

Ladungssicherung im Straßenverkehr – Wer kennt die Wahrheit?

Vorwort.....	1
Einleitung.....	2
1. Untersuchung der Lastannahmen.....	3
1.1 Vollbremsung.....	3
1.2 Kurvenfahrt.....	5
1.3 Spurwechsel.....	7
1.4 Ausweichen.....	8
1.5 Wankfaktor.....	9
2. Konventionelle Regeln und Berechnungsverfahren.....	12
2.1 Direktzurrung.....	12
2.1.1 Rutschsicherung.....	12
2.1.2 Kippsicherung.....	13
2.2 Niederzurrung.....	15
2.2.1 Rutschsicherung.....	15
2.2.2 Kippsicherung.....	16
3. Erweiterte Betrachtungsweisen.....	18
3.1 Ladungsbewegungen.....	18
3.2 Formänderung und Kraftaufnahme von Sicherungsmitteln.....	20
3.3 Horizontalkomponenten von Niederzurrungen.....	21
3.4 Semi-dynamischer Rechenansatz.....	23
3.4.1 Iteratives Verfahren.....	24
3.4.2 Selektive Verfahren.....	24
3.5 Volldynamischer Rechenansatz.....	25
4. Fallbeispiele.....	25
4.1 Direktsicherung in Längsrichtung mit Gurten und Holzblockierung.....	25
4.2 Direktsicherung mit Ketten unter ungünstigen Winkeln.....	27
4.3 Rutschsicherung in Längsrichtung mit schlaffer Niederzurrung.....	28
4.4 Rutschsicherung in Querrichtung mit schlaffer Niederzurrung.....	30
5. Zusammenfassung, Ausblick und Zielsetzung.....	31
5.1 Lastannahmen.....	31
5.2 Wankfaktor.....	31
5.3 Konventionelle Bilanz-Rechenverfahren.....	32
5.4 Ladungsbewegungen und Formänderung von Sicherungsmitteln.....	32
5.5 Rechenverfahren.....	33

Vorwort

Wer auch nur halbwegs regelmäßig die Fachpresse verfolgt oder im Internet unter bestimmten Stichworten sucht, wird schnell feststellen, dass seit einigen Jahren die heile Welt der bisherigen "Verkündigungen" zur Ladungssicherung im Straßenverkehr in Unordnung geraten ist.

Was ist passiert? Europa wächst zusammen. Der Gütertransport auf Straße, Schiene und zu Wasser hat weiter zugenommen und der verständliche Ruf nach einheitlichen Regeln, nicht nur zur Ladungssicherung, ist erhört worden.

Ein Normenentwurf ist auf den Weg gebracht worden, der europaweit für einen sicheren Standard sorgen soll, die DIN EN 12195-1, inzwischen mehrfach revidiert und von der Praxis mit unterschiedlichen Kommentaren begleitet. Die einflussnehmenden Interessen sind verständlicherweise vielschichtig, bis hin zur Bezugnahme auf Regelwerke der IMO, die als Unterorganisation der UNO wahrhaftig nicht für den Straßenverkehr in Europa zuständig ist.

Die letzte Fassung des Normentwurfs stellt den im September 2008 ausgehandelten Kompromiss dar, der in weiten Teilen wieder der VDI-Richtlinie 2700, Teil 2 vom November 2002 entspricht, aber zwischenzeitliche "Erkenntnisse" außer acht lässt. Dazu zählt aus deutscher Sicht der k-Faktor bei einseitig gespannter Niederzurrung, die Behandlung der Reibbeiwerte

und der Wankfaktor, aus Sicht einiger anderer europäischer Vertreter der nach vorn anzunehmende g-Wert für die Bemessung ausreichender Ladungssicherung.

Das wird von Kritikern beklagt, die mit ernst zu nehmender Sorge eine Sicherheitseinbuße befürchten und mit Recht darauf pochen, dass die Physik sich nicht geändert habe und die bisherigen (deutschen) Regeln weiter gelten müssen.

Die Physik hat sich mit Gewissheit nicht geändert, aber wie viel Physik ist in den bisherigen, stark vereinfachten Rechenmodellen zur Ladungssicherung überhaupt zur Anwendung gekommen? Die Modelle sollten leicht zu durchschauen und zu handhaben sein. Welche Abstriche sind gemacht worden? Könnte es sein, dass der intuitive Widerstand der Praxis gegen eine unter bestimmten Bedingungen unsinnig hohe Zahl von Niederzurrungen in manchen Fällen berechtigt ist, weil diese hohe Zahl durch Mängel im verwendeten Rechenmodell entstanden sein könnte? Die Physik wäre dafür nicht verantwortlich.

Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GdV) hat es deshalb unternommen, bei der anstehenden Überarbeitung des 1997 herausgegebenen Ladungssicherungshandbuchs die physikalischen Grundlagen zu untersuchen, die in den bisherigen Regeln zur Bemessung ausreichender Ladungssicherung verwendet worden sind. Man kann diese Grundlagen leicht aus den verwendeten Rechenmodellen erschließen, nicht aber die Begründung für getroffene Vereinfachungen und Annahmen. Es erschien daher unausweichlich, weiter auszuholen und nachzusehen, was wirklich mit der Ladung passiert, wenn ein LKW eine Vollbremsung macht oder einen schnellen Spurwechsel fährt.

Die nicht überraschende Erkenntnis war, dass die Vereinfachungen in den bisher verwendeten Rechenmodellen tatsächlich nicht vertretbare Abweichungen von der Realität enthalten, die teilweise auf der sicheren Seite, aber auch merklich auf der unsicheren Seite liegen. Ungeachtet der Notwendigkeit, im zukünftigen Ladungssicherungshandbuch einfache Regeln zur ausreichenden Ladungssicherung darzustellen, war es daher notwendig, alle Einflussgrößen für die Ladungssicherung auf den Prüfstand zu stellen.

Einleitung

Abgesehen von der grundsätzlichen Infragestellung der vereinfachten Rechenmodelle ist bei einer solchen Revision auch auf veränderte Rahmenbedingungen zu achten.

Heutige Nutzfahrzeuge haben leistungsfähigere Bremsen und Lenkhilfen. Die zu erwartenden Beschleunigungen sind daher höher. Die Straßen sind besser und die Motoren stärker, was zu höheren Geschwindigkeiten führt. Beladungstechniken sind mechanisiert und durchrationalisiert, was nicht immer die Voraussetzungen für wirksame Ladungssicherung verbessert. Hinzu kommen Zeitdruck und Personalmangel mit dem Resultat, dass Aufwand für und Qualität von Ladungssicherung bedroht sein können.

Andererseits stehen bessere Ladungssicherungsmittel zur Verfügung und die Verfügbarkeit von Rechenprogrammen macht komplexere Rechenmodelle für Planung und Prüfung von Sicherungskonzepten attraktiv. Die Internationalisierung der Verkehrsströme macht homogene Vorschriften für eine wirksame Kontrolle erforderlich. Es können und müssen also rechtssichere und physikalisch vernünftige Berechnungsverfahren entwickelt werden.

All diese Gesichtspunkte sind zu berücksichtigen. Wichtig ist am Ende, dass vereinfachte Regeln und Rechenansätze nur in Begleitung der zugrunde liegenden Gedankengänge und Herleitungen veröffentlicht werden, damit niemand Gefahr läuft, die Vereinfachungen als getreue Abbilder der Wirklichkeit zu nehmen und sie unter Berufung auf die Physik auszu-schlachten.

