

I. Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Institut für BFSV	Förderkennzeichen: 0330065
Vorhabensbezeichnung: „Verbesserung des integrierten Umweltschutzes durch den Einsatz von computergestützten Simulationsverfahren zur versandgerechten Dimensionierung von Sicherungsmitteln für Ladeeinheiten in der Ernährungsindustrie“	
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2001 - 31.01.2003	
Berichtszeitraum: 01.02.2001 - 31.01.2003	

I. Kurze Darstellung zu:

1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen auf der Basis praktischer Untersuchungen theoretische Modelle entwickelt werden, die es erlauben, computergestützte numerische Simulationsverfahren nach dem FEM-Ansatz (Finite Element Methode) für die versandgerechte Dimensionierung von Sicherungsmaßnahmen für Ladeeinheiten einzusetzen.

Sollte ein derartiges Verfahren nicht entwickelt werden können so werden Empfehlungen bezüglich der idealen Ladeeinheitensicherung ausgesprochen.

Das hierzu erforderliche Vorgehen umfasst die Definition von Steifigkeitsparametern für den Zusammenhalt von Ladeeinheiten unter Berücksichtigung der für den Zusammenhalt relevanten Parameter, wie beispielsweise die Art der Ladeeinheitensicherung, die Packstückmasse und -beschaffenheit, die Stapelweise oder den Einfluss versandspezifischer klimatischer und mechanischer TUL-Belastungen. Diese Parameter fließen in ein theoretisches Modell ein, welches die Simulation des Bewegungsverhaltens von Packstücken in palettierten Ladeeinheiten unter dynamischer Belastung ermöglichen soll. Auf diese Weise werden die Ladeeinheitensicherungsmaßnahmen optimiert werden können.

2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde durch und im

Institut für BFSV

Lohbrügger Kirchstraße 65

21033 Hamburg

durchgeführt. Die Bedingungen für die Durchführung des Vorhabens waren nicht über den gesamten Zeitraum ideal. Die Hochschule für Angewandte Wissenschaften hat im Forschungszeitraum massive Umbaumaßnahmen im Labor für Verpackungstechnik durchführen lassen, welche räumlich identisch mit den Räumen des Instituts sind. Diese Umbaumaßnahmen behinderten den Laborbetrieb für etwa ein dreiviertel Jahr. Des weiteren war die Auswertung und Umsetzung der

gemessenen Daten in ein mathematisches Modell aufgrund diverser Faktoren nicht möglich. Diese Faktoren sind unter Punkt 6. dieses Berichtes genannt.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Umsetzung des Forschungsvorhabens wurde ein Zeitraum von zwei Jahren veranschlagt. Bei Forschungsbeginn im Juli 2000 war der in Tabellen 1a und 1b aufgelistete vorläufige Arbeitsplan vorgesehen. Der verwendeten Personal- und Sachmitteleinsatz sind aus den Tabellen 2 und 3 ersichtlich. In Tabelle 4 ist der erforderliche Finanzmitteleinsatz aufgelistet.

Die für das Vorhaben geplanten Techniker und Ingenieursstellen sind als halbe Stellen vorgesehen, was in der Zeitplanung entsprechend zu berücksichtigen ist.

Arbeitsschritt	07/00	08/00	09/00	10/00	11/00	12/00	01/01	02/01	03/01	04/01	05/01	06/01
Ergänzende Literaturrecherche												
Analyse palettierter Ladeeinheiten												
Definition von Prüfprofilen												
Durchführung und Auswertung von Laborsimulationen												
Erarbeitung mathematischer Ansätze für Simulationsmodelle												

Tabelle 1a

Arbeitsschritt	07/00	08/00	09/00	10/00	11/00	12/00	01/01	02/01	03/01	04/01	05/01	06/01
Erarbeitung mathematischer Ansätze für Simulationsmodelle												
Durchführung, Evaluierung und Verfeinerung der FEM-Simulationen												
Forschungsbericht und Veröffentlichung der Ergebnisse												

Tabelle 1b

Das Vorhaben erfordert umfangreiche Planungstätigkeiten und die Berechnung komplexer mathematischer Modelle. Für diese Tätigkeiten ist ein Ingenieur vorgesehen.

Weiterhin werden über den gesamten Projektzeitraum hinweg begleitende Simulationstätigkeiten im dynamischen Prüflabor der BFSV erforderlich sein. Für diese Tätigkeiten ist der Einsatz eines Technikers erforderlich. Für zuarbeitende Tätigkeiten wie Hilfen beim Aufbau der Prüfeinrichtungen oder die Erschließung neuer Literaturquellen ist eine studentische Hilfskraft vorgesehen. Sowohl die Techniker als auch die Ingenieursstelle sind als halbe Stellen geplant.

Personaleinsatz	07/0	08/0	09/0	10/0	11/0	12/0	01/0	02/0	03/0	04/0	05/0	06/0
	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
½ Ingenieur												
½ Techniker												
Student												
Personaleinsatz	07/0	08/0	09/0	10/0	11/0	12/0	01/0	02/0	03/0	04/0	05/0	06/0
	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
½ Ingenieur												
½ Techniker												
Student												

Tabelle 2

Für das Vorhaben ist der Einsatz eines ausreichend dimensionierten elektrodynamischen Schwingtisches zur Simulation der Auswirkungen von Stoß- und Schwingungsbelastungen auf die Verschiebung von Packstücken in Ladeeinheiten erforderlich. Ein solcher Schwingtisch ist im Labor der Forschungsstelle bereits vorhanden.

Im Rahmen des Projektes sind weiterhin geeignete FEM-Software mit entsprechender Hardware, eine Hochgeschwindigkeitskamera zur Auswertung der Laborsimulationen sowie Musterladeeinheiten in ausreichender Anzahl erforderlich. Diese Sachmittel sind möglichst frühzeitig während der Durchführung des Projektes angeschafft worden.

Sachmittel	Zweck	Vorhanden	Nicht vorhanden
Elektrodynamischer Schwingtisch	Durchführung der experimentellen Laborsimulationen		
FEM-Software und Hardware	Durchführung computergestützter FEM-Simulationen		
Muster-Ladeeinheiten	Durchführung der experimentellen Laborsimulationen		
Hochgeschwindigkeitskamera	Dokumentation und Analyse von Packstückverschiebungen in Ladeeinheiten		

Tabelle 3

Aus der zuvor beschriebenen Planung des Personal- und Sachmitteleinsatzes ergibt sich nachstehende Finanzmittelbedarfsplanung. Die Planung umfasst den gesamten

Projektzeitraum von zwei Jahren, damit die Zuordnung zur detaillierten Tätigkeitsplanung anhand der Tabellen 1a bis 3 vorgenommen werden kann.

