

Ladungssicherung im Bigbagtransport

Studie zu Verschiebewegungen von Weichladungen

Prof. Ulrich Podzuweit

2013

Vorwort

Die hier vorgestellte Studie befasst sich mit Sicherheitsfragen von Schüttgütern in Bigbags und Säcken auf Straßenfahrzeugen. Allein schon Schüttgüter sind ein nicht ausreichend bearbeitetes Gebiet. Noch schwieriger wird die Schüttgutladung in Bigbags im Transport. Eine Ausarbeitung insbesondere zu theoretischen Fragen stößt schnell in unbekanntes Terrain vor. Sie kann oft nur Lösungsansätze und Wege aufzeigen, da das Fachgebiet noch eine Vielzahl nicht ausreichend untersuchter Felder hat. Ein Ziel der Studie soll es sein, einen Arbeitsansatz aufzuzeigen.

Daneben sollen Hintergrundinformationen zu der neuen VDI-Richtlinie Blatt 18 der 2700 geben. Eine Reihe von Aussagen und Vorgehensweisen dieser Richtlinie bedürfen einer ergänzenden Erläuterung, da sie in einer Richtlinie nicht umfassend erklärt werden können.

Mein Dank gilt der Firma Euro-Safe, die sich schwerpunktmäßig diesem Thema widmet und zweitens dem Königsberger Ladungssicherungskreis (KLSK), der sich dem Ladungssicherungsthema verpflichtet hat.

Ulrich Podzuweit

München, 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Ladung in Säcken	3
2.1	Ladungsgüter	3
2.2	Begriffe	5
2.2.1	Schüttgut	5
2.2.2	Schüttgutkegel	5
2.2.3	Schüttgutwinkel, Kegelwinkel	6
2.2.4	Einteilung nach Schüttgutwinkel α	6
2.2.5	Bedeutung des Schüttgutkegels	8
2.2.6	Gruppeneinteilung	8
3	Schüttguteigenschaften	11
3.1	Ladungsmasse	11
3.2	Setzen von Ladungen	11
3.3	Verdichtung	12
3.4	Rieselfähigkeit	12
4	Sacktechnologie	13
4.1	Einführung	13
4.2	Bauliche Ausführung von Bigbags	13
4.3	Säcke	16
4.4	Bigbags und Säcke auf Paletten	19
4.4.1	Paletten auf Fahrzeuge	19
4.4.2	Stapelung von Säcken auf Palette	20
4.4.3	Verbindung Palette mit Ladung	21
4.4.4	Reibung Aufstandsfläche von Bigbags	21
5	Antriebskraft	23
5.1	Einführung	23
5.2	Antriebskräfte für Auslösung einer Ladungsbewegungen	23
5.3	Energiebilanz bei Stoßanregung	25
5.4	Übertragbare Stoßenergie	26
6	Verschubbewegung	29
6.1	Begriff	29
6.2	Bigbagverformungen	30
6.3	Bewegungsablauf einer Verschubbewegung	31
7	Versuche zur Verschubbewegung	33
7.1	Versuchsbeschreibung	33
7.2	Versuchsergebnisse	34
7.3	Deformationsrate d_{Def}	36
7.4	Deformationsenergie bei Verschub	37
7.5	Verschubdeformationsenergien im Vergleich	38
7.6	Ablauf Bigbagverschub	39

7.6.1	Einführung	39
7.6.2	Zum Ablauf	40
7.6.3	Zum Verschubablauf	41
7.6.4	Annahmen	42
7.6.5	Haltekräfte bei Haftreibung	42
8	Verformungswiderstand eines Bigbag	45
8.1	Einführung	45
8.2	Berechnungsansatz für Verschubwiderstand	45
9	Aufprallphase	49
9.1	Einführung	49
9.2	Versatz in der Schwellphase einer Bremsung	49
9.3	Aufprallgeschwindigkeit, -energie	50
9.4	Nachrechnungen Aufprallgeschwindigkeit	51
9.5	Energiebilanz Aufprallphase	53
10	Aufprallversuche der Bahn	55
10.1	Einführung	55
10.2	Versuche	55
10.3	Feststellungen	59
10.3.1	Zu den Versuchen	55
10.3.2	Zusammenfassung der Ergebnisse des Bahnberichts	59
10.3.3	Verschubbewegung bei Reihenschaltung	59
10.3.4	Masseanteil bei Aufprall in der Verschubphase	60
11	Nachwort	61
12	Bilderverzeichnis	63
13	Verwendete Literatur	64
14	Anlagen	65
	Anlage 14.1 Werte zu Abschnitt 6	65

Verwendete Zeichen

a	Beschleunigung/Verzögerung (a-Wert)	m/sec ²
A	Fläche	m ²
B	Bigbagmodul	N/mm ²
c	Federrate	N/m
d	-rate	N/m
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²
E	Energie	Nm
F	Kraft	N
g	Erdbeschleunigung	9,81 m/sec ²
G	Gleitmodul	N/mm ²
h, H	Höhe	m
L	Länge	m
m	Masse	kg
s	Weg, allgemein	m
t	Zeit	sec
v	Geschwindigkeit	m/sec
V	Volumen	m ³ , dm ³
α	Anhebewinkel/Schüttgutwinkel	Grad
β	Versatzwinkel	Grad
Δ	Differenz	---
ε	Dehnung	---
κ	Kegelwinkel	Grad
μ	Reibungszahl	---
φ	Drehwinkel	Grad
ρ	Dichte	kg/m ³ , kg/dm ³

Indizes

A	Aufprall-
Diff	Differenz-
Def	Deformation
F	Flieh-
	Fahrzeug-
G	Gleitreibung
G	Gewichts-
H	Hangabtriebs-
H	Haftreibung
max	Maximal-
min	Minimal-
N	Normal-
Res	Resultierende . . .
T	Trägheits-
Vb	Verschub
Vs	Versatz

1 Einführung

Seit Anfang der 90er Jahre steigt der Transport von Schüttgütern in Weichladungen, wie Bigbags (Großsäcke) und Säcke, an. Bigbagbeförderungen füllen eine Lücke zwischen den Sackbeförderungen und den Transporten in Mulden und Silotankfahrzeugen. Großsäcke mit Schüttgütern sind eine „Weichladung“, die mehr oder weniger plastisch sind und deshalb in vielen Fällen nicht oder unbefriedigend mit gängigen Sicherungsmethoden, das heißt „fest verbunden“, gesichert werden können. Wenn aber gängige Sicherungstechniken nicht möglich sind, dann wird die Transportsicherung teurer oder unsicherer!

Die heutige Normung zur Sicherung von Ladungen hat einige wichtige Voraussetzungen. Zwei für das Thema lauten: Erstens, es werden „steife“ Ladungen vorausgesetzt und zweitens soll die Ladung „fest“ mit dem Fahrzeug verbunden sein. Weichladungen sind nicht „steif“. Und die Voraussetzung „fest“ verbunden“ aufgrund von Sicherungsmaßnahmen kann bei Bigbags nicht erfüllt werden. Bereits „normale“ Ladungen, wie z. B. Fässer, sind nicht steif und können deshalb nicht ohne weiteres mit einem Fahrzeug „fest verbunden“ werden. Und noch schwieriger wird es, wenn es sich um plastische Versandstücke, wie Bigbags oder Säcke, handelt!

Neben der sicherungstechnischen Frage gibt es neben weiteren auch die ökonomische. Da heute Schüttgutladungen in Tausenden von Tonnen befördert werden, muß auch die Kosten-seite beachtet werden.

Inzwischen wurden eine Vielzahl von günstigen Sicherungslösungen vorgestellt, die ein Herabfallen aus Eigenbewegungen verhindern sollen. Abb. 1.1 zeigt eine „Abladung“ nach Öffnen der Hecktür, aber auch eine „Verlagerung“ der Bigbags auf der Ladefläche, Abb. 1.2.



Abb. 1.1. „Herabfallen“



Abb. 1.2. „Verlagerung“ von Säcken

Mit Schüttgütern in flexiblen „Umschließungen“, wie Bigbags oder Säcke, ergeben sich eine Reihe von Fragen zur Sicherung auf Ladeflächen, insbesondere zum Gefährdungspotential aus Eigenbewegungen in Bezug zur Ladefläche. Dazu zählen das Herabfallen von der Ladefläche, aber auch die Freisetzung eines Gefahrguts, wenn es zu einer Umschließungsbeschädigung kommt, z. B. wenn ein Bigbag gegen eine Rungentasche prallt und undicht wird, Abb. 1.3 und 1.4. Das Ladegut muß dann nicht unbedingt von der Ladefläche „fallen“. Stäube können auch nach Undichtwerden eines Bigbags verweht werden!

Auch die Frage ist wichtig, ob der Aufprall einer Weichladung bei gleich großer Masse auf eine Seitenwand weniger gefährlich ist als der einer starren Ladung, ist offen.



Abb. 1.3. Undichter Bigbag



Abb. 1.4. Anstoßschaden

In diesem Beitrag sollen die Fragen aufgenommen werden, die das Eigenbewegungsverhalten und das Gefährdungspotential im Transport von Säcken und Großsäcken (Bigbags, FIBC) betreffen.

Im Mittelpunkt steht eine Eigenart in dem Bewegungsverhalten von Bigbags und Säcken auf Paletten, die hier als Verschiebbewegung bezeichnet werden soll und bei Weichladungen und Platten auftritt. Und nur hier wird es Verformungen geben, die nicht oder fast kaum zurückfedern.

Vorgestellt werden Versuche, Ergebnisse aus Recherchen und entwickelte Lösungsansätze. Deutlich soll damit auch werden, daß hier nichts Fertiges vorgelegt wird. Es sollen Wege zur Sicherung von Schüttgutladungen in Versandstücken aufgezeigt werden. Denn erst wenn die wirkenden Phänomene bekannt sind und richtig gewichtet werden können, ist es möglich, Sicherungsmaßnahmen auslegen zu können.

Eine Reihe von Erkenntnissen ergeben sich aus der Anwendung der technischen Mechanik. Weiterhin wurden zahlreichen Folgerungen mit einer deduktiven Vorgehensweise erarbeitet. Erkenntnisse können nicht nur aus Versuchen gewonnen werden, sondern auch Schlussfolgerungen auf theoretischem Wege aus allgemeinen Sätzen [2]. Die Ergebnisse müssen aber stets dann auch noch durch Versuche abgesichert werden.

An einigen Stellen sind die Erkenntnisse aus Versuchen oder deduktiven Rückschlüssen nicht ausreichend abgesichert, um als eine Basis mit allgemeingültigem Anspruch dienen zu können. Es wird dann eigens darauf hingewiesen. Gerade bei Schüttgütern gib es eine Reihe nicht untersuchter Sachverhalte.

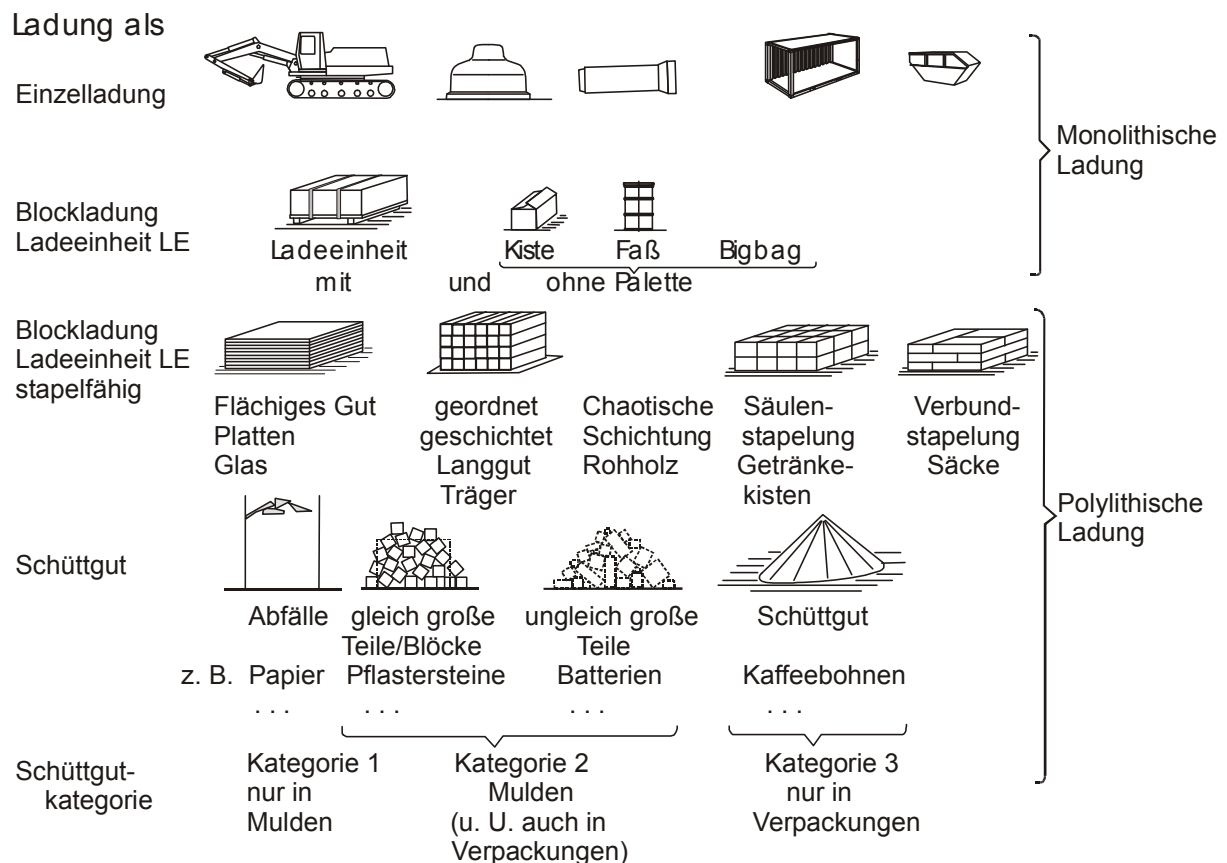
Ein weiterer Punkt soll angesprochen werden. Im zweiten Teil wird versucht, rechnerische Ansätze zu entwickeln. Die hier benutzte Vorgehensweise ist aus der Unfallmechanik abgeleitet. Die sog. Unfallmechanik ist seit den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt worden, um Straßenverkehrsunfälle zu rekonstruieren. Ziel dieser Disziplin war und ist es, „Rekonstruktionswerkzeuge“ zu entwickeln. Die Unfallmechanik soll auch nach Ladungssicherungszwischenfällen, zur Ermittlung der Ursache führen können.

2 Ladung in Säcken

2.1 Ladungsgüter

Feste Ladegüter können unterschiedlich eingeteilt werden. Die Übersicht 2.1 bringt eine Zusammenstellung, die nicht wie üblich von Produktgruppen ausgeht, sondern von der Ladungsmasse, also von der einteiligen großen Ladungsmasse zum kleinsten Ladungsteilchen alle Arten von Ladungen zusammenfaßt. Grundsätzlich wird damit in monolithische und polyolithische (vielgestaltige) Ladungen unterschieden werden.

Übersicht 2.1. Einteilung der Ladegüter



Die Einteilung von Schüttgütern in Kategorien und weiter unten zusätzlich in Gruppen ermöglicht es, Schüttgüter genauer zu unterscheiden. Damit können Sicherungsmaßnahmen in Hinblick auf ihre Sicherungswirkung im voraus beurteilt werden.

Des weiteren hat die Einteilung Übersicht 2.1 als Ansatz, daß Ladungen einmal unteilbar, nicht palettierbar sind und einzeln gesichert werden müssen. Daneben gibt es Ladungen, die entweder erst zu einer Ladeinheit auf einer Palette zusammengefasst werden müssen, aber auch ohne Palette z. B. durch Ausstauen auf der Ladefläche gesichert werden. Zusätzlich gibt es blockartige Ladungen, die geschichtet oder gestapelt werden können. Noch kleiner als Ladungsmassen sind einzelne Teilchen eines Schüttguts.

Unter Berücksichtigung der Vielzahl der Schüttgüter erscheint es in Hinblick auf die Ladungssicherung sinnvoll, sie in drei Kategorien nach Übersicht 2.1 einzuteilen. Abfallpapier wird in

aller Regel nur in Mulden transportiert. Pflastersteine werden in Mulden oder aber auch, wenn die Bigbagfestigkeit es zulässt, in offenen Bigbags transportiert, Akkus auch in Deckelfässer und Schüttgüter, wie Stäube in Weichverpackungen, wie Großsäcke oder Säcke und aber auch in Mulden oder Silotankfahrzeugen. Wenn die Ladungssicherung im Mittelpunkt steht, sind Mulden- oder Silobeförderungen hier nicht Gegenstand.

Mit der Einteilung in Kategorien wird eine Abgrenzung vorgenommen, die einerseits die Umschließung, z. B. Mulde oder Sack, erfasst, andererseits die Eigenschaft „Plastizität“. Pflastersteine sind auch in Bigbags eine steife Ladung, Kaffeebohnen dagegen nicht. Und: Güter in Mulden sind von Ladungssicherung nicht betroffen. Allerdings gibt eine Anzahl von Schüttgütern, die eine Einordnung unter eine Kategorie nicht erlauben. So verbacken z. B. einige Schüttgüter, wenn man sie zusammendrückt und sind dann kaum als „Schüttgüter“ zu bezeichnen.

Großsäcke (Bigbags), Abb. 2.1, aber auch Säcke, Abb. 2.2, werden als „Umschließung“ für Stäube, pulverförmige Ladungen, Granulate, Körner, Flocken, Späne oder Schnitzel, also Schüttgüter eingesetzt. Daneben gibt es aber auch Bigbags, in denen Pflastersteine befördert werden, einer Ladung, die sich deutlich von „üblichen“ Schüttgütern in Verpackungen unterscheidet. Schüttgüter, wie z. B. Altpapier, die in Mulden befördert werden, sind ebenfalls gesondert zu behandeln, weil sie nur in Ausnahmefällen in Verpackungen befördert werden. Im wesentlichen werden in Versandstücken Schüttgüter der Kategorie 3 befördert.

Die Begriffe Verpackung und Versandstück sollen nach den Festlegungen des Gefahrguttransportrechts (ADR) benutzt werden.

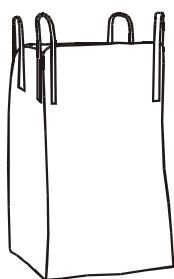


Abb. 2.1. Großsack



Abb.2.2. Sack (Beutel, Tüte)

Schüttgüter der Kategorie eins und zwei werden üblicherweise nicht in Verpackungen transportiert, Abb. 2.3, da sie zu groß für Verpackungen sind. Dazu gehören auch größere Pflastersteine als in Abb. 2.4. Auf Halden werden sie Schüttgutkegel ausbilden. Es wird dann von Stückigkeit gesprochen. Für Ladungssicherungsmaßnahmen dagegen ist nur die Kategorie 3 von Bedeutung, weil nur diese Güter in Verpackungen befördert werden, wie z. B. auch Akkus, Abb. 2.5.

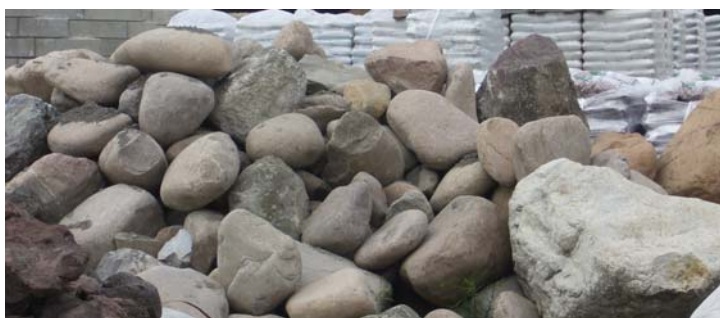


Abb. 2.3. Feldsteine



Abb. 2.4. Pflastersteine



Abb. 2.5. Akkus und Batterien

Von Bedeutung für die Ladungssicherung sind dagegen die Schüttgüter der Kategorie 3. Diese Schüttgüter werden bereits in kleinen Mengen ausgeschüttet einen Schüttgutkegel bilden, Abb. 2.6.

Schüttgut
Kategorie 3

Begriffe: Stäube
Granulate
Pellets
Körner (Kies)
Flocken
Späne
Partikel/Teilchen
Schnitzel
Fasern
Pollen
.....

Schüttgut-
kegel

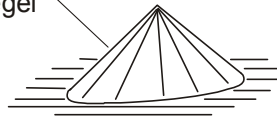


Abb. 2.6. Bezeichnungen für Schüttgüter

Schüttgüter der Kategorie 3 werden, wenn sie ausgeschüttet werden, ein unterschiedliches Rieselverhalten zeigen. Je nach Art des Stoffes und weiteren Eigenschaften, werden sie einen sog. Schüttgutkegel mit einem für das Ladegut typischen Kegel bilden, Abb. 2.7.

2.2 Begriffe

2.2.1 Schüttgut

In DIN 30 781 wird unter einem Schüttgut festgelegt:

„Schüttgut ist loses Gut in schüttbarer Form, wie z. B. Erz, Kohle, Getreide.“

Aus Sicht der Ladungssicherung ist diese Beschreibung nicht ausreichend.

Im Folgenden wird Schüttgut nur dann als Ladung verstanden, wenn es sich in einer „Umschließung“ befindet. Als „Umschließung“ sollen alle die Verpackungen zusammengefasst werden, die es nach dem Gefahrguttransportrecht, dem ADR, sind.

2.2.2 Schüttgutkegel

Wird ein bestimmtes Schüttgut, wie in Abb. 2.7 dargestellt, ausgeschüttet, ergibt sich für jede ausgeschüttete Menge stets der gleiche Kegelwinkel, Abb. 2.8.

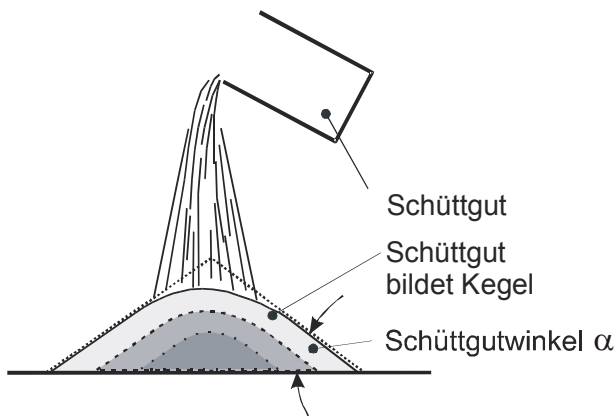


Abb. 2.7. Entstehung eines Schüttgutkegel

2.2.3 Schüttgutwinkel, Kegelwinkel

Ein bestimmtes Schüttgut hat einen typischen Schüttgut- α und Kegelwinkel κ , Abb. 2.8, wenn man es ausschüttet. In einigen Fällen ist es sinnvoll, den Kegelwinkel κ zu benutzen, üblich ist der Begriff Schüttgutwinkel α .