1. Untersuchung der Lastannahmen

Wegen der großen Streuung der Fahrzeugeigenschaften, der Straßenverhältnisse und des individuellen Fahrverhaltens werden in der bisherigen Rechenpraxis alles umfassende pauschale Beschleunigungswerte für den Güterverkehr auf Straßen verwendet. Diese sind nach derzeitigem Konsens in Deutschland und in einigen weiteren europäischen Ländern:

Nach vorn:	0,8 g
Nach hinten:	0,5 g
Seitwärts:	0,5 g

In einer Reihe von anderen europäischen Ländern gilt als Lastannahme nach vorn der Wert von 1,0 g.

Die senkrecht zur Ladefläche wirkende Kraft, die sowohl für die Reibung auf der Ladefläche als auch für das Eigenstandmoment einer Ladungseinheit wichtig ist, wird mit 1,0 g, also der vollen Erdbeschleunigung berechnet.

Um den wirklichen Verhältnissen etwas näher zu kommen, werden typische Grenzfälle von Belastungen untersucht. Unfallereignisse sind dabei ausgeschlossen.

1.1 Vollbremsung

Die Vollbremsung stellt die größte Belastung der Ladungssicherung nach vorn dar. Der neuere Stand der Entwicklung von LKW-Reifen lässt zusammen mit modernen Bremsanlagen und Asphaltstraßen Bremsverzögerungen zu, die durchaus an 0,8 g heranreichen¹. Dabei spielen weitere Faktoren eine Rolle, wie z.B. die Verteilung der Achslasten.

Die Ladefläche eines Lastkraftwagen oder eines Sattelauflegers ist nicht starr, sondern elastisch mit der Bremsfläche der Reifen verbunden, so dass die Trägheitskraft der Ladung nicht unmittelbar aus der Bremsverzögerung folgt, sondern zunächst ein Ankippen der Ladefläche nach vorn auslöst. Dieser sogenannte Nickwinkel ist im Verlauf der Vollbremsung nicht stationär, sondern wird von Nickschwingungen überlagert. Die Amplitude der Nickschwingungen hängt sehr stark von der Schwellzeit ab, also von der Dauer des Anstiegs der Bremskraft bis zu ihrem vollen Wert.

Während einer Vollbremsung wirken im Koordinatensystem der Ladefläche folgende Kräfte auf die Ladung nach vorn (parallel zur Ladefläche):

- Trägheitskraftkomponente aus dem Bremsvorgang,
- Hangabtrieb infolge geodätischer Ladeflächenneigung (Nickwinkel und Straßengefälle),
- Trägheitskraft infolge Tangentialbeschleunigung aus überlagerter Nickschwingung.

Die von der Ladung auf die Ladefläche wirkende Normalkraft wird dabei in der Regel aus zwei Ursachen verringert, nämlich durch die infolge der Ladeflächenneigung

- nach oben gerichtete Vertikalkomponente der Trägheitskraft,
- verringerte Normalkomponente der Gewichtskraft.

Die nach oben gerichtete Vertikalkomponente der Trägheitskraft sowie die verringerte Normalkraft infolge geodätischer Ladeflächenneigung verringern sowohl die Reibung zur Ladefläche als auch das Standmoment einer Ladungseinheit.

¹ vergl. H. Huinink; "Das 30 m - Auto", VDA Tagung, Bad Homburg, 2001

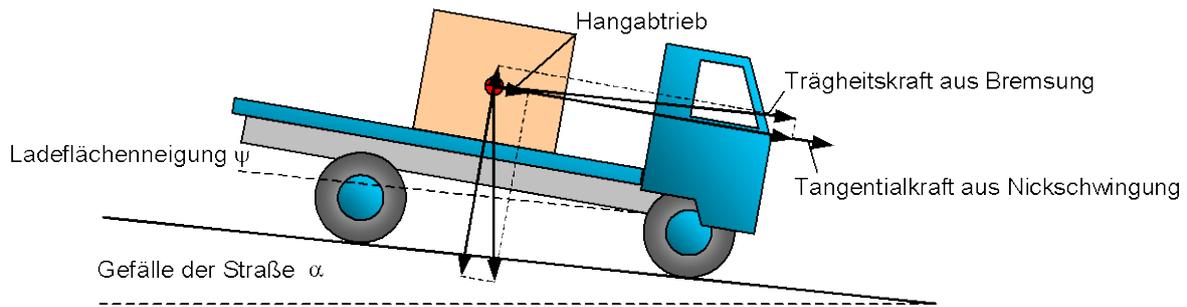


Bild 1: Scharfes Bremsen auf abschüssiger Straße

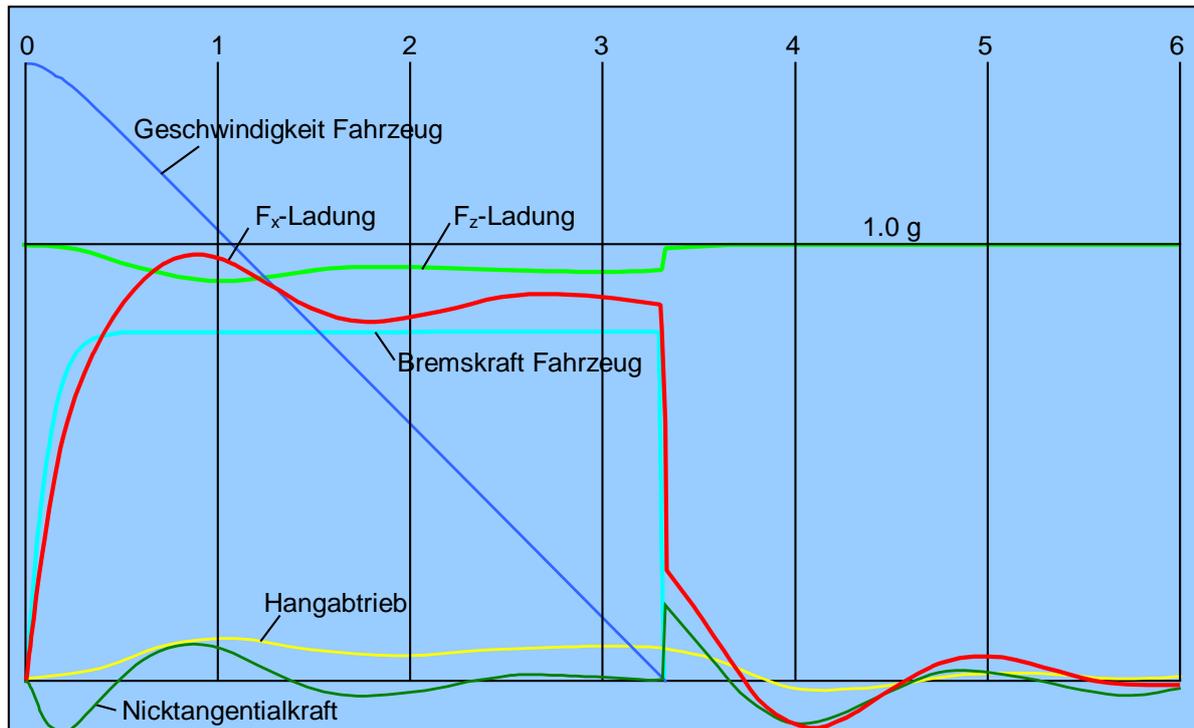


Bild 2: Vollbremsung auf ebener Straße aus 90 km/h mit 0,8 g Bremsverzögerung und 0,3 s Schwellzeit; Bremsweg = 42,9 m

Bild 2 zeigt die numerische Lösung der Bewegungsgleichungen über einen Zeitraum von 6 Sekunden. Die auf die Ladung wirkenden Kräfte sind in Einheiten von g umgerechnet dargestellt worden. Das Fahrzeug steht nach ca. 3,3 Sekunden.

