpalette hinaus, werden nicht selten ganze LKW-Ladungen abgelehnt, weil einige automatisierte Lagerhäuser eine entsprechend deformierte Palette nicht handhaben können. Neben der globalen Deformation des gesamten Verpackungssystems spielen lokale Deformationen der Untersysteme eine entscheidende Rolle. Beispielsweise sollen die PET-Flaschen in ihrer sekundären Verpackung durch den Konsumenten sicher transportiert werden können und am Ort ihrer Bestimmung den Qualitätsansprüchen des Kunden, beispielsweise in Bezug auf Form und Funktion, entsprechen.

Die mechanische Belastung der selbsttragenden Verpackungsstruktur resultiert aus deren Eigengewicht und aus dem Eigengewicht der enthaltenen Produkte sowie aus den Beschleunigungen, die auf das System einwirken. Weil die Beschleunigungen während des Transportes im LKW zu signifikanten Deformationen und Schäden der Produkte führen können, wird diese Belastung in der vorliegenden Arbeit gezielt untersucht. Ist die mechanische Reaktion des Verpackungssystems mit all seinen Komponenten auf die Beschleunigungen im LKW bekannt, so ist die Frage nach der Formstabilität des Verpackungssystems leicht zu beantworten. Das Ziel, die mechanische Antwort des Verpackungssystems auf die Beschleunigungen im LKW vorherzusagen, leitet sich demnach direkt aus dem Ziel dieser Arbeit ab, die Stabilität gewichtsreduzierter Verpackungen vorherzusagen. Häufig steht dabei nicht das gesamte Verpackungssystem im Fokus einer Weiterentwicklung. Ändert sich beispielsweise ein Flaschendesign, der Zulieferer einer Stretchfolie oder lediglich die mittlere Umgebungstemperatur, so stehen Entwickler häufig vor der Aufgabe, ein funktionierendes Verpackungssystem anzupassen und dessen Stabilität unter den neuen Randbedingungen weiterhin zu gewährleisten. Gelingt dies auf Basis der bekannten Verpackungsgeometrie und auf Basis der prozessabhängigen mechanischen Antwort der verwendeten Materialien, dann kann experimenteller

Aufwand vermieden oder gegenüber bisherigen erfahrungsbasierten Methoden drastisch reduziert werden.

Der umfassende Ansatz, d.h. von der Materialcharakterisierung über die Prozesssimulation zur Struktursimulation und damit zur Formstabilität, wird in der vorliegenden Arbeit für die Stretchfolie der tertiären Verpackung verfolgt. In Kapitel 3.1 wird der Einfluss der Prozessparameter beim Streck-Wickeln auf das mechanische Verhalten der applizierten Folie anhand prozessnaher Experimente charakterisiert. Ferner wird die Übertragbarkeit der gefundenen Ergebnisse auf verschiedene PE-Stretchfolientypen überprüft. Die Ergebnisse münden in einer vergleichenden technischen Bewertung der verschiedenen Stretchfolien. Außerdem werden die Ergebnisse der Materialcharakterisierung mit Messungen während des Streck-Wickelns verglichen. Hiermit sollen die nach Kapitel 2.2 zu erwartenden Einflüsse der Palettengeometrie auf das Prozessergebnis charakterisiert werden. Eine Verifikation der in Kapitel 4 entwickelten Simulationsmethoden zur Vorhersage des Prozessergebnisses des Streck-Wickelns bedarf außerdem eines Experimentes, in dem die Wickelkraft der Folie auf den Produkten gemessen wird.

Im Fall der PET-Getränkeflasche sind die Einflüsse des Umformprozesses auf die Flaschenstruktur weitestgehend erforscht [5–10]. Die vorliegende Arbeit schlägt in Kapitel 3.2 alternative Methoden vor, anhand der die mechanischen Eigenschaften der PET-Flasche mit den mechanischen Eigenschaften des Getränkepacks, bestehend aus der Schrumpffolie und sechs Getränkeflaschen, unter geringem experimentellem Aufwand charakterisiert und in Zusammenhang gebracht werden können. Zusammen mit der mechanischen Charakterisierung der Kartoneinleger kann die experimentelle Basis für die in Kapitel 4 entwickelten numerischen Methoden geschaffen werden, sodass ein Strukturmodell der transportfertigen Palette zur Vorhersage der Formstabilität von Verpackungskonzepten zur FE-gestützten Optimierung dieser Konzepte entwickelt werden kann.

Bis auf Weiteres ist auf eine experimentelle Verifikation der Stabilität eines Verpackungssystems unter realistischen Transportbedingungen nicht zu verzichten, da die in Kapitel 4 entwickelten Simulationsmethoden verifiziert werden müssen. Ein in der Entwicklung von Verpackungen gängiges Experiment hierfür ist der Transporttest auf dem LKW im Straßenverkehr. Diese Methode ist zeit- und kostenintensiv, weil eine LKW-Ladung mit Prototypen bereitgestellt werden muss. Außerdem ist die Ausbeute an Informationen mangels Wiederholgenauigkeit und

messtechnischen Möglichkeiten bei einem solchen Experiment relativ gering. In Kapitel 3.3 wird deshalb eine effizientere experimentelle Methode für die Verifikation der Stabilität des gesamten Verpackungssystems entwickelt.

3.1 Mechanisches Verhalten der PE-Stretchfolie

Eine Übersicht zu Normen und standardisierten Methoden zur Charakterisierung von Stretchfolien ist in der Literatur gegeben [48–52]. Bisha kommentiert, dass die Normen nicht geeignet sind, die Effektivität einer gegebenen Folie auf der Palette zu erkennen [51]. Bisha kritisiert unter anderem den von der ASTM vorgeschlagenen Standardhysteresetest [52], da dieser die Folie nicht in Anwendung repräsentiere. Dem ist hinzuzufügen, dass der Einfluss der Dehnungshistorie während des Wickelprozesses auf das mechanische Verhalten der auf der Palette applizierten Folie zu berücksichtigen ist. Die vorliegende Arbeit charakterisiert die Stretchfolie mechanisch unter prozessnahen Bedingungen, damit der Einfluss der verallgemeinerten Prozessparameter Vordehnung ε_1 und sekundäre Dehnung ε_2 charakterisiert werden kann.

Die Zusammenhänge zwischen der Dehnungshistorie und den mechanischen Eigenschaften der Folie in ihrem Anwendungsbereich werden charakterisiert und anhand eines Stretchfolientyps exemplarisch erörtert. Die Übertragbarkeit der gefundenen Zusammenhänge auf andere Folientypen wird überprüft, indem elf Typen verschiedener Hersteller mechanisch charakterisiert werden. Auf Basis dieser Ergebnisse wird eine Bewertungsmethode für Stretchfolien definiert. Weil die Methode selbst im Vordergrund steht, werden Hersteller und Typbezeichnungen der Folien hierbei nicht näher spezifiziert.

Im Anschluss offenbart die Analyse des Streck-Wickelprozesses den Einfluss von Kriech- und Relaxationsvorgängen sowie den Einfluss der Palettengeometrie auf die örtliche Verteilung der Kontaktkraft zwischen Folie und Produkten. Außerdem werden die Daten aus Laborexperimenten und Feldversuchen korreliert und damit die per Laborexperiment gewonnenen Erkenntnisse verifiziert. Im Folgenden wird bewusst auf die Erklärung mikromechanischer Prozesse in den Folien verzichtet. Stattdessen sind die Experimente auf phänomenologischer Ebene beschrieben, um den Zusammenhang zwischen den Prozessparametern des Streck-Wickelns auf das Prozessergebnis und damit auf die Stabilität der Palette zu vermitteln.

3.1.1 Einfluss der Dehnungshistorie

Ein numerisches Modell der Stretchfolie wird erst durch die experimentelle Kalibrierung zu einem prädiktiven Werkzeug, sei es für die Prozessoptimierung des Streck-Wickelprozess oder für die FE-gestützte Optimierung der Formstabilität der Palette. Für die erforderliche mechanische Charakterisierung steht der vorliegenden Arbeit der in Abbildung 3.1 dargestellte „Film Property Tester“ (FPT) des belgischen Herstellers ESTL [53] zur Verfügung.

Der FPT besteht aus einer Anordnung von Walzen und Umlenkrollen, wie in Abbildung 3.1 dargestellt. Die Rollen werden unabhängig voneinander drehzahlregelt angesteuert. Dabei wird das jeweils benötigte Antriebsmoment gemessen. Der Vergleich des FPT-Prinzips mit einer Streck-Wickelmaschine offenbart folgende Analogien: Die Folien werden auf Rollen mit einer Breite von 500 mm geliefert und können als solche entweder im Wickelkopf des Stretchwicklers oder als Walze W_0 im FPT eingespannt werden. Die gummierten Walzen W_1 und W_2 des FPT entsprechen der Vorstreckeinheit einer Streck-Wickelmaschine. Statt auf eine Palette wird die Folie auf eine dritte Walze (W_3) aufgewickelt. Die Abstände zwischen den Walzen und damit die freie Länge der Folie entsprechen den Abmessungen handelsüblicher Streck-Wickelmaschinen. Während einer Messung drehen sich alle Walzen mit prozesstypischen Geschwindigkeiten. Deshalb basiert jeder auf dem FPT gemessene erfasste Datenpunkt auf der Umformung eines neuen Foliensegmentes. Die sich ändernden Relativgeschwindigkeiten führen dabei zu prozessparameterabhängigen Dehnratenverläufen. Auch in dieser Hinsicht entspricht die hier angewendete Messmethode handelsüblichen Streck-Wickelmaschinen.

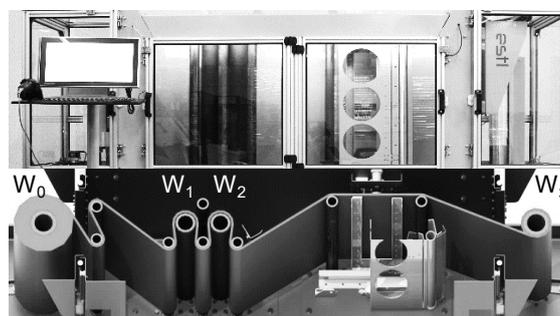


Abbildung 3.1: Film Property Tester [53]

Zu Beginn jeder Messung werden die Walzen W_1 und W_2 auf die erforderliche Anlagengeschwindigkeit von 4 m/s beschleunigt. Gleichzeitig werden W_0 und W_3 so angesteuert, dass die W_0 mit einer um 2% niedrigeren Umfangsgeschwindigkeit als die von W_1 dreht und W_3 mit einer um 2% höheren Umfangsgeschwindigkeit als

diejenige von W_2 dreht. So wird verhindert, dass die Folie aufgrund fehlender Spannung unerwünschte Bewegungen durch das Gerät nimmt. Jedoch bewirkt dieses Vorgehen Anlaufeffekte, die während der Analyse der Messdaten zu berücksichtigen sind. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass sich die Radien r_0 und r_3 der Walzen W_0 und W_3 während der gesamten Testzeit ändern. Die Radien werden deshalb mit optischen Wegsensoren erfasst, um die Geschwindigkeitsregelung der Folie zu realisieren. Das Abbremsen der Geschwindigkeit an der Oberfläche der Walzen W_0 und W_1 gegenüber W_2 resultiert in einer primären Deformation der Folie. Der zugehörige Verstreckgrad λ_1 und die nominelle primäre Dehnung ε_1 in Maschinenrichtung ergeben sich nach Gleichung (3.1) aus den Drehzahlen n_1 und n_2 und aus den Radien r_1 und r_2 der Walzen W_1 und W_2 :

$$\varepsilon_1 = \lambda_1 - 1 = \frac{n_2 r_2}{n_1 r_1} - 1 \quad (3.1)$$

Diese primäre Deformation entspricht dem Vorstrecken der Folie im Wickelkopf der Streck-Wickelmaschine. Gleichermaßen definieren die Drehzahlen n_2 und n_3 sowie die Radien r_2 und r_3 der Walzen W_2 und W_3 nach Gleichung (3.2) einen sekundären Verstreckgrad λ_2 , beziehungsweise eine sekundäre Dehnung ε_2 . Diese sekundäre Deformation findet im realen Prozess zwischen dem Wickelkopf und der Palette statt.

$$\varepsilon_2 = \lambda_2 - 1 = \frac{n_3 r_3}{n_2 r_2} - 1 \quad (3.2)$$

Schließlich ist die nominelle Gesamtdehnung ε_{ges} der Folie in Maschinenrichtung eine Folge der beiden aufeinanderfolgenden Verformungsschritte mit ihren Verstreckgraden λ_1 und λ_2 :

$$\varepsilon_{ges} = \lambda_{ges} - 1 = [\lambda_1 * \lambda_2] - 1 = [(\varepsilon_1 + 1) * (\varepsilon_2 + 1)] - 1 \quad (3.3)$$

Für die mechanische Charakterisierung der Folie sind neben den Dehnungen auch die Spannungen in Maschinenrichtung gesucht, die im Material durch die Deformation hervorgerufen werden. Unter der vereinfachenden Annahme reibungsloser Lager und von vernachlässigbarem Schlupf an den Rollen können mit Gleichungen (3.4) und (3.5) die Spannungen in Maschinenrichtung berechnet werden, die aus den beiden

Verformungsschritten des Wickelprozesses resultieren. Hierin sind die "nominelle Vorspannung" (σ_1) und die "nominelle Wickelspannung" (σ_2) die Reaktionen einer Folie mit einem Anfangsquerschnitt A auf ε_1 und ε_2 . Im Gegensatz zur Vorspannung σ_1 steht σ_2 direkt im Zusammenhang mit der Kraft, die für das Aufwickeln der Folie auf die Palette benötigt wird. Wegen „Actio = Reactio“ entspricht diese Kraft der Kontaktkraft zwischen der Folie und den Produkten und wird fortan als „Wickelkraft“ bezeichnet. Die Spannungen σ_1 und σ_2 bewirken die Antriebsmomente M_2 und M_3 der drehzahlgeregelten Walzen W_2 und W_3 mit ihren Radien r_2 und $r_3(t)$.

$$\sigma_1 = [M_2/r_2 + M_3/r_3]/A \quad (3.4)$$

$$\sigma_2 = M_3/(r_3 A) \quad (3.5)$$

In einer ersten Versuchsreihe wird ε_2 konstant gehalten, während ε_1 durch Abbremsen von W_1 und W_0 kontinuierlich erhöht wird, bis die Folie abreißt. Dieses „Experiment 1“ wird für die konstanten sekundären Dehnungen $\varepsilon_2 = \{-15\%, -10\%, -5\%, 0\%, 5\%, 10\%\}$ durchgeführt. Abbildung 3.2 stellt die Ergebnisse der sechs unabhängigen Messungen der nominellen Wickelspannung σ_2 über der gesamten nominellen Dehnung in Maschinenrichtung ε_{ges} dar. Mit Ausnahme des beschriebenen Anfahreffekts gleicht die Form der mit positiven zweiten Dehnungen gemessenen Kurven in Abbildung 3.2 denjenigen der einhüllenden Kurve aus Abbildung 2.4, die aus uniaxialen Zugversuchen derselben Folie bei niedrigeren Dehnraten resultiert.

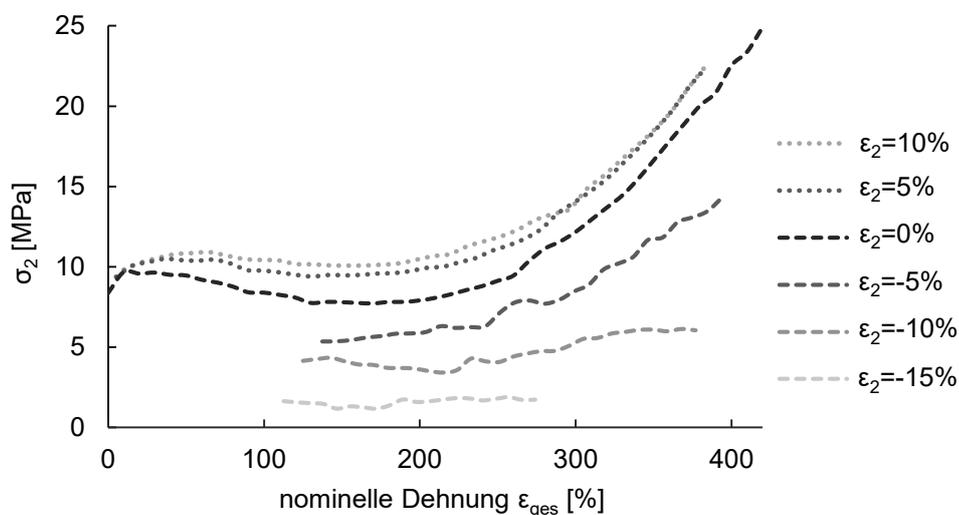


Abbildung 3.2: nominelle Wickelspannung in Maschinenrichtung

Damit die Prüfbedingungen den Prozessbedingungen auf einer handelsüblichen Streck-Wickelmaschine entsprechen, ist es notwendig, dass sich W_2 während eines Versuches konstant mit einer Oberflächengeschwindigkeit von 4 m/s dreht. Um die Menge an Folie zu reduzieren, die pro Versuch irreversibel deformiert und damit verbraucht wird, werden die Messungen mit negativen ε_2 verkürzt, indem der Prüfzyklus erst bei einer Vordehnung von $\varepsilon_1=150\%$ gestartet wird. Auf diese Weise wird der mögliche Einfluss von Produktionsschwankungen minimiert, da alle Versuche mit der gleichen Folienrolle durchgeführt werden können.

Anhand Abbildung 3.2 wird eine Tatsache deutlich, die weitreichende Folgen für die Entwicklung stabiler Verpackungen hat. Einem Wert von ε_{ges} können verschiedene Werte der Wickelspannung σ_2 zugeordnet werden. Während ε_{ges} im Zusammenhang mit der auf der Palette abgelegten Menge an Folie steht, steht σ_2 direkt im Zusammenhang mit der Kraft, mit der die abgelegte Stretchfolie die Produkte auf der Palette zusammenhält. Für den Streck-Wickelprozess bedeutet dies, dass aus der von der Folienrolle abgewickelten Menge an Folie keineswegs auf die Wickelkraft geschlossen werden kann, die die Folie auf den Produkten ausübt. Vielmehr ist es die Art, wie ε_{ges} erreicht wird, beziehungsweise die Deformationshistorie, die die Folie während des Streck-Wickelns erfährt, die einen maßgeblichen Einfluss auf σ_2 und damit auf die Wirkung einer Folienlage auf der Palette hat.

Bereits mit einer geringfügigen Entlastung der Folie $\varepsilon_2=\{-15\%, -10\%, -5\%\}$ nimmt σ_2 signifikant ab. Ein Versuch mit $\varepsilon_2=-20\%$ scheitert, weil die Folie soweit entlastet wird, dass sie sich in der Testvorrichtung mangels Wickelspannung verfängt. Jedoch unterscheiden sich die gemessenen Spannungen σ_2 für $\varepsilon_2=10\%$ kaum von denen für $\varepsilon_2=5\%$.

Offenbar hat gerade ε_2 einen entscheidenden Einfluss auf σ_2 und damit auf das Prozessergebnis des Streck-Wickelns. Dieser Einfluss soll mit einem weiteren Versuch näher analysiert werden. Um die Abnahme des Spannungsniveaus in Abbildung 3.2 für negative zweite Dehnungen näher analysieren zu können, ist es hilfreich, einen Entlastungspfad einer Spannungs-Dehnungskurve der Folie zu betrachten. Zu diesem Zweck bietet der FPT eine weitere Möglichkeit, die Walzen zu steuern. Im „Experiment 2“ werden konstante Geschwindigkeiten auf W_1 und W_2 beibehalten, während W_3 kontinuierlich variiert wird. Entsprechend wird ε_2 kontinuierlich variiert, während ε_1 konstant bleibt. Abbildung 3.3 veranschaulicht unter anderem die Entwicklung von σ_2

über ϵ_{ges} , wenn ϵ_1 konstant bei 283% gehalten wird und wenn die zweite Dehnung kontinuierlich von -20% auf +40% variiert wird.

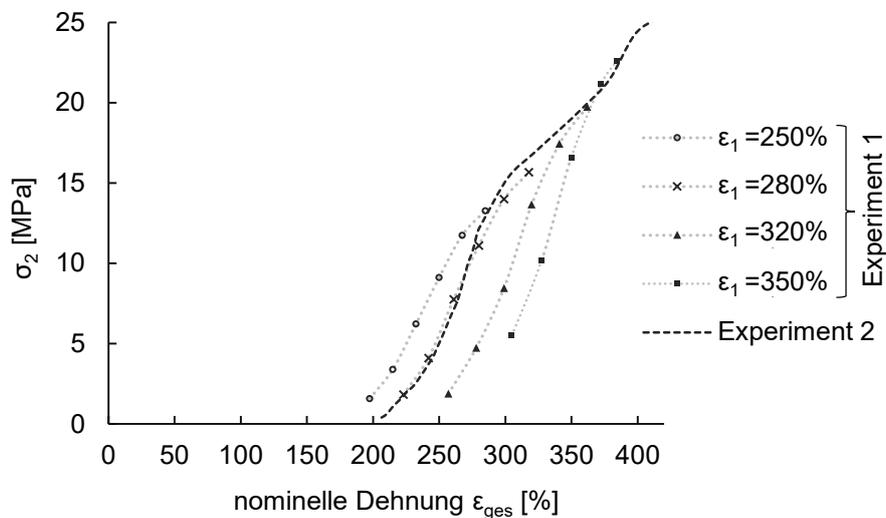


Abbildung 3.3: Wickelspannung σ_2 für verschiedene primäre Dehnungen ϵ_1 und variable sekundäre Dehnung ϵ_2

Die aus den Ergebnissen dieses zweiten Experimentes errechnete "Wicklungsspannungskurve bei 283% Vordehnung" oder " $\sigma_2(\epsilon_{\text{ges}}, \epsilon_1=283\%)$ " quantifiziert das Materialverhalten einer um 283% vorgedehnten Folie. Die Kurve verläuft wesentlich steiler als die Kurven in Abbildung 3.2. Der Entlastungspfad schneidet die X-Achse bei 206% und quantifiziert damit die plastische Dehnung, die nach der Vordehnung von 283% und der anschließenden Entlastung verbleibt. Vier weitere Wicklungsspannungskurven können auf Basis der Ergebnisse der ersten Versuchsreihe aus Experiment 1 durch Umsortieren der Daten visualisiert werden. Hierzu werden die Datenpunkte aus Abbildung 3.2 nach ihrer Vordehnung sortiert. Die resultierenden Wicklungsspannungskurven sind ebenfalls in Abbildung 3.3 dargestellt. Das Umsortieren der Daten ist möglich, da jeder Erfassungspunkt der dynamischen Messung von einem neuen Stück Streckfolie stammt, die mit einer individuellen Dehnungshistorie umgeformt wurde. Die Methode wird durch die gute Übereinstimmung der direkt gemessenen Kurve " $\sigma_2(\epsilon_{\text{ges}}, \epsilon_1=283\%)$ " mit der indirekt gemessenen Kurve " $\sigma_2(\epsilon_{\text{ges}}, \epsilon_1=280\%)$ " bestätigt.

Während sich die Kurven in Abbildung 3.3 im Bereich positiver sekundärer Dehnungen überlappen, ist bei negativen sekundären Dehnungen eine Parallelverschiebung der Kurven zueinander sichtbar. Ursache ist der irreversible Anteil der Deformation, der mit der während der Umformung erreichten maximalen Gesamtdehnung ϵ_{ges} zunimmt.

Einer unerwünschten irreversiblen globalen Deformation der Palette während des Transportes kann vorgebeugt werden, wenn die Stretchfolie mit hohen ϵ_1 in ihren Verfestigungsbereich überführt und anschließend teilweise entlastet wird, bevor sie auf der Palette abgelegt wird. Weil ein erneuter Fließbeginn erst mit einem erneuten Anstieg von σ_2 eintreten kann, besteht in dem beschriebenen Anwendungsbereich der Stretchfolie ein geringeres Potenzial für plastische Verformungen. Allerdings kann die Folie nicht völlig entlastet werden, da mit ϵ_2 und σ_2 auch die Wickelkraft der Folie verschwindet. Die Definition eines optimalen Anwendungspunkt für Streck-Wickelfolien erfordert eine nähere Analyse des Prozessfensters des Wickelprozesses bei hohen Dehnungen.

Schon anhand Abbildung 3.2 ist festzustellen, dass mit $\epsilon_2=5\%$ aus werkstofftechnischer Sicht eine Grenze für den Einfluss von ϵ_2 auf σ_2 erreicht ist. Diese Beobachtung bestätigt sich in Abbildung 3.3. Für $\epsilon_2 > 5\%$ folgt σ_2 eben dieser Belastungskurve $H=\sigma_2(\epsilon_2=5\%)$ aus Abbildung 3.2, welche die Kurven aus Abbildung 3.3 einhüllt. Veranschaulichend trägt Abbildung 3.4 die Kurven aus Abbildung 3.3 zusammen mit H in einem Diagramm auf. Mit Abbildung 3.4 ist demnach einerseits durch H eine Grenze des Prozessfensters für $\sigma_2(\epsilon_1, \epsilon_2)$ gegeben. Andererseits erklärt sich die Form der Wickelspannungskurven aus Abbildung 3.3.

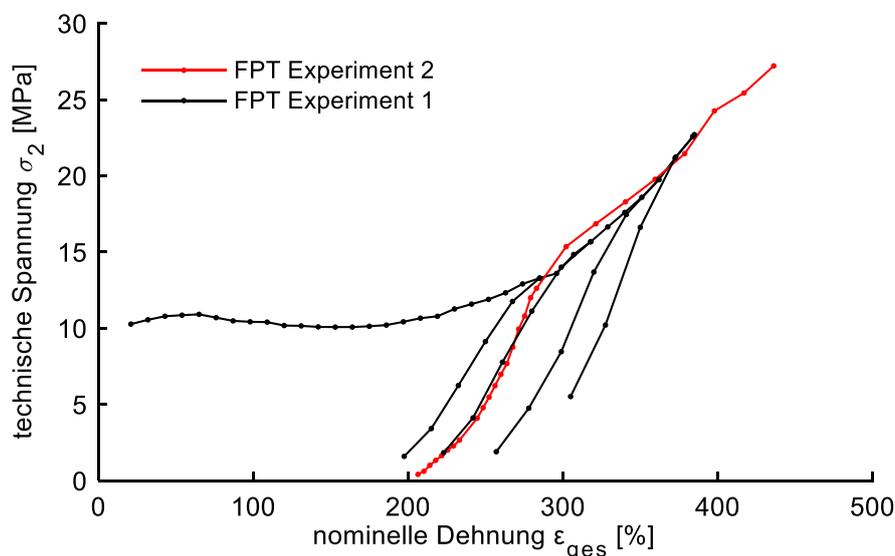


Abbildung 3.4: Vergleich der Messergebnisse aus Experiment 1 und Experiment 2

Es mag verwundern, dass H nicht durch $\sigma_2(\epsilon_1, \epsilon_2=0\%)$ aus Abbildung 3.2 gegeben ist. Dem ist entgegenzusetzen, dass die Folie sowohl im FPT als auch auf einer Streck-Wickelmaschine verschiedene Belastungszustände erfährt. Während der primären Verformung wird die Folie wegen des geringen Abstandes von W_1 und W_2 eher auf

Schub belastet, wohingegen zwischen W_2 und W_3 ein Lastfall auftritt, der wegen des Aspektverhältnisses des freien Foliensegmentes einem uniaxialen Lastfall nahekommt. Spannungen, die während der primären Deformation in Querrichtung der Folie hervorgerufen werden, können sich während der sekundären Deformation abbauen. In Konsequenz stellt im zweiten Deformationsschritt schon $\varepsilon_2=0\%$ eine Entlastung gegenüber dem primären Deformationsschritt dar.

Mit zunehmender primärer Dehnung ε_1 verlaufen die Wickelspannungskurven steiler, was auf die Verfestigung der Folie zurückzuführen ist. Hieran zeigt sich, dass die Deformationshistorie während des Streck-Wickelns nicht nur σ_2 , und in Konsequenz die erzeugte Wickelkraft der Folie auf der Palette, sondern auch das mechanische Verhalten der Folie in ihrem Arbeitspunkt maßgeblich beeinflusst.

Mit der Annahme, dass σ_2 für eine nachfolgende (tertiäre) Belastung der Folie auf der Palette dem vorherigen Entlastungspfad der Wickelspannungskurven folgt, kann ein Maß für die Steifigkeit (s_a) der mit ε_1 vorgedehnten und mit ε_2 auf der Palette applizierten Folie definiert werden. Abbildung 3.5 veranschaulicht anhand der Steigungen der Kurven aus Abbildung 3.3, wie die Steifigkeit (s_a) der applizierten Folie in ihrem Arbeitspunkt auf der Palette mit den beiden Prozessparametern ε_1 und ε_2 variiert.

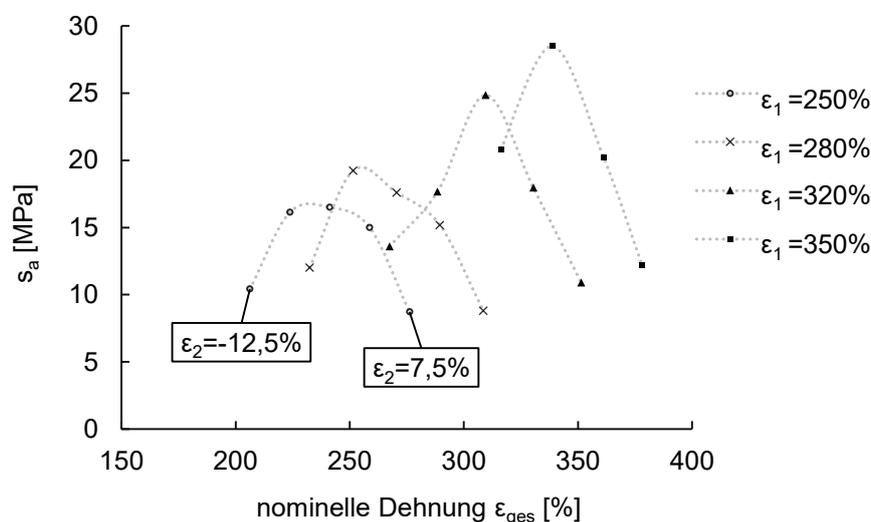


Abbildung 3.5: Einfluss der primären Dehnung ε_1 und der sekundären Dehnung ε_2 auf die Steifigkeit der Stretchfolie in ihrer Anwendung auf der Palette

Mit Abbildung 3.5 wird offensichtlich, dass die Dehnungshistorie und damit die Prozessparameter des Wickelprozesses auch für die Steifigkeit der Folie nach dem Wickelprozess eine entscheidende Rolle spielen. Der Zusammenhang von s_a und ε_1 ist eine triviale Folge der für PE typischen und in Kapitel 2.1 erörterten Verfestigung

bei hohen Dehnungen. Weniger offensichtlich ist der Zusammenhang $s_a(\varepsilon_1=\text{konst.}, \varepsilon_2)$, der sich in Abbildung 3.5 in der Kurvenform der Kurven von s_a über ε_{ges} wiederfindet. Die Steifigkeit der applizierten Folie ist am größten, wenn sie leicht von ihrer Vordehnung entlastet wird, beziehungsweise wenn ε_{ges} wenige Prozent kleiner als ε_1 gewählt wird.

Die Ursache für die anhand Abbildung 3.5 identifizierten Maxima von s_a ist mit Abbildung 3.4 und mit Abbildung 3.2 nachzuvollziehen. Die Plastizität der Folie bewirkt, dass das Spannungsniveau mit negativen ε_2 signifikant abnimmt. Dementsprechend verlaufen Entlastungspfade nicht auf dem ursprünglichen Belastungspfad, sondern steiler. Hingegen führen zunehmend positive sekundäre Dehnungen $\varepsilon_2 > 5\%$ nicht mehr zu entsprechend höheren Spannungen σ_2 . Folglich ist der Bereich, in dem die s_a über ε_2 maßgeblich beeinflusst werden kann, auf ein enges Intervall von $\varepsilon_2 = -15\%$ bis $\varepsilon_2 = 5\%$ begrenzt. Diese Begrenzung ergibt sich aus der einhüllenden Belastungskurve H und aus den Entlastungspfaden, die von dieser Kurve ausgehen.

Das technische Potenzial einer Folie hängt auch mit dem Verlauf der Einhüllenden H zusammen und wird in Kapitel 3.1.2 näher analysiert. Hervorzuheben bleibt aber, dass es nicht genügt, den Verlauf der Belastungskurve einer PE-Folie zu analysieren, um das Resultat des Streck-Wickelprozesses und damit die tertiäre Verpackung zu optimieren. Vielmehr ist auch der enorme Einfluss auf die Wickelkraft, die die Folie auf die Produkte erzeugt, und der Einfluss auf die Steifigkeit, die die Folie dem Verpackungssystem verleiht, auszunutzen.

Zusammenfassend erschließt sich, dass die primäre und die sekundäre Dehnung während des Streck-Wickelns maßgeblich beeinflussen, inwiefern das Potenzial einer Folie, den Verbund zu stabilisieren, ausgeschöpft wird. Anhand Abbildung 3.5 kann ein optimales Intervall für den Prozessparameter ε_2 bei -5% bis 0% identifiziert werden. In diesem Intervall werden die mechanischen Eigenschaften der Verpackungsfolie bestmöglich ausgenutzt. Voraussetzung ist, dass die Folie in ihren Verfestigungsbereich überführt wird. Die primäre Dehnung ε_1 ist dementsprechend in den Grenzen der Prozessierbarkeit zu maximieren. Die Prozessierbarkeit hängt nicht nur von den mechanischen Eigenschaften der Folie, sondern auch von der Bauart der jeweils verwendeten Streck-Wickelmaschine und von der Form der umwickelten Palette ab.

Neben den Prozessparametern der Dehnungshistorie entscheiden die Parameter des Wickelmusters, also die Position und die Anzahl der Folienlagen, essentiell über die

Effizienz der Transportverpackung. Zu berücksichtigen sind in diesem Zusammenhang unter anderem die Flexibilität und die maximale Belastbarkeit der restlichen Verpackungsstruktur. Die hier gemessenen Wicklungsspannungskurven dienen in Kapitel 4 als experimentelle Basis für die Kalibrierung eines Prozessmodells, welches die Vorhersage des Prozessergebnisses unter Berücksichtigung dieser Einflussfaktoren ermöglicht. Im folgenden Kapitel wird zunächst analysiert, inwiefern sich die hier erörterten Erkenntnisse auf andere Folientypen übertragen lassen. Darauf aufbauend wird eine Bewertungsmethode für Stretchfolien entwickelt. Im Anschluss werden die Daten aus den Laborexperimenten mit Daten aus Feldversuchen korreliert, wodurch die gewonnenen Erkenntnisse verifiziert werden können.

3.1.2 Vergleichbarkeit und technische Bewertung von Stretchfolien

Im vorangegangenen Abschnitt wurde der signifikante Einfluss der Dehnungshistorie während des Streck-Wickelns auf die Wickelkraft, die die Folie auf die gestapelten Produkte ausübt, und auf die Steifigkeit der Folie auf der Palette am Beispiel eines Folientyps festgestellt und quantifiziert. Allerdings sind eine Vielzahl verschiedener PE-Folientypen kommerziell verfügbar. Die Folien unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre Geometrie, durch die Anzahl verschiedener Lagen der Verbundfolien und, vereinfachend, durch deren Rezeptur. Aufgrund dieser Vielseitigkeit ist zu überprüfen, inwiefern die in Kapitel 3.1.1 gefundenen Zusammenhänge auf andere Folientypen übertragbar und damit verallgemeinerbar sind. Dabei verfolgt die vorliegende Arbeit nicht das Ziel, Zusammenhänge zwischen chemischem und strukturellem Aufbau der Folie auf deren Eignung als Verpackung hin zu untersuchen. Vielmehr soll dem Anwender ein quantitativer Vergleich der verschiedenen Folientypen in Bezug auf deren technische Performance auf der Palette ermöglicht werden.

Insgesamt werden elf Folien verschiedener Dicke d aber gleicher Breite $b=500$ mm von acht verschiedenen Herstellern, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, mit dem FPT mechanisch charakterisiert. In einem anwendungsorientierten Vergleich werden die Messergebnisse auf Basis der zu erwartenden Wickelkraft F_W auf der Palette nach Gleichung (3.6) analysiert.

$$F_W = M_3/r_3 \quad (3.6)$$

Auf diese Weise steht die Wirkung der Folie im Verpackungssystem vor der für den Anwender weniger relevanten technischen Spannung im Vordergrund. Abbildung 3.6 zeigt die nach Gleichung (3.6) ermittelte Kraft F_W für zwei Folientypen. Die im vorangegangenen Kapitel gefundene Abhängigkeit $\sigma_2(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ findet sich nach den

Gleichungen (3.3) und (3.6) in der Kurvenschar $F_W(\varepsilon_1=\{200\%, 250\%, 300\%, 350\%\}, \varepsilon_{ges})$ auch für die beiden hier charakterisierten Folien wieder.

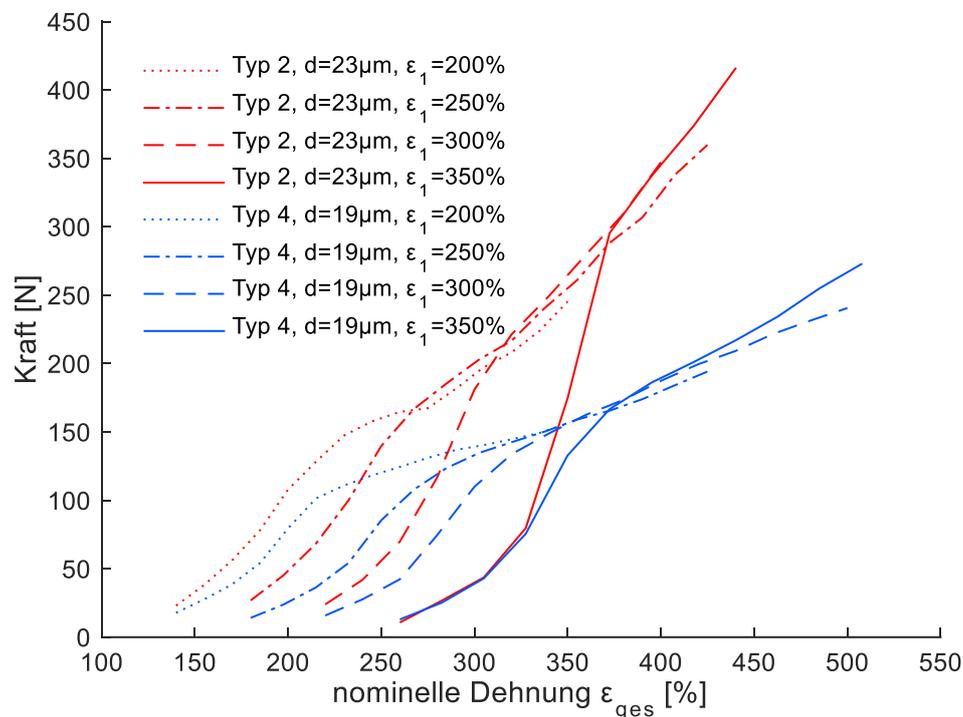


Abbildung 3.6: Kraft F_W , die für das Dehnen des Folientyps um $\varepsilon_2=\{-20\%, -15\%, \dots, 45\%, 50\%\}$ nach einer Vordehnung $\varepsilon_1=\{200\%, 250\%, 300\%, 350\%\}$ benötigt wird – Vergleich von Typ 2 und Typ 4.

Die Folientypen 2 und 4 aus Abbildung 3.6 gleichen in Bezug auf ihre mechanische Antwort nach einer vorherigen Dehnung außerdem dem Folientyp 1 aus Abbildung 3.4. Allerdings unterscheiden sich bei den beiden hier untersuchten Folien die maximal erreichten Kräfte F_W um 52%, obwohl d nur um 22% variiert. Offenbar weichen die für die Folie verwendeten PE-Typen in Bezug auf deren Verfestigungsverhalten bei hohen Dehnungen voneinander ab. Trotz der signifikanten Unterschiede in den gemessenen Kräften ist die Ähnlichkeit des Verlaufes der Kurven offensichtlich. Diese Ähnlichkeit legt die Vermutung nahe, dass eine Stauchung der für den Typ 2 gemessenen Kurven zu einer guten Übereinstimmung mit den für den Typ 4 gemessenen Kurven führt und dass sich auch andere Folientypen dementsprechend verhalten. Die Hypothese eines, in erster Näherung, linearen Zusammenhanges zwischen den mechanischen Antworten vorgestreckter Stretchfolien soll im Folgenden überprüft werden.

Abbildung 3.7 stellt eine Kurvenschar von je vier „Wickelkraftkurven“ $F_W(\varepsilon_1=\{200\%, 250\%, 300\%, 350\%\})$ für die elf charakterisierten Folientypen dar. Trifft die oben formulierte Hypothese zu, so lassen sich diese Kurven durch Streckung bzw. Stauchung ineinander überführen. Beispielsweise müssten die Wickelkraftkurven für

Typ 4 $F_{W,4}(\varepsilon_1, \varepsilon_{ges})$ aus den Wickelkraftkurven für Typ 2 $F_{W,2}(\varepsilon_1, \varepsilon_{ges})$ durch Stauchung mit dem Divisor s nach Gleichung (3.7) hervorgehen:

$$F_{W,4} = F_{W,2} \cdot s; = \frac{F_{W,2}}{s} \quad (3.7)$$

Der Folientyp 4 wird als Referenz für die Berechnung von s herangezogen, weil dieser Typ im Vergleich zu den anderen getesteten Typen für die meisten Parameterkombinationen $\{\varepsilon_1, \varepsilon_2\}$ einen Messwert liefert. Andere Folientypen reißen schon, wie in Abbildung 3.7 ersichtlich, bei wesentlich niedrigeren Gesamtdehnungen und können daher nicht in allen Bereichen als Referenz dienen. Ferner ist zu beobachten, dass die Foliendicke keine Aussage über die zu erreichende Wickelkraft zulässt. Folglich gibt es unter den getesteten Folien signifikante Unterschiede, entweder in der Kombination der verwendeten PE-Typen oder im Materialverhalten der PE-Typen selbst. Für die Anwendung ergibt sich die Notwendigkeit, die Einstellung der Streck-Wickelmaschine auf den verwendeten Folientyp abzustimmen, auch wenn ausschließlich Folien gleicher Materialstärken verwendet werden.

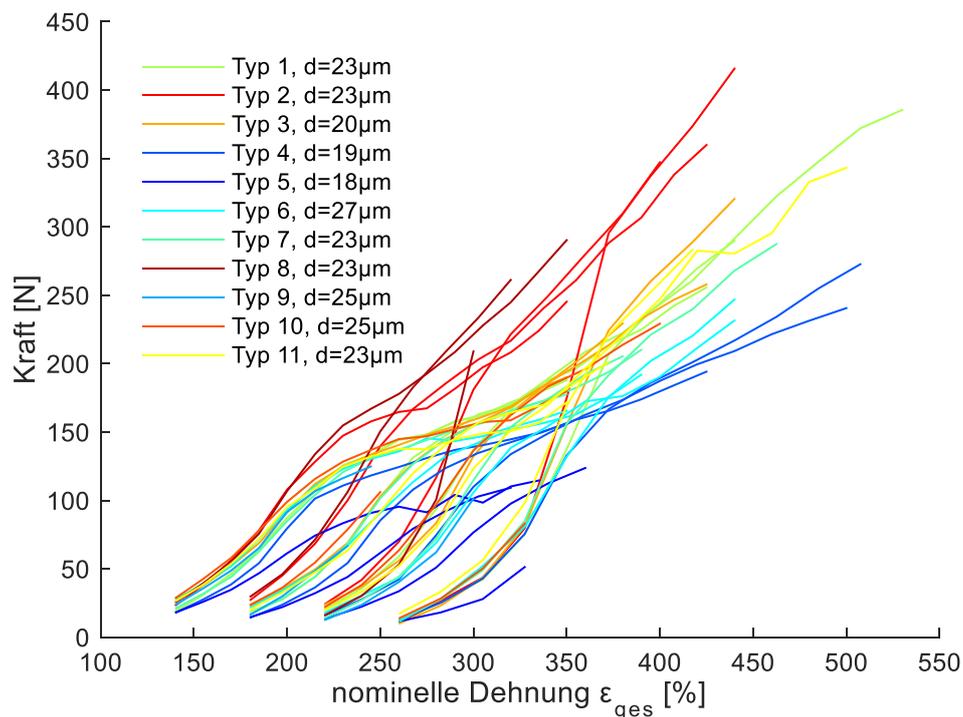


Abbildung 3.7: Kraft F_w , die für das Dehnen des Folientyps um $\varepsilon_2=\{-20\%, -15\%, \dots, 45\%, 50\%$ nach einer Vordehnung $\varepsilon_1=\{200\%, 250\%, 300\%, 350\%$ benötigt wird – Vergleich aller getesteten Folientypen

Ein geeigneter Divisor s kann für jede Folie durch Umstellung der Gleichung (3.7) bestimmt werden. Bei einem perfekten linearen Zusammenhang zwischen den mechanischen Antworten $F_{w,i}$ der i Folientypen ergäbe sich der Divisor s_i

gleichermaßen aus jedem Quotienten der einander in der Dehnungshistorie entsprechenden Messresultate:

$$s_i = \frac{F_{W,i}(\varepsilon_1, \varepsilon_{ges})}{F_{W,4}(\varepsilon_1, \varepsilon_{ges})} \quad (3.8)$$

Tatsächlich ist aber von einer dermaßen idealen Übereinstimmung nicht auszugehen, weswegen s_i als Mittelwert der Quotienten aller paarweise existenten Paare $F_{W,i}(\varepsilon_1, \varepsilon_{ges})$ und $F_{W,4}(\varepsilon_1, \varepsilon_{ges})$ gebildet wird. Abbildung 3.8 stellt die mit dem Quotienten s gestauchten Wickelkraftkurven aller elf getesteten Folien über ε_{ges} dar.

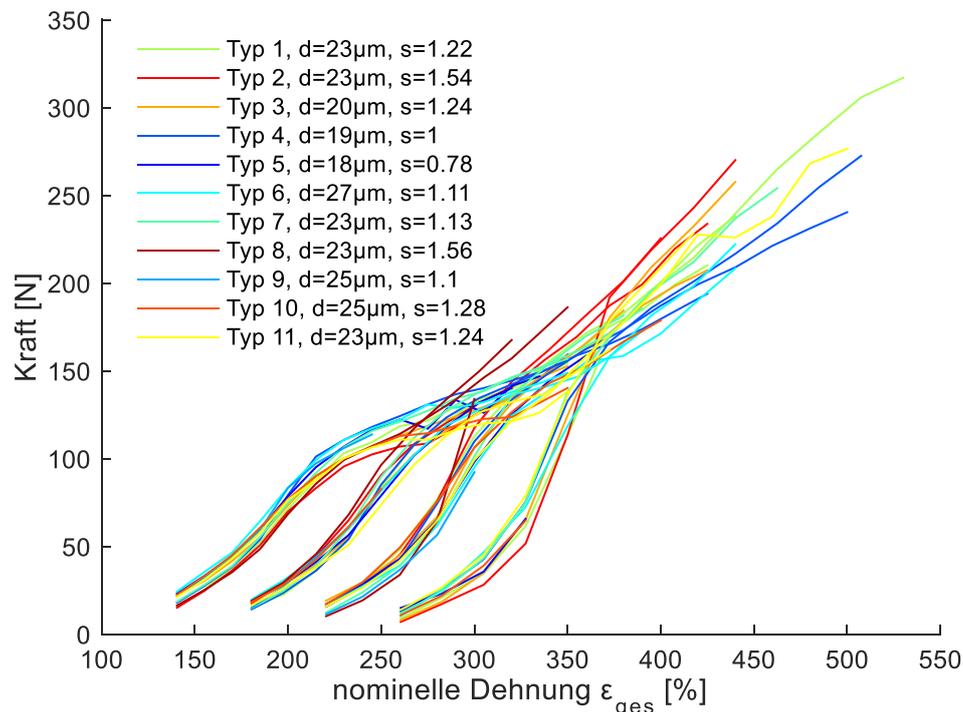


Abbildung 3.8: nach Division durch s gestauchte Abhängigkeit $F_W(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ der Messwerte aus Abbildung 3.7

Die gestauchten Wickelkraftkurven gleichen einander vor allem im jeweiligen Entlastungsbereich ($\varepsilon_2 \leq 0$ bzw. $\varepsilon_{ges} \leq \varepsilon_1$). Gerade in diesem Bereich werden die Folien idealerweise eingesetzt, weil ihre Steifigkeit dort ein Maximum erreicht. Außerdem wird mit der Vordehnung $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{ges}$ und der hierdurch eingetretenen Verfestigung einer plastischen Deformation der Folie während des Transportes vorgebeugt.

