

Modul 2: Versandbelastungen

LERNZIELE:

- Klärung physikalischer Grundbegriffe.
- Vermittlung der Grundlagen für das Verständnis der physikalischen Zusammenhänge, welche im Zusammenhang mit Versandbelastungen von Bedeutung sind.
- Befähigung des Anwenders, mögliche Belastung zu erkennen und ein Verständnis für die Ursachen und Wirkungsweise von Kräften zu entwickeln.
- Überschlägige Berechnungen der wirkenden Kräfte.
- Realistische Einschätzung der Größenordnung der zu erwartenden Belastungen in Abhängigkeit vom Verkehrsträger.

Entstehung von Versandbelastungen

Der kombinierte Verkehr zeichnet sich dadurch aus, dass Waren und Ladegüter von einem Versandort zu einem Bestimmungsort unter Ausnutzung unterschiedlicher Verkehrsträger transportiert werden. Damit ein rationeller Übergang zwischen den Verkehrsträgern sowie ein problemloser Transport gewährleistet werden können, ist die Verwendung standardisierter Transportbehälter erforderlich. Für den Transport von Stückgütern haben sich Frachtcontainer unterschiedlicher Bauart etabliert.

Auf diese Container und die darin befindlichen Ladegüter wirken während des Transportes dynamische Kräfte, die durch das Verkehrsverhalten der unterschiedlichen Verkehrsträger hervorgerufen werden und zu charakteristischen Versandbelastungen führen.

Beim kombinierten Verkehr sind Container und Ladung auf jedem Transportabschnitt Belastungen unterschiedlicher Intensität ausgesetzt. Um diejenigen Versandbelastungen abfangen zu können, die kritisch für die Sicherheit von Ladung und Umwelt werden könnten, sind bei der Auslegung der Ladungssicherung die einzelnen Versandabschnitte mit den jeweils höchstmöglichen Belastungen zu berücksichtigen.

Dynamische Belastungen während des Transportes durch charakteristische Bewegungen werden in Vielfachen der Erdbeschleunigung g ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$; auch Fallbeschleunigung) angegeben.

Im Folgenden sind neben den horizontalen Beschleunigungen auch vertikale Werte angegeben. Diese Werte werden bei den Berechnungen jedoch nicht beachtet. Experten weisen aber darauf hin, dass die vertikalen Beschleunigungen vorhanden sind und in extremen Situationen großen Einfluss haben können.

Straßentransport

Im Straßentransport werden die höchsten Belastungen durch scharfe Brems- und Ausweichmanöver (bzw. Kurvenfahrten) sowie durch Straßenunebenheiten hervorgerufen. In der Literatur sind unterschiedliche Angaben über die Höhe der maximal zu erwartenden Belastung zu finden (siehe Anhang). Verwendung finden folgende Werte. Beschleunigungen beim LKW-Transport liegen bei 0,8 g [C] in horizontaler Längsrichtung, bei 0,5 g [C] in horizontaler Querrichtung und 1,0 g [C] in vertikaler Richtung nach unten.

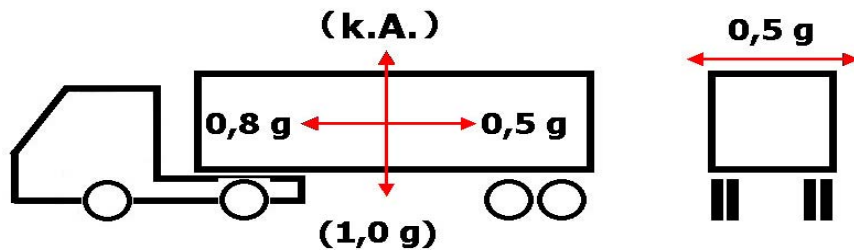


Abbildung 2 Beschleunigungen beim ausschließlichen Straßentransport

Schienentransport

Während des Schienentransportes können erhebliche Belastungen durch Vibrationen, Stöße und ruckartige Richtungsänderungen während der Fahrt über Schienenschwellen und Weichen auftreten. Beim Rangieren auf Bahnhöfen entstehen Rangierstöße als charakteristische Belastung des Schienentransportes. Zum Zusammenstellen von Zügen werden die Waggonen über einen „Ablaufberg“ abgerollt. Hierbei werden beim Zusammenkuppeln mit normalen Puffern Beschleunigungen in horizontaler Längsrichtung von bis zu 4,0 g [L] verwendet. Beim Einsatz von Langhubstoßdämpfern wird die Stoßenergie auf einen längeren Zeitraum verteilt. Hier wird mit Belastungen von bis zu 1,0 g [L] gerechnet werden. Für den kombinierten Ladungsverkehr werden geringere Belastungswerte zugesichert. Diese Werte betragen für alle Formen des kombinierten Ladungsverkehrs sowie für den Fahrbetrieb 1,0 g [L] in horizontaler Längsrichtung, 0,5 g [L] in horizontaler Querrichtung und etwa 0,3 g [L] in vertikaler Richtung nach oben.

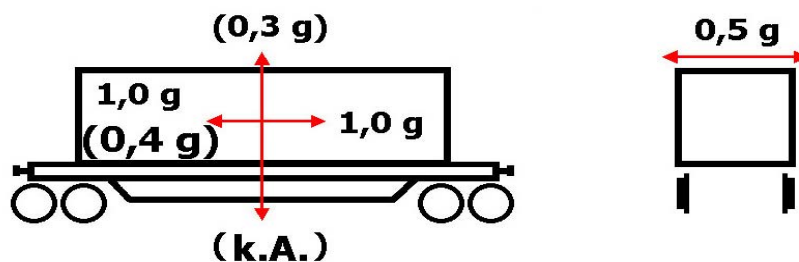


Abbildung 3 Beschleunigungen beim Containertransport auf der Schiene

Seetransport

Beim Seetransport sind die Belastungsmöglichkeiten noch vielfältiger und unberechenbarer als beim Straßen- oder Schienenverkehr. Ein Schiff kann sich im Gegensatz zur Bahn und zum LKW auch horizontal seitwärts bewegen, d.h. es kann „schwören“. Eine horizontale Bewegung in Längsrichtung wird als „wogen“ bezeichnet und die Längsbewegung entlang der vertikalen Achse wird „tauchen“ genannt.

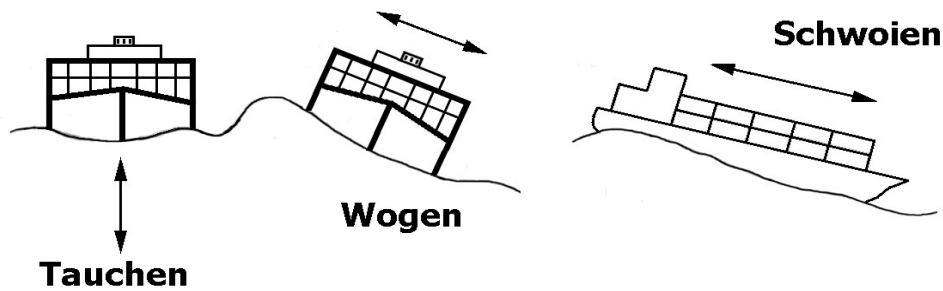


Abbildung 4 Bewegungsmöglichkeiten eines Schiffs 1

Ein Schiff kann aber nicht nur Längsbewegungen entlang der drei Raumachsen vollführen, sondern es führt auch Drehbewegungen um jeden Achse aus. Das Drehen um die Längsachse wird dabei als „rollen“ bezeichnet, das Drehen um die Querachse als „stampfen“ und das Drehen um die Hochachse als „gieren“.

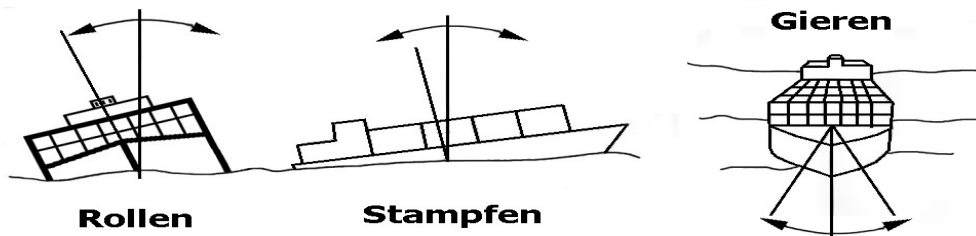


Abbildung 5 Bewegungsmöglichkeiten eines Schiffs 2

Für die Belastungen im Container sind Roll- und Stampfbewegungen am wichtigsten. Bei Schiffen mit hohem Wiederaufrichtvermögen liegen die Rollperioden bei 10 s und darunter. Dabei können Rollwinkel von 30° (im Extremfall bis 40°) erreicht werden. Für die Container und die darin befindliche Ladung bedeutet dies, dass die Ladung im 10 Sekunden-Takt von der linken auf die rechte Seite und wieder auf die linke Seite verschoben würde, wenn keine ausreichende Sicherung vorhanden wäre.

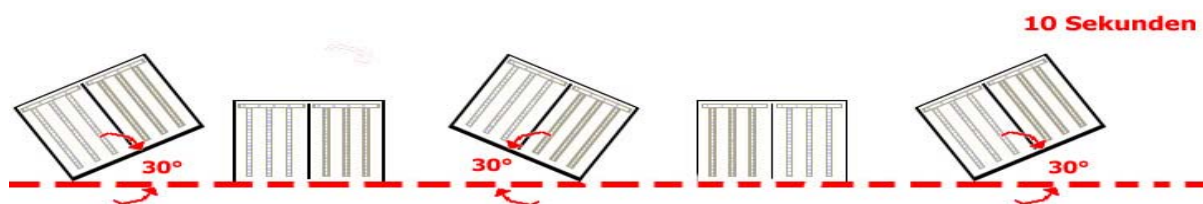


Abbildung 6 Bewegungsvorgang eines Containers beim Rollen eines Schiffs

Dieser Vorgang wiederholt sich in jeder Stunde 360 mal (pro Fahrttag also rund 8600 mal!)

Bei Stampfbewegungen werden Winkel von 5°-8° erreicht, wobei diese Winkel geringer sind, je länger ein Schiff ist, so dass sie bei großen Containerschiffen idR unter 5° liegen. Für den Container gilt, dass die Belastung um so höher ist, je weiter der Container von der Stampfachse entfernt gestaut ist. Ein Container, der in 140 m Entfernung von der Stampfachse gestaut ist, legt bei einem minimalen Stampfwinkel von nur 1° in jeder Stampfperiode von der Ausgangslage 2,4 m nach unten, anschließend 4,8 m nach oben und dann wieder 2,4 m nach unten in die Ausgangslage zurück.

Insgesamt werden schon bei diesem Stampfwinkel also fast 10 Höhenmeter pro Stampfperiode zurückgelegt. Bei einem Stampfwinkel von 3° wird dieser Container in jeder Stampfperiode gut 29 m nach oben und nach unten bewegt und bei einem Stampfwinkel von 5° erhöht sich dieser Wert auf fast 49 m!