Der LKW ist so beladen, dass sich bei 0,8 g Verzögerung ein stationärer Nickwinkel von 4° ergibt. Der maximale Nickwinkel nach 0,9 Sekunden beträgt $5,5^\circ$ auf Grund der überlagerten Nickschwingung. Diese ist stark gedämpft und klingt bis zum Stillstand des Fahrzeugs weitgehend ab, erhält aber durch den bekannten Ruck am Ende des Bremsvorgangs nochmals eine Anregung.

Die maximale Längskraft auf die Ladung bei 0,9 Sekunden entspricht 0,98 g. Dort ist gleichzeitig die Normalkraft auf 0,92 g zurück gefallen.

Zahlreiche weitere simulierte Vollbremsungen mit anderen Geschwindigkeiten, ansteigendem und abfallendem Straßengefälle und anderen Fahrzeugtypen (z.B. Sattelaufliieger mit kleinerem Nickwinkel) zeigen ähnliche Verläufe. Es lassen sich folgende, allgemeine Erkenntnisse ableiten:

- Wenn mit einer Bremskraftübertragung entsprechend 0,8 g gerechnet wird, muss die Ladungssicherung auf knapp 1,0 g ausgelegt sein, weil durch Hangabtrieb aus dem Nick-

winkel, verstärkt durch Tangentialkraft aus überlagerter Nickschwingung knapp 0,2 g hinzu kommen.

- Vollbremsungen aus geringeren Anfangsgeschwindigkeiten zeigen nur unwesentlich günstigere Ergebnisse. Erst bei Geschwindigkeiten unter 15 km/h kann es dazu kommen, dass das Fahrzeug bereits steht, bevor die maximale Längskraft erreicht worden ist.
- Sattelaufleger, bei denen der Nickwinkel mit dem halben Wert angenommen worden ist, erfahren um ca. 3% kleinere Längskräfte und einen um 4% geringeren Abbau der Normalkraft. Diese Vergünstigung fällt deshalb nicht deutlicher aus, weil gleichzeitig die Nickschwingungsperiode kürzer wird und die Amplituden der Nickschwingungen nur unwesentlich kleiner werden gegenüber einem Fahrzeug mit 4° stationärem Nickwinkel.
- Je steifer eine Ladefläche gelagert ist, d.h. je weniger sie auf Verzögerung mit einem Nickwinkel und mit Nickschwingungen reagiert, desto mehr nähert sich die auf die Ladung wirkende Längskraft der reinen Trägheitskraft aus der Bremsverzögerung an.
- Sanftere Bremsvorgänge mit Schwellzeiten über 2 Sekunden zeigen kaum noch überlagerte Nickschwingungen. Rechnet man mit 0,8 g maximaler Bremsverzögerung, so ist der Zuschlag nur noch für den Hangabtrieb aus stationärem Nickwinkel zu machen. Der Zuschlag ergibt sich aus dem Sinus dieses Winkels.
- Bei einer Vollbremsung bergauf aus 50 km/h wird die Bremskraft durch den Hangabtrieb unterstützt und der Bremsweg dadurch deutlich kürzer als auf ebener Straße. Der effektive Nickwinkel wird allerdings durch die nach hinten gerichtete Straßenneigung verkleinert, so dass der Unterschied in der Längskraft auf die Ladung gegenüber der Situation auf ebener Straße fast ausgeglichen wird. Unter den gewählten Randbedingungen gemäß Bild 2 ist die Ladung gegen eine Beschleunigungen von 0,99 g zu sichern.
- Bei einer Vollbremsung bergab aus 50 km/h ist die Längskraft auf die Ladung etwas kleiner als bei einer Vollbremsung auf ebener Straße. Die effektive Bremskraft ist kleiner und der Bremsweg größer. Allerdings wird der Hangabtrieb durch die Straßenneigung vergrößert. Unter den gewählten Randbedingungen ist die Ladung gegen eine Beschleunigungen von 0,96 g zu sichern.
- Rechenverfahren zur Bemessung der Ladungssicherung in Längsrichtung sollten in geeigneter Weise den Abbau der Normalkraft berücksichtigen.

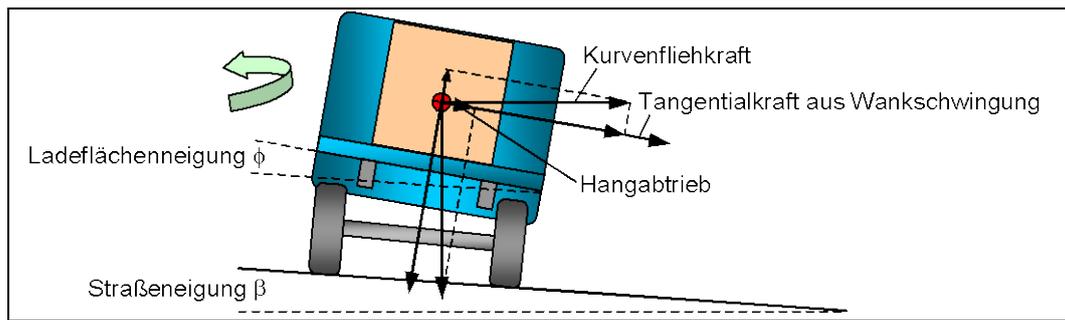
1.2 Kurvenfahrt

Bei einer engen Kurvenfahrt treten ähnliche Vorgänge auf wie bei einer Vollbremsung. In der stationären Phase der Kurvenfahrt ist die Ladefläche seitlich um einen Wankwinkel geneigt. Ein rascher Aufbau der Fliehkraft bis zu ihrem Maximalwert führt zu einer Wankschwingung mit Amplituden, die dem stationären Wankwinkel überlagert sind. Die ladeflächenparallele Querkraft auf die Ladung setzt sich daher zusammen aus:

- Fliehkraftkomponente aus Kurvenfahrt,
- Hangabtrieb infolge geodätischer Ladeflächenneigung,
- Trägheitskraft infolge Tangentialbeschleunigung aus einer Wankschwingung.

Auch hier wird die von der Ladung auf die Ladefläche wirkende Normalkraft aus zwei Ursachen verringert, nämlich durch die infolge der Ladeflächenneigung

- nach oben gerichtete Vertikalkomponente der Kurvenfliehkraft,
- verringerte Normalkomponente der Gewichtskraft.

Bild 3: Kurvenfahrt mit ungünstiger Straßenneigung β

Anders als in Längsrichtung wird hier die Fliehkraft im geodätischen Bezugssystem horizontal angesetzt, also nicht parallel zur Straßenneigung. Somit hat die Straßenneigung durch den Hangabtrieb einen direkten Einfluss auf die Komponenten der Fliehkraft, die auf die Ladung wirken.