Die Übereinstimmung der gestauchten Kurven im Entlastungsbereich eröffnet dem Anwender eine wichtige Erkenntnis: Grundsätzlich kann mit allen hier getesteten Folien das gleiche Prozessergebnis bezüglich applizierter Wickelkraft und applizierter Bauteilsteifigkeit des Folienpaketes erzielt werden, sofern sie in dem zuvor definierten idealen Bereich angewendet werden. Damit sich zwei Prozessergebnisse mit

unterschiedlichen Folien gleichen, muss neben den Prozessparametern ε_1 und ε_2 die Anzahl der applizierten Lagen vorgereckter Folie entsprechend dem Quotienten s angeglichen werden. Die beiden vorangehenden Aussagen beruhen auf der Annahme, dass die applizierte Folienkraft und die applizierte Bauteilsteifigkeit linear mit der Anzahl applizierter Lagen an Folie wachsen. Diese Annahme wird in Kapitel 3.1.3 verifiziert.

An dieser Stelle kann bestätigt werden, dass sich die in Kapitel 3.1.1 gefundenen Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern ε_1 und ε_2 und dem mechanischen Verhalten der Stretchfolie im Verpackungssystem auf andere Folientypen übertragen lassen.

Im nächsten Schritt ist zu fragen, wie die technische Performance der Stretchfolien quantifiziert und somit verglichen werden kann. Die gesuchte technische Performance P_T soll die Wirkung der Folie auf der Palette bei optimaler Ausnutzung der Folie quantifizieren. Die Wirkung der Folie auf der Palette wiederum setzt sich zusammen aus der auf die Produkte ausgeübte Wickelkraft F_w sowie aus der Steifigkeit s_a , die die Folie dem Verpackungssystem zusätzlich verleiht.

Durch den Divisor s ist bereits eine Größe gefunden, die die erreichten Wickelkräfte der Folien in Bezug zueinander setzt. Auf dieser Basis kann die effizientere Folie bei gegebenem Prozessparameter ε_1 ausgewählt werden. Allerdings wird mit s nicht berücksichtigt, dass die Folien unter Prozessbedingungen je nach Typ verschiedene Reißdehnungen erreichen. Tatsächlich ist ε_1 in den meisten Streck-Wickelmaschinen in einem weiten Bereich variierbar, sodass auch ein Vergleich der Folientypen unabhängig von ε_1 erfolgen sollte. Folien, die für den Einsatz außerhalb des getesteten Bereiches $\varepsilon_1 = \{200\% \text{ bis } 350\%\}$ konzipiert wurden, sollen durch die vorgeschlagene Bewertungsmethode nicht benachteiligt werden.

Abbildung 3.8 bestätigt, dass sich die mechanischen Verhaltensweisen der vorgedehnten Folien im Entlastungsbereich ($\varepsilon_2 \leq 0$) gleichen. Mit Abbildung 3.5 kann, unabhängig von ε_1 und wegen der hier festgestellten Ähnlichkeit im Materialverhalten auch unabhängig vom Folientyp, ein Optimum für die Steifigkeit der applizierten Folie bei $\varepsilon_2=0\%$ festgestellt werden. Darüber hinaus wächst s_a , wie mit Abbildung 3.5 nachvollziehbar, stetig mit ε_1 . Wegen der ausgeprägte Verfestigung der PE-Folien bei hohen Dehnungen liegt das globale Optimum für s_a demnach bei der Reißdehnung $\varepsilon_r(\varepsilon_2=0\%)$. Obwohl die maximalen Wickelkräfte F_w mit $\varepsilon_2 \geq 0$ erreicht werden, sollte ein solcher Prozess vermieden werden, um eine plastische Deformation der Stretchfolie

mit dem einhergehenden Potenzial einer irreversiblen globalen Deformation des Verpackungssystems während des Transportes zu vermeiden. Prozess- und Transportsicherheit erfordern, dass die Folie nicht bis an ihr Limit belastet wird. Aus diesem Grund wird die Grenzdehnung $\varepsilon_{80}=0,8*\varepsilon_r$ definiert, sodass auch signifikante und während des Streck-Wickelns oder während des Transportes unplanmäßig auftretende zusätzliche Dehnungen $\Delta\varepsilon_{err}$ der Folie in Längs- oder in Querrichtung nicht unmittelbar in Materialversagen resultieren. Die für die technische Bewertung der Folien herangezogene technische Performance P_T ergibt sich deshalb aus der Wickelkraft $F_w(\varepsilon_{80}, \varepsilon_2=0\%)$, die in dem definierten Arbeitspunkt $\{\varepsilon_{80}, \varepsilon_2=0\% \}$ erreicht wird. In diesem Arbeitspunkt sind sowohl F_w als auch s_a unter der Voraussetzung der Prozess- und der Transportsicherheit optimal.

P_T kann mit Experiment 1 aus Kapitel 3.1.1 für die elf getesteten Folientypen ermittelt werden. Tabelle 3.1 stellt P_T und ε_r zusammen für die elf getesteten Folientypen dar und ermöglicht somit ein Ranking. Die für das zu verpackende Produkt optimalen Prozessparameter können abweichen, beispielsweise wenn F_w die Produkte zu stark deformieren würde. F_w kann in diesem Fall mit ε_2 reduziert werden.

	Dicke [μm]	ε_{80} [%]	$P_t=F_w(\varepsilon_{80}, \varepsilon_2=0\%)$ [N]	Ranking
Typ 1	23	340	164	1
Typ 2	23	290	163	2
Typ 3	20	330	163	2
Typ 4	19	340	123	6
Typ 5	18	340	88	10
Typ 6	27	300	112	8
Typ 7	23	310	125	5
Typ 8	25	240	139	3
Typ 9	25	330	98	9
Typ 10	25	290	122	7
Typ 11	23	300	128	4

Tabelle 3.1: Ranking der getesteten Folientypen nach ihrer technischen Performance P_T

Anhand des Vergleiches der Folientypen fünf und sechs ist nachvollziehbar, dass die Foliendicke keinen unmittelbaren Rückschluss auf die erreichbare Wickelkraft zulässt. Folglich kann die Qualität einer Streck-Wickelverpackung nur sehr bedingt über die Optik bzw. über die Transparenz der tertiären Verpackung beurteilt werden. Vorhersagen zur Stabilität des Verpackungssystems erfordern deshalb Kenntnisse der individuellen Charakteristik des Verpackungsmaterials in Abhängigkeit von der Deformationshistorie während des Streck-Wickelns.

Es bleibt anzumerken, dass auch mit einer weniger performanten Folie durch das Aufbringen mehrerer Lagen grundsätzlich ein gleichwertiges Prozessergebnis erzielt werden kann. Die hier vorgenommene technische Bewertung der Stretchfolien ist unabhängig von den Kosten und unabhängig vom Gewicht beziehungsweise unabhängig vom Verbrauch des verwendeten Folienmaterials und versteht sich als ein Produktmerkmal.

Ausgehend von P_T sind jedoch ökonomische und ökologische Bewertungen der Stretchfolien möglich, die auch den Einfluss von ε_{ges} und den Einfluss der Foliendicke d auf den Folienverbrauch berücksichtigen. P_T ist ein Indikator für die Kraft, die eine Folienlage auf die Produkte ausübt, wenn die Folie vorher auf 80% ihrer Reißdehnung gedehnt wurde. Wird eine Folie mit geringerer P_T eingesetzt, so sind entsprechend mehr Lagen nötig, um die Palette zu stabilisieren. Die ökonomische Performance P_N ergibt sich folglich nach Gleichung (3.9) aus dem Quotienten aus P_T und den Kosten K_{80} für einen Meter der um ε_{80} gedehnten Folie.

$$P_N = \frac{P_T}{K_{80}} \quad (3.9)$$

Analog dazu lässt sich eine ökologische Performance P_L als der Quotient aus P_T und der Masse M_{80} eines Meters der um ε_{80} in Maschinenrichtung gedehnten Folie definieren:

$$P_L = \frac{P_T}{M_{80}} \quad (3.10)$$

Sowohl K_{80} als auch M_{80} können aus dem Preis, beziehungsweise aus der Masse einer Rolle Stretchfolie bestimmt werden. Die in Kapitel 4 vorgestellten Ansätze zur Modellierung des Verpackungssystems zielen darauf ab, die Reaktion eines Verpackungssystems auf dessen Belastungen während des Transportes vorherzusagen um Beschädigungen zu vermeiden. Lokales Materialversagen hingegen wird nicht modelliert und in diesem Kapitel nicht näher charakterisiert, weil die numerischen Methoden auch ohne diesen Detaillierungsgrad aussagekräftige Informationen liefern, indem die plastische Dehnung ausgewertet wird. Sind lokale Defekte der Stretchfolie von höherem Interesse, sollte die technische Bewertung der Folien auch deren Reiß- oder Durchstoßfestigkeit [54, 55] miteinbeziehen.

3.1.3 Prozessanalyse

Das in Kapitel 2.1 beschriebene viskoelastische Verhalten der PE-Folie führt zwangsläufig zu einer zeitlichen Entwicklung der Wickelkraft der Folie auf den Produkten. Diese zeitliche Entwicklung wird quantifiziert, um in Kapitel 4 mit in die Vorhersage des Prozessergebnisses des Streck-Wickelprozess einzufließen. Außerdem bleibt wegen der in Kapitel 2.2 beschriebenen Problematik des Umwickeln eines rechteckigen Objektes zu untersuchen, ob die mittels FPT bestimmte Wickelkraft der Folie tatsächlich auch durch den Streck-Wickelprozess erreicht wird und damit als Wickelkraft auf den Produkten zur Stabilisierung des Verbundes zur Verfügung steht. Das kommerziell verfügbare „Film Edge Force“ (FEF) Messsystem ermöglicht die Messung der Wickelkraft der Folie auf den gestapelten Produkten. Das FEF-System besteht aus bis zu acht unabhängigen Modulen mit einer Länge von jeweils 200 mm. Je nach Höhe der Palette können auch weniger Module eingesetzt werden. Jedes dieser Module enthält zwei Kraftaufnehmerpaare, die mit einem Hilfsrahmen am Rand einer Palette befestigt werden, bevor der Wickelprozess gestartet wird. Abbildung 3.9 stellt ein solches Modul in einer schematischen Schnittzeichnung dar.

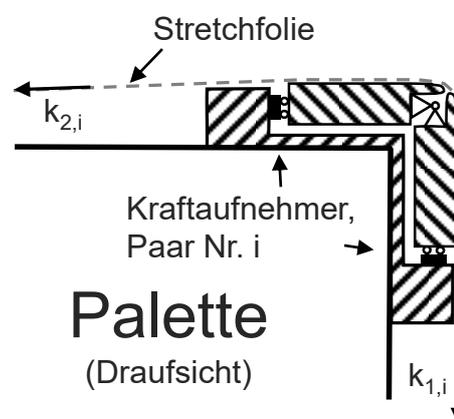


Abbildung 3.9: Skizze eines Moduls des FEF-Systems in der Draufsicht

Die Module sind an einer Ecke der Palette übereinander angeordnet. Somit messen die Kraftaufnehmer die räumliche Verteilung der Kontaktkräfte $k_{1,i}$ und $k_{2,i}$ an bis zu sechzehn Punkten, die gleichmäßig an einer Kante der Palette über deren Höhe verteilt sind. Die Kontaktkräfte sind die beiden Komponenten k_i der Wickelkraft F_w , die analog zur Definition der „Containment Force“ nach Bisha [51] zu verstehen ist. Mit dem FEF wird folglich die lokale Verteilung der Wickelkraft gemessen, die die Folie auf die Produkte ausübt. Die gesamte Wickelkraft F_w ist nach Gleichung (3.11) die Resultierende aller k_i und tritt an einer Kante der Palette auf, sobald die Streck-Wickelmaschine dort eine Folienlage ablegt. Im Rahmen dieser Studie wurden sieben

Module des FEF-Systems, wie in Abbildung 3.10 gezeigt, an der Kante eines Stapels konventioneller Europaletten aus Holz befestigt, um zunächst die möglichen Einflüsse der mechanischen Eigenschaften der Getränkepacks auf das Messergebnis auszuschließen.



Abbildung 3.10: FEF, angebracht auf einem Stapel hölzerner Europaletten

Der vorliegende Abschnitt quantifiziert zunächst die zeitliche Entwicklung der gesamten Wickelkraft $F_W(t)$ in Abhängigkeit von den verallgemeinerten Prozessparametern des Streck-Wickelns, von der Vordehnung ε_1 und von der sekundären Dehnung ε_2 . Mit den sechzehn Einstellungen eines vollfaktoriellen statistischen Versuchsplans (engl.: Design of Experiments, DoE) der beiden Faktoren $\varepsilon_1 = \{250\%; 283\%; 317\%; 350\%\}$ und $\varepsilon_2 = \{-8.3\%; -2.9\%; 3.1\%; 10\%\}$ wird ein weiterer Bereich des Prozessfensters für das Streck-Wickeln abgedeckt. Für jede Einstellung werden acht Lagen des Folientyps 1 an der gleichen vertikalen Position auf der Palette und auf dem FEF-System abgelegt. Die Kontaktkräfte $k_{1,i}$ und $k_{2,i}$ werden bis 20 Minuten nach Ende des Streck-Wickelprozesses aufgezeichnet und ergeben nach Gleichung (3.11) den Verlauf von $F_W(t)$.

$$F_W(t) = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} = \sqrt{\left(\sum_1^{14} k_{1,i}\right)^2 + \left(\sum_1^{14} k_{2,i}\right)^2} \quad (3.11)$$

Mit den Parameterkombinationen der DoE ergeben sich sechzehn verschiedene Verläufe für $F_W(t)$. Wenn die acht Folienlagen gleichermaßen zu $F_W(t)$ beitragen, ist mit $F_W'(t)$ der Beitrag einer Folienlage bestimmt.

$$F_W'(t) = F_W(t) : 8 \quad (3.12)$$

Abbildung 3.11 zeigt $F_W'(t)$ exemplarisch für zwei Parametersätze und Abbildung 3.12 fasst die Ergebnisse der DoE zusammen, indem sie die relative Änderung von $F_W(t)$ innerhalb der ersten 20 Minuten nach dem Wickelvorgang veranschaulicht.

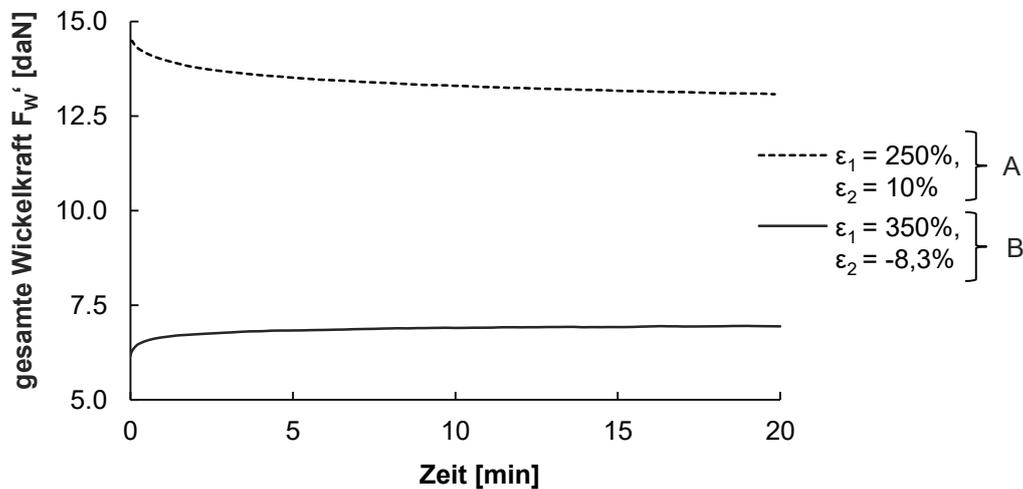


Abbildung 3.11: Verlauf der gesamten Wickelkraft $A(t)$, die eine Lage Folie auf die Palette ausübt

Für die in Abbildung 3.11 dargestellten Parameterkombinationen sind grundlegende Unterschiede im Verlauf von $F_W'(t)$ erkennbar. Parametersätze mit positiven sekundären Dehnungen, wie Parametersatz A, bewirken eine Relaxation der Kunststoffolie. Im Falle negativer sekundärer Dehnungen, wie bei Parametersatz B in Abbildung 3.11, liefert die Streck-Wickelmaschine mehr Folie, als es die Oberfläche der Palette erfordert. Dadurch ist eine viskoelastische Rückstellung der Vordehnung möglich. Die Folie schrumpft auf die Palette und bewirkt so einen verzögerten Anstieg der Wickelkraft. Die Konsequenz des ermittelten viskoelastischen Verhaltens der PE-Folien für die Praxis ist, dass eine Qualitätskontrolle der Paletten frühestens 20 Minuten nach dem Streck-Wickelvorgang zuverlässig ist. Außerdem muss eine modellbasierte Prognose des Prozessergebnisses den Einfluss der Viskoelastizität der Stretchfolie auf die Wickelkraft widerspiegeln, wie er in Abbildung 3.12 zusammengefasst ist. Diese Prognose soll mittels der per FPT generierten Datenbasis ermöglicht werden.

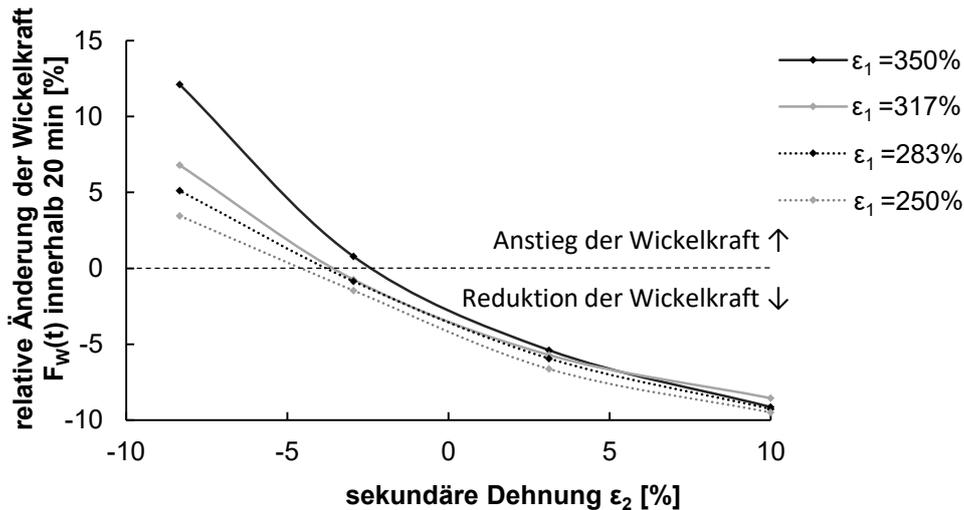


Abbildung 3.12: relative Änderung der Wickelkraft $A(t)$ innerhalb der ersten 20 Minuten nach dem Ende des Streck-Wickelprozesses

Mit Abbildung 3.12 ist der Einfluss von ε_1 und ε_2 auf die Änderung der Wickelkraft charakterisiert. Es bleibt zu analysieren, inwiefern die per FPT erzeugte Datenbasis für die Wickelkraft $F_w(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ beziehungsweise für die Wickelspannung $\sigma_2(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ eine Prognose der tatsächlich erreichten Wickelkraft F_w im Verpackungsprozess ermöglicht. Hierzu wird eine zweite DoE nach dem Vorbild der ersten durchgeführt, jedoch mit leicht abgeänderten Parametern $\varepsilon_2 = \{-12\%; -5,7\%; 1,5\%; 10\%\}$, sodass für negative ε_2 ein größeres Prozessfenster abgedeckt wird. Der wesentliche Unterschied der zweiten DoE gegenüber der ersten DoE ist allerdings, dass mit einer höheren Abtastrate von 40 Hz gemessen wird, um die zeitliche Entwicklung der Summe $k_1(t)$ der Kontaktkräfte $k_{1,i}(t)$ während des Wickelvorgangs genauer zu erfassen. Abbildung 3.13 stellt $k_1(t)$ exemplarisch für eine Parameterkombination dar.

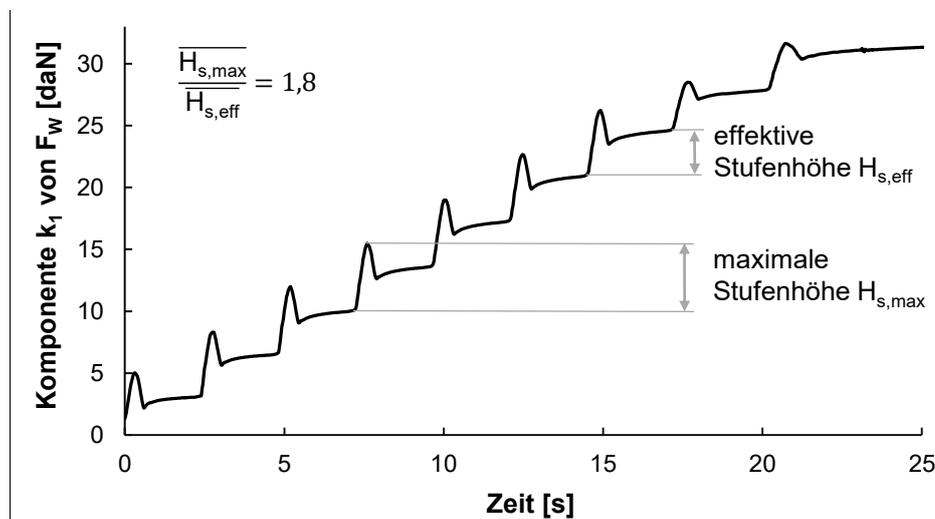


Abbildung 3.13: Entwicklung der Kantenkraft k_1 während des Streck-Wickelprozesses mit $\varepsilon_1 = 317\%$ und $\varepsilon_2 = -5,7\%$

Deutlich erkennbar sind die neun Stufen im Kraftverlauf, die auftreten, sobald der rotierende Arm der Stretchfolie die Folie auf dem Messsystem ablegt. Die Vergleichbarkeit zu den Ergebnissen des FPT-Experimentes 1 aus Kapitel 3.1.1 wird gewährleistet, indem die Wickelkraft einer Folienlage unmittelbar nach dem Ablegen bestimmt wird. Im Gegensatz zur ersten DoE wird deshalb der durchschnittliche Anstieg von k_1 pro Folienlage ausgewertet. Die Ergebnisse der FEF-Messung sind in Abbildung 3.14 mit $k_1(\varepsilon_{\text{ges}})$ dargestellt. Die mit in Kapitel 3.1.1 anhand der FPT-Messungen diskutierten Einflüsse von ε_1 , ε_2 auf das Prozessergebnis finden sich auch in Abbildung 3.14 wieder. Auch hier hat die ε_2 den signifikantesten Einfluss auf das Prozessergebnis.

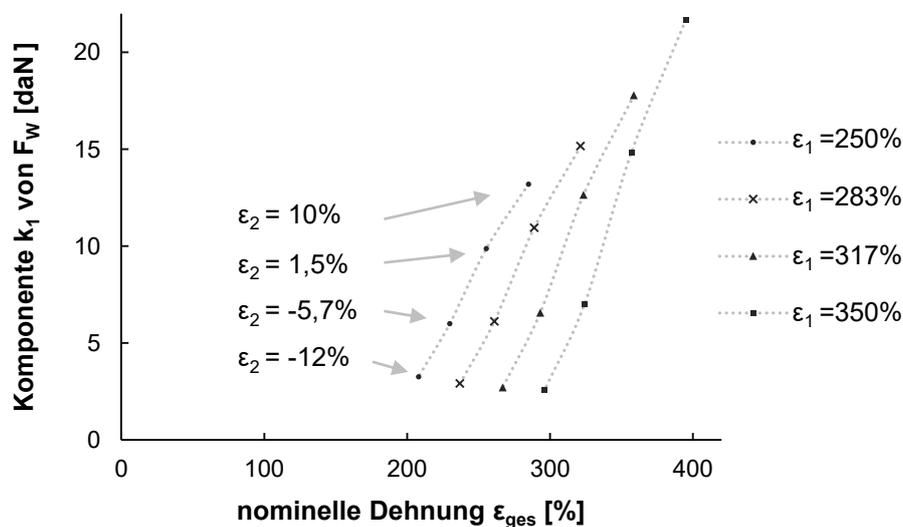


Abbildung 3.14: Einfluss von ε_1 und ε_2 auf k_1 im Streck-Wickelprozess

Für eine genauere Analyse werden die Ergebnissen der FPT-Messungen aus Abbildung 3.3 direkt mit den Ergebnissen der FEF-Messungen aus Abbildung 3.14 verglichen. Der direkte Vergleich wird ermöglicht, indem die durchschnittliche effektive Stufenhöhe von $k_1(t)$ durch die Querschnittsfläche der undeformierten Folie dividiert wird. Die auf diese Weise per FEF ermittelte nominelle Wickelspannung σ_2 der Folie auf der Palette wird in Abbildung 3.15 den per FPT bestimmten Werten für σ_2 gegenübergestellt.

Obwohl beide Kurvenscharen einander ähnlich sind, treten vor allem bei hohen Spannungen große Abweichungen auf. Diese Diskrepanz deutet darauf hin, dass der zugrundeliegende Streck-Wickelprozess nicht das volle Potenzial der Stretchfolie ausschöpfen kann. Eine mögliche Ursache hierfür soll im Folgenden erörtert werden.

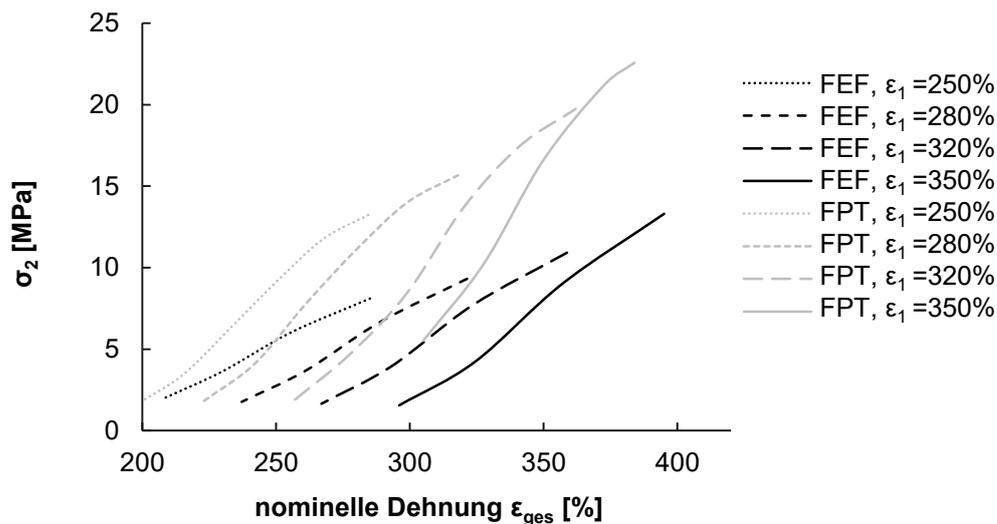


Abbildung 3.15: Spannungsniveau der Stretchfolie auf FPT und auf der Palette (FEF) in Abhängigkeit vom Wickelprozess

Wird die durchschnittliche maximale Stufenhöhe $\overline{H_{s,max}}$, wie sie in Abbildung 3.13 beispielhaft für einen Parametersatz dargestellt ist, für alle Parametersätze in Beziehung zur durchschnittlichen effektiven Höhe der Stufen $\overline{H_{s,eff}}$ gesetzt, kann ein mittlerer Korrekturfaktor von 1,8 für die FPT-Daten berechnet werden, der alle entsprechenden Messungen gut übereinstimmen lässt, wie Abbildung 3.16 darstellt.

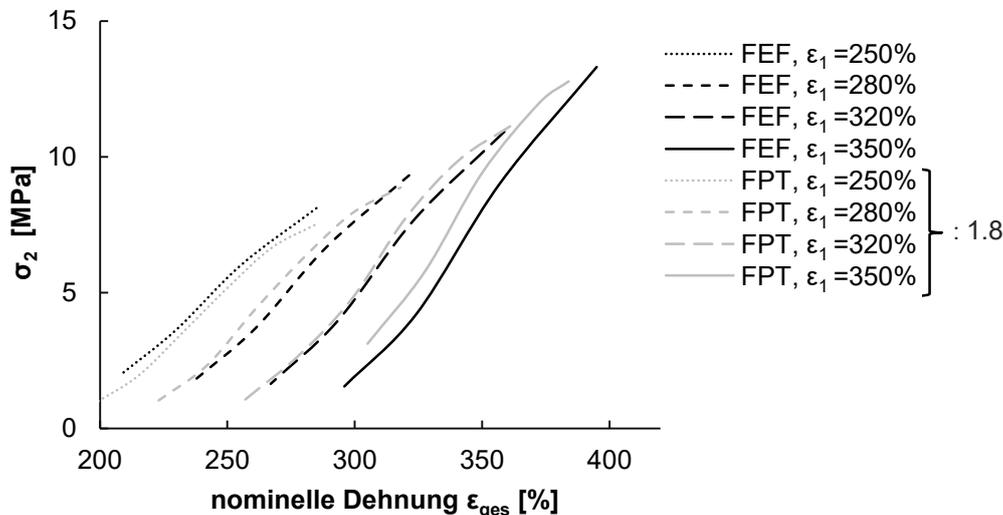


Abbildung 3.16: Spannungsniveau der Stretchfolie auf der Palette, Korrelation zwischen der Vorhersage basierend auf FPT-Daten und der FEF-Messung

Der gefundene Zusammenhang zwischen dem Kurvenverlauf von $k_1(t)$ und dem Verhältnis der per FPT und FEF gemessenen Spannungen σ_2 der Folie lässt einen Einfluss der Palettengeometrie und einen Einfluss der Maschinensteuerung auf das Ergebnis des Streck-Wickeln vermuten. Anders als beim FPT wird die Folie im Streck-Wickelprozess auf einem rechteckigen Körper abgelegt. Kapitel 2.2 erörtert die weitreichenden Folgen für den erforderlichen Geschwindigkeitsverlauf der Walzen im

Wickelkopf der Streck-Wickelmaschine, wenn der für F_W relevante Prozessparameter ε_2 während des Prozesses nicht variieren soll. Der ideale Verlauf der Geschwindigkeit der zweiten Walze des Wickelkopfes entspricht der erforderlichen Förderrate der Folie am Ausgang des Wickelkopfes. Diese Förderrate ist in Abbildung 3.17, in Abhängigkeit vom Winkel des rotierenden Armes einer Streck-Wickelmaschine dargestellt. Selbst wenn die Form dieses Geschwindigkeitsprofils hinreichend genau approximiert wird, stellen ein verzögernd ansprechender Regelkreis oder eine mit einem Winkelversatz von Δp fehlpositionierte Palette signifikante Störgrößen für die Regelung der Förderrate der Folie am Ausgang des Wickelkopfes dar.

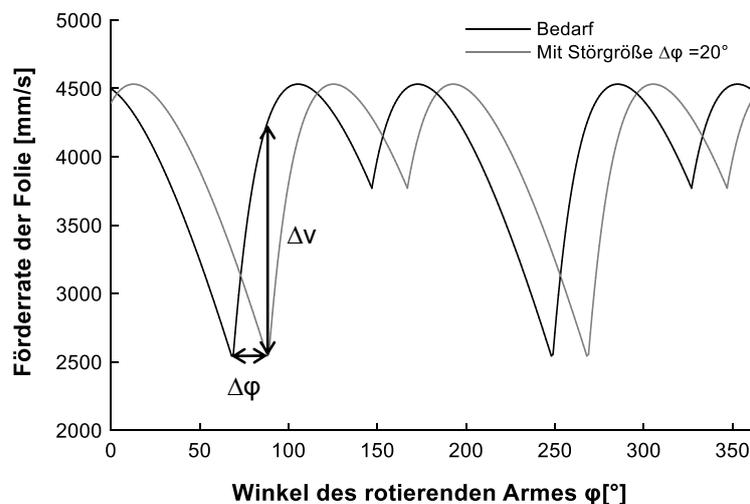


Abbildung 3.17: benötigtes Geschwindigkeitsprofil für das Umwickeln einer rechteckigen Palette mit konstanter Dehnung der Stretchfolie

Eine gleichermaßen signifikante Störgröße liegt in der Positionierung der Palette gegenüber dem Zentrum des Wickelkreises, wie Abbildung 3.18 darstellt.

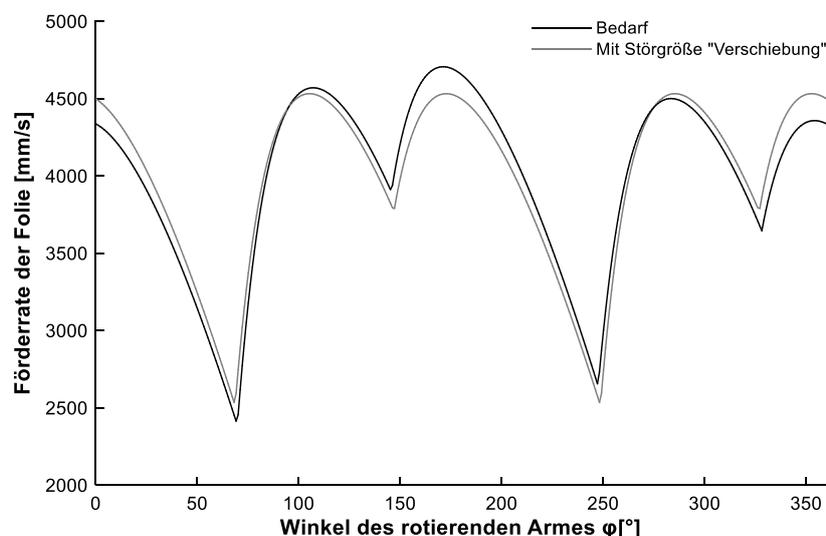


Abbildung 3.18: benötigtes amplitudenmoduliertes Geschwindigkeitsprofil für das gleichmäßige Umwickeln einer um 20 mm in beide Raumrichtungen verschobenen Palette

Die Konsequenz der in Abbildung 3.17 aufgezeigten Phasenverschiebung für die Kontaktkraft $k_1(t)$ ist in Abbildung 3.19 auf Basis einer vereinfachenden Berechnung verdeutlicht. Die Abweichung der Geschwindigkeitsprofile in Abbildung 3.17 resultiert in einer unerwünschten Abweichung $\Delta\varepsilon_2(t)$ der sekundären Dehnung $\varepsilon_2(t)$ von ihrem Mittelwert $\overline{\varepsilon_2(t)}$. Positive $\Delta\varepsilon_2(t)$, die ein „Überdehnen“ der Folie mit sich bringen, resultieren in den Überschwingern des Kraftverlaufes $k_1(t)$. Weil die Folie infolge des Überdehnens irreversibel deformiert wird, erzeugt sie nach einer anschließenden Entlastung $\overline{\varepsilon_2(t)}$ eine geringere Wickelkraft.

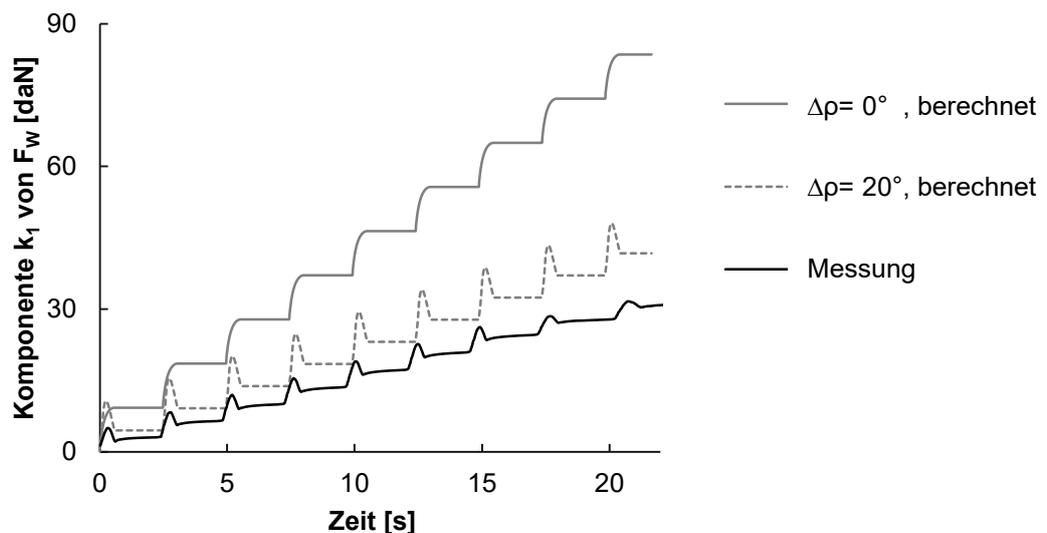


Abbildung 3.19: Entwicklung der Kantenkraft k_1 während des Streck-Wickelprozesses mit $\varepsilon_1=317\%$ und $\varepsilon_2 = -5,7\%$, berechnet und gemessen

Die Berechnung der Verläufe der Kontaktkraft $k_1(t)$ aus Abbildung 3.19 erfolgt mit einer in der kommerziell verfügbaren Software Matlab programmierten Routine. Mit Gleichung (2.2) berechnet der Algorithmus die ideale Förderrate und die Förderrate bei $\Delta\rho=20^\circ$. Der Quotient der Förderraten führt zum Verstreckgrad $\lambda_2(t)$ und zum Verlauf der sekundären Dehnung $\varepsilon_2(t)$. Mit der per FPT charakterisierten Abhängigkeit $\sigma_2(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ gelingt die abschätzende Berechnung von $k_1(t)$. Hierbei werden sowohl die geometrischen Gegebenheiten des Streck-Wickelns, wie in Abbildung 2.7 dargestellt, als auch die sich nach Gleichung (2.1) sprunghaft ändernde freie Länge des Folienabschnittes berücksichtigt.

Der Algorithmus reproduziert plausibel die gemessenen Überschwinger von $k_1(t)$. Das Ergebnis bestätigt, dass bereits eine geringe Phasenverschiebung in der Regelung der Foliengeschwindigkeit oder eine geringfügig vom Mittelpunkt abweichende Position der Palette einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung von $k_1(t)$ und in Konsequenz auf die gesamte Wickelkraft F_w haben können. Inwiefern das Potenzial

einer Stretchfolie ausgeschöpft werden kann, hängt demnach auch maßgeblich von der Streck-Wickelmaschine ab.

Diese Arbeit strebt eine Methode zur Vorhersage des Ergebnisses des Streck-Wickelprozesses auf Basis der per FPT durchgeführten mechanischen Charakterisierung der Stretchfolien an. Der gefundene Korrekturfaktor ($k_{\text{Prozess}} = 1,8$) begegnet den identifizierten Störeffekten und ermöglicht somit die Berechnung von $k_1(t_0)$ unmittelbar nach dem Streck-Wickelprozess. Es ist davon auszugehen, dass der gefundene Faktor vom Maschinentyp abhängt. Eine verlässliche Vorhersage für das Ergebnis, welches mit anderen Streckwickelmaschinen erzielt werden kann, bedarf demnach einer eigenen Untersuchung und Quantifizierung des in Abbildung 3.13 dargestellten und in Abbildung 3.19 erklärten Effektes. Darüber hinaus ist die in Abbildung 3.12 quantifizierte zeitliche Änderung der Wickelkraft in die Berechnung von $k_1(t)$ miteinzubeziehen.

Wegen der Vielzahl diskutierter Störeffekte für ε_2 und $k_1(t)$ wird ein Experiment durchgeführt, anhand dessen die angestrebte Vorhersage der Kontaktkraft validiert werden kann. Dazu wird eine handelsübliche Palette mit dem für diese Einheit üblichen Streck-Wickelprozess verpackt. Per FEF wird die lokale Verteilung der Kontaktkräfte $k_{1,i}(t)$ und $k_{2,i}(t)$ bis 20 Minuten nach Ende des Streck-Wickelprozesses gemessen. Abbildung 3.21 zeigt das Ergebnis des in Abbildung 3.20 dargestellten Messaufbaus.



Abbildung 3.20: Messung mit dem FEF-System

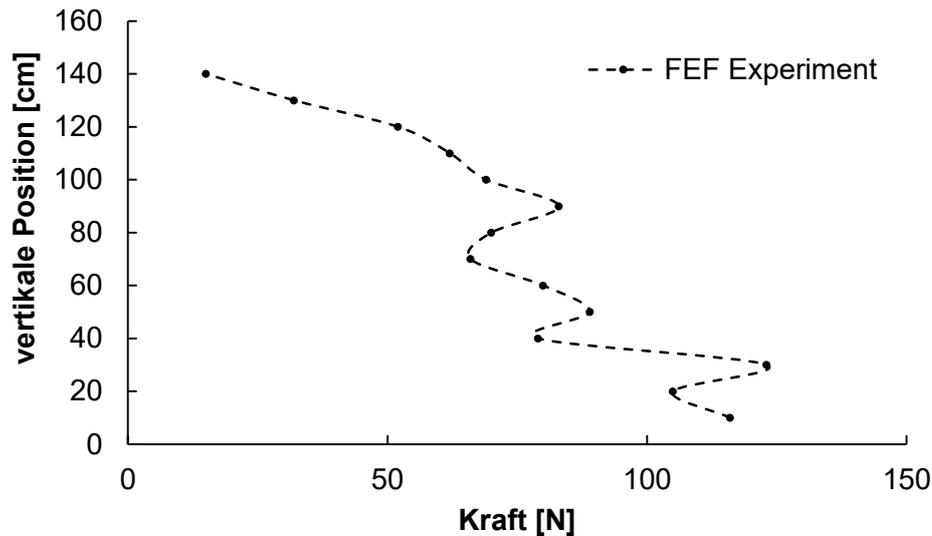


Abbildung 3.21: vertikale Verteilung der Komponente k_1 der Wickelkraft F_w

Mit zunehmender Höhe nehmen die Kontaktkräfte an der Kante der Palette ab, weil der übliche Prozess einen großen Teil der Folie auf den unteren Teil der Palette aufbringt, um die erste Schicht der Produkte mit dem Palettenträger zu verbinden. Weniger trivial als diese Erkenntnis ist die Vorhersage dieses Verlaufes sowie die Frage nach der Steifigkeit des aufgetragenen Folienpaketes und damit nach dem mechanischen Verhalten des Verpackungssystems beim Transport.

In Kapitel 4 entwickelt die vorliegende Arbeit eine Methode, das Ergebnis des Streck-Wickelprozesses mit numerischen Methoden vorherzusagen. Zu diesem Zweck wird ein konstitutives Modell für die Stretchfolie kalibriert und zusammen mit einem Modell, welches die Verteilung der Folie auf der Palette berechnet, auf den mit Abbildung 3.21 charakterisierten industriellen Prozess angewendet.

3.2 Mechanische Charakterisierung von Verpackungsstrukturen

Die mechanische Charakterisierung der Verpackungsstrukturen dient der Kalibrierung eines numerischen Modells zur Vorhersage der Formstabilität der gesamten Palette während des LKW-Transportes. Im Falle der PET-Getränkeflasche ist die Vorhersage des mechanischen Verhaltens basierend auf Prozesssimulationen des Streckblasformens möglich und in der Literatur beschrieben [5–10]. Der Einsatz von Struktursimulationen ist daher industrieller Standard in der Entwicklung von PET-Getränkeflaschen. Auch die Vorhersage des mechanischen Verhaltens von Wellpappe ist möglich und in der Literatur [56–58] beschrieben. Hingegen ist der Zusammenhang zwischen dem mechanischen Verhalten der Flasche, des sekundären Packs und der tertiären Verpackung mit der Formstabilität der Palette im LKW noch nicht hinreichend

bekannt. Deshalb beschreibt dieses Kapitel die mechanischen Eigenschaften des Kartoneinlegers, der Flasche und des Getränkepacks. Im Vordergrund stehen aber der Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften der Flasche und denjenigen des Getränkepacks sowie die Bedeutung des mechanischen Verhaltens des Getränkepacks für die Formstabilität der Palette.

3.2.1 Mechanisches Verhalten des Kartoneinlegers

Eine Übersicht zu den verschiedenen Typen der handelsüblichen Kartoneinleger ist in der Literatur gegeben [59]. Die für diese Arbeit verwendeten Kartoneinleger sind aus handelsüblicher Wellpappe des Typs „C-Welle“ gefertigt. Die mechanische Charakterisierung der Struktur erfolgt wie bei Aboura et. al. [57] unter der vereinfachten Annahme homogener mechanischer Eigenschaften. Die Geometrie des hierfür verwendeten und in Abbildung 3.22 dargestellten Probekörpers ist durch die Norm zur Bestimmung der Zugeigenschaften von Kunststoffen [60] inspiriert und entspricht den Probekörpern, die Aboura et. al. [57] für die mechanische Charakterisierung von Wellpappe nutzen.

Für uniaxiale Zugversuche werden die Probekörper sowohl in Maschinenrichtung, als auch quer dazu aus den Kartoneinlegern ausgeschnitten. Vor der Versuchsreihe werden die Proben einen Tag bei 23°C und 50% Luftfeuchte konditioniert. Die während der Versuche auftretenden Dehnungen werden mittels 3D-Bildkorrelation erfasst. Abbildung 3.22 stellt die mittlere gemessene Kraft über der gemessenen Dehnung für beide Versuchsreihen in einem Diagramm dar.