Finanzmittel		BFSV	Union Deutsche Lebensmittelwe rke
Personal	½ Ingenieur (TU)		
	½ Techniker		
	Student		
	Sicherstellung der Praxisrelevanz durch beratende Projektbegleitung		
	Finanzielle Direktunterstützung		
Sachmittel	FEM-Software mit geeigneten Auswertungsmodulen (z.B. Kontaktanalyse) und erforderliche Hardware		
	Nutzung dynamisches Prüflabor (ca. 60 Tagessätze à DM 800,-)		
	Hochgeschwindigkeitskamera m. Zubehör		
	Muster-Ladeeinheiten		
Zwischensumme 1			
Zwischensumme 2			
Zzgl. Gemeinkostenpauschale	50%		
Gesamt			

Tabelle 4

Die aufgeführten Planungen wurden im Wesentlichen eingehalten. Insbesondere die Arbeitspläne wurden sehr flexibel auf die vorhandenen Schwierigkeiten z.B. durch den Umbau reagiert und einzelne Schritte durch vermehrten Personaleinsatz im Anschluss wieder aufgearbeitet. Der Arbeitsplanpunkt „Durchführung, Evaluierung und Verfeinerung der FEM-Simulationen“ wurde durch eine sinnvolle praxisbezogene Umsetzung der Messergebnisse in reale Ladeeinheitensicherungsmaßnahmen-Optimierung ersetzt und somit das Ziel der Forschung erreicht.

4. Wissenschaftlich technischer Stand an dem angeknüpft wurde

Der Stand der Forschung in dem untersuchten Bereich ist nahezu „null“. Die Komplexität des Sachverhaltes hat bisher keine detaillierten Forschungsergebnisse zugelassen. Die Ladeeinheitensicherung erfolgt in der Praxis nach wie vor intuitiv durch den jeweils für den Versand Verantwortlichen. Dies bestätigte sich auch durch die Kontakte des Institut für BFSV zu führenden Lebensmittelkonzernen. Im Laufe des Vorhabens wurden regelmäßige (vierteljährlich) Literaturrecherchen im Internet und in den gängigen Hamburger Hochschulbibliotheken durchgeführt, sowie die Fachliteratur monatlich gesichtet. Es wurden keine neuen Ergebnisse die das Vorhaben betreffen bekannt. Weiterhin wurden sowohl Fachkongresse, wie z.B. die IIAPRI Konferenz 2001 in Warschau, als auch Messen und Hochschulkontakte für einen regelmäßigen Wissenstransfer genutzt.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit mit anderen Stellen beschränkte sich hauptsächlich auf den Industriepartner:

Union Deutsche Lebensmittelwerke AG, Dammtorwall 15, 20355 Hamburg

Die Union Deutsche Lebensmittelwerke AG hat das Projekt beratend und unterstützend begleitet. Insbesondere wurde dadurch die Praxisrelevanz und die praktische Anwendbarkeit der erarbeiteten Simulationsansätze sichergestellt. Weiterhin wurde eine Zusammenarbeit mit der Fa. Adams, dem Lieferanten der Simulationssoftware; schon im Ansatz abgebrochen, da die Consultingabteilung von der Fa. Adams eine Anwendbarkeit der derzeitig verfügbaren Software auf die schon bis dahin erzielten umfangreichen und viele Parameter enthaltenden Ergebnisse für nicht gegeben hielt.

Prof. Eschke
-Leiter der Forschungsstelle-

II. Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Institut für BFSV	Förderkennzeichen: 0330065
Vorhabensbezeichnung: „Verbesserung des integrierten Umweltschutzes durch den Einsatz von computergestützten Simulationsverfahren zur versandgerechten Dimensionierung von Sicherungsmitteln für Ladeeinheiten in der Ernährungsindustrie“	
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2001 - 31.01.2003	
Berichtszeitraum: 01.02.2001 - 31.01.2003	

II. Eingehende Darstellung:

6. Erzielte Forschungsergebnisse

Die praxisorientierten Untersuchungen an den vom Projektpartner zur Verfügung gestellten Ladeeinheiten haben verdeutlicht, dass i.d.R. eine deutlich überdimensionierte Ladeeinheitensicherung betrieben wird. Im Vergleich zum Anlieferzustand konnte bei allen Ladeeinheiten eine Verringerung der Sicherungsmaßnahmen erzielt werden. Generell lässt sich aufgrund der **Matrix 1** aus dem Schlussbericht schließen, dass ein erhebliches Einsparungspotential im Bereich der Ladeeinheitensicherung vorhanden ist. Eine Reihe Ladeeinheiten kommt mit minimalem Einsatz von Ladeeinheitensicherungs-mitteln, wie beispielsweise Stretchfolie aus, da die resultierenden Bewegungen der Einzelpackstücke während des Transportprozesses als gering einzustufen sind. Die im Rahmen der Forschung festgestellten maximal nach außen tretenden gemessenen Kräfte betrug 2g (zweifache Erdbeschleunigung [$1g=9,81m/s^2$]).

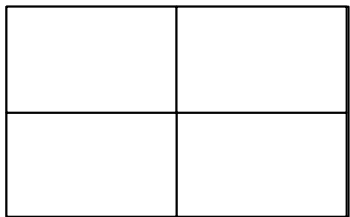
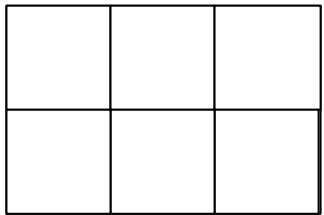
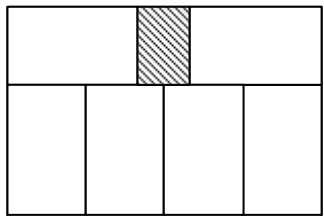
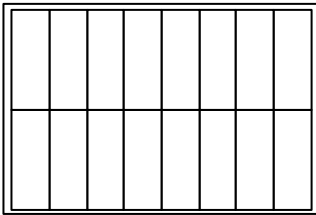
Abhängig von der Einzelpackstückmasse ergeben sich daraus:

$F = m * a$	mit $a=2g$ ergibt sich:
$F_{\max} = \text{Einzelpackstückmasse} * 2g$	

Aufgrund der erzielten Forschungsergebnisse aus der **Matrix 1** sollte es möglich sein in vielen Bereichen der Wirtschaft und insbesondere im Bereich der Lebensmittelindustrie erhebliche Mengen an Ladeeinheitensicherungsmitteln einzusparen. Wenn man bedenkt, dass ein Großteil der Transport lückenlos gestaut erfolgt, d.h. dass zwischen mehreren Paletten auf der Ladefläche oder im Container dicht an dicht stehen, so ist eine noch deutlich weitergehende Reduzierung von Ladeeinheitensicherungsmitteln möglich, da eine Verschiebung der Einzelpackstücke durch die benachbarten Ladeeinheiten verhindert wird. Daraus resultiert ein erheblicher Beitrag zum Umweltschutz.