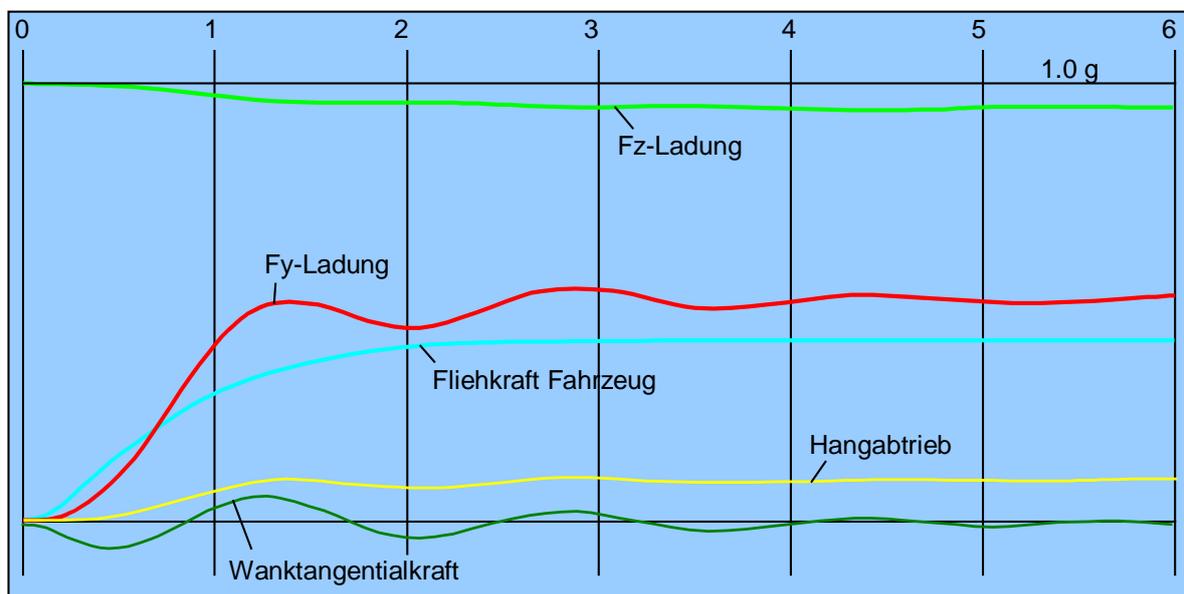


Bild 4: Kurvenfahrt auf ebener Straße mit 0,42 g Fliehbeschleunigung und 0,54 g maximaler Querbeschleunigung, maximale Wankamplitude = 5,8°.

Bild 4 zeigt die numerische Lösung der Bewegungsgleichungen über einen Zeitraum von 6 Sekunden. Die auf die Ladung wirkenden Kräfte sind in Einheiten von g umgerechnet dargestellt worden.

Die maximale Fliehbeschleunigung ist mit 0,42 g bewusst so gewählt worden, dass sich nach dem Abklingen der Wankschwingungen eine stationäre Querbeschleunigung von 0,50 g einstellt. Durch die erste Wankamplitude ergibt sich dadurch eine maximale Querbeschleunigung von 0,54 g. Dieser Wert wächst, wenn man die Schwellzeit verkürzt oder die Dämpfung der Wankschwingungen verringert.

Weitere simulierte Kurvenfahrten mit anderen Federwerten der Ladefläche sowie günstiger und ungünstiger Kurvenneigung der Straße zeigen vergleichbare Verläufe. Es lassen sich folgende, allgemeine Erkenntnisse ableiten:

- Die allgemein akzeptierte Annahme einer Querbeschleunigung von 0,5 g zur Bemessung der Ladungssicherung gegen Rutschen zur Seite darf nicht so interpretiert werden, dass dieser Wert allein der Fliehkraft zugeschrieben werden dürfe. Vielmehr müssen zwischen 20 und 30% dieses Wertes dem Hangabtrieb aus Ladeflächenneigung und den Tangentialkräften aus überlagerten Wankschwingungen reserviert bleiben.

- Die Ladeflächenneigung ist in stationärer Kurvenfahrt auch noch nach dem Abklingen der Wankschwingungen vorhanden und steuert knapp 20% zur Querbeschleunigung bei.
- Die Querkraftzuschläge aus Hangabtrieb und Tangentialkraft haben nichts mit dem sogenannten Wankfaktor zu tun, der in der VDI Richtlinie 2700 Blatt 2 gefordert wird. Der Wankfaktor berücksichtigt dynamische Kippmomente, während die genannten Zuschläge im Schwerpunkt angreifende Kräfte sind.
- In günstig ausgebauten Kurven (Straßenneigung zum Kurvenmittelpunkt hin) wird der Hangabtrieb durch die Straßenneigung teilweise kompensiert. Bei ungünstiger Straßenneigung tritt das Gegenteil ein.
- Steifere Ladeflächenaufhängungen führen wie schon bei der Vollbremsung zu geringeren Wankwinkeln und damit zu einer Annäherung der Querkräfte an die reinen Fliehkräfte.
- Langsameres Einleiten der Kurvenfahrt mit Schwellzeiten deutlich über zwei Sekunden lassen die überlagerten Wankschwingungen bei ausreichender Dämpfung bedeutungslos werden, weil die anfänglichen Amplituden in den Bereich der noch ansteigenden Fliehkraft fallen.
- Die Normalkraft aus einer betrachteten Ladungseinheit ist größenordnungsmäßig um 5% verringert. Das wirkt sich sowohl auf die Reibung als auch auf die Standfestigkeit negativ aus.

1.3 Spurwechsel

Zu den problematischen Fahrsituationen wird auch der schnelle Spurwechsel gezählt. Aus Veröffentlichungen² kann entnommen werden, dass der klassische Spurwechsel für einen LKW einen seitlichen Versatz von 3,75 m hat und mit 4 Sekunden Dauer als sehr schneller Spurwechsel gelten kann.

Die Analyse eines solchen Spurwechsels geht von der gefahrenen geometrischen Kontur der Fahrzeugschwerpunkts aus. Diese Kontur wird vielfach durch eine "schräge Sinuslinie" dargestellt. Es gibt jedoch auch andere sinnvolle Abbildungsfunktionen. Die zweite Ableitung der Abbildungsfunktion nach der Zeit ergibt den Verlauf der Querbeschleunigung des Fahrzeugs, die mit guter Näherung der Fliehkraft gleichgesetzt werden kann. Eine genauere Darstellung der Fliehkraft mit Hilfe des Kurvenradius bringt bei den üblich schlanken Kurvenverläufen keinen nennenswerten Unterschied.