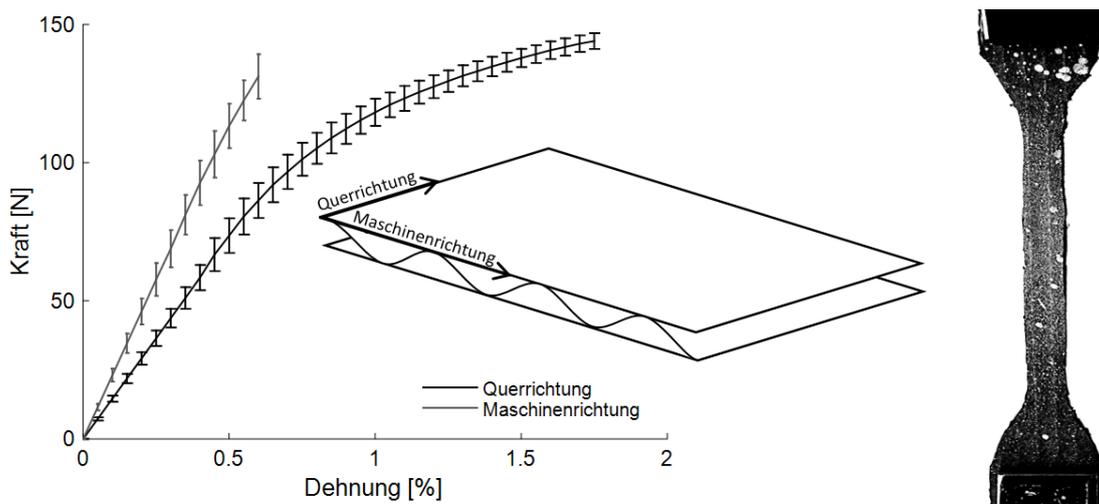


Abbildung 3.22: gemittelte Versuchsergebnisse der mechanischen Charakterisierung des Kartoneinlegers aus je fünf Versuchen in Quer- und in Maschinenrichtung

Bis zu einer Dehnung von 0.5% verformt sich die Wellpappe linear-elastisch. Darüber tritt in Maschinenrichtung ein Spröbruch auf, während in Querrichtung plastische Deformation und deshalb eine Bruchdehnung von über 1,6% zu beobachten ist. Diese ausgeprägte Nichtlinearität ist nach Allaoui et al. [61] darauf zurückzuführen, dass das mechanische Verhalten der Pappe von Wasserstoffbrückenbindungen bestimmt wird, die in Querrichtung stärker beansprucht werden. Die Querkontraktionszahl $\nu=0.27$ ergibt sich aus dem Verhältnis der Querdehnung zur negativen Längsdehnung als Mittelwert über alle Versuchsreihen. Weil die mechanische Antwort des Kartoneinlegers ausgeprägte lineare Anfangsbereiche zeigt, kommt im Rahmen dieser Arbeit ein transversalisotropes linear-elastisches Modell zum Einsatz. Die Vorteile und die Gültigkeit dieser Vereinfachung werden in Kapitel 4 diskutiert. Die aus den Versuchen ermittelten Materialparameter, die die Mechanik der als vereinfachend mechanisch homogen und linear-elastisch betrachteten Struktur repräsentieren, sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Parameter	E_1 (Maschinenrichtung)	E_2 (Querrichtung)	ν_{12}
Wert	397,42 MPa	258,2 MPa	0,27

Tabelle 3.2: Materialparameter für den Kartoneinleger unter der vereinfachenden Annahme homogener mechanischer Eigenschaften

Mit den Kurven in Abbildung 3.22 ergeben sich die Steifigkeiten E_i aus der Steigung der Sekanten zur Dehnung $\varepsilon = 0,5\%$, dividiert durch den Probenquerschnitt.

3.2.2 Mechanisches Verhalten der PET-Getränkeflasche

Die PET-Getränkeflasche wird ebenfalls als Bauteil der Palette aufgefasst. Im Hinblick auf die Formstabilität der Palette sind daher vorrangig die mechanischen Eigenschaften der mit dem Produkt, im vorliegenden Fall mit Wasser, gefüllten Flasche von Interesse. Entscheidend für die Stabilität der Palette ist die Reaktion der gefüllten Flasche auf mechanische Lasten, wie sie auch während eines LKW-Transportes auftreten können. Auf eine Flasche, die sich in einem Pack befindet, der auf der unteren Produktlage der Palette steht, wirkt einerseits die Gewichtskraft der darüber befindlichen Produkte. Andererseits treten beim Transport dynamische Belastungen durch Trägheitskräfte auf, die zusammen mit der durch die Stretchfolie eingebrachten Belastung auch in horizontaler Richtung auf die Flaschen einwirken.

Im Rahmen einer vom Autor dieser Arbeit betreuten Bachelorarbeit führt Fröstl [62] eine Versuchsreihe durch, in der Flaschen wie in Abbildung 3.23 axial und wie in

Abbildung 3.24 radial um jeweils 10 mm komprimiert werden. Für jeden Versuch wird eine fabrikneue Flasche verwendet. Während des Transportes zwischen Herstellungsort und Prüfmaschine werden die Flaschen weder auf einer Palette transportiert noch anderwärtig gestapelt oder belastet. Die Versuche werden unter Normalbedingungen durchgeführt.



Abbildung 3.23 aus Fröstl [62], einer vom Autor dieser Arbeit betreuten Bachelorarbeit:
Versuchsaufbau mit stehender Flasche



Abbildung 3.24 aus Fröstl [62], einer vom Autor dieser Arbeit betreuten Bachelorarbeit:
Versuchsaufbau mit liegender Flasche

Während die Flasche in den quasistatischen Versuchen mit einer Deformationsgeschwindigkeit von 1,5mm/s komprimiert wird, wird die Kraft an der oberen Traverse gemessen, die für die hervorgerufene Deformation nötig ist. Abbildung 3.25 und Abbildung 3.27 zeigen die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen. Dem progressiven Anstieg der Kraft während der Belastung der stehenden Flasche folgt bei 410N ein Plateau. Bei dieser vertikalen Kraft gibt der konkave Boden der Flasche dem wachsenden Innendruck nach und klappt wie ein bistabiles Federelement nach unten. Es folgt ein weiterer Kraftanstieg, bis sich der Griffbereich bei etwa 520N deformiert und bei etwa 630N der Flaschenhals abknickt. Häufig wird das Abknicken des Flaschenhalses von einer asymmetrischen Deformation des Griffbereiches der Flasche begleitet.

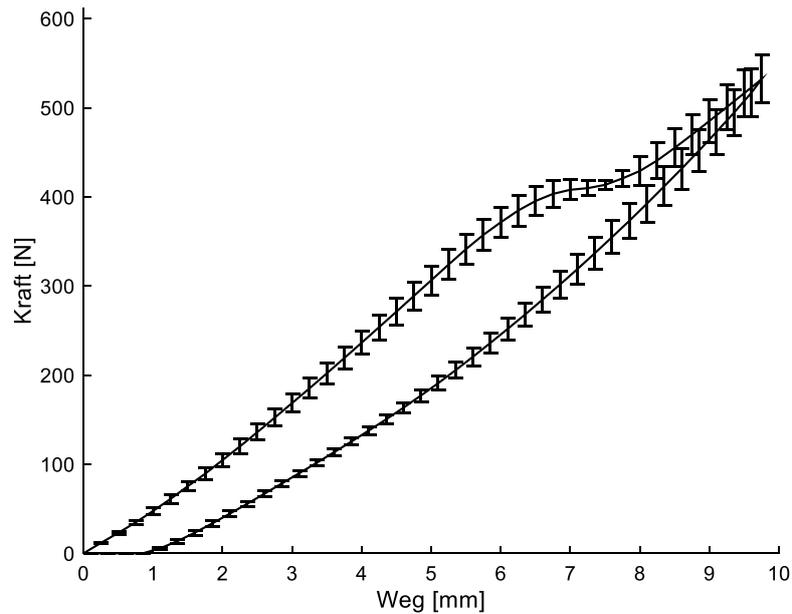


Abbildung 3.25 aus Fröstl [62], einer vom Autor dieser Arbeit betreuten Bachelorarbeit: Kraft-Weg Verlauf für den Versuch nach Abbildung 3.23

Die beiden lokalen Deformationen sind irreversibel, die Flasche kehrt danach nicht mehr in ihre ursprüngliche Form zurück. Anhand Abbildung 3.25 ist nachzuvollziehen, dass auch schon das Ausklappen des Flaschenbodens zu einer irreversiblen Deformation der Flasche von 1 mm führt. Kehrt der Flaschenboden nicht mehr in seine ursprüngliche Lage zurück, so verliert die Flasche ihre definierte Standfläche, steht dementsprechend schief oder gar nicht mehr. Mit einer Kraft von 410N ist folglich ein kritischer Grenzwert erreicht, der aus der geforderten Formtreue resultiert. Abbildung 3.26 stellt die beschriebenen Deformationsmuster dar.



Abbildung 3.26 aus Petrusch [63], einer vom Autor dieser Arbeit betreuten Masterarbeit: Charakteristische Versagensfälle der betrachteten PET-Getränkeflasche

Wird die Flasche, wie in Abbildung 3.24 dargestellt, radial belastet, kann die in Abbildung 3.27 dargestellte progressive Kraft-Weg-Kurve gemessen werden. Ein Versagen der Flaschen aufgrund einer zu hohen horizontalen Last tritt unter den Randbedingungen des hier gezeigten Versuches nicht auf.

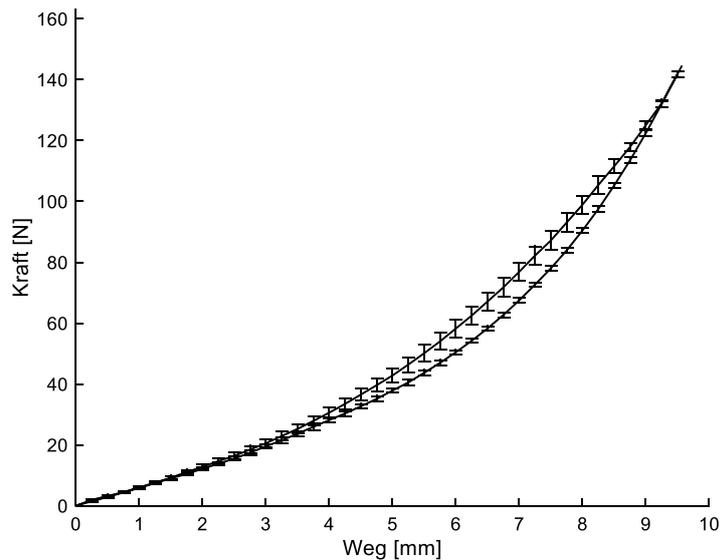


Abbildung 3.27 aus Fröstl [62], einer vom Autor dieser Arbeit betreuten Bachelorarbeit: Kraft-Weg-Verlauf für den Versuch nach Abbildung 3.24

Im LKW wird die PET-Flasche nicht nur durch quasistatische Lasten, sondern durch ein breitbandiges Beschleunigungssignal angeregt und darüber hinaus einem breiten Temperaturbereich ausgesetzt. Wie PE weist auch PET ein zeit- und temperaturabhängiges Werkstoffverhalten auf. Mit einer dynamisch-mechanisch-thermischen Analyse (DMTA) soll der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das Verhalten der PET-Flasche quantifiziert werden. Dazu wird die Flasche senkrecht in eine Prüfmaschine „ElectroPuls™ E10000 LinearTorsion“ der Firma Instron axial eingespannt und mit 100N statisch belastet. Ausgehend von der Deformation der Flasche bei der statischen Last von 100N wird eine Schwingung mit einer Amplitude von 0,2 mm angeregt. Die Flasche antwortet darauf mit einem schwingenden Kraftsignal, aus dem die komplexe Bauteilsteifigkeit k^* ausgewertet werden kann. Die Flasche ist von einer Klimakammer umgeben, sodass die Umgebungstemperatur variiert werden kann. Weil 1,5l Wasser temperiert werden müssen, wird die Umgebungstemperatur jeweils 30 Minuten gehalten, bevor die Flasche belastet und mit Frequenzen von 0.2 bis 20Hz angeregt wird. Die komplexe Bauteilsteifigkeit ist in Abbildung 3.28 in Abhängigkeit von der Temperatur der Flasche und des darin enthaltenen Wassers und in Abhängigkeit von der Frequenz der Anregung dargestellt.

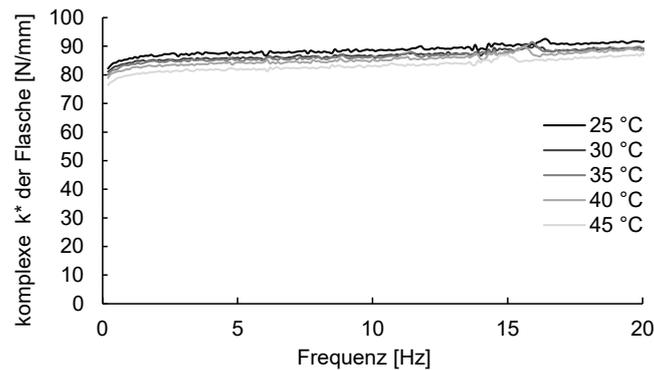


Abbildung 3.28: Ergebnis der DMTA der PET-Getränkeflasche

Die mechanische Antwort der PET-Flasche hängt wesentlich mit dem Druck in ihrem Inneren zusammen. Die axiale Belastung der Flasche und die daraus resultierende Deformation bewirken eine Änderung ihres Volumens. Mit sinkendem Volumen steigt der Druck im Inneren der Flasche. Dieser Druckanstieg wirkt der axialen Deformation entgegen. Diese Wechselwirkung tritt weitestgehend unabhängig von Belastungsfrequenz und Temperatur auf. Deshalb hängt k^* , wie in Abbildung 3.28 dargestellt, kaum von Temperatur und Frequenz ab. Aus den Daten der DMTA kann geschlossen werden, dass ein FE-Modell der PET-Flasche, welches mit quasistatischen Versuchen unter klimatischen Normalbedingungen kalibriert ist, seine Gültigkeit auch über diese Bedingungen hinaus nicht verliert.

3.2.3 Mechanisches Verhalten eines Getränkepacks

Die mechanische Charakterisierung der sekundären Verpackungseinheit erfolgt, analog zur Charakterisierung der Getränkeflasche, im Hinblick auf deren Verhalten als Bauteil der Palette. Im Fokus stehen dabei Lastfälle, die während des Transportes auch auf der Palette auftreten können. Im statischen Fall wirkt auf einen Six-Pack einerseits die Gewichtskraft der weiter oben gestapelten Packs. Andererseits wirken durch die Stretchfolie auch in horizontaler Richtung Kontaktkräfte auf den Pack ein. Während des Transportes werden diese Kräfte überlagert von Trägheitskräften, deren Richtung von der Richtung des Beschleunigungsvektors des Transportmittels abhängen. Der Gewichtskraft und den Trägheitskräften wirken Kontakt- und Reibkräfte entgegen. Die genannten Kräfte führen zu verschiedenen Lastfällen für einen Getränkepack, wenn dieser innerhalb einer Palette transportiert wird. Die Lastfälle sind in Tabelle 3.3 identifiziert und beschrieben. Außerdem beinhaltet Tabelle 3.3 Abbildungen von Versuchsaufbauten, die diese Lastfälle adressieren, und stellt die Versuchsergebnisse in Form von Kraft-Weg-Diagrammen dar. Fröstl [62] führt die Versuche im Rahmen einer vom Autor dieser Arbeit betreuten Bachelorarbeit durch.

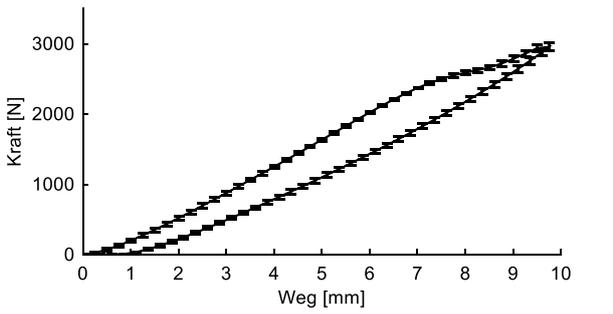
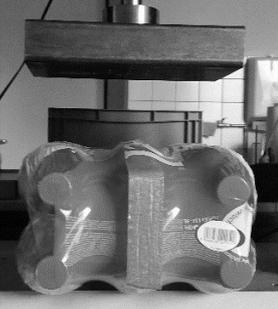
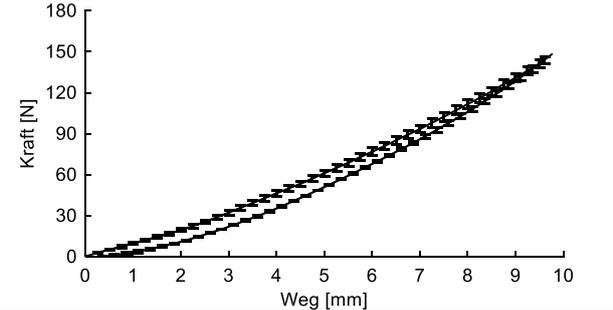
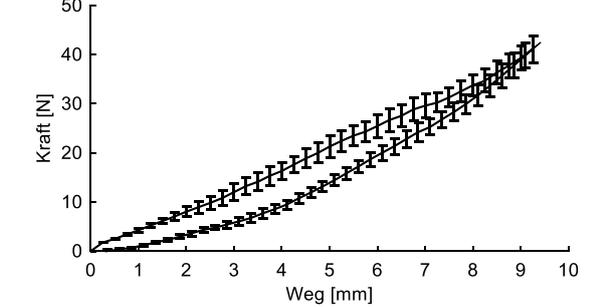
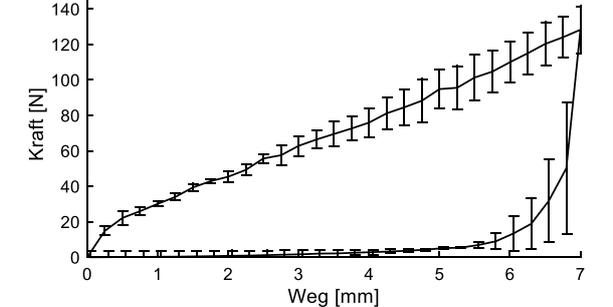
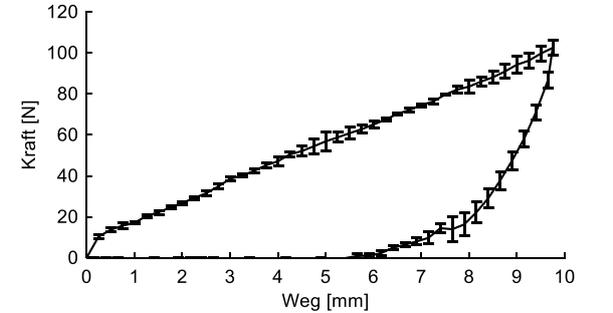
	Versuchsaufbau	Ergebnis
Lastfall 1 Uniaxiale Druckbelastung des stehenden Six-Packs.		
Lastfall 2 Uniaxiale Druckbelastung des auf drei Flaschen liegenden Six-Packs.		
Lastfall 3 Uniaxiale Druckbelastung des auf zwei Flaschen liegenden Six-Packs.		
Lastfall 4, Scherbelastung Zwei Flaschen werden gegen die verbleibenden, eingespannten Flaschen des Six- Packs abgeschert.		
Lastfall 5, Scherbelastung Drei Flaschen werden gegen die verbleibenden, eingespannten Flaschen des Six- Packs abgeschert.		

Tabelle 3.3: Charakterisierte Lastfälle aus Fröstl [62]

Die Lastfälle eins bis drei aus Tabelle 3.3 adressieren uniaxiale Druckbelastungen in verschiedene Richtungen, wie sie auch im statischen Fall auftreten können. Gegenüber einer senkrechten Belastung bietet der Pack, wie auch die einzelne Flasche, den größten mechanischen Widerstand. Im Gegensatz zu einem Kontinuum antwortet der Pack auf eine Komprimierung in eine Richtung nicht zwangsläufig mit einer Ausdehnung in die anderen beiden Raumrichtungen. Mit manuellen Messungen kann nachvollzogen werden, dass sich das den Pack umschließende Volumen maßgeblich verringert, wenn er komprimiert wird. Die Form der aufgezeichneten Kraft-Weg-Kurve gleicht deshalb der Kraft-Weg-Kurve einer einzelnen Flasche in Abbildung 3.25. Anhand Abbildung 3.29 kann das Versuchsergebnis für den Lastfall eins mit der Reaktion eines mechanischen Ersatzsystems aus sechs einzelnen Flaschen, berechnet mit den Werten aus Abbildung 3.25, verglichen werden. Mit dem Vergleich beider Kurven in Abbildung 3.29 kann bestätigt werden, dass die Mechanik des Packs für diesen Lastfall im Wesentlichen aus der Mechanik der Flasche hervorgeht.

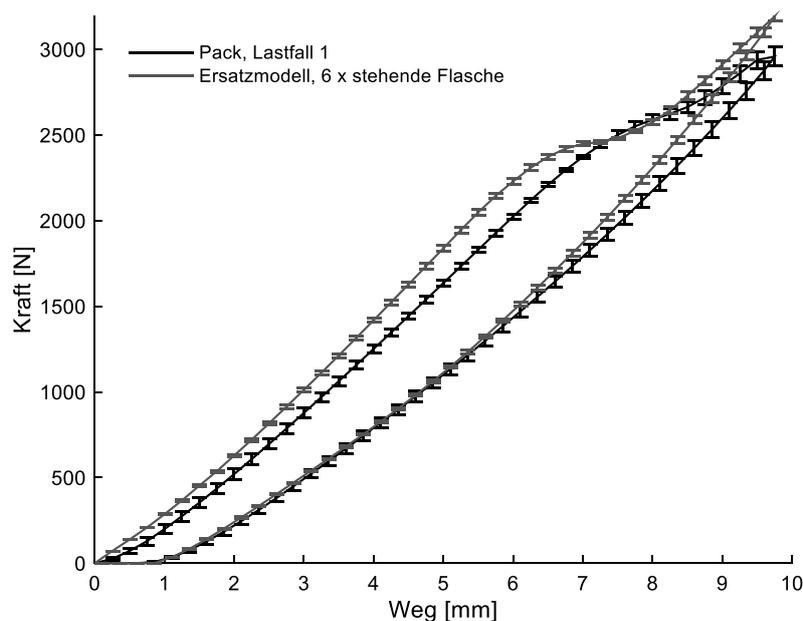


Abbildung 3.29: Vergleich des Ergebnisses des Experiments „Lastfall 1“ aus Tabelle 3.3 mit einem Ersatzmodell aus sechs stehenden Flaschen, berechnet aus den in Abbildung 3.25 dargestellten Messergebnissen

Der progressive Verlauf der zu den Lastfällen zwei bis drei gehörigen Kraft-Weg-Kurven weist ebenfalls Ähnlichkeit zu dem entsprechenden Versuchsergebnis für die einzelne Flasche in Abbildung 3.27 auf. Die Interpretation der Mechanik des Packs fällt auch hier leichter, wenn, wie in Abbildung 3.30 und Abbildung 3.31 dargestellt, die Reaktionen mechanischer Ersatzsysteme, berechnet aus der Reaktion einzelner Flaschen, betrachtet werden. Weil die Flaschen in den Lastfällen zwei und drei

übereinanderliegen, wird jeweils eine Kombination aus Reihen- und Parallelschaltungen ihrer Bauteilsteifigkeiten betrachtet.

Der Vergleich der Kurven in Abbildung 3.30 und in Abbildung 3.31 offenbart jedoch einen Unterschied, der auch unter Berücksichtigung des Eigengewichtes der Flaschen nicht verschwindet: Der Pack leistet sowohl für den Lastfall zwei als auch für den Lastfall drei weniger Widerstand als das mechanische Ersatzsystem aus sechs einzelnen Flaschen. Weil die Flaschen aufgrund ihrer zylindrischen Kontaktflächen einander ausweichen, kann aus den Messergebnissen für die Flasche nicht auf die Messergebnisse für die Lastfälle zwei und drei aus Tabelle 3.3 geschlossen werden.

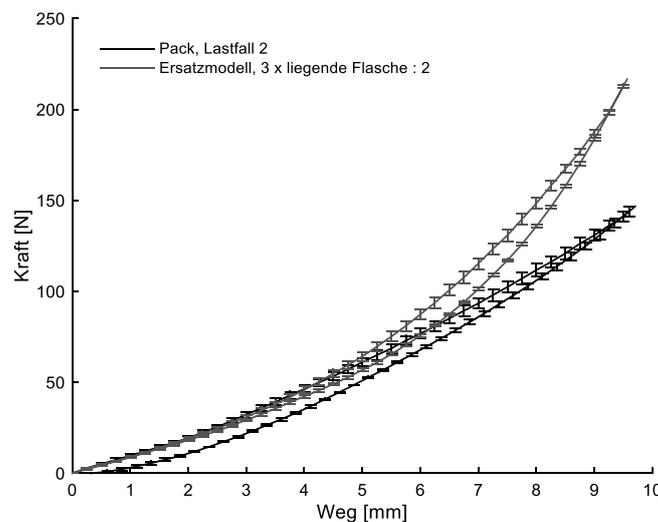


Abbildung 3.30: Vergleich des Ergebnisses des Experiments „Lastfall 2“ aus Tabelle 3.3 mit einem Ersatzmodell aus einer Reihenschaltung von drei liegenden Flaschen, berechnet aus den in Abbildung 3.27 dargestellten Messergebnissen

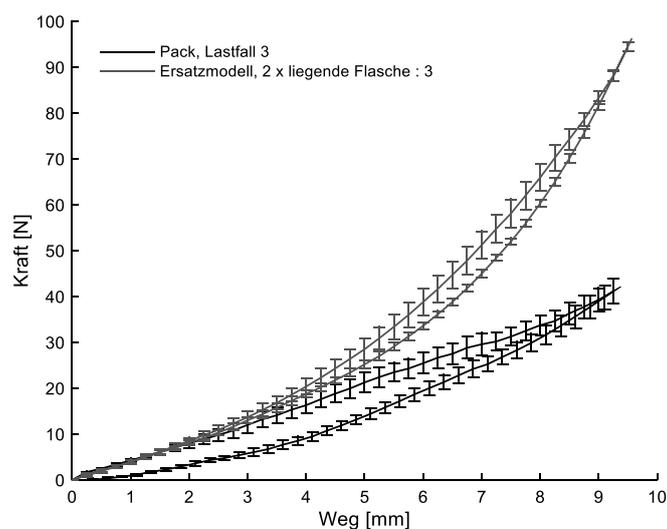


Abbildung 3.31: Vergleich des Ergebnisses des Experiments „Lastfall 3“ aus Tabelle 3.3 mit einem Ersatzmodell aus einer Reihenschaltung von zwei liegenden Flaschen, berechnet aus den in Abbildung 3.27 dargestellten Messergebnissen

Während des Transportes treten außerdem Lastfälle auf, bei denen die horizontalen Kräfte, die oben und unten an einem Pack angreifen, in einander entgegengesetzte Richtungen wirken. Hierdurch wird der Pack geschert. Solche Scher-Lastfälle treten beispielsweise im Falle von Brems- oder Lenkmanövern auf. Dieses Szenario ist durch die Lastfälle vier und fünf aus Tabelle 3.3 mit den dazugehörigen Versuchsaufbauten adressiert. Im Falle der uniaxialen Druckbelastung der Lastfälle eins bis drei verhält sich der Pack weitestgehend elastisch, eingebrachte Deformationen sind erst bei sehr hohen Kräften irreversibel. Im Gegensatz dazu treten unter den Lastfällen vier und fünf schon bei vergleichbar geringen Kräften signifikante plastische Deformationen des Verpackungssystems auf. Wenn während des Transportes der Palette den Lastfällen vier und fünf entsprechende Scherbelastungen auftreten, entsteht eine plastische Deformation des Packs, die sich auch in einer globalen plastischen Deformation der gesamten Palette äußern kann.

In Kapitel 4 entsteht eine Methode, die es ermöglicht, auf Basis der hier charakterisierten mechanischen Eigenschaften des Getränkepacks, der PE-Folie und des Kartoneinlegers die mechanischen Eigenschaften der Palette vorherzusagen.

Soll darüber hinaus auf Basis bekannter mechanischer Eigenschaften der Flasche eine Vorhersage für das mechanische Verhalten des Packs getroffen werden, so ist schon aufgrund des Geometrieinflusses der Flasche für die Lastfälle zwei und drei ein einfaches mechanisches Ersatzmodell nicht mehr hinreichend. Die Vorhersage der Antwort des Packs auf diese Lastfälle sowie auf die Lastfälle vier und fünf aus Tabelle 3.3 bedürfen eines komplexeren Modells des Packs. Fröstl [62] entwickelt im Rahmen einer vom Autor dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeit ein in der Entwicklungsabteilung von Nestlé Waters etabliertes FE-Modell der Flaschen sowie ein Modell der Schrumpffolie [64] weiter zu einem FE-Modell des Packs. Die Ergebnisse von Fröstl [62] werden in Kapitel 4 aufgegriffen, jedoch werden für die Kalibrierung des in Kapitel 4 entwickelten FE-Modells der gesamten Palette die in Tabelle 3.3 dargestellten experimentellen Ergebnisse herangezogen.

3.2.4 Tribologische Untersuchungen am Verpackungssystem

In der Produktion, genauer zwischen Palletiermaschine und Streck-Wickelmaschine, werden die auf Paletten gestapelten Getränkepacks auch ohne die stabilisierende Stretchfolie befördert. Das ist möglich, weil die im Verpackungssystem auftretenden Reibkräfte wesentlich zur mechanischen Kopplung von den auf der Palette benachbarten Verpackungsstrukturen beitragen. Diese Transportphase verdeutlicht die Signifikanz der tribologischen Eigenschaften sämtlicher Kontaktpaarungen auf der Palette für das mechanische Verhalten des Verpackungssystems. Im Rahmen einer vom Autor dieser Arbeit betreuten Projektarbeit [65] entsteht der in Abbildung 3.32 dargestellte Prüfstand. Der Prüfstand orientiert sich an der internationalen Norm DIN EN ISO 8295 [66] zur Bestimmung der Reibungskoeffizienten für Folien und Bahnen.

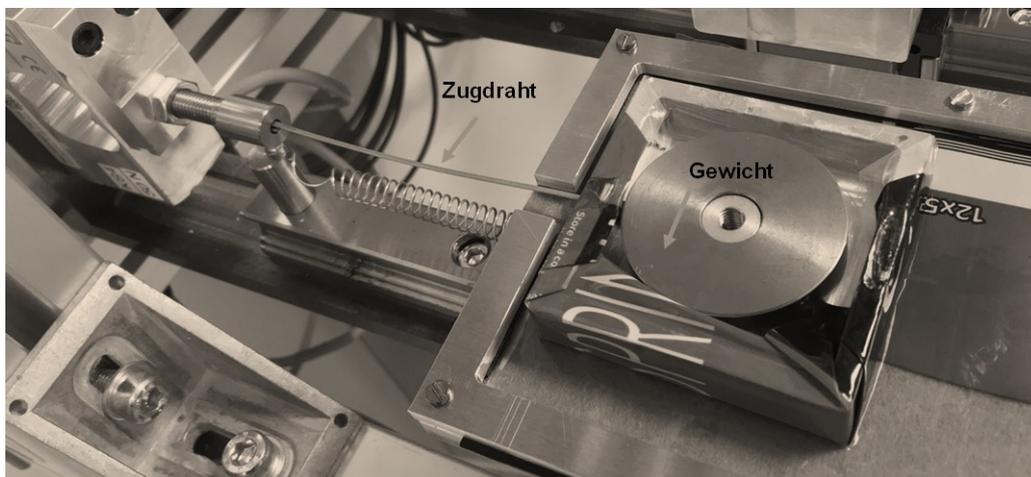


Abbildung 3.32: Prüfstand zur Bestimmung der Reibkoeffizienten nach DIN EN ISO 8295 [66]

Wie in der Norm beschrieben, können mit dem Prüfstand sowohl die statischen Reibkoeffizienten μ_s wie auch die dynamischen Reibkoeffizienten μ_D der relevanten Kontaktpaarungen ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst.

	Kontaktpartner 1	Kontaktpartner 2	$\mu_s \pm \sigma$	$\mu_D \pm \sigma$
Paarung 1	Schrumpffolie	Schrumpffolie	$0,67 \pm 0,07$	$0,45 \pm 0,03$
Paarung 2	Schrumpffolie	Papier	$0,34 \pm 0,03$	$0,27 \pm 0,01$
Paarung 3	Stretchfolie	Stretchfolie	> 1	> 1
Paarung 4	Stretchfolie	Schrumpffolie	> 1	> 1

Tabelle 3.4: Nach DIN EN ISO 8295 [66] gefundene statische Reibkoeffizienten und dynamische Reibkoeffizienten für die jeweiligen Kontaktpaarungen auf der Palette

Für die Paarungen drei und vier werden wegen der Beteiligung der Stretchfolie sehr hohe Reibkoeffizienten, deutlich über 1 gemessen. Weil hier ein Stick-Slip-Effekt auftritt, wird eine genauere Quantifizierung nicht vorgenommen. Die Paarung Holzpalette-Kartoneinleger wird nicht untersucht, weil sich die untersten Kartoneinleger, belastet durch das Gewicht der darauf gestapelten Produkte, an die raue Kontur der Holzplanken anpassen und somit auf der bepackten Palette praktisch nicht mehr verrutschen.

3.3 Analyse der Palettenstabilität unter Transportbedingungen

Aufgrund der Vielzahl an geometrischen Parametern, Materialparametern und Prozessparametern, die eine transportfertige Palette mit Getränkeflaschen definieren, führen diese selbst innerhalb der Randbedingungen einer vorgegebenen Verpackungsstrategie zu einer enormen Anzahl möglicher Verpackungskonzepte. Die Bewertung eines neuen Verpackungskonzeptes in Bezug auf dessen Formstabilität während des LKW-Transportes ist wiederum mit nicht unerheblichem experimentellen Aufwand verbunden. Das Blasformen und die manuelle Befüllung der Flaschen, die Herstellung der Packs und das manuelle Stapeln der Packs auf einer oder mehreren Paletten ist vergebliche Mühe, wenn der angestrebte Transporttest im LKW kein eindeutiges Ergebnis liefert. Das Risiko hierfür ist hoch, schließlich ist die Reproduzierbarkeit eines von Menschenhand gesteuerten Fahrmanövers begrenzt.

Dem beschriebenen Szenario kann begegnet werden, sobald eine repräsentative und zeitraffende Prüfmethode existiert, anhand derer die mechanische Reaktion einer Palette auf realistische, definierte Transportbelastungen unter kontrollierten Laborbedingungen anhand reproduzierbarer Tests untersucht werden kann. Eine derartige Prüfmethode wird in Kapitel 3.3.2 auf der Basis der Analyse von typischen Transportbelastungen (Kapitel 3.3.1) entwickelt.

Der experimentelle Aufwand kann weiter drastisch reduziert werden, wenn mit numerischen Methoden eine Vorhersage der Formstabilität der Palette in Bezug auf ihre Belastungen während des Transportes (künftig nur „Formstabilität“ oder „Palettenstabilität“) gelingt, und so eine Vorauswahl geeigneter Konzepte getroffen werden kann. Im Entwicklungsalltag sind (zugunsten des Aufwandes für die experimentelle Kalibrierung eines solche numerischen Modells und zugunsten der erforderlichen Rechenzeit) Vereinfachungen innerhalb der numerischen Methoden zu treffen, sodass bis auf Weiteres nicht auf eine experimentelle Verifikation der Stabilität

numerisch optimierter Verpackungskonzepte verzichtet werden kann. Deshalb wird die entwickelte Prüfmethode in Kapitel 3.3.3 auf das in der vorliegenden Arbeit beispielhaft diskutierte Verpackungskonzept angewendet, um die dynamisch-mechanischen Eigenschaften der Palette zu charakterisieren.

3.3.1 Charakterisierung der Transportbelastungen

Die mechanische Belastung der selbsttragenden Verpackungsstruktur resultiert aus deren Eigengewicht, aus dem Eigengewicht der enthaltenen Produkte sowie aus den Beschleunigungen, die auf das System einwirken. Weil die Intensität der Beschleunigung während des Transportes im LKW ihr Maximum erreicht, steht diese Zeitspanne im Fokus der vorliegenden Arbeit. Umwelteinflüsse, wie schwankende Temperaturen und die Luftfeuchtigkeit, können erheblichen Einfluss auf die Materialeigenschaften der verwendeten Verpackungsmaterialien und damit auf die mechanischen Eigenschaften der Palette haben. Jedoch können diese Störgrößen in Laborversuchen kontrolliert werden, sodass Zusammenhänge zwischen den mechanischen Eigenschaften der Verpackungsmaterialien und der Verpackungsstrukturen sowie der Palettenstabilität bei definierten klimatischen Bedingungen untersucht und optimiert werden können. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Entwicklung von Methoden, mit denen das dynamisch-mechanische Verhalten der Verpackungssysteme bei klimatischen Normalbedingungen analysiert und optimiert werden kann.

In der Literatur [67–72] findet sich eine Vielzahl an Daten zu den Beschleunigungen, die charakteristisch für die unterschiedlichsten Straßenbedingungen in verschiedenen LKW-Typen und LKW-Trailer-Typen sind und die an unterschiedliche Messpositionen erfasst wurden. Die deutsche Norm DIN 30786-2 enthält eine Datensammlung und gibt damit einen Überblick über die Vielfalt der im LKW auftretenden Beschleunigungen mit dem Hinweis, dass „...*die Werte nicht ausschließlich mittels genormter Messverfahren, d. h. entsprechend wissenschaftlich fundierter Kenntnisse, gewonnen wurden und auch nicht alle Einzelheiten und Ergebnisse in vollständiger Form bekannt sind*“ [68].

Die amerikanische Norm ASTM D 4169 [11] und deren internationales Pendant ISTA 3E 2016 [73] beschreiben die Beschleunigungen im LKW über ihre spektrale Leistungsdichte oberhalb einem Hertz. Über einen längeren Zeitraum anhaltende Beschleunigungen, beispielsweise verursacht durch Bremsungen oder Kurvenfahrten, werden hier nicht berücksichtigt. Auch wegen der Fokussierung dieser Normen auf die

hohen Frequenzbereiche kommen verbreitet [67–70] Messmethoden zum Einsatz, die Beschleunigungen niedriger Frequenz nicht erfassen.

Die Darstellung der Messergebnisse über ihre spektrale Leistungsdichte birgt ein weiteres Risiko für Fehleinschätzungen. In der spektralen Leistungsdichte geht die Information zeitlicher Abfolgen, der Spitzenwerte und der Häufigkeitsverteilung der Intensität verloren. Es kann also nicht beurteilt werden, ob ein Maximum der spektralen Leistungsdichte aus einigen wenigen, sehr intensiven Ereignissen oder aus einer gleichartigen, aber ständigen und weniger intensiven Anregung resultiert. Schon aufgrund des mechanischen Verhaltens der beteiligten Werkstoffe verhalten sich die Paletten nicht wie ein linear-zeitinvariantes System. Folglich sind Szenarien, die in ihrer spektralen Leistungsdichte äquivalent sind, nicht notwendigerweise auch in ihren Wirkungen auf das mechanisch nichtlineare Verpackungssystem gleich.

Bereits der Vergleich mit einer Fahrt im PKW rechtfertigt die Annahme, dass bedeutende Abweichungen der Anregung vom Mittelwert nach oben auftreten (beispielsweise durch Kurvenfahrten, Notbremsungen und Ausweichmanöver) und dass gerade diese extremen aber selten auftretenden Fahrmanöver einen maßgeblichen Einfluss auf das Wohlbefinden der Passagiere bzw. auf den Zustand der Ladung haben können.

Länger zurückliegende [71, 72] und aktuelle Studien [74, 75] bestätigen, dass das Beschleunigungssignal, welches während eines LKW-Transportes im Straßenverkehr auf dessen Auflieger gemessen werden kann, nicht stationär ist und dass dessen Intensitäten eine nicht-gaußförmige Wahrscheinlichkeitsverteilung aufweisen. Die Studien von Griffiths et al. [74] und Bonnin et al. [75] beschränken sich allerdings auf die Analyse vertikal auftretender Beschleunigungen oberhalb der Frequenz von einem Herz, wodurch die Wirkung starker Bremsungen und Lastwechsel vernachlässigt werden. Auch normierte Tests, wie in ASTM D 4169 [11], schlagen eine Anregung mit einem einzelnen Freiheitsgrad vor, obwohl das Verpackungssystem durch den realen Transport in allen sechs Freiheitsgraden angeregt wird [70].

Die Wirkungen von Rotationen, Quer- und Längsbeschleunigungen sowie von niederfrequenten vertikalen Beschleunigungen, beispielsweise hervorgerufen durch eine unebene, kurvige Fahrbahn, sollen im Rahmen der vorliegenden Analyse nicht ausgeschlossen werden. Außerdem sollen die Einflüsse der nach Griffiths et al. [74] auftretenden hohen Standardabweichungen des Transportbeschleunigungssignals auf den Zusammenhalt der Palette näher untersucht und berücksichtigt werden.

Deshalb ist trotz der aufgezeigten Verfügbarkeit von Messdaten in der Literatur der hohe experimentelle Aufwand von Transporttests auf der Straße dennoch erforderlich. Es ergibt sich jedoch der Vorteil, sowohl Typ des LKWs, des Trailers sowie die Position des Messsystems darin frei zu wählen. Insgesamt werden fünf Transporttests mit voll beladenen LKWs des Typs „Mercedes Benz Actros“ mit Trailern des Typs „Krone SD“ auf typischen Auslieferungswegen durchgeführt. Tabelle 3.5 fasst die wichtigsten Eckdaten der Transporttests zusammen.

Test Nr.:	Startort	Zielort	Strecke [km]	Fahrzeit [min]
1	Vittel, Fr	Worms, De	326	279
2	Vittel, Fr	Vittel, Fr	312	303
3	Valdisotto, It	Rom, It	709	519
4	Valdisotto, It	Genua, It	347	423

Tabelle 3.5: durchgeführte Transporttests

Der Transporttest eins aus Tabelle 3.5 dient neben der Erfassung des Beschleunigungssignals auf der Ladefläche auch einer ersten Einschätzung des dynamischen Verhaltens einer Palette während des Transportes.

Für den ersten und den zweiten Test erfolgt die Erfassung der Beschleunigungen mittels zweier piezoresistiver 3-Achs-Beschleunigungsaufnehmer mit einem Messbereich von $\pm 10g$. Ein Beschleunigungssensor wird auf dem Holzboden des LKW-Trailers verschraubt. Der zweite Beschleunigungssensor dient der Erfassung des dynamischen Verhaltens einer Palette während des Transporttests auf der Straße und wird deshalb oben auf der Palette befestigt. Weil die Position im LKW-Trailer einen entscheidenden Einfluss auf das gemessene Beschleunigungssignal hat [67] wird das Worst-Case-Szenario betrachtet und am hinteren Ende der Ladefläche gemessen. Abbildung 3.33 verdeutlicht die Ausrichtung der Sensoren im LKW.

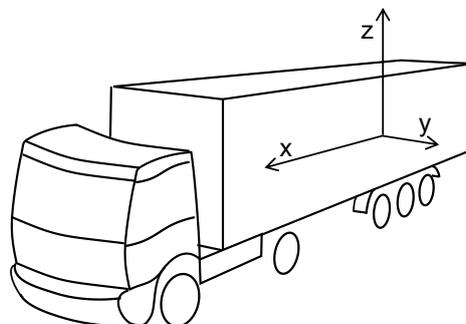


Abbildung 3.33: Ausrichtung der Beschleunigungssensoren im LKW

Für die Messungen während der Transporttests drei und vier aus Tabelle 3.5 wird lediglich auf der Ladefläche gemessen. Weil keine synchrone Datenerfassung erfolgen muss, kann zugunsten einer kompakteren Bauweise und einer einfacheren Handhabbarkeit im alltäglichen Betrieb der Datenlogger „innRecord“ des Herstellers Safeload mit kapazitivem Messprinzip und einem Messbereich von $\pm 6g$ zum Einsatz kommen. Da beide angewendeten Messprinzipien die Erfassung statischer und dynamischer Beschleunigungen ermöglichen, bestätigt sich die Vergleichbarkeit der gewonnenen Daten in Vorversuchen.

Beide Messsysteme erfassen Beschleunigungsdaten mit einer Abtastrate von 500Hz. Wegen der Messung in drei Raumrichtungen werden binnen einer Stunde 5,4 Millionen Datenpunkte generiert. Im Rahmen der Auswertung ist folglich eine Datenreduktion erforderlich, bei der möglichst wenig Information verloren gehen soll. Aus den oben genannten Gründen ist allein die spektrale Leistungsdichte für den Zweck dieser Arbeit nicht aussagekräftig genug.

Abbildung 3.34 zeigt das Ergebnis des ersten Schrittes der Auswertung aller Versuche am Beispiel des ersten Transporttests aus Tabelle 3.5. Die Berechnung des abgebildeten Histogramms erfolgt durch Unterteilung des Messsignals in Abschnitte von je einer Minute sowie durch Einordnung der für diese Minuten berechneten Intensitäten des Beschleunigungssignals in Klassen konstanter Breite. Hierbei ist die Intensität des Beschleunigungssignals im Sinne einer besseren Vergleichbarkeit mit vorhandenen Literaturdaten nicht in SI-Einheiten, sondern durch den gRMS-Wert dargestellt. Der gRms-Wert wird auf Basis des Verlaufs des Betrages des Beschleunigungsvektors binnen je einer Minute gebildet. Die im Histogramm dargestellten relativen Häufigkeiten beziehen sich auf die in Tabelle 3.5 aufgeführte Transportdauer. Außerdem stellt Abbildung 3.34 die kumulierten Anteile der Beschleunigungsintensitäten an der gesamten Transportdauer dar.

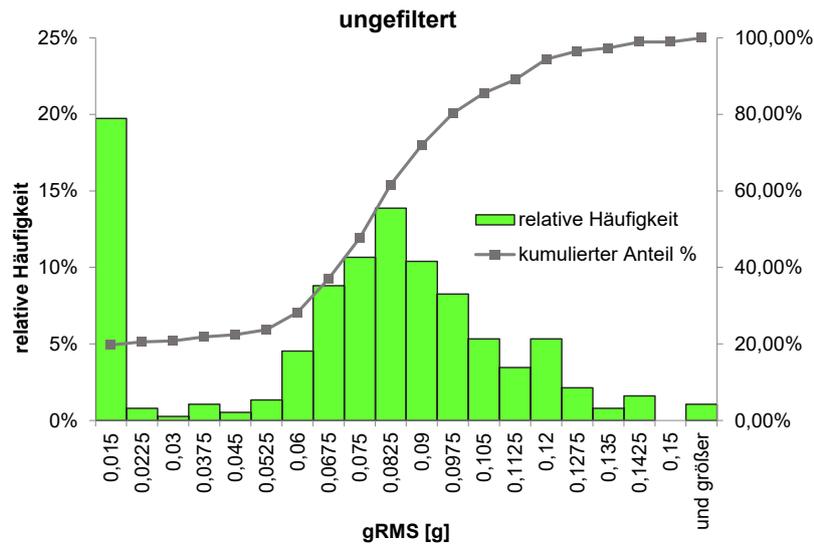


Abbildung 3.34: Histogramm der auf der Ladefläche auftretenden Intensitäten des Beschleunigungssignals aus dem Transporttest eins

Anhand des Histogramms sind Griffiths et al. [74] und Bonnin et al. [75] zu bestätigen. Die Intensitäten des Beschleunigungssignals treten mit einer linksschiefen, nicht-gaußförmigen Häufigkeitsverteilung auf. Binnen insgesamt 74 Minuten beziehungsweise während insgesamt 20% der Zeit des 375-minütigen Transportes liegt die Intensität des Beschleunigungssignals unterhalb 0,015gRMS. In diesen Minuten steht der LKW. Anhand des Histogramms kann demnach die reine Fahrzeit identifiziert werden. Auch unter Ausschluss sämtlicher Pausen und Stillstände ergibt sich keine gaußförmige Häufigkeitsverteilung. So liegt der Mittelwert der Intensität während der reinen Fahrzeit mit 0,0903gRMS deutlich oberhalb der zweithäufigsten Kategorie [0,075gRMS - 0,0825gRMS]. Grund dafür ist, dass 105 Minuten (38%) eine geringere Intensität aber 144 Minuten (52%) eine höhere Intensität aufweisen und dass gerade zu hohen Intensitäten hin „Ausreißer“ (>0,15 gRMS) beobachtbar sind. Mit Blick auf diese signifikanten Ausreißer werden die vier durchgeführten Transporttests nicht nur anhand der durchschnittlichen, sondern auch anhand der maximalen Intensität der während der reinen Fahrzeit auftretenden Fahrmanöver verglichen. Abbildung 3.35 stellt entsprechend die durchschnittlichen und die maximalen Intensitäten der während der vier Transporte aufgenommenen Beschleunigungssignale einander gegenüber. Die Messmethode mit 3-Achs-Beschleunigungsaufnehmern erlaubt hierbei die Auswertung des Beschleunigungssignals in Fahrtrichtung (X), quer zur Fahrtrichtung (Y) und vertikal zur Ladefläche (Z), wie in Abbildung 3.33 dargestellt.