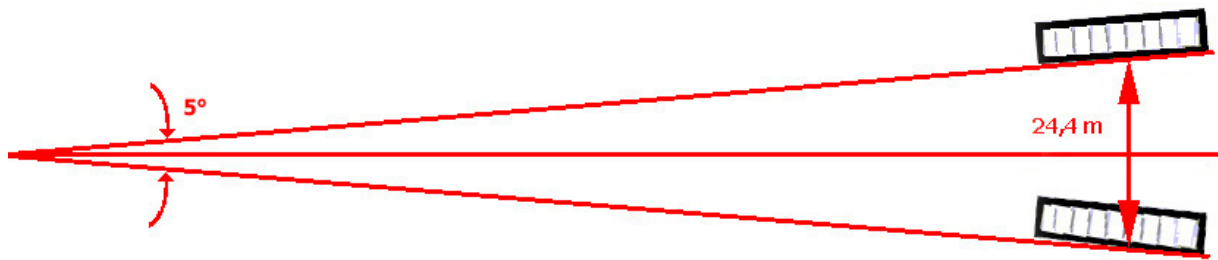


Abbildung 7 Bewegungsvorgang eines Containers beim Stampfen eines Schiffs

Belastungen während des Seetransportes sind also abhängig von der Größe des Schiffes sowie von dem Stauplatz der Container. Daneben spielen der Beladezustand und natürlich die Wetterbedingungen eine große Rolle. Der Verlader kann keine dieser Randbedingungen beeinflussen, daher muss von der ungünstigsten Annahme ausgegangen werden. Man sollte sich immer vor Augen halten, dass der Container während des Seetransportes nicht mehr zugänglich ist und Ladungssicherungsmaßnahmen daher auch nicht mehr nachgebessert werden können. Außerdem treten Belastungen wesentlich häufiger auf als bei anderen Verkehrsträgern.

Neben den oben beschriebenen Belastungen treten noch Vibrationen durch Maschinen- und Schiffsschrauben sowie Stöße durch „Wellenschlag“, d.h. durch das harte Einsetzen des Schiffes in die See, auf. Da die Belastung beim Seetransport wegen der vielen variierenden Randbedingungen weniger genau vorhersehbar sind als bei anderen Transportarten, sollte gerade bei der Beladung und Sicherung von Containern für den Seetransport immer von den ungünstigsten Voraussetzungen ausgegangen werden. Beim Transport wird mit Werten für die Beschleunigungen in den einzelnen Richtungen gerechnet, die in der folgenden Abbildung zu sehen sind:

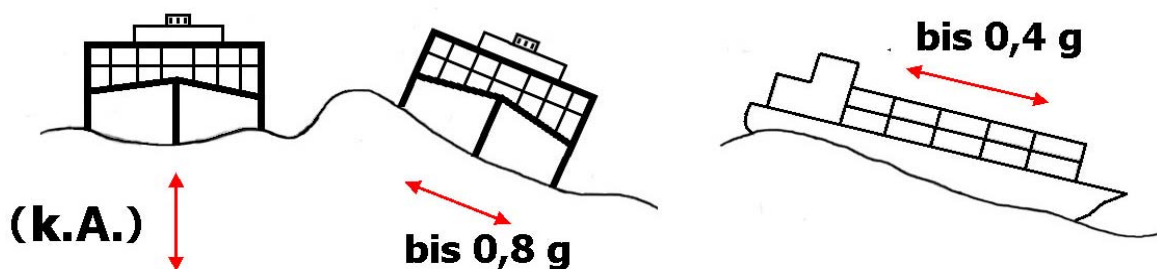


Abbildung 8 Beschleunigungen im Seeverkehr [A]

Die Anhaltswerte für die Beschleunigungen sind zwar in Richtung der Raumachse angegeben, sie werden aber nicht etwa durch die entsprechenden Längsbewegungen des Schiffes entlang dieser Achsen verursacht, sondern sind in erster Linie auf Rollen und Stampfen zurückzuführen.

Umschlag

Eine besondere Rolle kommt dem Containerumschlag im kombinierten Verkehr zu. Durch die Umsetzvorgänge der Container wird ein Transport mit unterschiedlichen Verkehrsträgern erst möglich gemacht. Zu Umschlagszwecken werden die Container mit Containerbrücken und Van-Carriern aufgenommen und verfahren. Beim Absetzen der Container auf dem Kaigelände oder im Schiffsrumpf treten Absetzstöße in vertikaler Richtung und beim Einfädeln in das Gestänge der Beladeschächte treten Stoßbelastungen in vertikaler und horizontaler Richtung auf. Weiterhin werden Container während des Aufnehmens mit der Brücke in vertikaler und horizontaler Richtung beschleunigt.

Abschließend soll betont werden, dass sämtliche Belastungen, die auf den Container wirken, in gleicher Weise auch auf das Ladegut wirken.

Zusammenfassung der Beschleunigungswerte

Zusammenfassend sind in der folgenden Tabelle noch einmal Anhaltswerte für maximale Belastungen dargestellt, die bei den einzelnen Versandabschnitten zu erwarten sind:

Transportmittel	Horizontale Beschleunigung			Vertikale Beschleunigung	
	In Fahrtrichtung	Entgegen der Fahrtrichtung	Quer zur Fahrtrichtung	Nach oben	Nach unten
Straßenfahrzeuge (LKW)	0,8 g	0,5 g	0,5 g	k.A.	1,0 g
Schienenfahrzeuge ¹	4,0 g	1,0 g	0,5 g	0,3 g	k.A.
Schienenfahrzeuge ²	1,0 g	1,0 g	0,5 g	0,3 g	k.A.
Seeschiff	0,4 g	0,4 g	0,8 g	k.A.	k.A.

Tabelle 1 Maximale Beschleunigung bei den einzelnen Verkehrsträgern

Vor der Beladung sollte bekannt sein, mit welchen Verkehrsträgern der Transport durchgeführt wird. Wenn dies nicht bekannt ist, muss die Ladung so gesichert sein, dass ein gefahrloser Transport mit allen Verkehrsträgern möglich ist.

¹ Einzelwagen und Wagengruppen bei normaler Rangierbehandlung

² - Wagen ohne Abstoßen und Ablaufenlassen in geschlossenen Zügen

- Wagen im kombinierten Ladungsverkehr mit Großcontainern, Wechselbehältern, Sattelanhängern und Lastkraftwagen und gegebenenfalls mit Anhängern

- Wagen mit Langhubstoßdämpfern

Transport- und Umschlag-Belastungen beim Containerversand

Transport- und Umschlag-Belastungen (TU-Belastungen) sind ursächlich für Schäden an Ladegütern.

Man unterscheidet generell 3 Arten von Belastungen:

1. Mechanische Belastungen
2. Klimatische Belastungen
3. Biotische Belastungen (biotisch = lebenden Ursprungs)

Für die Ladungssicherung im Container sind die mechanischen und klimatischen Belastungen relevant.

Mechanische Belastungen

Mechanische Belastungen unterscheidet man in:

- Statische Belastungen
- Dynamische Belastungen

Statische Belastungen sind beim Containertransport Stapelstauchbelastungen der Ladegüter beim Übereinanderstapeln und für den Container Druckbelastungen auf den Containerboden. Statische Belastungen wirken nur im Zustand der Ruhe, d.h. bei Standzeiten der Container. Statische Belastungen werden bei Transport- und Umschlag-Belastungen durch dynamische Komponenten überlagert.

Dynamische Belastungen sind ursächlich für das Rutschen von Ladegütern und Veränderung der Druckbelastungen. Die Ursache für Schäden an Ladegütern sind Bewegungen dieser Ladegüter innerhalb des Containers. Ladungssicherung ist eine Maßnahme, um diese Bewegungen zu verhindern.

Dynamische Belastungen werden im mehrfachen der Erdbeschleunigung angegeben. Die Erdbeschleunigung beträgt $9,81 \text{ m/s}^2 = 1 \text{ g}$.

Bei Transport- und Umschlag-Prozessen treten ebenfalls Geschwindigkeitsänderungen pro Zeit (also Beschleunigungen) auf.

LKW = Anfahren, Abbremsen, Kurvenfahrt

Bahn = Rangieren, Anfahren, Abbremsen, Kurvenfahrt

Schiff = Rollen, Stampfen, Gieren

Umschlag = Absetzen, Abbremsen, Anheben

Aus diesen Geschwindigkeitsänderungen resultieren Beschleunigungskräfte die auf den Container und die Ladegüter im Container einwirken. Die Beschleunigungskräfte wirken dann horizontal und/oder vertikal.

Nach neuen Messungen im Rahmen eines Forschungsvorhabens der BAM ergeben sich Eckwerte von Beschleunigungsbelastungen, für die beim kombinierten Containertransport in Frage kommenden Transportmittel, die die Angaben von Beschleunigungen für diese Transportmittel in einschlägigen Richtlinien/Empfehlungen, wie die VDI-Richtlinie 2700 [C] oder die CTU-Packrichtlinien [A], gut abdecken.

Richtung	g	m/s ²
In/entgegen Fahrtrichtung	1,0	9,81
Quer zur Fahrtrichtung	0,8	7,8
Vertikal nach oben/unten	0,8/1,8	7,8/17,66

Tabelle 2 Beschleunigungen beim kombinierten Containertransport

Klimatische Belastungen

Klimatische Belastungen im Container sind Temperatur- und Feuchtigkeitsbelastungen.

Klimatische Belastungen können einen Einfluss auf die Festigkeit von Ladungssicherungsmaßnahmen im Container haben.

Container sind geschlossene Transportgefäße. Ein Anspruch des Verladers an einen Container ist:

- Der Container muss regen- und seewasserdicht sein.

Diese Anforderung gilt für alle geschlossenen und unbelüfteten Standardcontainer. Im Umkehrschluss bedeutet diese Anforderung, dass Feuchte, die mit den hygroskopischen (wasseranziehenden) Packstoffen und mit dem Ladungssicherungsmaterial (Holz) in den Container eingepackt wird, während der gesamten Transport- und Lagezeit im Container wirken kann. Die Temperaturschwankungen hervorgerufen durch Tag-Nacht-Wechsel oder beim Durchfahren von Klimazonen führen zu Veränderungen der Materialfeuchten hygroskopischer Ladungssicherungsmittel und damit zu Änderungen von Abmessungen und Festigkeiten.

Biotische Belastungen

Biotische Belastungen sind für die eigentliche Ladungssicherung eher unbedeutend. Für die Auswahl und Qualität von Ladungssicherungsmaterialien aus Holz auch in Verbindung mit Temperaturen und Materialfeuchten sowie Einfuhrbeschränkungen verschiedener Staaten können Probleme entstehen.

Kritische Versandbelastungen und Bewegung

Von kritischer Versandbelastung kann gesprochen werden, wenn aufgrund der oben beschriebenen Belastungen während des Versandprozesses Kräfte wirken, die zu unkontrollierten Bewegungen des Ladegutes und in der Folge zu einer Beschädigung des Ladegutes oder zu einer Gefährdung für Mensch und Umwelt führen.

Daher spielt die Bewegungsmöglichkeit des Ladegutes im Versandprozess eine entscheidende Rolle. Die Bewegung wird dabei immer auf das direkte Umgebungssystem des Ladegutes bezogen.