Schräge Sinuslinie:
$$y = \frac{y_{\max}}{x_{\max}} \cdot x - \frac{y_{\max}}{2\pi} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{x_{\max}} \cdot x\right) [\text{m}]$$

Alternativer Spurwechselverlauf:
$$y = y_{\max} \cdot (1 - e^{-s \cdot x})^2 [\text{m}]$$

² Aufsatz von Schulze, Becke in VerkehrsrechtsReport im ZAP-Verlag, Münster, 4/2007

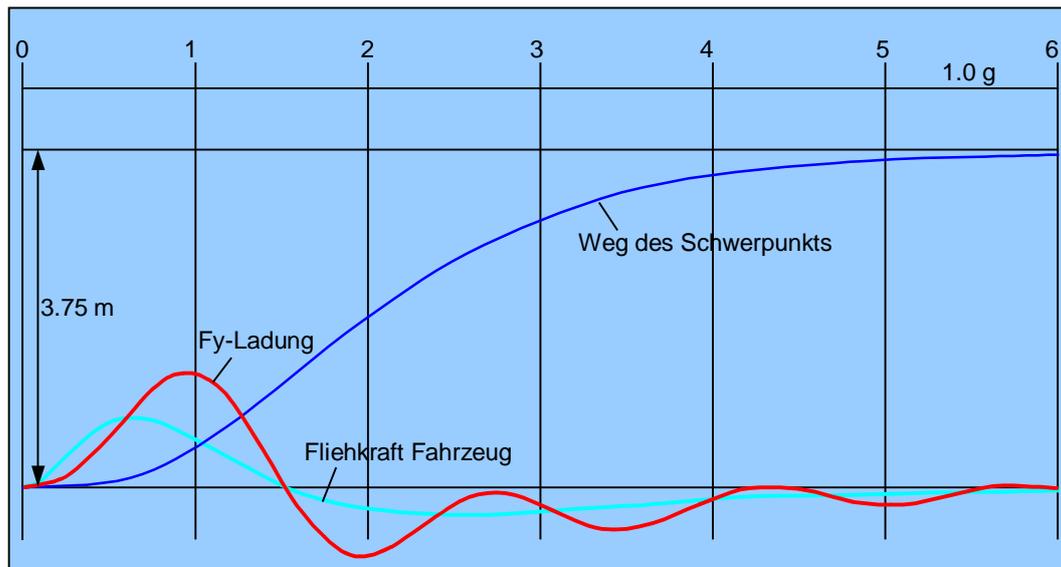


Bild 5: Spurwechsel nach dem alternativen Rechenverlauf

Der in Bild 5 gezeigte Spurwechsel ist nach dem alternativen, asymmetrischen Verlauf gerechnet worden. Die Spurwechselzeit von 4 Sekunden wird, um Vergleichbarkeit mit der schrägen Sinuslinie in der ersten Hälfte zu erhalten, mit dem Doppelten der für die halbe Querdistanz benötigten Zeit bestimmt.

Es handelt sich mit 2 Sekunden Halbwertszeit bereit um einen sehr schnellen Spurwechsel. Die auf die Ladung wirkende Querkraft erreicht knapp 0,3 g nach etwa einer Sekunde und ist gegen die deutlich kleinere Fliehkraft bereits merklich phasenversetzt. Die Wankschwingungen sind ausgeprägt. Ein resonantes Aufschaukeln ist aber nicht zu verzeichnen.

Eine Reihe von Testläufen mit geänderten Eingangsgrößen lässt folgende allgemeine Erkenntnisse ableiten:

- Selbst extrem kurze Spurwechselzeiten führen nicht zu Quereschleunigungen von mehr als 0,5 g. Eine Spurwechselzeit von z.B. 3 Sekunden (1,5 Sekunden Halbwertszeit) liefert 0,48 g. Diese Zeit ist aber mit einem LKW nach verfügbaren Quellen nicht zu erreichen.
- Wird die Dämpfung der Wankschwingungen verkleinert, so steigen die Quereschleunigungen leicht an, während größere Wanksteifigkeit die Werte verkleinert.
- Die Verkleinerung der Normalkraft ist vernachlässigbar gering, weil die Wankwinkel nur kleine Werte erreichen.
- Die deutliche Phasenverschiebung lässt auf beginnende Resonanz zwischen Wankschwingungen und Lenkeinschlägen schließen. Resonanz müsste sich deutlich bemerkbar machen, wenn die halbe Wankperiode gleich der Halbwertszeit des Spurwechsels ist. Das Ergebnis wäre ein größerer Quereschleunigungswert in der zweiten Halbschwingung des Wankvorgangs.

1.4 Ausweichen

Die geschilderte Beobachtung einer beginnenden Resonanz bei kurzen Spurwechseln war der Anlass, ein spurwechselähnliches Ausweichmanöver zu untersuchen, bei dem die Querdistanz deutlich kleiner ist und damit auch die erreichbare Spurwechselzeit kürzer sein kann. Da praktische Beobachtungen nicht vorlagen, wurde erfahrenen LKW-Fahrern die Frage vorgelegt, ob es möglich sei, innerhalb von 1,5 Sekunden einen beladenen LKW einen Spurwechsel mit einem Meter seitlichem Versatz zu fahren. Die Antworten waren positiv, bezeichneten aber ein solches Manöver "aus dem Bauch" heraus als grenzwertig.

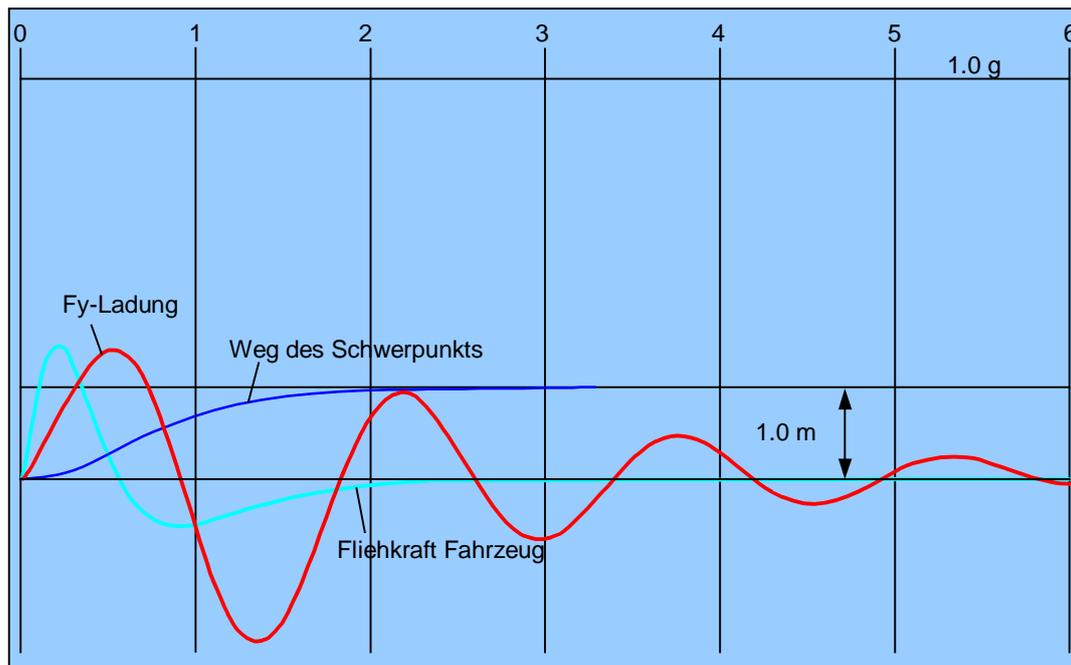


Bild 6: Ausweichen um 1,0 m mit 0,75 s Halbwertzeit

Die Ergebnisse bestätigen die Erwartungen. Bild 6 zeigt das Ausweichmanöver um 1 Meter seitwärts mit einer Halbwertzeit von 0,75 Sekunden. Die Kräfte sind auf Beschleunigungen in der Einheit g normiert dargestellt. Die Querkraft auf die Ladung ist deutlich phasenversetzt gegenüber der Fliehkraft mit einem Schwingungsversatz von ca. $\pi/2$. Das bedeutet, dass zumindest das erste Maximum der Querkraft, entsprechend 0,32 g, sich allein aus Hangabtrieb und Tangentialkraft zusammensetzt, weil die Fliehkraft dort gleich Null ist. Das zweite Maximum ist absolut größer als das erste und erreicht 0,41 g. Auch in diesem Maximum dominiert die Tangentialbeschleunigung aus der Wankschwingung. Der Anstieg von 0,32 g auf 0,41 g ist auf resonante Anregung zurückzuführen.