6.1 Analyse und Kategorisierung palettierter Ladeeinheiten aus der Ernährungsindustrie hinsichtlich Packschemata und physikalischer Eigenschaften.

Ein wesentlicher Parameter für das Bewegungsverhalten von Packstücken während des Transportprozesses sind die physikalischen Eigenschaften der Packstücke. Hierbei ergibt sich eine Abhängigkeit zwischen den Abmessungen, den Massen, den Stapelschemata und den Oberflächenbeschaffenheiten der einzelnen Packstücke und der entsprechend auftretenden Packstückverschiebung. Die Analyse der in der mitteleuropäischen Lebensmittelindustrie eingesetzten Paletten ergab zu 90% den Einsatz von Europaletten (1200 mm x 800 mm). Hieraus resultiert eine Konzentration der Forschungstätigkeiten auf Ladeeinheiten deren Grundlage eine Europalette bildet. Generell wird bei der Palettierung ein möglichst hoher Flächennutzungsgrad angestrebt. Dieser sollte 100% sein aber mindestens 90 % betragen. Des weiteren kommen in der Lebensmittelindustrie sowohl Säulen- als auch Verbundstapelung in Betracht. Die folgende Tabelle 1 GIBT einen Überblick über die in der Lebensmittelindustrie häufig eingesetzten Stapelschemata.

Packstückabmessungen (L x B) [mm]	Flächennutzungsgrad	Schematische Darstellung
600 x 400	100%	
300 x 400	100%	
300 x 500	93,75%	
380 x 143	90,57	

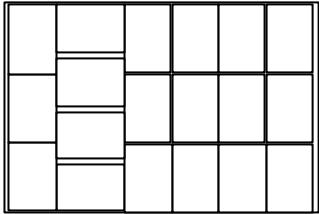
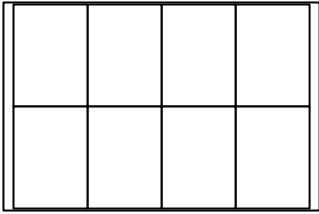
262 x 178	92,3	
390 x 283	92	

Tabelle 1: Typische Stapelschemata der Lebensmittelindustrie

Ausgehend von den statistisch relevanten Packschemata aus Tabelle 1 wurden die zu untersuchenden Ladeeinheiten festgelegt. Diese wurden vom Projektpartner für die Untersuchungen bereitgestellt und sind in der Tabelle 2 zusammen gefaßt.

	Dosenkartoffeln	Semmelknödel	Kartoffelbrei	Mineralwasser
Masse des Einzelpackstücks	3199 g	1867 g	4360 g	6560 g
Volumen des Einzelpackstücks	260×178×117 mm ³	380×143×181 mm ³	390×283×116 mm ³	255×190×238 mm ³
Packstoff	Blechdosen+ Wellpappetray	Pappeschachtel+ Wellpappetray	Wellpappe- schachtel	PET-Flaschen+ Schrumpffolie
Abmessung der Ladeinheit	1152×786×964 mm ³	1144×760×869 mm ³	1145×780×1495 mm ³	1148×768×956 mm ³

Tabelle 2: Ladeeinheiten mit entsprechenden Daten

Um der Stellungnahme der Begutachtung des Zwischenberichtes gerecht zu werden wurden weitere "kritische Ladeeinheiten für die Untersuchung vom Projektpartner bereitgestellt und im Rahmen des Projektes untersucht. Diese zusätzlichen Einheiten spezifiziert die Tabelle 3.

	Frühstückscerealien	Planzenöl
Masse des Einzelpackstücks	12360 g	13720 g
Volumen des Einzelpackstücks	790×383×410 mm ³	335×250×248 mm ³
Packstoff	PE-Beutel+ Wellpappeschachtel	Glasflaschen+ Wellpappeschachtel
Abmessung der Ladeinheit	1160×790×1790 mm ³	1170×690×885 mm ³

Tabelle 3: Ladeeinheiten mit entsprechenden Daten

Alle angelieferten Paletten waren gestretcht und bei der Anlieferung in einem einwandfreien Zustand. Zwischen der unteren Lage und der jeweiligen Palette befand sich je eine Papierlage. Zwischen den einzelnen Packstücklagen waren ebenfalls Papier-zwischenlagen vorgesehen. Um diese Einflussparameter bei den späteren Betrachtungen mit einbeziehen zu können wurden die unterschiedlichen Reibungskoeffizienten ermittelt. Diese spielen unabhängig von Einwirkrichtung der Belastungen für die horizontale Packstückverschiebung eine signifikante Rolle. Nur bei den Ladeeinheiten mit den Frühstückscerealien, dem Speiseöl und den Semmelknödeln waren keine Papierzwischenlagen vorhanden. Hier wurden die Reibungskoeffizienten der Schachteln untereinander und der Schachteln auf der Palette gemessen. Hierzu wurde mit einer Umlenkrolle und einer Zugprüfeinrichtung an den Einzelpackstücken gezogen. Den Meßaufbau und die entsprechenden gemessenen Werte liefert die Tabelle 4. Die gesamten Messdaten enthält der **Anhang 3** dieses Berichtes

	Dosenkartoffeln	Semmelknödel	Kartoffelbrei
Palette ohne Papier	0,405~0,407	0,421~0,423	0,417~0,464
Palette mit Papier	0,391~0,425	0,365~0,429	0,381~0,456
ohne Zwischenlage	0,495~0,535	0,455~0,551	0,327~0,758
mit Zwischenlage	0,408~0,409		0,449~0,524
	Speiseöl	Frühstückscerealien	Mineralwasser
Palette ohne Papier	0,419~0,432	0,422~0,441	0,391~0,409
Palette mit Papier	0,378~0,415	0,401~0,424	0,365~0,4
ohne Zwischenlage	0,457~0,493	0,436~0,455	0,572~0,591
mit Zwischenlage			0,479~0,512



Tabelle 4: Reibungskoeffizienten der ausgewählten Produkte und Darstellung der Messung
6.2 Definition von Prüfprofilen für die Laborsimulation auf der Basis realistischer Belastungsgrößen.

Zur Ermittlung realistischer Belastungsgrößen wurden sowohl versandbegleitende Datenaufzeichnungen vorgenommen als auch Handhabungsuntersuchungen mit Flurfördergeräten durchgeführt.

Die Messungen während realer Transporte haben typischerweise ähnliche Werte der spektralen Leistungsdichte ergeben, wie in der internationalen Normung angegeben. Beispielhaft sei das folgende Diagramm 1 genannt. Es stellt die spektrale Leistungsdichte für ca. 1000 km LKW-Versand innerhalb Mitteleuropas dar. Zum Vergleich dazu ist in der unteren linken Bildecke der Leistungsdichteverlauf aus der ASTM D 4728 abgebildet. Beide Plots sind nahezu deckungsgleich. Bei den im innereuropäischen LKW-Versandprozess gemessenen Stößen war eine ähnliche Tendenz zu erkennen. Viele der Stoßparameter und Stoßanzahlen waren ähnlich wie in der DIN 30786 festgelegt.