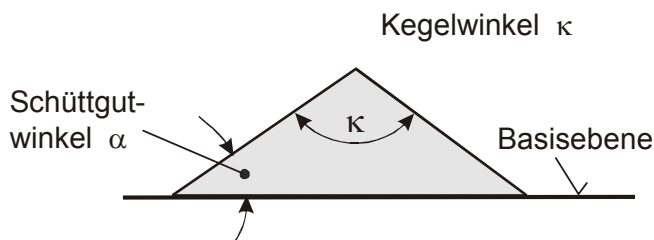


Abb. 2.8. Schüttgut- und Kegelwinkel

2.2.4 Einteilung nach Schüttgutwinkel α

Schüttgüter haben unterschiedlichste Schüttgutwinkel. Die Schüttgüter der Kategorie 2 und 3 werden, um in den Sicherungsmaßnahmen differenzieren zu können, zusätzlich in drei Gruppen eingeteilt, Übersicht 2.2. Diese Zuordnung ermöglicht es, Sicherungsmaßnahmen entsprechend den relevanten Eigenschaften eines Schüttguts und der gewählte Verpackung vorzunehmen.

Wird nur ein Partikel auf dem Schüttgutkegel betrachtet, wird das Teilchen in Ruhe verharren, wenn die Haftreibungskraft größer ist als die Hangabtriebskraft, Abb. 2.9.

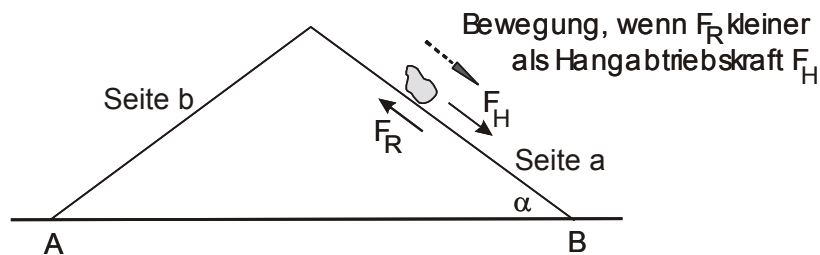


Abb. 2.9. Haftreibung und Schüttgutkegel

Die aktiven Kräfte an dem Partikel sind in Abb. 2.10 dargestellt.

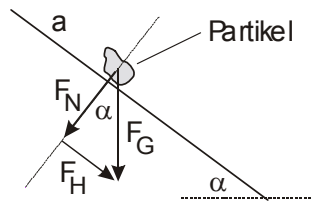


Abb. 2.10. Partikel auf schiefer Ebene

Es kommt zu keiner Bewegung des Teilchens, wenn gilt:

$$F_H \leq F_N \cdot \mu_H$$

$$F_G \cdot \sin \alpha \leq F_G \cdot \mu \cos \alpha$$

$$\mu_H \geq \tan \alpha$$

Wird die Steilheit größer als der Winkel α , kommt es zu einem beschleunigten Abgleiten. Möglich sind aber auch Abrollvorgänge oder Kombinationen von Gleiten und Abrollen.

Ein weiterer Fall ist die Einwirkung von Fliehkräften auf einen Schüttgutkegel. Statt der Hangabtriebskraft wird eine Fliehkraft angesetzt, Abb. 2.11 bis 2.12. Die Fliehkraft sei 1/3 der Gewichtskraft [1].

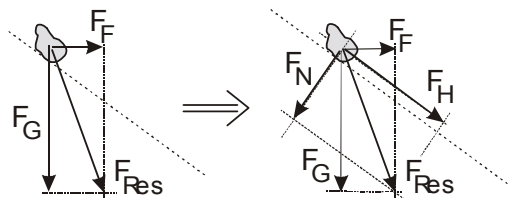
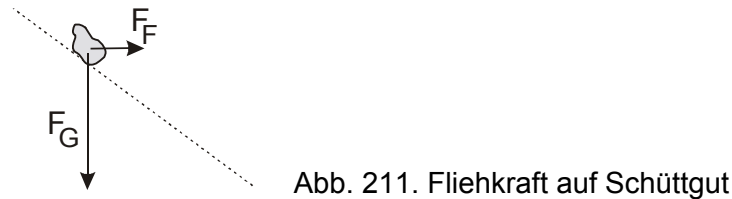


Abb. 2.12. Umrechnung Fliehkraft auf Hangabtriebskraft

Wird aus der Fliehkraft und der Gewichtskraft eine resultierende Kraft gebildet und dann diese Kraft in eine Normalkraft und eine parallel zur schiefen Ebene wirkende Kraft umgewandelt, zeigt sich, daß die Fliehkraft in ähnlicher Weise wirkt, wie die Hangabtriebskraft allein, Abb. 2.13.

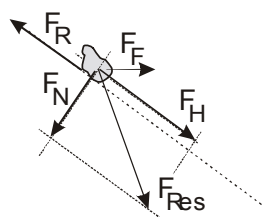


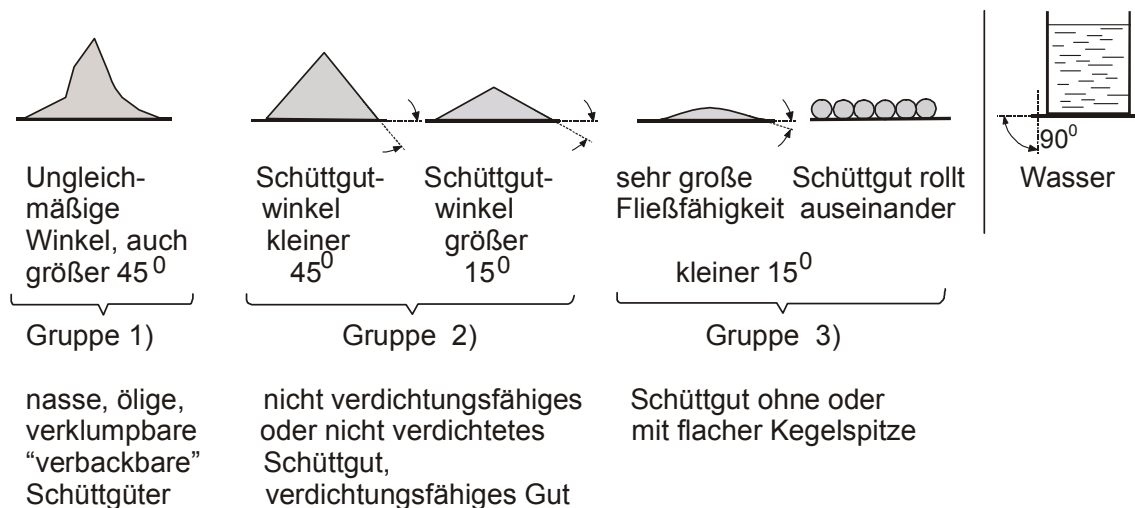
Abb. 2.13. Hangabtriebskraft statt Fliehkraft

Abb. 2.13 zeigt auf, daß die Frage, ob die Ladung durch die Fliehkraft ins Gleiten kommt einzig allein von der Reibungs- und der möglichen Normalkraft abhängt.

2.2.5 Bedeutung des Schüttgutkegels

Für Sicherungsmaßnahmen sind Schüttgüter der Kategorie 2 und 3 von Bedeutung. Sie werden in großen Mengen in Verpackungen transportiert. Die Sicherungstechniken von festen Ladungen können hier nur bedingt angewendet werden, weil sie nicht steif sind und damit mit dem Fahrzeug nicht fest verbunden werden können. Als für die Ladungssicherung sinnvoll hat sich zusätzlich eine Einteilung in Gruppen nach dem Schüttgutkegel gezeigt, Übersicht 2.2. Damit wird über den Schüttgutwinkel die innere Reibung innerhalb eines Schüttguts bei Einwirkung von äußeren Kräften erfasst.

Übersicht 2.2. Einteilung der Schüttgüter



Schüttgüter der Gruppe 1 sind Güter, die unter Feuchtigkeitszusatz (z. B. Dextrose mit 5 % Feuchtigkeit), mit Ölzusatz oder aus anderen Gründen (Aufladung, . . .) zum „Verklumpen“ oder „Verbacken“ neigen und ungleichmäßige Schüttgutkegel bilden, auch mit mehr als 45° .

Schüttgüter der Gruppe 2 mit Schüttgutwinkel nahe 45° Grad können im Regelfall wie „normale“ Ladungen gesichert werden, insbesondere wenn sie verdichtungsfähig sind und die Verdichtung während der Beförderung vorhält.

Solche der Gruppe 3 verhalten sich eher wie Flüssigkeiten und sind oft auch in aufwendigen Bigbagauführungen nicht oder nicht ausreichend formstabil und damit nur kostenaufwendig zu sichern. Für sie müssen individuelle Lösungen entwickelt werden.

2.2.6 Gruppeneinteilung

1. Gruppe 1

Eine Verhaltensvariante von Schüttgutkegeln ist in Abb. 2.14 dargestellt. Es handelt sich um feuchten Sand. Schüttgüter, die unterschiedliche Kegelwinkel beim Ausschütten bilden, unter Umständen eine steile Kegelspitze ausbilden, verkleben, verbacken oder verklumpen

können, sollen der Gruppe 1 zugeordnet werden. Derartige Stoffe können mit geringerem Aufwand gesichert werden, weil ein Bigbag mit diesen Schüttgütern relativ steif ist.

Während Güter der Gruppe 2 allein durch Coulombsche Reibung einen Kegel ausbilden, wirken in der Gruppe 1 zusätzliche Bindekräfte. Die Bindekräfte können auch aus einem „Zwischenstoff“ zwischen den Partikeln herrühren, wie Feuchtigkeit oder Öl. Während z. B. trockene Dextrose wegen seines Schüttgutwinkels zur Gruppe 2 zuzuordnen ist, ergibt sich bei mehr als 4 % Feuchtigkeit versehene Dextrose ein Zuordnung nach Gruppe 1, Abb. 2.14.



Abb. 2.14. Feuchter Sand

Eine besondere Stellung innerhalb der Gruppe 1 nehmen die verdichteten Schüttgüter ein. Verdichtungsfähig sind Stoffe, die wie Schotter für Gleise kantig in der Form und rau in der Oberfläche sind. Entscheidend ist auch, ob sich die Verdichtung nicht durch vertikale Aus- und Einfederungen Fahrzeugs während des Transports abbaut. Hierzu gibt es eine Reihe von Fragen.

2. Gruppe 2

Abb. 2.15 zeigt das Verhalten von spitzem Kies, einem Schüttgut, das der Gruppe 2 zuzuordnen ist. Kantiger Kies bildet einen deutlichen Kegel aus, runder Kies dagegen ist eher der Gruppe 3 zugehörig. Kantiger Kies ist verdichtungsfähig, runder dagegen nicht.



Abb. 2.15. Kantiger Kies

Abb. 2.16 zeigt den Schüttgutkegel von trockenem Zucker, Abb. 2.17 von Sand. Der Zucker bildet einen anderen Kegel aus als Dextrose, die sich eher wie nasser Sand verhält.

3. Gruppe 3

Die folgenden Abbildungen zeigen verschiedenste Schüttgutkegel der Gruppe 3. In Abb. 2.18 sind Tonkugeln für die Herstellung von Leichtbeton und in Abb. 2.19 Kaffeebohnen nach dem Ausschütten zu sehen. Sie bilden nur „schwach“ Kegelkonturen aus, weil sie leicht

auseinanderrollen. Ähnlich verhalten sich Erbsen, Getreide und andere Nahrungsmittel. Es überwiegt die Rollreibung.

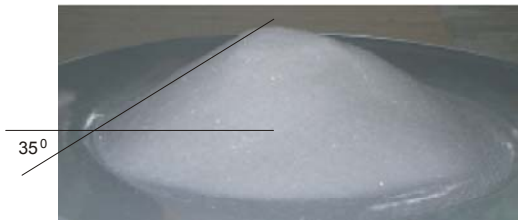


Abb. 2.16. Zucker



Abb. 2.17. Trockener Sand



Abb. 2.18. Tonkugeln



Abb. 2.19. Kaffeebohnen

In der Gruppe 3 sind Schüttgüter zusammengefasst, die einen Schüttgutwinkel von kleiner als 15 Grad ausbilden. Zu diesen Schüttgütern zählen Stoffe mit runden Formen und glatten Oberflächen, die leicht rollen können.

Während die Abgrenzung mit dem Winkel von 45 Grad sich mit dem Tangens von gleich 1 (=Coulombsche Reibung) ergibt, ist die Winkelfestlegung von kleiner 15 Grad willkürlich. Hier kann auch ein Winkel von z. B. 20 Grad festgelegt werden. Es handelt sich nicht um eine Abgrenzung, die sich aus der Reibungslehre ($\mu = \tan \alpha \rightarrow \square 1$, folglich $\alpha \square 45$ Grad) ergibt.

3 Schüttguteigenschaften

3.1 Ladungsmasse

Die Sicherungsmaßnahmen müssen stets die Masse des Schüttguts berücksichtigen, weil einige Sicherungstechniken, wie die Niederzurrtechnik oder eine Buchtflaschingsicherung in ihrer Auslegung masseabhängig sind. Bei Schüttgütern ist die Masse und die Form zur Beschreibung allein nicht ausreichend. Wird eine monolithische Ladungsmasse in viele gleich große Würfel zerlegt, so nimmt die gleiche Masse eine größeren Raum ein, wenn diese Würfel ausgeschüttet werden, Abb. 3.1. Auch das Volumen ist eine wichtige Größe.

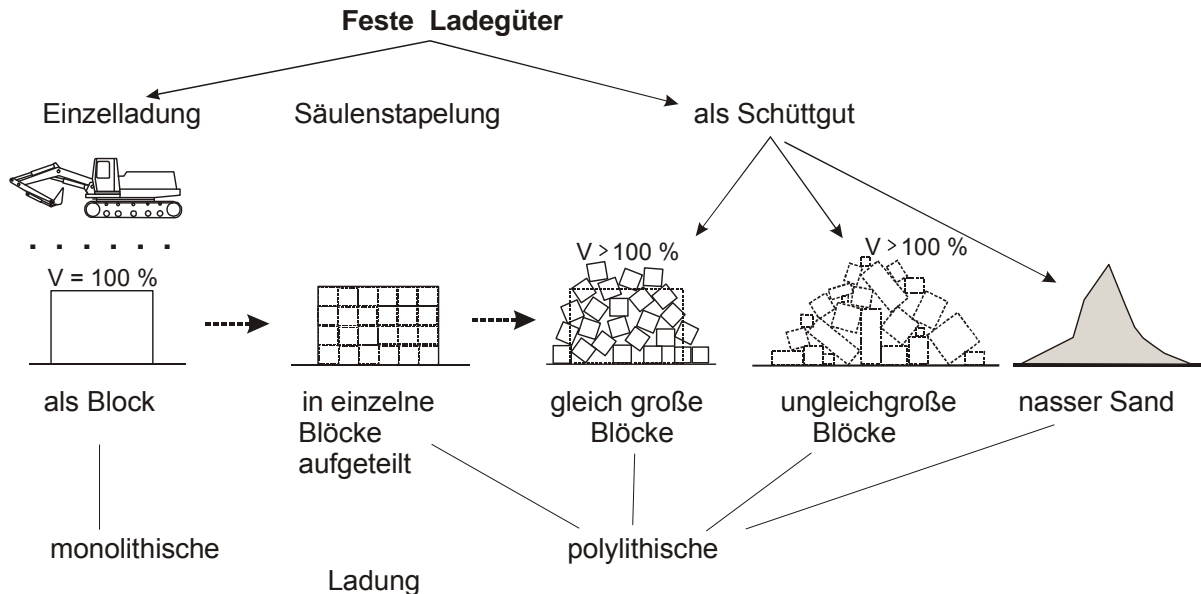


Abb. 3.1. Einteilung der festen Ladegüter

Berücksichtigt wird die Masse und das Volumen, indem die Dichte benutzt wird. Die Masse wird auf ein bestimmtes Volumen bezogen.

$$\text{Dichte } \rho = \frac{m}{V} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Abhängig ist die Dichte bei Schüttgütern von der Einzelgröße der Teilchen und von der Oberflächenausbildung (rund – kantig) und –rauigkeit (glatt – rau). Mit der Oberfläche und Form entscheidet sich auch, ob der Schüttgutwinkel von Roll-, bzw. Gleitreibung oder beiden bestimmt wird. Die Gruppeneinteilung nimmt diese Punkte auf. Die Dichte wird auch von der Anzahl der Teilchen zum Beispiel pro Kubikmeter beeinflusst.

3.2 Setzen von Ladungen

An verschiedenen Ladungen können Setzungserscheinungen auftreten. Das bedeutet z. B., dass eine Gurtvorspannung einer Niederzurrung nicht „steht“. Eine Niederhaltekraft kann nicht stabil aufgebaut werden. Ein Bigbag mit Kaffeebohnen, insbesondere wenn der nicht fest zugebunden ist, wird durch eine Niederzurrung tief eingeschnürt. Er kann damit aber nicht gegen Eigenbewegungen zum Fahrzeug gesichert werden.

3.3 Verdichtung

Verdichten bedeutet, daß das Gut auf ein kleineres Volumen bei gleicher Masse gebracht wird. Im Gegensatz zu Setzungserscheinungen, die zeitabhängig sind (also ohne oder mit Bewegungen) kann ein Schüttgutladung durch vertikales Drücken, vertikales oder horizontales Rütteln, durch Einblasen oder durch Einwirkung eines Vakuums (seltene Methode) verdichtet werden. Wichtig ist auch, ob die Verdichtung während einer Beförderung anhält.

Bei Schüttgütern hängt wesentlich die Verdichtungsfähigkeit davon ab, ob das Partikel kantig und die Oberfläche rauh ist.

Eine Verdichtung muß auch während der Beförderung stehen bleiben.

3.4 Rieselfähigkeit

Wird ein Schüttgut auf eine ebene Fläche ausgeschüttet, so bildet sich ein Schüttgutwinkel, z. B. Abb. 2.7. Wird nun die Basisebene, Abb. 3.2, langsam angehoben, so wird das Gut anfangen, abzurieseln und zwar von der Spitze beginnend. Das Abrieseln beginnt sofort, da der Kegelwinkel bereits der Grenzwinkel ist, bei dem das Schüttgut gerade noch nicht abgleitet. Das Verhalten auf einer schiefen Ebene ist insofern von Bedeutung als ein Schüttgut z. B. in einem Bigbag eine erkennbare „Verzögerung“ hat. Ausführungen dazu sind in Abschnitt 6 ff zu finden.

An der Oberfläche des Kegels wirken Reibungskräfte zwischen den Partikeln. Die Teilchen werden gleiten bzw. rollen oder beide Varianten gleichzeitig ausführen. Das Abrieseln wird solange andauern, bis der Schüttwinkel zur Basisebene sich wieder eingestellt hat, Abb. 3.2.

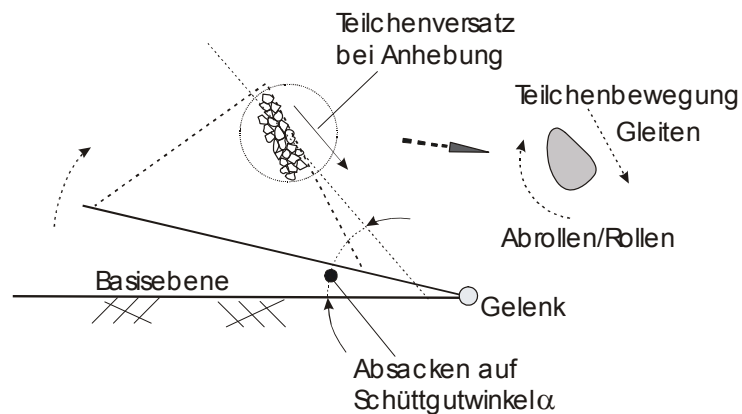


Abb. 3.2. Schüttgut auf schiefer Ebene

4 Sacktechnologie

4.1 Einführung

Schüttgutladungen in Säcken sollen als Weichladungen bezeichnet werden, da sie bei Einwirkung äußerer Kräfte nicht formbeständig sind. Sie können bei Belastungen von horizontal oder vertikal wirkenden Kräfte ihre Form (Querschnitt, Höhe) ändern und sich in Bezug zu ihrer Aufstandsfläche verschieben.

Entscheidend für die Gestaltfestigkeit ist auch, ob die Säcke voll befüllt und ausreichend fest und dicht verschlossen wurden. Bleibt ein füllungsfreier Raum oder werden Bigbags offen befördert, z. B. weil sie Pflastersteine enthalten, werden sie von der Richtlinie VDI 2700, Blatt 18 nicht erfasst, weil in beiden Fällen das Ladegut bei Krafteinwirkungen ausweichen kann und der Bigbag damit forminstabiler wird.

Das Verhalten eines Schüttguts allein ist nicht ausschlaggebend dafür, ob und wie ein Schüttgut gesichert werden kann. Hinzu kommt die Sackvariante, also die Umschließung mit ihren Eigenschaften. Abb. 4.1 zeigt einige Merkmale und Ausrüstungen von Bigbags.

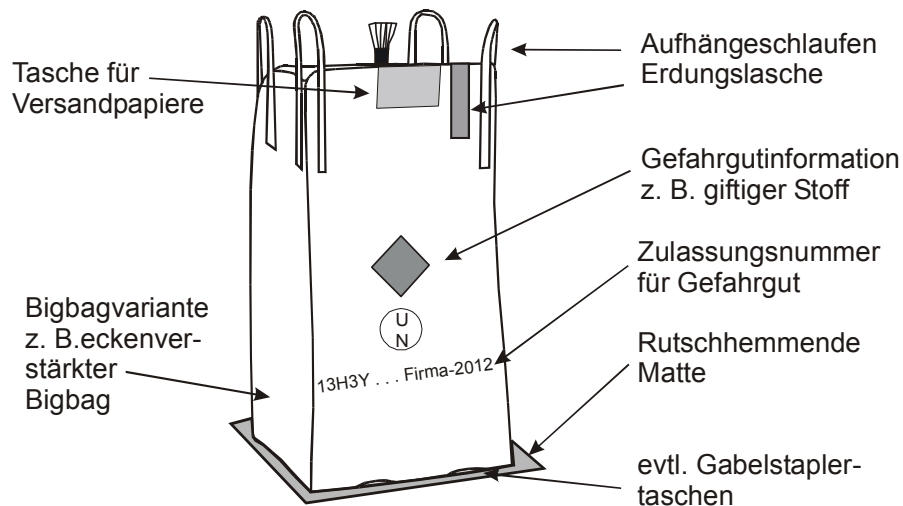


Abb. 4.1. "Ausrüstungen" für einen Bigbag

4.2 Bauliche Ausführung Bigbags

Großsäcke (Bigbags) werden als „Umschließung“ für Stäube, pulverförmige Ladungen, Granulate, Körner, Späne, also Schüttgüter eingesetzt. Daneben gibt es aber auch Bigbags, in denen Pflastersteine befördert werden. Ladegüter für Bigbags können deshalb in „weiche“ (plastisch – elastisch) und in „harte“ unterschieden werden.

Sie haben eine ca. 1,2 m mal 1,2 m große Grundfläche und eine Höhe von bis zu 2,2 m. Mit diesen Abmessungen passen sie gut zwischen die Seitenwände eines LKW-Aufbaus. Beim Befüllen ändern sich aber die quadratisch angelegten Querschnittsmaße etwas. Man spricht dann vom Packmaß, Abb. 4.2.

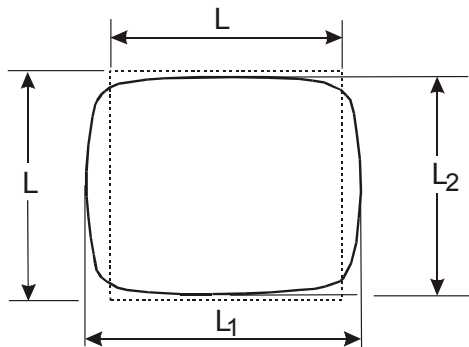


Abb. 4.2. Packmaße L_1 , L_2



Abb. 4.3. Bigbag mit Innenfächern

Die Ladungsmasse liegt maximal bei 1500 kg. In aller Regel werden Bigbags auf Paletten stehend zwischengelagert und auch befördert. Es werden aber auch Bigbags direkt auf die Ladefläche gestaut. Die Verbindung Bigbag mit einer Palette wird durch Schrumpffolie oder Wickeln hergestellt.