Somit ist als Erkenntnis zu werten, dass extrem kurze, spurwechselähnliche Ausweichmanöver (Gegenstände auf der Fahrbahn!) zwar noch nicht unbedingt Querbeschleunigungen über 0,5 g verursachen, aber bedeutende Wankbeschleunigungen enthalten, die u.a. für die Beurteilung des Wankfaktors herangezogen werden müssen.

1.5 Wankfaktor

Der Wankfaktor ist durch die VDI-Richtlinie 2700 eingeführt worden und steht für die "Berücksichtigung von dynamischen Kippmomenten durch eine instationäre Seitenneigung bzw. durch Winkelbeschleunigungen aus Wankschwingungen des Fahrzeugs um seine Längsachse". Diese Beschreibung ist eindeutig und vollständig. Es geht um dynamische Kippmomente.

Das quasistatische Kippmoment auf eine Ladungseinheit ergibt sich aus der Kraft F_x bzw. F_y , die in ihrem Schwerpunkt angreift, multipliziert mit dem Abstand d dieses Kraftvektors von der wirksamen Kippachse (Bild 7 links). Die Kraft F_x bzw. F_y ist auch die Kraft, die bei der Sicherung der Ladung gegen Rutschen berücksichtigt werden muss.

Dynamische Kippmomente in Längs- bzw. Querrichtung ergeben sich aus der Rotationsträgheit der Ladungsmasse gegenüber den Winkelbeschleunigungen durch Nick- bzw. Wankschwingungen. Diese führen zu einem "dynamischen" Drehmoment an der betreffenden Ladungseinheit, welches von der Lage von Kippachse und Ladungsschwerpunkt unabhängig ist (Bild 7 rechts). Für die Größe dieses Zusatzmoments gilt:

$$\text{Querrichtung: } M_{\text{dyn}} = -J \cdot \ddot{\phi} \quad [\text{N}\cdot\text{m}]$$

$$\text{Längsrichtung: } M_{\text{dyn}} = -J \cdot \ddot{\psi} \quad [\text{N}\cdot\text{m}]$$

Das Rotationsträgheitsmoment J um eine Achse durch den Schwerpunkt kann für quaderförmige, homogene bzw. hohle Ladungseinheiten angenähert bestimmt werden durch:

$$J_{\text{homogen}} \approx m \cdot \left(\frac{b^2 + h^2}{12} \right) [\text{kg}\cdot\text{m}^2] \quad J_{\text{hohl}} \approx m \cdot \left(\frac{(b+h)^2}{12} \right) [\text{kg}\cdot\text{m}^2]$$

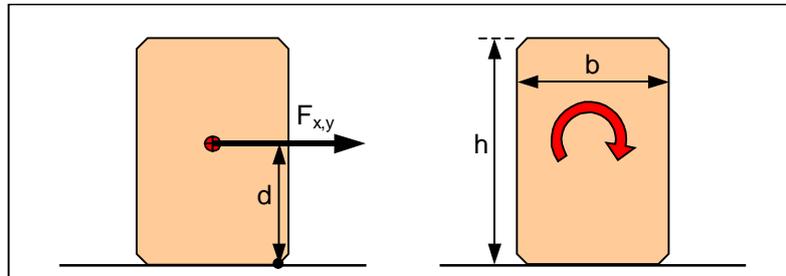


Bild 7: Statisches und dynamisches Kippmoment

Die anzuwendende VDI-Richtlinie 2700, Blatt 2 fordert zur Sicherung kippgefährdeter Ladungseinheiten einen Zuschlag von 0,2 g zur seitwärts gerichteten Beschleunigungsannahme von 0,5 g. Der Wankfaktor wird ausdrücklich nicht zur Prüfung und Bemessung der Sicherung gegen Rutschen dieser kippgefährdeten Ladungseinheiten verwendet.

Zur Überprüfung der angemessenen Größenordnung dieses Wankfaktors wird die Rotationsträgheit einer kippgefährdeten Ladungseinheit ($h \geq 2 \cdot b$) von maximaler Höhe (Straßenverkehr: $h = 3$ m) in einen Zuschlag w zur Querbeschleunigung umgerechnet.

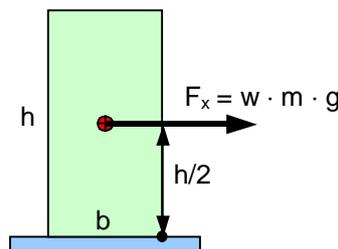


Bild 8: Zur Umrechnung des Rotationskippmoments in einen Wankfaktor

$$\text{Kippmoment aus Rotationsträgheit: } M_{\text{dyn}} = m \cdot \ddot{\phi} \cdot \left(\frac{b^2 + h^2}{12} \right) \quad \text{bis} \quad m \cdot \ddot{\phi} \cdot \left(\frac{(b+h)^2}{12} \right) \quad [\text{N}\cdot\text{m}]$$

$$\text{Äquivalentes Kippmoment: } M_{\text{äqu}} = w \cdot m \cdot g \cdot h / 2 \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (w = \text{Wankfaktor})$$

$$\text{Beschleunigungszuschlag homogen: } w = \frac{m \cdot \ddot{\phi} \cdot (b^2 + h^2) / 12}{m \cdot g \cdot h / 2} = \ddot{\phi} \cdot \frac{h \cdot 1,25}{6 \cdot g} = 0,0637 \cdot \ddot{\phi}$$

$$\text{Beschleunigungszuschlag hohl: } w = \frac{m \cdot \ddot{\phi} \cdot (b+h)^2 / 12}{m \cdot g \cdot h / 2} = \ddot{\phi} \cdot \frac{h \cdot 2,25}{6 \cdot g} = 0,1147 \cdot \ddot{\phi}$$

Die einzusetzende Winkelbeschleunigung aus Wankschwingungen bzw. Nickschwingungen kann aus den beschriebenen Simulationsrechnungen abgeschätzt werden. Da diese Simulationen allesamt als grenzwertig angesehen werden können, sind die Ergebnisse für den genannten Zweck brauchbar.

Vollbremsung, Kurvenfahrt und Spurwechsel zeigen Maximalwerte der Winkelbeschleunigungen von $0,5 \text{ s}^{-2}$ oder weniger³. Nur das Ausweichmanöver zeigt deutlich größere Werte von bis zu $1,3 \text{ s}^{-2}$. Dabei ist aber zu beachten, dass diese hohen Winkelbeschleunigungen wegen der Phasenverschiebung durchweg zusammen mit verhältnismäßig kleinen Fliehkräften auftreten, so dass die wirksamen Querbeschleunigungen noch weit unter $0,5 \text{ g}$ bleiben. Die Notwendigkeit eines größeren Wankfaktors wird dadurch kompensiert.

Rechnet man großzügig mit Winkelbeschleunigungen bis 1 s^{-2} , so rechtfertigt dies einen Beschleunigungszuschlag für die Kippsicherung von $0,064$ bis $0,115 \text{ g}$. In den überaus meisten Fällen von Vollbremsungen, Kurvenfahrten oder Spurwechseln würde jedoch die Hälfte davon ausreichend sein. Hier besteht noch Bedarf an Messungen in der Praxis.