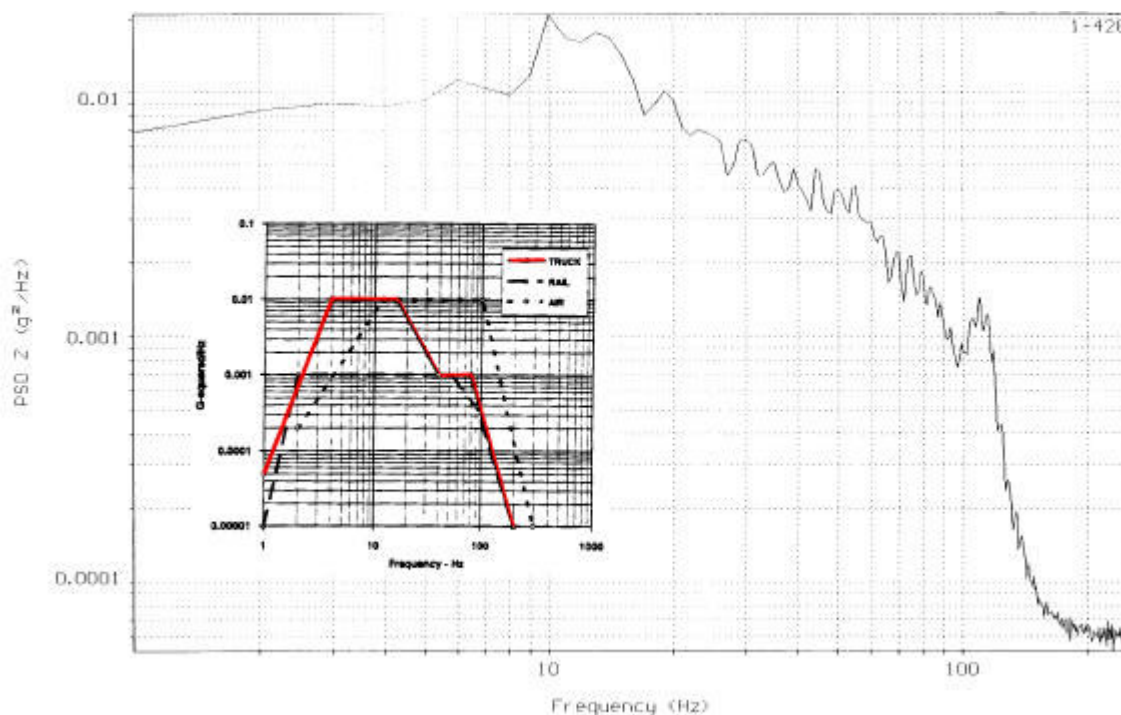


Diagramm 1: Vergleich eines gemessenen PSD-Spektrums mit der ASTM D 4728

Die Handhabungsversuche mit Flurförderzeugen ergaben beim Absetzen der Ladeeinheiten auf einem ebenen Betonboden die Mittelwerte aus der Tabelle 5. Die gemessenen Stoßparameter liefert der **Anhang 4**.

Art des Flurförderzeuges	Messrichtung	Hubhöhe	Stoßintensität	Stoßzeit	Bemerkungen
Handgabelhubwagen	Vertikal	100 mm	2,5 g	8 ms	keine
Handgabelhubwagen	Vertikal	50 mm	0,9 g	20 ms	Keine
Handgabelhubwagen	Horizontal	Keine	1,5	15	Beim Absetzen
Gabelstapler	Vertikal	100 mm	8 g	6 ms	Keine
Gabelstapler	Vertikal	150 mm	12 g	8 ms	Keine
Gabelstapler	Horizontal	Keine	13 g	22 ms	Beim Absetzen
Gabelstapler	Horizontal	Keine	18 g	18 ms	Beim Absetzen
Gabelstapler	Vertikal	Keine	5 g	15 ms	Schlagloch-fahrt

Tabelle 5: Messung beim Transport mit Flurförderzeugen

Als Folge der gemessenen Werte wurde das folgende Prüfprogramm zugrunde gelegt, welches damit auch auf nationalen und internationalen Normen basiert. Weiterhin wurden praxisnah drei Umschlagprozesse angenommen. Ein Umschlag manuell, zwei mittels Stapler.

Prüfprogramm (vertikale Belastungsrichtung):

Prüfung	Prüfparameter	Prüfbelastung	Referenz
<u>Rütteln</u>	4 bis 5 Hz ; (A = 25 mm)	1 Stunde	DIN-EN 22247
<u>Random-Vibration</u>	LKW: Truck-Spektrum	1 Stunde	MILSTD 810 F
<u>Dauer-Schocken</u>	2,5 g / 8 ms	1 Stück	DIN 30786
	12 g / 8 ms	2 Stück	
	5 g / 15 ms	2 Stück	
	18 g / 3 ms	16 Stück	
	17 g / 5 ms		
	17 g / 3 ms	160 Stück	
	16,5 g / 5 ms		
	15 g / 4 ms	1600 Stück	
	16 g / 6 ms		
	12 g / 5 ms	16000 Stück	
15 g / 7 ms			

Tabelle 6a: Packstückprüfprogramm

Prüfprogramm (horizontale Belastungsrichtung, längs):

Prüfung	Prüfparameter	Prüfbelastung	Referenz
<u>Rütteln</u>	4 bis 5 Hz ; (A = 25 mm)	1 Stunde	DIN-EN 22247
<u>Random-Vibration</u>	LKW: Truck-Spektrum	1 Stunde	MILSTD 810 F
<u>Dauer-Schocken</u>	1,5 g / 15 ms	1 Stück	DIN 30786
	18 g / 11 ms	2 Stück	
	13 g / 1 ms	16 Stück	
	12 g / 5 ms		
	12 g / 1,5 ms	160 Stück	
	11 g / 5 ms		
	11 g / 2 ms	1600 Stück	
	10 g / 6 ms		
	8 g / 4 ms	16000 Stück	
8 g / 10 ms			

Tabelle 6b: Packstückprüfprogramm

Prüfprogramm (horizontale Belastungsrichtung, quer):

Prüfung	Prüfparameter	Prüfbelastung	Referenz
<u>Rütteln</u>	4 bis 5 Hz ; (A = 25 mm)	1 Stunde	DIN-EN 22247
<u>Random-Vibration</u>	LKW: Truck-Spektrum	1 Stunde	MILSTD 810 F
<u>Dauer-Schocken</u>	1,5 g / 15 ms	1 Stück	DIN 30786
	18 g / 11 ms	2 Stück	
	13 g / 1 ms	16 Stück	
	11 g / 2 ms		
	12 g / 1,5 ms	160 Stück	
	10 g / 3 ms		
	11 g / 2 ms	1600 Stück	
	8,5 g / 4 ms		
	8 g / 4 ms	16000 Stück	
	7 g / 5 ms		

Tabelle 6c: Packstückprüfprogramm

6.3 Durchführung von charakteristischen Belastungssimulationen an ausgewählten Ladeeinheiten im Labor. Fototechnische Dokumentation (per Hochgeschwindigkeitskamera) und Analyse des Bewegungsverhaltens der Packstücke bei unterschiedlichen Randbedingungen.