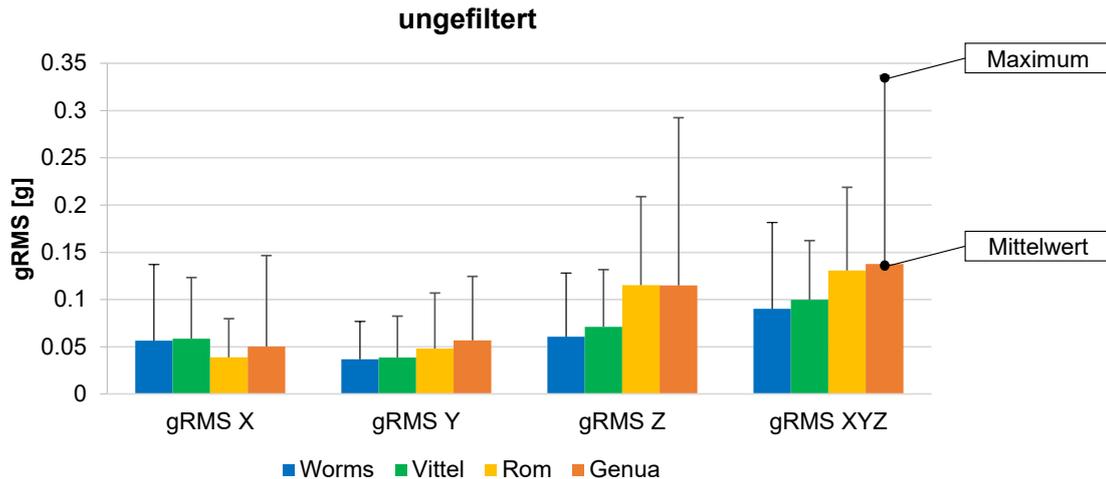


Abbildung 3.35: gemittelte und maximale Intensitäten der Beschleunigungssignale

Insgesamt fällt auf, dass die Intensitäten einiger Beschleunigungssignale das Dreifache des Mittelwertes erreichen. Transporte, die zu großen Teilen über italienische Straßen führen, rufen vertikal zur Ladefläche die höchsten gemessenen Intensitäten des Beschleunigungssignals hervor. Dennoch treten auch in Fahrtrichtung und in Querrichtung gegenüber der vertikalen Richtung signifikante Intensitäten des Beschleunigungssignals auf.

Der Vergleich der vier Transporttests rechtfertigt die Annahme, dass die Intensität des Beschleunigungssignals in vertikaler Richtung maßgeblich von der Beschaffenheit der Straße abhängt. In vertikaler Richtung können beispielsweise die durch Unebenheiten und Schlaglöcher hervorgerufenen Stöße ein breites Frequenzband anregen, sodass vertikal auf der Ladefläche auch hochfrequente Beschleunigungen auftreten. In Fahrt- oder in Querrichtung treten solche Stöße mit entsprechender Intensität nicht auf, weil beim Transport auf der Straße keine enge seitliche Führung wie beispielsweise auf der Schiene gegeben ist. Gerade innerhalb der Analyse der Quer- und Längsbeschleunigungen rücken deshalb die niedrigen Frequenzanteile des Beschleunigungssignals weiter in den Fokus.

Es bleibt zu untersuchen, welche Bedeutung den in der Literatur oft vernachlässigten niederfrequenten Komponenten des Beschleunigungssignals in Fahrt- und in Querrichtung zukommt. Dies zu analysieren erfordert die Aufteilung des Beschleunigungssignals in einen hochfrequenten und in einen niederfrequenten Anteil. Die Definition einer Frequenzweiche für die Beschleunigungssignale orientiert sich an folgendem Fahrmanöver, welches gerade noch dem niederfrequenten Anteil des Beschleunigungssignals zugeordnet werden soll: Ein LKW durchfährt einen

Kreisverkehr mittlerer Größe (Durchmesser 35m) zügig, mit einer Geschwindigkeit von durchschnittlich 30 Kilometern pro Stunde. Auf der Ladefläche entsteht dadurch ein näherungsweise sinusförmiger Verlauf der Querschleunigung mit einer Frequenz von etwa 0,15 Hz. Ein Tiefpassfilter wird mit einer Filterfrequenz von 0,16 Hz so gewählt, dass auch derartige, durch zügige Kurvenfahrten eingeleiteten Ausschläge im Signal erhalten bleiben, etwaige Vibrationen oder Stöße jedoch gefiltert werden. Abbildung 3.36 stellt die Intensitäten der tiefpassgefilterten Beschleunigungssignale den ungefilterten Beschleunigungssignalen aus Abbildung 3.35 gegenüber. Mit dem Vergleich wird deutlich, dass ein signifikanter Anteil der durchschnittlichen Intensität auf das enge Frequenzband zwischen 0 und 0,16Hz fällt. Setzt man die in Abbildung 3.36 dargestellten durchschnittlichen Intensitäten der tiefpassgefilterten kombinierten Beschleunigungssignale (gRMS XYZ) in Relation zu den entsprechenden ungefilterten Signalen, so ergibt sich, dass je nach Messkanal zwischen 25% und 50% der Intensität des ungefilterten Signals aus niederfrequenten Ereignissen resultieren. Demnach ist der niederfrequente Anteil der auf die Palette einwirkenden Beschleunigung nicht zu vernachlässigen, sofern dessen Wirkung auf das Systemverhalten der Palette signifikant ist.

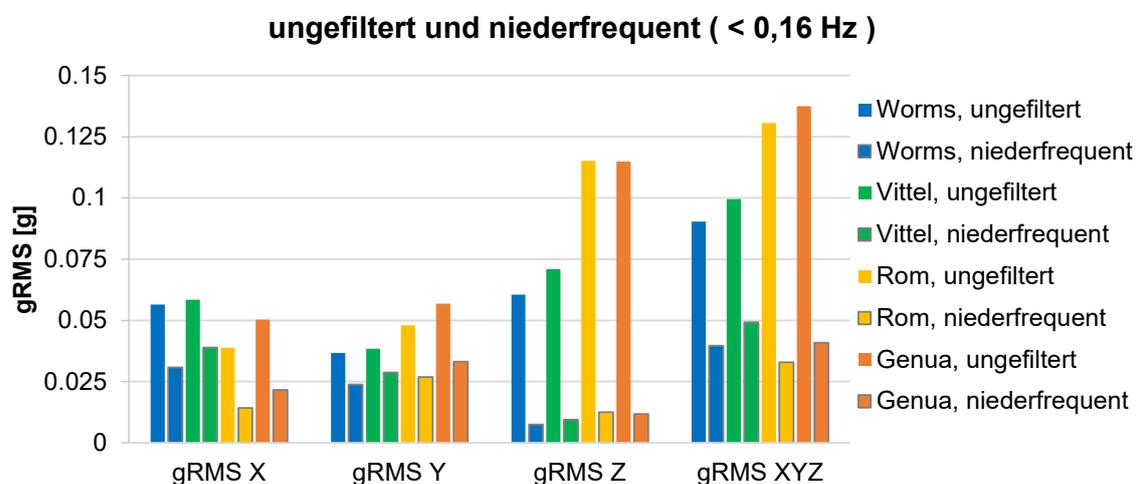


Abbildung 3.36: gemittelte Intensitäten der ungefilterten und der tiefpassgefilterten Beschleunigungssignale während der Transporttests eins bis vier

Anhand Abbildung 3.36 wird außerdem deutlich, dass signifikante niederfrequente Beschleunigungen im Wesentlichen auf Kurvenfahrten sowie auf Beschleunigungs- bzw. Bremsmanöver zurückzuführen sind. Die Maxima der Beschleunigungen sind in Abbildung 3.36 zugunsten der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Die Maxima der tiefpassgefilterten Signale nehmen aber, wie bei den ungefilterten Signalen, ein Vielfaches der dargestellten Mittelwerte an. Ebenso bestätigt sich die Annahme, dass

die hohen Intensitäten in vertikale Richtung auf hochfrequente Signalanteile und damit möglicherweise auf Straßenbedingungen, seien es Stöße oder ein rauher Untergrund, zurückzuführen sind.

Die relative Häufigkeit der während der gesamten Transportdauer auftretenden Beschleunigungsintensitäten sowie deren kumulierte Anteile sind auch im Rahmen der Analyse der niederfrequenten Anteile der Beschleunigungssignale aufschlussreich. Das in Abbildung 3.37 dargestellte Histogramm wurde analog zu Abbildung 3.34 auf Basis der Daten des ersten Transporttests, jedoch mit dem tiefpassgefilterten Beschleunigungssignal erstellt.

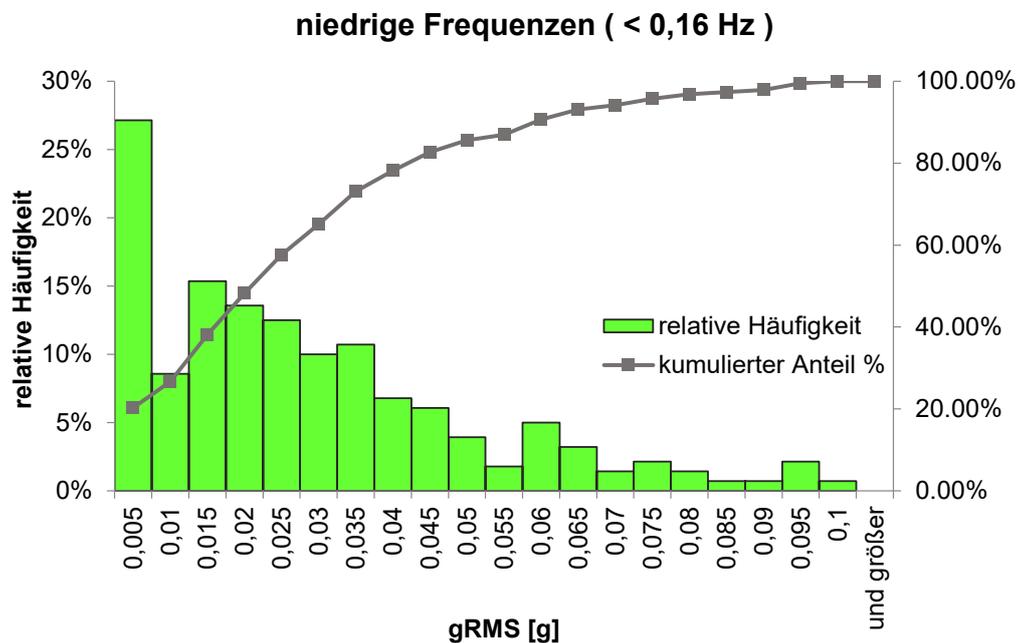


Abbildung 3.37: Histogramm der auf der Ladefläche auftretender Intensitäten des tiefpassgefilterten Beschleunigungssignals aus dem Transporttest eins

Die Form des Histogramms in Abbildung 3.37 verdeutlicht, dass intensive Quer- und Längsbeschleunigungen ($>0,05\text{gRMS}$) gerade im niedrigen Frequenzspektrum keine singulären Ereignisse, sondern vielmehr ein charakteristisches Merkmal eines durch Menschenhand geführten Transportes sind. Dieser wenig untersuchte Umstand spiegelt einen signifikanten Teil des Belastungsszenarios einer Palette während ihres Transports im LKW wieder. Deshalb bleibt anzunehmen, dass diese extremen Brems- und Lenkmanöver ($>0,05\text{gRMS}$) entsprechend signifikante Reaktionen der Palette hervorrufen. In den folgenden Kapiteln wird eine Prüfmethode entwickelt, die sowohl hochfrequente als auch niederfrequente Ereignisse hoher Intensität miteinbezieht, sodass die mechanische Reaktion der Palette umfassend charakterisiert werden kann.

3.3.2 Entwicklung einer zeitraffenden stationären Prüfmethode

Die in Kapitel 3.3.1 generierten Versuchsdaten stellen einen wesentlichen Teil der experimentellen Basis dar, auf der in diesem Kapitel eine Prüfmethode zur Bewertung und zum Vergleich verschiedener Verpackungskonzepte hinsichtlich ihrer Formstabilität während eines LKW-Transportes entwickelt wird. Nicht zuletzt hängt von der Formstabilität der Palette auch die Verkehrssicherheit des LKW ab. Gerade im Fall von Getränkepaletten ist der zusätzliche Einsatz von Ladungssicherungsmitteln wie z.B. Gurten unpraktisch und unüblich. Deshalb wird die Ladungssicherung hier meistens durch das Verpackungssystem selbst realisiert. Der Zweck der hier entwickelten Prüfmethode unterscheidet sich jedoch in einem wesentlichen Punkt von normierten Prüfmethoden [11–15] sowie von Kloneckis Arbeit zur Entwicklung einer Prüf- und Bewertungsmethodik für Ladungssicherungssysteme [76].

Primäres Ziel der vorliegenden Arbeit ist nicht die Verifikation der Ladungssicherheit, die auch maßgeblich vom Transportmittel abhängt und deren Anforderungen auf europäischer Ebene [4] definiert sind. Vielmehr liegt der Fokus hier auf der Optimierung der Paletten in Bezug auf ihre Formstabilität während des LKW-Transportes und auf der dazu notwendigen dynamisch-mechanischen Charakterisierung des Verpackungssystems. Weil auch relativ kleine Deformationen der Paletten zur Ablehnung einer gesamten LKW-Ladung durch den Kunden führen können, ist neben der Reaktion der Palette auf maximal intensive Fahrmanöver auch die Wirkung von weniger intensiven, aber dennoch signifikanten Fahrmanövern von Bedeutung. Damit zielgerichtet optimiert werden kann, sind die während eines Transportes auftretenden Beschleunigungen so zu approximieren, dass die Beanspruchung des Verpackungssystems auf einem stationären Prüfstand bei verkürzter Beanspruchungsdauer äquivalent zur Beanspruchung des Systems während eines intensiven Transportes im LKW bleibt. Außerdem sollen anhand der Prüfmethode auch kleine aber signifikante Stabilitätsunterschiede vergleichbarer Verpackungssysteme identifizierbar sein, um eine Optimierung erkennen zu können. In Kapitel 3.3.1 wurden sowohl Ereignisse mit niederfrequenten Beschleunigungssignalen hoher Intensität als auch Ereignisse mit intensiven hochfrequenten Beschleunigungssignalen als charakteristisch für LKW-Transporte und damit als potentiell schädigend für die Paletten identifiziert. Entscheidend ist, dass diese Ereignisse in ihrer Wirkung auf das Verpackungssystem reproduziert werden

können. Dafür soll die Palette mit transporttypischen Beschleunigungssignalen angeregt werden.

Die erreichbare Genauigkeit für die Reproduktion hochfrequenter Anteile des auf dem LKW gemessenen Beschleunigungssignals hängt auch mit wirtschaftlichen Randbedingungen zusammen. Prinzipiell eignen sich sowohl servoelektrische als auch hydraulische Aktuatoren, um die Palette anzuregen. Allerdings liegen die Kosten am Markt verfügbarer servoelektrischer Aktuatoren bei einem Bruchteil der Kosten für die hydraulisch betriebene Alternative mit entsprechendem Hub. Mit der kostengünstigeren Lösung geht allerdings eine Limitierung des Frequenzbandes einher, mit dem die Getränkepalette mit den einem intensiven Transport entsprechenden spektralen Leistungsdichten angeregt werden kann. Folglich richtet sich eine der wesentlichen Fragestellungen, die vor der Konstruktion oder der Anschaffung eines solchen Systems zu beantworten ist, auf den Frequenzbereich, mit dem die Palette anzuregen ist.

Anhand der Messungen mit einem zweiten Beschleunigungsaufnehmer während Transporttest eins (siehe Tabelle 3.5) kann die Systemantwort einer Palette analysiert werden. Die Messwerte des 3-Achs-Beschleunigungsaufnehmers, der mittig auf der oberen Lage der Produkte fixiert wird, geben im Vergleich mit den Messwerten des auf der Ladefläche montierten Sensors Aufschluss über das dynamische Systemverhalten der Palette während der intensivsten 60 Minuten des LKW-Transportes. Abbildung 3.38 stellt zusammenfassend die aus den Messdaten beider Sensoren ermittelte spektrale Leistungsdichte für das Beschleunigungssignal dar.

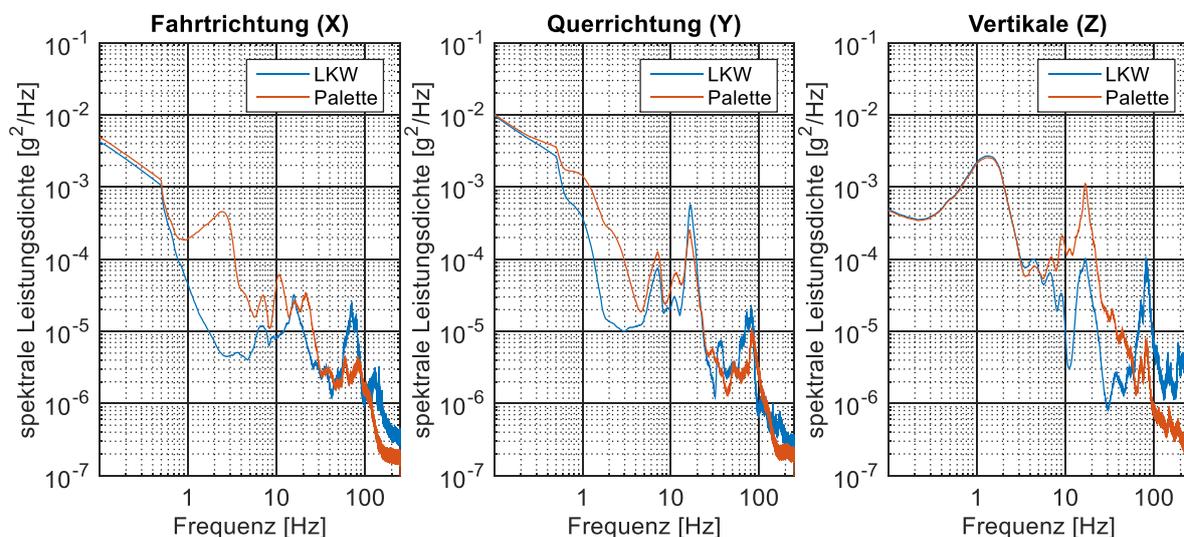


Abbildung 3.38: spektrale Leistungsdichte des Beschleunigungssignals auf dem LKW und auf der Palette während der intensivsten 60 Minuten des Transporttestes eins

Die Ausrichtung der beiden Sensoren im LKW entspricht der in Abbildung 3.33 dargestellten. Die spektralen Leistungsdichten, die auf der Ladefläche gemessen werden, weisen die beiden für den LKW-Transport typischen und in der Literatur [11, 15] dokumentierten Maxima auf. Aus der Tatsache, dass die bei 80Hz auftretenden Maxima der spektralen Leistungsdichten die Maxima bei niedrigeren Frequenzen nicht überschreiten, kann geschlossen werden, dass die hochfrequenten Schwingungen mit bedeutend kleineren mittleren Amplituden auftreten. Die Palette antwortet auf diese hochfrequenten Anregungen wegen der dämpfenden Wirkung der Wassermasse mit vernachlässigbar kleinen Leistungsdichten ($<10^{-5} \text{ g}^2/\text{Hz}$). Plausible Wirkungen der hochfrequenten Anregungen sind höchstens die in der Literatur [70] beobachteten Schadensbilder, die mit der lokalen Abrasion der Produkte, nicht aber mit der globalen Deformation der Palette in Zusammenhang stehen. Im Falle der Getränkepaletten stehen die in der Literatur [70] beobachteten lokalen Phänomene jedoch nicht im Vordergrund.

Ein weiteres Indiz dafür, dass der Schädigungseffekt der niederfrequenten Anregungen den Schädigungseffekt der hochfrequenten Anregungen überwiegt, ist ebenfalls anhand Abbildung 3.38 ersichtlich. Die Palette reagiert aufgrund des Resonanzverhaltens der schweren flexiblen Produkte verstärkt auf Anregungen niederer Frequenz. Folglich sind die Bewegungsamplituden der obersten Lage der Palette für niederfrequente Transportereignisse höher als die Amplitude, mit der sich die Ladefläche des LKW bewegt. Die resultierende globale Deformation der Produkte und der gesamten Palette steht eng in Zusammenhang mit den beobachteten Schadensfällen nach einem LKW-Transport. Das beobachtete dynamisch-mechanische Verhalten der Getränkepaletten rechtfertigt die Annahme, dass eine realistische Anregung in einem Frequenzband bis 50Hz genügt, um einen repräsentativen Transporttest durchführen zu können. Die Mehrkosten eines hydraulischen Systems gegenüber einem servoelektrischen System sind demnach nicht zu rechtfertigen.

Neben dem Frequenzbereich sind unter anderem die Grenzwerte bezüglich der realisierbaren Positionen, der Geschwindigkeiten und der Beschleunigungen der sechs Freiheitsgrade relevant für die Definition eines geeigneten Prüfstandes für die geplanten Transporttests im Labor. Lang andauernde niederfrequente Quer- und Längsbeschleunigung sind, den Gleichungen (3.13) und (3.14) folgend, durch Neigen um den Rollwinkel ϕ (um die Fahrzeuglängsachse) beziehungsweise durch Neigen um

den Nickwinkel Θ (um die Fahrzeugquerachse) zu reproduzieren. Diese Approximation ist notwendig, da der Prüfstand Ortsfest installiert werden soll und da eine theoretisch mögliche Installation auf Schienen den vorgesehenen finanziellen Rahmen sprengen würde.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{a_{y,Tp}}{a_{z,Tp}} \quad (3.13)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{-a_{x,Tp}}{9.81m/s^2} \quad (3.14)$$

In den Gleichungen (3.13) und (3.14) sind $a_{i,Tp}$ die tiefpassgefilterten Anteile der auf dem LKW gemessenen Beschleunigungskomponenten a_i . Die durch das Neigen nicht darstellbaren hochfrequenten Anteile $a_{i,Bp}$ des Beschleunigungssignals werden stattdessen durch eine transversale Bewegung des Prüftisches überlagert. Die im LKW gemessenen Beschleunigungssignale resultieren demnach in fünf Eingangssignalen für das Prüfsystem:

- im Rollwinkel ϕ
- im Nickwinkel Θ
- in den Erschütterungen in Fahrtrichtung $a_{x,Bp}$
- in den Erschütterungen in Querrichtung $a_{y,Bp}$
- in den Erschütterungen in vertikale Richtung $a_{z,Bp}$

Ein Schlingern bzw. Gieren des LKW wird nicht betrachtet, da diese Phänomene im Straßenverkehr nicht von Bedeutung sind. Das in Abbildung 3.39 dargestellte servoelektrisch angetriebene Hexapod-System kann die Getränkepaletten im Frequenzbereich von 0 bis 50Hz mit transportäquivalenten Beschleunigungssignalen anregen. Das Hexapod-System ist aus Sicherheitsgründen mit Barrieren ausgestattet, die ein Herabfallen der Palette verhindern. Abstand und Winkel der Barrieren zur getesteten Palette sind so gewählt, dass ein Kontakt mit der Palette erst stattfindet, wenn das Verpackungssystem vollständig versagt.

Die Eignung des gewählten Systems als LKW-Transportsimulator für Getränkepaletten wird im Rahmen der dynamisch-mechanischen Charakterisierung in Kapitel 3.3.3 anhand der auftretenden Schädigungsbilder der Palette validiert. Der vorliegende Abschnitt erörtert zunächst die Entwicklung der Prüfmethode.



Abbildung 3.39: Hexapod System für den Transporttest von Getränkepaletten, Abbildung aus einer Masterarbeit der Arbeitsgruppe [63]

Damit während der Prüfung der Paletten auf dem Hexapod möglichst realistische Beschleunigungen auf das Verpackungssystem wirken, wird ein Testzyklus definiert, der direkt auf den Messungen während des Straßentransportes basiert und die intensivsten auf der Ladefläche gemessenen Beschleunigungssignale reproduziert. Zu diesem Zweck werden jeweils drei Minuten des Transportes eins herangezogen, die in Fahrtrichtung, in Querrichtung und in vertikaler Richtung des LKW oder in Kombination der Richtungen die höchsten Intensitäten aufweisen. Aus den zwölf ausgewählten Minuten können zehn voneinander verschiedene Minuten zu einer Testsequenz kombiniert werden. Diese zehnmütige Sequenz wird unter Anwendung von Gleichung (3.13) und Gleichung (3.14) auf den Hexapod übertragen. Die Testsequenz bewirkt eine Konditionierung der Paletten mit signifikanten transporttypischen Belastungen.

Mit der Prüfmethode soll auch innerhalb solcher Paletten, die diese Konditionierungsphase unbeschadet überstehen, eine Rangfolge gebildet werden können. Deshalb ist es erforderlich, noch intensivere Fahrmanöver zu simulieren. Weil lediglich die Fahrdynamik des Sattelzuges die Beschleunigungen limitiert, die während eines unfallfreien Transportes auftreten können, finden Referenzmessungen im LKW sicherheitshalber auf einem abgesperrten Flughafengelände statt. Im Rahmen dieser „Flugplatztests“ durchfährt ein mit Getränkepaletten beladener LKW mehrfach mit sukzessiv steigenden Geschwindigkeiten den in Abbildung 3.40 dargestellten Parcours.



Abbildung 3.40: Parcours des Flugplatztests, Bilder und Kartendaten © 2018, Google

Nach jedem Durchgang wird der Zustand der Paletten dokumentiert. Bei einer Geschwindigkeit von 45km/h lässt sich der Sattelzug nicht mehr fehlerfrei durch den Parcours steuern. Darüber hinaus brechen die Holzplanken des Aufliegers, weil sie die Paletten bei solchen extremen Kurvenfahrten nicht mehr stützen können. Mit diesem Durchgang wurde der fahrdynamische Grenzbereich des Sattelzuges überschritten. Deshalb dient der vorangehende Durchgang bei 40km/h als Referenz für die Prüfung der Paletten auf dem Hexapod. Das hierbei ermittelte Beschleunigungssignal ist in Abbildung 3.41 dargestellt.

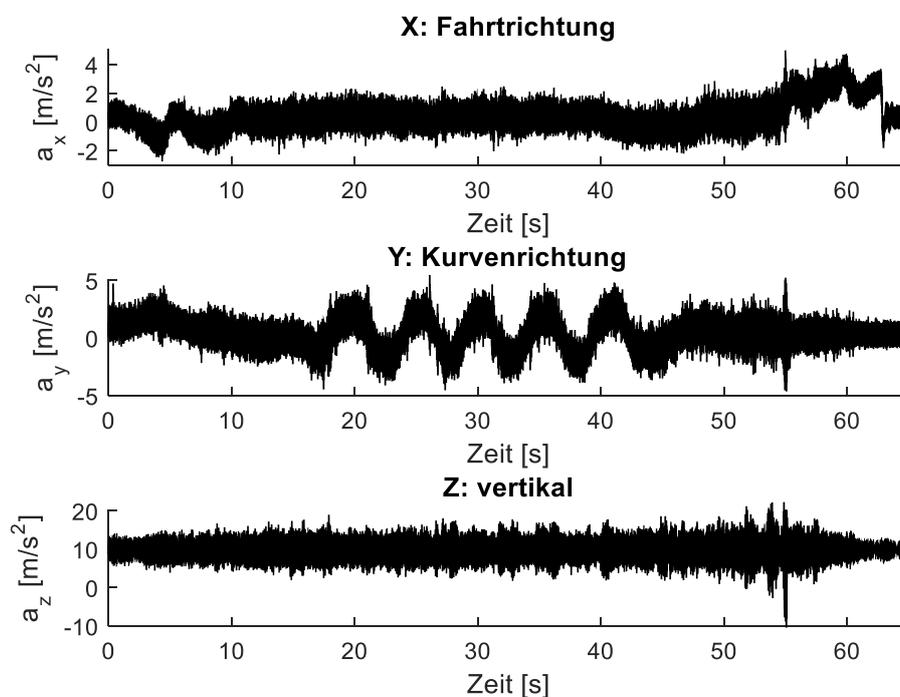


Abbildung 3.41: Beschleunigungssignal auf der Ladefläche des LKW während des Flugplatztests bei 40km/h

Die im LKW gemessenen Beschleunigungssignale werden auf den Hexapod übertragen, indem der bei 0.16Hz tiefpassgefilterte Anteil $a_{i,Tp}$ des gemessenen Beschleunigungssignals $[a_x, a_y, a_z]$ nach den Formeln (3.13) und (3.14) durch Rotationen um den Massenschwerpunkt der Palette angenähert wird. Die zwischen 0.16 und 40Hz bandpassgefilterten Komponenten $a_{i,Bp}$ von $[a_x, a_y, a_z]$ werden durch transversale Verschiebungen der Plattform nachgebildet. Das aus dem Flugplatztest resultierende Eingangssignal für den Transportsimulator ist in Abbildung 3.42 dargestellt.

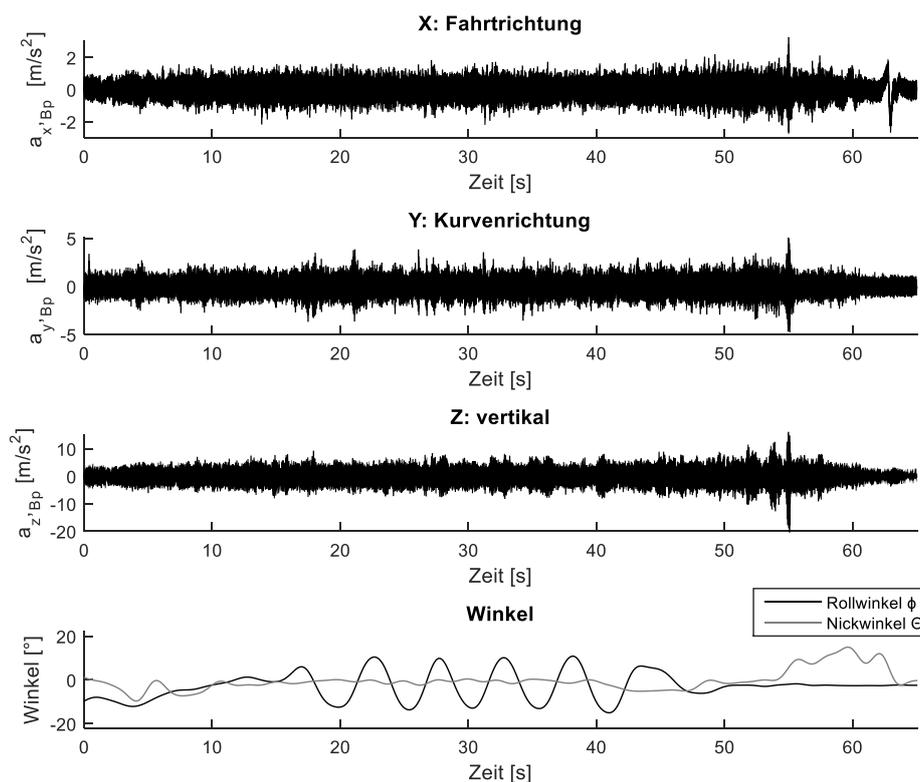


Abbildung 3.42: Eingangssignal für den Hexapod, basierend auf dem Signal aus Abbildung 3.41

Damit im industriellen Alltag möglichst effizient eine Rangfolge verschiedener Verpackungsstrategien bezüglich ihrer Stabilität ermittelt werden kann, kann der Flugplatztest über einen Skalierungsfaktor S_n für die Eingangssignale in n verschiedenen Intensitätsstufen abgespielt werden. Der gesamte Testzyklus ist in Abbildung 3.43 schematisch dargestellt.

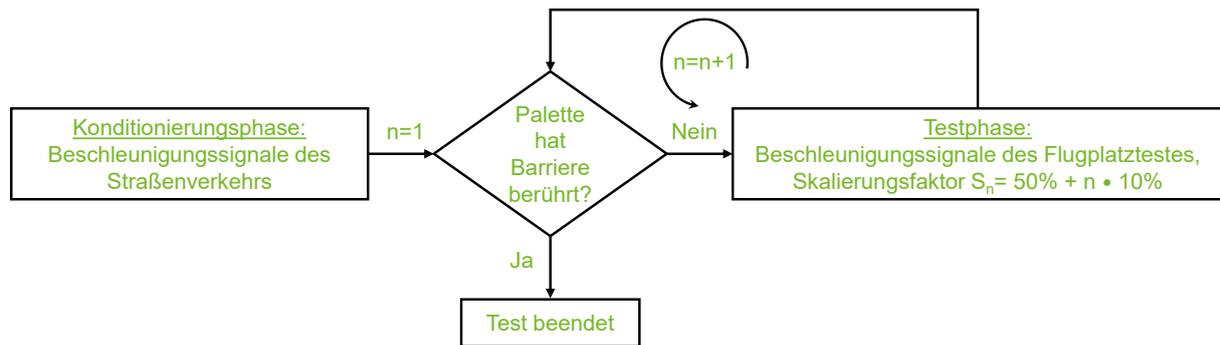


Abbildung 3.43: schematische Darstellung des Testzyklus der entwickelten Prüfmethode

3.3.3 Dynamisch-mechanische Charakterisierung der Palette

Das dynamisch-mechanische Verhalten des gesamten Verpackungssystems hat nicht nur im Fall von Getränkeflaschen Einfluss auf Art und Ausmaß von Belastungen, die auf die transportierten Produkte wirken und diese potenziell schädigen. Das in Kapitel 4 entwickelte FE-Modell der Palette eignet sich zur Analyse von lokal auftretenden Belastungen und der daraus resultierenden irreversiblen lokalen Deformationen. Über die Möglichkeit lokal überhöhter Beanspruchung einzelner Produkte hinaus steht das dynamisch-mechanische Verhalten der Paletten eng in Zusammenhang mit dem weitaus häufigeren Reklamationsgrund, nämlich einer für automatisierte Warenhäuser unzulässig hohen globalen Deformation der gesamten Palette. Deshalb steht die globale Deformation des gesamten Verpackungssystems im Vordergrund der dynamisch-mechanischen Analyse.

Petrausch konzipiert im Rahmen seiner vom Autor der vorliegenden Arbeit betreuten Masterarbeit [63] ein Messsystem, mit dem die Deformation der Palette während des Testzyklus verfolgt werden kann. Wie Abbildung 3.44 zeigt, werden je vier optische Sensoren auf zwei im rechten Winkel zueinander liegenden Seiten der Palette dazu genutzt, die Bewegung der verschiedenen Produktlagen zu quantifizieren.

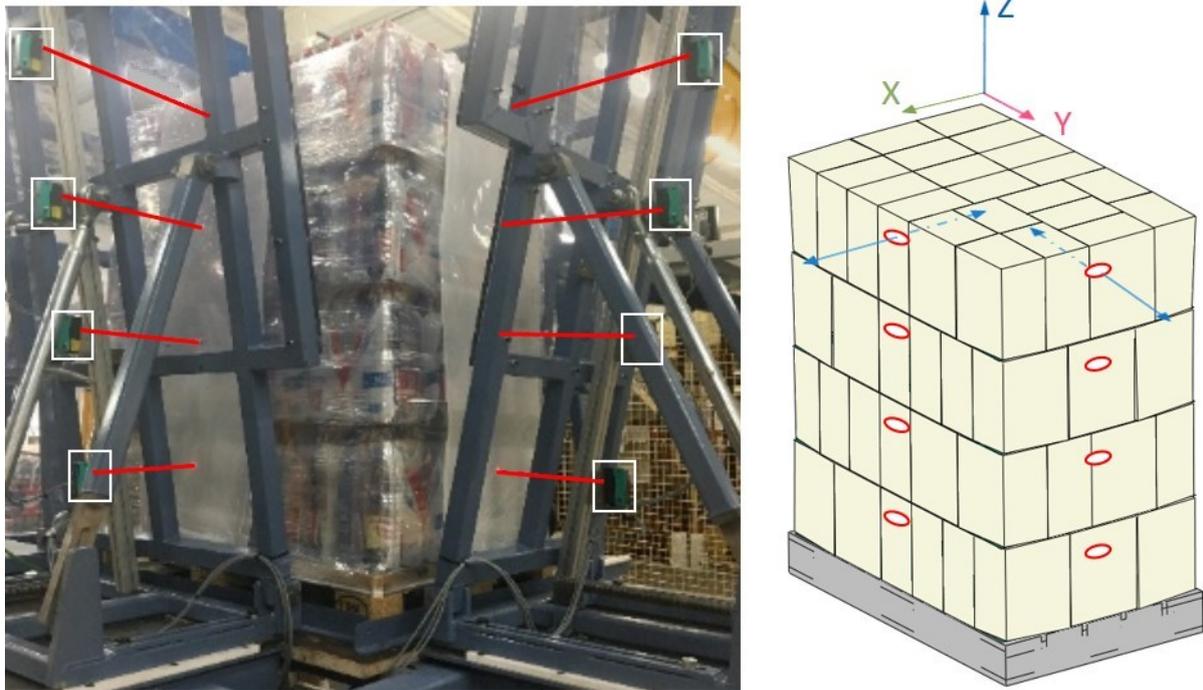


Abbildung 3.44 aus Petrausch [63], links: optische Sensoren, hervorgehoben durch weiße Kästen sowie durch den angedeuteten Laserstrahl, rechts: Skizze der Messpositionen auf der Palette.

Die in der europäischen Richtlinie 2014/47 [4] referenzierte Prüfmethode [14] der EUMOS definiert maximale Deformationen der Palette, die nach einem kurzen Intervall mit konstanter Beschleunigung vorliegen dürfen. Diese Prüfmethode ist jedoch nur bedingt geeignet für die zielgerichtete Optimierung der Verpackungssysteme aus Kunststoff, weil durch sie dynamisch-zyklische Ereignisse sowie die Akkumulation von plastischer Deformation oder Schädigungen nicht adressiert werden.

Die im vorangegangenen Kapitel 3.3.2 entwickelte Prüfmethode ermöglicht hingegen eine umfassende dynamisch-mechanische Charakterisierung zum Zweck einer zielgerichteten Optimierung des Verpackungssystems unter Berücksichtigung des voraussichtlich nichtlinearen und zeitlich varianten Systemverhaltens. Zu Beginn des Testzyklus wird für jeden optischen Sensor der Wert seines initialen horizontalen Abstandes zur Palette erfasst. So kann die Verschiebung der Produkte der verschiedenen Lagen während des Testzyklus mit einer Abtastrate von einem Kilohertz ausgewertet und dadurch die Deformation der gesamten Palette erfasst werden. Abbildung 3.45 zeigt die Deformation der Palette während der Konditionierungsphase anhand der Verschiebung der Produkte der obersten Lage in Fahrtrichtung (X) und in Querrichtung (Y) im bewegten Koordinatensystem der Testplattform.

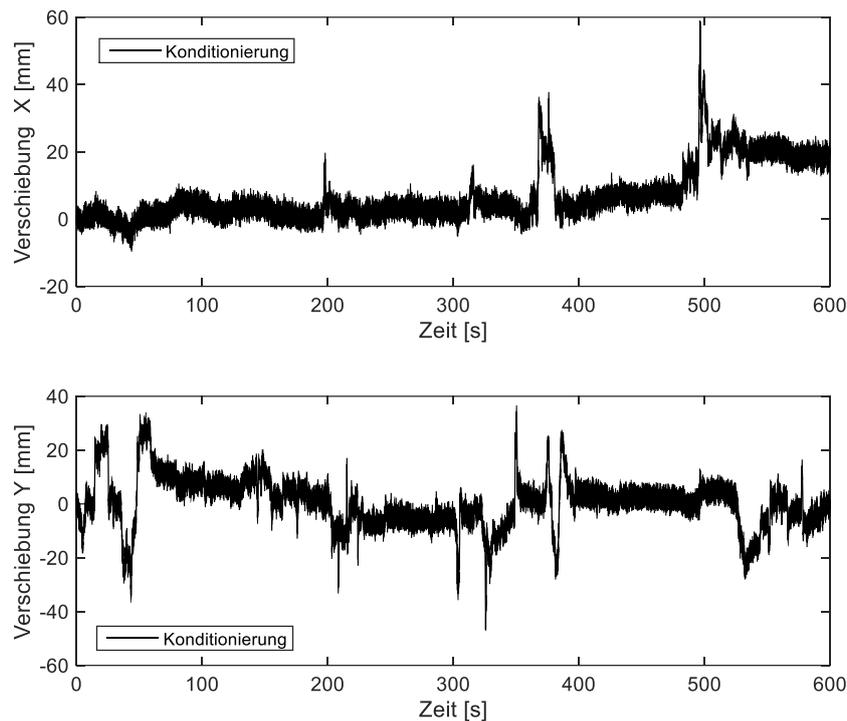


Abbildung 3.45: Deformation der Palette während der Konditionierungsphase anhand der Verschiebung der Produkte der obersten Lage in Fahrtrichtung (X) und Querrichtung (Y) im Koordinatensystem der Testplattform

Auf der Höhe $h_4=1375$ mm der Palette, auf der sich die beiden oberen Sensoren befinden, neigt sich das Verpackungssystem während der Konditionierungsphase aufgrund einer simulierten Bremsung zum Zeitpunkt $t=497$ s um maximal 57 mm. In Fahrtrichtung entsteht erst durch diese Belastung eine signifikante globale plastische Deformation der Palette von 20 mm. In Querrichtung (Y) neigt sich die Palette in entsprechender Höhe $h_4=1375$ mm um maximal 47 mm. Am Ende der Konditionierungsphase ist allerdings keine signifikante Deformation der Palette in Querrichtung messbar.

Die Annahme, dass vor allem niederfrequente Anteile des Beschleunigungssignals eines Transportes maßgebliche globale Deformationen der Getränkepalette hervorrufen, kann anhand Abbildung 3.45 noch nicht zweifelsfrei bestätigt werden. Insgesamt führen die ständig vorhandenen Erschütterungen zwar nicht zu einer signifikanten Formänderung, allerdings ist dem Ereignis, welches die bleibende Deformation in Fahrtrichtung nach ca. 500 s hervorruft, anhand Abbildung 3.45 kein Frequenzspektrum zuzuordnen. Dies gelingt jedoch mit Interpretation von Abbildung 3.46. Hier ist die Wirkung des Bremsmanövers aus Abbildung 3.45 im Detail dargestellt. Anhand der Dauer von mehreren Sekunden ist das Bremsmanöver mit seiner signifikanten Wirkung als niederfrequentes Ereignis identifiziert.

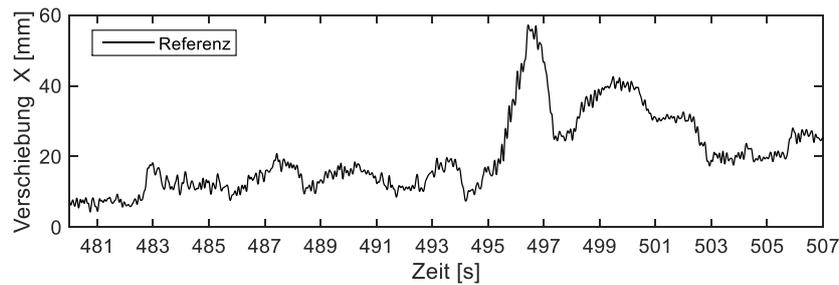


Abbildung 3.46: Deformation der Palette während eines binnen der Konditionierungsphase reproduzierten Bremsmanövers

Die Palette erfährt mit der Konditionierungsphase die intensivsten Minuten eines realen Transportes. Anders als beim LKW-Transport wirken die Beschleunigungen hier auf eine freistehende Palette, die sich nicht wie im LKW an andere Paletten oder an die Begrenzung der Ladefläche anlehnt. Dennoch haben sich die Produkte insgesamt um nicht mehr als 20 mm verschoben. Deshalb würde diese Palette auch von Kunden akzeptiert, die beispielsweise wegen automatisierter Lagerhäuser hohe Qualitätsansprüche stellen. Entscheidend ist in diesem Fall, dass die Produkte nicht mehr als 50 mm über den Rand der hölzernen Palette hinausragen [47]. Die Beobachtung eines akzeptablen Zustands der getesteten Palette ist in Einklang mit dem üblichen Zustand der Ladung nach dem Transport auf der Straße, dem die Konditionierungsphase nachempfunden ist. Deshalb wird die Palette dem in Abbildung 3.43 dargestellten Testzyklus folgend mit einem Beschleunigungssignal belastet, welches die während des Flugplatztestes gemessenen Beschleunigungen, multipliziert mit $S_1=50\%$, approximiert. Der in Abbildung 3.43 formulierten Abbruchbedingung entsprechend wird der Test so lange mit einem um jeweils 10% erhöhten Skalierungsfaktor S_n für das zu reproduzierende Beschleunigungssignal wiederholt, bis die Palette während des Tests die Barrieren des Hexapod (vgl. Abbildung 3.44) berührt. Dies ist bei $S_4=80\%$ der Fall.

Abbildung 3.47 zeigt die Deformation der Palette während der Testphase anhand der Verschiebung der Produkte der obersten Lage in Fahrtrichtung (X) und Querrichtung (Y) im Koordinatensystem der Testplattform. Die während der vier Testphasen beobachtbare Deformation der Palette steigt erwartungsgemäß mit der Intensität der Anregung. Auf die Reproduktion der Slalomfahrten antwortet die Palette jeweils mit einer oszillierenden Deformation quer zur Fahrtrichtung. Entsprechend bewirken die Bremsmanöver, dass sich die Palette in Fahrtrichtung neigt. Die oberste Lage der Produkte wird während der dritten Testphase ($S_3=70\%$) gegenüber der Holzpalette um bis zu 58 mm in Querrichtung und um bis zu 132 mm in Fahrtrichtung ausgelenkt.