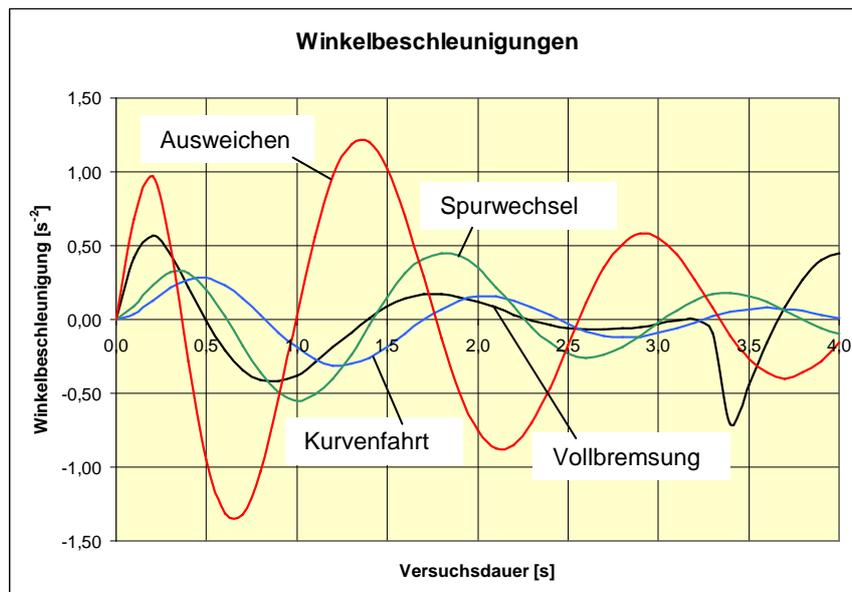


Bild 9: Winkelbeschleunigungen von Nick- bzw. Wankschwingungen

Der neuere Entwurf der DIN EN 12195-1 (01/2009) verlangt zur Kippsicherung nicht standfester Ladungseinheiten nur die Annahme von $0,6 \text{ g}$ als Querbeschleunigung, also einen Zuschlag von $0,1 \text{ g}$. In Längsrichtung des Fahrzeugs findet der Wankfaktor keine Anwendung.

Die Erkenntnis aus den vorstehenden Überlegungen lautet: Die Annahme von $0,1 \text{ g}$ als angemessenen Beschleunigungszuschlag für die Kippsicherung kippgefährdeter Ladungseinheiten kann unterstützt werden. Der Zuschlag sollte jedoch auch für die Kippsicherung solcher Ladungseinheiten in Längsrichtung verwendet werden.

³ Der höhere Ausschlag bei der Vollbremsung zum Zeitpunkt $3,4 \text{ s}$ liegt zeitgleich mit dem Wegfall der Bremskraft, also beim Stillstand des Fahrzeugs.

2. Konventionelle Regeln und Berechnungsverfahren

Konventionelle Berechnungsverfahren unterscheiden Direktzurrung und Niederzurrung und wenden beide Sicherungsprinzipien auf die Ziele Rutschsicherung und Kippsicherung an. Das Sicherungsprinzip der Kompaktierung, welches im Gütertransport auf der Straße häufig in Form von Umreifung oder Bündelung vorkommt, wird rechnerisch kaum geprüft.

Nachstehend werden die konventionellen Berechnungsverfahren kurz vorgestellt mit Hervorhebung der Rahmenbedingungen und vereinfachenden Annahmen. Um jüngste Entwicklungstendenzen deutlich zu machen, werden die Rechenkonventionen von drei Regelwerken vorgestellt und gegebenenfalls verglichen:

Quelle [1] VDI 2700, Blatt 2 vom November 2002,

Quelle [2] DIN EN 12195-1 vom April 2004,

Quelle [3] DIN EN 12195-1 vom Januar 2009.

Die Bezeichnungsweise der Rechengrößen in den Formeln ist in den genannten Regelwerken unterschiedlich. Um die Vergleichbarkeit zu erleichtern, wird für die vorliegende Darstellung folgendes vereinbart:

F = in der Rechnung angenommene Kraft im Ladungssicherungsmittel [kN]

F_x, F_y, F_z = Komponenten der Kraft im Koordinatensystem der Ladefläche [kN]

L = Länge des Ladungssicherungsmittels [m]

X, Y, Z = geometrische Komponenten der Länge L [m]

m = Ladungsmasse [t]

f_x, f_y = Beschleunigungsbeiwerte in Längs- und Querrichtung

μ = Reibbeiwert

n = Anzahl der parallelen Sicherungsmittel

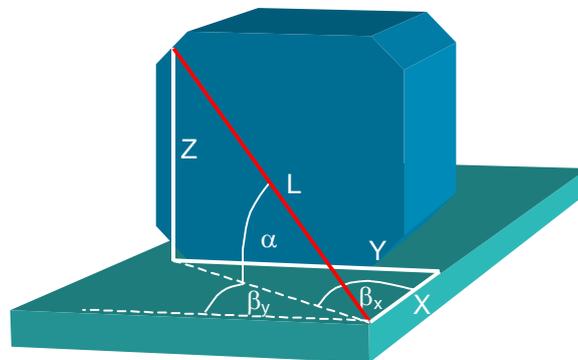


Bild 10: Räumliche Koordinaten eines Ladungssicherungsmittels

2.1 Direktzurrung

Eine Direktsicherung verbindet Ladung und Fahrzeug mit Ladungssicherungsmitteln, welche in der Lage sind, Kräfte direkt durch Zug-, Druck- oder Schubspannungen zu übertragen. Die Grenzen dieses Sicherungsprinzips sind nach konventioneller Bewertung allein durch die Belastbarkeit dieser Ladungssicherungsmittel und der beteiligten Befestigungspunkte an Ladung und Fahrzeug gegeben.

2.1.1 Rutschsicherung

Die Bilanzen stellen die auf die Ladungsmasse bezogene Lastannahme der Reibung und der Wirkung der Zurrmittel gegenüber. Die Reibung wird generell unter Verwendung des Gleitreibbeiwerts und der Normalkraft = Ladungsgewicht berechnet. Die Sicherungswirkung

der Zurrmittel setzt sich aus Horizontalkomponente und der mit dem Gleitreibbeiwert multiplizierten Vertikalkomponente zusammen.

Die Bilanz in Quelle [1] für die Querrichtung lautet:

$$m \cdot g \cdot f_y \leq m \cdot g \cdot \mu + n \cdot F \cdot \frac{Y + \mu \cdot Z}{L}$$

Die Bilanzen in Längsrichtung sehen sinngemäß aus. Die Bilanzen werden nach n oder nach F aufgelöst, um den Sicherungsaufwand zu bestimmen.