In einem ersten Schritt wurde die Messtechnik konfiguriert und die entsprechenden Applikationen entwickelt und programmiert, um eine sinnvolle schnelle und auswertbare Messung sicherzustellen.

Danach wurde mit der Untersuchung der Ladungsverschiebungen im Labor begonnen. Die vorhandene Erfahrung bei der Simulation von Versandbelastungen hat gezeigt, dass auch bei vertikaler Anregung mit horizontalen Ladungsverschiebungen zu rechnen ist. Daher wurde festgelegt, dass die vertikale Belastungsrichtung als erstes untersucht werden soll. In die einzelnen oben aufgeführten Paletten wurden die festgelegten Belastungsparameter eingeleitet. Hierbei wurden die Paletten in den folgenden Varianten mit den oben genannten Prüfprogrammen beaufschlagt:

- Ungesichert
- Gesichert wie angeliefert.

Einen Teil der Auswertungen liefert der **Anhang 1a**. Einige der dokumentierten Fotos im Rahmen der Versuche liefert der **Anhang 2**.

In der vertikalen Anregungsrichtung war es bisher trotz diverser Messungen nicht möglich verwertbare Ergebnisse zu erzielen. Die Schwierigkeit bestand darin, eine Reproduzierbarkeit der Packstückverschiebung und der damit verbundenen interessierenden auftretenden Querkräfte zu ermitteln. Die Bewegungen der einzelnen Packstücke waren, bei gleichen eingeleiteten Belastungen und identischer jeweils neu durchgeführter Stapelung, nicht gleich. Daraus ist zu schließen, dass die Menge der zu berücksichtigenden Einflussgrößen so groß ist, dass bei vertikaler Anregung eine systematische reproduzierbare Packstückverschiebung nicht zu ermitteln ist. Kleinste Veränderungen im Ladeeinheitenaufbau haben hierbei große Auswirkungen auf die Verschiebung. Die gemessenen Größen wurden dennoch in das Forschungsergebnis eingebunden. Aus den erzielten Ergebnissen ist ein Rückschluss auf die Ladungssicherung möglich. Bei vollflächigen, lückenlosen Stauen kann eine minimale Ladeeinheitensicherung gewählt werden.

Als Beispiel einer besonders stark ausgeprägten Verschiebung nach vertikaler Belastung der Einzelpackstücke ist die Abbildung 2 zu betrachten.

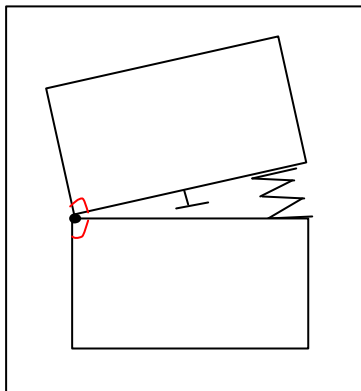


Abbildung 2: Packstückverschiebung

Im Rahmen der dynamischen Prüfungen in der horizontalen Richtung wurden gleiche Schwierigkeiten wie bereits in der vertikalen Richtung gemessen. Die an den unterschiedlichen Einzelpackstücken auftretenden Beschleunigungen waren bei jeder Messung unterschiedlich. Im folgendem sollen kurz die hierfür verantwortlichen Parameter näher erläutert werden.

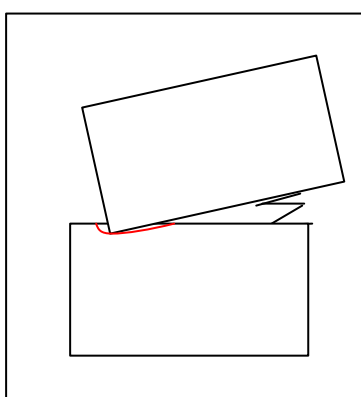
- a. Einen entscheidenden Einfluss auf die Veränderung der Messwerte zwischen zwei Messungen am gleichen Messpunkt nach neu erfolgter Stapelung der Ladeinheit ist die Tatsache, dass eine identische Aufstapelung - hier sorgfältig manuell durchgeführt - nicht möglich ist und schon kleinste, u.U. nur wenige Millimeter betragende geometrische Veränderungen innerhalb der Ladeinheit zu erheblichen Veränderungen des Verhaltens der Ladeinheit unter Vibrations- und Stoßeinwirkung führen.
- b. Die Veränderung der Messwerte zwischen 2 Stößen ist z.B. damit zu begründen, dass von einem zum nächsten Stoß die Geometrie der Ladeinheit verändert wird und damit nicht mehr die selben Ausgangsbedingungen herrschen.

Hier spielen u.a. die folgenden Betrachtungen eine erhebliche Rolle.



Kippen der Packstücke bei horizontaler Belastungsrichtung. Durch die Veränderung der Auflagegeometrie wird eine Änderung der Kraft bewirkt die ein Verschieben verursacht. Gleichzeitig ergeben sich partielle Verformungen im Bereich der aufliegenden Kante.

Abbildung 3a: Packstückkipverhalten (Kante auf Kante)



Noch komplexer wird die Beschreibung der Vorgänge bei denen die Einzelpackstücke aufgrund der Vibrations- und Schockbelastungen soweit verschoben sind, das die sie nicht mehr direkt übereinander liegen. Da die Seitenwände von Wellpappeschachteln i.d.R. eine wesentlich höhere Tragkraft besitzen als die Deckel und Bodenflächen, wird hier beim leichten Ankippen der Packstücke aufgrund der Belastungen die

Deckelfläche einseitig verformt.

Abbildung 3b: Packstückkipverhalten (Kante auf Fläche)

- c. Ein weiterer Punkt für nicht reproduzierbare Ergebnisse ergibt sich daraus, dass sich mit fortschreitender Dauer der Einwirkung von Vibrationen und Stößen die Reibungskoeffizienten der einzelnen Ladeeinheitenkomponenten (Packstücke) verändern. Dieses resultiert zum einen aus der Verformung der Einzelpackstücke und zum anderen aus der Veränderung der Oberfläche der einzelnen Komponenten.

Die nachfolgende Tabelle 7 liefert einige Messwerte, die bei der Beschleunigungsmessung an den Einzelpackstücken der unterschiedlichen Ladeeinheiten gemessen wurden. Sie soll verdeutlichen, aus welchem Grund eine weitere Betrachtung der Beschleunigungen und der daraus resultierenden Kräfte sich als nicht sinnvoll erwiesen hat, da die Messfehler teilweise größer waren als die gemessenen Unterschiede beispielsweise zwischen zwei Stößen. Desweiteren waren die

Messwerte derartig niedrig, daß teilweise gerade der Anfangsmessbereich der Aufnehmer erreicht wurde.