Die Großsäcke werden aus Geweben oder Kunststoff hergestellt. Sie werden in der Regel an vier Ecken abgenäht oder verstärkt, damit eine in etwa quadratische Querschnittsfläche nach Befüllung eingehalten wird, Abb. 4.3. Bigbags können aber auch weitere Abnäher und Zuganker besitzen, so daß auch bei Befüllung in der Regel ein fast quadratischer Querschnitt bleibt, Abb. 4.4.

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal für Bigbags ist die Querschnittsform, Abb. 4.4. Erkennbar ist, daß es neben den quadratischen auch zylindrische gibt. Die Formtreue ist unterschiedlich. Sie hängt auch von den Abnähern und evtl. vorhandenen Zugankern ab, Abb. 4.4 E).

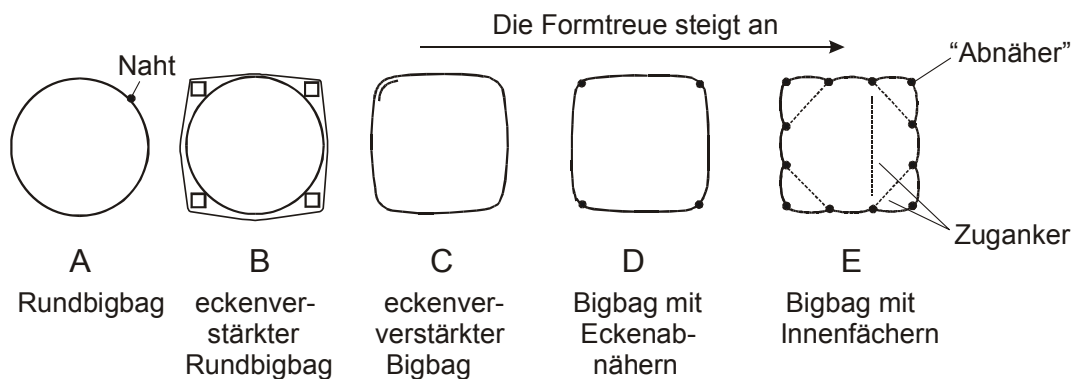


Abb. 4.4. Querschnittsformen

Aber auch für runde Bigbags wären Verstärkungen denkbar, in dem z. B. Wendeln wie bei Grasabfallbehältern eingebaut würden. Abb. 4.5 zeigt einen mit Vierkanthölzern eckenverstärkten Rundbigbag.

Für die weiter unten folgenden Ausführungen sind die Kenngrößen Querschnittsfläche A eines Bigbags und die Höhe H , Abb. 4.6, wichtig, Übersicht 4.1.



Abb. 4.5. Eckenverstärkter Rundbigbag

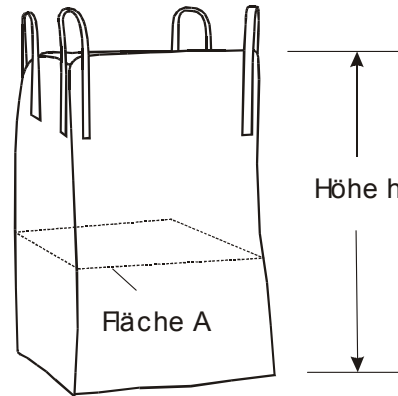


Abb. 4.6. Querschnittsfläche A

Übersicht 4.1. Gängige Bigbagabmessungen

Abmessungen in m	Fläche A in m ²
1 x 1	1
1,2 x 1,2	1,44
...?	

Ein Bigbag als Umschließung ist nachgiebig und wird durch das Ladegut auf Innendruck beansprucht und versucht deshalb in den kreisförmigen Querschnitt (bzw. kugelförmigen) überzugehen. Das hat aber zur Folge, dass Stauraum verloren geht. Deshalb wird ein Großsack in der Variante „eckig durch Abnäher“ sich anders in seinem Platzbedarf verhalten als ein runder und beide wieder anders als einer mit zahlreichen Abnähern. Die letztgenannte Variante wird sich aber auch bei äußeren Kräften, z. B. Bremskräften anders als die mit einem Kreisquerschnitt verformen. Es muß deshalb stets das Ladegut *und* die Umschließung gemeinsam betrachtet werden.

Abb. 4.7 zeigt Einfüllöffnungen von Bigbags. Die Skizze A stellt eine offen beförderte Variante dar. Die Richtlinie VDI Blatt 18 erfasst die Sicherheitsmaßnahmen für offene Bigbags nicht, Abb. 2.4.

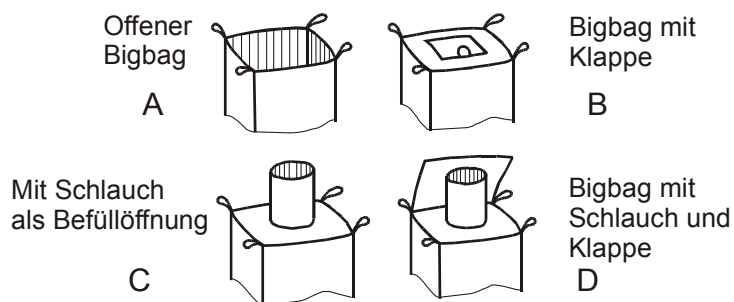


Abb. 4.7. Einfüllöffnungen

Abb. 4.8 zeigt eine zugebundene Schlauchöffnung der Variante C.



Abb. 4.8. Zugebundene Schlauchöffnung

Bigbags besitzen vier Schlaufen, an denen sie angehoben werden können, Abb. 4.9. Daneben gibt es Bigbags, die an der Unterseite Gabelstaplertaschen zur Aufnahme von Zinken haben und dann von unten angehoben werden können.

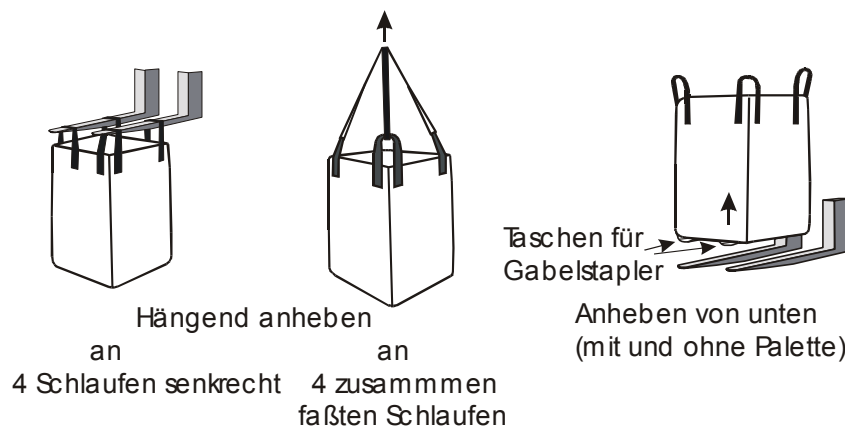


Abb. 4.9. Anhebevarianten

4.3 Säcke

Lange bevor Großsäcke entwickelt und eingesetzt wurden, waren Säcke und Ballen für alle möglichen Güter *die* Ladeeinheiten im Ladungstransport, Abb. 4.10 und 4.11.



Abb. 4.10. Ballen



Abb. 4.11. Jutesack

Säcke wurden in Netzen oder auf Platten aus Seeschiffen herausgehievt und mit Sackkarren in Lager gebracht.

Säcke sind heute aus anderen Materialien. Sie sind auch relativ formtreu, Abb. 4.12, und werden im Transport gestapelt auf Paletten transportiert. Abb. 4.13. zeigt eine im 5er-Verband gestapelte Palette.



Abb. 4.12. Formtreue Rechtecksäcke



Abb. 4.13. 5er Verbundstapelung

Eine Definition des Begriffs „Sack“ gibt es im Gefahrguttransportrecht, dem ADR. Danach ist ein Sack eine *„flexible Verpackung aus Papier (mehrlagig), Kunststofffolien, Textilien gewebten oder anderen geeigneten Werkstoffen.“* Säcke können ohne oder mit Innenauskleidung oder Beschichtung sein. Sie können staubdicht oder sogar wasserbeständig sein. Die maximale Nettomasse liegt bei 50 kg nach dem ADR, Abb. 4.14. Die Begriffe Beutel oder Tüte werden im ADR nicht verwendet, sie werden den Säcken zugeordnet.



Abb. 4.14. Papiersack

Säcke werden von oben mittels Schwerkraft befüllt, Abb. 4.15 oder durch Einblasen über eine schlauchartige Öffnung, Abb. 4.16. Die Öffnungen werden durch Nähte oder durch Zukleben mit einem Deckblatt verschlossen, Abb. 4.17.



Abb. 4.15. Für Schwerkraftbefüllung



Abb. 4.16. Befüllung über Einblasen

Einen Sackverschluß nach Befüllung mittels Klebung und Naht zeigt Abb. 4.17.

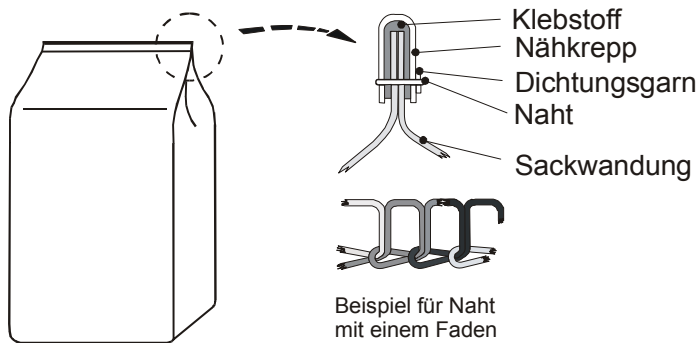


Abb. 4.17. Beispiel für Verschlusstechnologie

Eine Klebeverschuß mit einem Deckblatt an einem Sackboden zeigt Abb. 4.18.

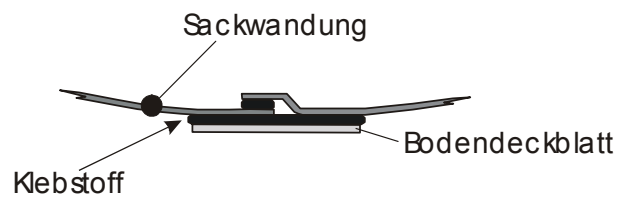


Abb. 4.18. Geklebter Bodenverschluß

4.4 Bigbags und Säcke auf Palette

4.4.1 Paletten auf Fahrzeuge

Bigbags werden direkt auf die Ladefläche gestaut. In der Regel werden sie aber auf Paletten befördert. Damit muß aber auch eine ausreichend (g-Werte) feste Verbindung zwischen Palette und Bigbag, bzw. Säcke hergestellt werden, Abb. 4.19 zeigt eine Wicklung, die auch den Palettenfuß erfasst.



Abb. 4.19. Wicklung um Bigbag und Palette

Damit die Ladefläche seitlich möglichst kleine Freiräume hat, werden bestimmte Größen eingesetzt, Übersicht 4.2.

Übersicht 4.2. Palettenabmessungen für „Säcke“

Gängige Palettenabmessungen
für Bigbags und Säcke

Länge in mm	Breite in mm	
800	1200	Poolpalette
1000	1200	Industriepalette
1140	1140	Chemiepalette (Cp 3, CP 9)
1200	1200	Chemiepalette

Abb. 4.20 zeigt skizzenartig die oberste Lage einer Palette. Entscheidend ist bei Säcken, da der Boden nachgiebig ist, wie die Einzelbretter liegen. Wie die Versuche in [4] gezeigt haben, wird ein Sack in Längsrichtung der Bretter leichter abrutschen, Abb. 4.20.

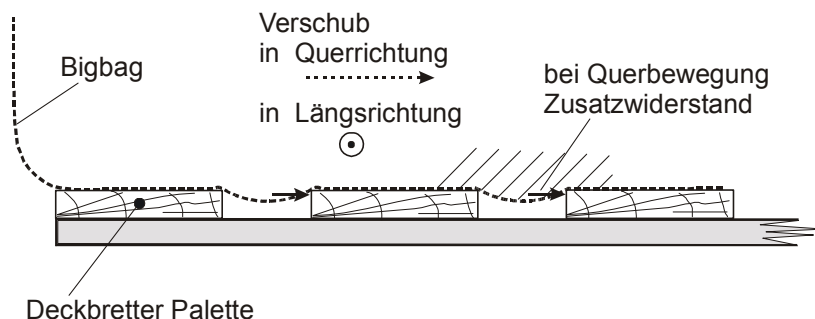


Abb. 4.20. Versatz in Quer- und in Längsrichtung auf einer Palette

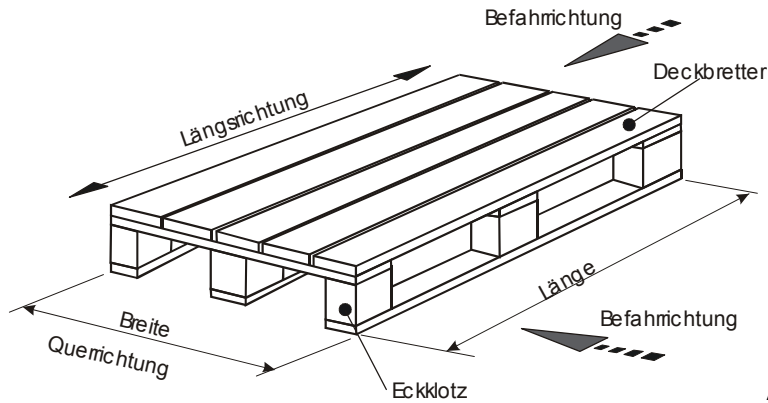


Abb. 4.21. Europalette

4.4.2 Stapelung von Säcken auf Palette

Säcke können unterschiedlich gestapelt werden. Abb. 4.22 bis 4.24 zeigen alte Techniken, die früher bei der Beladung von Schiffen eingesetzt wurden [7]. „Frei hoch“ entspricht der Säulenstapelung.



Abb. 4.22. „Im Bock“ gestapelt



Abb.4.23. Säulenstapelung

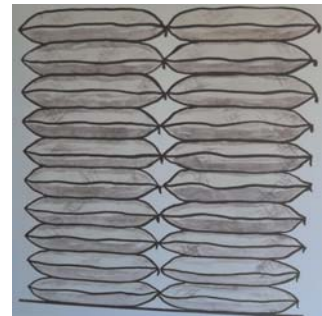


Abb. 4.24. „Frei hoch“

Säcke müssen heute im Verbund gestapelt werden, Abb. 4.1, damit sind sie weniger anfällig gegen Querversatz bei Einwirkung z. B. von Fliehkräften. Eine Säulenstapelung nach Abb. 4.23 ist bei Querkraften nicht ausreichend versatzsicher. Eine sog. chaotische Stauung, also ohne eine Regelung gestaut, ist nur in Containern mit festen Wänden vertretbar.

Abb. 4.25 zeigt das Prinzip der Verbundstapelung. Abb. 4.26 zeigt die 3er und 5er Verbundstapelung. Daneben gibt es weitere Arten von Verbundstapelungen. Sie müssen jeweils auf die Palettenmaße abgestimmt sein.

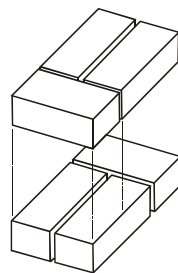


Abb. 4.25. Verbundstapelung

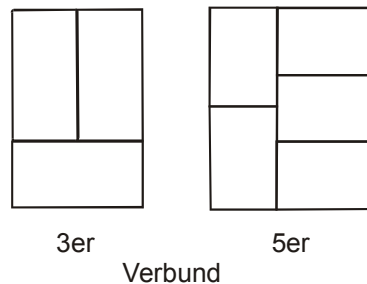


Abb. 4.26. Verbundstapelungen

4.4.3 Verbindung Palette mit Ladung

Wichtig ist es, daß es nicht zu einer Verschiebung von Lagen zueinander und der Ladung mit der Palette kommt. Dafür stehen im wesentlichen drei Techniken zur Verfügung [9]: Die vertikale Bündelung, die Wicklung und die Schrumpffolie, Abb. 4.27 bis 4.29.

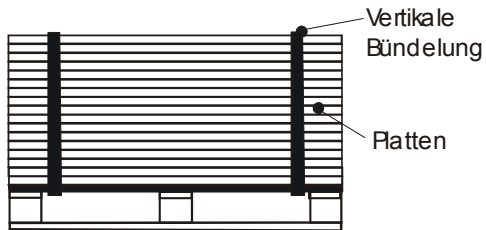


Abb. 4.27. Vertikale Bündelung

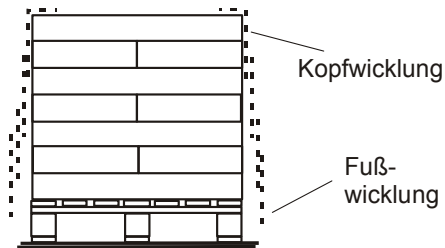


Abb. 4.28. Wickeln

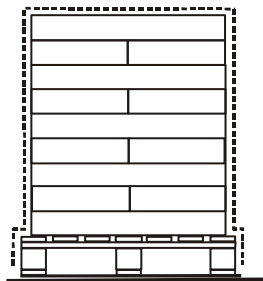


Abb. 4.29. Haubenstretch

4.4.4 Reibung Aufstandsfläche von Bigbags

Wesentlich für eine feste Verbindung zwischen Bigbag und Palette ist die Reibung an der Aufstandsfläche. Je höher die Reibungszahl ist, desto weniger muß eine Zusatzsicherung aufnehmen, z. B. ein Haubenstretch. Die Reibung wird aber bei Bigbag und Säcken auf Holzpaletten von dem Abstand und der Richtung der Deckbretter zur äußeren Kraft abhängen, da die nachgiebige Bigbagaufstandsfläche sich in die Fugen eindrückt. Zu der Coulombschen Reibung kommt also ein Zusatz aus einem „Formschluß“ hinzu, Abb. 4.20. Es muß also bei Versuchen und Untersuchungen die Lage und der Abstand der Deckbretter beachtet werden (dazu auch Anlage 14.2).

5 Antriebskraft

5.1 Einführung

Wirken im Transport Kräfte an einer Ladung, so kann es zu Eigenbewegungen in Bezug zum Fahrzeug kommen. Dabei sind drei Bewegungsarten möglich: Rollen, Versatz (oder Gleiten), und Kippen [2], Abb. 5.1. Streng genommen gilt das nur für steife Ladungen.

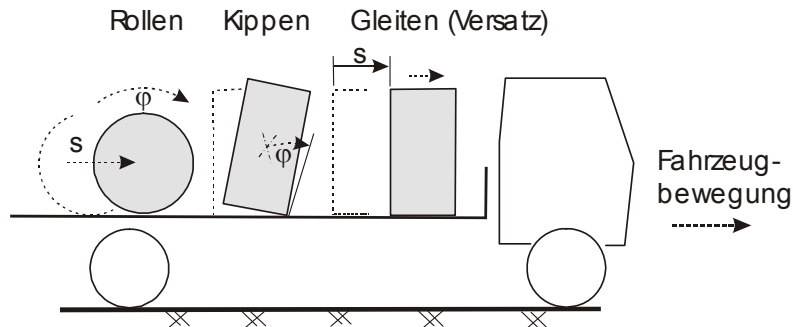


Abb. 5.1. Bewegungsarten

Eine Gefährdung im Ladungstransport geht in fast allen Fällen auf eine Eigenbewegung der Ladung zurück. Durch Ladungsaufprall kann die Bordwand durchschlagen werden und die Ladung auf die Straße herabfallen oder sie kann gegen andere Ladung oder gegen „Hindernisse“, wie z. B. Rungentaschen für Einstecklatten, stoßen und undicht werden. Eine sich bewegende Ladung kann auch ein Fahrzeug umkippen.

Im Folgenden sollen zunächst einige Grundlagen aus der Mechanik zu Eigenbewegungen von Massen vorweg behandelt werden.

5.2 Antriebskräfte für Auslösung einer Ladungsbewegungen

Eine Ladungsbewegung bei alleiniger Reibschlussicherung kommt dann zustande, wenn die Antriebskraft, z. B. aus einer Verzögerung, die Haftreibungskraft an der Ladungsaufstandsfläche, im Folgenden als Haftreibungsverzögerung bezeichnet, übersteigt. Das geschieht bei einer Verzögerung von $\mu_{\text{Haft}} \cdot g$. Bei einer höheren Verzögerung wird die Ladung zu gleiten beginnen, Abb. 5.2. Im Beispiel liegt dieser Punkt in 1, wenn die Verzögerung einen Wert von μ_{H} mal g von 6 m/sec überschreitet. Dieser Punkt soll auch als Lösepunkt bezeichnet werden. Der Übergang dauert im Ladungsbereich nach Erkenntnis aus [5] im Regelfall weniger als 0,1 Sekunde. Danach befindet sich die Ladung im Gleit- oder Kippzustand. In der Gleitreibungsphase wird die Gleitreibung die widerstehende Kraft mit $a_{\text{V}} = \mu_{\text{Gleit}} \cdot g$ sein ($a_{\text{V}} = 0,4 g$ Gleitreibungsverzögerung).

Ab dem Zeitpunkt 3 wirkt dann an der Ladung eine Differenzbeschleunigung als Antrieb zwischen der tatsächlichen Fahrzeugverzögerung, z. B. 8 m/sec^2 und der Gleitreibungsverzögerung an der Ladung. Wird eine Bremsung mit $0,8 g$ aus 80 km/h zugrunde gelegt, dann dauert die Bremsung ca. 3,4 sec bis Stillstand des Fahrzeugs. Voraussetzung ist eine „kalte“ Fahrzeugbremsanlage zu Beginn der Bremsung, denn wenn die Bremsanlage überhitzt ist, tritt der Fadingeffekt auf. Die Verzögerung fällt ab. Der lineare Anstieg in der Schwellzeit und der konstante Verzögerungsverlauf in der Bremszeit sind aus der Unfallanalytik übernommen [z. B. 6, 10].

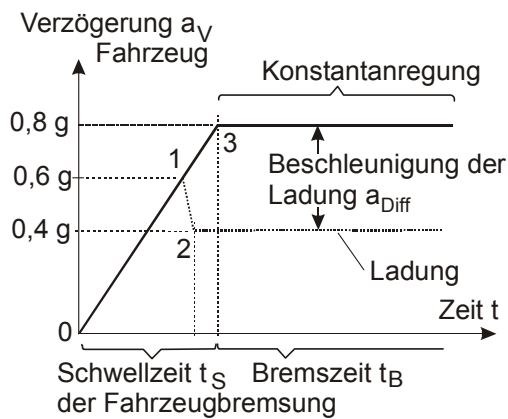


Abb. 5.2. Bremsdiagramm [6] mit Ladungsbewegung

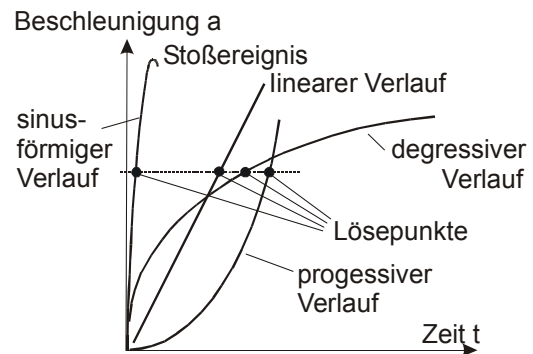


Abb. 5.3. Kraftanstiegsvarianten

Eine ähnliche Charakteristik ist der Querschleunigungsverlauf bei einer Kurvenfahrt mit konstantem Radius und einer konstanten Geschwindigkeit. Bei beiden Varianten, Bremsen und Kurvenfahrt, können sich Eigenbewegungen der Ladung ergeben. Diese Art der Anregung soll als Konstantanregung bezeichnet werden. Eine Konstantanregung liegt z. B. auch vor, wenn die Ladung durch eine Hangabtriebskraft beschleunigt wird.