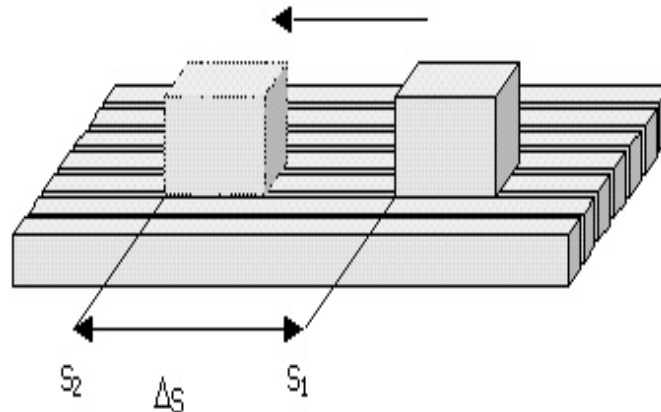


Abbildung 9 Bewegung eines Körpers

Im Fall des Containertransportes bedeutet das: Um die Auswirkungen von Versandbelastungen auf ein Ladegut zu erfassen, ist die Bewegung des Ladegutes relativ zum Container entscheidend und nicht etwa die Bewegung des Versandmittels, welches den Container transportiert. Eine Beschädigung des Ladegutes bzw. eine Gefährdung von Mensch und Umwelt kann von den Kräften ausgehen, welche wirken, wenn die Bewegung des Ladegutes abrupt zum Stillstand gebracht wird.

Anders ausgedrückt: Eine Beschädigung von Ladegütern aufgrund von Versandbelastungen entsteht durch Stoßkontakt mit der Containerwand bzw. dem Containerboden oder mit anderen Ladeeinheiten. Diese Stoßvorgänge können nur auftreten, wenn dem Ladegut genügend Bewegungsspielraum zur Verfügung steht.

DER BEWEGUNGSSPIELRAUM DES LADEGUTES MUSS GERING GEHALTEN WERDEN.

Insbesondere im Straßenverkehr ist außerdem zu berücksichtigen, dass die unkontrollierte Bewegung des Ladegutes zu einer gefährlichen Verlagerung des Schwerpunktes im Container und damit zu einer kritischen Beeinträchtigung der Fahrstabilität führen kann.

Geschwindigkeit und Beschleunigung

Geschwindigkeit

Die Durchschnittsgeschwindigkeit v beschreibt den Weg s (in Meter), der in einer bestimmten Zeit (t in Sekunden) zurückgelegt wird.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} [m / s]$$

Gleichung 1

Für die Umrechnung von km/h in m/s ist die Geschwindigkeit durch den Faktor 3,6 zu dividieren. Ein Fahrzeug, welches sich konstant mit 50 km/h fortbewegt, legt also

$$v = \frac{50}{3,6} = 13,9 [m / s]$$

Gleichung 2

zurück.

Beschleunigung

Eine Beschleunigung bewirkt eine Veränderung der Geschwindigkeit in einem bestimmten Zeitraum.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} [m / s^2]$$

Gleichung 3

Wenn das Fahrzeug in 5 Sekunden gleichmäßig von 0 auf 13,9 m/s (also 50 km/h) beschleunigt, so tritt eine Beschleunigung von

$$a = \frac{13,9}{5} = 2,8 [m / s^2]$$

Gleichung 4

auf.

Würde das Fahrzeug 10 Sekunden lang mit 2,8 m/s² beschleunigen, dann wäre es am Ende mit 100 km/h natürlich doppelt so schnell.

In Bezug auf die Ladungssicherung heißt das: Je größer der Weg ist, den ein beschleunigtes Ladegut zurücklegt, desto größer ist die Geschwindigkeit des Ladegutes am Ende dieses Weges. Auch hier zeigt sich, dass der Bewegungsspielraum des Ladegutes gering gehalten werden sollte!

Änderungen der Geschwindigkeit sind natürlich auch in die anderen Richtungen möglich und spielen hier oft eine viel wichtigeren Rolle. Wenn das obige Fahrzeug in 5 Sekunden von 50 km/h auf 0 km/h abbremst, wirkt ebenfalls die Beschleunigung von 2,8 m/s². Wenn Ladegüter, die in Bewegung geraten sind, abgebremst werden, dann geschieht dies meist etwas unsanfter (z. B. durch die Containerwand) und in wesentlich kürzerer Zeit. Wird ein Körper aus der gleichen Geschwindigkeit (50 km/h) nicht in 5 Sekunden, sondern innerhalb von nur 0,1 Sekunden zum Stillstand gebracht, so wirkt eine Beschleunigung, die um den

Faktor 50 höher ist ($138 \text{ m/s}^2 \approx 14 \text{ g}$) als die $2,8 \text{ m/s}^2$ aus dem Beispiel und die erhebliche Schäden hervorgerufen kann.

Querbeschleunigung

Beschleunigungen können nicht nur in Längsrichtung, sondern auch in Querrichtung an Körpern wirken. Obwohl jeder die Wirkung von Querbeschleunigung schon im täglichen Leben erfahren hat (beispielsweise in Fahrgeschäften auf Jahrmärkten), ist die Vorstellung davon, wie Querbeschleunigungen zustande kommen, etwas abstrakter, als bei Beschleunigungen in Längsrichtung. Sie ist aber hilfreich für das Verständnis von Ladungssicherung.

Querbeschleunigungen entstehen bei der Kreisbewegung von Körpern, also etwa auch bei Kurvenfahrten von Fahrzeugen. Wenn sich ein Körper auf einer Kreisbahn bewegt (man stelle sich eine an einem Seil befestigte Kugel auf einer sich drehenden Scheibe vor), so wird dieser Körper konstant zum Kreismittelpunkt hin beschleunigt. Diese Beschleunigung wird durch eine Kraft erzeugt, die in Richtung Kreismittelpunkt wirkt (im Beispiel der Kugel übt das befestigte Seil die Kraft aus). Von dem Moment an, von dem keine Beschleunigung zum Kreismittelpunkt hin stattfinden würde, würde sich die Kugel geradeaus bewegen und die Kugel wäre zum Zeitpunkt t_2 nicht mehr auf der Kreisbahn, sondern in Punkt P_1 (dies geschieht, wenn etwa ein Hammerwerfer sein Wurfgeschoss loslässt). Da dies nicht geschehen ist, ist die Kugel in der Zeit zwischen t_1 und t_2 von P_1 nach P_2 beschleunigt worden. Die Beschleunigung, die dieses Verhalten bewirkt, wird Zentripetalbeschleunigung genannt. Sie stellt keine Änderung des Geschwindigkeitsbetrages, sondern eine Änderung der Richtung der Geschwindigkeit dar.

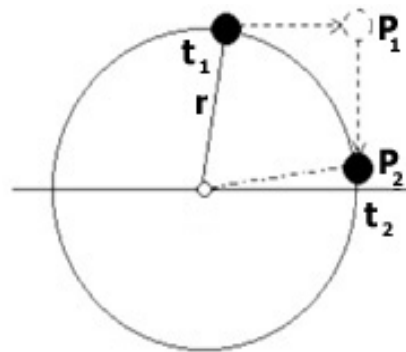


Abbildung 10 Kreisbewegungen

Die Zentripetalbeschleunigung a_{quer} ist von der Geschwindigkeit v und dem Kurvenradius (r ; in dem Beispiel entspricht r der Länge des Seils) abhängig und berechnet sich nach der Formel

$$a_{\text{quer}} = \frac{v^2}{r} [m / s^2]$$

Gleichung 5

Auch bei der Kreisbewegung wirken Beschleunigungen in zwei Richtungen. Die der Zentripetalbeschleunigung entgegengesetzt wirkende Beschleunigung, die das Bestreben hat die Kugel nach außen zu drücken, wird Zentrifugalbeschleunigung genannt. Damit ein Körper auf einer Kreisbahn bleibt, muss also eine nach innen gerichtete Beschleunigung (die Zentripetalbeschleunigung) wirken, die ebenso groß sein muss, wie die nach außen gerichtete Beschleunigung (Zentrifugalbeschleunigung).

Das gleiche gilt natürlich auch für Fahrzeuge, die eine Kurve durchfahren oder für Ladeeinheiten, die auf einem solchen Fahrzeug transportiert werden. Hier ist es die Aufgabe der Ladungssicherung dafür zu sorgen, dass Zentripetalkräfte (zum Beispiel in Form von Reibkräften) wirken, die stark genug sind, um ein Verrutschen der Ladeeinheit bei Querbeschleunigung zu verhindern.

Wenn ein Fahrzeug beispielsweise eine Kurve mit einem Radius von 30 m mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit von 33 km/h durchfährt, dann kann die Beschleunigung wie folgt berechnet werden:

Die Geschwindigkeit von 33 km/h entspricht:

$$v = \frac{33}{3,6} = 9,17 \text{ [m / s]}$$

Gleichung 6

Damit wirkt eine Querbeschleunigung

$$a_{\text{quer}} = \frac{9,17^2}{30} = 2,8 \text{ [m / s}^2\text{]}$$

Gleichung 7

Dies ist der gleiche Beschleunigungswert wie bei der Beschleunigung in Längsrichtung aus dem vorigen Beispiel, wenn das Fahrzeug in 5 Sekunden von 0 auf 50 km/h beschleunigt.

In Abhängigkeit der Wirkrichtung der Beschleunigung zur Fahrtrichtung wird also zwischen Längsbeschleunigung und Querbeschleunigung unterschieden, außerdem treten Beschleunigungen (bei Stößen) auch in vertikaler Richtung auf. Zusammen mit der Masse lassen sich aus den Beschleunigungen die Kräfte berechnen, die am Ladegut angreifen.

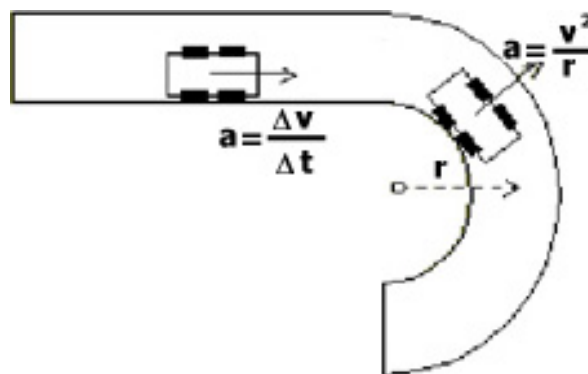


Abbildung 11 Beschleunigungen bei der Kurvenfahrt

Massen, Kräfte und Momente

Beschleunigungen werden von Kräften verursacht. Damit diese Kräfte an Körpern wirken können, müssen Massen vorhanden sein, an denen die Kräfte angreifen können. Als träge Masse wird die Eigenschaft von Körpern bezeichnet, sich einer Beschleunigung zu widersetzen.

Das Prinzip von Körpern, ihren Bewegungszustand beizubehalten, wird als Trägheitsprinzip bezeichnet und wurde von Sir Isaac Newton (1643-1727) in seinem ersten Newtonschen Axiom wie folgt formuliert:

„Ein Körper bleibt in Ruhe oder bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit weiter, wenn keine resultierende äußere Kraft auf ihn wirkt.“

Die Trägheit von Körpern ist die Ursache für die Notwendigkeit Ladungen zu sichern. Wenn sich beispielsweise ein Container mit Ladegut mit konstanter Geschwindigkeit fortbewegt und der Container abrupt abgebremst wird, so würde ohne träge Masse auch das Ladegut sofort zum Stillstand kommen. Aufgrund seiner Trägheit hat das Ladegut aber das Bestreben seine Bewegungsrichtung (die Vorwärtsbewegung) beizubehalten und es kommt zu einer Verschiebung in Fahrtrichtung. Die Vorwärtsbewegung wird lediglich gestoppt, weil der Trägheitskraft andere Kräfte entgegenwirken.