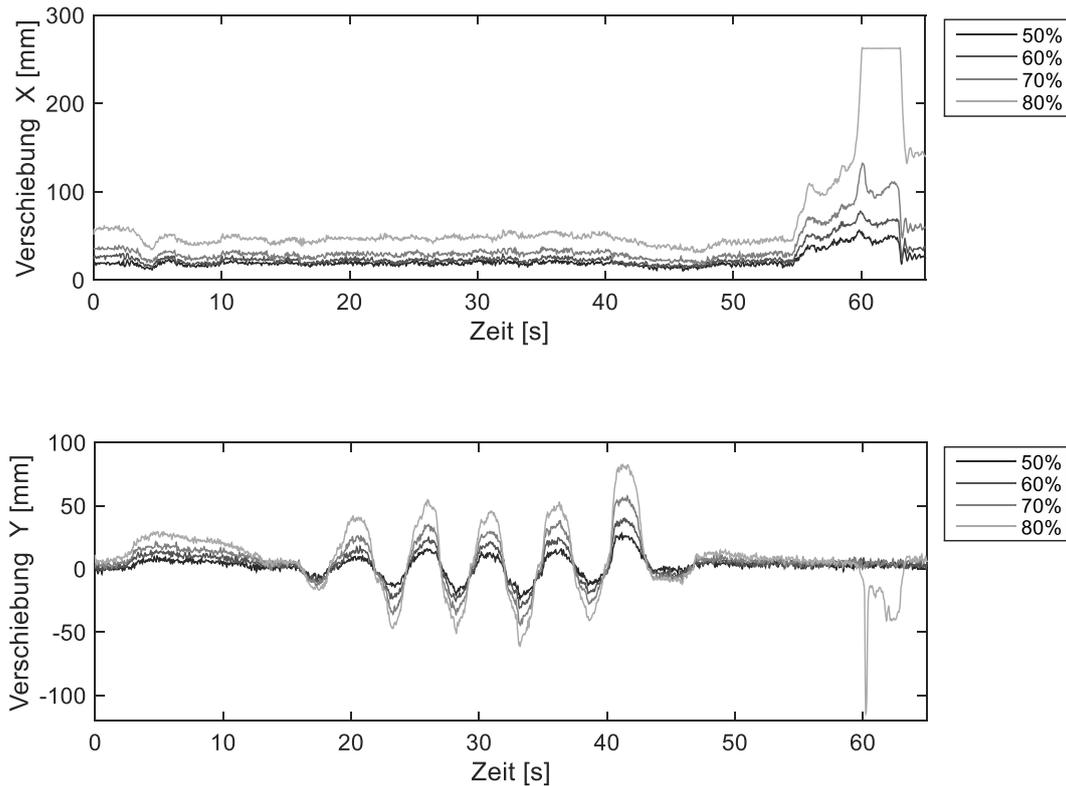


Abbildung 3.47: Deformation der Palette während der Testphase anhand der Verschiebung der Produkte der obersten Lage in Fahrtrichtung (X) und Querrichtung (Y) im Koordinatensystem der Testplattform

Die mit jeder Testphase sukzessiv wachsende plastische Deformation des gesamten Verpackungssystems ist in Abbildung 3.48 dargestellt. Nach der dritten Testphase ($S_3=70\%$) bleibt die oberste Lage der Palette um 59 mm in Fahrtrichtung und um 6.5 mm in Querrichtung ausgelenkt. Der kritische Grenzwert für eine bleibende Deformation liegt für Kunden mit automatischen Warenhäusern bei 50mm. Dieser Wert ist an dieser Stelle bereits überschritten. Allerdings sind über die plastische Deformation hinaus keine signifikanten Schäden am Verpackungssystem sichtbar.

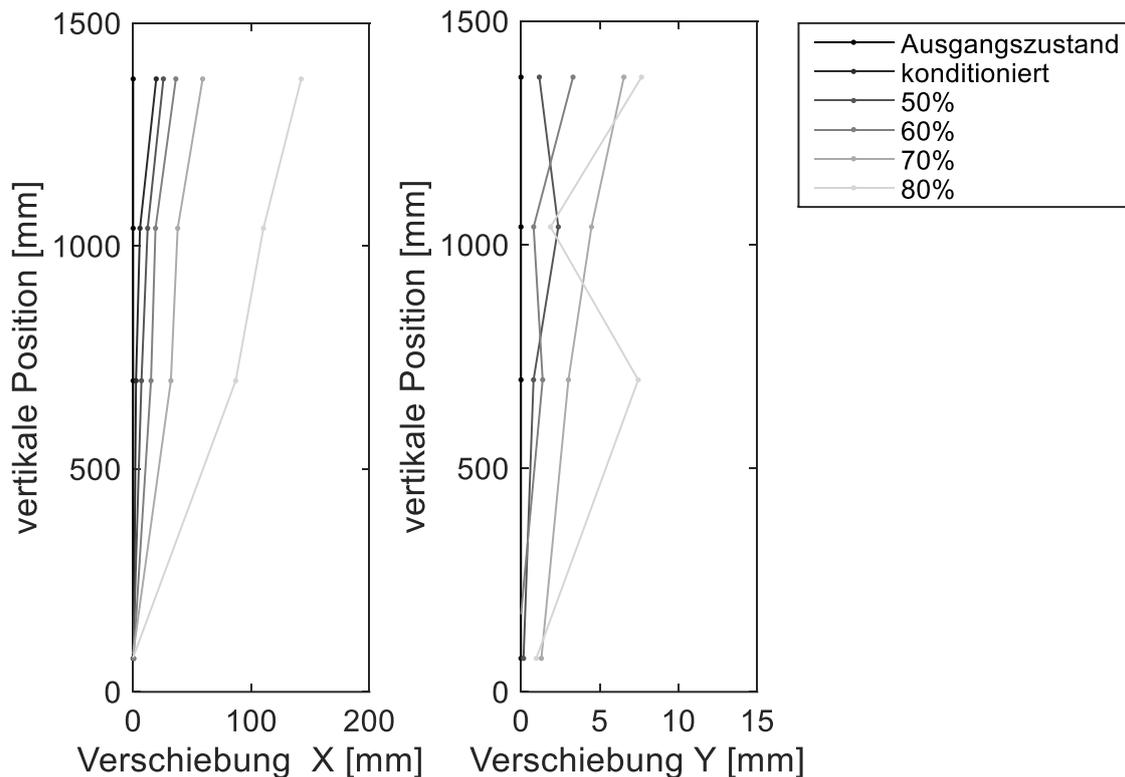


Abbildung 3.48: Verschiebung, der Produkte in Fahrtrichtung (X) und Querrichtung (Y) in Abhängigkeit von ihrer vertikalen Position auf der Palette

Der Testzyklus wird fortgeführt, bis das Verpackungssystem in Sekunde sechzig der vierten Testphase ($S_4=80\%$) der beschleunigten Masse des Wassers keine ausreichenden Rückstellkräfte mehr entgegengesetzt, sodass die Palette gegen die Barriere der Testplattform prallt. Die Produkte der obersten Lage bleiben nach der vierten Testphase um 142 mm in Fahrtrichtung verschoben. Außerdem weist die Palette Beschädigungen auf. Abbildung 3.49 bis Abbildung 3.52 verdeutlichen einerseits die Auswirkungen des Transporttestes im LKW auf dem Flugplatz und andererseits die Auswirkungen des Testzyklus im Labor. Hierbei verdeutlichen Abbildung 3.49 und Abbildung 3.50 den Einfluss des jeweiligen Tests auf die globale Form der Getränkepaletten. Die für den Labortest bereits diskutierte bleibende Verformung der Palette ist auch für die Paletten im LKW, vor allem in Fahrtrichtung, signifikant, wie der Vergleich von Abbildung 3.49 und Abbildung 3.50 zeigt. Obwohl der Testzyklus im Labor die im LKW gemessenen Beschleunigungssignale aufgrund der diskutierten technischen Grenzen der Prüfmethode nur approximieren kann, ist die Übereinstimmung des Deformationsmusters des Verpackungssystems in beiden Tests unverkennbar.



Abbildung 3.49: Wirkung des Transporttests im LKW (links) im Vergleich zur Wirkung des Transporttests im Labor (rechts) auf die globale Form der Palette. Sicht auf die schmale Seite.



Abbildung 3.50: Wirkung des Transporttests im LKW (links) im Vergleich zur Wirkung des Transporttests im Labor (rechts) auf die globale Form der Palette. Sicht auf die breite Seite.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen beiden Tests besteht darin, dass sich die Paletten während der Fahrt im LKW an den Barrieren der Ladefläche und aneinander abstützen, wohingegen die Barrieren im Labortest in deutlich größerer Distanz angebracht sind. Der Umstand, dass das Verpackungssystem auf dem Prüfstand bereits bei einem um 20% abgeminderten Beschleunigungssignal versagt, spricht daher für die definierte Prüfmethode, sofern der Grund für das Versagen der gleiche ist, beziehungsweise Schädigungsmechanismen in beiden Fällen gleich ablaufen. Dies kann anhand Abbildung 3.51 und Abbildung 3.52 nachvollzogen werden.



Abbildung 3.51: Wirkung des Transporttests im LKW (links) im Vergleich zur Wirkung des Transporttests im Labor (rechts) mit Fokus auf die Getränkepacks



Abbildung 3.52: Wirkung des Transporttests im LKW (links) im Vergleich zur Wirkung des Transporttests im Labor (rechts) mit Fokus auf die Stretchfolie

Sowohl im LKW als auch im Labor führt die Scherbelastung auf die Getränkepacks der unteren Lage zu einer plastischen Deformation der Schrumpffolie und damit zu einer irreversiblen Scherdeformation des gesamten Packs. Aufgrund dieser Scherdeformationen der Packs wird die Stretchfolie stärker beansprucht, sodass sie sich zunächst lokal, an den Kanten der Palette, plastisch verformt und schließlich einreißt. Dieses Schadensbild und die damit einhergehende globale Deformation der gesamten Paletten gehören zu den häufigsten Reklamationsgründen. Weil die entwickelte Prüfmethode diesen typischen Versagensfall von Getränkepaletten im LKW reproduzieren kann, ist ihre Eignung als realitätsgetreuer Transporttest verifiziert. Die Prüfmethode bewährt sich seither im Alltag der Verpackungsentwicklung bei der Optimierung der Verpackungskonzepte.

In der Praxis zeigt sich bislang, dass Paletten, die ein Testlevel mit $S_3=70\%$ überstehen, in der Regel mängelfrei beim Kunden ankommen. Diese Einschätzung

wird von der Beobachtung gestützt, dass bereits ab einem Testlevel mit $S_4=80\%$ im Labor die während des entsprechenden Transporttests im LKW (100%) auftretenden Schadensbilder auftreten. Sowohl auf der Testplattform als auch in der Simulation steht die Ladung frei, ohne stützende Kontaktpartner. Allerdings wird eine Palette während des LKW-Transportes, bei ordnungsgemäßer Beladung [4], durch benachbarte Paletten und durch die Struktur des Trailers gestützt. Der Vergleich der Schadensbilder von Paletten nach dem LKW-Transport und von solchen nach dem Labortest zeigt, dass die auf der Testplattform frei stehenden Paletten bereits früher versagen, wie Abbildung 3.51 und Abbildung 3.52 darstellen.

Es bleibt anzumerken, dass die hier vorgeschlagenen Methoden der Optimierung von Verpackungssystemen hinsichtlich ihrer Stabilität dienen. Allerdings ist ein Nachweis der Verkehrssicherheit nach den Kriterien der Europäischen Richtlinie [4] weder auf Basis der entwickelten Prüfmethode noch auf Basis des in Kapitel 4 entwickelten FE-Modells der Palette zulässig. Für diesen Nachweis gelten die in der europäischen Richtlinie [4] zitierten Normen [11–15]. Aufbauend auf der vorliegenden Arbeit entstehen zur Zeit Prüfmethode für den Hexapod, welche die normierten Prüfmethode approximieren. Diese rein technischen Fragestellungen werden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter vertieft.

Im folgenden Kapitel entstehen, basierend auf der mechanischen Charakterisierung der Verpackungsstrukturen in Kapitel 3.2, numerische Methoden, die miteinander kombiniert eine Vorhersage der Formstabilität einer Getränkepalette ermöglichen. Ein Strukturmodell der Getränkepalette vereint die Ergebnisse der numerischen Methoden und soll so der FE-gestützten Optimierung des Verpackungssystems dienen. Voraussetzung hierfür ist, dass dieses Modell der Palette ihr dynamisch-mechanisches Verhalten realistisch wiedergeben und die diskutierten Phänomene reproduzieren kann. Deshalb muss sich das in Kapitel 4 entwickelte numerische Modell an dem im vorliegenden Kapitel quantifizierten dynamisch-mechanischen Verhalten der Getränkepalette messen.

4 Mechanische Modellierung des Verpackungssystems

Das komplexe Materialverhalten der im Verpackungssystem verwendete Polymere resultiert in komplexen Wirkungsketten, von den Prozessparametern der Verpackungsprozesse über die mechanischen Eigenschaften der geschaffenen Verpackungsstrukturen bis hin zur erzielten Stabilität der Palette in Bezug auf deren Belastungen während des LKW-Transportes. Die Finite Elemente Methode (FEM) bietet die Möglichkeit, diese Wirkungsketten anhand eines Modells des Verpackungssystems umfassend zu untersuchen und zu charakterisieren. Dazu sind valide Modelle der Unterstrukturen Voraussetzung für ein hinreichend genaues und valides FE-Modell der gesamten Verpackungsstruktur. Diese Bedingung soll unter Anwendung der Ergebnisse der mechanischen Charakterisierung aus Kapitel 3 erfüllt werden. Ein numerisches Modell der Stretchfolie wird experimentell kalibriert und anschließend evaluiert. Dieses Modell wird in einem analytischen Modell des Streck-Wickelprozesses angewendet, um dessen Ergebnis zu berechnen. Außerdem dienen die Experimente aus Kapitel 3.2 der Kalibrierung von Strukturmodellen für den Six-Pack und für den Kartoneinleger. In Kombination mit dem berechneten Ergebnis des Streck-Wickelprozesses kann aus den Strukturmodellen für Pack und Kartoneinlegern ein Strukturmodell für das gesamte Verpackungssystem, d.h. für die Palette, erstellt werden.

Das Modell der Palette soll einerseits der numerischen Bewertung von Verpackungsstrategien dienen. Andererseits sollen die mechanischen Eigenschaften der Unterstrukturen mit der Stabilität des Verbundes in Verbindung gebracht werden können. Beide Ziele erfordern die experimentelle Verifikation des Paletten-Modells. Die modellbasierte Analyse und die Optimierung des Verpackungssystems folgen in Kapitel 5.

4.1 Materialmodellierung

Empirische Methoden zur Optimierung der Palettenstabilität stoßen nicht nur wegen der aufwendigen Präparation der tonnenschweren Probekörper an ihre Grenzen. Aus dem Materialverhalten von PE resultieren komplexe Wirkungsketten, von den mechanischen Eigenschaften der Verpackungsfolie über die Prozessparameter während des Streck-Wickelns zur erzielten Vorspannung und zur Steifigkeit der applizierten Folie und darüber hinaus bis zur Stabilität der Palette. Eine Auslegung des Verpackungssystems im Hinblick auf dessen mechanische Belastungen während

eines LKW-Transportes muss deshalb die Dehnungshistorie während des Wickelprozesses berücksichtigen. Eine effektive und zielgerichtete Beeinflussung der Palettenstabilität erfordert demnach die Berechenbarkeit des mechanischen Materialverhaltens der PE-Stretchfolie. Diese Berechenbarkeit wird mit einem modellbasierten numerischen Ansatz erzielt. Voraussetzung hierfür ist ein Materialmodell, welches den Einfluss der Dehnungshistorie während des Verpackens auf die mechanischen Eigenschaften der applizierten Verbundfolie abbilden kann.

Das von Ayoub et al. vorgeschlagene und von Makki et al. erweiterte Materialmodell wird in der vorliegenden Arbeit auf die Stretchfolie angewendet. Dieses numerische Modell der Stretchfolie wird erst durch die experimentelle Kalibrierung zu einem prädiktiven Werkzeug für die Prozessoptimierung des Streck-Wickelprozess. Das Materialmodell soll den Einfluss der Dehnungshistorie auf die Vorspannung und auf die Steifigkeit der applizierten Stretchfolie berechenbar machen und wird deshalb anhand der prozessnahen Experimente aus Kapitel 3.1 kalibriert. Eine Validierung des Materialmodells erfolgt in Kapitel 4.2 anhand des Vergleiches mit den Ergebnissen der FEF-Messung aus Kapitel 3.1.3.

4.1.1 Stand der Technik

Die mechanische Antwort eines Polymers ergibt sich aus der Kinetik der Polymerketten, die die Mikrostruktur des Materials formen. Liegen diese Ketten in ungeordneter Form (amorph) vor, so sind die makroskopischen Eigenschaften des Polymers durch die intramolekularen Kräfte, d.h. durch die Kettenkonstitution und durch die Kettenkonfiguration sowie durch die intermolekularen Kräfte, d.h. durch die Nebenvalenzkräfte und die Kettenkonformation bestimmt. Quantenmechanische (QM) und molekulardynamische Ansätze (MD) greifen dieses Wissen über die Mikrostruktur der Polymere auf und modellieren elastische und viskose Eigenschaften des Materials, indem die Bewegungen von Ketten in der Größenordnung von wenigen hundert (QM) bis zu einigen Millionen (MD) Atomen für wenige Nanosekunden simuliert werden [77]. Die Zeitskala der molekulardynamischen Ansätze ist jedoch nicht immer ausreichend, da viele Verformungsmechanismen einschließlich Konformationsänderungen auf anderen Zeitskalen stattfinden [77]. Im industriellen Alltag haben solche Modelle aufgrund ihrer Komplexität und des erforderlichen Rechenaufwands bislang wenig Bedeutung erlangt. Viele in der Literatur beschriebene Materialmodelle betrachten den Polymerwerkstoff daher mathematisch als Kontinuum, dessen mechanische Eigenschaften über konstitutive Gleichungen beschrieben werden. Innerhalb der

konstitutiven Materialmodelle wird unterschieden zwischen rein phänomenologischen Modellen [78–81] sowie physikalisch basierten Ansätzen [43, 82, 83], welche die elementaren Deformationsmechanismen in ihren konstitutiven Gleichungen aufgreifen. Für teilkristalline Thermoplaste wie PE hat außerdem die Morphologie der Polymerketten maßgeblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffes. Liegen die Ketten in geordneter Form vor, können sich Kristallite bilden, die wiederum durch amorphe Regionen voneinander getrennt sind. Die Deformationsmechanismen der Kristallite und der amorphen Bereiche unterscheiden sich dabei grundlegend. Im betrachteten Fall von Polyethylen bewirkt das breite Intervall möglicher Kristallisationsgrade in mehrfacher Hinsicht unterschiedliche mechanische Eigenschaften verschiedener Stretchfolien. Darüber hinaus muss neben den inter- und intramolekularen Kräften auch die Konformation des Makromolekülkettennetzwerkes berücksichtigt werden. Verschlaufungen der Polymerketten untereinander bewirken auf makroskopischer Ebene, dass das Netzwerk aus Molekülketten einer Deformation Widerstand leistet. Einen Überblick über die verschiedenen Modellierungsansätze für teilkristalline Thermoplaste im allgemeinen und für verschiedene PE-Typen im speziellen ist in der Literatur [36, 84] gegeben. Die vorliegende Arbeit erhebt den Anspruch der Erweiterbarkeit der präsentierten Methoden auf ein breites Anwendungsspektrum in der Verpackungsindustrie. Daher ist es gerade im Falle des meistverbrauchten Verpackungsmaterials PE zielführend, den stark variierenden Kristallisationsgrad und dessen Einfluss auf die Mechanik des Polymers im Rahmen der numerischen Repräsentation des Materials aufzugreifen. Hingegen wird in dieser Arbeit darauf verzichtet, die Stabilität der Palette bis auf mikromechanische Zusammenhänge zurückzuführen. Vielmehr soll das Materialmodell geeignet sein, den Verlauf der Spannung in Maschinenrichtung sowohl für Be- als auch für Entlastungspfade der Stretchfolie auch für die prozesstypischen hohen Dehnungen und Dehnraten vorherzusagen. Diese Zielsetzung bezüglich der numerischen Repräsentation von PE überschneidet sich in weiten Teilen mit dem Ziel der Arbeiten von Ayoub et al. [85] und Makki et al. [36]. Diese Arbeiten zeigen, dass ein Materialmodell, welches auf die Arbeiten von Colak [80], Ahzi et al. [43] und Boyce [82] zurückgeht, prinzipiell in der Lage ist, verschiedene PE-Typen auch bei zyklischer Belastung exakt zu beschreiben. Im Folgenden wird das von Ayoub et al. [85] vorgeschlagene und von Makki et al. [36]

erweiterte Materialmodell beschrieben und auf die Stretchfolie während des Wickelprozesses angewendet.

4.1.2 Mechanische Modellierung der Stretchfolie

Das experimentell kalibrierte Materialmodell für die Stretchfolie soll den Einfluss der Dehnungshistorie während des Streck-Wickelprozesses auf die intrinsischen Spannungen sowie auf die mechanischen Eigenschaften der applizierten Verbundfolie abbilden. Hierfür wendet diese Arbeit das von Ayoub et al. [85] vorgeschlagene und von Makki et al. [36] erweiterte Materialmodell auf die Stretchfolie an. Die konstitutiven Gleichungen des Modells sind anhand von Abbildung 4.1 schematisch dargestellt.

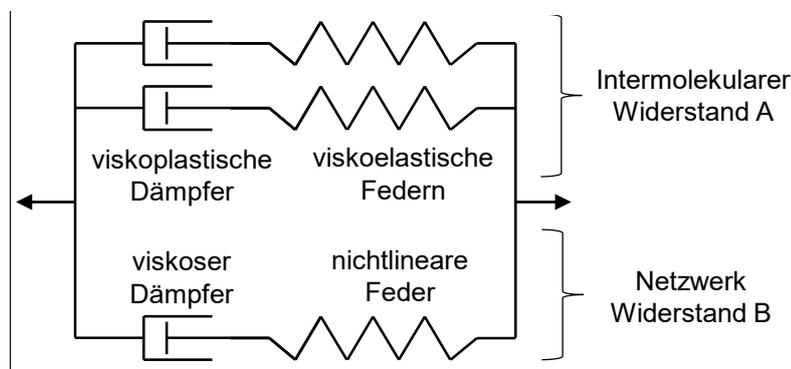


Abbildung 4.1: Skizze des verwendeten Materialmodells für die Stretchfolie

Das Modell basiert auf der Annahme, dass sich die mechanische Antwort von PE, hier beschrieben durch die Cauchy Spannungen T , aus der mechanischen Antwort von zwei Deformationsmechanismen zusammensetzt. Der Intermolekulare Widerstand T_A und der Widerstand des Netzwerkes T_B aus Polymerketten sind additiv miteinander verknüpft:

$$T = T_A + T_B \quad (4.1)$$

Die Cauchy Spannungen des intermolekularen Anteils T_A wiederum resultieren einerseits aus den Widerständen T_A^k der kristallinen Bereiche und andererseits aus den Widerständen T_A^a der amorphen Bereiche. Nach der von Ayoub et al. [83] abgewandelten Mischungsregel kann T_A in Abhängigkeit vom Volumenanteil χ der kristallinen Phase und vom Interaktionsparameter β bestimmt werden:

$$T_A = \chi^\beta T_A^k + (1 - \chi)^\beta T_A^a \quad (4.2)$$

Sowohl der Beitrag des amorphen Volumens als auch der Anteil des kristallinen Volumens können nach Makki et al. [36] durch das mit den Gleichungen (4.3) bis (4.12) gegebene „Overstress-Model“ in der Version von Colak [80] beschrieben werden.

Hierin steht der Index „i“ stellvertretend für die Indizes „a“ bzw. „k“ der amorphen oder kristallinen Bereiche. Das Overstress-Modell entspringt der „viscoplasticity theory based on overstress“ (VBO). Die VBO beschreibt ein dehnratenabhängiges plastisches Verhalten und geht anstelle von einer Fließfläche, von zwei tensoriellen Zustandsvariablen, der „Gleichgewichtsspannung“ G und der kinematischen Spannung K sowie von zwei skalaren Zustandsvariablen, der isotropen Spannung r und der Gilman-Spannung (engl. „drag stress“) D , aus [86, 78, 79]. Die Gleichgewichtsspannung G ist vom Belastungspfad abhängig und kann nach einer plastischen Deformation im Material bestehen bleiben. Die kinematische Spannung K ermöglicht die Modellierung des Bauschinger Effektes und beeinflusst den Tangentenmodul E_t bei hohen Dehnungen. Die isotrope Spannung r^i ist unabhängig von der Dehnrate und trägt, wie die Gilman-Spannung D , die eine Vierschiebung der Streckgrenze bewirkt, zur Dehnungsverfestigung bei. Abweichend von Ayoub et al. [85] werden in der vorliegenden Arbeit die Statusvariablen r^i und D wie bei Makki et al. [36] in Abhängigkeit von der Hauptdehnung ε_H definiert. Nähere Informationen zu der physikalischen Bedeutung der hier beschriebenen Statusvariablen finden sich in der Literatur [78, 80].

Der Steifigkeitstensor C aus den Gleichungen (4.3) und (4.4) findet sich in Abbildung 4.1 schematisch in den viskoelastischen Federn wieder.

$$T_A^i = \frac{1}{J_A^{e,i}} C_A^{e,i} \ln(V_A^{e,i}) \quad (4.3)$$

$$(C_A^{e,i})_{ijkl} = \frac{\varphi^i E^i}{2(1 + \nu^i)} \left((\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) + \frac{2\nu^i}{1 - 2\nu^i} \delta_{ij} \delta_{kl} \right) \quad (4.4)$$

J_A ist die elastische Volumenänderung, ν^i die Querkontraktionszahl und $\ln(V_A)$ die elastische Hencky-Dehnung. C hängt außerdem über die Funktion φ in Gleichung (4.5) von den in Gleichung (4.6) und (4.7) definierten Statusvariablen K und G ab:

$$\varphi^i = 1 - \beta_1 \left(\frac{\kappa^i}{r^i} \right)^{\alpha_1} \quad \text{mit } \kappa^i = \left(\frac{1}{2} (G^{i'} - K^{i'}) \cdot (G^{i'} - K^{i'}) \right)^{1/2} \quad (4.5)$$

Das Tensorprodukt $A \cdot B$ ist wie folgt definiert: $A \cdot B = \text{tr}(A^T B)$ mit A^T , der Transponierten von A .

$$\dot{K}^{i'} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{(T_A^{i'} \cdot T_A^{i'})^{\frac{1}{2}} E_A^i E_t^i}{\sqrt{3} \tau_A^i + g^i E_A^i - E_t^i} D_A^{p,i} \quad (4.6)$$

$$\dot{G}^{i'} = \Psi^i \frac{\dot{T}_A^{i'}}{E_A^i} + \Psi^i \left(\sqrt{3} \frac{\tau_A^i}{D^i} \right)^{m^i} \left(\frac{T_A^{i'} - G^{i'}}{\sqrt{3}\tau_A^i} - \frac{G^{i'} - K^{i'}}{r^i} \right) + \left(1 - \frac{\Psi^i}{E_A^i} \right) \dot{K}^{i'} \quad (4.7)$$

In den Gleichungen (4.6) bis (4.12) bezeichnet $\dot{\gamma}_A^p$ die Scherdehnrate nach Gleichung (4.8) und τ_A nach Gleichung (4.9) den Effektivwert der Differenz der intermolekularen Cauchy-Spannung T_A und der Gleichgewichtsspannung G . Die Scherdehnrate hängt über einen Viskositätsparameter „ m “ mit der τ_A und der Gilman-Spannung D zusammen:

$$\dot{\gamma}_A^{p,i} = \sqrt{\frac{3}{2}} * \left(\sqrt{3} \frac{\tau_A^i}{D^i} \right)^{m^i} \quad (4.8)$$

$$\tau_A^i = \left(\frac{1}{2} (T_A^{i'} - G^{i'}) \cdot (T_A^{i'} - G^{i'}) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.9)$$

Die Formfunktion Ψ in Gleichung (4.10) beschreibt den Übergang zum plastischen Fließen. Die Konstanten c_1 bis c_5 sind Materialparameter und g und k in Gleichung (4.11) sind die effektive Gleichgewichtsspannung bzw. die effektive kinematische Spannung:

$$\Psi^i = \Psi_1^i + \left(\frac{c_2 - \Psi_1^i}{\exp(c_3 \dot{\gamma}_A^{p,i})} \right) \text{ mit } \Psi_1^i = c_1 \left(1 + c_4 \left(\frac{g^i}{r^i + k^i + c_5 (\tau_A^i)^2} \right) \right) \quad (4.10)$$

$$\text{mit } g^i = \left(\frac{1}{2} G^{i'} \cdot G^{i'} \right)^{1/2} \text{ und } k^i = \left(\frac{1}{2} K^{i'} \cdot K^{i'} \right)^{1/2} \quad (4.11)$$

Gleichung (4.12) definiert den Tensor der viskoplastischen Dehnrate D_A^p in Abhängigkeit von der Gleichgewichtsspannung, der Scherdehnrate $\dot{\gamma}_A^p$ und der effektiven Spannung τ_A .

$$D_A^{p,i} = \dot{\gamma}_A^{p,i} \frac{T_A^{i'} - G^{i'}}{\sqrt{2}\tau_A^i} \quad (4.12)$$

Der viskohyperelastische Netzwerkanteil ist so wie in der Literatur [36] mittels der von Arruda et al. [87] als „Eight-Chain Model“ bekannten Beziehung für die in Abbildung 4.1 dargestellten nichtlinearen Feder sowie durch die von Boyce et al. [82] beschriebene Beziehung für den viskosen Dämpfer implementiert. Eine 3D-Repräsentation des beschriebenen Materialmodells wurde im Rahmen dieser Arbeit mithilfe der kommerziell verfügbaren Software Matlab programmiert. Das implementierte Modell übersetzt eine beliebige, für den Streck-Wickelprozess typische

Dehnungshistorie in die zu erwartende mechanische Antwort der Folie. Jedoch hängt die Vorhersage des Materialmodells nicht nur von den beschriebenen konstitutiven Gleichungen, sondern auch von den darin enthaltenen Konstanten, den Materialparametern, ab. In der Literatur [36, 85] wurden für PE-HD geeignete Parametersätze bestimmt. Ausgehend von diesen Parametersätzen kann mit dem Trust-Region-Verfahren nach Coleman [88] durch Minimierung der Fehlerquadrate zwischen experimenteller Beobachtung und numerischer Vorhersage ein geeigneter Parametersatz für die hier verwendete Stretchfolie gefunden werden. Die dieser Kalibrierung zugrundeliegenden experimentellen Beobachtungen sind die in Abbildung 3.4 dargestellten FPT-Messergebnisse. Der sich ergebende Parametersatz ist in Tabelle 4.1 dargestellt.

Parameter des viskoelastisch-viskoplastischeer intermolekularer Widerstandes [36, 85]					
Parameter	Symbol	Wert amorph	Wert kristallin	Einheit	Quelle
Kristallisationsgrad	χ	59,53		%	Fit
Umlagerungsparameter	β	3,02		\square	Fit
Elastizitätsmodul	E	350	1622	MPa	Fit
Tangentenmodul	E_t	1		MPa	[36, 85]
Querkontraktionszahl	ν	0,46		\square	[85]
Formkoeffizienten	α_1	5		\square	[36, 85]
	β_1	0,45		\square	[85]
	c_1	40		MPa	[36, 85]
	$c_{2, \text{Belastung}}$	800		MPa	[85]
	$c_{2, \text{Entlastung}}$	2,7		MPa	[36, 85]
	$c_{3, \text{Belastung}}$	25		s	[85]
	$c_{3, \text{Entlastung}}$	25		s	[85]
	c_4	5		\square	[36, 85]
c_5	3		MPa^{-1}	[36, 85]	
isotrope Spannung	Γ Belastung	$r_0 \times 0,9788 \times \epsilon_H^{0,1079}$		MPa	[36]
	Γ Entlastung	$r_0 \times 1,576 \times \epsilon_H^{0,2207}$			[36]
	r_0	1,66	18,43		Fit
Gilman-Spannung	D Belastung	$D_0 \times 0,6997 \times \epsilon_H^{0,1886}$		MPa s	[36]
	D Entlastung	$D_0 \times 1,3983 \times \epsilon_H^{0,1236}$			[36]
	D_0	9,73	52,22		Fit
Viskositätskoeffizient	m Belastung	$m_0 \times \epsilon_H^{-0,124}$		\square	[36]
	m Entlastung	$m_0 \times 1,2238 \times \epsilon_H^{0,0818}$			[36]
	m_0	5,11	2,98		Fit
Parameter des viskohyperelastischen Netzwerkanteils nach Boyce et al. [87]					
Parameter	Symbol	Wert		Einheit	Quelle
Verschlaufungsdichte	N Belastung	$N_0 / ((\epsilon_H / \epsilon_{H, \text{max}})^{0,3852})$		\square	[36]
	N Entlastung	$N_0 / (0,4963 \times (\epsilon_H / \epsilon_{H, \text{max}})^{13,38} + 0,5012)$			[36]
	N_0	56,14			Fit
Gummimodul	C_{r_0} Belastung	$C_{r_0} \times (\epsilon_H / \epsilon_{H, \text{max}})^{0,3852}$		MPa	[36]
	C_{r_0} Entlastung	$C_{r_0} \times (0,4963 \times (\epsilon_H / \epsilon_{H, \text{max}})^{13,38} + 0,5012)$			[36]
	C_{r_0}	8,84			Fit
Parameter der molekularen Relaxation	Q/R	$24,5 \times 10^{-2}$		K	Fit
	D_{net}	0,01		$\text{MPa}^{-1}\text{s}^{-1}$	Fit

Tabelle 4.1: Materialparameter für die Stretchfolie im Wickelprozessmodell

Im Gegensatz zu herkömmlichen Methoden der Kalibrierung eines Materialmodells anhand von Zugversuchen ist bei der Kalibrierung anhand der FPT-Messergebnissen zu berücksichtigen, dass die resultierenden Spannungs-Dehnungskurven nicht das Resultat einer kontinuierlichen Deformation eines einzelnen Probekörpers sind. Wie im realen Prozess beträgt die Geschwindigkeit der Folie hinter der Vorstreckeinheit des FPT 4000mm/s. Deshalb basiert jeder in Abbildung 3.4 dargestellte Messpunkt $\sigma_2(\varepsilon_{\text{ges}})$ auf der Deformation eines neu abgewickelten Foliensegmentes, welches mit einer individuellen Dehnungshistorie verstreckt wurde. Abbildung 4.2 stellt Dehnungshistorien von Experiment 1 dar. Entsprechend stellt Abbildung 4.3 die Dehnungshistorien von Experiment 2 dar.

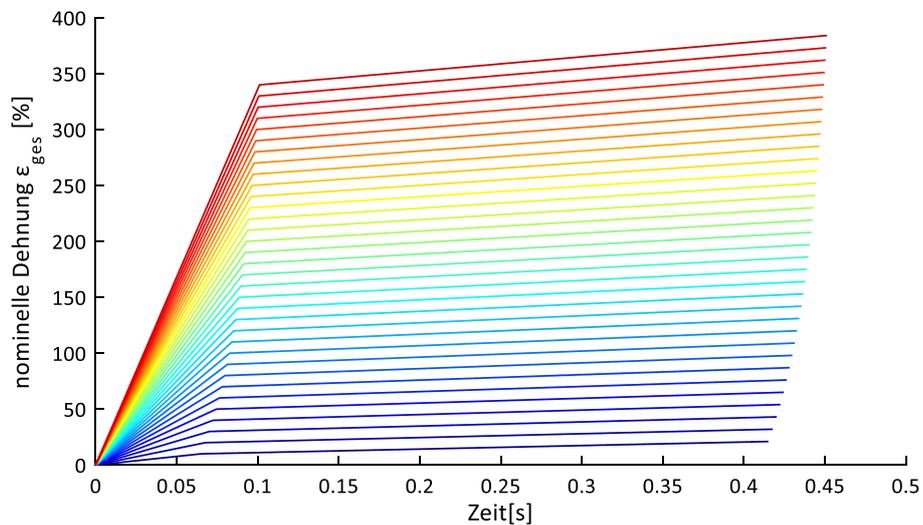


Abbildung 4.2: individuelle Dehnungshistorien der einzelnen Messpunkte der Belastungskurve des Experimentes 1 (vgl. Abbildung 3.4)

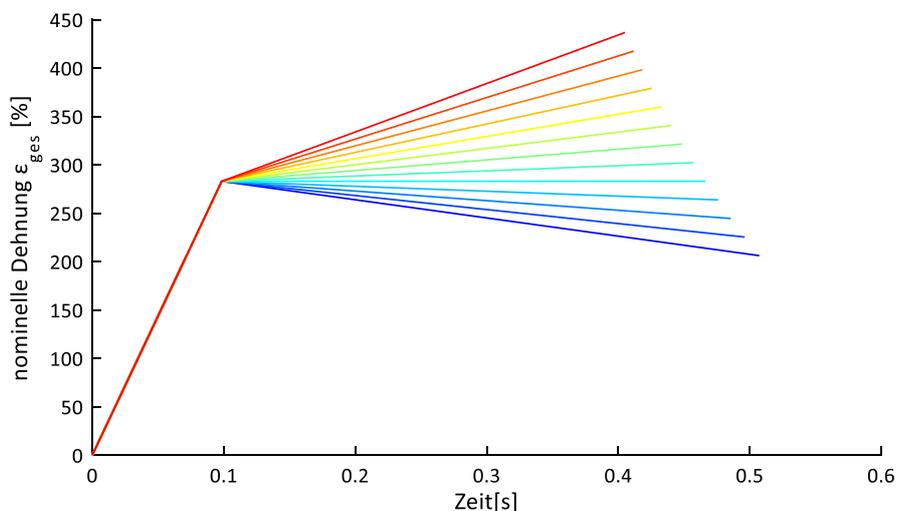


Abbildung 4.3: Dehnungshistorien der Messpunkte des Experimentes 2 (vgl. Abbildung 3.4)

Der Spannungswert, der aus dem an den Walzen gemessenen Drehmoment errechnet wurde, versteht sich als der zeitliche Endpunkt der aus der Dehnungshistorie resultierenden Spannungshistorie. Analog dazu ist die Eignung einer gewählten Parameterkombination nicht am gesamten Spannungsverlauf, sondern an den Endpunkten der prognostizierten Spannungshistorien ersichtlich, wie Abbildung 4.4 anhand der Prognose des kalibrierten Modells und der FPT-Messergebnisse für Experiment 2 verdeutlicht. Entscheidend für die Stabilität der Palette bleiben ebendieser Endzustand, also der Spannungs-Dehnungszustand, sowie die Geometrie der Folie, wenn sie auf der Palette appliziert ist. Abbildung 4.4 zeigt außerdem das Ergebnis der FPT-Messungen aus Experiment 2 in Kapitel 3.1. In diesem Experiment wurde die Folie zunächst um $\varepsilon_1=283\%$ vorgedehnt und anschließend um $\varepsilon_2 = \{-20\%, -15\%, -10\%, \dots, 30\%, 35\%, 40\}$ weitergedehnt.

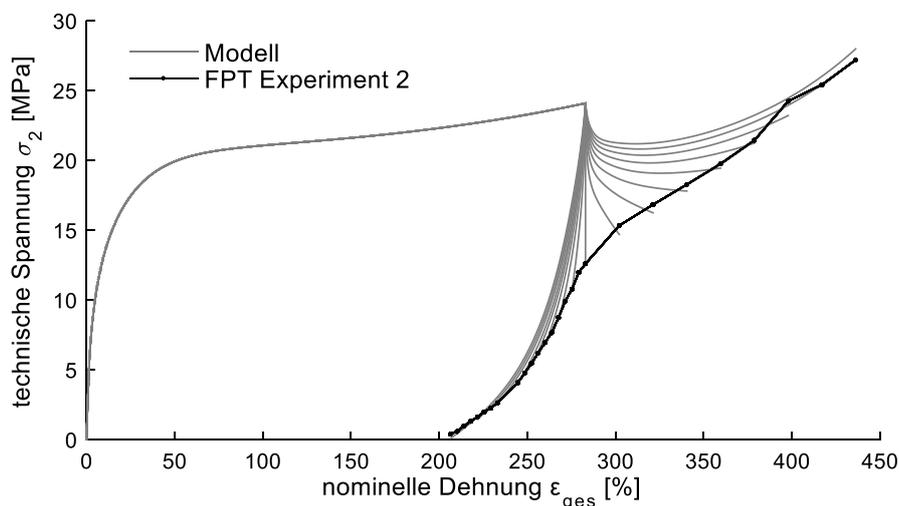


Abbildung 4.4: Prognose des Spannungsverlaufes auf Basis des Materialmodells und der in Abbildung 4.3 dargestellten Dehnungsverläufe der Folie im FPT im Vergleich mit den entsprechenden Messergebnissen

Auf Basis dieser in Abbildung 4.3 dargestellten Dehnungshistorien kann die mechanische Antwort der Folie anhand des kalibrierten Materialmodells berechnet werden. Die resultierenden Spannungs-Dehnungskurven sind in Abbildung 4.4 dargestellt. Die Vordehnung resultiert im ersten Teil der Spannungs-Dehnungskurven, bis hin zum in Abbildung 4.4 dargestellten Spannungsabfall. Die ausgeprägte Plateauregion ist typisch für PE. Aufgrund der kurzen Verweilzeit der Folie zwischen den beiden Walzen der Vorstreckeinheit erfolgt die Verformung hier mit einer höheren Dehnrates ε_1 , höher als die Dehnrates ε_2 der nachfolgenden, geringen positiven oder negativen Dehnung ε_2 , die zwischen W_2 und W_3 aus Abbildung 3.1 stattfindet. Das implementierte viskoelastische Materialverhalten von PE antwortet mit einem Abfall

der Spannung in Maschinenrichtung, bevor diese Spannung auf einem niedrigeren Niveau wieder ansteigt. Auf negative ε_2 hingegen antwortet die Folie, wie auch das Modell aufgrund der implementierten Plastizität, mit drastischem Rückgang der Spannung σ_2 in Maschinenrichtung. An dem in Abbildung 4.4 dargestellten Beispiel lässt sich nachvollziehen, dass die Spannung, die das Modell am Ende der simulierten Dehnungshistorie berechnet, mit sehr guter Genauigkeit der durch Gleichung (3.5) berechneten Spannung σ_2 entspricht, welche aus dem gemessenen Drehmoment beim Aufwickeln der Folie auf W_3 aus Abbildung 3.1 errechnet wird.

In Analogie zu den in Abbildung 4.4 dargestellten Spannungs-Dehnungskurven kann das Modell auf die einzelnen Belastungsszenarien angewendet werden, die während der FPT-Messungen durchlaufen wurden. Die simulierten Spannungen in Maschinenrichtung, die nach diesen Belastungsszenarien und damit nach einem entsprechenden Streck-Wickelprozess in der Folie verbleiben, sind in Abbildung 4.5 zusammen mit der per FPT gemessene Abhängigkeit $\sigma_2(\varepsilon_{ges})$ dargestellt. Insgesamt fällt auf, dass die mechanische Antwort der Folie auf den Streck-Wickelprozess im Bereich der Dehnungsverfestigung der Folie sehr gut prognostiziert werden kann. Die durchgeführte Kalibrierung gewichtet eben diesen Bereich stärker, weil er, wie in Kapitel 3.1 erörtert, im Verpackungsprozess zu effektiveren Ergebnissen führt und damit relevanter ist.

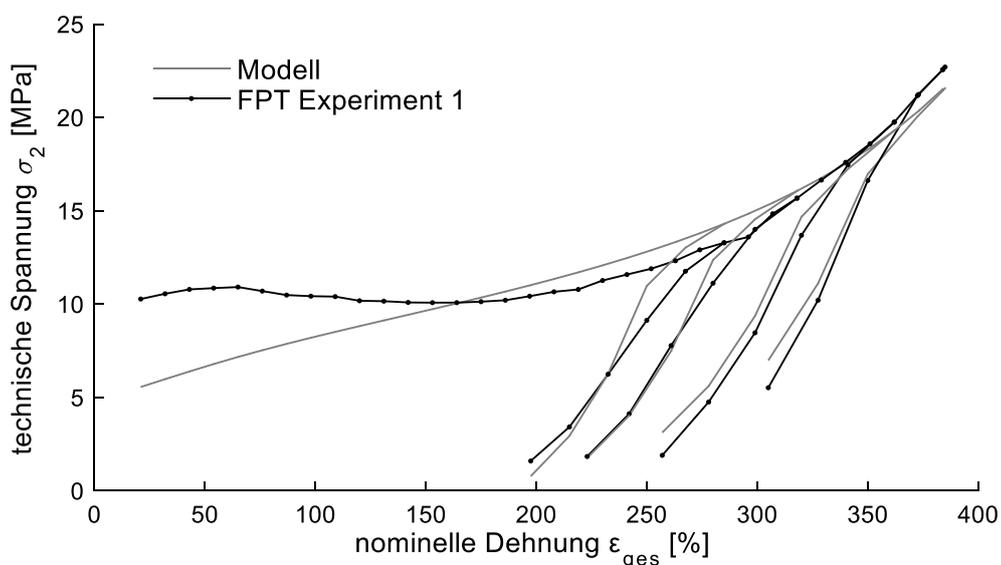


Abbildung 4.5: Vergleich der per Materialmodell prognostizierten Spannungs-Dehnungszustände mit den FPT-Messergebnissen

Anhand der unterschiedlichen Steigungen der Dehnungsverläufe der Abbildung 4.2 und der Abbildung 4.3 ist ersichtlich, wie sehr sich die Dehnraten, die beim Streck-

Wickeln mit verschiedenen Prozessparametern auftreten, voneinander unterscheiden. Die Dehnrates, die die Folie beim Vordehnen auf ein hohes Dehnungsniveau ($\dot{\epsilon}_1(\epsilon_1=340\%)=33.67/s$) erfährt, unterscheidet sich um den Faktor 22 von der Dehnrates, die die Folie beim Vordehnen auf ein niedriges Dehnungsniveau ($\dot{\epsilon}_1(\epsilon_1=10\%)=1.54/s$) erfährt und um den Faktor 108 von der kleinsten Dehnrates, die in den zur Kalibrierung verwendeten FPT-Messungen auftreten ($\dot{\epsilon}_2(\epsilon_1=10\%, \epsilon_2=11\%)=0.31/s$).

Infolge dieser hohen Bandbreite auftretender Dehnrates und infolge der Gewichtung während der Kalibrierung ergeben sich bei niedrigen ϵ_{ges} signifikante Ungenauigkeiten in der Prognose. Diese sind absichtlich in den Bereich niedrigerer Dehnungen verlagert und im Rahmen dieser Arbeit akzeptabel, weil der faktische Anwendungsbereich der Folie (hohe Dehnungen und hohe Dehnrates) im Fokus steht. Die Validierung des Materialmodells soll anhand eines realen Verpackungsprozesses erfolgen. Hierfür entsteht in Kapitel 4.2 eine numerische Repräsentation des Streck-Wickelprozesses, die das kalibrierte Materialmodell aufgreift und dessen Vorhersage mit den Ergebnissen der in Kapitel 3.1.3 erfolgten Messung der Wickelkraftverteilung der Folie auf der Palette vergleicht.

4.2 Modellierung des Streck-Wickelprozesses

Die Verpackungsprozesse, die zu einer transportbereiten Palette mit Getränkeflaschen führen, gehen einher mit mechanisch irreversiblen Änderungen in den Strukturen der zugrundeliegenden Verpackungsmaterialien. Deshalb müssen Vorhersagen zum mechanischen Verhalten dieser transportbereiten Palette den Einfluss der zugrundeliegenden Verpackungsprozesse auf das mechanische Verhalten der Ausgangsmaterialien berücksichtigen. Darüber hinaus sind neben den Materialeigenschaften auch die Geometrie und die intrinsischen Spannungen der geschaffenen Verpackungsstrukturen eng mit der jeweiligen Prozessführung verknüpft.

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Studien zu den Zusammenhängen zwischen Prozessführung während des Streckblasformprozesses einer PET-Getränkeflasche und deren strukturmechanischen Eigenschaften [6, 7, 9]. Diese Zusammenhänge werden in der vorliegenden Arbeit nicht weiter untersucht. Stattdessen basiert das angestrebte Modell der transportbereiten Palette auf einem Strukturmodell der sekundären Verpackung, welches sich auf eine mechanische Charakterisierung nach erfolgtem Streckblasform- und Schrumpfprozess stützt (siehe

Kapitel 3.2). Kapitel 3.1 verdeutlicht, dass gerade im Falle der Streck-Wickelverpackung ein enormer Einfluss der Prozessparameter auf die Wickelkraft sowie auf das mechanische Verhalten der applizierten Folie und damit auf die Stabilität der Palette besteht. Deshalb steht der Streck-Wickelprozess im Vordergrund dieser Arbeit. Auf Basis der experimentellen Charakterisierung von Stretchfolien entsteht im Folgenden ein numerisches Modell zur Vorhersage des Ergebnisses des Streck-Wickelprozesses. Die hier vorgestellten Methoden basieren auf den vom Autor der vorliegenden Arbeit bereits veröffentlichten Beiträgen [89, 90].