Neben dem linearen Anstieg der Beschleunigung, Abb. 5.2, kann der Anstieg aber auch mit anderen Verläufen erfolgen, Abb. 5.3.

Abb. 5.4 zeigt einen sinusförmigen Verlauf, wie er bei Stoßereignissen auftritt.

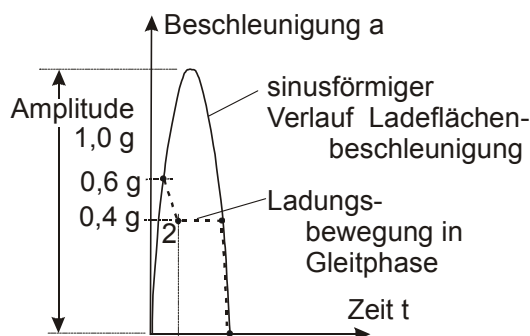


Abb. 5.4. Sinusförmiger Anstieg

Ein derartiger Horizontalstoß tritt z. B. dann auf, wenn ein Fahrzeug über ein beidseitiges Fahrbahnhindernis fährt. Abb. 5.5 zeigt das Ergebnis eines Horizontalschwingtischversuchs mit einem Stahlfaß [15]. Wird der Verlauf als sinusförmig angesetzt, kann durch Integration die Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt errechnet werden.

Es lassen sich damit zwei Anregungsformen aus den Folgen ableiten:

1. Eine Bewegungsanregung mit einer nachfolgenden konstanten Beschleunigung (= Konstantanregung) und
2. eine sinusförmige Stoßanregung bei z. B. $a = 0,5 \text{ g}$ mit einer nachfolgenden Auslaufbewegung (= Stoßanregung).

Bei einer Haftreibungsgrenze $\mu_H = 0,5$, z. B. in Abb. 5.5, wird die Haftung überwunden. Der Lösepunkt liegt fast im Umkehrpunkt der Kurve bei 0,5 g.

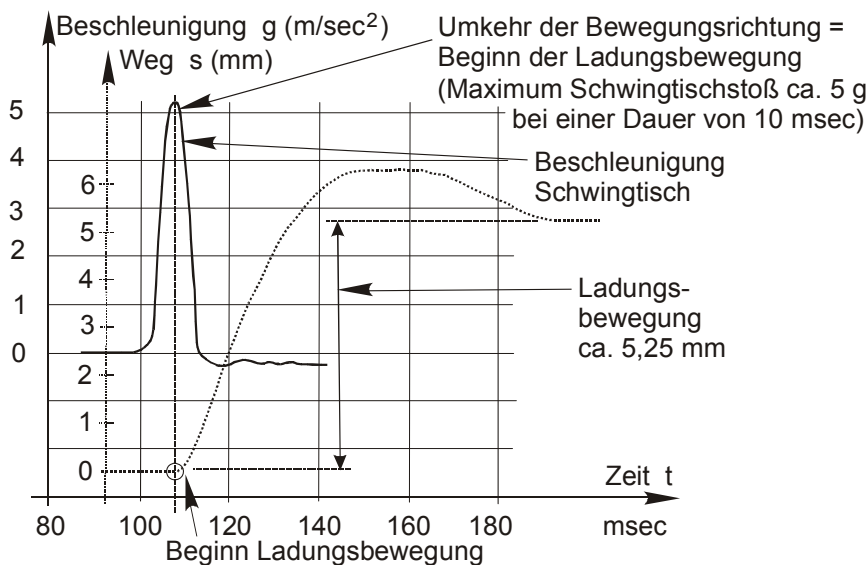


Abb. 5.5. Schwingtischversuch [15]

Der Begriff Stoßanregung könnte den Eindruck vermitteln, daß mechanisch der Impuls für eine rechnerische Behandlung eingesetzt werden kann. Die Verwendung des Impulses setzt voraus, daß die Stoßkraft sehr hoch und die Stoßzeit sehr klein ist. Die bei PKW-Crashversuchen auftretenden Kräfte und Zeiten (100 bis 200 msec) erlauben es, andere äußere Kräfte (z. B. Bremskräfte) zu vernachlässigen. Diese Vorgehensweise ist bei Ladungseigenbewegungen nicht vertretbar, weil weder die Kräfte hoch (Reibungskräfte an der Ladungsaufstandsfläche) noch die Zeiten (Aufprall) sehr kurz sind. Abb. 5. 6 zeigt die nach derzeitigem Kenntnisstand bekannten Zeiten im Vergleich.

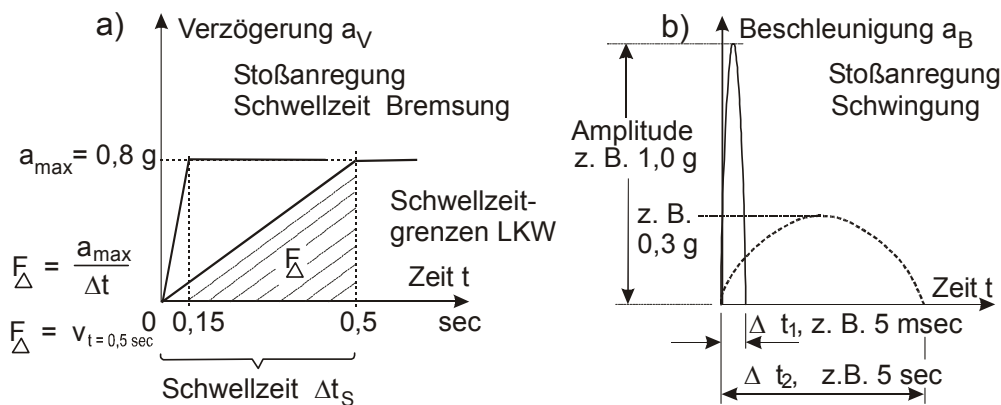


Abb. 5.6. Zeitvergleich Konstant- und Stoßanregung

5.3 Energiebilanz bei Stoßanregung

Beide Anregungsarten bewirken eine Kraft an einer Ladung mit der möglichen Folge einer Bewegung. Die Bewegung folgt bei freier Ladefläche um die Ladung herum der Wirkrichtung

der Kraft. Aus der Kraft mal dem Ladungsweg in Wirkrichtung der Kraft ergibt sich eine Energie, die bei einer Stoßanregung nur sehr gering sein kann. Es muß also festgelegt werden, welcher Weg bereits als Ladungsweg gelten soll. Der Ladung wird über die Haftreibung zunächst eine Bewegungsenergie übertragen. Im Augenblick des Lösen und des Übergangs in eine Gleitbewegung kann diese Bewegungsenergie mit der Ladungsmasse m und der augenblicklichen Geschwindigkeit v beschrieben werden. Diese Energie wird, wenn keine weitere Anregung erfolgt, über einen Gleitweg Δs bis zum Stillstand in Reibungswärme umgewandelt.

$$\frac{1}{2} m_L \cdot v_1^2 = m_L \cdot g \cdot \mu_G \cdot \Delta s \quad (\text{Gl. 5.1})$$

$$\frac{1}{2} m_L \cdot v_1^2 = m_L \cdot g \cdot \mu_G \cdot \Delta s \quad (\text{Gl. 5.2})$$

Die Energiebilanz in Gl. 5.1 zeigt auch auf, daß bei alleiniger Reibschlusssicherung einer Ladung, die Ladungsmasse keine Rolle spielt!

5.4 Übertragbare Stoßenergie

Es soll die bis zur Haftreibungsgrenze übertragene Energie einer nur über Reibschluß mit der Ladefläche verbundenen Ladung errechnet werden. Denn nur bis zur Haftreibungsgrenze kann Energie „übertragen“ werden. Zugrunde gelegt werden soll der in Abb. 5.7 festgelegte lineare Verzögerungsanstieg in der Schwellphase einer Bremsung (0 – 3).

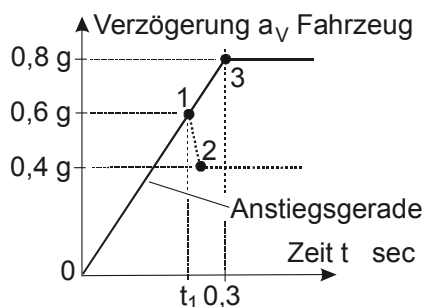


Abb. 5.7. Stoß aus Schwellphase

$$\begin{aligned} a &= k \cdot t \\ 8 \text{ m/sec}^2 &= k \cdot 0,3 \text{ sec} \\ k &= \frac{8 \text{ m/sec}^2}{0,3 \text{ sec}} \\ k &= 26,6 \frac{\text{m}}{\text{sec}^3} \\ a(t) &= 26,6 \frac{\text{m}}{\text{sec}^3} \cdot t \end{aligned} \quad (\text{Gl. 5.3})$$

Aus Gleichung 5.3 kann durch Integration die Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt errechnet werden.

$$v = \frac{1}{2} 26,6 \frac{\text{m}}{\text{sec}^3} t^2 \quad (\text{Gl. 5.4})$$

oder

$$v = \frac{1}{2} \left(26,6 \frac{\text{m}}{\text{sec}^3} t \right) \cdot t \quad (\text{Gl. 5.5})$$

mit Gl. 5.3.

$$v = \frac{1}{2} a(t) \cdot t \quad (\text{Gl. 5.6})$$

Die Geschwindigkeit in Gleichung 5.6 ist die Fläche unter Anstiegsgeraden in Abb. 5.7, in diesem Fall ein Dreieck.

Die bis zum Punkt 1, Abb. 5.7, übertragene Energie errechnet sich damit

$$E = \frac{1}{2} m \left(\frac{1}{2} 26,6 \cdot t_1^2 \right)^2 \quad (\text{Gl. 5.7})$$

Erkennbar ist, daß die übertragene Energie mit längerer Zeitdauer bis Punkt 1 und wachsender Haftreibungszahl immer größer wird.

In einem zweiten Schritt soll der Versatz bei einer bestimmten Gleitreibungszahl ermittelt werden. Es werden folgende Werte zugrunde gelegt: Ladungsmasse 1000 kg, Fahrzeugverzögerung 0,8 g, Haftreibungsgrenze 0,6 und die Zeit $t_3 = 0,3 \text{ sec}$ bis zur Vollverzögerung, dann ergibt sich eine übertragene Energie auf die Ladung von:

Die Zeit t_1 bis Punkt 1 in Abb. 5.7 ergibt sich aus:

$$\frac{0,8 \text{ g}}{0,3 \text{ sec}} = \frac{0,6 \text{ g}}{t_1}$$

$$t_1 = 0,225 \text{ sec}$$

$$E = \frac{1}{2} m \left(\frac{1}{2} 26,6 \cdot t^2 \right)^2$$

$$E = \frac{1}{2} 1000 \cdot \frac{1}{4} 26,6^2 \cdot t_1^4 \left[\text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{sec}^4} \right]$$

$$E = 226,7 \text{ Nm}$$

Aus [3] ergibt sich:

$$E_G = m_L \cdot g \cdot \mu_G \cdot s_G \quad (\text{Gl. 5.8})$$

Damit ergibt sich ein Gleitweg im Auslauf von:

$$s_G = \frac{226,7 \text{ Nm} \cdot \text{sec}^2}{1000 \cdot 10 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}}$$

$$s_G = 0,022 \text{ m}$$

Der Gleitreibungsweg aus diesem Stoß zu Beginn der Verzögerung wird damit ca. 0,02 m lang sein.

Die gesamte umgesetzte Energie bis zum Stillstand des Fahrzeugs lässt sich mit diesem Schema errechnen.

6 Verschiebung

6.1 Begriff

Bei Bigbags, gestapelten Säcken und geschichteten Platten tritt zu der Verschiebung eine zusätzliche Besonderheit bei den möglichen Beweglichkeiten auf, die als sog. Verschiebung bezeichnet werden soll, Abb. 6.1.

„Als eine Verschiebung soll eine Gleitbewegung einer Schüttgutladung in Säcken, Bigbags und Platten bezeichnet werden, bei der die Aufstandsfläche unverrückt auf der Ladefläche bis zum Lösepunkt verbleibt und die Ladungsmasse eine in sich irreversible Gleitbewegung macht. Eine Verschiebung beginnt in Abgrenzung zur Verschiebung bereits vor der Haftreibungsgrenze.“

Während einer Verschiebung wird die Haftreibung an der Aufstandsfläche der Ladung nicht unterbrochen. Nur der darüber liegende Teil „verschoben“, Abb. 6.1.

Verschiebung s bei
Platten Schüttgut
(Stämmen)

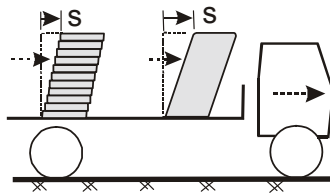


Abb. 6.1. Verschiebung

Ab einem bestimmten Verschiebung kann nach der Verschiebungphase ein Verschiebung oder ein Kippen eines Bigbags eintreten, unter Umständen können die Vorgänge nahezu zeitgleich ablaufen.

Abb. 1.2, 6.2 und 6.3 zeigen Beispiele für Verschiebung an Versandstücken mit einem Schüttgut.



Abb. 6.2. Verschiebung von Bigbags



Abb. 6.3. Verschiebung von Säcken [5]

Die Verschiebung stellt eine Besonderheit von Schüttgutladungen in Weichverpackungen und im Plattentransport dar. Bei diesen Ladungen ergeben sich irreversible

Beweglichkeiten. Ein verschobener Plattenstapel verformt sich nicht ohne äußere Krafteinwirkung wieder rückwärts. Bei elastische Ladungen, wie Fässer zum Beispiel, werden sich Rückfederungen ergeben. Im Folgenden soll die Bewegungsart Verschub näher beschrieben werden.

Neben dem einseitigen Verschub kann es aber auch zu Bigbagverschuibschwingungen kommen, z. B. wenn der Bigbag bei Verschiebbewegung auf eine Barriere stößt, die den Bigbag zurückstößt, Abb. 6.4.

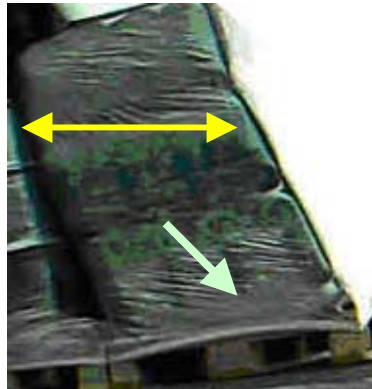


Abb. 6.4. Horizontale Längsschwingung

6.2 Bigbagverformungen

Bigbags mit Schüttgütern werden sich mit einem bestimmten Ladegut bei Einwirkung von äußeren Kräften, z. B. bei Bremskräften, in einer bestimmten Weise verformen. Praxiserfahrungen und Versuche haben gezeigt, dass nach derzeitigem Kenntnisstand sich folgende Konturen bei Verschiebbewegungen an Bigbags von der Ausgangs- zur Endstellung einstellen können, Abb. 6.5. Abb.6.6 zeigt ein Beispiel für den Fall E). Die Konturen zeigen den Endstand der Verschiebbewegung, aber nicht, wie der zeitliche Ablauf erfolgt. Auf mögliche zeitliche Abläufe wird unter Absatz 7.6.3 und Abb. 6.7 eingegangen.

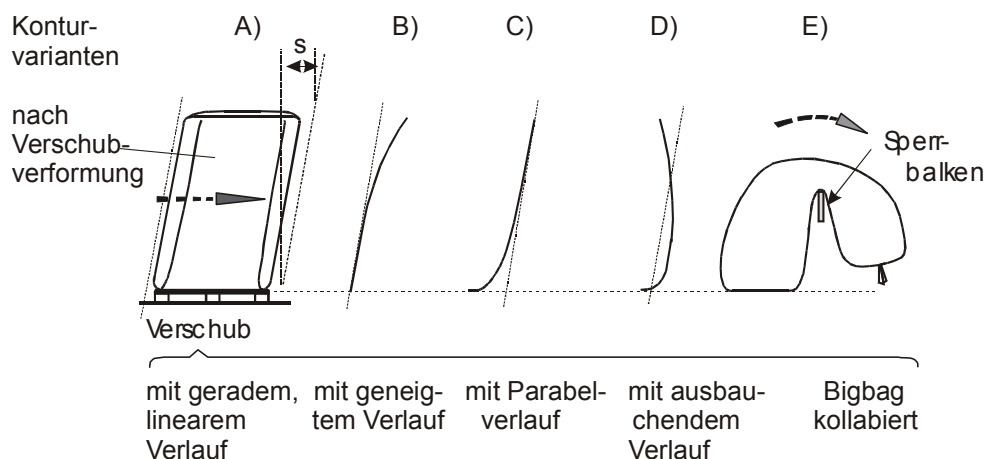


Abb. 6.5. Verformungsvarianten Bigbag [8]



Abb. 6.6. Kollabierter Bigbag [8]

6.3 Bewegungsablauf einer Verschiebung

In Abb. 8.7 sind drei verschiedene Verformungsabläufe skizziert. Unter A) entwickelt sich die Bewegung von „unten“ her, in B) gleichzeitig und in C) von „oben“.

Beobachtungen mit dem Abgleiten von Platten, Abb. 7.10 auf einer Palette bei einseitiger Anhebung zeigen, daß wie bei Bigbags sich eine Verschiebung ergibt.

Die Abb. 6.7 zeigt drei mögliche Abläufe für die Verformung von Bigbags, aber auch von gestapelten Säcken, am Beispiel von gestapelten Platten bei Einwirkung einer Querkraft. Das Endergebnis, eine bestimmte Verformungslinie nach Abb. 6.5, kann nach derzeitigem Erkenntnisstand, über diese drei Möglichkeiten erreicht werden, die in der Abbildung dargestellt sind. Welche der drei Varianten das reale Geschehen trifft oder unter welchen Bedingungen, ist bisher nicht ausreichend untersucht worden. Offen ist die Frage, ob das Modell für eine Plattenverschiebung sich auf Schüttgüter übertragen läßt. Die Frage, ob das Plattenmodell anwendbar ist und wie der Ablauf ist, ist bei einem Aufprall während einer Verschiebung von Bedeutung.

Randbedingungen: Reibungszahl μ_{Gleit} zwischen den Platten gleich und niedrig (damit wird ein zeitlich konstante Widerstandskraft angenommen),
Haftreibung zwischen unterster Platte und der Palette höher als
zwischen den Platten und
Platten mit gleicher Masse.

Während in t_3 bei Modell A) bereits die 3. Platte zum Anliegen an ein „Hindernis“ kommt, ist es in der Variante B) erst die zweite. Bei Aufprall während der Verschiebung sind bei der Berechnung, je nach Verwendung des Modell A), B) oder C), deshalb unterschiedlich große Massen beim Aufprall in der Verschiebung anzusetzen. Da aber eine energetische Betrachtung immer auch die Masse enthält, ist diese Frage von Bedeutung. Die Aufschlagkraft kann mit der Beschleunigung oder mit Kraftplatten gemessen werden. Wenn aber die Masse zeitabhängig und plastisch ist, kommen nur eine Messung mit Kraftplatten in Frage. Nur bei den Versuchen der Deutschen Bahn, Abschnitt 10, wurden seinerzeit Kraftplatten verwendet!

Zu dem Ablauf sind weitere Untersuchungen nötig. Ein Berechnungsansatz ist im Abschnitt 7.6.5 zu finden.

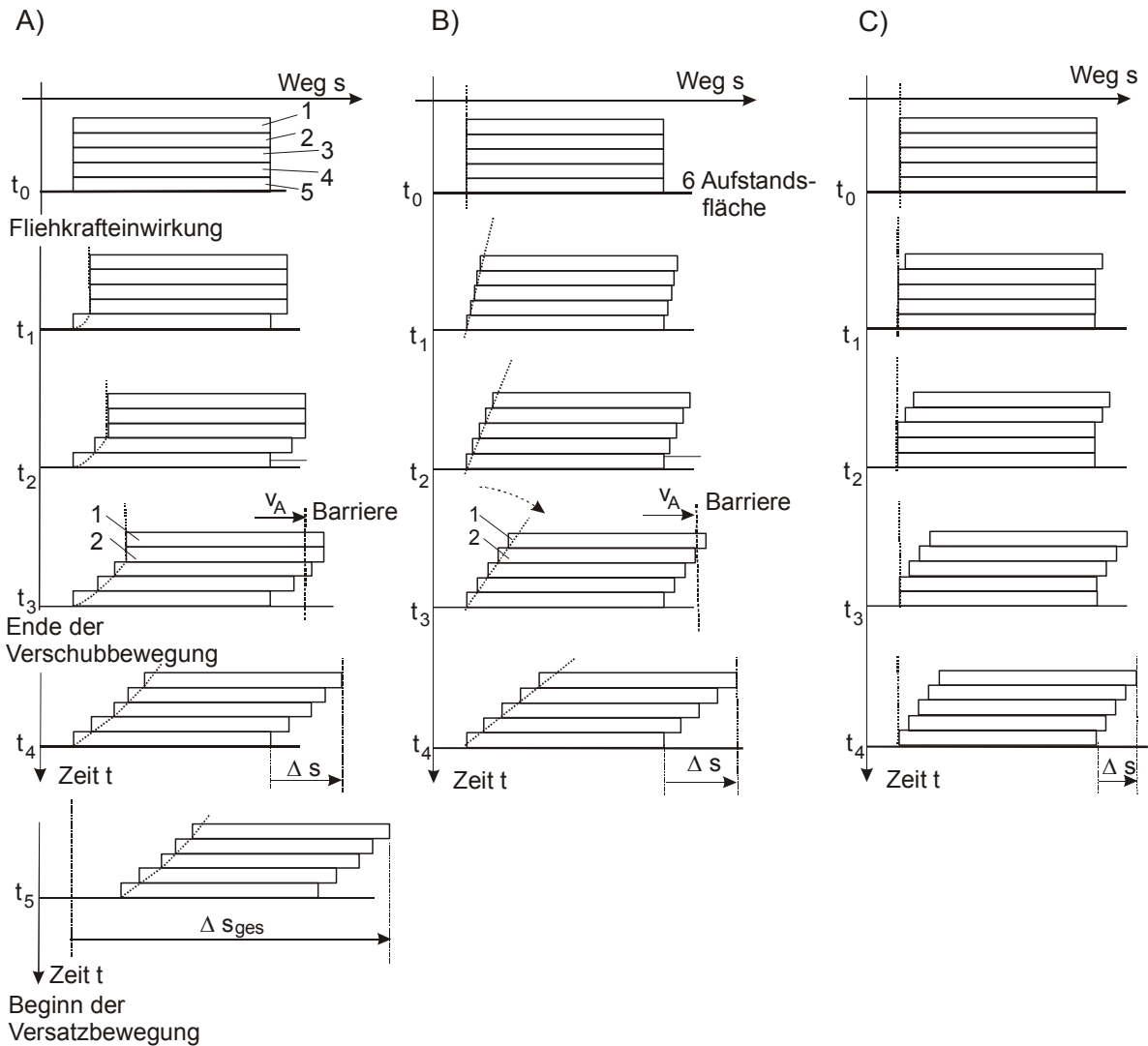


Abb. 6.7. Verformungsabläufe in der Verschubphase

Mit dem Berechnungsansatz nach Abschnitt 7.6.3 (Seite 41 ff) zeigt sich, daß sich ein Verschiebungsablauf nach Modell A) ergeben muß. Aber gerade Platten sind, was die Reibungsverhältnisse anbelangt schwierig zu behandeln. Es macht z. B. einen Unterschied, ob sie noch warm oder schon erkaltet sind, ob die Luft zwischen den Platten durch längeres Lagern schon heraus ist oder nicht.