Massenträgheitskraft

Ein Körper mit einer trägen Masse ändert seine Geschwindigkeit also nur, wenn eine Kraft angreift. Daher bezeichnet man das Produkt aus Masse und Beschleunigung als Massenträgheitskraft

$$F_a = m \cdot a [N]$$

Gleichung 8

Die Kraft F_a ist diejenige Kraft, welche die träge Masse m mit der Beschleunigung a beschleunigt. Die Einheit der Kraft (kg m/s^2) fasst man zu der Bezeichnung Newton (N) zusammen. Die Erkenntnis, dass sich die Beschleunigung einer Masse in dem Verhältnis ändert, in dem sich die resultierende Kraft ändert, wird auch als zweites Newtonsches Axiom bezeichnet. Die Einheit 1 Newton entspricht daher jener Kraft, die benötigt wird, um die Masse 1 kg auf 1 m/s^2 zu beschleunigen. Im Bereich der Ladungssicherung wird oft vereinfacht mit der Einheit Dekanewton (daN; deka (griech.) = zehn) gearbeitet, wenn auf die Gewichtskraft Bezug genommen wird.

Die obige Definition der Kraft ist allgemein gültig. Auch die Querbeschleunigungskraft F_{aq} lässt sich aus dem Produkt von Masse und Beschleunigung bestimmen. Hier ist lediglich die Querbeschleunigung einzusetzen:

$$F_{aq} = m \cdot \frac{v^2}{r} [N]$$

Gleichung 9

Während des Versandprozesses wirken unterschiedliche Kräfte auf Ladegüter ein, deren Ursache die bereits besprochenen Versandbelastungen sind. Die wirksamen Kräfte unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Wirkungsrichtung und Intensität.

Wenn sich entgegengesetzt wirkende Kräfte gegenseitig aufheben, bleibt das Ladegut im Ruhezustand. Sofern sich entgegengesetzt wirkende Kräfte nicht gegenseitig aufheben, wirkt auf das Ladegut eine resultierende Kraft ein, welche eine Beschleunigung hervorruft. Wenn

das Ladegut beschleunigt wird, ändert sich die Geschwindigkeit des Ladegutes vom Stillstand im Container auf einen beliebigen Wert. Das Ladegut gerät in Bewegung.

DAMIT SICH EIN LADEGUT IN BEWEGUNG SETZEN KANN, MUSS EINE RESULTIERENDE KRAFT WIRKEN.

Diese aus den Newtonschen Axiomen folgenden Erkenntnisse sind auch für die Ladungssicherung von entscheidender Bedeutung, denn sie besagen im Umkehrschluss, dass die Bewegung des Ladegutes verhindert werden kann, wenn Kräfte aufgebracht werden, die den im Versandprozess angreifenden Kräften entgegenwirken. Nach ihrer Wirkungsweise können daher Beschleunigungskräfte und Ladungssicherungskräfte unterschieden werden. Beschleunigungskräfte haben das Bestreben, das Ladegut in Bewegung zu setzen, während Ladungssicherungskräfte dazu beitragen, eine Bewegung zu verhindern.

Gewichtskraft

Die in vertikaler Richtung wirkende Beschleunigungskraft wird Gewichtskraft (F_G) genannt und beschreibt die Kraft, die dadurch entsteht, dass jede Masse zum Mittelpunkt der Erde hin beschleunigt wird. Sie ist senkrecht zum Erdmittelpunkt gerichtet. Dabei wirkt die sog. Erdbeschleunigung g mit $9,81 \text{ m/s}^2$.

$$F_G = m \cdot g \text{ [N]}$$

Gleichung 10

Die in Gleichung 10 angegebene Masse ist charakteristisch für die Schwere des Körpers und wird daher als „schwere“ Masse bezeichnet.

Im Zusammenhang mit Versandbelastungen spielt die Erdbeschleunigung g eine wichtige Rolle. Um eine Vorstellung von der Größenordnung des Vergleichsmaßes 1 g zu erhalten, stelle man sich eine in horizontale Richtung wirkende Beschleunigung vor. Dann würde sich ein Wert von 1 g bei einer Beschleunigung eines Fahrzeuges von 0 km/h auf 100 km/h in weniger als 3 Sekunden ergeben.³

Vereinfacht ist es zulässig mit einer Näherung der Erdbeschleunigung von 10 m/s^2 zu rechnen. Dabei stellt man fest, dass beispielsweise auf eine Masse von 100 kg eine Gewichtskraft von

$$F_G = 100 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1000 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1000 \text{ N}$$

Gleichung 11

wirkt.

Wenn anstelle der Einheit Newton die Einheit Dekanewton verwendet wird, so kann man sagen, dass auf die Masse von 100 kg eine Kraft von 100 daN ($= 10 \cdot 100 \text{ N}$) wirkt.

WIRD MIT DER FALLBESCHLEUNIGUNG GERECHNET, SO ENTSPRICHT DIE KRAFT IN DEKANEWTON DER MASSE IN KG.

In Zusammenhang mit der Fallbeschleunigung wird bei der Ladungssicherung oft mit der Einheit daN gerechnet.

³ $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{100 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{2,83 \text{ s}} = \frac{100 \cdot 1000 \text{ m}}{2,83 \text{ s} \cdot 3600 \text{ s}} = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Reibkraft

Wenn man versucht ein Ladegut auf einer Fläche zu verschieben, so muss ein Mindestmaß an Kraft aufgebracht werden, damit sich die Ladung überhaupt in Bewegung setzt. Diese Kraft ist zur Überwindung der Haftreibung erforderlich. Auch wenn sich das Ladegut in Bewegung gesetzt hat, ist eine Reibungskraft zu überwinden, damit die Bewegung beibehalten wird. Diese Kraft ist geringer als die Haftreibungskraft und wird Gleitreibungskraft genannt.

Man kann sich die Entstehung der Haftreibungskraft erklären, indem man sich vor Augen hält, dass Oberflächen niemals ganz glatt sind, sondern sich bei stark vergrößerter Betrachtung ineinander verzahnen. Um die Körper gegeneinander zu verschieben, muss eine horizontale Kraft angreifen, die stark genug ist, um die Verzahnung so auseinander zu drücken, dass die Oberflächen übereinander gleiten können. Die Stärke dieser Verzahnung ist von der Gewichtskraft F_G abhängig, d.h. der Kraft, mit der die Oberflächen aufeinander gedrückt werden. Außerdem spielen die Berührungsmaterialien sowie der Zustand der Oberfläche eine Rolle. So verhält sich Holz auf Holz anders als Metall auf Beton. Es macht weiterhin einen Unterschied, ob die Berührungsflächen fettig, trocken, staubfrei, nass oder vereist sind.

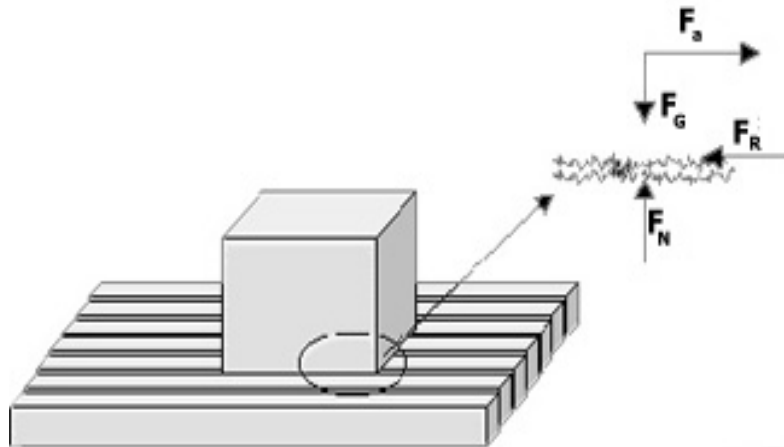


Abbildung 12 Reibkraft

Die Reibungskraft wirkt der Massenträgheitskraft und damit der Bewegung des Ladegutes entgegen. Sie wird daher zu den Ladungssicherungskräften gezählt.

EINE VERBESSERUNG DER LADUNGSSICHERUNG LÄSST SICH DURCH EINE ERHÖHUNG DER REIBKRAFT ERREICHEN.

Der Einfluss der Oberflächenstruktur und Oberflächenbeschaffenheit wird durch den Gleitreibungskoeffizient μ erfasst, der experimentell ermittelt werden kann und für den Anhaltswerte aus Tabellen entnommen werden können. Die Reibkraft F_R lässt sich daher leicht mit dem Gleitreibungskoeffizient μ und der Gewichtskraft berechnen:

$$F_R = \mu \cdot F_G = \mu \cdot m \cdot g \text{ [N]}$$

Gleichung 12

Bei der Ladungssicherung darf grundsätzlich nur der kleinere Gleitreibungskoeffizient in die Gleichung eingesetzt werden, da das Ladegut aufgrund vertikaler Beschleunigungen vibriert und nicht davon ausgegangen werden kann, dass eine feste Haftung zwischen Ladegut und Boden vorliegt. Gleitreibungskoeffizienten können für unterschiedlichste Materialpaarungen der Literatur entnommen werden. In Tabelle 3 sind die gängigsten Gleitreibungskoeffizienten

enthalten. Weitere Koeffizientenwerte sind im Anhang wiedergegeben (s. Anhang Tabelle 21). Die Größenordnung dieser Werte sollte jedem, der mit Ladungssicherung befasst ist, bekannt sein.

Reibpartner	Gleitreibungskoeffizient bei folgendem Oberflächenzustand der Reibpartner		
	trocken	nass	fettig
Holz ↔ Holz	0,20 – 0,50	0,20 – 0,25	0,05 – 0,15
Metall ↔ Holz	0,20 – 0,50	0,20 – 0,25	0,02 – 0,10
Metall ↔ Metall	0,10 – 0,25	0,10 – 0,20	0,01 – 0,10
Beton ↔ Holz	0,30 – 0,60	0,30 – 0,50	0,10 – 0,20

Tabelle 3 Gleitreibungskoeffizienten [D]

Die angegebenen Werte sind für die Berechnung anwendbar. Für genauere Ansätze oder für andere Materialien lassen sich die Gleitreibungskoeffizienten experimentell ermitteln.

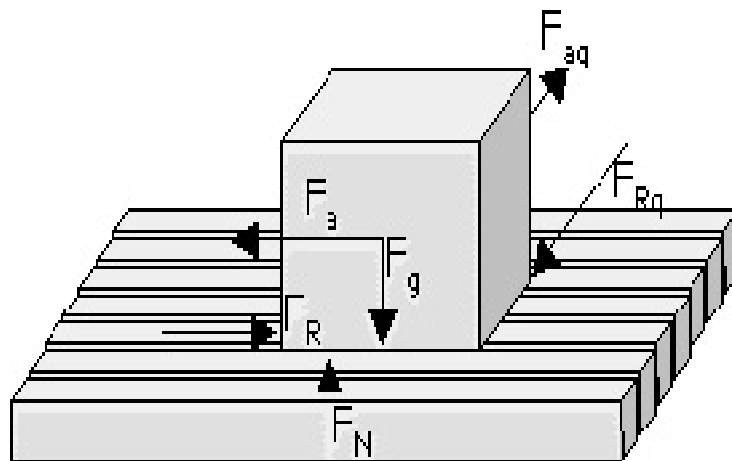


Abbildung 13 Kräfte an einem Körper

In Abbildung 13 sind die bisher behandelten Kräfte eingezeichnet. Aus der Abbildung geht hervor, dass Kräfte grundsätzlich paarweise angreifen (jede Kraft erzeugt eine Gegenkraft, die allerdings immer auf einen anderen Körper wirkt).