Lage auf der Palette (von unten nach oben)	Verteilung auf der Palette	Dosenkartoffeln am Beispiel des 8g/10ms Schock (längs)
1. Lage	Rechts	0,745
1. Lage	Mittig	0,652
1. Lage	Links	0,698
2. Lage	Rechts	0,725
2. Lage	Mittig	0,702
2. Lage	Links	0,699
3. Lage	Rechts	0,789
3. Lage	Mittig	0,722
3. Lage	Links	0,773
4. Lage	Rechts	0,741
4. Lage	Mittig	0,786
4. Lage	Links	0,658
5. Lage	Rechts	0,763
5. Lage	Mittig	0,682
5. Lage	Links	0,721
6. Lage	Rechts	0,653
6. Lage	Mittig	0,687
6. Lage	Links	0,635
7. Lage	Rechts	0,776
7. Lage	Mittig	0,714
7. Lage	Links	0,623

Tabelle 7: Gemessene Beschleunigungen an den einzelnen Packstücken der Stirnseite der Ladeinheit "Kartoffel pur"

Diese Messwerte liegen für eine Vielzahl der Ladeinheiten und Belastungen vor. Sie sind im **Anhang 1a** aufgelistet. Auf die Darstellung aller Messungen wurde wegen identischer Ergebnisse verzichtet. Die Ergebnisse sollen die undefinierten und nicht zu systematisierenden Messergebnisse verdeutlichen, welche zum teilweisen Scheitern dieser Art der Untersuchung beigetragen haben. Bei den Messwerten handelt es sich um die Mittelwerte bezogen auf die Anzahl der eingeleiteten Stöße. Eine Analyse jedes einzelnen Stoßes wurde durchgeführt und wie beschrieben ggf. nach erneutem Aufstapeln wiederholt, diese hat jedoch keine zusammenhängenden Resultate ergeben.

Die aufgelisteten Werte sind dennoch für die weitere Dimensionierung von Ladeeinheitensicherungsmitteln nützlich. Zumal generell resultierende Beschleunigungen an den Einzelpackstücken von bis zu 2g (2-fache Erdbeschleunigung) gemessen wurden. Hieraus resultiert die auf die Ladeeinheitensicherung nach außen wirkende Kraft.

6.4 Entwicklung von mathematischen Modellen zur Simulation von Verschiebungen in Ladeeinheiten

Der Ansatz des Forschungsvorhabens kann nach den statistisch ausgewerteten Messergebnissen zur Beschreibung vom Bewegungsverhalten von Ladeeinheiten nur als bedingt geeignet gelten. Den ersten Ansatz soll die Abbildung 4 verdeutlichen.

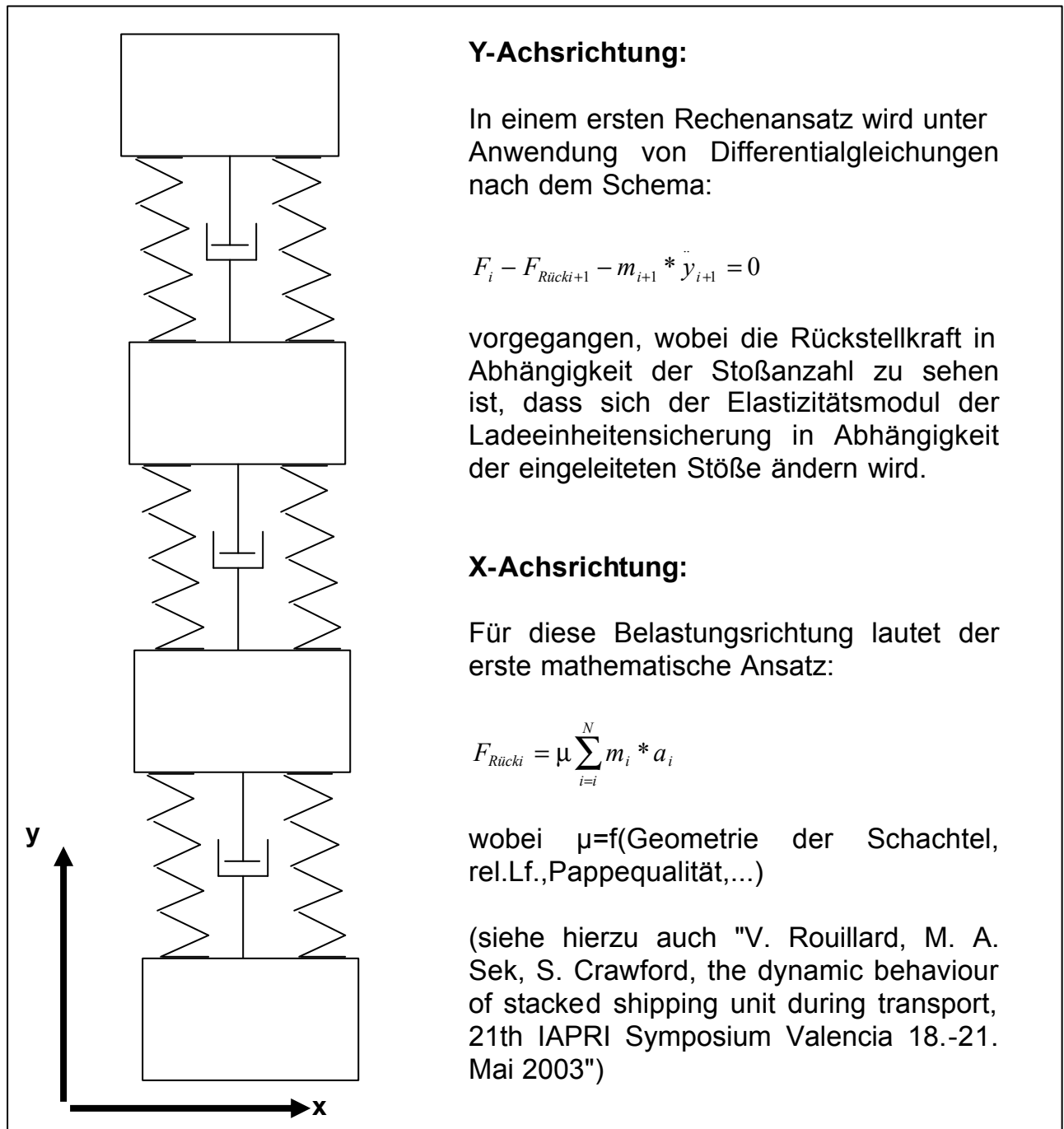


Abbildung 4: Mathematischer Ansatz

Leider ist dieser Ansatz aufgrund des sich verändernden Modells während der Vibrations- und Schockbelastung als gänzlich ungeeignet zu bezeichnen. Er wäre lediglich für massen- und oberflächenhomogene Körper geeignet.