Auch könnte es möglich sein, daß unter dem Einfluß vertikaler Ladeflächenschwingungen sich ein Verlauf nach C) entwickelt.

7 Versuche zur Verschiebbewegung

7.1 Versuchsbeschreibung

Im Folgenden soll ein Versuch vorgestellt werden, der mit einem Schüttgut der Gruppe 2 in verschiedenen Bigbagarten hinsichtlich des Verschiebverhaltens untersucht wurde [4].

In 2011 wurden befüllte Bigbags (auf einer Palette) mit einem feinkörnigem Schüttgut, das einen Schüttgutwinkel von 30 Grad hatte, mittels eines Gabelstaplers langsam in Etappen angehoben und jeweils der Verschiebweg und der Anhebungswinkel gemessen. Über den Anhebungswinkel mittels der Gewichtskraft (einer 1000 kg schweren Masse) kann die Hangabtriebskraft ermittelt werden, Abb. 7.4. Die Hangabtriebskraft ist als eine Antriebskraft zu verstehen, die den Bigbag ab einem geringen Anhebungswinkel verschiebt. Die langsame Anhebung entspricht der eines schwelenden Anstiegs einer Bremsung, Abb. 5.6.

Ab einem bestimmten Anhebungswinkel begann die Verschiebbewegung, die mit größer werdenden Winkel zunahm, Abb. 7.1, 7.2 und 7.3. Es wurden mehrere Sackvarianten jeweils mit dem gleichen Schüttgut gemessen.

Es handelte sich um folgende Bigbagvarianten (vgl. Abb. 4.4):

1. Versuch 1 – Bigbag mit Innenfächern
2. Versuch 5 – Rundgewebter Bigbag
3. Versuch 11 – Eckenverstärkter Bigbag

Die Bigbags wurden auf einer Palette stehend angehoben und der Versatz s stets in einer bestimmten Höhe gemessen. Die den Versatz auslösende Antriebskraft war die Hangabtriebskraft, die umso stärker anwächst, je größer der Anhebungswinkel α ansteigt. Der Anhebungswinkel wurde mit einem Winkelmesser gemessen, der Verschiebwinkel γ aus Verschiebweg s und der Höhe h errechnet.



Abb. 7.1. Beginn Verschieb



Abb. 7.2. Versatz nach Verschieb

Ebenso waren aber nach der Verschiebphase Abkippvorgänge möglich, Abb. 7.3.

Es muß deshalb die Frage diskutiert werden, ob es günstiger ist einen Versatz oder eine Kippbewegung als nachfolgende Bewegungsart nach einem Verschieb zu erreichen.



Abb. 7.3. Abkippen nach Verschiebbewegung

Die Bigbags waren zu 100 % befüllt und „fest“ zugebunden! Weitere Angaben zu den Versuchen sind in Anlage 14.1 zu finden.

Abb. 7.4 zeigt skizzenmäßig die Versuchsanordnung und nennt die Bezeichnungen für den Versuch.

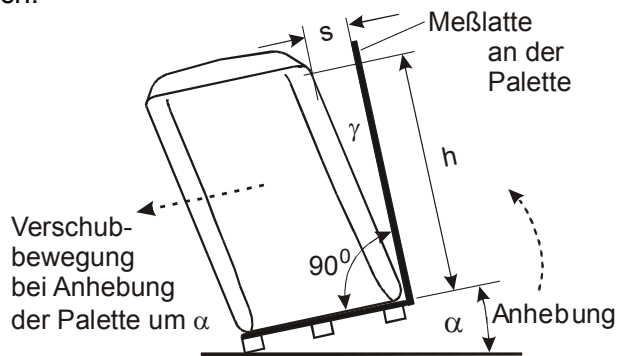


Abb. 7.4. Versuchsanordnung

7.2 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse des Versuchs 1 sind in der Übersicht 7.1 dargestellt.

Übersicht 7.1. Ergebnisse Versuch 1

Anhebungswinkel der Palette α Grad	Hangabtriebskraft F in N	Verschieb s in cm	Verschieb- winkel γ Grad
9,2	1599	ohne Befund	
12,1	2096	o. B.	
16,7	2873	o. B.	
17	2923	3,5	1,5
19,8	3387	4,8	2
23,3	3955	5	2,1
24,7	4178	5,4	2,3
25,1	4242	6	2,5
28,7	4802	6,5	2,7

Höhe h = 1,47 m

Mit den Werten lässt sich ein Diagramm Hangabtriebskraft über dem Vers Schubweg erstellen, Abb. 7.5. Die Hangabtriebskraft ergibt sich als Funktion des Sinus des Anhebewinkels.

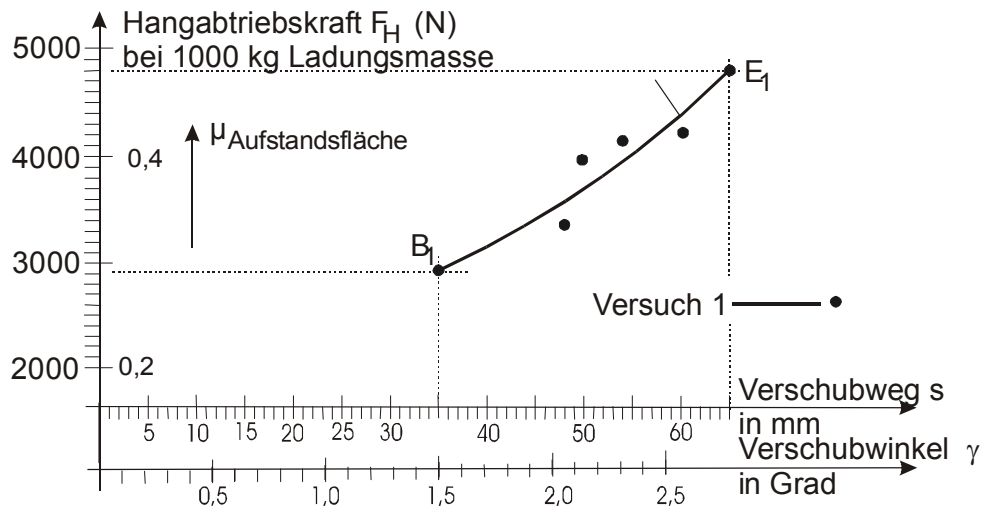


Abb. 7.5. Kraftverlauf über dem Vers Schubweg (Vers Schubdiagramm)

Die Kurve stellt eine Federrate dar. Da es aber keine oder nur eine geringe Rückfederung nach einem Aufprall des Bigbags gibt, soll deshalb im Folgenden von einer Deformationsrate d_{Def} statt von einer Federrate gesprochen werden.

Die Kurve beginnt in B1, bei einer Hangabtriebskraft von ca. 3000 N. Da das Schüttgut bereits bei wenigen Winkeln anfängt, abzurieseln, zeigt der Punkt B1 den Einfluß der Bigbagvariante. Der Vers Schub endet im Punkt E1. Hier geht die Bewegung in eine Gleit- oder in eine Kippbewegung über.

Wenn eine Ladungsmasse von 1000 kg gewählt wird, kann gleichzeitig die mindestens notwendige Haftreibung an der Aufstandsfläche angetragen werden. Damit zeigt der Punkt E1 den Beginn der Gleitphase (oder der Kippphase). Der Übergang vom Haften ins Gleiten an der Aufstandsfläche beginnt damit ab einem μ von ca. 0,4₈.

Der Verlauf zwischen B1 und E1 ist relativ ungenau, da sich die Messung des Vers Schubs mit der vorhandenen Meßtechnik in dieser Versuchsreihe als zu ungenau herausgestellt hat. Ob die Kurven progressiv, bzw. degressiv oder linear verlaufen, ließ sich wegen der relativ ungenauen Wegmessung nicht lösen. Die ersten Vers Schubmillimeter sind bei Weichladungen auch nur mit größerem Aufwand zu messen.

Die Abb. 7.6 zeigt die aufgenommenen Kurven der Bigbagarten:

4. Versuch 1 – Bigbag mit Innenfächern
5. Versuch 5 – Rundgewebter Bigbag
6. Versuch 11 – Eckenverstärkter Bigbag

Ergänzende Angaben zu den Versuchen sind in Anlage 14.1 zu finden.

Der Kurvenbeginn (B) bei den drei Bigbagvarianten liegt deutlich unterschiedlich. B11 (Versuch 11) und B5 (Versuch 5) beginnen in etwa bei der gleichen Krafteinwirkung, aber wegmäßig unterschiedlich. Der rundgewebte Bigbag reagiert „weicher“. B1 dagegen spricht

kraftmäßig deutlich später an und zeigt die Steifheit des formstabilen IBC. Damit der hoch liegende Endpunkt erreicht werden kann, muß die Aufstandsflächenreibung hoch sein, sonst tritt vorzeitig ein Abrutschen, bzw. Kippen ein.

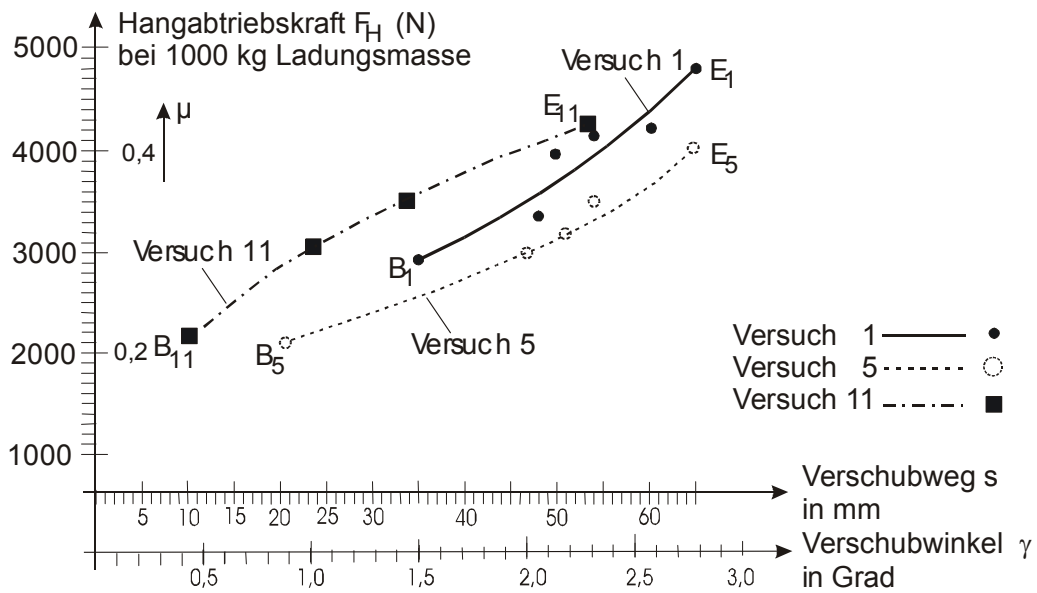


Abb. 7.6. Bigbagvarianten im Vergleich

7.3 Deformationsrate d_{Def}

Für die folgenden Überlegungen wird die linearisierte Kurve aus dem Versuch 11 benutzt, Abb. 7.7. Außerdem wird der Kurvenzug bis zum den Nullpunkt verlängert.

Erst ab einer Kraft von ca. 1800 N beginnt der Versatz, der im Maximum bei 54 mm Weg und einer Kraft von 4200 N in eine Versatzbewegung übergeht, da nun die Reibhaftung an der Aufstandsfläche überwunden wird.

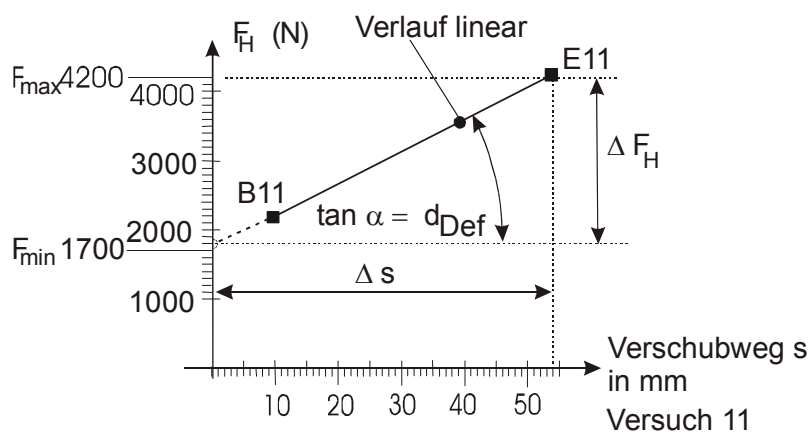


Abb. 7.7. Linearisierter Verlauf Versuch 11

Die allgemeine Form einer Geradengleichung lautet:

$$F = a \cdot s + b \quad (\text{Gl. 7.1})$$

Wird für den Weg s Null eingesetzt, ergibt sich für $b = 1700 \text{ N}$. Werden die Werte $F = 4200 \text{ N}$ bei einem Weg von $s = 53 \text{ mm}$ eingesetzt, ergibt sich für a :

$$4200 \text{ N} = a \cdot 53 \text{ mm} + 1700 \text{ N}$$

$$a = 47,169 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Die Geradengleichung lautet daher für den Versuch 11:

$$F_H = 47,169 \text{ N/m} \cdot s + 1700 \text{ N}$$

$$a = d_{\text{Def}} = \frac{F_{\text{max}} - F_{\text{min}}}{\Delta s} \quad (\text{Gl. 7.2})$$

Die Geradengleichung gilt bis zur Haftreibungsgrenze von $\mu = 0,44$.

$$F_H = d_{\text{Def}} \cdot s$$

$$d_{\text{Def}} = \frac{\Delta F_H}{\Delta s} \quad (\text{Gl. 7.3})$$

Die Deformationsrate lässt sich mit Gleichung 7.3 ermitteln. Sie beträgt in diesem Fall $48,148 \text{ N/m}$.

Offen bleibt die Frage, ob sich die gleiche Deformationsrate ergibt, wenn der Bigbag z. B. 25 Grad Versatz machen kann, bevor er abzugleiten beginnt, und er aber „schnell“ z. B. auf 25 Grad angehoben wird.

7.4 Deformationsenergie bei Vers Schub

Die Vers Schubenergie kann aus der Deformationsrate und dem Verformungsweg nach Gl. 7.4 berechnet werden [3].

$$E_{\text{Def}} = \frac{1}{2} d_{\text{Def}} \cdot s^2 \quad (\text{Gl. 7.4})$$

Die Deformationsenergie lässt sich auch aus der Fläche unter der Deformationskurve ermitteln.

$$E_{\text{vb}} = \frac{F_{\text{max}} + F_{\text{min}}}{2} \cdot s \quad (\text{Gl. 7.5})$$

Die Verformungsenergie für den Versuch 1 beträgt dann 130 Nm . Der Verformungswiderstand wird durch den Bigbag und innere Reibung des Schüttguts aufgebracht. Der Endwert sollte erreicht werden. Dazu muß aber die Aufstandsflächenreibung hoch sein und der Großsack nicht vorher zu kippen beginnen.

Die Größe der Fläche unter der Kurve, z. B. dargestellt mit der Deformationskurve aus dem Versuch 11 in Abb. 7.8, ist eine Kraft längs eines Weges und damit eine Arbeit. Sie steht für

die „innere“ Reibungsarbeit des Schüttguts und für die Widerstandskraft der Bigbagvariante bei Einwirkung einer äußeren Kraft. Wird die Deformationskurve aus Versuch 11 wieder linearisiert benutzt, ergeben sich vereinfachte Berechnungsmöglichkeiten, Abb. 7.8, für die Verschiebenergie z. B. für den Maximalverschiebung bis E. Die Gerade von E nach B wurde nach A hinaus verlängert.

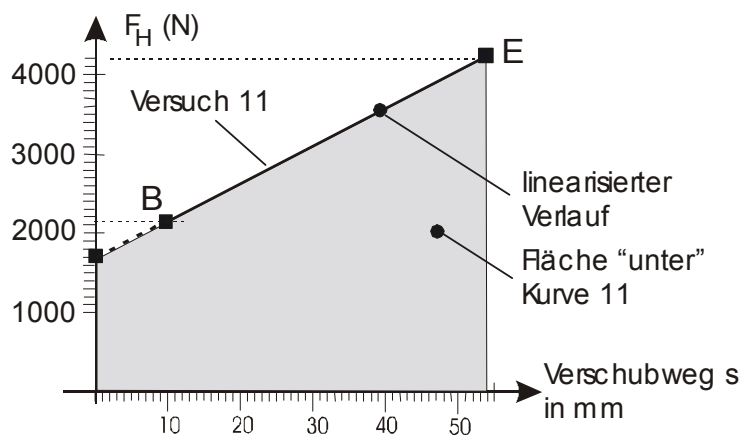


Abb. 7.8. Energie als Fläche unter der Kurve der Deformationsrate

Die Fläche unter der Kurve stellt eine Energie E_{Vs} dar, die im Folgenden als Verschiebenergie bezeichnet wird, die sich auch durch Flächenberechnung ermitteln lässt:

$$E_{Vb} = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2} \cdot s \quad (\text{Gl. 7.6})$$

$$E_{Vb} = \frac{4200 \text{ N} - 1700 \text{ N}}{2} \cdot 0,053 \text{ m}$$

$$E_{Vb} = 66,2 \text{ N m}$$

Diese Energie wird bis zu dem Endpunkt E in dem Bigbag gespeichert, da es sich um eine Verformung mit nahezu Null Rückstellung handelt, es also nur eine Kompressionsphase gibt.

Die Verschiebenergie kann auch aus der Deformationsrate und dem Verformungsweg nach Gl. 7.4 berechnet werden [3].

$$E_{\text{Def}} = \frac{1}{2} d_{\text{Def}} \cdot s^2$$

$$E_{\text{Def}} = \frac{1}{2} 47\,169 \cdot 0,053^2 \text{ Nm}$$

$$E_{\text{Def}} = 66,2 \text{ Nm}$$

7.5 Verschiebendeformationsenergien im Vergleich

Im Abschnitt 7.4 wurde die Energie bei einer Verschiebendeformation errechnet. Im Folgenden werden die Werte aus den drei Versuchen V1, V5 und V11 ermittelt und miteinander verglichen. Die Ausgangswerte und errechneten Werte sind in Anlage 14.1 zu finden.

Übersicht 7.2 zeigt einen Vergleich der Deformationsraten und der Verformungsenergien, Abb. 7.9 zeigt in einem Diagramm einen Vergleich der Deformationsraten.

Übersicht 7.2. Vergleich Deformationsraten und Verformungsenergien

Deformationsrate	Versuch 1	Bigbag mit Innenfächer	63 333 N/m
	Versuch 5	Rundgewebter Bigbag	40 909 N/m
	Versuch 11	Eckenverstärkter Bigbag	47 169 N/m
Verformungsenergie	Versuch 1	Bigbag mit Innenfächer	130 Nm
	Versuch 5	Rundgewebter Bigbag	87,7 Nm
	Versuch 11	Eckenverstärkter Bigbag	66,2 Nm

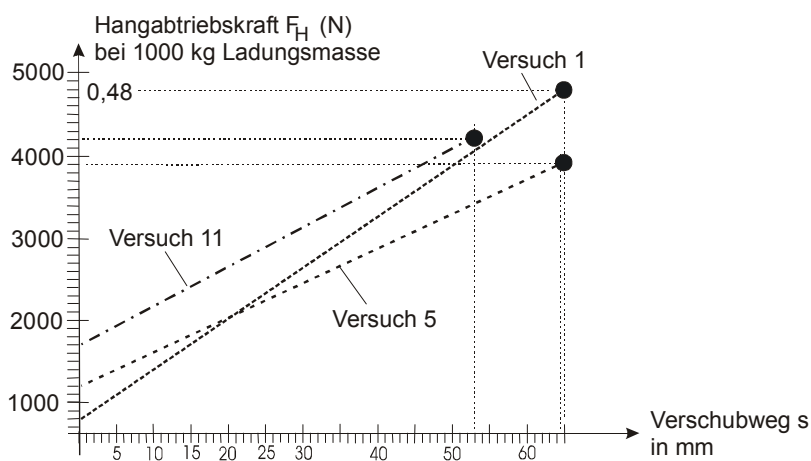


Abb. 7.9. Deformationsraten im Vergleich

Da entscheidend die Energie im Moment des Aufpralls ist, kommt es also weniger darauf an, ob die Rate hoch oder niedrig ist, sondern wo der Endpunkt liegt (später Beginn des Versatzes) und wie groß der Verformungsweg insgesamt ist. Der günstigste ist zwar der Bigbag mit Innenfächern, aber danach ist der rundgewebte günstiger in Hinblick auf die zerstörende Wirkung bei einem Aufprall.