Sämtliche Beschleunigungskräfte greifen im Schwerpunkt des Körpers an. Der oben gezeigte Körper kann sich nur in Bewegung setzen, wenn die Massenträgheitskräfte F_a bzw. F_{aq} größer sind als F_R . Da es Aufgabe der Ladungssicherung ist, eine Bewegung der Ladung zu verhindern, muss die Differenz zwischen F_a und F_R von einer Sicherungskraft F_S abgefangen werden.

DIE DIFFERENZ ZWISCHEN DER MAXIMAL ZU ERWARTENDEN HORIZONTALEN BESCHLEUNIGUNGSKRAFT UND DER REIBKRAFT MUSS DURCH LADUNGSSICHERUNGSMITTEL AUFGEBRACHT WERDEN.

Um auszurechnen, welche Sicherungskräfte erforderlich sind, um eine Ladungssicherung gegen Verrutschen zu sichern, ist also wie folgt vorzugehen:

Eine Paletteneinheit mit einer Masse von 600 kg ist in einem Container für den Straßentransport in horizontaler Längsrichtung zu sichern. Hierfür sind Belastungen in Höhe von 1,0 g zu erwarten. Für den Gleitreibungskoeffizient wird $\mu = 0,2$ angenommen. Als Ladungssicherungskraft wirkt dann die folgenden Reibkraft:

$$F_R = \mu \cdot m \cdot g = 0,2 \cdot 600 \cdot 10 = 1200 \text{ [N]}$$

Gleichung 13

oder 120 daN.

Die maximale Beschleunigungskraft, die auf das Ladegut wirkt, beträgt:

$$F_a = m \cdot a = 600 \cdot 10 = 6000 \text{ [N]}$$

Gleichung 14

oder 600 daN.

Die Ladung ist also mit mindestens

$$F_S = F_a - F_R = 6000 - 1200 = 4800 \text{ [N]}$$

Gleichung 15

bzw. 480 daN zu sichern.

Für die Berechnung wurde 1,0 g mit 10 m/s² angesetzt. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass die erforderlichen Kräfte mit ein wenig Übung sehr leicht im Kopf auszurechnen sind. Somit sollte jeder, der mit der Verladung von Gütern betraut ist, in der Lage sein die erforderliche Sicherungskraft F_S überschlägig zu berechnen. Die überschlägige Rechnung mit 1,0 g = 10 m/s² ist vertretbar, da man sich bei diesem Ansatz bezüglich der erforderlichen Sicherungskräfte auf der „sicheren Seite“ befindet, wenn bei allen Kräften die Beschleunigungen in g angegeben werden.

Wie beeinflusst die Größe der Berührungsflächen die Reibung?

Als dargestellt wurde, dass die Reibung von der Größe der Gewichtskraft abhängig ist, wurde nicht weiter ausgeführt, dass die Größe der Reibung proportional zur Berührungsfläche und proportional zur Kraft pro Flächeneinheit ist. Die Größe der Oberfläche spielt daher keine Rolle, da das Produkt aus der Fläche A und der Kraft pro Flächeneinheit (F_G/A) unabhängig von der Fläche ist. Die Größe der Oberflächen beeinflusst die Reibung nicht.

EINE GROßE BERÜHRUNGSFLÄCHE IST NICHT GLEICHBEDEUTEND MIT MEHR REIBUNG ZWISCHEN DEN FLÄCHEN.

Eine Reibkraftherhöhung lässt sich also durch eine Erhöhung des Gleitreibungskoeffizienten (z. B. trockene, fettfreie Oberflächen oder durch reibkraftherhöhende Zwischenlagen) sowie durch eine Erhöhung der vertikalen Kraftkomponenten erreichen. Entsprechende Ladungssicherungsmaßnahmen, wie z. B. das Niederzurren, dienen daher auch der Erhöhung der Reibkraft.

Um ein Verrutschen der Ladegüter zu verhindern, sind die horizontalen Beschleunigungskräfte maßgebend. Beschleunigungskräfte in vertikaler Richtung könnten in Form von Vibrationen beispielsweise ein Wandern der Ladegüter bewirken. Allerdings besteht eine ausreichende Sicherung gegen dieses Verhalten, sofern Ladungssicherungsmaßnahmen für horizontale Maximalkräfte ausgelegt sind (z. B. durch Niederzurren).

Kippvorgänge

Beschleunigungskräfte, die an Ladegütern angreifen, haben das Bestreben, die Ladegüter in Bewegung zu setzen. Sofern die Ladegüter ausreichend gegen Verrutschen gesichert sind, entsteht ein Kippmoment, welches dahin wirkt, den Körper um seine Kippkante zu kippen.

Insbesondere bei Kippvorgängen ist die Lage des Schwerpunktes eines Körpers von Bedeutung. Bei gleichmäßig gefüllten, homogenen Einheiten (beispielsweise bei aus Kisten einer Art bestehenden palettierten Ladeeinheiten) liegt der Schwerpunkt im geometrischen Mittelpunkt. Bei unregelmäßigen Körpern (z. B. Maschinenbauteil) liegt der Schwerpunkt in der Regel nicht im geometrischen Mittelpunkt. Da die als Kippkraft wirkende Massenträgheitskraft (F_a) im Schwerpunkt (S) eines Körpers angreift, entsteht senkrecht dazu in Richtung der Standfläche ein Hebelarm (h_k) der Kippkraft.

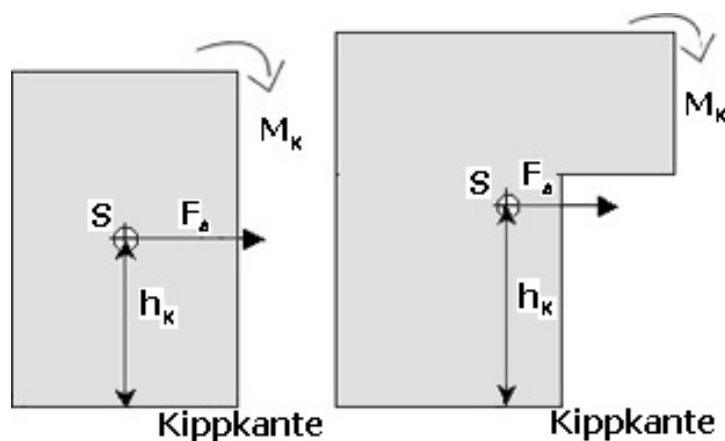


Abbildung 14 Kippmoment

Das Produkt aus Hebelarm h_k und Beschleunigungskraft F_a wird als Kippmoment M_k bezeichnet:

$$M_k = F_a \cdot h_k \text{ [Nm]}$$

Gleichung 16

Das Kippmoment ist um so größer, je größer die Beschleunigung ist und je höher der Schwerpunkt liegt.

JE HÖHER DER SCHWERPUNKT, DESTO GRÖßER IST DAS KIPPMOMENT.

Dem Kippmoment entgegengesetzt wirkt ein Standmoment M_S . Bei dem Standmoment wirkt die Gewichtskraft F_G als Beschleunigungskraft. Den Hebelarm (h_S) des Standmomentes bildet der Abstand des Schwerpunktes zu der an die Kippkante angrenzenden Seitenfläche.

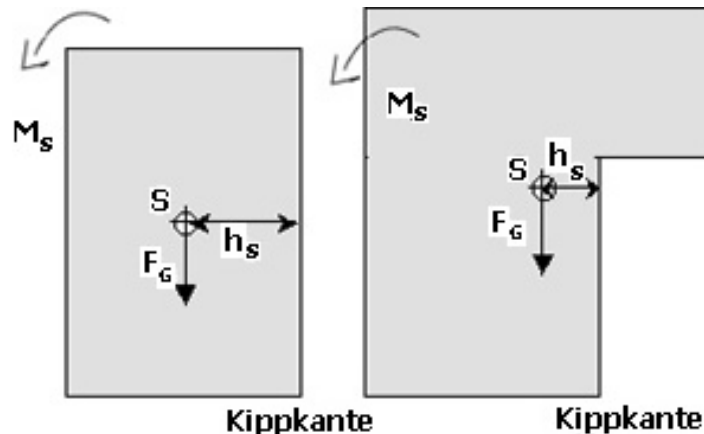


Abbildung 15 Standmoment

$$M_S = F_G \cdot h_S \text{ [Nm]}$$

Gleichung 17

Eine Kippgefahr für ein Ladegut besteht immer dann, wenn das Kippmoment größer ist als das Standmoment. Das Kippmoment ist von der Höhe des Schwerpunktes (dem Hebelarm) und von der Beschleunigungskraft abhängig. Für ein Ladegut ist der Hebelarm h_K in Längsrichtung der gleiche wie in Querrichtung, da sich der Abstand vom Boden nicht verändert. Insofern wirkt in Längs- und Querrichtung jeweils ein anderes Kippmoment, wenn sich die maximalen Beschleunigungskräfte unterscheiden.

Beim Standmoment ist dagegen die Beschleunigungskraft in Längs- und Querrichtung gleich (es wirkt jeweils die Gewichtskraft), es kann aber je nach Schwerpunktlage ein unterschiedlicher Hebelarm h_S wirken. Hier gilt:

JE KLEINER DER ABSTAND VON DER KIPPKANTE, DESTO GERINGER IST DAS STANDMOMENT.

Beispiel: Der Schwerpunkt eines Ladegutes ($m=1000 \text{ kg}$) liegt in $1,0 \text{ m}$ Höhe und in $0,5 \text{ m}$ Entfernung von der Kippkante. Ein Verrutschen sei nicht möglich. Besteht eine ausreichende Kippsicherung gegen eine maximale Beschleunigung von $0,8 \text{ g}$?

Für eine ausreichende Kippsicherung muss das Standmoment größer sein als das Kippmoment. Das Kippmoment errechnet sich zu:

$$M_K = F_a \cdot h_K = 1000 \cdot 0,8 \cdot 9,81 \cdot 1 = 7848 \text{ [Nm]}$$

Gleichung 18

Für das Standmoment gilt:

$$M_S = F_G \cdot h_S = 1000 \cdot 1,0 \cdot 9,81 \cdot 0,5 = 4905 \text{ [Nm]}$$

Gleichung 19

Für ein Ladegut mit der Masse von 1000 kg errechnet sich also ein Kippmoment in Höhe von etwa 7848 Nm bei einem Standmoment von etwa 4905 Nm .

Man erkennt aber auch ohne genaue Zahlenwerte, dass in diesem Fall das Ladegut stark kippgefährdet ist, da $0,8 \cdot m \cdot g$ einen höheren Wert ergibt als $0,5 \cdot m \cdot g$. Das Beispiel soll zeigen, dass die Masse eines Ladegutes beim Vergleich zwischen dem Kippmoment und dem Standmoment keine Rolle spielt, da in beiden Fällen die gleiche Masse wirkt.

Auf diese Weise lassen sich bezüglich der Kippgefahr für bestimmte maximale Beschleunigungen sehr leicht Aussagen treffen, sofern der Abstand des Schwerpunktes vom Boden und von den Seitenflächen angegeben werden kann.

BEIM VERGLEICH ZWISCHEN KIPPMOMENT UND STANDMOMENT SPIELT DIE MASSE DER KÖRPER KEINE ROLLE.