Eine Untersuchung an derartigen Packstücken oder Probekörpern scheidet aus, da es nicht realitätsnah und insofern nicht beim Projektträger beantragt war. Eine Übertragung auf die Praxis ist nicht möglich.

Die Aufstellung der Differentialgleichungen und die daraus resultierende Entwicklung eines rechnergestützten Simulationsmodells wurde versucht mit Hilfe der Consulting Abteilung der Fa. Adams (Lieferant der Simulationssoftware, basierend auf FEM) zu realisieren. Die Mitarbeiter der Fa. Adams bestätigten nach intensiven gemeinsamen Versuchen die Tatsache, dass eine derartig große Anzahl sich im Laufe der Simulation verändernder Parameter z.Z. nicht durch ein Softwaremodell zu lösen ist.

Da die weitere Betrachtung mathematischer Zusammenhänge und deren Umsetzung dadurch in Frage gestellt wurde, wurde auf die zweite, ursprünglich parallel zur Messung vorgesehene Methode zur Ermittlung der Bewegungen innerhalb der Ladeeinheit zurückgegriffen, die Bewegungsermittlung mittels Video und Bearbeitungssoftware.

Um im Rahmen des Projektes sinnvolle und für die Praxis anwendbare Ergebnisse zu erzielen, wurde im weiteren Verlauf des Projektes auf die aufwendige und nicht zu dem Ergebnis der Forschung beitragende Messung der Beschleunigungsdaten verzichtet. Statt dessen wurde auf die visuelle Überwachung mittels Videokamera und die Auswertung der Bilddaten gesetzt.

Die Messung mittels Videoanalyse hat die folgenden Hauptmerkmale ergeben:

Die **Hauptschwachstellen** der Ladeeinheiten bilden die **oberen Lagen Einzelpackstücke und die unterste Lage am Übergang zur Palette**. (Abbildungen S.185 u. 190) Hier ergaben sich ohne (ausreichende) Ladeeinheitensicherung massive Verschiebungen bis hin zum Versagen des gesamten Zusammenhaltes der Einheit. Die Begrenzung der Verschiebung war mit kleinem Einsatz von Ladeeinheitensicherungsmitteln möglich. Die als optimal anzusehenden Sicherungsmethoden liefert die **Matrix 1**. Eine ausgewählte Anzahl von Datensätzen der Videomessungen liefert der **Anhang 1b**.

Im folgenden sollen im Rahmen der Versuche exemplarische Beispiele für die Prüfungen an den Ladeeinheiten zur Ermittlung einer optimierten Ladeeinheitensicherung aufgelistet werden.

Die Prüfung ganz ohne Ladeeinheitensicherungsmaßnahmen erwies sich schnell als unsinnig, weil die Einheiten schon nach den ersten Minuten der Simulation aus den in den Tabelle 6 dargestellten Prüfprogrammen Auflöseerscheinungen zeigten. Abbildung 5 soll diese Tatsache am Beispiel der Frühstückscerealien verdeutlichen. Aus diesem Grund wurden insbesondere bei den Belastungen „Rütteln“, „Random-Vibration“ und bei den Stoßbelastungen mit 1600 bzw. 16000 Stößen die Simulation vorzeitig abgebrochen und nicht die gesamte Prüfzeit erreicht. Diese Tatsache ist ebenfalls in einigen der Tabellen des **Anhang 1b** nachzuvollziehen.



Abbildung 5: Verrutschte Ladeeinheit, ungesichert mit Frühstückscerealien nach den Prüfungen „Rütteln“, „Random-Vibration“ und „Schocken 1,5g/15ms“

Um die für die jeweilige Ladeeinheit optimalen Ladeeinheitensicherungsmaßnahmen zu ermitteln, wurden Versuche mit dem unterschiedlichsten Aufwand an Ladeeinheitensicherungen durchgeführt.

Einige Auszüge sollen hier genannt werden, die verdeutlichen, wie die Auswahl der optimalen Ladeeinheitensicherung getroffen werden kann. Die Versuche ohne Ladeeinheitensicherung und die Versuche bei denen an den Ladeeinheiten die Beschleunigungen gemessen wurden hatten bereits deutlich gezeigt, dass die Stöße in der horizontalen Belastungsrichtung die größten Verschiebungen **innerhalb** der Ladeeinheiten verursachen.

Die Abbildung 6 zeigt eine Ladeeinheit mit dem Produkt "Kartoffel pur" die einzig durch 2 Kunststoffumreifungsbänder und einen Wellpappezuschnitt über der oberen Lage sowie zwei Kantenschoner gesichert war.



Abbildung 6: Ladeeinheitensicherung an der Ladeinheit "Kartoffel pur" mittels zweier Umreifungsbänder nach 4999 Schock 8g/10ms

In einem weiteren Schritt wurden die Ladeeinheitensicherungsmaßnahmen „erhöht“. Auch dieser Vorgang soll an der Ladeinheit "Kartoffel pur" verdeutlicht werden. Die Einheit aus Abbildung 6 wurde im folgenden zusätzlich zur 2-fachen Bandumreifung 1,5-fach gestretcht, das heißt Stretchung mit halber Überlappung.

Als Stretchfolie kam bei allen Optimierungsversuchen eine 16 µm PE-Folie zu Einsatz, die zum stretchen ca. 30% vorgereckt wurde.

Den Zustand vor und nach der Prüfung zeigt die Abbildung 7. Die Verbindung aus Packstücken und Palette hielt den Belastungen nicht stand.

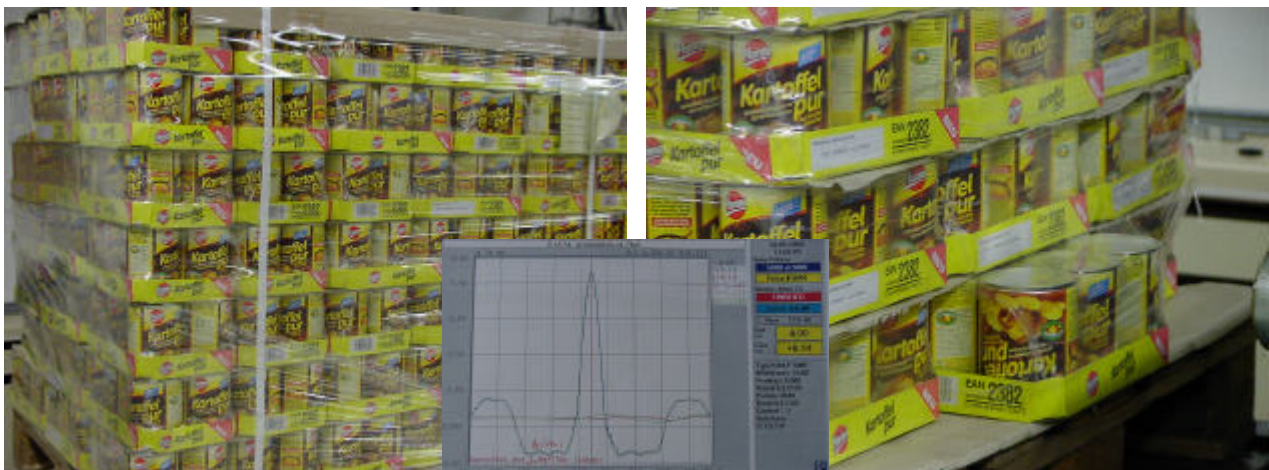


Abbildung 7: "Kartoffel pur" 2-fach gebändert und zusätzlich 1,5-fach gestretcht nach 5000 Schocks 8g/10ms