7.6 Ablauf Bigbagverschub

7.6.1 Einführung

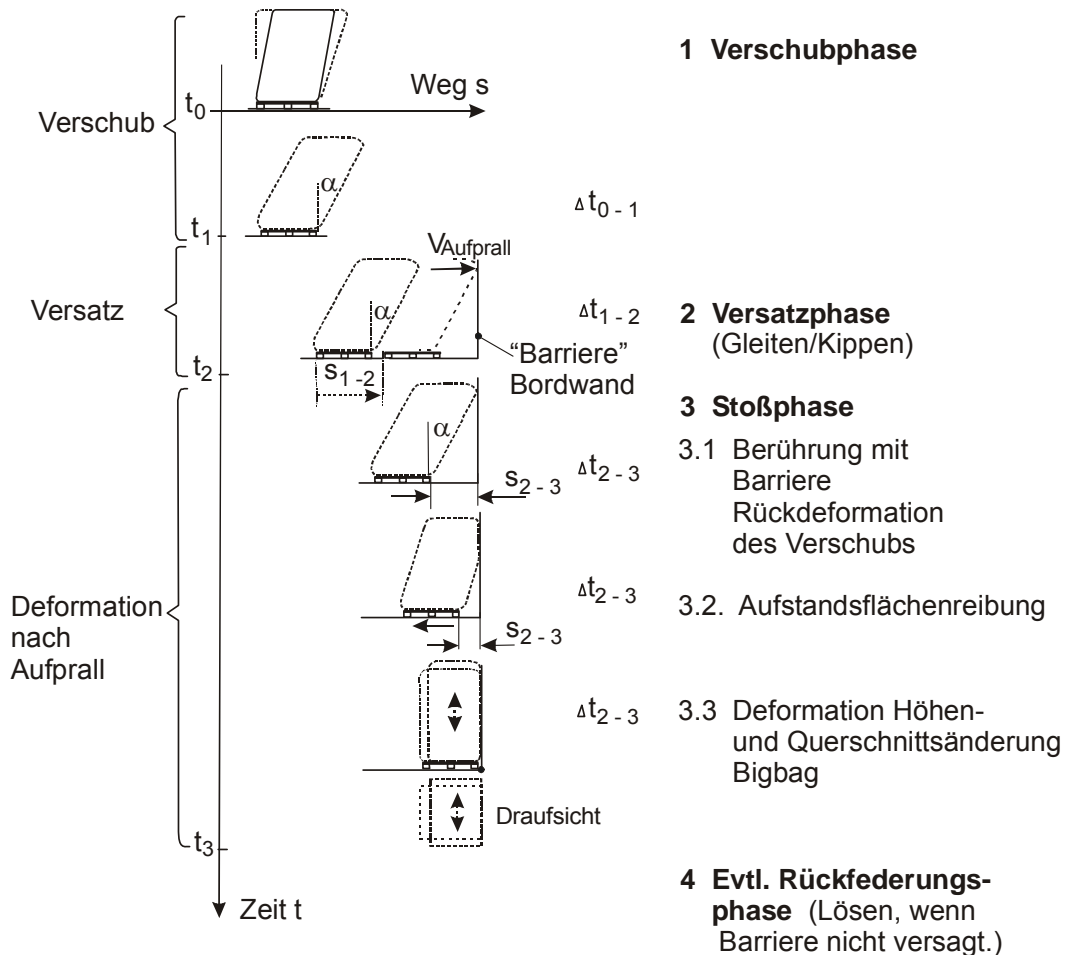
Neben den Gleitvarianten Versatz und Verschub für Bigbags ist der Aufprall einer Weichladung auf eine Wand oder eine andere Ladung von großer Bedeutung. Ein Aufprall eines Bigbags auf eine „Barriere“ kann in Phasen unterteilt werden:

1. Verschubphase (Beginn der Bewegung bis maximaler Versatz),
2. Beginn einer Verschiebbewegung,
3. Zeitpunkt der ersten Berührung,

4. der Bigbag wird aus der Schrägstellung zurück deformiert und
5. die Schüttgutmasse drückt nach oben und in die Querschnittsrichtungen.

Die Phasen zeigt eines Bigbagaufpralls zeigt die Übersicht 7.3.

Übersicht 7.3. Aufprallphasen



7.6.2 Zum Ablauf

Die in Übersicht 7.3 dargestellten Verhältnisse leiten sich aus Denkweisen der Unfallanalytik nach Straßenverkehrsunfällen ab, die seit den 70er Jahren der 20. Jahrhunderts zur Untersuchung von Straßenverkehrsunfällen entwickelt wurde. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die einzelnen energetischen Anteile getrennt ermitteln zu können. Da Kräfte superponiert werden dürfen, können die einzelnen Phasen eigens untersucht werden.

Entscheidend sind die Ladungsmasse und die Aufprallgeschwindigkeit. Die Aufprallgeschwindigkeit kann berechnet werden, wenn bestimmte Annahmen gemacht werden [14].

Bei einem langsamen Anstieg der Antriebskraft wird zunächst eine Verschiebbewegung auftreten und dann die Versatzbewegung folgen, wenn die Haftreibungsgrenze aus μ_{Haft} mal g an der Aufstandsfläche überschritten wird. Bei schnellem Kraftaufbau dagegen werden

beide Bewegungsarten mehr oder weniger gleichzeitig ablaufen. Nach einer Versatzbewegung wird die Ladung z. B. auf eine Seitenwand aufprallen. Die Barriere soll als steif angenommen werden. Bei kurzen Verschiebewegen kann es auch sein, daß der Verschiebe beim Aufprall noch nicht abgeschlossen ist. Hier sind eine Vielzahl von Varianten denkbar. In vielen Fällen wird die Grenze unscharf sein.

Die in der Deformationsphase stattfindenden Energieumwandlungen führen dazu, daß der Aufprallstoß zeitlich in die Länge gezogen wird und damit in der Kraftspitze deutlich niedriger wird, Abb. 5.6 b). Die Bewegungsenergie wird von drei Widerständen „gemindert“: Der Redeformationsenergie aus dem Verschiebe, der Deformation von Höhe und Querschnitt und der Aufstandsflächenreibungenergie.

In der Phase $t_{2,3}$ wird auch der Bigbagverschiebe rückdeformiert. Das bedeutet, daß über innere Reibungsarbeit im Schüttgut und des verwendeten Bigbags ein Teil der Aufprallenergie noch zusätzlich durch Rückdeformation „verloren geht“.

Ebenso muß die Verschiebeenergie und die Energie durch die Höhen- und Querschnittsverformung beachtet werden. Sie mindern ebenfalls die Aufprallenergie. Das bedeutet, daß der Aufprall einer gleichgroßen, aber steifen Masse „härter“ ausfällt. In dieser Bilanzierung sind Verformungen der Wand, auf die Ladung aufprallt, besonders zu berücksichtigen. Würde der Aufprall mit geringerer Intensität ablaufen als bei einer vergleichbare steife Masse, würde das unter Umständen geringere Sicherungsmaßnahmen rechtfertigen! Unter Umständen kommt es aber zu einer geringen Rückfederung nach t_3 .

Von den in der Stoßphase unter 3. aufgelisteten möglichen Energieumwandlungen kann die Rückdeformation abgeschätzt werden. Die Reibungsenergie zu ermitteln, kann bereits Schwierigkeiten machen, wenn die Normalkraft nicht bekannt ist, weil die Stoßkraft u. U. nicht parallel zur Aufstandsfläche wirkt. Zu der Höhen- und Querdeformation beim Aufprall von Bigbags sind zur Zeit keine Untersuchungen bekannt.

7.6.3 Zum Verschiebeablauf

Mittels einer Kräftebilanz zu einem Anhebeversuch soll im Folgenden ein Plattenstapel rechnerisch untersucht werden. zugrunde gelegt werden soll der Verschiebeablauf nach C) in Abb. 6.7. Abb. 7.10 zeigt eine Plattenstapel. Auch bei Platten ist eine Verschiebewegung möglich.



Abb. 7.10. Platten

7.6.4 Annahmen

Für die folgenden Ausführungen wird auf Annahmen und Daten zurückgegriffen:

1. Eine Plattenladung auf einer Palette wird auf einer Seite bis zu einem Grenzwinkel α_{Grenz} angehoben, so daß die Platte durch Reibhaftung gerade noch gehalten wird. In einem zweiten Abschnitt wird auf einen deutlich größeren Winkel angehoben, die Ladung wird bis zu einem bestimmten Winkel festgehalten und dann ausgelöst.
2. Reibungszahl zwischen den Platten (μ_H und μ_G) seien im Gleiten konstant und gleich groß.
3. Für Berechnungen soll gelten: $m_1 = m_2 = m_i = m$
4. Der Anhebewinkel schiefe Ebene soll unter $\alpha = 38^\circ$ und über $11,3^\circ$ liegen.
5. Haftreibungskoeffizient $\mu_H = 0,4$
Gleitreibungskoeffizient $\mu_G = 0,2$ ($\tan 11,3 \text{ Grad} = 0,2$)
Haftreibung der untersten Platte zur Palette sei größer als $\mu = 0,6$.
Die Palettenladung sei nur mittels Reibschluß gehalten.
6. Es wird ein Versatzablauf nach C) in Abb.6.7 angenommen.

7.6.5 Haltekräfte bei Haftreibung

Platte 1 stehe vor dem Gleitbeginn, Abb. 7.11. Der Ansatz geht davon aus, daß die Platten von oben zu gleiten beginnen. Die Platte 1 soll zunächst in Ruhe verharren. Für eine Kräftebilanz wird die 1. Platte „freigeschnitten“.

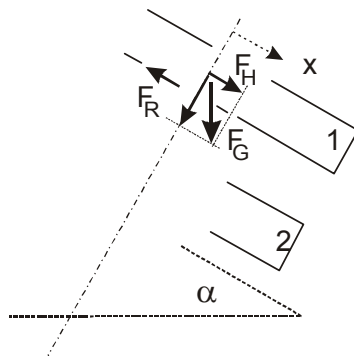


Abb. 7.11. Kräfte an 1. Platte

$$F_{R1} = m \cdot g \cdot \mu \cdot \cos \alpha$$

$$F_H = m \cdot g \cdot \sin \alpha$$

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu$$

$$m \cdot g \cdot \sin \alpha = m \cdot g \cdot \mu_H \cdot \cos \alpha$$

$$\mu_H = \tan \alpha$$

Rückhaltung Antrieb

(Gl. 7.7)

Wird der „Antrieb“ größer, kommt es zu einer Bewegung. Es ergibt sich die gleiche Formel wie für eine blockartige, durch Reibung gehaltene Ladung.

Eine Kräftebilanzierung für die 2. Platte zeigt dann Abb. 7.12:

Da an der 2. Platte die Gewichtskraft der oberen Platte wirkt, ergibt sich eine doppelte Gewichtskraft in der Kräftebilanz für den noch „gehaltenen“ Zustand an der Unterseite der Platte 2 und eine Gleitung an der Oberseite in Richtung der Hangabtriebskraft:

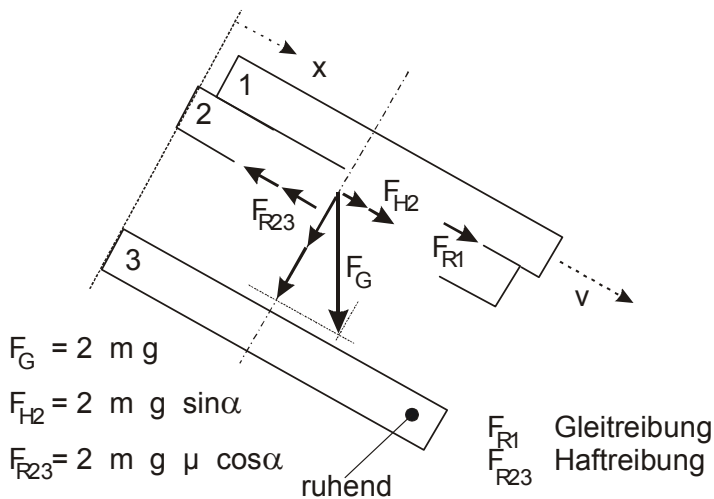


Abb. 7.12. Kräfte an der 2. Platte

$$2 \mu_H \cos \alpha = 2 \sin \alpha + \mu_G \cos \alpha$$

$$\mu_H \cdot \frac{1}{2} \mu_G = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$$

Rückhaltung Antrieb

(Gl. 7.8)

Die Haftreibung der 2. Platte wird also reduziert aber in geringem Ausmaß als bei der 1. Platte und erst dann, wenn die 1. Platte sich bewegt. Die Reduzierung beträgt bei der 2. Platte die Hälfte der Gleitreibungszahl.

Für die 3. Platte gilt nach Abb. 7.13:

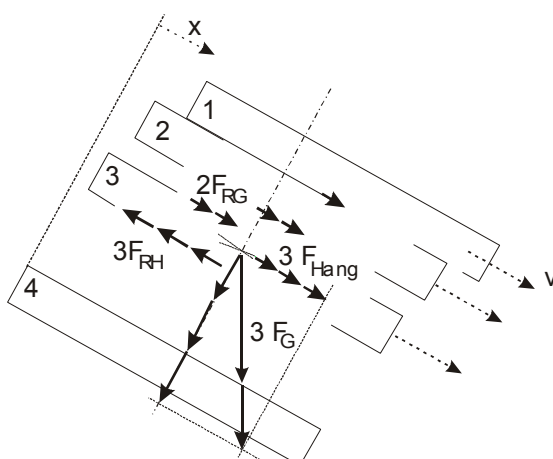


Abb. 7.13. Kräfte an der 3. Platte

$$2 \mu_H \cos \alpha = 2 \sin \alpha + \mu_G \cos \alpha$$

Rückhaltung Antrieb

$$\mu_H - \frac{1}{2} \mu_G = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$$

$$\mu_H - \frac{1}{2} \mu_G = \tan \alpha \quad (\text{Gl. 7.9})$$

Die Haftreibung der 2. Platte wird also reduziert. Die Reduzierung beträgt bei der 2. Platte die Hälfte der Gleitreibungszahl.

Für die 3. Platte gilt nach Abb. 7.10:

$$3 \mu_H \cos \alpha = 3 \sin \alpha + 2 \mu_G \cos \alpha$$

$$\mu_H - \frac{3-1}{3} \mu_G = \tan \alpha \quad (\text{Gl. 7.10}).$$

Oder allgemein:
$$\mu_H - \frac{x-1}{x} \mu_G = \tan \alpha \quad (\text{Gl. 7.11}).$$

Nach dieser Überlegung rutscht der Plattenblock nach dem Modell C in Abb. 6.7!

Je größer x ansteigt, desto mehr nähert sich der Ausdruck $x-1/x$ dem Wert eins. Für eine große Anzahl von Platten ($x \rightarrow \infty$) folgt:

$$\mu_H - \mu_G = \tan \alpha \quad (\text{Gl. 7.12})$$

Ob Bigbags nach dieser Ableitung als ein Plattenstapel mit unendlich vielen Platten angesehen werden kann, ist eine Frage.

8 Verformungswiderstand eines Bigbag

8.1 Einführung

Im Folgenden wird für die Vershubdeformation eines Bigbags ein Berechnungsansatz aufgezeigt, mit dem sich auch Deformationsrate versuchstechnisch ermitteln lässt.

Für das Folgende wird vorausgesetzt, daß die Vershubbewegung reproduzierbar ist, und auch keine Rückfederung nach einer Verformung auftritt. Je stärker der Bigbag eine Verformung erfährt, desto größer wird die Antriebskraft sein. Das bezieht aber auch den Fall ein, daß die Kraft und der Vershub nicht mehr im Bereich einer Linearität sind. Obwohl damit ein Bigbag mit Schüttgut nicht die Grundbedingung einer Schubfeder, nämlich die Gültigkeit des Hookeschen Gesetzes erfüllt, soll der Vershub als Schubfederansatz behandelt werden. Insbesondere stützt die „Verformungslinie“, Abb. 8.1, diesen Ansatz, weil die „Verformungslinie“ ihren Deformationsweg bereits oberhalb der „Aufstandsebene“ beginnt, während das Modell „einseitig eingespannter Träger“ unter einer Schüttgutlast unter einem Winkel von 90 Grad beginnt.

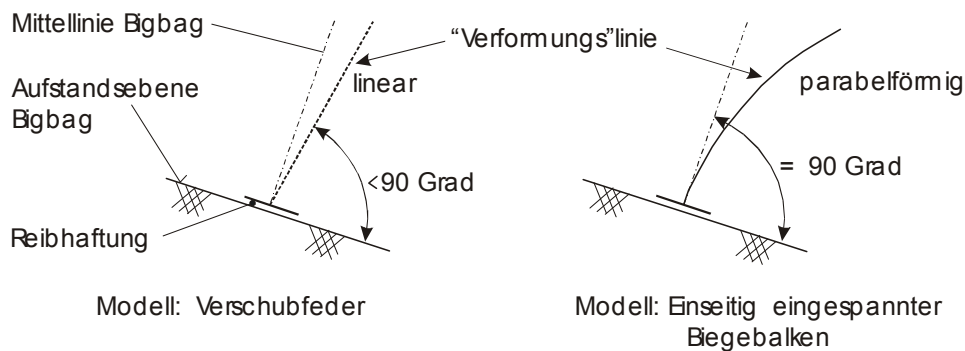


Abb. 8.1. Verformungsmodelle

Es soll der theoretische Ansatz „Vershubfeder“ am Beispiel eines Stabes unter einer Schubbeanspruchung abgeleitet werden. Inwieweit der Ansatz allgemein gültig ist, muß noch untersucht werden.

8.2 Berechnungsansatz für Vershubwiderstand

Wird ein Stab auf Zug belastet, wird er sich um Δl verlängern. Es gilt in Anlehnung an Ausführungen in [13]:

Die Spannung σ ist proportional der Dehnung ε .

$$\sigma \propto \varepsilon \quad \varepsilon = \frac{\text{Verlängerung } \Delta l}{\text{Ursprüngliche Länge } l}$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad E = \text{Proportionalitätsfaktor} \quad (\text{Gl. 8.1})$$

Mit dem E-Modul wird die Gleichheit in Gl. 8.1 zwischen der Spannung und der Dehnung hergestellt. Der E-Modul hat die Einheit einer Spannung.

Für den Fall, daß ein Bigbagversatz als eine Schubfederbewegung betrachtet wird, gilt: Die Schubspannung τ ist gleich dem Produkt aus Gleitmodul G und Versatzwinkel γ (in Radiant).

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (\text{Gl. 8.2})$$

Bei größeren Gammawinkel muß der Tangens statt des Radiants verwendet werden.

Führt eine von außen auf einen Bigbag einwirkende Kraft zu einem Schrägversatz eines Bigbags, können durch einen „Freischnitt“ an einer beliebigen Stelle die innen wirkenden Kräfte und Momente sichtbar gemacht werden. Die an der freigeschnittenen Stelle anzubringenden Kräfte und Moment stellen den statischen Gleichgewichtszustand wieder her, Abb. 8.2.

An der Schnittstelle wirken im allgemeinsten Fall zwei Kräfte und ein Moment. Da ein Schüttgut (und der Bigbag) keine Zugkraft aufnehmen kann, werden die Zugspannungen Null gesetzt. Auch ein Biegemoment kann nicht auftreten, sonst würde ein Kippen zustande kommen. Danach verbleibt im wesentlichen nur eine Schubkraft. Eine Verschubkraft kann entstehen, solange die innere Reibungskraft kleiner ist als die Reibungskraft, die an der Aufstandsfläche des Bigbags wirkt und auch die „Widerstandskraft“ des Bigbags mit berücksichtigt wird.

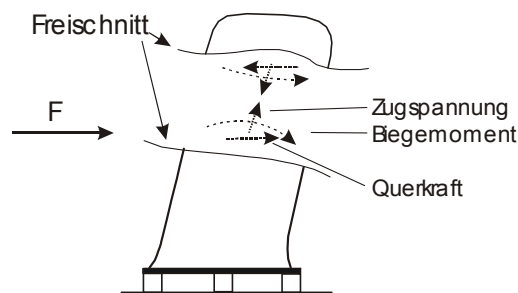


Abb. 8.2. Spannungsvarianten am Bigbag

Dann könnte analog zu Gleichung 8.2 für den Bigbagverschub statt eines Gleitmoduls ein „Bigbagmodul B “ in den Berechnungsgang eingeführt werden. Damit bekommt Gleichung 8.2 die Fassung:

$$\tau = B \cdot \gamma \quad (\text{Gl. 8.3})$$

B stellt für diesen Anwendungsfall ein Proportionalitätsfaktor dar und soll mit Bigbagmodul bezeichnet werden.

Da der Winkel bei einem Verschub nicht klein bleibt, sondern, wie in der Praxis zu beobachten ist, über 5° ansteigen kann, wird der Tangens statt des Winkels γ in Radiant verwendet.

$$\tau = B \cdot \tan \gamma \quad (\text{Gl. 8.4})$$

$$\tau = B \cdot \tan \gamma$$

$$\frac{F_H}{A} = B \frac{s}{h}$$

(Gl. 8.5)

$$F_H = d_{Def} \cdot s$$

(Gl. 8.6)

$$d_{Def} = \frac{B \cdot A}{h}$$

(Gl. 8.7)

Der Bigbagmodul B ist eine Konstante, die ein Schüttgut der Gruppe 2 in einem bestimmten Bigbag unter Berücksichtigung des Füllungsgrades (fest zugebunden) erfasst. Der Ausdruck B mal A geteilt durch Höhe h stellt die Deformationsrate d_{Def} dar. Die Bigbagrate ist für einen befüllten Bigbag eine konstante Größe. Bei gegebener Hangabtriebskraft wird s umso kleiner je größer die Querschnittsfläche ist und je kleiner die Höhe h ist.

Voraussetzungen sind:

1. Es wird nur eine Viertelschwingung der Verformung betrachtet,
2. die Verformung wird nur in Schubspannung umgesetzt
3. die Verschiebung wird linearisiert und
4. der Bigbag wird fest verschlossen.

Mit den geometrischen Maßen eines Bigbags lässt sich die Federrate des Bigbag errechnen, aber auch aus dem Verschiebungsdiagramm ermitteln.

9 Aufprallphase

9.1 Einführung

Neben den Bewegungsarten und den Gleitvarianten Vers Schub und Versatz für Bigbags ist der Aufprall einer Ladung auf eine Wand oder eine andere Ladung von großer Bedeutung. Ein Aufprall eines Bigbags auf eine „Barriere“ kann in folgende Phasen unterteilt werden:

1. Vers Schubphase (Beginn der Bewegung bis maximaler Vers Schub),
2. Beginn einer Vers atzbewegung,
3. Zeitpunkt der ersten Berührung mit der Barriere,
4. der Bigbag wird aus der Schrägstellung zurück deformiert und
5. die Schüttgutmasse drückt nach oben und in die Querschnittsrichtungen.

Die Phasen zeigt eines Bigbagaufpralls zeigt die Übersicht 7.3.

9.2 Vers Schub in der Schwellphase einer Bremsung

Wird einmal davon ausgegangen, daß die Antriebskraft von der Masseträgheitskraft einer Schwellphasenbremsung ausgeht, dann kann mittels einiger Annahmen ein zeitlicher Zusammenhang zwischen dem Vers Schubweg und der jeweils zurückgelegten Zeit errechnet werden. Ausgangspunkt ist ein Vers Schubdiagramm nach Abb. 7.6.

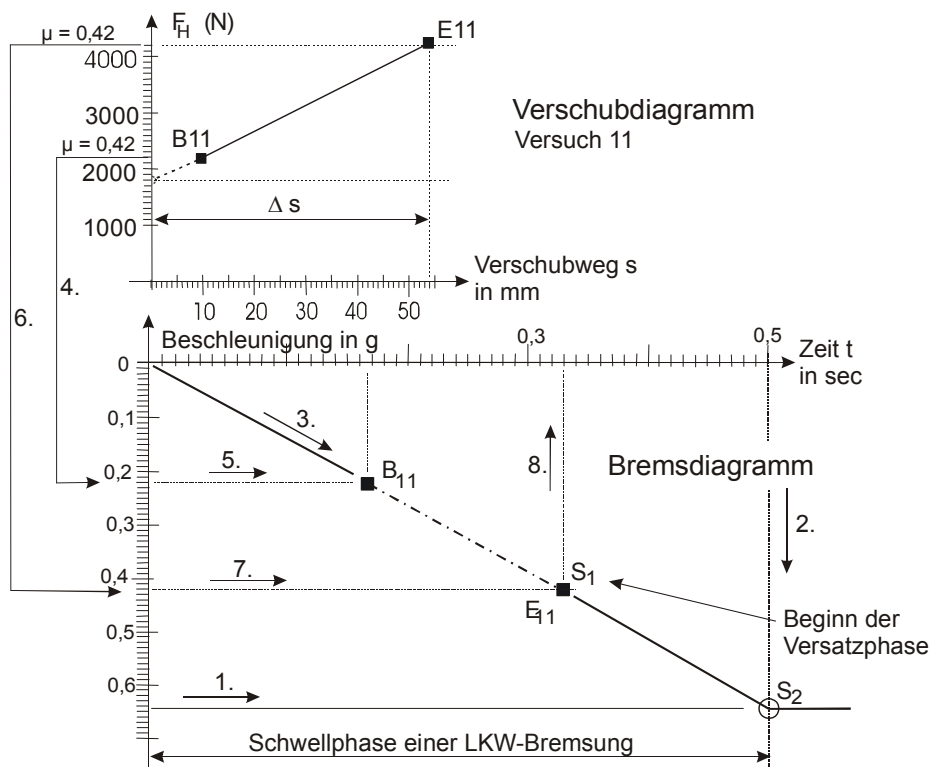


Abb. 9.1. Brems- mit Vers atzdiagramm

Zu den einzelnen Schritten in Abb. 9.1:

1. → 3. Konstruktion des Schwellphasenverlaufs
4. → 7. Übertragung des Vers Schubdiagramms

Das vorhandene Vershubdiagramm lässt sich mit den Schritten 1. bis 7. in ein Bremsdiagramm einfügen. Angenommen werden die Schwellzeit (0,5 sec) und eine maximale Fahrzeugverzögerung (0,65 g). Damit ergeben sich unter diesen Voraussetzungen zeitliche Zuordnungen für die Punkte B11 und E11 im Bremsdiagramm.