Im Streck-Wickelprozess erfährt die PE-Stretchfolie eine mechanisch irreversible plastische Deformation. Das mechanische Verhalten der Folie in ihrem Anwendungspunkt hängt demnach, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, von der Dehnungshistorie ab, die die Folie während des Prozesses durchläuft. Entsprechend hängt die Wickelkraft, mit der die Folie auf den Produkten aufliegt, nicht nur von der Menge und von der Verteilung der Folie auf der Palette, sondern ebenfalls von der Dehnungshistorie und dem durch den Prozess hervorgerufenen Spannungs-Dehnungszustand der Folie ab. Die Wickelkraft resultiert aus intrinsischen Spannungen, die nach dem Verstrecken in der Folie verbleiben. Das in Kapitel 4.1 kalibrierte Materialmodell der PE-Folie übersetzt die während des Prozesses auftretenden Dehnungshistorien in eben diesen intrinsischen Spannungszustand. Im Folgenden soll überprüft werden, inwiefern sich das Materialmodell mit den im Laborversuch (FPT) gefundenen Materialparametern eignet, das Ergebnis eines Streck-Wickelprozesses vorherzusagen. Als Referenz dient der in Kapitel 3.1.3 untersuchte Prozess und die dort experimentell ermittelte Verteilung der Wickelkraft. Für die Validierung des Materialmodells ist neben der Kenntnis der intrinsischen Spannungen der Folie auch die Kenntnis der Verteilung der Folie auf der Palette erforderlich. Das vom Autor dieser Arbeit entwickelte Streckwickelprozessmodell [89] wurde erweitert, um anhand der Einstellung der Streck-Wickelmaschine die Verteilung der Folie auf der Palette berechnen zu können.

Basierend auf einer durch den Benutzer eingegebenen Liste an Parametern des Wickelmusters modelliert ein Algorithmus die Folie als Polygone, die auf der virtuell erzeugten Oberfläche der Palette dem realen Prozess entsprechend verteilt werden. Abbildung 4.6 verdeutlicht die Funktion der Routine mit einer chronologisch sortierten Bildreihe, die das Resultat des realen und des modellierten Prozesses für äquivalente Zeitpunkte darstellt.

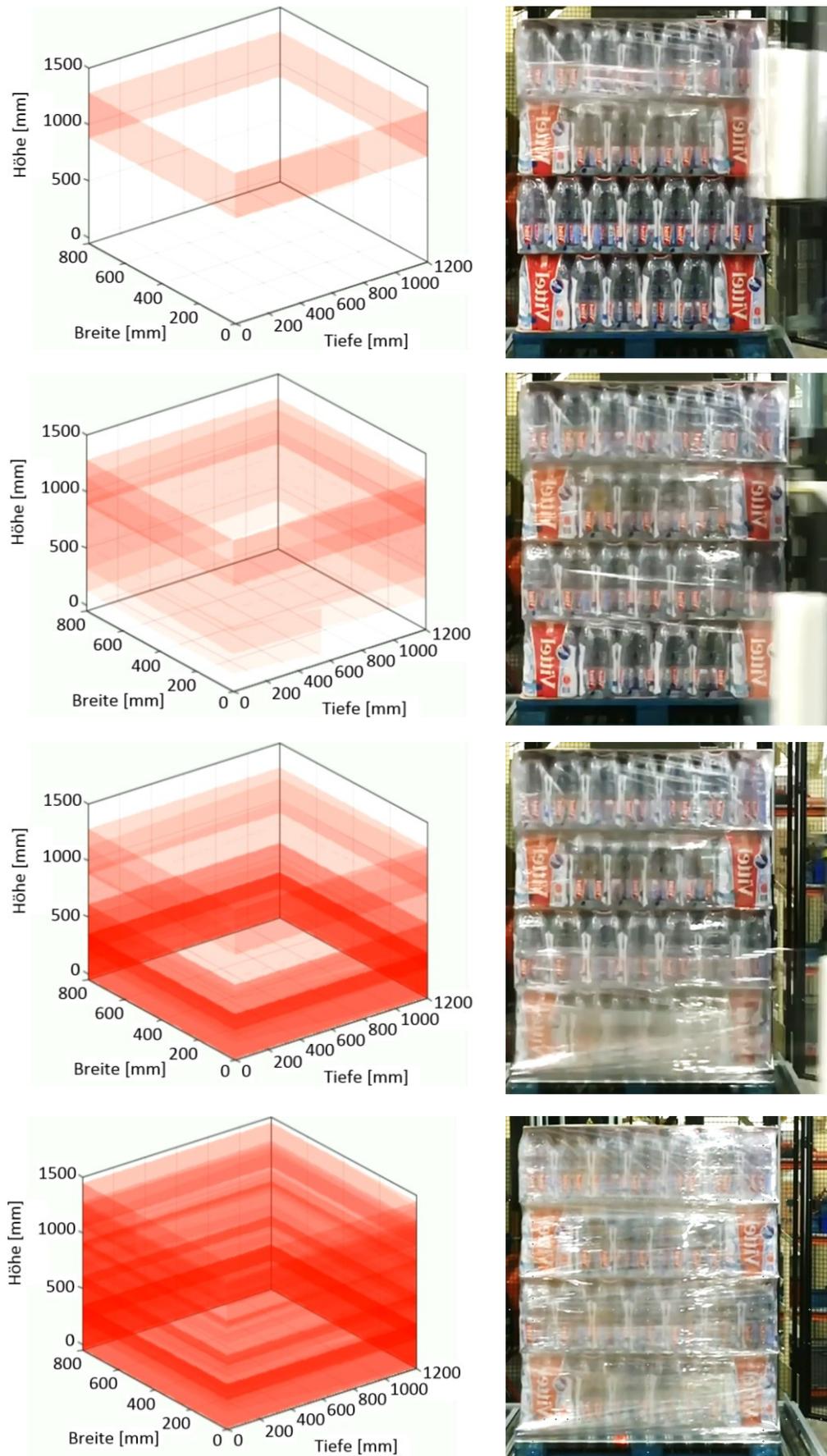


Abbildung 4.6: Abfolge des Streck-Wickelprozesses, links: Modell, rechts: Fotografie zum entsprechenden Zeitpunkt im realen Prozess.

Neben der vertikalen Position der Polygone auf der (virtuellen) Palette und neben deren Steigungswinkel wird auch deren vertikale Ausdehnung h_1 sowie eine ihnen zugewiesene Dicke d_1 in Abhängigkeit von den Prozessparametern variiert. Weil die Deformation der PE-Folie im Streck-Wickelprozess einem uniaxialen Lastfall nahekammt, diesem aber nicht exakt entspricht, basiert die durch Polygone repräsentierte Foliengeometrie auf Messergebnissen, die im Rahmen der in Abbildung 3.10 dargestellten Experimente erfasst wurden. Wie Abbildung 4.7 darstellt, approximiert Gleichungen (4.13) die Messergebnisse der Folienbreite bzw. die dem Polygon zuzuweisende Höhe h_1 . Gleichung (4.14) leitet unter der Annahme eines konstanten Volumens die sich ergebende Materialstärke bzw. die dem Polygon zuzuweisende Dicke d_1 ab.

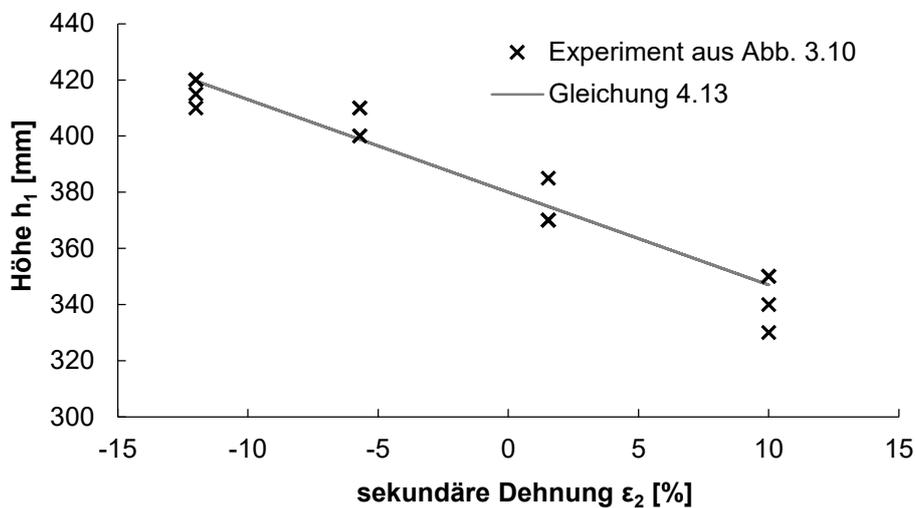


Abbildung 4.7: Approximation der gemessenen Breite der Folie (bzw. der Höhe h_1 des Polygons im Modell) nach dem Verstrecken der Folie

Es ergeben sich die Höhe h_1 eines Polygons und für die dem Polygon zugewiesene Materialstärke d_1 :

$$h_1 = 380 \text{ mm} - 330 \text{ mm} * \epsilon_2 \quad (4.13)$$

$$d_1 = \frac{h_0 * d_0}{h_1 * (\epsilon_{\text{ges}} + 1)} \quad (4.14)$$

mit	h_0	Höhe der Folie vor dem Verstrecken (500mm)
	d_0	Materialstärke (23 μ m)
	h_1	Höhe des Polygons
	d_1	dem Polygon zugewiesene Dicke
	ϵ_2	sekundäre nominelle Dehnung in Maschinenrichtung
	ϵ_{ges}	gesamte nominelle Dehnung in Maschinenrichtung

Die Gesamtheit der erzeugten Polygone bildet die Verteilung der Stretchfolie auf der Palette ab. Für die Validierung des Prozessmodells bleibt die Materialstärke und Wickelkraft entlang einer Kante der Palette von zentraler Bedeutung. Zu diesem Zweck kreiert der Algorithmus eine Reihe von Stützpunkten entlang einer Kante oder in einem interessierenden Bereich, wie in Abbildung 4.8 skizziert.

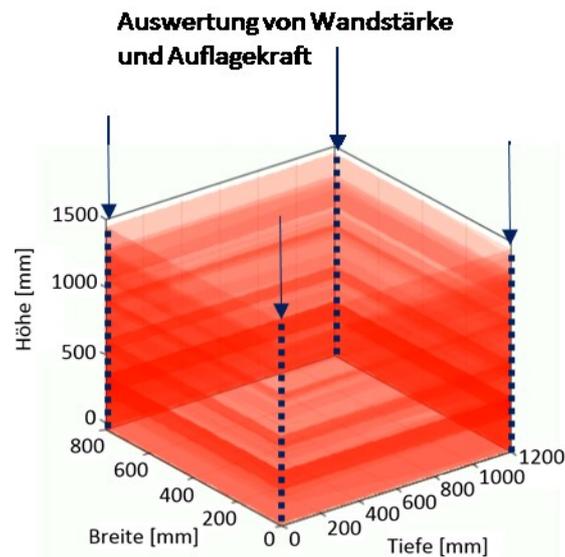


Abbildung 4.8: Auswertung der Wandstärke und der Wickelkraft des Folienbündels

Sind die Polygone erstellt und der gewünschte Satz von Stützpunkten festgelegt, wird bestimmt, ob diese Stützpunkte innerhalb oder außerhalb eines Polygons liegen. Hierzu löst das in der kommerziell verfügbaren Software Matlab programmierte Prozessmodell ein „Point in Polygon Problem“ mittels Algorithmischer Geometrie (AG). Darüber hinaus kann mit dem in Kapitel 4.1 kalibrierten Materialmodell für jedes Polygon abhängig von der individuellen Dehnungshistorie des repräsentierten Folienabschnittes ein Spannungswert und hiermit dessen Beitrag zur Wickelkraft berechnet werden. Hierbei wird der in Kapitel 3.1.3 für die verwendete Streck-Wickelmaschine gefundene Korrekturfaktor $k_{\text{Prozess}} = 1,8$ berücksichtigt. Für jedes Polygon werden die berechneten Beiträge der Wickelkraft gleichmäßig auf die mittels AG identifizierte Stützpunkte verteilt und zu einer Gesamtkraft an jedem Punkt addiert. Die Vergleichbarkeit mit den FEF-Messungen aus Kapitel 3.1.3 wird gewährleistet, indem der ermittelte Kraftverlauf entsprechend der FEF-Sensorik durch lineare Interpolation auf 14 Einzelkräfte aufgeteilt wird.

Abbildung 4.9 ermöglicht den Vergleich der vom Prozessmodell berechneten mit der gemessenen Wickelkraftverteilung. Obwohl das Verhalten der PE-Folie genau vorhergesagt werden kann (vgl. Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5) und obwohl die Korrelation zwischen im Prozess und während der Materialcharakterisierung

gemessenen Wickelspannungen σ_2 durch Division um k_{Prozess} berücksichtigt wird (vgl. Abbildung 3.16), weicht die Vorhersage des Prozessmodells signifikant von der Realität ab.

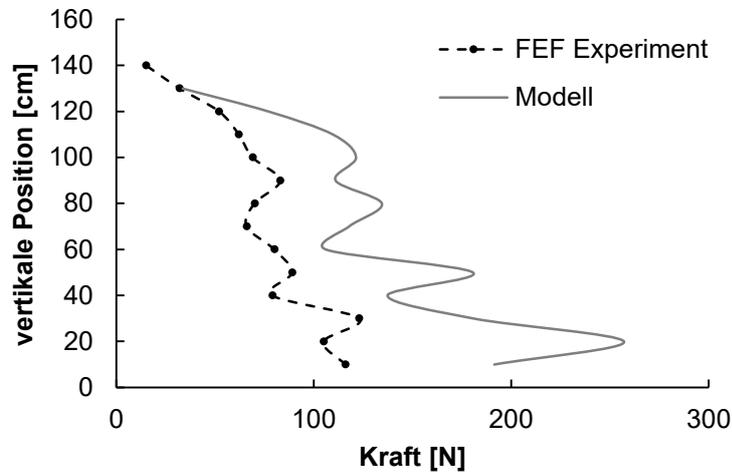


Abbildung 4.9: Vergleich der vorhergesagten und der gemessenen Wickelkraftverteilung ohne Berücksichtigung der Produktsteifigkeit (Umfang = 3972.5mm)

Anhand Abbildung 4.9 ist offensichtlich, dass das Prozessmodell einen wichtigen Effekt vernachlässigt, weil deutlich überhöhte Kräfte vorhergesagt werden. Eine dermaßen signifikante Abweichung deutet auf eine fehlerhafte Einschätzung eines signifikanten Prozessparameters hin. Die sekundäre Dehnung ε_2 hat in den FEF-Experimenten aus Kapitel 3.1.3 maßgeblichen Einfluss auf die gemessene Wickelkraft (vgl. Abbildung 3.14). Da prozessbedingte Abweichungen schon mit k_{Prozess} berücksichtigt sind, rückt die Palette selbst in den Vordergrund der Überlegung: Wenn sich deren Umfang während des Wickelprozesses ändert, weil die gestapelten Packs der applizierten Wickelkraft nachgeben, so wird die Folie zusätzlich entlastet und die Wickelkraft verringert. Die Vorhersage des Prozessmodells geht von einem Umfang U der Palette aus, der sich entweder durch Messung am Objekt oder nach Gleichung (4.15) aus der Anzahl, dem Stapelmuster und dem Durchmesser der undeformierten Flaschen ergibt.

$$U_0 = 2 * (14 * d_{\text{Flasche}}) + 2 * (9 * d_{\text{Flasche}}) + \pi * d_{\text{Flasche}} = 3972.5\text{mm} \quad (4.15)$$

Die Messung des Umfangs U der Palette, die in dem beobachteten Prozess verpackt wurde, ergibt jedoch 3755mm. Wird der Umfang der durch die Folienkraft komprimierten Palette für die Berechnung von ε_2 berücksichtigt, so ergibt sich die in Abbildung 4.10 dargestellte Wickelkraftverteilung.

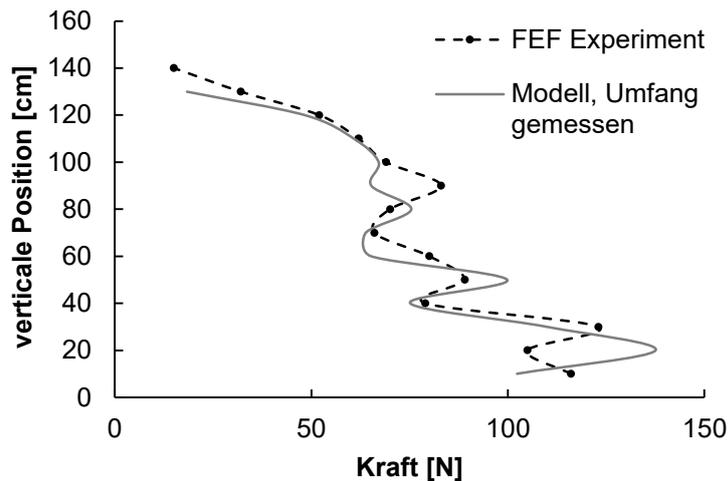


Abbildung 4.10: Vergleich der vorhergesagten und der gemessenen Wickelkraftverteilung unter Berücksichtigung der Produktsteifigkeit ($U = 3755\text{mm}$)

Der Vergleich der experimentell gemessenen mit der berechneten lokalen Verteilung der Wickelkraft bestätigt die prinzipielle Eignung des vorgestellten Materialmodells und verifiziert die analytische Darstellung des Wickelprozesses sowie die Eignung der hier angewandten Messmethoden zur Charakterisierung von Stretchfolien unter Prozessbedingungen.

Abweichungen beider Kurven voneinander sind selbst bei einer akkuraten Repräsentation des Prozesses zu tolerieren, da viele Ursachen unsystematischen und damit kaum kontrollierbaren Einfluss auf die Messergebnisse haben können. Die mechanischen Eigenschaften der PE-Folie sowie ihre Geometrie unterliegen Prozessschwankungen. Außerdem muss sich das FEF-System der komprimierten Palette anpassen, sodass die vertikale Ausrichtung der einzelnen Module nicht mehr akkurat gegeben sein kann. Der kombinierte Lastfall der Folie während des Streck-Wickels resultiert in einem komplexen Spannungszustand, der mit den verfügbaren Methoden nicht weiter charakterisiert werden kann. Die Genauigkeit der Vorhersage des Modells, die trotz der Breite des betrachteten Prozessfensters und trotz der zugrundeliegenden Breite des Intervalls auftretender Dehnraten erzielt wird, rechtfertigt die vereinfachende Annahme eines uniaxialen Lastfalls.

Im Hinblick auf die Vielzahl möglicher Fehlerquellen sind die Abweichungen der beiden Kurven aus Abbildung 4.10 als nicht signifikant zu bezeichnen. Mit Akzeptanz dieser Art von approximativer Vorhersagegenauigkeit ist die Gültigkeit des konstitutiven Modells der Folie sowie die Gültigkeit des gesamten Modells für die Vorhersage des Prozessergebnisses des Streck-Wickelprozesses nachgewiesen. Weil für die

Vorhersage der Wickelkraft der Arbeitspunkt der Folie vorhergesagt werden muss, ist auch die Steifigkeit der Folie in diesem Anwendungspunkt bekannt.

Kritisch und entscheidend für den praktischen Nutzen des Modells ist dessen Eignung, auch ohne eine existierende Palette und mit geringstmöglichem experimentellem Aufwand eine hinreichend genaue Vorhersage des Prozessergebnisses zu ermöglichen. Muss der Umfang der durch den Verpackungsprozess komprimierten Palette vorgegeben werden, so ist diese Bedingung nicht erfüllt. Folglich ist eine Erweiterung der Methode angeraten, mit der die Produktsteifigkeit berücksichtigt und die Vorhersage der Abnahme des Palettenumfangs durch den Streck-Wickelprozess ermöglicht werden kann.

Die Erweiterung soll sich gegenüber der herkömmlichen Methode einer FEM-Berechnung durch geringeren Aufwand der Kalibrierung und der Berechnung auszeichnen. So soll das Prozessmodell auch bei kurzen Entwicklungszyklen, häufig wechselnden Produktgeometrien oder Folienlieferanten in effektiver Weise helfen, einen geeigneten Streck-Wickelprozess zu finden.

Weil das aufgebrachte Folienpaket kaum Biegesteifigkeit aufweist, verteilt sich die Wickelkraft, wie in Abbildung 4.11 skizziert, im Wesentlichen auf die Flaschen in der Umgebung der vier vertikalen Kanten der Palette. Infolgedessen weicht die Form verpackter Paletten meist von der ursprünglich (in guter Näherung) rechteckigen Grundform ab.

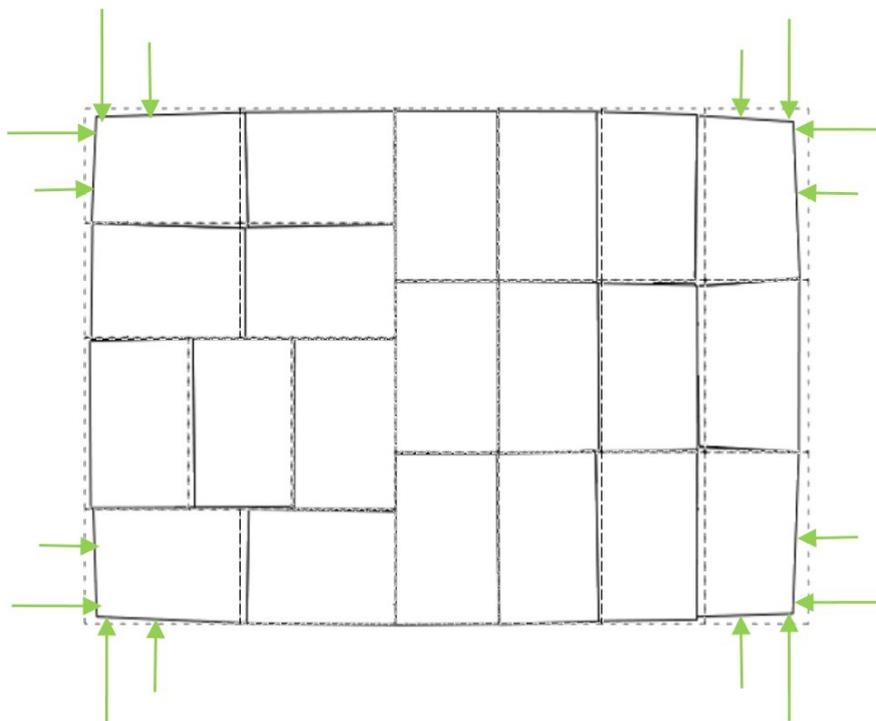


Abbildung 4.11: Wirkung der Stretchfolie auf die Form der Palette – skizzierte Draufsicht mit symbolischer Darstellung der Wickelkraftverteilung

Es ist nicht bekannt, wie genau sich die Wickelkraft F_W auf die Flaschen an den Rändern der Palette aufteilt. Vereinfachend wird angenommen, dass sich die beiden Komponenten k_i der Wickelkraft F_W (vgl. Abbildung 3.9) jeweils gleichmäßig auf alle vier Lagen der Palette und dort jeweils auf die Flasche an der Kante und ihre beiden direkten Nachbarn aufteilen. Eine Flasche erfährt demnach im Mittel eine Kontaktkraft k_F nach Gleichung (4.16):

$$k_F = \frac{(k_1 + k_2)}{2} \div 4 \div 2 \quad (4.16)$$

Die resultierende Deformation einer Flasche kann durch die Dehnung ε_D ihres Durchmessers d beschrieben werden.

$$\varepsilon_D = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (4.17)$$

Mit dem in Kapitel 3.2.2 charakterisierten Kraft-Wegverlauf $F(d)$ und den Gleichungen (4.16) und (4.17) lässt sich ein Zusammenhang $\varepsilon_D(k_F)$ ableiten. Weiter wird angenommen, dass ε_U , die Umfangsdehnung der Palette, ausschließliches Resultat der deformierten Flaschen ist und dass Gleichung (4.18) gilt:

$$\varepsilon_U = \varepsilon_D(k_F) \quad (4.18)$$

Auf Basis der experimentellen Ergebnisse der radial belasteten Flasche lässt sich eine prozentuale Deformation der Packs am Umfang der Palette, und damit die gesuchte Reduktion des Umfangs wie folgt berechnen:

$$U = U_0 * (1 + \varepsilon_D(k_F)) \quad (4.19)$$

Gleichung (4.19) wird im Rahmen der Routine iterativ gelöst, da k_F über k_1 und k_2 definiert ist, welche durch das Materialmodell, definiert durch die Gleichungen (4.1)-(4.12), mit der sekundären Dehnung ε_2 der Stretchfolie und deshalb erneut mit U zusammenhängt. Unter Anwendung der hier formulierten Erweiterung des Prozessmodells ergibt sich der in Abbildung 4.12 dargestellte Verlauf der Wickelkraft. Dieser unterscheidet sich kaum vom Verlauf aus Abbildung 4.10, da der berechnete Umfang nur um 0,024% vom gemessenen Wert abweicht.

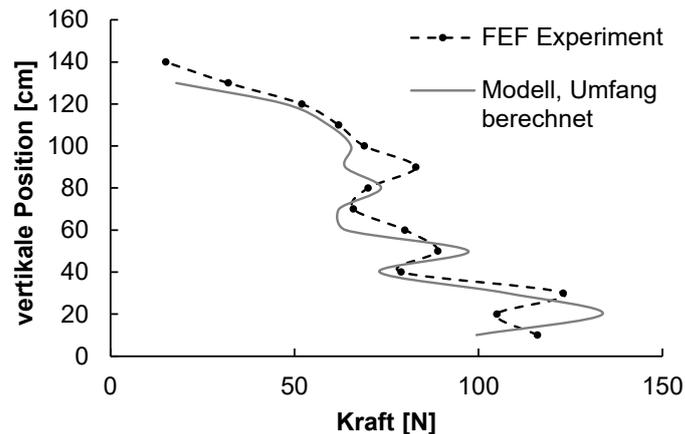


Abbildung 4.12: Vergleich der vorhergesagten und der gemessenen Wickelkraftverteilung unter Berücksichtigung der Produktsteifigkeit ($U = 3746\text{mm}$)

Die hohe Genauigkeit, mit der sowohl der Umfang der Palette nach dem Streck-Wickelprozess als auch die Wickelkraftverteilung vorhergesagt werden können, validiert die Erweiterung des Prozessmodells. Zusätzlich wird die zeitliche Entwicklung der Wickelkraft mit dem in Abbildung 3.12 dargestellten Datensatz im Prozessmodell hinterlegt, sodass eine Vorhersage der Wickelkraft zum Zeitpunkt $t=t_0$ unmittelbar nach dem Streck-Wickelprozess sowie zum Zeitpunkt $t=t_{20}$ zwanzig Minuten nach Abschluss des Streck-Wickelprozesses ermöglicht wird.

Das entwickelte Prozessmodell ist ein effektives Werkzeug, welches künftig in der Verpackungsentwicklung zur Optimierung der Palettenstabilität eingesetzt werden kann. Dabei hilft das Prozessmodell nicht nur bei der gezielten Optimierung von Wickelzyklen. Zusätzlich trägt der Ergebnisdatensatz des Prozessmodells im Rahmen einer Finite-Elemente-Analyse (FEA) der gesamten Palette dazu bei, den experimentellen Aufwand bei der Entwicklung stabiler Verpackungslösungen zu reduzieren. Im Folgenden wird der Aufbau des FE-Modells der gesamten Palette beschrieben.

4.3 Strukturmodellierung

Das vorliegende Kapitel widmet sich der Entwicklung von Strukturmodellen des Packs und des Kartoneinlegers, die in Kombination mit einer geeigneten numerischen Repräsentation der Stretchfolie auf der Palette und mit tribologisch realistischen Kontaktbedingungen ein numerisches Modell der transportfertigen Palette ergeben. Dieses Palettenmodell wird anschließend in Kapitel 4.4 experimentell verifiziert, um in Kapitel 5 die zielgerichtete mechanische Optimierung der Palette in Bezug auf ihre Formstabilität während des LKW-Transportes zu ermöglichen. Die Strukturmodelle

entstehen in der kommerziell verfügbaren FE-Software ABAQUS. Mit der zentralen Differenzenmethode wird ein explizites Integrationsverfahren gewählt, damit unstetige, dynamische Vorgänge sowie der Einfluss von Trägheitskräften realistisch abgebildet werden können.

4.3.1 Vereinfachte mechanische Modellierung des Six-Packs

Das Strukturmodell des Getränkepacks soll dessen mechanisches Verhalten als Bauteil der transportbereiten Palette derart realistisch wiedergeben, dass die Antwort der Palette, beziehungsweise deren globale Deformation als Reaktion auf transporttypische Anregungen, berechenbar wird. Die Güte sämtlicher im Palettenmodell vereinten Strukturmodelle bemisst sich demnach an der Vorhersagegenauigkeit der Formstabilität der Palette und an der Anwendbarkeit des Palettenmodells im industriellen Alltag der Verpackungsentwicklung.

Die vorgesehene Anwendung des Palettenmodells erfordert einerseits, dass die enthaltenen Strukturmodelle für ein breites Spektrum an möglichen Verpackungskonzepten ihre Gültigkeit behalten. Folglich muss auch das Modell des Six-Packs mit geringem experimentellem Aufwand, beispielsweise durch die in Kapitel 3 dargestellten Methoden, kalibrierbar und adaptierbar konzipiert werden. Andererseits sollte die Simulationszeit, die zur Bewertung eines Verpackungskonzeptes erforderlich ist, den zeitlichen Aufwand einer physischen Testreihe nicht wesentlich übersteigen. Idealerweise soll das Palettenmodell über Nacht, also binnen 12 Stunden, eine Vorhersage und damit eine Bewertung der Verpackungsstrategie ermöglichen. Allerdings sind 66 Sekunden Echtzeit zu simulieren, wenn nur eine Testphase des mit Abbildung 3.43 definierten repräsentativen Transportszenarios simuliert wird.

Fröstl [62] entwickelt im Rahmen einer vom Autor dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeit ein bestehendes FE-Modell der Flaschen sowie ein in der Literatur [64] beschriebenes Modell der Schrumpffolie weiter zu dem in Abbildung 4.13 dargestellten FE-Modell des Packs aus sechs 1,5l PET-Flaschen. Dieses Modell ist detailliert in der Geometrie und genau in der Repräsentation des mechanischen Verhaltens des Getränkepacks, erfüllt aber nicht die Anforderungen an den zulässigen Rechenaufwand. Das innerhalb der folgenden Abschnitte vorgestellte vereinfachte Strukturmodell des Getränkepacks ist ebenfalls in Abbildung 4.13 dargestellt, erfüllt aber sowohl die Anforderungen an die Genauigkeit als auch die Anforderungen an den maximalen Rechenaufwand.

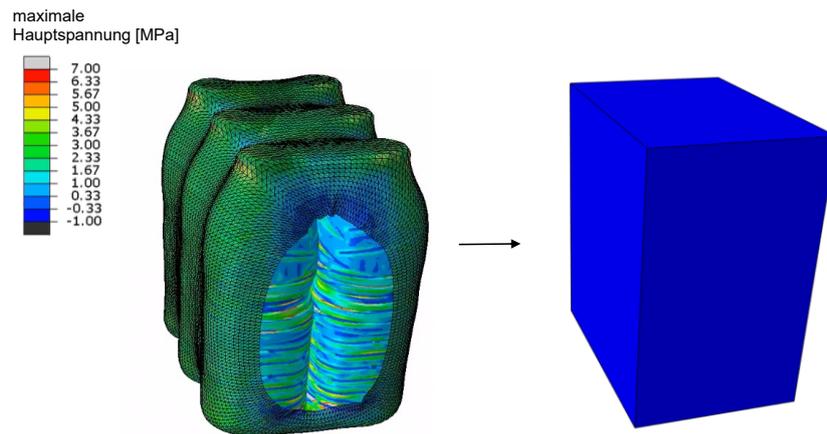


Abbildung 4.13: links: detailliertes Packmodell für den Pack mit sechs 1,5l PET-Flaschen, rechts: vereinfachtes Packmodell als Strukturelement

Der Rechenaufwand wird durch drastische Reduzierung der beteiligten Elementanzahl auf ein Element minimiert. Die Dichte dieses Elements wird so gewählt, dass dessen Masse der Masse des realen Packs entspricht. Dieses in Abbildung 4.13 dargestellte Element muss nicht als finites Element, sondern vielmehr als Strukturelement verstanden werden.

Für die Modellierung des mechanischen Verhaltens des Getränkepacks wird der explizite Solver über die Benutzerschnittstelle VUMAT mit einem selbst programmierten numerischen Modell für dessen Strukturmechanik gekoppelt. Damit das Modell unabhängig von den äußeren Abmaßen des Packs anwendbar bleibt, arbeitet die Routine, wie ein Materialmodell, mit dem Spannungstensor σ und dem Dehnungstensor ϵ des Strukturelementes.

Basis für die Kalibrierung des mechanischen Verhaltens des Packs sind die in Tabelle 3.3 dargestellten Kraft-Weg-Beziehungen. Fünf von sechs der zur Kalibrierung benötigten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen können unter Berücksichtigung der Geometrie des Packs ($l \times b \times h = 264 \text{ mm} \times 176 \text{ mm} \times 322.6 \text{ mm}$) direkt aus den in Tabelle 3.3 dargestellten Kraft-Weg-Beziehungen ermittelt werden. Diese werden der Routine tabellarisch hinterlegt. Während der Simulation wird linear interpoliert und in seltenen Fällen linear extrapoliert. Der dritte Scher-Lastfall ist unbedeutend für den LKW-Transport, weil der LKW sich nur langsam um seine Hochachse dreht. Deshalb werden hierfür ebenfalls die experimentellen Ergebnisse des Lastfall 5 herangezogen. So sind es letztlich sechs Belastungspfade von experimentell ermittelten wahren Spannungs-Dehnungs-Beziehungen $\sigma_{ij}^{exp}(\epsilon_{ij}^{exp})$, die das Strukturmodell des Packs kalibrieren.

Im Strukturmodell wird der neue Spannungstensor $\boldsymbol{\sigma}_{t+\Delta t}$ für jeden Zeitschritt $t \rightarrow t+\Delta t$ auf Basis des alten Spannungstensors $\boldsymbol{\sigma}_t$, auf Basis des Tensors der Dehnungen $\boldsymbol{\varepsilon}_{t+\Delta t}$ und auf Basis von Statusvariablen berechnet. Das entwickelte Modell basiert auf orthotroper Elastizität. Wegen des „freien Volumens“ in einem Getränkepack können in den Experimenten aus Tabelle 3.3 keine signifikanten Querkontraktionen festgestellt werden. Folglich hat die Steifigkeitsmatrix \mathbf{D}^{el} eines Packs lediglich Einträge auf der Hauptdiagonalen und die Spannungsberechnung vereinfacht sich wie folgt:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij,t+\Delta t} &= \sigma_{ij,t} + \Delta\sigma_{ij} && \text{mit} \\ \Delta\sigma_{ij} &= D_{ij}^{el} \cdot \Delta\varepsilon_{ij}^{el} && \text{für } i = j \leq 3, \\ \Delta\sigma_{ij} &= D_{ij}^{el} \cdot \Delta\gamma_{ij}^{el} = D_{ij} \cdot 2 \cdot \Delta\varepsilon_{ij}^{el} && \text{für } i = j > 3\end{aligned}\quad (4.20)$$

Hierin sind σ_{ij} und D_{ij}^{el} die Einträge der Tensoren $\boldsymbol{\sigma}$ und \mathbf{D}^{el} an den Stellen i und j . Die Hypoelastizität des Packs wird abgebildet, indem D_{ij}^{el} abhängig von der elastischen Dehnung ε_{ij}^{el} definiert wird. Die Beziehung $D_{ij}^{el}(\varepsilon_{ij}^{el})$ wird dabei direkt aus experimentellen Daten $\sigma_{ij}^{exp}(\varepsilon_{ij}^{exp})$ abgeleitet. Für die Einträge der Steifigkeitsmatrix $D_{ij}^{el}(\varepsilon_{ij}^{el})$ gilt:

$$\begin{aligned}D_{ij}^{el}(\varepsilon_{ij}^{el}) &= \frac{d\sigma_{ij}^{exp}}{d\varepsilon_{ij}^{exp}} && \text{für } |\varepsilon_{ij}^{el}| < \varepsilon_{ij,0}^{exp} \\ D_{ij}^{el}(\varepsilon_{ij}^{el}) &= \max\left(\frac{d\sigma_{ij}^{exp}}{d\varepsilon_{ij}^{exp}}\right) && \text{für } |\varepsilon_{ij}^{el}| \geq \varepsilon_{ij,0}^{exp}\end{aligned}\quad (4.21)$$

Der Bezugspunkt $\langle \varepsilon_{ij,0}^{exp}, \sigma_{ij,0}^{exp} \rangle$ in Gleichung (4.21) ist der Punkt im Belastungspfad der experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Beziehung $\sigma_{ij}^{exp}(\varepsilon_{ij}^{exp})$, indem ihre Ableitung maximal wird. Fällt $\langle \varepsilon_{ij,0}^{exp}, \sigma_{ij,0}^{exp} \rangle$ nicht in den Ursprung, dann verläuft der Belastungspfad, wie beispielsweise für den Lastfall 1, zunächst progressiv. Es wird angenommen, dass im progressiven Bereich von $\sigma_{ij}^{exp}(\varepsilon_{ij}^{exp})$ kein plastisches Fließen auftritt. Erst ab dem Wendepunkt $\langle \varepsilon_{ij,0}^{exp}, \sigma_{ij,0}^{exp} \rangle$ der Spannungs-Dehnungs-Beziehung wird ε_{ij} mit den Gleichungen (4.22) bis (4.26) in einen elastischen und in einen plastischen Anteil aufgeteilt. Die Einführung der Plastizität im Strukturmodell des Packs erfolgt, indem nur der elastische Anteil ε_{ij}^{el} der gesamten Dehnung ε_{ij} für die Spannungsberechnung herangezogen wird. Dabei setzt sich jeder Anteil ε_{ij} des

Dehnungstensors $\boldsymbol{\varepsilon}$ nach Gleichung (4.22) additiv aus einem elastischen Anteil ε_{ij}^{el} und einem plastischen Anteil ε_{ij}^{pl} zusammen.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{el} + \varepsilon_{ij}^{pl} \quad (4.22)$$

$$\Delta\varepsilon_{ij}^{el} = r_{ij}^{elastic} \cdot \Delta\varepsilon_{ij} \quad (4.23)$$

Hierin beschreibt $r_{ij}^{elastic}$ den Anteil des elastischen Dehninkrementes $\Delta\varepsilon_{ij}^{el}$ am gesamten Dehninkrement $\Delta\varepsilon_{ij}$. Es gilt:

$$r_{ij}^{elastic} = \frac{\Delta state_{ij}^{elastic}}{\Delta\varepsilon_{ij}} \quad (4.24)$$

Die Statusvariablen $state_{ij,t+\Delta t}^{elastic}$ stehen in Zusammenhang mit dem Betrag der elastischen Dehnung und sind mit Gleichung (4.25) abhängig von den Statusvariablen $state_{ij,t+\Delta t}^{plastic}$.

$$state_{ij,t+\Delta t}^{elastic} = \max[(|\varepsilon_{ij}| - state_{ij,t+\Delta t}^{plastic}), 0] \quad (4.25)$$

Die Statusvariablen $state_{ij,t+\Delta t}^{plastic}$ bilden nach Gleichung (4.26) den Betrag der zuvor maximal erreichten plastischen Dehnung.

$$state_{ij,t+\Delta t}^{plastic} = \max[state_{ij,t}^{plastic}, 0] \quad \text{für } |\varepsilon_{ij}| < \varepsilon_{ij,0}^{exp}$$

$$state_{ij,t+\Delta t}^{plastic} = \max \left[state_{ij,t}^{plastic}, |\varepsilon_{ij}| - \frac{\sigma_{ij}^{exp}(\varepsilon_{ij}) - \sigma_{ij,0}^{exp}}{D_{ij}^{el}(\varepsilon_{ij,0}^{exp})} + \varepsilon_{ij,0}^{exp} \right] \quad \text{für } |\varepsilon_{ij}| \geq \varepsilon_{ij,0}^{exp} \quad (4.26)$$

Abbildung 4.14 und Abbildung 4.15 vergleichen exemplarisch die Antwort des mit den Gleichungen (4.20) bis (4.26) konstituierten und experimentell kalibrierten Strukturmodells auf die Lastfälle eins und fünf mit den entsprechenden experimentellen Daten aus Tabelle 3.3. Da das Packmodell das Verhalten eines Strukturelementes konstituiert, wird die Ausgabe des Modells zunächst wieder in nominelle Spannungen und Dehnungen und anschließend über die Geometrie des Packs auf Kräfte und Wege zurückgerechnet, obwohl das Modell selbst, bedingt durch die Logik des FE-Solvers, mit Spannungen und Dehnungen arbeitet. Anhand Abbildung 4.14 wird deutlich, dass erst eine irreversible Verformung eintritt, sobald die Kraft nicht mehr progressiv mit dem Weg zunimmt. Der Entlastungspfad gleicht dem Belastungspfad, verläuft aber realistischerweise ohne den Wendepunkt bei der Position $x=7.8\text{mm}$.

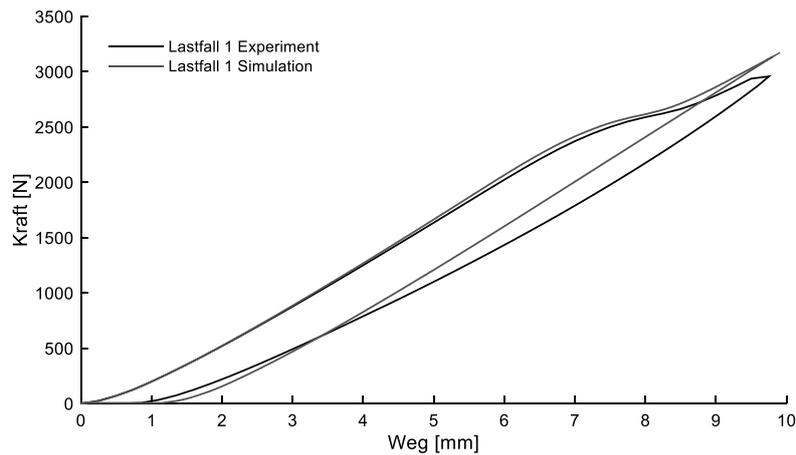


Abbildung 4.14: Vergleich der experimentellen Daten für den Lastfall 1 aus Tabelle 3.3 mit der Simulation des vereinfachten Packmodells

Abbildung 4.15 zeigt die Antwort des Strukturmodells auf eine wechselnde Belastung mit steigender Amplitude. Für positive Kräfte folgt die Belastungskurve der experimentellen Vorlage. Das Modell bildet ein plastisches Fließen mit isotroper Verfestigung ab. Entlastungskurven verlaufen mit der (maximalen) Anfangssteigung der experimentellen Kurve.

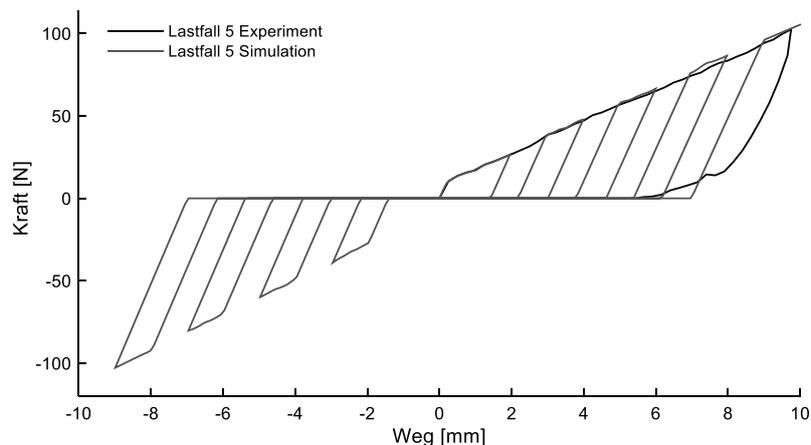


Abbildung 4.15: Vergleich der experimentellen Daten für den Lastfall 5 aus Tabelle 3.3 mit der Simulation des vereinfachten Packmodells

Im Ausgangszustand bewirkt die Schrumpffolie des Packs eine Kontaktkraft zwischen den Flaschen, die zu einer inneren Reibung führt. Bei einer ausgeprägten plastischen Deformation der Schrumpffolie nimmt die Normalkraft, und damit die innere Reibung ab, sofern auf den Pack keine horizontalen Kräfte wirken. Auf einer Palette wirken in der Regel hingegen Kräfte in horizontaler Richtung auf den stehenden Pack ein. Deshalb wirkt einer Scherbelastung des Packs als Bauteil der Palette eine innere Reibung entgegen, auch wenn eine ausgeprägte plastische Deformation der Schrumpffolie vorliegt und diese die Flaschen praktisch spannungsfrei umgibt. Aus

diesem Grund wird dem durch das Strukturmodell gegebenen mechanischen Widerstand des Packs gegenüber Scherbelastungen eine Coulomb'sche Reibung parallelgeschaltet, deren Reibkraft der Bewegungsrichtung entgegenwirkt. Die so geschaffene Energiedissipation unterdrückt unrealistische Oszillationen nach einer dynamischen Anregung des Packmodells, beeinflusst aber das modellierte quasistatische Verhalten nicht drastisch, wie in Abbildung 4.16 darstellt.

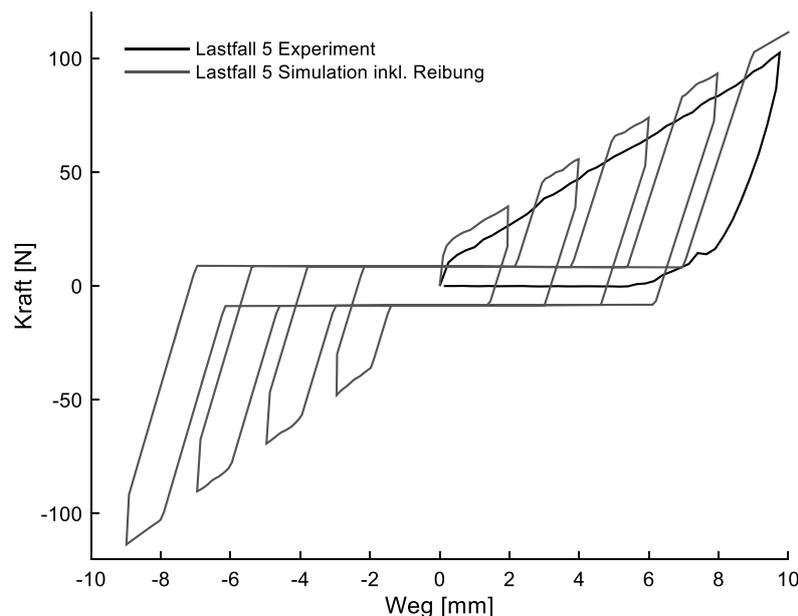


Abbildung 4.16: Vergleich der experimentellen Daten für den Lastfall 5 aus Tabelle 3.3 mit der Simulation des vereinfachten Packmodells unter Berücksichtigung eines parallel geschalteten Reibelementes

Weil sich die Güte des hier entwickelten Strukturmodells auch an der Vorhersagegenauigkeit der Formstabilität der Palette bemisst, erfolgt die experimentelle Verifikation des Strukturmodells für den Pack in Kapitel 4.4 zusammen mit der experimentellen Verifikation des Strukturmodells der Palette.