Um die Verbindung zwischen der unteren Lage Einzelpackstücke und der Palette zu verbessern wurde nach weiteren Zwischenschritten als optimale Lösung 2-fach gebändert und im unteren Bereich 4-fach gestretcht und nach oben hin 1,5-fach.



Abbildung 8: "Kartoffel pur" 2-fach gebändert und zusätzlich unten 4-fach und oben 1,5-fach gestretcht

Im folgenden eine kurze Beschreibung der optimalen Ladeeinheitensicherungsmethode für die untersuchten Einheiten.

Ladeinheit	Anzahl der Packstücke pro Lage	Einzelpackstückmasse	Maßnahme
Kartoffelbrei	8	4360g	6-fach stretchen im Übergang Palette Packstück. Nach oben hin 4-fach weiterstretchen. Wellpappe Zuschnitt auf der oberen Packstücklage verwenden
Semmelknödel	16	1867g	4-fach stretchen im Übergang Palette Packstück. Nach oben hin 2-fach weiterstretchen. Wellpappe Zuschnitt auf der oberen Packstücklage verwenden

Dosenkartoffeln	19	3199	2-fach gebändert und zusätzlich 4-fach stretchen im Übergang Palette Packstück. Nach oben hin 1,5-fach weiterstretchen. Wellpappe Zuschnitt und Kantenschoner auf der oberen Packstücklage verwenden
Mineralwasser in 0,5l PET-Flaschen	8	6560	2-fach gebändert und zusätzlich 4-fach stretchen im Übergang Palette Packstück. Nach oben hin 3-fach weiterstretchen. Wellpappe Zuschnitt und Kantenschoner auf der oberen Packstücklage verwenden
Pflanzenöl	10	13720	2-fach gebändert und zusätzlich 8-fach stretchen im Übergang Palette Packstück. Nach oben hin 5-fach weiterstretchen. Wellpappe Zuschnitt und Kantenschoner auf der oberen Packstücklage verwenden
Frühstücks-cerealien	3	12360	2-fach gebändert und zusätzlich 2-fach stretchen im Übergang Palette Packstück. Nach oben hin 1,5-fach weiterstretchen. Wellpappe Zuschnitt und Kantenschoner auf der oberen Packstücklage verwenden

Tabelle 8: Optimierte Ladeeinheitensicherung

Aus der Vielzahl dieser hier nur beispielhaft genannten Prüfungen wurden **zwei** Merkmale abgeleitet, die die Ladeeinheitensicherungsmethode bestimmen.

Hierbei handelt es sich um die Einzelpackstückabmessungen und damit die Anzahl der Packstücke je Lage und die Einzelpackstückmasse der Ladeinheit.

Die nachfolgende Matrix ermöglicht eine exakte Auswahl der Ladeeinheitensicherung für einen ca. 1000 km langen LKW-Versand in Mitteleuropa.

		Einzelpackstückgewicht		
		Weniger als 2 kg	2 bis 7 kg	7 bis 15 kg
Anzahl der Ein- zelpack- stücke je Lage	Bis 3 Packstücke	-	-	2-fach Bändern
	3 bis 8 Packstücke	-	Stretchen	2-fach Bändern + Stretchen
	8 bis 20 Packstücke	Stretchen	2-fach Bändern + Stretchen	

Matrix: Optimierter Einsatz von Ladeeinheitensicherungsmitteln

Der Einfluss der Höhe wurde nicht ermittelt, da keine identisch aufgebauten Ladeeinheiten des Projektpartners zur Verfügung standen. Der Einfluss der Höhe beschränkt sich jedoch auf die oberen Lagen. Diese werden, so haben es die Untersuchungen gezeigt, durch den auch im mittleren Bereich der Ladeeinheit vorhandenen Ladeeinheitensicherungsmittelleinsatz ausreichend gesichert. Beschleunigungen und daraus resultierende Kräfte, die auf die Ladeeinheitensicherungsmittel in horizontaler Richtung zukommen, bewegen sich in der Größenordnung von bis zu 2 g.

Die als besonders bruchempfindlich eingeschätzten Produkte auf den Ladeeinheiten mit Pflanzenöl und Frühstückscerealien haben genauso wie alle anderen keinerlei Schäden gezeigt! Es entstand aufgrund der Belastungen weder nennenswerter Abrieb an den Primärverpackungen, noch Glasbruch an den Flaschen. Die Frühstückscerealien waren nach Abschluss ebenfalls in einem als gut zu bezeichnenden Zustand. Die geprüften Verpackungen der Produkte können von der Anmutung her als weiterhin verkaufsfähig bezeichnet werden.

Im Hinblick auf die festgestellte Möglichkeit die Ladeeinheitensicherung zu reduzieren muss noch auf einen weiteren Optimierungspunkt hingewiesen werden, der immer dann zu Tragen kommt, wenn Ladeeinheiten vollflächig und lückenlos auf der Ladefläche oder im Container gestaut werden, d. h. die sachgemäße **Ladungssicherung**. Hierdurch kann eine weitere Reduzierung der Ladeeinheitensicherung vorgenommen werden, da die nebeneinander stehenden Ladeeinheiten gegenseitig eine Verschiebung von Einzelpackstücken verhindern.

Die Ergebnisse des Vorhabens können in verschiedenen Industriezweigen genutzt werden. Insbesondere partizipieren die Industriezweige von den Ergebnissen, die in großer Menge immer wieder identisch aufgebaute Ladeeinheiten versenden. Zu nennen sind hier neben der Lebensmittelindustrie auch die Industriezweige Kosmetik, Pharmazie, Chemie, sowie z.T. die Automobilzulieferindustrie. Das Ergebnis des Vorhabens liefert für eine Vielzahl von Ladeeinheiten eine gute Anleitung zur optimierten Sicherung.

Das Ziel des Vorhabens eine Optimierung der Ladeeinheitensicherung zu erreichen ist erreicht.

Prof. Eschke
-Leiter der Forschungsstelle-