9.3 Aufprallgeschwindigkeit, -energie

Das erarbeitete Bremsdiagramm kann nun dazu benutzt werden, die Aufprallgeschwindigkeit nach einer bestimmten Gleitstrecke der Ladung zu errechnen. Dabei werden idealisierte Bremsbedingungen vorausgesetzt, wie sie nach [z. B. 10] in der Unfallanalytik seit ca. 1980 fest gebräuchlich sind.

Für die Berechnung der Aufprallgeschwindigkeit in der Vershubphase werden folgende Annahmen getroffen:

1. $\mu_G = 0,2_0$ (konstant über den Weg),
2. Gleitweg $s = 0,2$ m,
3. die Barriere sei „steif“,
4. die Zeit vom Übergang Haft- in die Gleitreibung sei = 0,1 sec und
5. Grundlage ist das oben beschriebene Bremsdiagramm, Abb. 5.2.

Der Gleitweg muß aus einer Umrechnung des Weges in den Feldern I bis III in Zeiten ermittelt werden.

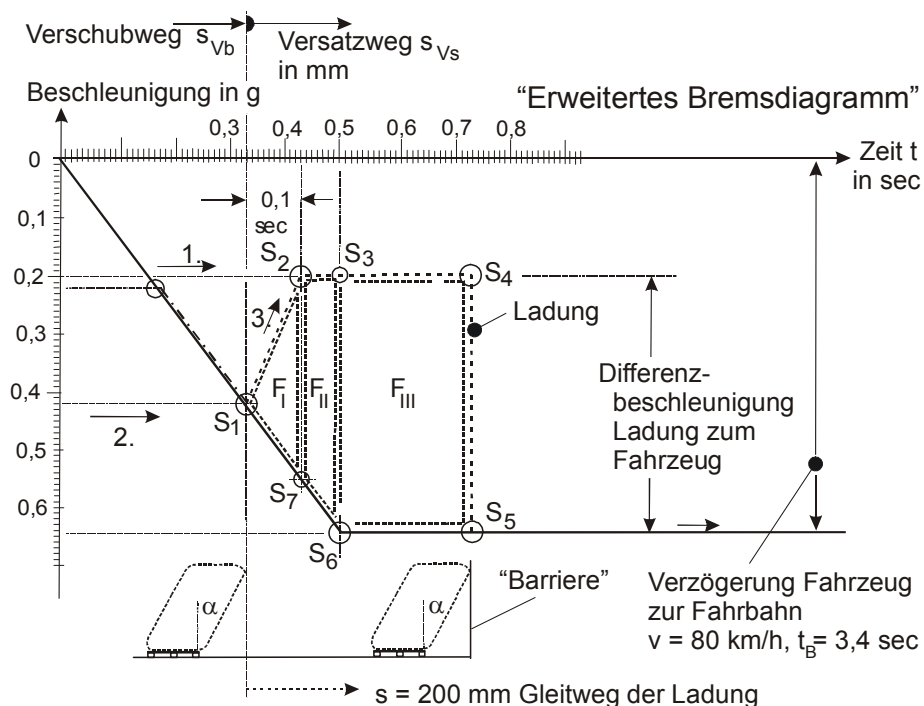


Abb. 9.2. „Erweitertes Bremsdiagramm“

Das Bremsdiagramm ist erweitert um die Bewegung der Ladung von Punkt S_1 bis Punkt S_4 , Abb. 9.2. In S_4 komme die Ladungsbewegung an einer steifen „Barriere“ auf dem Fahrzeug (z. B. Stirnwand) zum Stillstand [14]. Von S_4 bis S_5 wird die Zeitdifferenz mit Null angenommen.

Die Fahrzeug und die Ladungsbewegung sind reibungsverzögert und werden idealisiert für diese Vorgänge als zeitlich konstant angenommen. Damit liegt an der Ladung eine sog. Differenzbeschleunigung als Antriebskraft (Antriebsbeschleunigung mal Masse) von Punkt S₃ bis S₄ an, die damit ebenfalls über dem Gleitweg zeitlich konstant ist. Aus der Differenzbeschleunigung und der Zeit Δt kann dann die Aufschlaggeschwindigkeit berechnet werden.

9.4 Nachrechnungen Aufprallgeschwindigkeit

Um zu prüfen, ob das Fahrzeug vor Beendigung des Ladungsverschubs zum Stillstand kommt, wird zuerst die Bremszeit des Fahrzeugs nach [6] errechnet. Die Fahrzeuggeschwindigkeit betrage 80 km/h und die Verzögerung a_F = 6,5 m/sec². Das Beispiel wird ohne Rechnung mit Ober- und Untergrenzen für die Reifen- und die Ladungsreibung behandelt. Damit wird die Bremszeit bis Stillstand des Fahrzeugs:

$$\begin{aligned} t &= \frac{v}{a_F} \\ &= \frac{80 \text{ km/h}}{6,5 \text{ m/sec}^2} \\ &= 3,4 \text{ sec} \end{aligned}$$

Die Bremszeit beträgt ca. 3,4 sec.

Der Ladungsversatz von 200 mm Länge liegt, wie unten gezeigt wird, zeitlich deutlich innerhalb der Bremszeit des Fahrzeugs von 3,4 sec. Vereinfacht wird die Berechnung der Aufprallgeschwindigkeit der Ladung in Abb. 9.1 nur die „Fläche“ S₃, S₄, S₅ und S₆ herangezogen. In diesem Bereich liegt eine konstante Differenzbeschleunigung vor. Mit μ_G = 0,2 ergibt sich eine Gleitreibungsverzögerung von ca. 2 m/sec². Damit wird die anzurechnende Verzögerung:

$$\begin{aligned} a_{\text{Diff}} &= 6,5 - 2 \text{ (m/sec}^2\text{)} \\ &= 4,5 \text{ m/sec}^2 \end{aligned}$$

Die Aufprallgeschwindigkeit errechnet sich dann aus folgendem Ansatz (dazu auch Abb.5.6):

Für die Nachrechnung soll statt der Bremsverzögerung als Antriebskraft ein Antrieb aus einer schiefen Ebene genommen werden. Wird der Winkel auf der schiefen Ebene so groß, daß die Ladung in Bewegung kommt, so wirkt nun entgegen der Bewegungsrichtung die Masseträgheitskraft F_T, Abb. 9.3, da die Ladung durch die Gewichtskraft beschleunigt wird. Da an der Gewichtskraft die Massenanziehungskraft wirkt und diese konstant ist, wird die Bewegung aus der Hangabtriebskraft ebenfalls gleichmäßig konstant beschleunigt sein.

Das Kräftegleichgewicht in Richtung der Wirkfläche ergibt sich dann nach dem d'Alembert-schen Ansatz [13]:

$$\begin{aligned} &F_H - F_R - F_T = C \\ \text{oder} & \quad \gamma \cdot g \sin \alpha - \gamma \cdot \bar{s} - \gamma \cdot g \mu \cos \alpha = C \end{aligned} \quad (\text{Gl. 9.1})$$

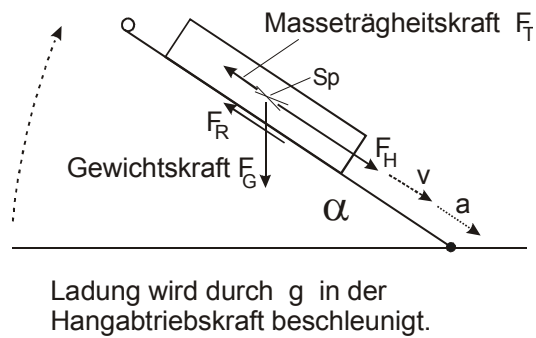


Abb. 9.3. Sich bewegende Ladung auf einer schiefen Ebene

Nach zweimaligem Integrieren ergibt sich der Weg s als Funktion der Zeit t bei geeigneter Wahl der Anfangskoordinaten.

$$\ddot{s} = g \sin \alpha - g \mu_G \cos \alpha \quad (\text{Gl. 9.2})$$

Damit ergibt sich für die Geschwindigkeit v als Funktion der Zeit t :

$$\dot{s} = v = (g \sin \alpha - g \mu_G \cos \alpha) \cdot t \quad (\text{Gl. 9.3})$$

und für den Weg als Funktion der Zeit:

$$s = \frac{1}{2} (g \sin \alpha - g \mu_G \cos \alpha) \cdot t^2 \quad (\text{Gl. 9.4})$$

$$t = \sqrt{\frac{2s}{g(\sin \alpha - \mu_G \cos \alpha)}} \quad (\text{Gl. 9.5})$$

Mit diesem Ansatz kann auch statt der Hangabtriebskraft die Verzögerungskraft eingesetzt werden.

Für ein $\mu_H = 0,42$ errechnet sich ein Grenzwinkel von ca. 22,7 Grad. Übersteigt der Anhebungswinkel $\alpha = 22,7$ Grad, so setzt sich die Ladung in Bewegung. Für die folgende Aufprallgeschwindigkeit soll ein „schnell“ eingestellter Winkel von 30 Grad angenommen werden, für den Weg wird 200 mm vorgegeben und für $\mu_G = 0,2$. Es errechnet sich mit Gl. 9.5 eine Zeit bis zum Aufprall von

$$t = 0,35 \text{ sec}$$

Nach dieser Zeit wird eine Aufprallgeschwindigkeit (Gl. 9.3) nach 200 mm Weg:

$$v = 1,14 \text{ m/sec}$$

Die Aufprallenergie wird mit einer Masse $m = 1000 \text{ kg}$:

$$\begin{aligned}
 E_A &= \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 \\
 &= \frac{1}{2} 1000 \text{ kg} \cdot 1,14 \frac{\text{m}}{\text{sec}}^2 \\
 &= 649,8 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

Für ein $\mu_G = 0,1$ ergibt sich mit den gleichen Annahmen:

$$\begin{aligned}
 t &= 0,31 \text{ sec} \\
 v &= 1,28 \text{ m/sec} \\
 E &= 821 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

Erwartungsgemäß wird die Gleitzeit kürzer, die Aufprallgeschwindigkeit größer und damit auch die Aufprallenergie.

Erwartungsgemäß wird die Aufprallgeschwindigkeit größer, wenn die Reibhaftung an der Aufstandsfläche kleiner wird. Die Aufprallenergie steigt mit dem Quadrat der Geschwindigkeit an.

9.5 Energiebilanz Aufprallphase

Bei einem langsamen Anstieg der Antriebskraft wird zunächst eine Verschiebung auftreten und dann die Versatzbewegung folgen. Bei schnellem Kraftaufbau dagegen werden beide Bewegungsarten mehr oder weniger gleichzeitig ablaufen. Die Barriere soll als steif angenommen werden. Bei einer Seitenbelastung kann es auch sein, daß der Versatz beim Aufprall noch nicht abgeschlossen ist. Hier sind mehrere Varianten möglich.

Die Stoßphase, also die Phase von der ersten Berührung bis zum Stillstand der Ladung an der Wand, soll im Folgendem mittels einer Energiebilanz qualitativ behandelt werden. Grundlage sind die oben unterschiedenen Phasen. Zum Zeitpunkt der 1. Berührung in (t_2) kann eine Energiebilanz nach Abb. 10.1 erstellt werden.

Diese deduktiv abgeleitete Energiebilanz zum Zeitpunkt der 1. Berührung soll aufzeigen, daß die Bewegungsenergie von drei Widerständen „gemindert“ wird: Der Redeformationsenergie aus dem Verschiebung, der Deformation von Höhe und Querschnitt und der Aufstandsflächen-Reibungsenergie.

Das ist zum einen die Reibungsenergie an der Aufstandsfläche. Ebenso wird in der Phase Phase t_{2-3} Bigbagverschiebung rückdeformiert. Das bedeutet, daß über innere Reibungsarbeit ein Teil der Aufprallenergie abzuziehen ist. Weiterhin muß die Energie durch die Höhen- und Querschnittsverformung beachtet werden. Sie mindern ebenfalls die Aufprallenergie. Das bedeutet, daß der Aufprall einer gleichgroßen, aber steifen Masse „härter“ ausfällt. In dieser Bilanzierung sind Verformungen der Wand, auf die die Ladung aufprallt, ebenfalls zu berücksichtigen [4]. Der Aufprall einer Bigbagladung läuft mit geringerer Intensität ab als der einer vergleichbaren steifen Masse!

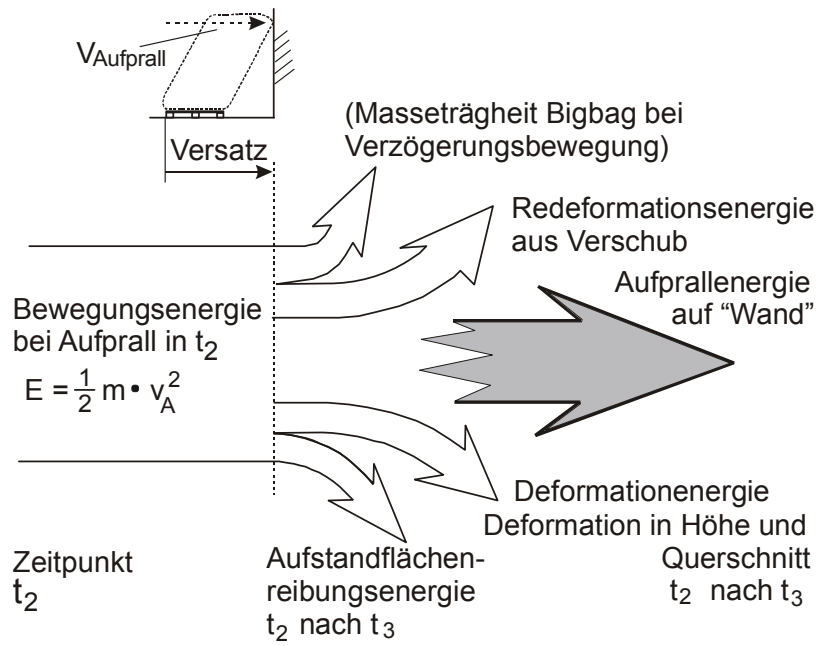


Abb. 10.1. Energiebilanz

10 Aufprallversuche der Bahn

10.1 Einführung

Im Rahmen der Arbeiten zu [11] wurden von dem Versuchszentrum der Deutschen Bahn in Minden Aufprallversuche mit Güterwagen durchgeführt [12], die mit Bigbags beladen waren. Die Abb. 10.1 zeigt in einer Skizze, wie die Bigbags in dem Wagen gestaut waren. Untersucht werden sollte u. a., welche Kräfte beim Aufprall eines Güterwagens nach Ablauf von einem Ablaufberg an der Pufferbohle und der Stirnwand des Güterwagens entstehen.

10.2 Versuchen

Abb. 10.1 zeigt die Ladung und Anordnung der Messgeräte.

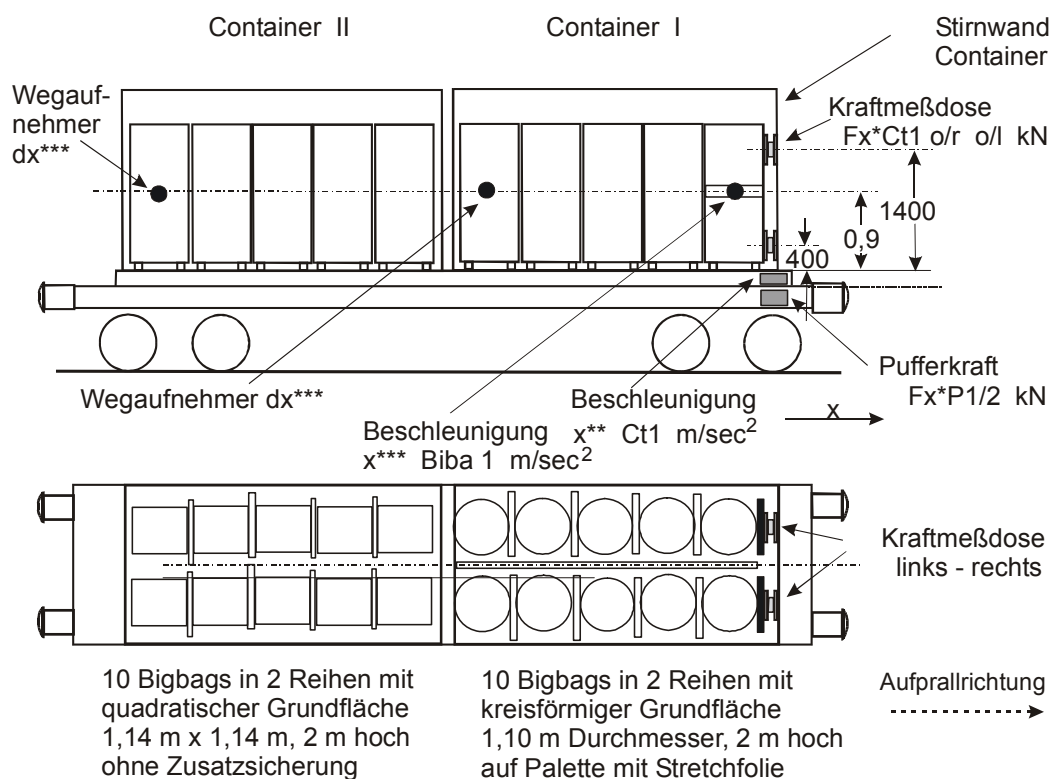


Abb. 10.1. Beladung und Meßsignale

Untersucht wurden „quadratische“ und „runde“ Bigbags mit 2 m Höhe und einer Masse von 1000 kg. Bei dem Aufprall machten die Bigbags nach hinten anwachsend eine starke, lineare Verschiebung nach vorn. Zwischen einer Versatz- und einer Verschiebung wurde bei Abschluß des Forschungsvorhabens noch nicht unterschieden.

Auch in der Zeit des Forschungsvorhabens [11] war bekannt, daß in der Aufprallphase eines Bigbags der Masseanteil aus der Ladung nicht konstant ist und deshalb mit Beschleunigungsaufnehmern nur unzureichend gemessen werden kann. Deshalb wurde auch auf Kraftmessdosen an der Stirnwand zurückgegriffen.

Abb. 10.2 zeigt die Lage der vier Kraftmessdosen der Stirnwand. Um die Kraftaufbau in der Versatzphase eines Bigbags ausmessen zu können, hätten in der Höhe weitere Kraftmesser vorgesehen werden müssen. Vorbild können hier die Anordnung von Kraftmessplatten für Crashversuche in der Automobilindustrie sein.

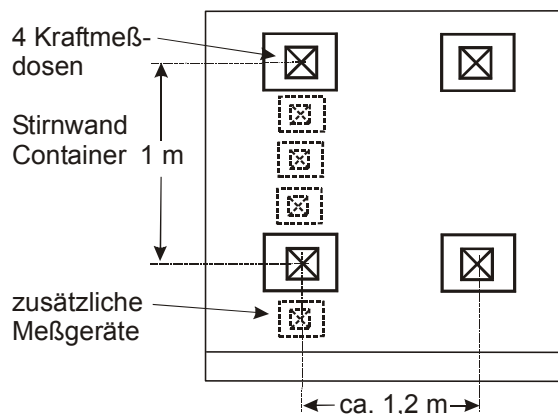


Abb. 10.2. Lage Kraftmeßdosen

In Übersicht 10.1 sind einige Daten zu den Versuchen zusammengestellt.

Übersicht 10.1. Versuchsdaten

Daten zum Versuch

Wagenmasse	17,2 Tonnen
2 Container leer	3,2 Tonnen
10 Bigbags je Container je 1 t	10 Tonnen
insgesamt	20 Tonnen
Gesamtmasse	40,4 Tonnen
Stoß 5 Aufprallgeschwindigkeit	8,7 km/h
Beschleunigung $x^{**}Ct 1$	6,7 m/sec ²
(16 Hz)	

Bei den europäischen Bahnen werden nach Versuchen zu Ende der 50er Jahre des 20. Jahrhunderts bei Messungen alle Frequenzen oberhalb von ca. 30 Herz abgefiltert. Um die Unterschiede der Kräfte, bzw. der Beschleunigungen aufzuzeigen, wurden in diesen Versuchen auch Werte mit 500 Hz-Filterung gemessen und dokumentiert. Bei der Deutschen Bahn wurde nach 1960 stets nur mit 16 Hz Filterung gemessen [12].

Die Abb. 10.2 bis 10.4 zeigen, daß zwei Anordnungen geprüft wurden, die offene – also mit Freiräumen – und die geschlossene Anordnung der Bigbag. Die Abb. 10.3 zeigt, daß es bei der offenen Anordnung (Variante 2) zu einem Kippen des Bigbags kam.

In Abb. 10.5 sind einige der Meßschriebe eingefügt.