Bei Querbeschleunigungen, die beispielsweise durch Kurvenfahrten während des Straßentransportes entstehen, wird ein kippgefährdetes Gut in der Regel Wankbewegungen um seine Längsachse ausführen, bevor es zum Kippen kommt. Durch diese Wankbewegung entstehen dynamische Kippmomente, welche die Kippgefahr nochmals erhöhen. Diese dynamischen Kippmomente werden durch einen Wankfaktor berücksichtigt, welcher zu der maximalen Querbeschleunigung hinzuzuaddieren ist. In VDI 2702 [E] wird dieser Term mit $0,2 \text{ g}$ angegeben. Bei einer maximalen Querbeschleunigung von $0,5 \text{ g}$ im Straßenverkehr muss als bezüglich der Kippgefahr mit $0,7 \text{ g}$ ($0,5 \text{ g} + 0,2 \text{ g}$) gerechnet werden.

Welchen Einfluss hat die Stapelung von Ladegütern auf die Kippgefahr?

Gestapelte Güter können als Einheit betrachtet werden, wenn die Güter so übereinander gestapelt sind, dass sie sich nicht gegeneinander verschieben können. Wenn gleichartige Güter mit mittigem Schwerpunkt gestapelt werden, dann verdoppelt sich bei zwei Einheiten die Masse und damit die Gewichtskraft bzw. das Standmoment.

$$M_{S\text{-doppelt}} = 2 \cdot m \cdot g \cdot h_S = 2 \cdot M_{S\text{-einzel}} \text{ [Nm]}$$

Gleichung 20

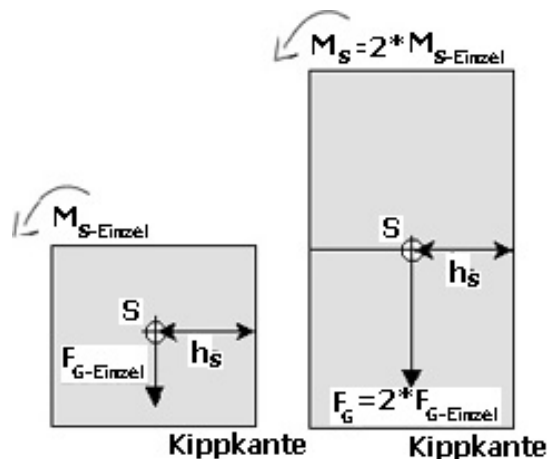


Abbildung 16 Standmoment im Vergleich (Einzelkörper ↔ Körper doppelter Höhe)

In gleicher Weise wird über den Masseneinfluss auch die Trägheitskraft und damit das Kippmoment verdoppelt. Zusätzlich verdoppelt sich bei zwei übereinander gestapelten Einheiten der Abstand zur Aufstandsfläche und damit der Hebelarm, so dass sich das Kippmoment bei zwei gestapelten Gütern insgesamt vervierfacht.

$$M_{K-doppelt} = 2 \cdot m \cdot g \cdot h_{K-einzel} = 4 \cdot M_{K-einzel} \quad [Nm]$$

Gleichung 21

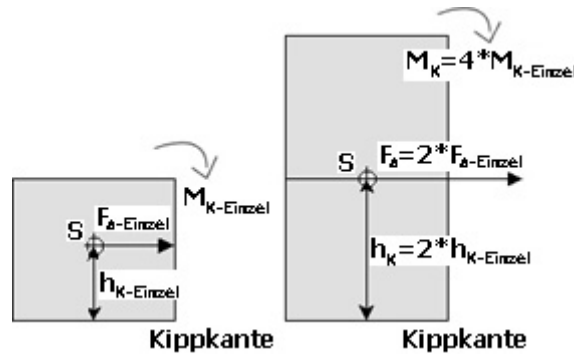


Abbildung 17 Kippmoment im Vergleich (Einzelkörper ↔ Körper doppelter Höhe)

Allgemein gilt für die Stapelung von gleichartigen Ladegütern, dass das Kippmoment stärker zunimmt als das Standmoment und zwar in dem Maße, in dem sich der Hebelarm h_K vergrößert. Bei Ladegütern mit mittigem Schwerpunkt entspricht dies der Anzahl der übereinander gestapelten Einheiten. Bei dreifacher Masse und dreifachem (Kipp-) Hebelarm h_K verdreifacht sich also das Standmoment, wogegen das Kippmoment sich verneunfacht (also 3-mal stärker zunimmt).

Stapelstauchdruck

Bei der Stapelung von Gütern erhöht sich auch der Druck auf die unteren Verpackungseinheiten. Dieser Druck nimmt bei Wankbewegungen erheblich zu, da deren Gewicht dann zusätzlich auf die Kippkante der untersten Lage einwirken. Bei der Stapelung von Gütern ist daher auf eine ausreichende Tragfähigkeit der unteren Ladeeinheiten zu achten. Gegebenenfalls ist für eine Gewichtsverteilung durch geeignete Maßnahmen während der Beladung zu sorgen.

Zusammenfassung

- Dynamische Versandbelastungen werden im kombinierten Verkehr durch unterschiedliche Versandvorgänge und Umschlagsoperationen ausgelöst. Dabei sollten je nach Verkehrsträger Belastungen von bis zu 1,0 g in horizontaler Richtung und von bis zu 1,0 g (Straße) bzw. 1,8 g (Schiff) in vertikaler Richtung nach unten einkalkuliert werden.
- Für eine wirksame Ladungssicherung ist es erforderlich, den Gütern keinen Bewegungsspielraum zu gewähren.
- Damit eine Ladungssicherung als ausreichend angesehen werden kann, müssen Ladungssicherungskräfte wirken, die mindestens den Beschleunigungskräften entsprechen.
- Wenn die Beschleunigung in g angegeben ist, dann entspricht die Kraft in daN der Masse in kg.
- Eine Erhöhung der Reibkraft trägt wesentlich zur Verbesserung der Ladungssicherung bei.
- Wenn ein Ladegut gegen Verrutschen gesichert ist, dann muss die Kippsicherheit des Ladegutes beachtet werden.
- Bei dynamischer Querbelastung ist nach VDI-2702 [E] ein zusätzlicher Wankfaktor von 0,2 zu berücksichtigen.

Übungsaufgaben

ÜBUNG 1

Eine Bierkiste ($m_{\text{Bier}} = 15 \text{ kg}$) und ein Betonklotz ($m_{\text{Beton}} = 15000 \text{ kg}$) sollen ohne zusätzliche Ladungssicherungsmaßnahmen in einem Container transportiert werden. Als Gleitreibungskoeffizient wird in beiden Fällen $\mu = 0,3$ angenommen. Vor der ersten roten Ampel bremst der Fahrer des Transportfahrzeuges in 4 Sekunden aus einer Geschwindigkeit von 50 km/h ab.

1a) Welche Beschleunigung entsteht dabei?

1b) Was passiert mit der Bierkiste?

1c) Was passiert mit dem Betonklotz?

1d) Welcher Gleitreibungskoeffizient wäre für die Bierkiste und welcher wäre für den Betonklotz erforderlich, um in diesem Fall ein Verrutschen zu vermeiden?

ÜBUNG 2

Ein Fahrzeug durchfährt eine Kurve vom Radius 30 m mit einer Geschwindigkeit von 35 km/h.

2a) Welche Querbeschleunigung entsteht dabei für die Ladegüter im Container?

2b) Im Container steht eine Europalette ($m = 600 \text{ kg}$) auf rauem Holzboden. Als Gleitreibungskoeffizient wird $\mu = 0,4$ angenommen. Mit welcher Kraft muss die Palette gesichert sein, damit sie sich nicht verschiebt?

2c) Durch hohe Luftfeuchtigkeit und Schwitzwasserbildung verändert sich der Gleitreibungskoeffizient auf $\mu = 0,2$. Welche Sicherungskraft ist nun erforderlich?

2d) Die Ladeeinheit ist 1,80 m hoch mit mittigem Schwerpunkt. Ist die Europalette bei einer Querbeschleunigung von 0,3 g ausreichend gegen Kippen gesichert? Wie sieht das Ergebnis unter Berücksichtigung des Wankfaktors aus?

ÜBUNG 3

Ein Auto bremst in 5 Sekunden aus 50 km/h ab; während ein Ladegut, welches im Container mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h rutscht, in 0,1 Sekunden gestoppt wird. Wo tritt die höhere Beschleunigung auf?

ÜBUNG 1

Eine Bierkiste ($m_{\text{Bier}} = 15 \text{ kg}$) und ein Betonklotz ($m_{\text{Beton}} = 15000 \text{ kg}$) sollen ohne zusätzliche Ladungssicherungsmaßnahmen in einem Container transportiert werden. Als Gleitreibungskoeffizient wird in beiden Fällen $\mu = 0,3$ angenommen. Vor der ersten roten Ampel bremst der Fahrer des Transportfahrzeuges in 4 Sekunden aus einer Geschwindigkeit von 50 km/h ab.

Lösung 1a)

Die Beschleunigung errechnet sich aus der Änderung der Geschwindigkeit im angegebenen Zeitintervall. Die 50 km/h müssen in die Einheit m/s umgerechnet werden.

$$v = \frac{50}{3,6} = 13,9 \text{ [m / s]}$$
$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{13,9}{4} = 3,5 \text{ [m / s}^2\text{]}$$

Lösung 1b)

Die Bierkiste wird mit einer Reibkraft von

$$F_R = \mu \cdot m \cdot g = 0,3 \cdot 15 \cdot 9,81 = 44,1 \text{ [N]}$$

gehalten. Gleichzeitig wird die Masse mit einer Trägheitskraft in Höhe von

$$F_a = m \cdot a = 15 \cdot 3,5 = 52,5 \text{ [N]}$$

beschleunigt. Da die Beschleunigungskraft größer ist als die Sicherungskraft, setzt sich die Bierkiste bei diesem Bremsmanöver in Bewegung. Wenn diese Bewegung durch einen Aufprall auf die Containerwand gestoppt wird, sollte man sich ernsthafte Sorgen um den Zustand der Bierkiste machen

Lösung 1c)

Der Betonklotz wird mit einer Reibkraft von

$$F_R = \mu \cdot m \cdot g = 0,3 \cdot 15000 \cdot 9,81 = 44145 \text{ [N]}$$

gehalten. Gleichzeitig wird die Masse mit einer Trägheitskraft in Höhe von

$$F_a = m \cdot a = 15000 \cdot 3,5 = 52500 \text{ [N]}$$

beschleunigt. Auch hier ist die Beschleunigungskraft größer als die Sicherungskraft und die Ladung setzt sich in Bewegung. Im Gegensatz zur Bierkiste sollte man sich in diesem Fall allerdings weniger Sorgen um die Ladung machen, sondern eher um das Leben des Fahrers und anderen zufällig anwesenden Verkehrsteilnehmern.

Lösung 1d)

Um ein Verrutschen zu vermeiden, muss die Reibkraft mindestens genauso groß sein wie die Beschleunigungskraft. Für die Bierkiste heißt das:

$$F_R = \mu \cdot m \cdot g \geq 52,5 \text{ [N]}$$

Daraus errechnet sich ein Gleitreibungskoeffizient von

$$\mu = \frac{52,5}{15 \cdot 9,81} = 0,36$$

Für den Betonklotz ergibt die gleiche Rechnung

$$\mu = \frac{52500}{15000 \cdot 9,81} = 0,36$$

Die Gleitreibungskoeffizienten, die erforderlich sind, um ein Verrutschen zu verhindern, sind also gleich groß und völlig unabhängig von der Masse. Allgemein kann man sagen, dass der Gleitreibungskoeffizient mindestens der maximalen Beschleunigung in g entsprechen muss, um ein Verrutschen zu verhindern.⁴ Damit lässt sich sehr leicht der erforderliche Gleitreibungskoeffizient bestimmen. (Für eine maximale Beschleunigung von 0,4 g wäre beispielsweise ein Gleitreibungskoeffizient von $\mu = 0,4$ erforderlich).