4.3.2 Mechanische Modellierung des Kartoneinlegers

Die Kartoneinleger sind für die Stabilität der Palette von zentraler Bedeutung. Einerseits wird die Bewegung aller Packs auf einer Ebene der Palette durch die Reibung zwischen Pack und Kartoneinleger miteinander gekoppelt. Andererseits wird der Flaschenboden geschützt, da die Aufstandsfläche auf dem Kartoneinleger größer ist, als diejenige auf einem Flaschendeckel. Es gibt aber noch einen weiteren positiven Aspekt für die Mechanik der Palette, den die Kartoneinleger mit sich bringen.

Die Geometrie der Getränkepacks beschränkt die Anzahl der Möglichkeiten, diese unter möglichst vollständiger Ausnutzung der Grundfläche der Holzpalette übereinander zu stapeln. Dabei wird ein möglichst formschlüssiger Verbund

angestrebt, sodass die einzelnen Packs nach Möglichkeit nie übereinander fluchtend platziert werden. Ein teilweise säulenartiger Aufbau der Palette lässt sich aber wegen der Geometrie des Packs oder wegen des Palletisierungsverfahren nicht immer vollständig vermeiden. Nachteil eines solchen säulenartigen Aufbaus ist, dass sich die einzelnen Säulen einer Palette relativ zueinander bewegen können, sodass sich die Palette global deformiert, ohne dass dabei lokale Deformationen der Packs auftreten, die dieser Bewegung Widerstand leisten. Die Kartoneinleger bewirken eine Kopplung dieser Säulen, sodass sich diese nicht mehr unabhängig voneinander bewegen können, ohne den mechanischen Widerstand des Kartoneinlegers zu überwinden. Die Modellierung der Kartoneinleger kann prinzipiell durch das für den Pack entwickelte Strukturmodell umgesetzt werden. Weil die mechanische Antwort des Kartoneinlegers aber ausgeprägte lineare Anfangsbereiche zeigt, kommt im Rahmen dieser Arbeit ein in der FE-Software implementiertes [91] transversalisotropes linear-elastisches Modell nach Gleichung (4.27) zum Einsatz. Vorteil des transversalisotropen linear-elastischen Materialmodells ist, dass es bei gleicher Elementgröße und bei vernachlässigbarem Einfluss auf die Genauigkeit des gesamten Palettenmodells um den Faktor 1,3 schneller rechnet als das in Kapitel 4.3.1 entstandene Strukturmodell. Die Struktur des Kartoneinlegers wird vereinfachend als homogenes Material aufgefasst. Aufgrund der Geometrie der Struktur erfolgt die Modellierung mit Schalenelementen und unter der Annahme eines ebenen Spannungszustandes.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (4.27)$$

Hierin sind ε_{11} und σ_{11} die Dehnung und Spannung in Maschinenrichtung, ε_{22} und σ_{22} sind Dehnung und Spannung in Querrichtung, γ_{12} und τ_{12} sind die Schubverzerrung und Schubspannung in der Ebene des Kartoneinlegers. E_1 und E_2 , die E-Moduln des Materials in die entsprechenden Richtungen, werden nach Gleichung (4.28) als Sekantenmodul zur Dehnung $\varepsilon_{ii} = 0,5\%$ aus den in Abbildung 3.22 dargestellten experimentellen Daten und der Probekörpergeometrie (Breite b und Dicke d) ermittelt.

$$E_i = \frac{F(\varepsilon_{ii} = 0,5\%)}{b \cdot d} \quad (4.28)$$

Aboura et. al [57] charakterisieren einen ähnlichen Kartoneinleger. Dieser Quelle wird der Wert für die Modellierung der Querkontraktion $\nu_{12} = 0,27$ entnommen. Außerdem

verifizieren Aboura et. al [57], dass die hier angewendete homogenisierte und zweidimensionale Repräsentation der Wellpappe für den hiesigen Zweck hinreichend genaue Ergebnisse liefert. Der Schubmodul G_{12} wird, wie in der Literatur [57], nach Gleichung (4.29) von Baum [92] bestimmt.

$$G_{12} = 0,387\sqrt{E_1 \cdot E_2} \quad (4.29)$$

Außerdem ist es in der FE-Software erforderlich, die Schubmoduln der Querschubverformung anzugeben [91]. Diese Werte werden ebenfalls der Literatur [57] entnommen. Tabelle 4.2 fasst die Materialparameter zusammen, mit denen die Struktur des Kartoneinlegers innerhalb des Modells der Palette repräsentiert wird.

Parameter	E_1	E_2	G_{12}	G_{13}	G_{23}	ν_{12}
Wert	397,42 MPa	258,2 MPa	121.1 MPa	2,32 MPa	3,93 MPa	0,27

Tabelle 4.2: Materialparameter für die Modellierung des Kartoneinlegers

4.3.3 Mechanische Modellierung der transportfertigen Palette

Mit den vorangehenden Kapiteln 4.3.1 und 4.3.2 sind die Strukturmodelle des Getränkepacks und des Kartoneinlegers gegeben. Instanzen dieser Modelle können in der Simulationsumgebung vervielfacht und so zueinander angeordnet werden, dass der Aufbau dem einer realen Palette mit Six-Packs der 1,5l PET-Flasche der Marke Vittel entspricht. Die hölzerne Palette wird als Starrkörper modelliert. Der beschriebene Aufbau ist in Abbildung 4.17 dargestellt.

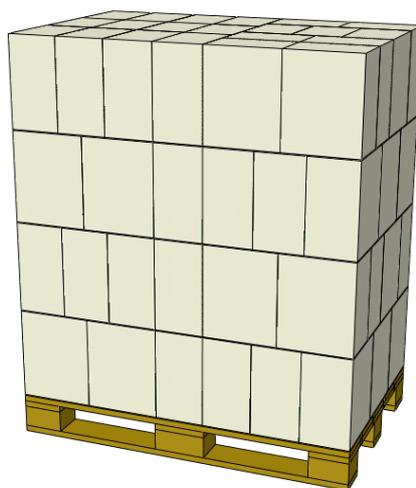


Abbildung 4.17: Aufbau des Strukturmodells der Palette mit Six-Packs der 1,5l PET-Flasche der Marke Vittel ohne Stretchfolie

Diesem Aufbau fehlen wesentliche Aspekte zu einem repräsentativen Strukturmodell der transportfertigen Palette. Zu nennen sind die numerische Repräsentation der Stretchfolie, die Wirkung der Gewichtskraft, die mechanischen Randbedingungen an das Äquivalent der hölzernen Palette sowie die Reibung zwischen sämtlichen Kontaktpartnern auf der Palette. Diese Aspekte werden dem Modell in den folgenden Abschnitten hinzugefügt.

Ein Materialmodell, welches die Stretchfolie im Streck-Wickelprozess beschreibt, ist in Kapitel 4.1 gegeben. Mit diesem Modell lässt sich einerseits die Materialverteilung der Folie auf der Palette und andererseits das mechanische Verhalten der Folie in ihrem Arbeitspunkt auf der Palette vorhersagen. Eine Simulation des Streck-Wickelprozesses zur Initialisierung des Palettenmodells ist deshalb nicht nötig. Stattdessen wird die Stretchfolie durch ein zusammenhängendes, flächiges Bauteil repräsentiert. Diese Annahme basiert auf der in Kapitel 3.2.4 charakterisierten Tribologie des Kontaktes der Stretchfolie mit sich selbst. Befindet sich die Folie auf der Palette, sind die einzelnen Lagen kaum zu trennen, sofern zwischen ihnen eine Normalkraft wirkt oder gewirkt hat. Die Oberfläche der Folie auf der Palette wird, sowie der Kartoneinleger, mit Schalenelementen modelliert. Jedem Element wird die durch das Prozessmodell berechnete Materialstärke des Foliensverbundes an der entsprechenden Stelle zugewiesen, wie Abbildung 4.18 darstellt.

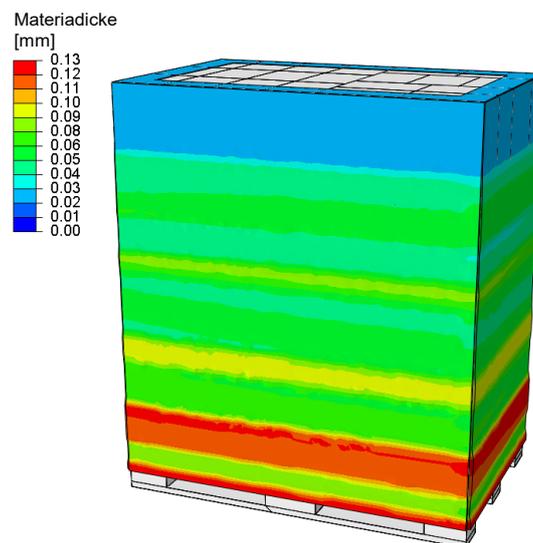


Abbildung 4.18: Aufbau des Strukturmodells der Palette inklusive Stretchfolie

Im realen Verpackungsprozess erfährt die Folie eine primäre Dehnung von 310% und wird anschließend entlastet, bevor sie auf der Palette zum Liegen kommt. Dieser Zustand stellt die Referenzkonfiguration für das zu modellierende Folienspaket dar.

Die Berechnung der Materialparameter für das elastoplastische Modell erfolgt auf Basis des bereits existierenden und kalibrierten Materialmodells. Das in Kapitel 4.1 beschriebene Materialmodell kann beantworten, wie sich die Folie nach einer solchen Vordehnung verhält. Hierfür wird die Antwort des Modells auf Dehnungshistorien untersucht, die, wie in Realität, mit einer primären Dehnung von 310% beginnen. Wie Abbildung 4.19 zeigt, verhält sich die Folie ihrem Arbeitspunkt auf der Palette in guter Näherung linear-elastisch und mit zunehmender Dehnung elastoplastisch.

Das in Abbildung 4.19 dargestellte Materialverhalten beschreibt den verwendeten Folientyp (Typ 1). Wird eine andere PE-Folie verwendet, so verlieren zunächst die in Tabelle 4.1 gegebenen Materialparameter ihre Gültigkeit. Aufgrund der in Kapitel 3.1.2 diskutierten Vergleichbarkeit der Stretchfolien sind die im Folgenden dargestellten Methoden jedoch auch auf andere PE-Folientypen anwendbar. Die in Tabelle 4.1 gegebenen Materialparameter können dann als Startwerte für den Least-Squares-Fit einer notwendigen Wiederholung der Kalibrierung verwendet werden.

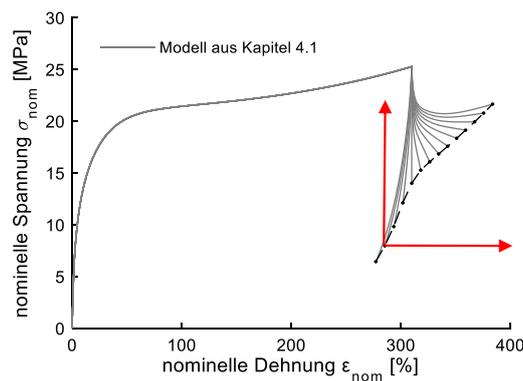


Abbildung 4.19: Generierung einer Datenbasis zur Kalibrierung des elastoplastischen Modells für die Stretchfolie im Strukturmodell der Palette. Das im Graph skizzierte Koordinatensystem deutet den Arbeitspunkt der Folie auf der Palette an.

Weil nicht der Streck-Wickelprozess, sondern nur das mechanische Verhalten der Folie in ihrem Arbeitsbereich auf der Palette modelliert werden muss, eignet sich ein in der FE-Software implementiertes elastoplastisches Materialmodell [91] mit isotroper Verfestigung für eine hinreichend realistische Beschreibung des mechanischen Verhaltens der applizierten Folie.

Da die Referenzkonfiguration des Strukturmodells der Folie durch deren Zustand nach dem Streck-Wickelprozess gegeben ist, ist es erforderlich, die aus dem kalibrierten Modell gewonnene Datenbasis in ein Koordinatensystem zu überführen, in dem sich Spannungen und Dehnungen auf diese Referenzkonfiguration beziehen. Dieses Referenzkoordinatensystem ist in Abbildung 4.19 darstellt. Das mechanische

Verhalten der Folie im Bezug die Referenzkonfiguration in ihrem Arbeitspunkt ist in Abbildung 4.20 dargestellt.

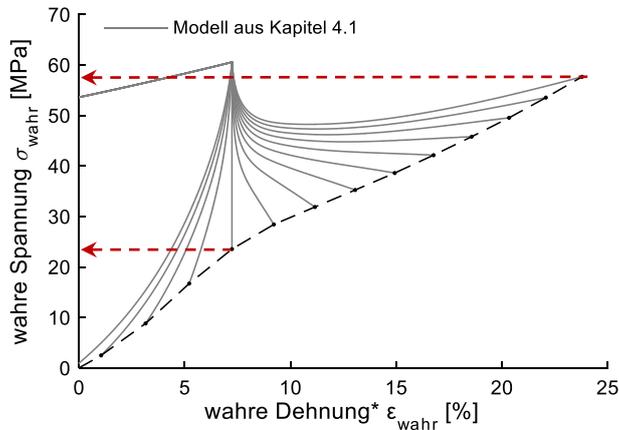


Abbildung 4.20: Transformation der in Abbildung 4.21 dargestellten Daten in das Koordinatensystem des Arbeitspunktes der Folie. *Die Wahre Dehnung berücksichtigt die Referenzkonfiguration der um 310% Vorgedehnten und anschließend mit einer Sekundärdehnung von -7% entlasteten Folie. Die wahre Spannung berücksichtigt ebenfalls diese Referenzkonfiguration.

Anhand der Daten aus Abbildung 4.20 lassen sich die Materialparameter für das elastoplastische Modell bestimmen. Die Definition der isotropen Verfestigung erfolgt durch die Angabe von zwei Stützpunkten. Die gefundenen Materialparameter sowie die Stützpunkte sind in Tabelle 4.3 aufgelistet. Der Wert für die Querkontraktionszahl ν stammt aus der Literatur [85] (siehe auch Tabelle 4.1).

Parameter	E	ν	$\sigma_F(\epsilon_{pl} = 0\%)$	$\sigma_F(\epsilon_{pl} = 4.15\%)$
berechneter Wert	294,3MPa	0,46	23,7 MPa	57,8 MPa

Tabelle 4.3: Materialparameter für die Modellierung der Stretchfolie als Teil des Strukturmodells der Palette

Wie in Kapitel 4.2 diskutiert, bewirkt die Folie eine Deformation der flexiblen Produkte, die nicht zu vernachlässigen ist. Dieser Zustand wird im Modell durch einen ersten Simulationsschritt erreicht. Hierbei wird die Folie durch die per Prozessmodell errechnete Spannung in Ihrem Arbeitspunkt vorbelastet. Während dieses vorbereitenden Simulationsschritts steigt außerdem die Erdbeschleunigung binnen einer Sekunde auf ihren natürlichen Wert ($9,81\text{m/s}^2$) an und belastet somit das Verpackungssystem. Das Äquivalent der hölzernen Palette bleibt dabei fest eingespannt. Mit Abschluss dieses Schrittes startet die eigentliche Transportsimulation. Die Ausgangskonfiguration der Palette vor der Transportsimulation ist in Abbildung 4.22 dargestellt.



Abbildung 4.22: Aufbau des Strukturmodells der Palette in der Ausgangskonfiguration

Während der eigentlichen Transportsimulation wird das Äquivalent der hölzernen Palette exakt mit der während der Testphase gemessenen Bewegung des Hexapodtisches angeregt. Wie in der Realität, werden Rotationen und transversale Beschleunigungen überlagert und ergeben im Zusammenspiel in sehr guter Näherung das auf dem LKW gemessene Beschleunigungssignal.

Nicht zuletzt beeinflussen die tribologischen Eigenschaften der verschiedenen Kontaktpaarungen auf der Palette das mechanische Verhalten des Verpackungssystems. Die Reibkoeffizienten der auf der Palette auftretenden Kontaktpaarungen sind in Tabelle 3.4 aufgelistet und werden für die Simulation übernommen. Für Kontaktpaarungen mit Reibkoeffizienten größer eins wird ein Reibkoeffizient von 1,5 angenommen. Mit diesem Wert ist einerseits gewährleistet, dass die modellierten Reibkräfte in einer realistischen Größenordnung liegen. Andererseits wird eine Relativbewegung ermöglicht, sodass exzessive Verzerrungen der am Kontakt beteiligten Elemente verhindert werden und damit der Abbruch der Simulation verhindert wird.

4.4 Experimentelle Verifikation des Palettenmodells

Das Strukturmodell der transportfertigen Palette dient der Vorhersage ihrer Formstabilität während LKW-Transporten. Diese LKW-Transporte können durch den in Abbildung 3.43 definierten Testzyklus repräsentiert werden. Der Testzyklus beinhaltet eine zehnmütige Konditionierungsphase der Palette, die dazu gedacht ist, das Verpackungssystem in einen mechanisch stationären Zustand zu überführen. In dieser Konditionierungsphase schließen sich beispielsweise etwaige Lücken zwischen den Packs manuell aufgebauter Paletten. Außerdem können lokal plastische Deformationen auftreten, die aber noch nicht mit einer globalen Deformation des Verpackungssystems oder mit einer Schädigung der Flaschen einhergehen. Weil das Strukturmodell der Palette geometrisch ideal aufgebaut werden kann wird in der Simulation zugunsten der Rechenzeit auf diese Konditionierungsphase verzichtet.

Ferner wird das Strukturmodell der Palette für jede Testphase des in Abbildung 3.43 definierten Testzyklus in den Ausgangszustand versetzt, weil die fortschreitende Verzerrung der Elemente der Stretchfolie lokal zu immer kleiner werdenden Elementkantenlängen L_e und damit nach Gleichung (4.30) zu kleiner werdenden stabilen Zeitinkrementen Δt_{stab} sowie folglich zu höheren Rechenzeiten führt. In Gleichung (4.30) bezeichnen ρ und E die Dichte und die Steifigkeit der Stretchfolie.

$$\Delta t_{stab} \leq L_e \cdot \sqrt{\rho/E} \quad (4.30)$$

Diese Einschränkung wirkt sich allerdings nicht auf den Nutzen der Simulation aus, ähnliche Verpackungskonzepte zu vergleichen und zu bewerten. Auf dem Hexapod kippt die Palette, wenn sie mit einem auf $S_4=80\%$ skalierten Beschleunigungssignal des Flugplatztestes angeregt wird. Die Verifikation des Strukturmodells der Palette erfolgt deshalb einerseits anhand der für $S_3=70\%$ prognostizierten Deformationshistorie der Palette. Andererseits kann die Güte des Modells anhand lokaler und irreversibler Deformationen der Palette beurteilt werden, die in Experiment und Simulation nach einer Anregung mit einem Skalierungsfaktor von $S_4=80\%$ auftreten.

Für die Auswertung der Verschiebung der einzelnen Produktlagen werden in der Simulation Knoten der Stretchfolie herangezogen, die in ihrer Position den in Abbildung 3.44 dargestellten Messpositionen entsprechen. Damit auf die globale Deformation der Palette rückgeschlossen werden kann, stellt Abbildung 4.23 sowohl

die gemessenen als auch die durch das Modell prognostizierten Verschiebungen relativ zur bewegten Holzpalette dar.

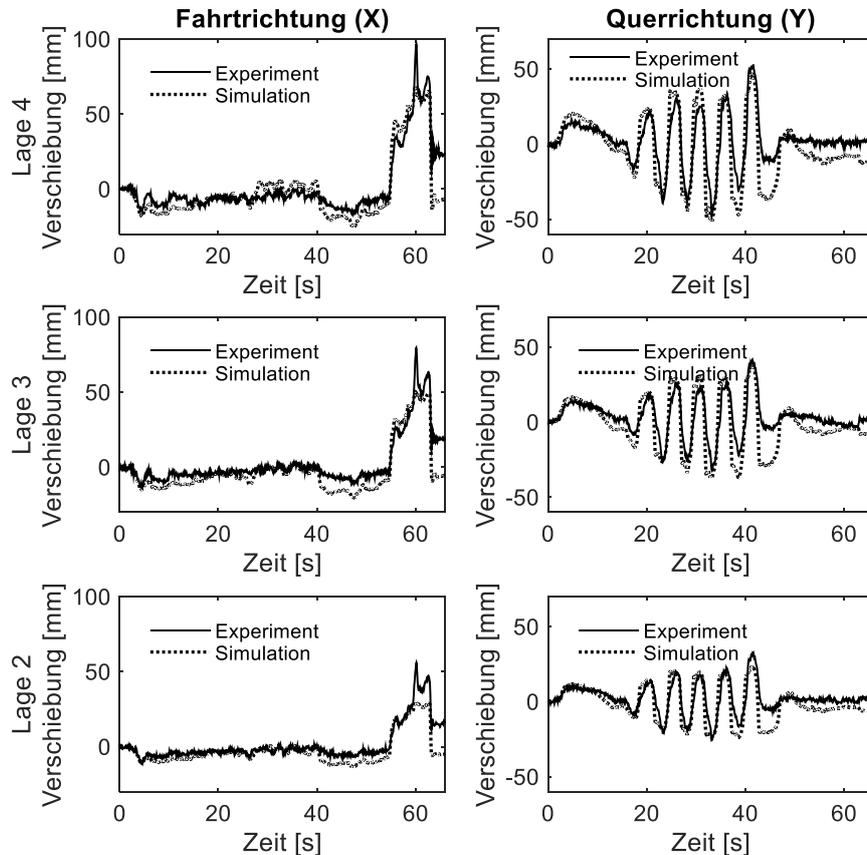


Abbildung 4.23: Deformation der Palette während der Testphase bei $S_3=70\%$ anhand der Verschiebung der Produkte der obersten drei Lagen in Fahrtrichtung (X) und Querrichtung (Y) im bewegten Koordinatensystem der Holzpalette, Experiment und Simulation

Das mechanische Verhalten der Palette wird während der Slalomfahrt sowohl bezüglich der Amplitude, als bezüglich der Phase der Verschiebung an allen Messpositionen realistisch wiedergegeben. Lediglich das Nachschwingen der Palette nach der letzten Kurve wird leicht überschätzt.

Querbeschleunigungen haben weder in der Simulation, noch in der Realität Einfluss auf die Deformation der Struktur in Fahrtrichtung. Hingegen äußert sich der Signalabschnitt des Bremsmanövers in einer Deformation der Palette von 96.7 mm, gemessen in der Mitte der obersten Produktlage, sodass in der Realität schließlich eine bleibende Verschiebung von 23.8 mm messbar bleibt. In der Simulation werden an entsprechender Stelle maximal 68.9 mm Verschiebung vorhergesagt und die Struktur schwingt an ihre Ursprungsposition zurück. Vor allem die tieferen Produktlagen reagieren in der Simulation weniger stark auf das Bremsmanöver.

Den globalen Deformationen nach zu urteilen antwortet das Modell insgesamt etwas elastischer, also mit weniger irreversibler Deformation, als die physisch vorhandene Palette. Eine mögliche Erklärung dieser leicht überschätzten Formstabilität liegt in der vereinfachten Geometrie des virtuellen Getränkepacks. In der Realität bewirkt der kreisförmige Querschnitt der Flaschen Freiräume zwischen den Packs, die wiederum kleine Verschiebungen ermöglichen. Darüber hinaus wurde die reale Palette, im Gegensatz zu ihrem virtuellen Äquivalent, durch vorherige Konditionierungs- und Testphasen möglicherweise strukturell geschwächt. Dieser Unsicherheit wird begegnet, indem im Folgenden lokale auftretende Phänomene verglichen werden. Nach dem Transporttest mit $S_4=80\%$ zeigt sich deutlich, wie das bestehende Verpackungssystem mit verschiedenen lokal auftretenden irreversiblen Deformationen auf eine transporttypische Belastung antwortet. Das Modell spiegelt die in Abbildung 3.51 dokumentierte plastische Scherdeformation der Packs in den Statusvariablen „ $state_{plastic,12}$ “ nach Gleichung (4.26) wider, wie Abbildung 4.24 zeigt.

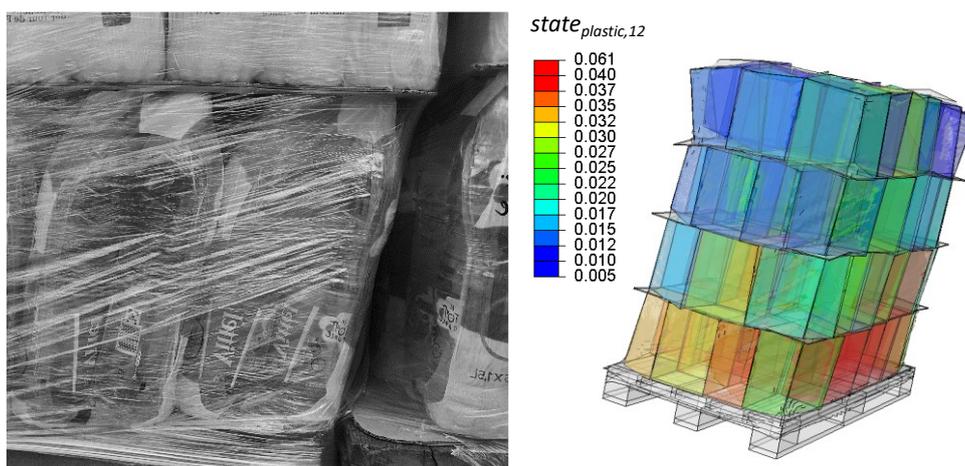


Abbildung 4.24: Scherdeformation des Packs in Realität und Simulation nach einem Transporttest mit dem Skalierungsfaktor $S_4=80\%$.

Die errechnete maximale plastische Scherdehnung der Packs von bis zu 6.1% kann daher als Indikator für die strukturelle Schwächung des Verpackungssystems dienen und kann damit die Grenze von dessen Formstabilität aufzeigen. Auch die plastische Deformation der Folie an den Kanten der Palette wird durch die Simulation vorhergesagt, wie Abbildung 4.25 darstellt.

Trotz der vielen Vereinfachungen, die nötig sind, in einem angemessenen Zeitrahmen und mit einem angemessenen Aufwand für die experimentelle Kalibrierung zu einem aussagekräftigen Ergebnis zu kommen, welches jedoch nicht den Anspruch einer

hundertprozentigen Übereinstimmung mit der Realität haben kann, zeigt sich ein wesentlicher Vorteil der Simulation gegenüber physischen Tests.

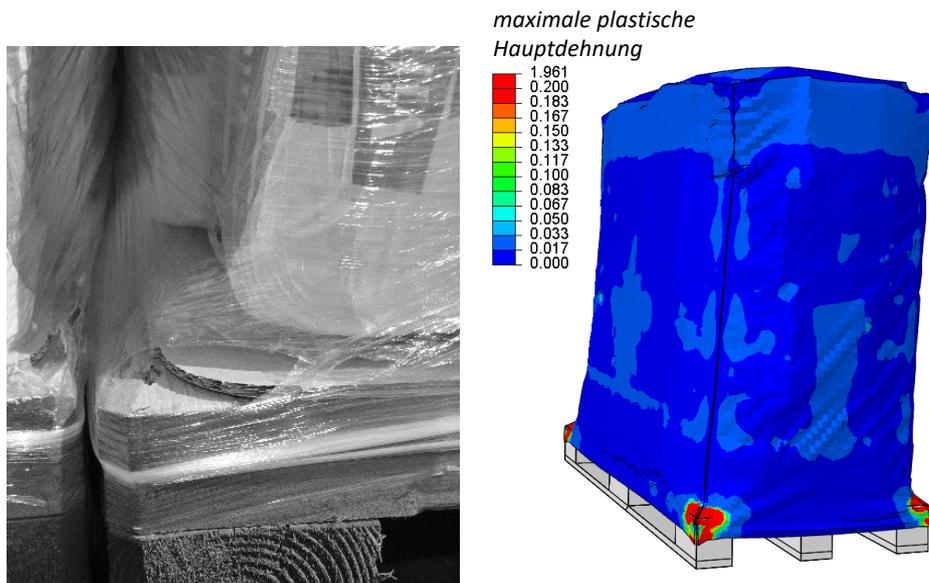


Abbildung 4.25: Vergleich des lokalen Versagens der Stretchfolie in Realität mit der plastischen Deformation in der Simulation nach einem Transporttest mit dem Skalierungsfaktor 80%.

Das Simulationsergebnis ermöglicht durch die Analyse der allumfänglich vorhandenen Daten zu dem simulierten mechanischen Problem tiefe Einblicke „in das Innere der Palette“, beziehungsweise in den Zustand einzelner Komponenten. Diese Einblicke sind messtechnisch nur mit immensem Aufwand zu realisieren und führen zudem zu einer Verfälschung des mechanischen Verhaltens.

Beispielsweise können die berechneten, lokal auftretenden irreversiblen Deformationen auch bei einer global kaum deformierten Palette als Indikator für den Grenzbereich der Formstabilität der Palette dienen. Im folgenden Kapitel wird das Palettenmodell auf stärkere Anregungen angewendet und ausgewertet, um eine optimierte Verpackungsstrategie zu entwickeln.

5 FE-gestützte Analyse und Optimierung

Das kalibrierte und verifizierte Modell der transportfertigen Palette wird in diesem Kapitel angewendet, um das mechanische Verhalten des Verpackungssystems während eines LKW-Transportes zu analysieren. Anschließend wird mit Hilfe der vorgestellten numerischen Methoden ein optimiertes Verpackungskonzept entwickelt, welches mit weniger Verpackungsmaterial zu einer formstabileren Palette führt, ohne dabei die primäre Verpackung, die PET-Flasche, zu ändern. Die Qualität des Verpackungskonzeptes wird mit den in Kapitel 3 entwickelten experimentellen Methoden verifiziert.

5.1 Modellbasierte mechanische Analyse der Verpackungsstrategie

Die Grenze der Formstabilität des Verpackungssystems ist einerseits mit einer unzulässigen bleibenden Deformation der gesamten Palette gegeben. Diese globale Deformation kann beispielsweise durch Verschiebungen der einzelnen Komponenten des Verpackungssystems relativ zueinander entstehen. Andererseits werden lokale Phänomene bereits in Kapitel 4 mit der globalen Form der Palette in Zusammenhang gebracht und damit als kritisch für deren Formstabilität identifiziert. Das Ergebnis einer FE-Simulation kann den Zusammenhang zwischen der Scherdeformation der Getränkepacks und der plastischen Deformation der Stretchfolie mit der globalen Deformation der Palette bestätigen. Wird das Modell des Verpackungssystems mit dem auf dem Hexapod gemessenen Beschleunigungssignal ohne Skalierungsfaktor angeregt, so ergibt sich ein eindeutiges Bild über den Zustand der Palette und ihrer Komponenten nach einem besonders intensiven Transportszenario.

Obwohl auf der Materialebene keine Versagenskriterien definiert sind und dementsprechend kein Materialversagen modelliert wird, deutet der Zustand einzelner Komponenten des Modells nach der Anregung mit dem unskalierten Beschleunigungssignal des Flugplatztestes auf ein Versagen des gesamten Verpackungskonzeptes hin. Abbildung 5.1 stellt das Modell der Palette und darin die Strukturmodelle von Packs dar, die aus diesem Szenario mit extremen Verzerrungen hervorgehen.

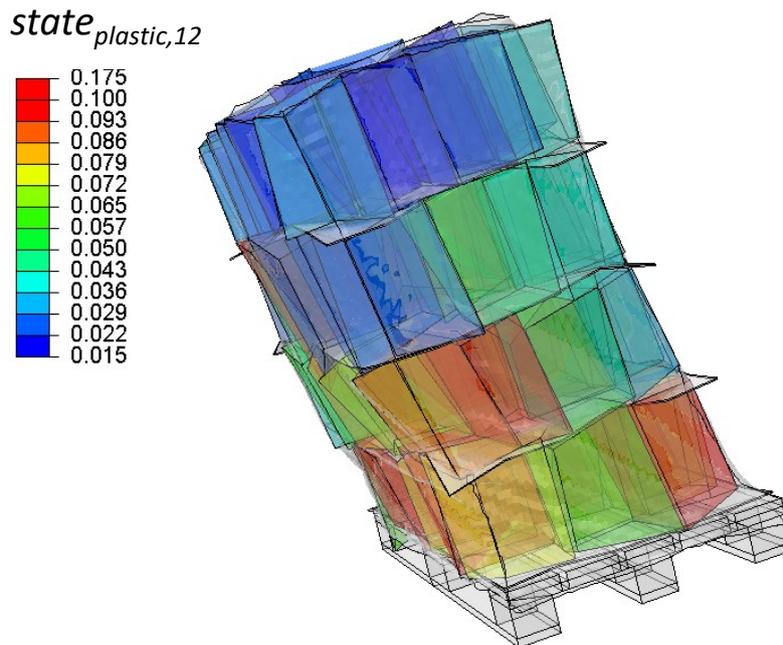


Abbildung 5.1: Berechnete Deformation der Palette und plastische Deformation der Packs während der Simulation des Bremsmanövers.

Die dargestellte plastische Scherdehnung „state_{plastic,12}“ von bis zu 17.5% bedeutet eine Neigung einzelner Packs um bis zu 20.5°. Einerseits ist für einen dermaßen deformierten Pack nicht mehr gewährleistet, dass die sechs Getränkeflaschen zusammenhalten, wenn Kunden einen solchen Pack tragen. Andererseits ist es wahrscheinlich, dass die Flaschen selbst Schaden nehmen, wenn sie im Winkel von 20.5° auf der darunter befindlichen Holzpalette stehen und gleichzeitig die Last der sich neigenden Palette auf sie einwirkt.

Auch das Äquivalent der Folie erfährt binnen des Verlaufes der FE-Simulation signifikante plastische Deformationen, die auf ein Versagen in der Realität hindeuten. In der Realität versagt die Folie an den Ecken der Holzpalette. Entsprechend finden sich dort auch im Modell die größten plastischen Dehnungen, wie Abbildung 5.2 exemplarisch zeigt. Die dargestellte plastische Dehnung von bis zu 260% entspricht wegen der Vordehnung um 310% einer Gesamtdehnung der Folie von 1376%. Anhand Abbildung 3.4 ist nachzuvollziehen, dass die Folie damit ihre Streckgrenze weit überschritten hat.

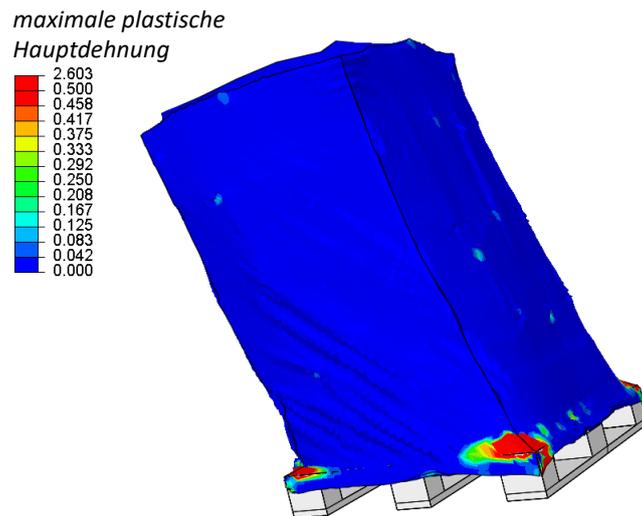


Abbildung 5.2: Berechnete Deformation der Palette und plastische Deformation der Stretchfolie während der Simulation des Bremsmanövers.

Betrachtet man den prognostizierten und in Abbildung 5.3 dargestellten Verlauf der globalen Deformation der Palette, so ist anhand der mit der Simulationszeit anwachsenden Amplitude der Verschiebung der einzelnen Produktlagen in Querrichtung auf eine Akkumulation irreversibler Deformationen und somit auf eine voranschreitende strukturmechanische Schwächung der Palette mit jeder Kurve zu schließen. Deshalb bleibt auch nach dem Bremsmanöver eine Verschiebung der obersten Produktlage in Fahrtrichtung von 87 mm bestehen.

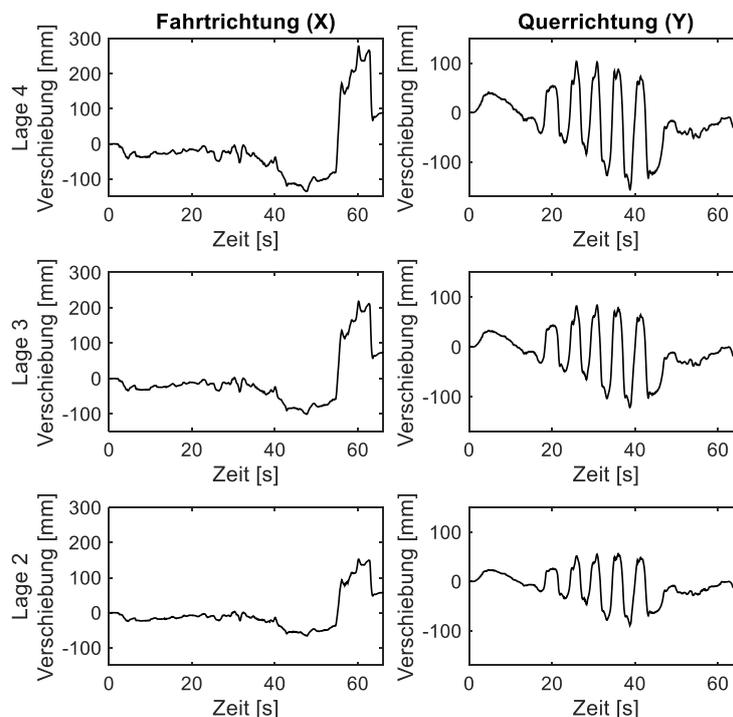


Abbildung 5.3: Deformation der Palette während der Testphase bei $S_6=100\%$ anhand der Verschiebung der Produkte der obersten drei Lagen in Fahrtrichtung (X) und Querrichtung (Y) im bewegten Koordinatensystem der Holzpalette, Simulation

Die prognostizierte Form der Palette nach dem Testszenario bei $S_6=100\%$ ist in Abbildung 5.4 dargestellt um zu verdeutlichen, dass bereits das Entladen dermaßen deformierter Paletten mit dem Gabelstapler sowie das Stapeln solcher Paletten in einem Hochregallager inakzeptable Risiken mit sich bringt.

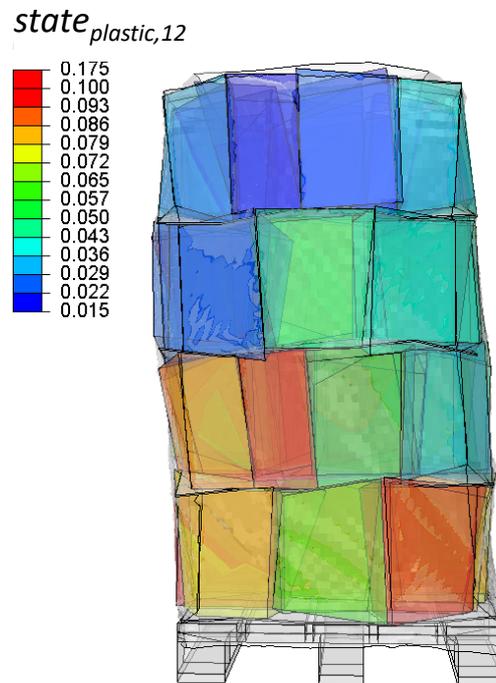


Abbildung 5.4: Prognostizierte Form der Palette nach dem Testszenario mit einem Skalierungsfaktor von 100%

Folglich können anhand der Simulation Schwachstellen des bisherigen Verpackungskonzeptes identifiziert werden, die bei intensiven Fahrmanövern zu einem globalen Versagen der Palette und ihrer Komponenten führen. Im Umkehrschluss erscheint die folgende These plausibel: Werden die plastische Scherdeformation des Packs sowie die plastische Deformation der Stretchfolie reduziert, so können auch die Akkumulation lokaler irreversibler Deformationen und die einhergehende voranschreitende Schwächung des Verpackungssystems reduziert oder vermieden werden, sodass eine formstabilere Palette entsteht.

5.2 FE-gestützte Konzeption einer mechanisch optimierten Palette

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem vorangehenden Kapitel entsteht in diesem Kapitel ein Konzept für die Optimierung der mechanischen Eigenschaften der Palette bei gleichzeitiger Reduktion des Materialeinsatzes.

Anders als die Stretchfolie wird die Schrumpffolie des Packs nicht vorgedehnt, bevor sie als Verpackung um die Flaschen gelegt wird. Die Schrumpffolie erreicht in ihrer Anwendung deshalb nicht den aus mechanischer Sicht günstigen Dehnungsverfestigungsbereich von PE. In diesem Bereich kann eine PE-Folie kaum noch weiter plastisch verformt werden, kann aber, trotz geringerer Materialstärke, höheren mechanischen Beanspruchungen standhalten, wie Abbildung 3.4 verdeutlicht. Darüber hinaus ergibt sich für das vorliegende Verpackungssystem allein aufgrund des Materialeinsatzes für die sekundäre Verpackung ein höheres Einsparpotenzial als für die tertiäre Verpackung. Insgesamt entfallen beim vorliegenden Verpackungskonzept 840g auf die Schrumpffolie, während die Palette von lediglich 360g Stretchfolie stabilisiert wird.

Daher konzentriert sich diese Arbeit im Folgenden auf die Optimierung der Palette durch eine mechanische Optimierung der sekundären Verpackung. Hierbei soll vor allem die Schersteifigkeit des Packs erhöht werden und das Potenzial für plastische Scherdeformationen vermindert werden. Im Hinblick auf dieses Ziel stellt der von Lancaster patentierte [93] und kommerziell verfügbare [94] Orbital Stretchwrapper (OSW) eine vielversprechende Alternative zum Schrumpfprozess dar. Hierbei wird, wie im Streck-Wickelpack der Palette, eine vorgedehnte PE-Folie mehrfach um die Flaschen gewickelt. Es entsteht der in Abbildung 5.5 rechts dargestellte Getränkepack, fortan als OSW-Pack bezeichnet.



Abbildung 5.5, links: Getränkepack in der bisherigen Ausführung, rechts: mechanisch optimierter OSW-Pack, verpackt durch Lanfranchi [94]

Ein Tragegriff wurde dem OSW-Pack nicht hinzugefügt, da er für die nachfolgenden Untersuchungen überflüssig ist. Insgesamt werden für den OSW-Pack nur 10g PE-Folie benötigt, was einer Gewichtsreduktion von über 50% gegenüber dem bisherigen Pack bedeutet. In Kapitel 3 wurde für den Kontakt der Stretchfolie der Palette mit sich selbst ein Reibkoeffizient größer 1 charakterisiert. Möglicherweise bewirkt das Streckwickeln der Packs auch diesbezüglich einen Vorteil. Da die experimentelle Evaluierung des Konzeptes mit Kosten verbunden ist, ist es sinnvoll, auch hier das FE-Modell einzusetzen, um die Erfolgsaussichten abzuschätzen. Für eine abschätzende Simulation wird angenommen, dass sich die Schersteifigkeit der Packs um den Faktor 1,5 erhöht und dass sich die Kontaktbedingungen der Stretchfolie der Palette in den Kontaktbedingungen des mit Stretchfolie umwickelten Packs wiederfinden. Die Schätzung beruht auf der Annahme von 50% Materialeinsatz mit dreifacher Steifigkeit (vgl. Abbildung 3.5 bzgl. des Einflusses der Dehnung auf die Steifigkeit von PE). Abbildung 5.6 untermauert mit dem Simulationsergebnis die Erfolgsaussichten des beschriebenen Konzeptes. Die simulierten Verschiebungen unterscheiden sich deutlich für beide Konzepte. Anhand der kleineren Bewegungsamplituden und anhand der geringeren bleibenden Deformation wird das Potenzial des OSW-Konzeptes offensichtlich.

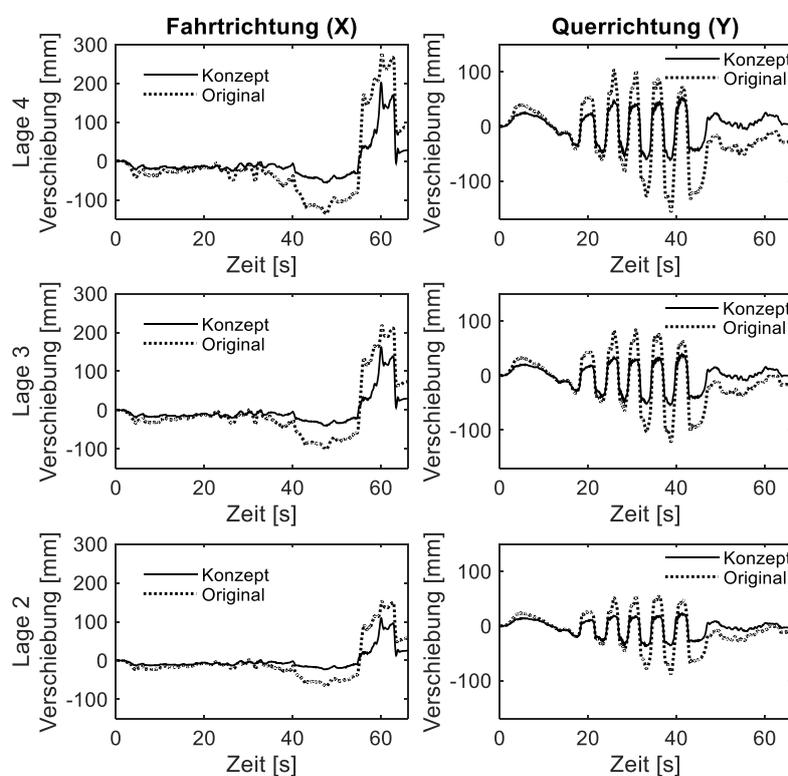


Abbildung 5.6: Deformation der Palette während der Testphase bei $m=100\%$ anhand der Verschiebung der Produkte der obersten drei Lagen in Fahrtrichtung (X) und Querrichtung (Y) im bewegten Koordinatensystem der Holzpalette, Simulation für OSW-Konzept und Original

Während das Verpackungssystem im extremen Flugplatztest, wie in Kapitel 5.1 diskutiert, für das bisherige Original-Konzept versagt, prognostiziert die Simulation dem optimierten OSW-Konzept nur minimale bleibende Deformationen und bedeutend weniger plastische Scherdeformation, wie Abbildung 5.7 darstellt. Im folgenden Kapitel wird diese Vorhersage überprüft.



Abbildung 5.7: Vergleich der prognostizierten globalen Deformation der Palette sowie der plastischen Scherdeformation der Packs für die bisherige Palette (links) und das optimierte OSW-Konzept (rechts)

5.3 Experimentelle Validierung des Palettenmodells

Ziel dieses Kapitels ist nicht nur, das mithilfe der FE-Simulation gefundene OSW-Konzept unter Verwendung der in Kapitel 3 entwickelten experimentellen Methoden zu bewerten, sondern auch, die in dieser Arbeit entwickelten numerischen Methoden, die im Strukturmodell der Palette münden, zu validieren.

Nach der vielversprechenden Prognose für die Formstabilität des vorgeschlagenen alternativen Verpackungskonzeptes soll eine Palette mit den OSW-Getränkepacks aufgebaut werden, um sie einem Transporttest zu unterziehen. Zuvor wurde angenommen, dass sich das alternative Verpackungskonzept günstig auf das mechanische Verhalten des sekundären Packs auswirkt. Diese Annahme wird überprüft, bevor die Ergebnisse des Transporttestes der mechanisch optimierten Palette diskutiert werden. Weil das mechanische Verhalten des Packs für die Lastfälle eins bis drei aus Tabelle 3.3 wesentlich vom mechanischen Verhalten der Flasche bestimmt wird und diese im OSW-Pack nicht geändert wurde, liegt der Fokus in den folgenden Abschnitten auf den Lastfällen vier und fünf.