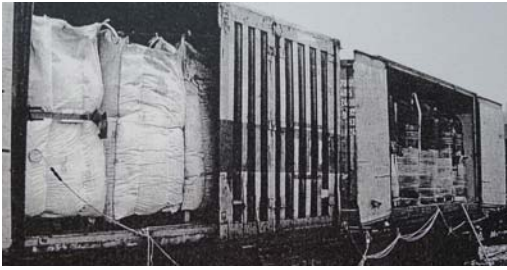


Abb. 10.2. Variante 1

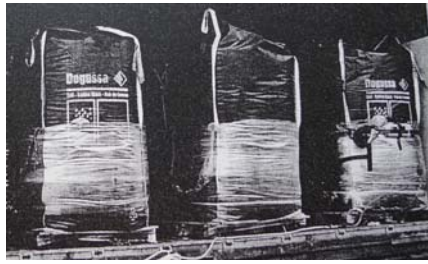


Abb. 10.3. Variante 2

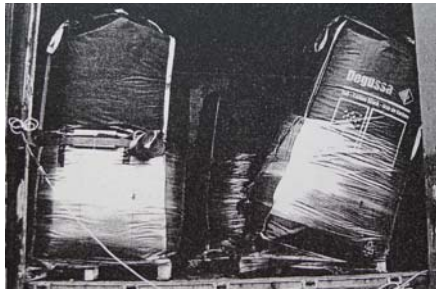


Abb. 10.4. Kippvorgang bei Variante 2

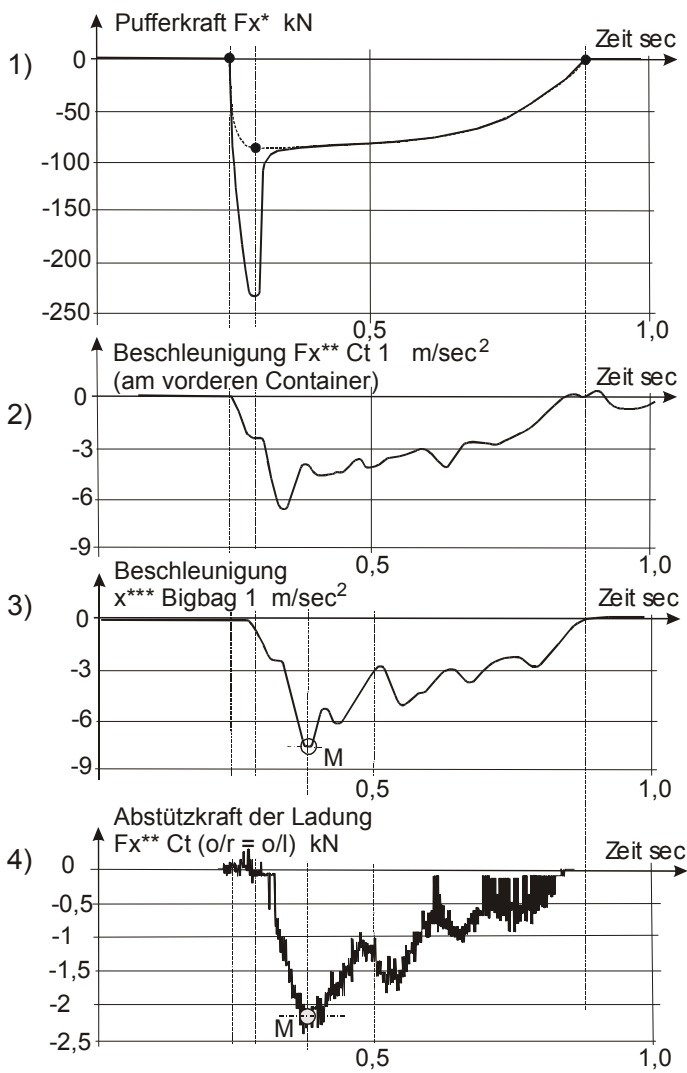


Abb. 10.5. Messschriebe Versuch 5

Die Übersicht 10.2 gibt die Maximalwerte der Messungen wieder.

Übersicht 10.2. Gemessene Werte

				Variante 1				Variante 2		
Versuch	Nr.:			3	4	5	6	7	8	9
v	[km/h]			4,9	7,2	8,7	11,2	9,0	11,0	8,9
Meßstellen			Tiefpaß-	Meßwerte						
Fx* P1	Pufferkräfte	[kN]	ungefiltert	-160	-210	-242	-269	-243	-268	-242
Fx* P2				-125	-176	-208	-247	-213	-236	-210
Fx**Ct o/r	Abstützkräfte der Ladung			-1,2	-1,8	-2,3	-3,6	-3,4	-4,3	-3,8
Fx**Ct u/r				0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	-1,1	-1,9
Fx**Ct o/l				-1,3	-1,9	-2,3	-3,6	-2,8	-3,9	-3,2
Fx**Ct u/l				-0,6	-0,8	-0,8	-1,2	-1,3	-1,9	-1,7
x*Wk	Beschleunigungen	[m/s ²]	500 Hz	-18,2	-34,1	-44,7	-88	-53,6	-90,9	-53,6
			16 Hz	-2,8	-4,6	-6,8	-9,8	-8,2	-9,7	-8,2
			32 Hz	-3,1	-5,1	-8,1	-10,8	-7,9	-11,1	-8,4
x**Ct 1			500 Hz	-6,6	-11,7	-19,4	-47,5	-15,5	27,5	-15,0
			16 Hz	-3,0	-4,6	-6,7	-13,1	-7,9	-8,4	-8,2
			32 Hz	-3,3	-5,2	-8,4	-19,4	-7,9	-10,6	-8,5
z**Ct 1			500 Hz	-8,3	18,0	-22,1	-54,6	28,7	36,5	-20,9
			16 Hz	2,1	1,6	2,1	3,7	-1,5	2,3	1,5
			32 Hz	3,6	2,9	5,4	7,1	2,8	3,9	3,4
x***Biba 1			500 Hz	-4,8	-6,6	-8,8	-12,1	-10,7	-11,9	-12,0
			16 Hz	-3,8	-5,6	-7,6	-10,7	-10,2	-10,9	-11,5
			32 Hz	-3,8	-5,5	-7,6	-11,0	-10,3	-11,0	-11,8
x**Ct 2	16 Hz	-3,2	-5,1	-8,2	-9,2	-7,7	-8,4	-7,9		
	32 Hz	-2,8	-4,5	-6,6	-10,4	-7,7	-10,1	-8,4		
x***Biba 2	16 Hz	-3,2	-5,1	-6,3	-9,5	-7,9	-10,1	-8,5		
dx***Biba 1	Relativwege	[mm]	ungefiltert	12,8	33,0	65,8	Ausfall			
dx***Biba 2			6,6	20,2	40,7					

Erklärung zur Bezeichnung der Meßstellen:

Fx* P1	Pufferkräfte	Seite 1
Fx* P2	Pufferkräfte	Seite 2
Fx**Ct o/r	Abstützkräfte der Ladung	oben/rechts
Fx**Ct u/r		unten/rechts
Fx**Ct o/l	Ladung	oben/links
Fx**Ct u/l		unten/links
x*Wk		am Wagenkasten
x**Ct 1		am vorderen Ct (Container)
z**Ct 1		am vorderen Ct
x***Biba 1	Beschleunigungen	am BigBag im vorderen Ct
x**Ct 2		am hinteren Ct
x***Biba 2		am BigBag im hinteren Ct
dx***Biba Ct1	Relativwege	am BigBag im vorderen Ct
dx***Biba Ct2		am BigBag im hinteren Ct

Aus der Vielzahl der aufgenommenen Kurven werden in Abb. 10.5 einige wiedergegeben. Sie zeigen, daß auf das Stoßereignis die Massen von Container und Bigbags zwar zeitverzögert, aber in etwa mit der gleichen Charakteristik folgen. Das Ende des Stoßereignisses war bei allen Signalen in etwa zum gleichen Zeitpunkt.

10.3 Feststellungen

10.3.1 Zu den Versuchen

Das Ziel der DB-Versuche war es, die Festigkeit von Stirnwänden von Güterwagen und die maximalen Stoßkräfte am Puffer beim Rangieren über einen Ablaufberg festzustellen. Grundsätzliche Fragen zum Bewegungsverhalten und zur Sicherung von Bigbags waren nicht Untersuchungsgegenstand.

10.3.2 Zusammenfassung der Ergebnisse des Bahnberichts

Die Zusammenfassung der Schlussberichts lautete:

„Mit zwei 20`-Container (beladen mit FIBC-Gebinden der Fa. Degussa) auf einem 4-achsigen Containertragwagen mit Stoßverzehreinrichtungen wurden Auflaufversuche bis zu einer Auflaufgeschwindigkeit von $v = 11,2 \text{ km/h}$ durchgeführt. Bei einer Tiefpassfilterung mit 16 Hz betrug hierbei die größte Beschleunigung am Ladegut $10,2 \text{ m/sec}^2$.

Bei einer flächenfüllenden Beladung der Container mit jeweils fünf FIBC in zwei Längsreihen (ohne Zwischenräume zwischen den Paletten) traten keine Beschädigungen an FIBC-Gebinden auf. Eine zusätzliche Ladungssicherung ist bei dieser Beladeart somit nicht erforderlich.

Bei einer weiteren Beladevariante mit vier FIBC-Gebinden in einer Längsreihe mit Zwischenräumen zwischen den Paletten wurde aufgrund der sehr großen Kippbewegung der Gebinde die Stretchfolie an den FIBC-Gebinden im Container 1 beschädigt. Bei einer Verladung mit Ladelücken kann daher auf eine zusätzliche Ladungssicherung nicht verzichtet werden.“

10.3.3 Verschiebbewegung bei Reihenschaltung

Die Abb. 10.4 zeigt eine Verschiebbewegung hintereinander stehender Bigbags. Auffällig ist, daß alle Bigbags in etwa die gleiche Schrägstellung haben, Abb. 10.6 und 10.7 (dazu auch Abb. 1.2).



Abb. 10.6. Schrägstellung mit Säcken

Inwieweit Weichladungen in Reihe „geschaltet“ sich immer parallel stellen und unter welchen Voraussetzungen, ist bisher nicht genauer untersucht worden, Abb. 10.7.

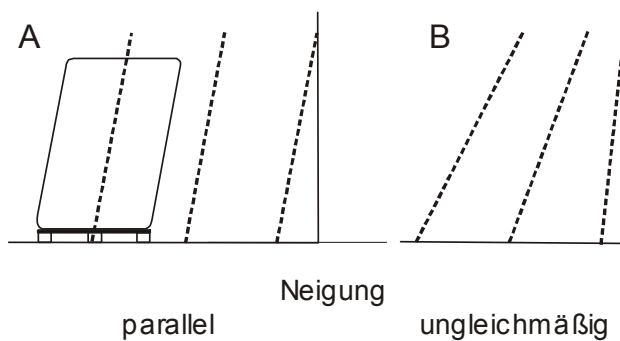


Abb. 10.7. Reihenschaltung

10.3.4 Masseanteil bei Aufprall in der Verschubphase

Die Messergebnisse der Übersicht 10.2 können aber auch noch weitere Aussagen ermöglichen. So wurde im Versuch 6 die maximale Aufprallkraft und die maximale Beschleunigung am Bigbag gemessen. Die Stoßspitze liegt in etwa zeitgleich und auch die Zeitdauer beider Messungen liegen nahe beieinander. Für den Maximalpunkt M, Abb. 10.5, ergibt sich aus der Newtonschen Gleichung die anteilige Masse bei diesem Aufprallereignis:

$$F_M = m_{bb} \cdot a_M \quad (\text{Gl. 10.1})$$

$$m_{bb} = \frac{F_M}{a_M} = \frac{3600 \text{ kg m sec}^{-2}}{10,7 \text{ m sec}^{-2}} = 336 \text{ kg}$$

Das bedeutet, daß beim Aufprall in der Verschubphase zu diesem Zeitpunkt nur ca. 1/3 der 1000 kg-Masse am Stoß beteiligt war.

Daraus lässt sich folgern, daß der Verschubaufprall unkritischer zu sehen ist, weil nur ein Teil der Masse wirksam wird.

Auch stellt sich die Frage, ob denn die in Reihen stehenden Bigbags, wenn sie denn eine Versatzbewegung machen, sich keine Kräfte von hinten stehenden auf den vorderen Bigbag übertragen.

Auch zu diesen Fragen sind Zusatzversuche nötig.

11 Nachwort

Die vorliegende Ausarbeitung befasst sich im 1. Teil mit fachkundlichen Fragen zur Ladungssicherung im Transport von Schüttgütern in Großsäcken. Während um 1990 die Beförderung in Großsäcken eine Randfrage war, ist sie im Jahre 2013 von großer Gewichtung.

Diese Ausarbeitung ist aus der Zuarbeit bei der Entwicklung des Blatt 18 der VDI 2700 entstanden. Einige der in Blatt 18 verwendeten Begriffe, die Einteilung nach Kategorien und Gruppen, sind ohne zusätzlichen Kommentar schwer zu verstehen. Daneben wird auf die Eigenschaften von Schüttgütern (Arten, Eigenschaften, . . .) eingegangen, soweit es für den Transport und die Sicherung wichtig ist. Von zentraler Bedeutung scheint die Kegelbildung beim Ausschütten von Schüttgütern (Rieselverhalten, . . .) und auch die Verdichtungsfähigkeit zu sein. Zu diesen Punkten wurden wichtige Erkenntnisse zusammengetragen.

Die Kegelbildung steht in Beziehung zu der Neigung eines mit einem Schüttgut befüllten Bigbags bei Einwirkung einer Horizontalkraft sich verschieben zu können. Diese Bewegung, die mit Vers Schub bezeichnet wird, ist ohne Kra fteinwirkung von außen irreversibel und ein „innerer Widerstand“. Sie ist die gravierendste Abweichung zu „steifen“ und „elastischen“ Ladungen. Sie hat zur Folge, daß ein Aufprall auf eine Seitenwand weniger „hart“ erfolgt als bei „steifen“ und „elastischen“ Ladungen.

Die Unterscheidung in Vers chub- und Vers atzbewegung ermöglicht es, zu unterscheiden zwischen äußerer und innerer Reibungsarbeit, also zwischen Aufstandsflächenarbeit aus Reibung beim Gleiten und der Reibungsarbeit im Schüttgut in Verbindung mit der Bigbagkonstruktion. Außerdem ist von Bedeutung, daß die innere Arbeit zeitlich vor dem Vers atz (oder dem Kippen) erfolgt.

Die Unterschiede zwischen diesen beiden Ladungen sollten im 2. Teil durch kleinere Untersuchungen, deduktive Ableitungen und Berechnungen verdeutlicht werden. Dabei wurde im besonderen Maße auf die Vorgehensweisen der sog. Unfallmechanik zurückgegriffen. Die Unfallmechanik, die seit Beginn der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts zur Untersuchung von Straßenverkehrsunfällen entwickelt wurde, bietet eine Reihe von Verfahren und Möglichkeiten an, bestimmte Abläufe bei Bremsvorgängen oder Kurvenfahrt zu berechnen. So wird u. a. das „Erweiterte Bremsdiagramm“ erstmals vorgestellt mit dem die Aufprallgeschwindigkeit einer gleitenden Masse berechnet werden kann, weil auch die Bewegung der Ladung in dem Bremsdiagramm mit erfasst wird.

Eine wichtige Frage ist der Aufprallablauf, da bei plastischen Ladungen die Masse beim Aufprall zeitabhängig ist. Hier liefern die zitierten „Bahnversuche“ wichtige Hinweise.

Sowohl mit den Anhebeversuchen, als auch mit den Recherchen zum Aufprallablauf und mit den gemessenen Kräften in den „Bahnversuchen“ erscheint die Aussage, die zunächst nur qualitativ gegeben werden kann, gerechtfertigt, daß der Aufprall einer Bigbagladung weniger kritisch ist als der einer starren Masse.

Die hier vorgelegten Untersuchungen und Berechnungsmöglichkeiten sollen neue Wege zur Rekonstruktion bei Aufprallschäden aufzeigen, müssten aber noch in breiten Maße durch weitere Untersuchungen abgesichert werden. Ob der Ansatz tragfähig ist und für welche

Bereiche und unter welchen Bedingungen er im Bigbagtransport Allgemeingütigkeit besitzt oder ob es Ausnahmen gibt, müsste noch umfassend untersucht werden.

Ziel dieser Studie sollte es sein, Sicherungsmaßnahmen für Schüttgüter und Umschließungen auf Grundlage von Daten und Berechnungswerkzeugen am Schreibtisch festlegen zu können, ohne jeweils kostspielige Untersuchungen vornehmen zu müssen.

12 Bilderverzeichnis

Abbildungen:

1.1/4.8	M. Lang, Polizeidirektion Schweinfurt, Mitglied KLSK
1.2/4.3/4.19/10.6	W. Neumann, EUROSAFE, 63 457 Hanau, Mitglied KLSK
2.19/6.2	C. Franz, 42 111 Wuppertal, Mitglied KLSK
4.5	W. Schlobohm, GWS, 27412 Kirchtimke, Mitglied KLSK
4.12/4.13/6.4/11.6	S. Ehringer, SE-LogCon, 86 943 Thaining, Mitglied KLSK
10.2/10.3/10.4	Bahnbericht [12]
Übersicht 10.2	

Alle anderen Abbildungen und Skizzen: Verfasser, Mitglied KLSK

13 **Verwendete Literatur**

- [1] Strauch, Winfried, Containerhandbuch, GDV, 2004,
- [2] Höfling, Oskar, Lehrbuch der Physik, Ferd. Dümmers Verlag Bonn, 1962
- [3] Kuchling, Horst, Taschenbuch der Physik, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1989, ISBN 3-8171-1020-0, 1991 Verlag Harri Deutsch, Frankfurt/Main
- [4] Versuche der Fa. Euro-Safe, 63 457 Hanau, 2011
- [5] Podzuweit, Ulrich, Forschungsvorhaben des deutschen Bundesverkehrsministeriums „Ladungssicherung von Gefahrgut“, FE Nr. 90380/9, 1994
- [6] Burg, Heinz, Rau, Hartmut, Handbuch der Verkehrsunfall-Rekonstruktion, Verlag Information Ambs GmbH, 1981, Seite 313
- [7] Speicherstadtmuseum, 20 457 Hamburg
- [8] Versuchsbericht „Hildesheim“ der KLSK-Tagung am, Internetseite KLSK
- [9] Podzuweit, Ulrich, Lemmer, Holger, Ladungssicherungstechnik, Schäden-Ursachen-Vermeidung, Verkehrsverlag Fischer, 40 215 Düsseldorf, ISBN 978 – 3 - 87841
- [10] Burckhardt, Manfred, Zur Theorie der "Bremstechnik", Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 5/79
- [11] Forschungsvorhaben des deutschen Bundesverkehrsministeriums „Ermittlung der Transportbeanspruchungen zur Optimierung der Ladungssicherung in Containern“, Teil Schienentransport, BMV FE Nr. A.24/16.49.00 – 96473/97 – K
- [12] Rothmann, Wessling, Auflaufversuche mit FIBC in Containern auf einem stoß-gedämpften Containertragwagen, Bericht Nr. 53 510 der Deutsche Bahn AG, Forschungs- und Technologiezentrum Minden vom 3.11.1998
- [13] Szabo, Istvan, Einführung in die Technische Mechanik, Springer-Verlag Heidelberg, 8. Auflage, 1984
- [14] Podzuweit, Ulrich, Ladungssicherung – Zur Festigkeit von Stirnwänden, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 12/2007
- [15] Goeddecke, Thomas, Systematische Ermittlung der Transportbeanspruchung zur Optimierung der Ladungssicherung im Container, Forschungsbericht der BAM – Projektnr. 3134 zum BMV-Forschungsvorhaben BMV-A.24/1649.00-96473/97-KA

Werte zu Abschnitt 6.5

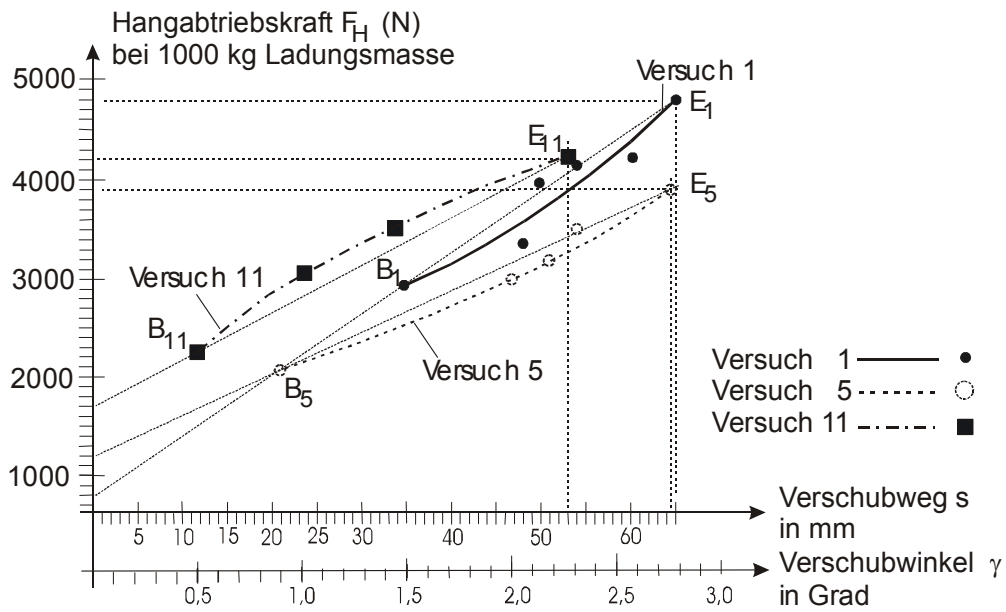


Abb. 14.1.1. Gemessene Kurven

Aus Abb. 14.1.1 gemessene Daten:

	F_{max} N	F_{min} N	ΔF N	Δs mm
V1	4800	800	4000	65
V5	3900	1200	2700	65
V11	4200	1700	2500	53

Deformationsrate

$$d_{Def} = \frac{\Delta F_H}{\Delta s}$$

	d_{Def}	
V1	61 538 N/m	Bigbag mit Innenfächer
V5	41 538 N/m	Rundgewebter Bigbag
V11	47 169 N/m	Eckenverstärkter Bigbag

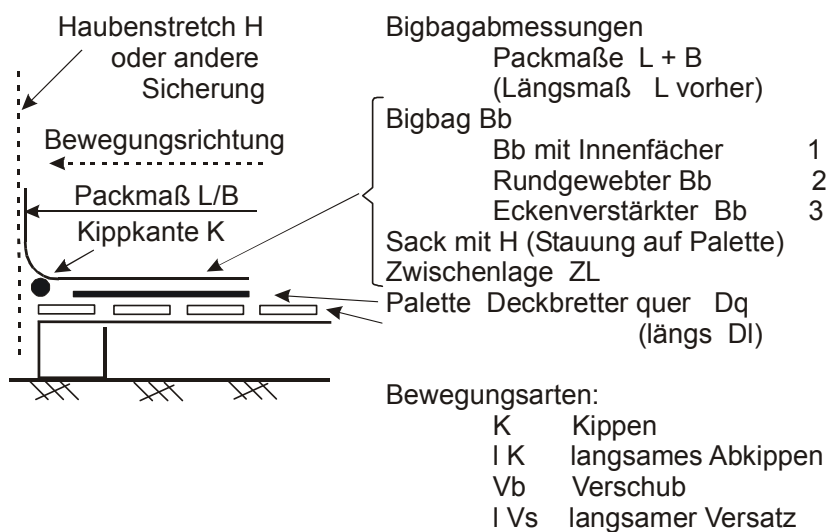
Deformationsenergie

$$E_{Def} = \frac{1}{2} d_{Def} \cdot s^2$$

	E_{Def}	
V1	130 Nm	Bigbag mit Innenfächer
V5	87,7 Nm	Rundgewebter Bigbag
V11	66,2 Nm	Eckenverstärkter Bigbag

Übersicht 14.1 zeigt die Versuchsparameter.

14.1. Versuchsvariablen



Die Übersicht 14.2 enthält eine Zusammenstellung der Versuche und die wichtigsten Ergebnisse.

Übersicht 14.2. Grenzwinkel im Versuch

Versuche	Versuchsnummer	Bigbag	Zwischenlage	Palette	Grenzwinkel Grad	nur-Vers Schub Vb	Kippen K Versatz Vs nach Verschub Vb
1	B 1	Papier	Dq	28,7	X		
2	B 1	Papier	DI	20,7		K	
3	B 1	---	DI	20,1		IVs	
4	B 1	---	Dq	23		IKI	
5	B 2	Papier	Dq	25		IVs	
6	B 2	---	Dq	23,3		K	
7	B 2	----	DI	21,5		IVs	
8	B 2	---	DI	22,9		K	
9	SK	---	Dq	18			
10	SH	---	DI	19,1	X		
11	B 3	Papier	Dq	25,8		IVs	
12	B 3	---	Dq	22,3		K	

Abkürzungen
 Dq Deckbretter quer zur Bb-Bewegung
 DI Deckbretter längs
 K Kippen
 IVs langsamer Versatz