⁴ $\frac{3,5}{9,81} = 0,36$

ÜBUNG 2

Ein Fahrzeug durchfährt eine Kurve vom Radius 30 m mit einer Geschwindigkeit von 35 km/h.

Lösung 2a)

Auch hier müssen die 35 km/h zuerst in die Einheit m/s umgerechnet werden.

$$v = \frac{35}{3,6} = 9,7 \text{ [m / s]}$$

Die Querschleunigung kann dann aus der Geschwindigkeit und dem Kurvenradius errechnet werden.

$$a_{\text{quer}} = \frac{v^2}{r} = \frac{9,7^2}{30} = 3,1 \text{ [m / s}^2\text{]}$$

Lösung 2b)

Die Palette wird durch die Reibkraft gesichert:

$$F_R = \mu \cdot m \cdot g = 0,4 \cdot 600 \cdot 9,81 = 2354 \text{ [N]}$$

Gleichzeitig wird die Palette mit der Trägheitskraft

$$F_a = m \cdot a = 600 \cdot 3,1 = 1860 \text{ [N]}$$

beschleunigt. Da die Reibkraft größer ist als die Beschleunigungskraft, wäre in diesem Fall keine zusätzliche Sicherung gegen Verrutschen erforderlich. Aufgrund von Vertikalbeschleunigungen muss die Palette dennoch gesichert werden.

Lösung 2c)

Wenn sich der Gleitreibungskoeffizient halbiert, dann halbiert sich auch die Reibkraft, welche das Ladegut sichert:

$$F_R = 0,2 \cdot 600 \cdot 9,81 = 1177 \text{ [N]}$$

Da sich die Trägheitskraft nicht ändert, ist die Beschleunigungskraft plötzlich größer als die Ladungssicherungskraft. Der Unterschied muss von einer zusätzlichen Sicherungskraft aufgebracht werden.

$$F_S = F_a - F_R = 1860 - 1177 = 683 \text{ [N]}$$

Lösung 2d)

Bei einer Höhe von 1,80 m und mittigem Schwerpunkt wirkt ein Hebelarm von $h_K = 0,9$ m. Bei einer Querschleunigung von 0,5 g wirkt ein Kippmoment von:

$$M_K = F_{\text{aquer}} \cdot h_K = 600 \cdot 0,5 \cdot 9,81 \cdot 0,9 = 2648,7 \text{ [Nm]}$$

In das Standmoment gehen die Gewichtskraft und der seitliche Hebelarm ein. Bei einer Europalette von 0,8 m Breite und mittigem Schwerpunkt beträgt der Hebelarm $h_S = 0,4$ m.

Das Standmoment berechnet sich damit zu:

$$M_S = F_G \cdot h_S = 600 \cdot 9,81 \cdot 0,4 = 2354 \text{ [Nm]}$$

Ohne Berücksichtigung des Wankfaktors ist das Standmoment kleiner als das Kippmoment. Von einer Kippgefährdung ist auszugehen.

Mit Berücksichtigung des Wankfaktors (0,2) erhöht sich die anzusetzende Querschleunigung auf 0,7 g. Das Kippmoment erhöht sich damit auf:

$$M_K = F_{\text{quer}} \cdot h_K = 600 \cdot 0,7 \cdot 9,81 \cdot 0,9 = 3708,18 \text{ [Nm]}$$

Unter Berücksichtigung des Wankfaktors liegt das Kippmoment deutlich über dem Standmoment, so dass für diesen Fall von einer erhöhten Kippgefährdung auszugehen ist.

Zu diesen Aussagen hätte man ohne detaillierte Rechnung gelangen können:

Sofern die Masse und der g Wert nicht als Zahlenwert eingesetzt werden, kann man das Kippmoment auf

$$M_K = F_{\text{quer}} \cdot h_K = m \cdot 0,5 \cdot g \cdot 0,9 = 0,45 \cdot m \cdot g \text{ [Nm]}$$

veranschlagen.

Das Standmoment ergibt sich unter gleicher Voraussetzung zu:

$$M_S = F_G \cdot h_S = m \cdot g \cdot 0,4 \text{ [Nm]}$$

Es kann sofort festgestellt werden, dass das Standmoment kleiner ist als das Kippmoment ($0,45 \cdot m \cdot g$).

Wenn der Wankfaktor berücksichtigt wird, erhält man mit:

$$M_K = m \cdot 0,7 \cdot g \cdot 0,9 = 0,63 \cdot m \cdot g \text{ [Nm]}$$

ein Kippmoment, welches wesentlich größer ist als das Standmoment M_S .

ÜBUNG 3

Ein Auto bremst in 5 Sekunden aus 50 km/h ab; während ein Ladegut, welches im Container mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h rutscht, in 0,1 Sekunden gestoppt wird. Wo tritt die höhere Beschleunigung auf?

Lösung 3)

Für das bereits im Text als Beispiel benutzte Auto ergibt sich eine Geschwindigkeitsänderung von

$$v = \frac{50}{3,6} = 13,9 [m / s]$$

Daraus errechnet sich eine Beschleunigung von

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{13,9}{5} = 2,8 [m / s^2]$$

Für das Ladegut mit einer Geschwindigkeit von

$$v = \frac{5}{3,6} = 1,39 [m / s]$$

ergibt sich eine Beschleunigung beim Aufprall in Höhe von:

$$a = \frac{1,39}{0,1} = 13,9 [m / s^2]$$

Die Beschleunigung beim Aufprall ist bei dieser geringen Rutschgeschwindigkeit rund fünfmal so hoch wie die Beschleunigung beim Abbremsen.

Fragen und Antworten

FRAGE 1: EINE PALETTE MIT GETRÄNKEDOSEN IST ETWA DOPPELT SO SCHWER WIE EINE PALETTE MIT WEINGLÄSERN. WIE GROß MÜSSEN UMGEFÄHR DIE SICHERUNGSKRÄFTE BEI DEN GETRÄNKEDOSEN IM VERHÄLTNISS ZU DEN SICHERUNGSKRÄFTEN BEI DEN WEINGLÄSERN SEIN, WENN BEIDE PALETTEN GEGEN EINE HORIZONTALE BESCHLEUNIGUNG VON 1,0 G GESICHERT SIND?

FRAGE 2: IST EIN LADEGUT BEI EINEM GLEITREIBUNGSKOEFFIZIENT VON $\mu = 0,5$ AUSREICHEND GEGEN QUERBESCHLEUNIGUNGEN IM SCHIENENVERKEHR (MAX 0,5 G) GESICHERT?

FRAGE 3: WELCHE SICHERUNGSKRAFT IST UMGEFÄHR ERFORDERLICH, UM PALETTEN IM CONTAINER FÜR DEN STRAßENVERSAND AUSREICHEND ZU SICHERN?

FRAGE 4: WIE GROß MUSS DER GLEITREIBUNGSKOEFFIZIENT SEIN, DAMIT EIN LADEGUT AUSREICHEND GEGEN BEWEGUNG GESICHERT IST?

FRAGE 5: WIE BEWERTEN SIE DIE AUSSAGE: JE SCHWERER DAS LADEGUT, DESTO BESSER IST ES GEGEN VERRUTSCHEN GESICHERT?

FRAGE 6: AUF DEM MOND IST DIE GEWICHTSKRAFT ETWA 1/6 SO GROß WIE AUF DER ERDE. WIE MÜSSTEN DIE LADUNGSSICHERUNGSKRÄFTE FÜR HORIZONTALE VERSCHIEBUNG IM VERGLEICH ZUR ERDE AUSGELEGT WERDEN?

FRAGE 7: WIE HOCH SIND ETWA DIE VERSANDBELASTUNGEN BEIM STRAßENVERKEHR IN HORIZONTALER UND IN VERTIKALER RICHTUNG?

FRAGE 8: WELCHE BEWEGUNGEN SIND BEIM SCHIFF BESONDERS KRITISCH?

FRAGE 9: WIE HOCH SIND ETWA DIE VERSANDBELASTUNGEN BEIM SCHIENENTRANSPORT IM KOMBINIERTEN VERKEHR IN HORIZONTALER UND VERTIKALER RICHTUNG?

FRAGE 10: WIE HOCH SIND ETWA DIE VERSANDBELASTUNGEN BEIM SEETRANSPORT IN HORIZONTALER UND IN VERTIKALER RICHTUNG?

FRAGE 11: WOVON IST DIE REIBKRAFT ABHÄNGIG?

FRAGE 12: WIE OFT BEWEGT SICH EIN CONTAINER AUF EINEM SCHIFF MIT EINER ROLLPERIODE VON 10 SEKUNDEN AN EINEM FAHRTAG VON EINER SEITE AUF DIE ANDERE?

FRAGE 13: WIEVIEL HÖHENMETER LEGT EIN CONTAINER IN GUT 100 M ENTFERNUNG VON DER STAMPFACHSE IN EINER STAMPFPERIODE UMGEFÄHR ZURÜCK?

FRAGE 14: WOVON IST DIE QUERBESCHLEUNIGUNG ABHÄNGIG?

FRAGE 15: WIE WIRD DIE REIBKRAFT BERECHNET?

FRAGE 16: WIE WIRD DIE BESCHLEUNIGUNGSKRAFT IN QUERRICHTUNG BERECHNET?

FRAGE 17: WIE WIRD DIE BESCHLEUNIGUNGSKRAFT IN LÄNGSRICHTUNG BERECHNET?

FRAGE 18: WIE HOCH IST IN ETWA DER GleITREIBUNGSKoeffIZIENT HOLZ AUF HOLZ IN NASSEM, TROCKENEM UND FETTIGEM ZUSTAND?

FRAGE 19: WIE HOCH IST IN ETWA DER GleITREIBUNGSKoeffIZIENT METALL AUF HOLZ IN NASSEM, TROCKENEM UND FETTIGEM ZUSTAND?

FRAGE 20: IN WELCHE RICHTUNG WIRKT AUF EINER GERADEN LADEFLÄCHE DIE REIBKRAFT IM VERHÄLTNIS ZUR MASSENTRÄGHEITSKRAFT?

FRAGE 21: IN WELCHE RICHTUNG WIRKT AUF EINER GERADEN LADEFLÄCHE DIE REIBKRAFT IM VERHÄLTNIS ZUR GEWICHTSKRAFT?

FRAGE 22: WIEVIEL BETRÄGT ÜBERSCHLÄGIG DIE GEWICHTSKRAFT (IN DEKA-NEWTON) FÜR EIN LADEGUT MIT DER MASSE $M = 1500 \text{ KG}$ BEI EINEM GleITREIBUNGSKoeffIZIENT VON $\mu = 0,2$ UND EINER BESCHLEUNIGUNG VON $1,0 \text{ G}$?

FRAGE 23: WIEVIEL BETRÄGT ÜBERSCHLÄGIG DIE REIBKRAFT (IN DEKA-NEWTON) FÜR EIN LADEGUT MIT DER MASSE $M = 1500 \text{ KG}$ BEI EINEM GleITREIBUNGSKoeffIZIENT VON $\mu = 0,2$ UND EINER BESCHLEUNIGUNG VON $1,0 \text{ G}$?