Abbildung 5.8 verdeutlicht das unterschiedliche mechanische Verhalten des originalen und des optimierten Getränkepacks für den Lastfall vier aus Tabelle 3.3. Insgesamt verläuft die Kraft-Weg-Kurve für den optimierten OSW-Pack auf niedrigerem Niveau. Da hier insgesamt nur 10g anstelle von 21g PE-Folie verwendet wurden, kann auf Basis der beiden dargestellten Kurvenverläufe nicht eindeutig beurteilt werden, welches Verpackungskonzept das für die Formstabilität der Palette günstigere mechanische Verhalten bietet. Der im Falle des OSW-Packs flacher verlaufende Entlastungspfad kann einen Vorteil darstellen. Da der Kunststoff über sein plastisches Plateau hinausgestreckt ist, sind eingebrachte Deformationen reversibler. In der Kraft-Weg-Kurve des optimierten Packs äußert sich diese optimierte Elastizität durch einen weniger steil verlaufenden Entlastungspfad.

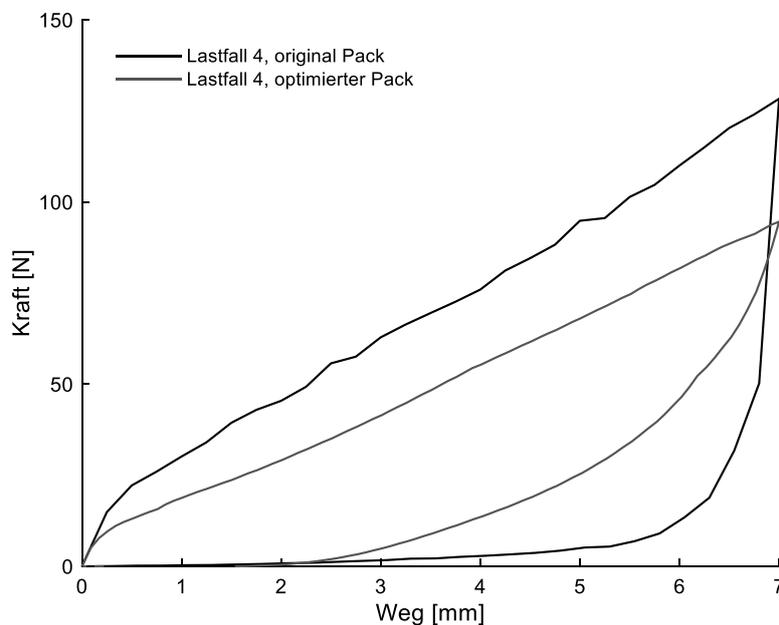


Abbildung 5.8: Vergleich der mechanischen Eigenschaften des optimierten Packs mit den mechanischen Eigenschaften des bisher verwendeten Packs im Lastfall vier aus Tabelle 3.3

Die Kraft-Weg-Kurven der beiden konkurrierenden Konzepte sind für den Lastfall fünf in Abbildung 5.9 dargestellt. Hier verläuft die Kurve des optimierten Packs während der Belastungsphase deutlich steiler, der Pack leistet also mehr Widerstand. Für den Lastfall fünf bestätigt sich der zuvor angenommene Faktor von 1,5 zur Referenz, dem Originalpack.

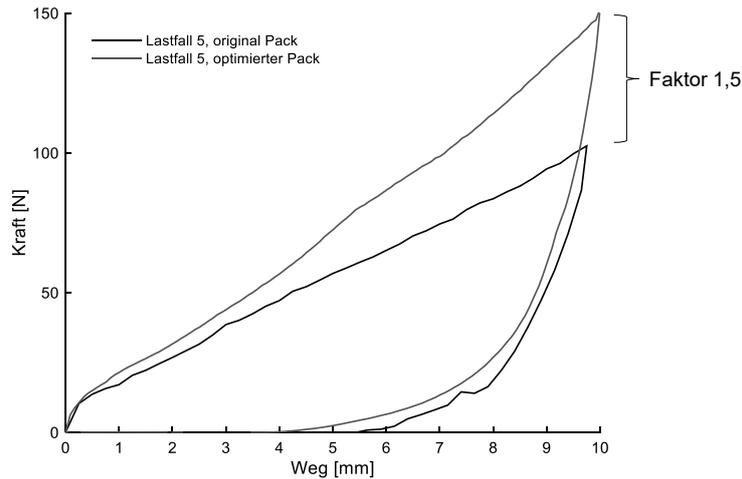


Abbildung 5.9: Vergleich der mechanischen Eigenschaften des optimierten Packs mit den mechanischen Eigenschaften des bisher verwendeten Packs im Lastfall fünf aus Tabelle 3.3

Mit den gegebenen Kraft-Weg-Kurven für den optimierten OSW-Pack kann das Strukturmodell des Packs kalibriert werden. So ist eine genauere Prognose des mechanischen Verhaltens der Palette möglich. Mit den vorhandenen Packs kann dann die Formstabilität des Verpackungskonzeptes mit vertretbarem Aufwand anhand der in Kapitel 3 entwickelten Prüfmethode verifiziert werden. Allerdings soll auch das FE-Modell der Palette validiert werden. Dessen Trennschärfe kann besser beurteilt werden, wenn die zuvor vorgenommene Schätzung des mechanischen Verhaltens des OSW-Packs durch die gemessenen Daten ersetzt, und erneut eine Simulation durchgeführt wird. In der Simulation wird das mechanische Verhalten des OSW-Packs mit dem in Kapitel 4.3 beschriebenen Strukturmodell, wie in Abbildung 5.10 dargestellt, approximiert.

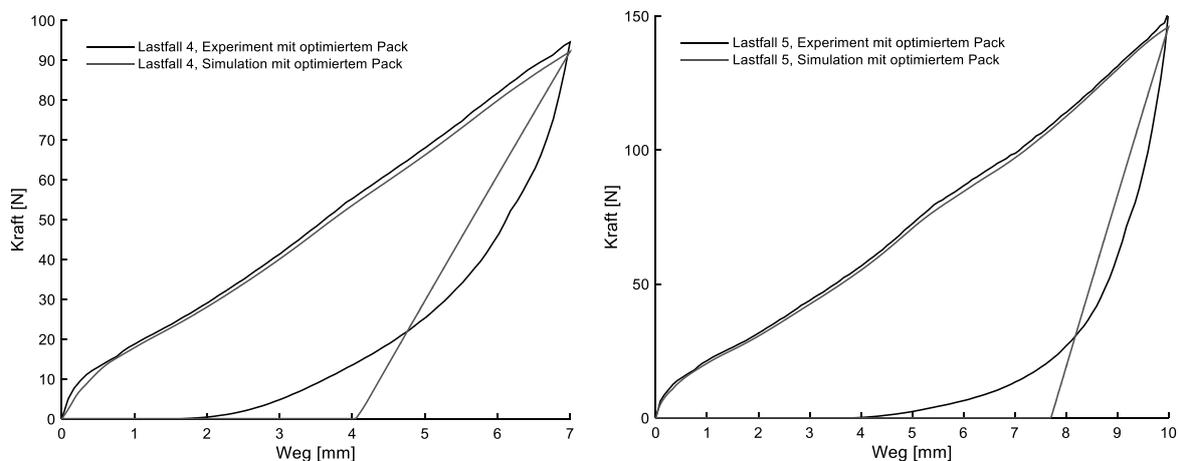


Abbildung 5.10: Vergleich zwischen der mechanischen Antwort des optimierten OSW-Packs in Experiment und Simulation für den Lastfall vier (links) und für den Lastfall fünf (rechts)

Im Gegensatz zu den in Abbildung 5.6 dargestellten Simulationsergebnissen, die zur Verifikation eines Verpackungskonzeptes dienen, sollen die in Abbildung 5.11 dargestellten Simulationsergebnisse vor allem die Trennschärfe der numerischen Methode aufzeigen. Deshalb basieren die in Abbildung 5.11 dargestellten Simulationsergebnisse auf einer weniger intensiven Anregung mit dem auf 80% skalierten Beschleunigungssignal des Flugplatztestes.

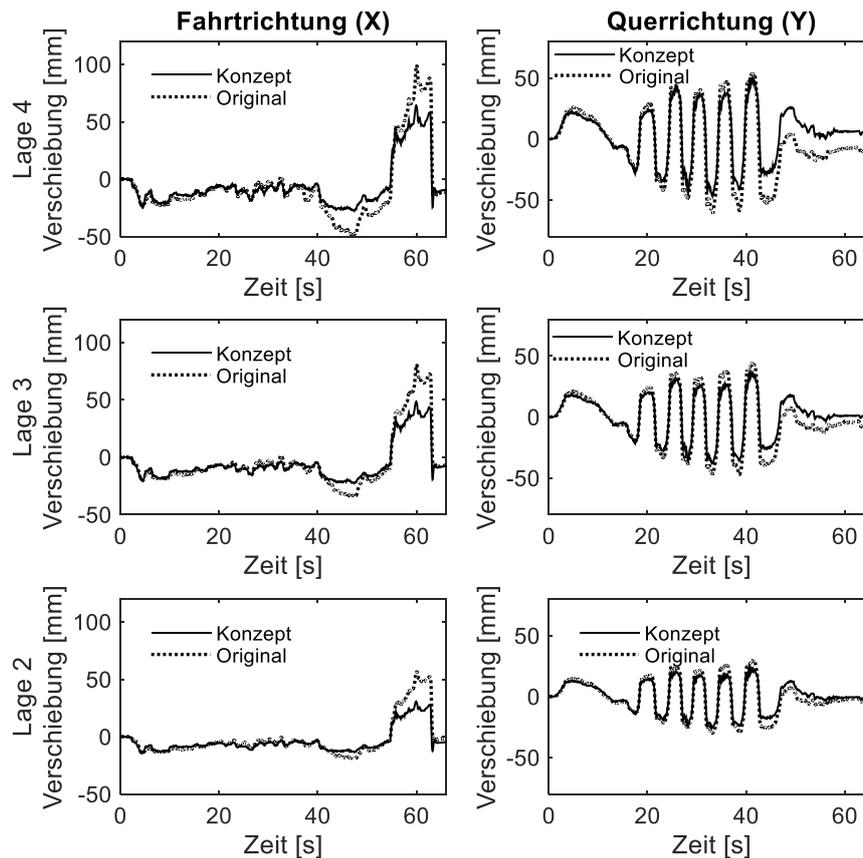


Abbildung 5.11: Deformation der Palette während der Testphase bei $m=80\%$ anhand der Verschiebung der Produkte der obersten drei Lagen in Fahrtrichtung (X) und Querrichtung (Y) im bewegten Koordinatensystem der Holzpalette, Simulation für optimiertes OSW-Konzept und Original

Die in Abbildung 5.11 dargestellten Simulationsergebnisse zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden untersuchten Verpackungskonzepten. Sofern sich diese Unterschiede auch in der Realität bestätigen, ist die Trennschärfe der in dieser Arbeit entwickelten numerischen Methode nachgewiesen und das Strukturmodell der Palette für den angedachten Zweck, für die Entwicklung und für den Vergleich von Verpackungskonzepten für Getränke, validiert.

Anzumerken bleibt, dass die reale Palette des bisherigen Original-Verpackungskonzeptes bei der im vorliegenden Beispiel simulierten Intensität ($S_4=80\%$) an die Barriere des Hexapod kippt, sodass sich die in Abbildung 3.51 und in

Abbildung 3.52 dargestellten Schadensfälle ergeben. Das mit dem Kippen der Palette verbundene einseitige Abheben der hölzernen Palette von der Plattform wird in der Simulation nicht berücksichtigt. Dennoch folgt die Verschiebung der Packs auch für diese Simulation in weiten Teilen dem während des Experimentes gemessenen Signal, wie Abbildung 5.12 illustriert.

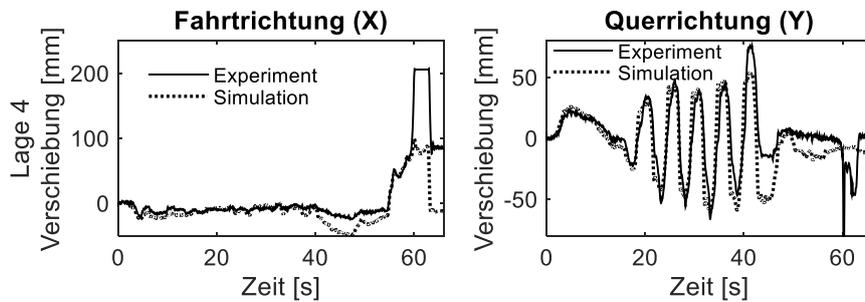


Abbildung 5.12: Deformation der originalen Palette während der Testphase bei $m=80\%$ anhand der Verschiebung der Produkte der obersten Lage in Fahrtrichtung (X) und in Querrichtung (Y) im bewegten Koordinatensystem der Holzpalette, Simulation und Experiment

Die experimentelle Verifikation des entwickelten OSW-Verpackungskonzeptes erfolgt anhand des in Kapitel 3.3 entwickelten und in Abbildung 3.43 dargestellten Testzyklus. Bereits während der Konditionierungsphase zeigt sich, dass das optimierte OSW-Verpackungskonzept mit geringeren Deformationen auf die Anregung antwortet. Anhand Abbildung 5.13 ist dieser Unterschied vor allem binnen der ersten hundert Sekunden der Konditionierungsphase ersichtlich, da sich die oberste Produktlage der optimierten Palette deutlich weniger in Querrichtung verschieben. Allerdings ist im Zustand beider Paletten nach der Konditionierungsphase kein signifikanter Unterschied ersichtlich.

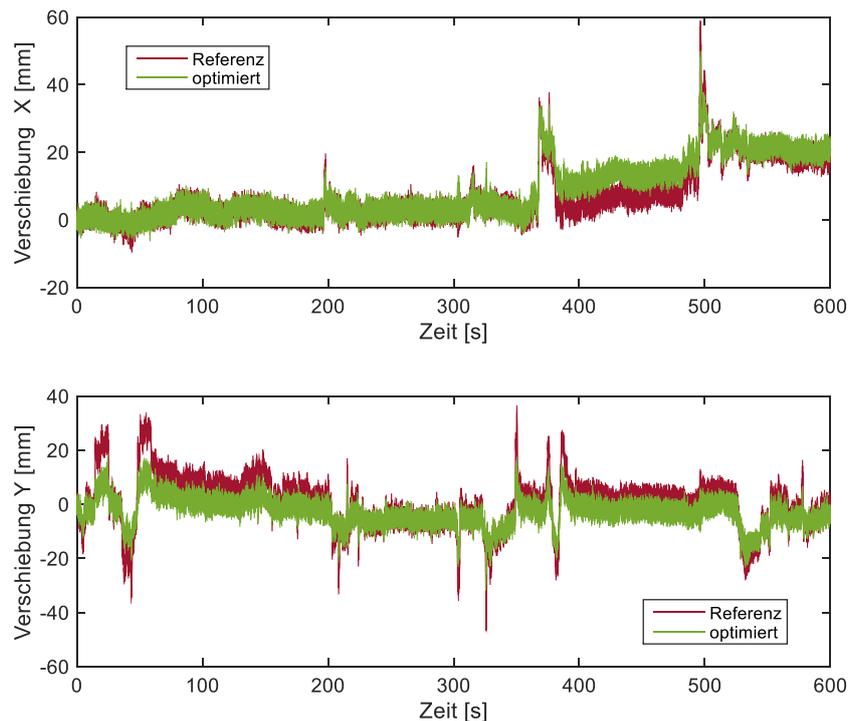


Abbildung 5.13: Vergleich der Deformationen von optimierter Palette und Referenzpalette während der Konditionierungsphase anhand der Verschiebung der Produkte in Fahrtrichtung (X) und Querrichtung (Y) auf der obersten Lage im Koordinatensystem der Testplattform.

Dem Testzyklus aus Abbildung 3.43 folgend beginnt nach der Konditionierungsphase die erste Testphase mit einem Skalierungsfaktor $S_1=50\%$ für die Beschleunigungen. In weiteren Testphasen wird dieser Skalierungsfaktor in Schritten von je 10% sukzessive erhöht. Eine eindeutige Bewertung des optimierten Konzeptes ist anhand der Testphase mit einem Skalierungsfaktor von $S_4=80\%$ möglich. Abbildung 5.14 stellt die Reaktionen beider Paletten während dieser Testphasen dar in einem Diagramm der Verschiebung der obersten Produktlage relativ zur hölzernen Paletten.

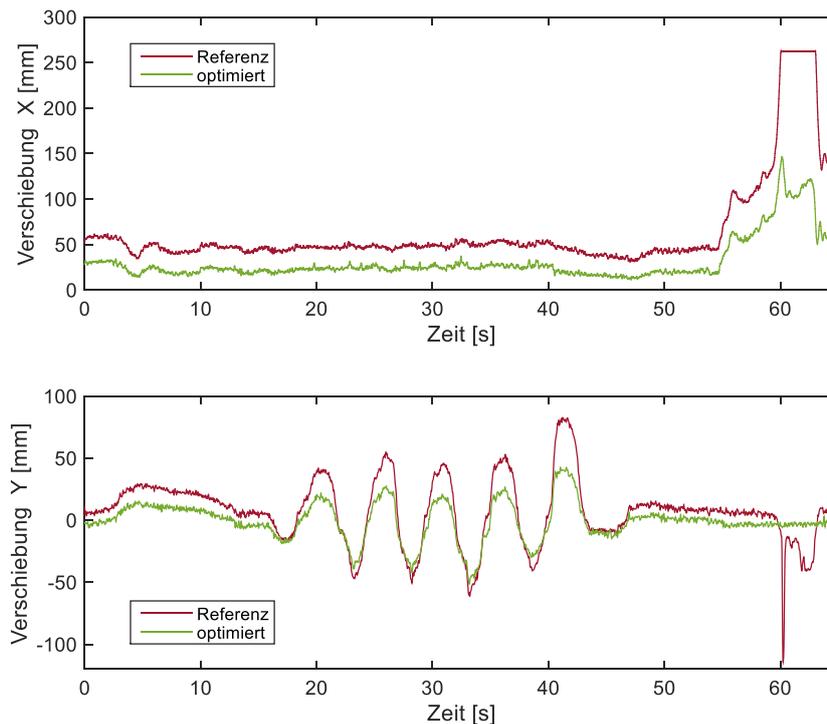


Abbildung 5.14: Vergleich der Deformationen von optimierter Palette und Referenzpalette während der Testphase anhand der Verschiebung der Produkte in Fahrtrichtung (X) und Querrichtung (Y) auf der obersten Lage im Koordinatensystem der Testplattform.

Die Referenzpalette startet in diese Testphase bereits mit signifikanten Verschiebungen, welche aus den vorangegangenen Testphasen und aus der Konditionierungsphase resultieren. Auch die optimierte Palette startet mit einer Verschiebung der obersten Produktlage in Fahrtrichtung, die aber deutlich geringer ausfällt. Deshalb würde die optimierte Palette zu Beginn der beschriebenen Testphase auch die strenge Qualitätskontrolle für die Lagerung in automatisierten Lagerhäusern noch bestehen, während die Referenzpalette den Grenzwert von 50 mm Verschiebung um 8 mm überschreitet. Anhand der Kurvenverläufe der Verschiebungen ist deutlich erkennbar, dass das optimierte Konzept mit OSW-Getränkepacks auf die gleiche Anregung mit weniger Verschiebung antwortet und den Transporttest übersteht, ohne gegen die Barriere der Prüfvorrichtung zu kippen. Der Zustand beider Paletten nach diesem Testzyklus unterscheidet sich deutlich, wie Abbildung 5.15 quantifiziert. Abbildung 5.16 hält den gleichen Moment der Testphase für beide Paletten in Simulation und Experiment fest.

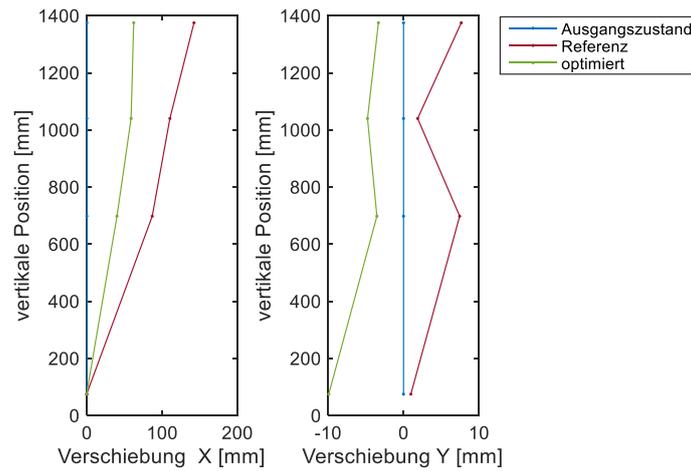


Abbildung 5.15: Vergleich der Deformationen von optimierter Palette und Referenzpalette nach der Testphase (80%) anhand der Verschiebung der Produkte in Fahrtrichtung (X) und Querrichtung (Y) in Abhängigkeit von ihrer vertikalen Position auf der Palette

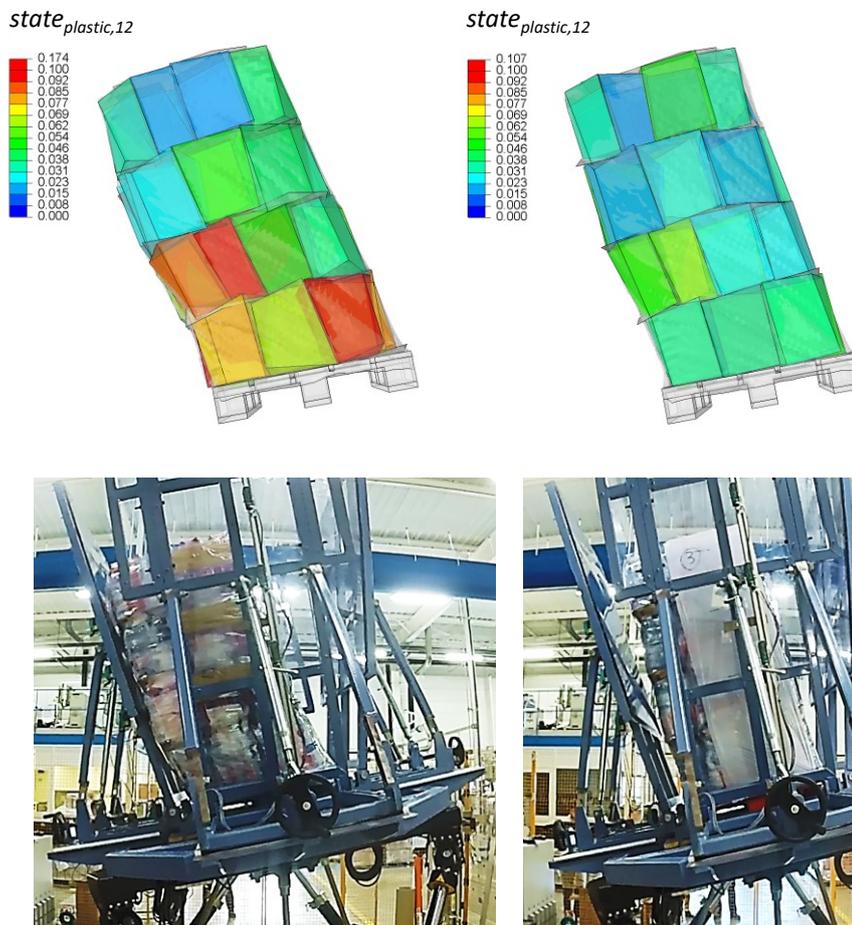


Abbildung 5.16: Vergleich der globalen Deformation der bisherigen Palette (links) und der Palette optimierten OSW-Konzepts (rechts), Experiment und Simulation

Die durchgeführten Experimente beweisen, dass das optimierte OSW-Konzept mit einem um 52% reduzierten Materialeinsatz für die sekundäre Verpackung zu einer formstabileren Palette führt. Mit diesem Ergebnis sind das Strukturmodell der Palette und die diesem Modell zugrundeliegenden numerischen Methoden validiert.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit entwickelt experimentelle und numerische Methoden, die die Entwicklung gewichtsoptimierter und stabiler Kunststoffverpackungssysteme erleichtern. Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist dabei die Reduktion des Materialeinsatzes für Kunststoffverpackungen unter Gewährleistung der Transportsicherheit und der Produktqualität. Die entwickelten Methoden eignen sich insbesondere, das mechanische Verhalten von Paletten mit Getränkeflaschen während des Transports im LKW zu analysieren und hinsichtlich der Formstabilität zu optimieren.

Die zielgerichtete Optimierung des Verpackungssystems hinsichtlich seiner Formstabilität beim Transport erfordert die Kenntnis der Transportbedingungen und von deren Wirkung auf das Verpackungssystem. Deshalb werden im ersten, praktischen Teil dieser Arbeit sowohl die Transportbedingungen als auch deren Wirkung auf die Getränkepaletten im Rahmen von mehreren Feldversuchen auf der Straße und auf einem abgesperrten Testgelände analysiert. Auf dieser Datenbasis werden die Anforderungen an ein Testsystem im Labor erarbeitet, mit dem eine zeitraffende Prüfmethode für die Formstabilität der Paletten möglich ist. Die entwickelte Prüfmethode kann anhand ihrer Wirkung auf das Verpackungssystem validiert werden.

Die entwickelte experimentelle Prüfmethodik für die Formstabilität von Paletten während LKW-Transporten ersetzt sukzessive und konzernübergreifend die teuren und wegen fehlender Reproduzierbarkeit häufig wenig aussagekräftigen Transporttests mit voll beladenen LKWs auf der Straße. Aufbauend auf der entwickelten Bewertungsmethode für die Formstabilität von Paletten wird geprüft, ob in zukünftigen Normen zur Ladungssicherung eine ähnliche Prüfmethodik, basierend auf dem kompakten Hexapodsystem, berücksichtigt werden kann.

Entscheidend für die erfolgreiche Entwicklung gewichtsoptimierter Kunststoffverpackungen ist das Verständnis der Materialeigenschaften der beteiligten Materialien unter Prozessbedingungen. Die vorliegende Arbeit analysiert den Streck-Wickelprozess, charakterisiert PE-Stretchfolien unter Prozessbedingungen und entwickelt eine Methode für den Vergleich der am Markt erhältlichen Produkte.

Darüber hinaus wird das mechanische Verhalten von Verpackungsstrukturen analysiert und charakterisiert. Diese Datenbasis ermöglicht nicht nur die Bewertung von Verpackungskonzepten, sondern auch die numerische Modellierung von Verpackungskonzepten und damit die Berechnung des mechanischen Verhaltens von Paletten mit Getränkeflaschen und von deren Reaktion auf die Beschleunigungen während eines LKW-Transportes.

Im zweiten Teil dieser Arbeit entsteht ein Prozessmodell des Streck-Wickelprozesses. Mit diesem Modell kann das Prozessergebnis auf der Grundlage von Material- und Prozessdaten berechnet werden. Einerseits hilft dieses Modell bei der Definition geeigneter Streck-Wickelprozesse, andererseits fließen die Ergebnisse des Prozessmodells mit in das FE-Modell der gesamten Palette ein. Dieses Modell ist so konzipiert, dass es sich nicht nur für das in der vorliegenden Arbeit diskutierte Beispiel einer Getränkepalette einsetzen lässt, sondern ganz allgemein und vielseitig für die Optimierung verschiedener Verpackungsstrukturen nutzen lässt. Das FE-Modell der Palette kann mit Daten aus dem ersten Teil dieser Arbeit experimentell verifiziert werden.

Anhand der numerischen Repräsentation der Palette lässt sich das mechanische Verhalten der Getränkepalette noch detailreicher analysieren. Mit dem Modell können real existierende Störgrößen ausgeschlossen werden. Außerdem lassen sich die Einflüsse von Systemkomponenten, Prozessparametern und Belastungsszenarien getrennt voneinander analysieren. So kann zielgerichtet auf ein effektiveres Verpackungskonzept hingearbeitet werden. Im dritten Teil der Arbeit wird ein optimiertes Verpackungskonzept entwickelt und verifiziert. Der Erfolg der FE-gestützten Optimierung validiert das FE-Modell der Palette und damit auch die zugrundeliegenden numerischen Methoden.

Die in dieser Arbeit entwickelten numerischen Methoden münden in einem Modell der real existierenden Palette. Dieses Modell kann weiter verbessert werden, beispielsweise durch eine genauere Repräsentation der Packgeometrie für alle Packs oder aber durch einen lokal höheren Detaillierungsgrad, wie in Abbildung 6.1 dargestellt. So könnten auch Details des Designs der PET-Flasche mit dem mechanischen Verhalten der gesamten Palette in Verbindung gebracht werden.

Außerdem könnte die Auswirkung des Schrumpfprozesses oder des Streck-Wickelprozesses auf das mechanische Verhalten des Getränkepacks unter Anwendung des aufgeführten Materialmodells vorhergesagt werden.

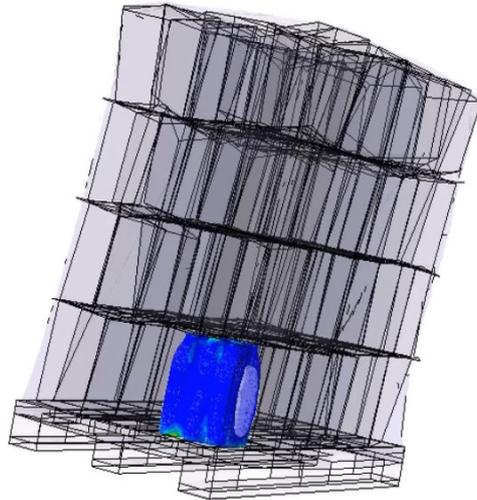


Abbildung 6.1: Mögliche Erweiterung des Strukturmodells

Ausschlaggebend ist aber, dass die entwickelten numerischen Methoden auf die täglichen Entwicklungsaufgaben der Verpackungsindustrie angewendet werden können, um optimale Kunststoffverpackungen zielgerichteter entwickeln zu können.

Mit dem Modell können DoE rein virtuell durchgeführt werden. So kann der Einfluss einzelner Systemkomponenten auf die Stabilität der Palette charakterisiert werden. Auf dieser Grundlage können Verpackungskomponenten zielgerichtet weiterentwickelt und kreative Entwicklungsprozesse angestoßen werden. Das Modell erlaubt auch die Bewertung von innovativen Verpackungskonzepten, die zum jetzigen Zeitpunkt technisch noch nicht realisierbar sind. Die präsentierten numerischen Methoden sind im Einsatz, um Verpackungskonzepte zu optimieren, neuartige Verpackungskonzepte zu entwickeln und um das Potenzial der verwendeten Materialien noch besser auszuschöpfen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] WTO; World Trade Statistical Review 2019, Genf, (2019).
- [2] Die Europäische Kommission; Transportierte Gütermenge im Straßengüterverkehr der Europäischen Union (28 Länder). in den Jahren 2008 bis 2017 (in 1.000 Tonnen), <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/987284/umfrage/transportierte-guetermenge-im-strassengueterverkehr-der-europaeischen-union/>, Zugriff am 04. November 2019.
- [3] R. Geyer, J. R. Jambeck and K. L. Law; Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances* 33 (7) e1700782, (2017).
- [4] Europäischen Parlament; Richtlinie 2014/47/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 3. April 2014 über die technische Unterwegskontrolle der Verkehrs- und Betriebssicherheit von Nutzfahrzeugen, die in der Union am Straßenverkehr teilnehmen, und zur Aufhebung der Richtlinie 2000/30/EGText von Bedeutung für den EWR. 2014/47/EU, (2014).
- [5] K. Hartwig; Simulation des Streckblasverfahrens und Charakterisierung des prozeßrelevanten Materialverhaltens; 1. Aufl. Dissertation, Mainz, Aachen, (1996).
- [6] G. H. Menary; Modelling Injection Stretch Blow Moulding and the Resulting 'in Service' Performance of PET Bottles. Ph.D., Queen's University of Belfast, Belfast, (2001).
- [7] C. W. Tan, G. H. Menary and Y. Salomeia et al.; Modelling of the Injection Stretch Blow Moulding of PET Containers via a Pressure-Volume-time (PV-t) Thermodynamic Relationship. *International Journal of Material Forming-S1* S. 799 ff., (2008).
- [8] J. Zimmer; Analyse und Optimierung des flüssigkeitsgestützten Streckblasformens. Dissertation, (2015).
- [9] J. Nixon, G. H. Menary and S. Yan; Finite element simulations of stretch-blow moulding with experimental validation over a broad process window. *International Journal of Material Forming-5* S. 793 ff., (2017).
- [10] J. Zimmer, D. Klein and M. Stommel; Experimental and Numerical Analysis of Liquid-Forming. *Key Engineering Materials* S. 842 ff., (2015).
- [11] ASTM-D4169-16; Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems, West Conshohocken, PA, (2016).

-
- [12] DIN EN12642; Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Aufbauten an Nutzfahrzeugen – Mindestanforderungen; beuth, (2016).
- [13] DIN EN12195-1; Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen – Sicherheit, beuth, (2010).
- [14] EUMOS40509; Test method for load unit rigidity, (2012).
- [15] ISTA-3E; Similar Packaged-Products in Unitized Loads for Truckload Shipment, (2016).
- [16] G. Menges, W. Michaeli and E. Haberstroh et al.; Werkstoffkunde Kunststoffe, Hanser, München, (2011).
- [17] M. A. Spalding and A. M. Chatterjee; Handbook of Industrial Polyethylene Technology, Wiley, Hoboken, (2016).
- [18] M. Niaounakis and E. Kontou; Effect of LDPE on the thermomechanical properties of LLDPE-based films. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*-13 S. 1712 ff., (2005).
- [19] W. Kimansky, H. Sinn and H. Vollmer et al.; Verfahren zur Herstellung von Polyethylen, Polypropylen und Copolymeren-DE 000003007725 A1, (1981).
- [20] W. Kaminsky; The discovery of metallocene catalysts and their present state of the art. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*-16 S. 3911 ff., (2004).
- [21] K. Ziegler, E. Holzkamp and H. Breil et al.; Das Mülheimer Normaldruck-Polyäthylen-Verfahren. *Die Chemie*-19/20 S. 541 ff., (1955).
- [22] J. P. Hogan and Robert L. B.; Polymers and production thereof-US2825721, (1958).
- [23] H. Pfannmueller, F. Urban and H. Gropper et al.; Production of homopolymers or copolymers of ethylene-US3714135, (1970).
- [24] H. Knuutila, A. Lehtinen and A. Nummila-Pakarinen; *Advanced Polyethylene Technologies—Controlled Material Properties* S. 13 ff., (2004).
- [25] M. Bonnet; *Kunststofftechnik. Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele*, Springer Vieweg, Wiesbaden, (2016).
- [26] A. Peacock; *Handbook of Polyethylene: Structures: Properties, and Applications*, CRC Press, Clemson, South Carolina, (2000).
- [27] Marianne Gilbert; *Brydson's Plastics Materials*. 8. Auflage, Elsevier, Oxford, (2017).

-
- [28] A. S. Kannan; Structure Property Relationships in Polyethylene Blown Films. Ph.D., Atlanta, (2015).
- [29] J. L. Jordan, D. T. Casem and J. M. Bradley et al.; Mechanical Properties of Low Density Polyethylene. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*-4 S. 411 ff., (2016).
- [30] J. C. Lucas, M. D. Failla and F. L. Smith et al.; The double yield in the tensile deformation of the polyethylenes. *Polymer Engineering and Science* S. 1117 ff., (1995).
- [31] W. Kluge, J. Petermann and R. M. Gohil et al.; Verformungsmechanismen und kristalline Überstrukturen in Polyäthylen und isotaktischem Polystyrol. Anwendungsbezogene physikalische Charakterisierung von Polymeren, insbesondere im festen Zustand. *Progress in Colloid & Polymer Science*-66 S. 149 f., Steinkopff, Darmstadt, (1979).
- [32] T. Kida, T. Oku and Y. Hiejima et al.; Deformation mechanism of high-density polyethylene probed by in situ Raman spectroscopy. *Polymer* S. 88 ff., (2015).
- [33] A. Peterlin; Molecular model of drawing polyethylene and polypropylene. *Journal of Materials Science*-6 S. 490 ff., (1971).
- [34] R. G. Snyder, J. R. Scherer and A. Peterlin; Low-frequency Raman study of drawn polyethylene. *Macromolecules*-1 S. 77 ff., American Chemical Society, (1981).
- [35] K.-H. Nitta and M. Takayanagi; Direct observation of the deformation of isolated huge spherulites in isotactic polypropylene. *Journal of Materials Science*-24 S. 4889 ff., (2003).
- [36] M. Makki, G. Ayoub and H. Abdul-Hameed et al.; Mullins effect in polyethylene and its dependency on crystal content: A network alteration model. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* S. 442 ff., (2017).
- [37] P. Mukherjee, A. Ghosh and N. Spegazzini et al.; Relating Post-yield Mechanical Behavior in Polyethylenes to Spatially Varying Molecular Deformation Using Infrared Spectroscopic Imaging. *Homopolymers. Macromolecules*-10 S. 3836 ff., (2018).
- [38] Q. Fang, Y. Tian and H. Wu et al.; Revealing the deformation mechanism of amorphous polyethylene subjected to cycle loading via molecular dynamics simulations. *RSC Advances*-56 S. 32377 ff., (2018).

-
- [39] P. J. DesLauriers, M. J. Lamborn and J. S. Fodor; Correlating polyethylene microstructure to stress cracking; correlations to post yield tensile tests. *Polymer S.* 422 ff., (2018).
- [40] R. Wang, D. Ren and X. Sun et al.; Structure variation and puncture resistance of stretched crosslinked polyethylene film: Effects of stretching temperature. *Journal of Applied Polymer Science-16*, (2019).
- [41] Z. Wang, Y. Liu and C. Liu et al.; Understanding structure-mechanics relationship of high density polyethylene based on stress induced lattice distortion. *Polymer S.* 170 ff., (2019).
- [42] H. Beerbaum; Ermittlung strukturbezogener bruchmechanischer Werkstoffkenngrößen an Polyethylen-Werkstoffen. Dissertation, Halle-Wittenberg, (1999).
- [43] S. Ahzi, A. Makradi and R. V. Gregory et al.; Modeling of deformation behavior and strain-induced crystallization in poly(ethylene terephthalate) above the glass transition temperature. *Mechanics of Materials-12 S.* 1139 ff., (2003).
- [44] Takumitsu Kida, Yusuke Hiejima* and Koh-hei Nitta and T. Kida et al.; Raman Spectroscopic Study of High-density Polyethylene during Tensile Deformation. *International Journal of Experimental Spectroscopic Techniques-1 S.* 1 ff., (2016).
- [45] L. Mullins; Effect of Stretching on the Properties of Rubber. *Rubber Chemistry and Technology-2 S.* 281 ff., Rubber Division, ACS, (1948).
- [46] L. Mullins; Softening of Rubber by Deformation. *Rubber Chemistry and Technology-1 S.* 339 ff., Rubber Division, ACS, (1969).
- [47] GS1; Bonnes pratiques logistiques pour la robotique interopérable, Paris, (2017).
- [48] VDI4487; Prüfung qualitätsrelevanter Eigenschaften von Wickelstretchfolien, Düsseldorf, (2017).
- [49] DIN16995; Folien für Verpackungszwecke – Kunststoff-Folien – Eigenschaften, Prüfverfahren, (2016).
- [50] DIN EN ISO527-3; Kunststoffe Bestimmung der Zugeigenschaften, (1995).
- [51] Bisha; Correlation of the Elastic Properties of Stretch Film on Unit Load Containment. Ph.D., Virginia, (2012).
- [52] ASTM D4728-17; Standard Test Method for Random Vibration Testing of Shipping Containers, (2017).

- [53] ESTL, <https://www.estl.be/>, Zugriff am 16.11.2019.
- [54] DIN EN14477; Verpackung, Flexible Packstoffe – Verpackung, Flexible Packstoffe – Bestimmung der Durchstoßfestigkeit – Prüfverfahren, (2004).
- [55] DIN EN ISO6383-2; Kunststoffe – Folien und Bahnen – Bestimmung der Reißfestigkeit - Teil 2: Elmendorf-Verfahren, (2004).
- [56] A. Harrysson and M. Ristinmaa; Large strain elasto-plastic model of paper and corrugated board. *International Journal of Solids and Structures*-11-12 S. 3334 ff., (2008).
- [57] Z. Aboura, N. Talbi and S. Allaoui et al.; Elastic behavior of corrugated cardboard. Experiments and modeling. *Composite Structures*-1 S. 53 ff., (2004).
- [58] N. Talbi, A. Batti and R. Ayad et al.; An analytical homogenization model for finite element modelling of corrugated cardboard. *Composite Structures*-2 S. 280 ff., (2009).
- [59] J. Pflug, I. Verpoest, D. Vandepitte; Folded Honeycomb cardboard and core material for structural applications. *Proceedings of the IEEE*, (1999).
- [60] DIN EN ISO527-2; Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen, (2012).
- [61] S. Allaoui, Z. Aboura and M. L. Benzeggagh; Phenomena governing uni-axial tensile behaviour of paperboard and corrugated cardboard. *Composite Structures*-1 S. 80 ff., (2009).
- [62] M. Fröstl; Charakterisierung und Modellierung des mechanischen Verhaltens einer Verpackungseinheit von PET-Getränkeflaschen. Bachelorarbeit, Dortmund, (2019).
- [63] J. Petrausch; Characterisation and Modelling of the Mechanical Behaviour of Plastic Packaging. Masterarbeit, Dortmund, (2019).
- [64] D. Klein, M. Stommel, J. Zimmer; Numerical Simulation and Validation of the Shrink Process of Plastic Films in Packaging Applications. 32nd, International Conference of the Polymer Processing Society, Lyon, (2016).
- [65] N. Maskar; Characterization of the tribological properties of a packing system – development and construction of a test device and measurement of friction coefficients. Projektarbeit, Dortmund, (2016).

-
- [66] DIN EN ISO8295; Kunststoffe – Folien und Bahnen – Bestimmung der Reibungskoeffizienten, (2004).
- [67] B. Soleimani and E. Ahmadi; Measurement and analysis of truck vibration levels as a function of packages locations in truck bed and suspension. *Computers and Electronics in Agriculture* S. 141 ff., (2014).
- [68] DIN30786-2; Transportbelastungen – Datensammlung von mechanisch-dynamischen Belastungen – Teil 2: Wertesammlungen, (2013).
- [69] M.-A. Garcia-Romeu-Martinez, S. P. Singh and V.-A. Cloquell-Ballester; Measurement and analysis of vibration levels for truck transport in Spain as a function of payload, suspension and speed. *Packaging Technology and Science-8* S. 439 ff., (2008).
- [70] C. Ge and L. Pan; Vibration damage rate curves for quantifying abrasion of printed packaging in accelerated random vibration test. *Packaging Technology and Science-2* S. 215, (2017).
- [71] V. Rouillard and Vincent Rouillard; On the synthesis of non-Gaussian road vehicle vibrations. Ph. D. Monash University, Monash, (2007 // 2017).
- [72] V. Rouillard and M. Lamb; On the effects of sampling parameters when surveying distribution vibrations. *Packaging Technology and Science: An International Journal-8* S. 467 ff., (2008).
- [73] International Safe Transit Association (ISTA); Resource Book 2019. Individual Test Procedures/Projects and Resource Book, East Lansing, (2019).
- [74] K. R. Griffiths, B. J. Hicks and P. S. Keogh et al.; Wavelet analysis to decompose a vibration simulation signal to improve pre-distribution testing of packaging. *Mechanical Systems and Signal Processing* S. 780 ff., (2016).
- [75] A. S. Bonnin, J. B. Nolot and V. Huart et al.; Decomposition of the acceleration levels distribution of a road transport into a sum of weighted Gaussians: Application to vibration tests. *Packaging Technology and Science-8* S. 511 ff., (2018).
- [76] Kamil Klonecki; Entwicklung einer Prüf- und Bewertungsmethodik für Ladungssicherungssysteme. Dissertation, Darmstadt, (2017).
- [77] J. L. Bouvard, D. K. Ward and D. Hossain et al.; Review of Hierarchical Multiscale Modeling to Describe the Mechanical Behavior of Amorphous Polymers. *Journal of Engineering Materials and Technology-4* S. 41206, (2009).

-
- [78] E. Krempl; Models of Viscoplasticity. Some Comments on Equilibrium (Back) Stress and Drag Stress. *Acta Mechanica*-1-4 S. 25 ff., (1987).
- [79] N. Dusunceli and O. U. Colak; Modelling effects of degree of crystallinity on mechanical behavior of semicrystalline polymers. *International Journal of Plasticity*-7 S. 1224 ff., (2008).
- [80] O. U. Colak; Modeling Deformation Behavior of Polymers with Viscoplasticity Theory Based on Overstress. *International Journal of Plasticity*-1 S. 145 ff., (2005).
- [81] F. Zaïri, B. Aour and J. M. Gloaguen et al.; Numerical modelling of elastic–viscoplastic equal channel angular extrusion process of a polymer. *Computational Materials Science*-1 S. 202 ff., (2006).
- [82] M. C. Boyce, S. Socrate and P. G. Llana; Constitutive Model for the Finite Deformation Stress-Strain Behavior of Poly(ethylene terephthalate) above the Glass Transition. *Polymer*-6 S. 2183 ff., (2000).
- [83] G. Ayoub, F. Zaïri and C. Frédérix et al.; Effects of crystal content on the mechanical behaviour of polyethylene under finite strains. Experiments and constitutive modelling. *International Journal of Plasticity*-4 S. 492 ff., (2011).
- [84] C. M. Popa, R. Fleischhauer and K. Schneider et al.; Formulation and implementation of a constitutive model for semicrystalline polymers. *International Journal of Plasticity* S. 128 ff., (2014).
- [85] G. Ayoub, F. Zaïri and M. Naït-Abdelaziz et al.; Modelling large deformation behaviour under loading–unloading of semicrystalline polymers. Application to a high density polyethylene. *International Journal of Plasticity*-3 S. 329 ff., (2010).
- [86] J. J. Gilman; Progress in the microdynamical theory of plasticity. *Proc. 5th US National Congress of Applied Mechanics*, ASME, (1966).
- [87] E. M. Arruda and M. C. Boyce; A Three-Dimensional Constitutive Model for the Large Stretch Behavior of Rubber Elastic Materials. *Mech. Phys. Solids* S. 389 ff., (1993).
- [88] T. F. Coleman and Y. Li; An Interior Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds. *Society for Industrial and Applied Mathematics*-Vol. 6, No. 2 S. 418 ff., (1994).

-
- [89] D. Klein, M. Stommel and J. Zimmer; Influence of the stretch wrapping process on the mechanical behavior of a stretch film. AIP Conference Proceedings 1960 Issue 1, id.120012, (2018).
- [90] D. Klein, M. Stommel and J. Zimmer; Constitutive modeling of the mechanics of polyethylene films in stretch wrapping processes. AIP Conference Proceedings 2113 Issue 1, id.130001, (2019).
- [91] Dassault; Abaqus Analysis User's Manual. Version 2019.
- [92] G.A. Baum; The elastic properties of paper: a review. IPC Technical Paper Series-145 S. 1 ff., (1984).
- [93] P. Lancaster and W. G. Lancaster; Verpackungsmaschine-DE000003330489A1, (1983).
- [94] Lanfranchi; ALLWRAPPER® on license of COLINES,
<http://www.lanfranchigroup.com/en/detail/39/43/1/20-Orbitalstretchwrapping.html>,
Zugriff am 10.11.2019.