FRAGE 24: WIEVIEL BETRÄGT ÜBERSCHLÄGIG DIE BESCHLEUNIGUNGSKRAFT (IN DEKA-NEWTON) FÜR EIN LADEGUT MIT DER MASSE $M = 1500 \text{ KG}$ BEI EINEM GleITREIBUNGSKoeffIZIENT VON $\mu = 0,2$ UND EINER BESCHLEUNIGUNG VON $1,0 \text{ G}$?

FRAGE 25: WIEVIEL BETRÄGT ÜBERSCHLÄGIG DIE SICHERUNGSKRAFT (IN DEKA-NEWTON) FÜR EIN LADEGUT MIT DER MASSE $M = 1500 \text{ KG}$ BEI EINEM GleITREIBUNGSKoeffIZIENT VON $\mu = 0,2$ UND EINER BESCHLEUNIGUNG VON $1,0 \text{ G}$?

Frage 1: Eine Palette mit Getränkedosen ist etwa doppelt so schwer wie eine Palette mit Weingläsern. Wie groß müssen ungefähr die Sicherungskräfte bei den Getränkedosen im Verhältnis zu den Sicherungskräften bei den Weingläsern sein, wenn beide Paletten gegen eine horizontale Beschleunigung von 1,0 g gesichert sind?

Die Beschleunigungskraft errechnet sich aus Masse mal Beschleunigung. Wenn sich die Masse verdoppelt, verdoppelt sich auch die Beschleunigungskraft. Folglich muss sich auch die Sicherungskraft verdoppeln, um eine Bewegung des Ladegutes zu verhindern.

Frage 2: Ist ein Ladegut bei einem Gleitreibungskoeffizient von $\mu = 0,5$ ausreichend gegen Querbeschleunigungen im Schienenverkehr (max. 0,5 g) gesichert?

Die Sicherung ist ausreichend, sofern wirklich der Gleitreibungskoeffizient von $\mu = 0,5$ wirkt. Um ausschließlich durch die Reibungsverhältnisse zu sichern, muss der Gleitreibungskoeffizient der maximalen Beschleunigung in g (hier 0,5) entsprechen. Man muss aber beachten, dass sich der Gleitreibungskoeffizient verringert, sofern sich das Ladegut vertikal bewegen kann.

Frage 3: Welche Sicherungskraft ist ungefähr erforderlich, um Paletten im Container für den Straßenversand ausreichend zu sichern?

Wichtig ist es realistische Annahmen zu treffen. Zum Beispiel: Eine Palette wiegt etwa 600 kg, für den Gleitreibungskoeffizient (Holz auf Holz) kann 0,2 angenommen werden. Bei einer Beschleunigung von 1,0 g greifen 480 daN an der Palette an. Die Reibkraft beträgt etwa

120 daN ($0,2 \cdot 600$ daN). Damit beträgt die erforderliche Sicherungskraft ungefähr 480 daN ($600 - 120$ daN).

Frage 4: Wie groß muss der Gleitreibungskoeffizient sein, damit ein Ladegut ausreichend gegen Bewegung gesichert ist?

Damit sich das Ladegut nicht bewegt, muss die Reibkraft der Massenträgheitskraft entsprechen. Der Gleitreibungskoeffizient muss also so groß sein, wie die Trägheitsbeschleunigung in g.

Frage 5: Wie bewerten sie die Aussage: Je schwerer das Ladegut, desto besser ist es gegen Verrutschen gesichert?

Wenn die Reibkraft mit der Beschleunigung verglichen wird, dann steht auf beiden Seiten der Gleichung dieselbe Masse (sie kürzt sich also raus). Allein der Gleitreibungskoeffizient und nicht die Masse ist entscheidend dafür, wie gut ein Ladegut gegen Verrutsche gesichert ist. Wenn die erforderliche Sicherungskraft berechnet werden soll, ist die Masse allerdings von entscheidender Bedeutung.

Frage 6: Auf dem Mond ist die Gewichtskraft etwa 1/6 so groß wie auf der Erde. Wie müssten die Ladungssicherungskräfte für horizontale Verschiebung im Vergleich zur Erde ausgelegt werden?

Wenn die Gewichtskraft nur 1/6 beträgt, dann ist auch die Reibkraft nur 1/6 so groß wie auf der Erde. Um Körper in horizontaler Richtung zu beschleunigen, muss allerdings die gleiche Kraft wirken wie auf der Erde. Die Sicherungskraft gegen Unfälle auf dem Mond müsste also erheblich höher sein als auf der Erde.

Frage 7: Wie hoch sind etwa die Versandbelastungen beim Straßenverkehr in horizontaler und in vertikaler Richtung?

Beim Straßenverkehr sind etwa 0,5 g in Querrichtung und 1,0 g in Längsrichtung zu erwarten.

Frage 8: Welche Bewegungen sind beim Schiff besonders kritisch?

Insbesondere Roll- und Stampfbewegungen des Schiffs können zu kritischen Belastungen im Containertransport führen.

Frage 9: Wie hoch sind etwa die Versandbelastungen beim Schienentransport im kombinierten Verkehr in horizontaler und vertikaler Richtung?

Beim Schienenverkehr sind etwa 0,5 g in Querrichtung und 1,0 g in Längsrichtung zu erwarten. In vertikaler Richtung nach oben muss mit 0,3 g gerechnet werden.

Frage 10: Wie hoch sind etwa die Versandbelastungen beim Seetransport in horizontaler und in vertikaler Richtung?

Beim Seetransport sind etwa 0,8 g in Querrichtung und 0,4 g in Längsrichtung zu erwarten. In vertikaler Richtung muss mit 1,8 g nach unten gerechnet werden.

Frage 11: Wovon ist die Reibkraft abhängig?

Die Reibkraft ist von dem Oberflächenzustand (trocken, nass, fettig, vereist), von der Oberflächenbeschaffenheit (Material, Oberflächenstruktur) und von der Masse abhängig, aber nicht von der Größe der Oberflächen.

Frage 12: Wie oft bewegt sich ein Container auf einem Schiff mit einer Rollperiode von 10 Sekunden an einem Fahrtag von einer Seite auf die andere?

Bei einer Rollperiode von 10 Sekunden bewegt sich ein Container an einem Fahrtag rund 8600 mal von einer Seite auf die andere.

Frage 13: Wie viel Höhenmeter legt ein Container in gut 100 m Entfernung von der Stampfachse in einer Stampfperiode ungefähr zurück?

Der Weg, den der Container zurücklegt, hängt neben der Entfernung von der Stampfachse natürlich auch vom Stampfwinkel ab. Für eine komplette Stampfperiode (Auslenkung aus der Mittellage nach oben hinunter ins Tal und wieder in die Mittellage) sind 30 m ein realistischer Wert.

Frage 14: Wovon ist die Querbeschleunigung abhängig?

Die Querbeschleunigung ist von der Geschwindigkeit (v) und dem Kurvenradius (r) abhängig. Die Formel zur Berechnung der Querbeschleunigung lautet:

$$a = \frac{v^2}{r}$$

Frage 15: Wie wird die Reibkraft berechnet?

Die Reibkraft ist vom Gleitreibungskoeffizient μ und von der Gewichtskraft abhängig. Die Formel lautet:

$$F_R = \mu \cdot m \cdot g$$

Frage 16: Wie wird die Beschleunigungskraft in Querrichtung berechnet?

Die Beschleunigungskraft in Querrichtung ist von der Querbeschleunigung und von der Masse abhängig. Die Formel zur Berechnung der Beschleunigungskraft lautet:

$$F = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

Frage 17: Wie wird die Beschleunigungskraft in Längsrichtung berechnet?

Die Beschleunigungskraft in Längsrichtung ist von der Beschleunigung und von der Masse abhängig. Die Formel zur Berechnung der Beschleunigungskraft lautet:

$$F = m \cdot a$$

Frage 18: Wie hoch ist in etwa der Gleitreibungskoeffizient Holz auf Holz in nassem, trockenem und fettigem Zustand?

Der ungefähre Gleitreibungskoeffizient liegt in nassem Zustand zwischen 0,20 und 0,25, im trockenen Zustand zwischen 0,20 und 0,50 und bei fettigen Oberflächen zwischen 0,05 und 0,15.

Frage 19: Wie hoch ist in etwa der Gleitreibungskoeffizient Metall auf Holz in nassem, trockenem und fettigem Zustand?

Der ungefähre Gleitreibungskoeffizient liegt im nassen Zustand zwischen 0,20 und 0,25, im trockenen Zustand zwischen 0,20 und 0,50 und bei fettigen Oberflächen zwischen 0,02 und 0,10.

Frage 20: In welche Richtung wirkt auf einer geraden Ladefläche die Reibkraft im Verhältnis zur Massenträgheitskraft?

Die Reibkraft wirkt immer entgegengesetzt zur Massenträgheitskraft.

Frage 21: In welche Richtung wirkt auf einer geraden Ladefläche die Reibkraft im Verhältnis zur Gewichtskraft?

Die Reibkraft wirkt senkrecht zur Gewichtskraft.

Frage 22: Wie viel beträgt überschlägig die Gewichtskraft (in Dekanewton) für ein Ladegut mit der Masse $m = 1500 \text{ kg}$ bei einem Gleitreibungskoeffizient von $\mu = 0,2$ und einer Beschleunigung von $1,0 \text{ g}$?

Die Gewichtskraft in daN entspricht der Masse in kg, sie beträgt also ungefähr 1500 daN. Der Gleitreibungskoeffizient und die Beschleunigung sind für die Gewichtskraft bedeutungslos.

Frage 23: Wie viel beträgt überschlägig die Reibkraft (in Dekanewton) für ein Ladegut mit der Masse $m = 1500 \text{ kg}$ bei einem Gleitreibungskoeffizient von $\mu = 0,2$ und einer Beschleunigung von $1,0 \text{ g}$?

Die Reibkraft in daN entspricht dem Produkt aus Gleitreibungskoeffizient und der Masse in kg, sie beträgt also ungefähr $0,2 \cdot 1500 = 300 \text{ daN}$.

Frage 24: Wie viel beträgt überschlägig die Beschleunigungskraft (in Dekanewton) für ein Ladegut mit der Masse $m = 1500 \text{ kg}$ bei einem Gleitreibungskoeffizient von $\mu = 0,2$ und einer Beschleunigung von $1,0 \text{ g}$?

Die Beschleunigungskraft in daN entspricht dem Produkt aus der Masse in kg und der Beschleunigung in g, sie beträgt also ungefähr 1500 daN. Der Gleitreibungskoeffizient ist für die Beschleunigungskraft bedeutungslos.

Frage 25: Wie viel beträgt überschlägig die Sicherungskraft (in Dekanewton) für ein Ladegut mit der Masse $m = 1500 \text{ kg}$ bei einem Gleitreibungskoeffizient von $\mu = 0,2$ und einer Beschleunigung von $1,0 \text{ g}$?

Die Beschleunigungskraft in daN entspricht dem Produkt aus der Masse in kg und der Beschleunigung in g, sie beträgt also ungefähr 1500 daN . Die Reibkraft in daN entspricht dem Produkt aus Gleitreibungskoeffizient und der Masse in kg, sie beträgt also ungefähr $0,2 \cdot 1500 = 300 \text{ daN}$. Die erforderliche Sicherungskraft muss die Differenz aus Beschleunigungskraft und Gleitreibungskoeffizient abdecken. Sie beträgt $1500 - 300 = 1200 \text{ daN}$