Der gezeigte Ansatz wird grundsätzlich auch in den anderen Quellen verwendet. Die Quellen [2] und [3] bestimmen die Kraftkomponenten jedoch nicht mit Hilfe der Längskomponenten, sondern mit entsprechenden Winkelfunktionen der Laschwinkel α und β_x bzw. β_y . Die Beziehungen lauten:

$$X/L = \cos \alpha \cdot \cos \beta_x, \quad Y/L = \cos \alpha \cdot \cos \beta_y, \quad Z/L = \sin \alpha$$

In den Quellen [2] und [3] wird zusätzlich eine Variante der Bilanz für die Rutschsicherung mit Direktzurrung und Blockierung gezeigt. Dabei wird die Blockierkraft BC ohne Berücksichtigung der Steifigkeit der Blockierung den Sicherungskräften hinzugefügt.

$$m \cdot g \cdot f_y \leq m \cdot g \cdot \mu + n \cdot F \cdot \frac{Y + \mu \cdot Z}{L} + BC$$

In Quelle [3] werden als Reibbeiwerte sogenannte Standardwerte eingesetzt, die in der Rutschtbilanz mit dem Faktor 0,85 verringert werden. Diese Standardwerte sind Mittelwerte aus Messreihen von Haftreibbeiwerten, die mit 0,925 multipliziert wurden und Gleitreibbeiwerten, die durch 0,925 dividiert wurden, jeweils für die gleiche Materialpaarung. Die Bilanz in Querrichtung lautet dann:

$$m \cdot g \cdot f_y \leq m \cdot g \cdot 0,85 \cdot \mu + n \cdot F \cdot \frac{Y + \mu \cdot 0,85 \cdot Z}{L}$$

2.1.2 Kippsicherung

Die Kippsicherung wird nur dann geprüft, wenn die Eigenstandfestigkeit der Ladungseinheit nicht ausreicht. Die Prüfkriterien für die Eigenstandfestigkeit sind damit Bestandteil des Rechenmodells.

Nach Quelle [1] lauten die Prüfkriterien für ausreichende Eigenstandfestigkeit mit L , B , H = Länge, Breite, Höhe einer (quaderförmigen) Ladungseinheit mit Schwerpunkt im geometrischen Zentrum und $f_w = 0,2$ (Wankfaktor):

$$\text{Kippsicherheitsprüfung in Querrichtung } B : H > (f_y + f_w),$$

$$\text{Kippsicherheitsprüfung in Längsrichtung } L : H > f_x$$

Die Bilanz in Querrichtung lautet:

$$m \cdot g \cdot (f_y + f_w) \cdot H/2 \leq m \cdot g \cdot B/2 + n \cdot F \cdot \frac{H \cdot Y + B \cdot Z}{L}$$

Die Bilanzen in Längsrichtung sehen sinngemäß aus, jedoch ohne den Wankfaktor. Die Bilanzen werden nach n oder nach F aufgelöst, um den Sicherungsaufwand zu bestimmen. Auf die Möglichkeit asymmetrischer Schwerpunktlage wird nicht gesondert eingegangen.

Quelle [2] behandelt die Kippsicherung mit Hilfe von Direktzurrung unzureichend. Die Prüfkriterien für die Kippsicherheit sind wie in [1], jedoch mit einer unklaren Formulierung in

Bezug auf den bei der Prüfung zu verwendenden Querbeschleunigungsbeiwert. Eine eigene Kippbilanz wird jedoch nicht angegeben, sondern ein System von Ungleichungen, welches für einen Sicherungsfall mit Diagonalzurrung und gleichzeitiger Blockierung sowohl die Rutsicherheit als auch die Kippsicherheit nachweisen soll.

Das Ungleichungssystem ist aber nur für den Nachweis der Rutsicherheit zielführend, wenn auch unter Außerachtlassung der unterschiedlichen Lastaufnahme von Zurrung und Blockierung (siehe 2.1.1). Für den Nachweis der Kippsicherheit ist es unbrauchbar und führt leicht zu falschen Ergebnissen. Die Formeln lauten im Originaltext für die Querrichtung mit $n = 2$ Laschings pro Seite:

$$\text{Formel 17: } BC + 2 \cdot (\cos \alpha \cdot \cos \beta_y + \mu_D \cdot \sin \alpha) \cdot LC > (c_y - \mu_D \cdot c_z) \cdot m \cdot g$$

$$\text{Formel 18: } 2 \cdot (\cos \alpha \cdot \cos \beta_y + \mu_D \cdot \sin \alpha) \cdot LC > \frac{d-b}{h} \cdot (c_y - \mu_D \cdot c_z) \cdot m \cdot g$$

$$\text{Formel 19: } BC > \frac{h-d-b}{h} \cdot (c_y - \mu_D \cdot c_z) \cdot m \cdot g$$

BC = Blockierkraft [kN]

α = vertikaler Laschwinkel

β = horizontaler Laschwinkel

μ_D = Gleitreibbeiwert

LC = zulässige Zurrkraft [kN]

c_y = Querbeschleunigungsbeiwert

c_z = Vertikalbeschleunigungsbeiwert

m = Ladungsmasse [t]

g = Erdbeschleunigung [m/s^2]

Die Größen d , b , w und h werden in Bild 11 anschaulich gemacht. Bild 11 zeigt eine Sicherungssituation, wie sie in der VDI-Richtlinie 2700, Blatt 2, Bild 14 dargestellt ist.

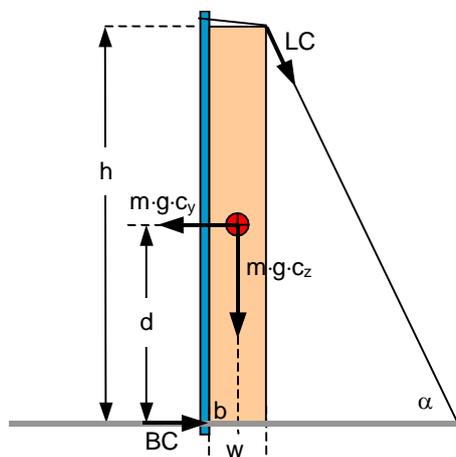


Bild 11: Zur Anwendung der Kippsicherungsprüfung nach DIN EN 12195-1

Formel 17 entspricht dem konventionellen Ansatz für den Rutsicherheitsnachweis. Formel 18 soll die Kippsicherheit durch die Zurrung nachweisen. Die Blockierung trägt zur Kippsicherheit nicht bei. Insofern ist die Formel 19 überflüssig.

Ein Rechenbeispiel zeigt die Untauglichkeit der Formel 18 mit den Werten $m = 10$ t, $c_y = 0,7$, $c_z = 1$, $h = 3,0$ m, $d = 1,5$ m, $b = 0,25$ m, $w = 0,5$ m, $\alpha = 64^\circ$, $\beta_y = 0^\circ$, $\mu_D = 0,4$, $n = 2$

$$LC_{\min} = \frac{(d-b) \cdot (c_y - \mu_D \cdot c_z) \cdot m \cdot g}{2 \cdot h \cdot (\cos \alpha \cdot \cos \beta_y + \mu_D \cdot \sin \alpha)} = \frac{1,25 \cdot 0,3 \cdot 10 \cdot 9,81}{6 \cdot (0,44 + 0,36)} = 7,66 \text{ kN}$$

Die Kippbilanz nach Quelle [1] lautet:

$$m \cdot g \cdot (f_y + f_w) \cdot H/2 \leq m \cdot g \cdot B/2 + n \cdot F \cdot \frac{H \cdot Y + B \cdot Z}{L}$$

Zur Vergleichbarkeit wird ersetzt: $H/2 = d$, $B/2 = b$, $H = h$, $B = w$. Der Winkel α liefert die Größen Y , Z und L . $Z = h = 3,0$ m, $L = h/\sin\alpha = 3,34$ m und $Y = L \cdot \cos\alpha = 1,46$ m.

$$LC_{\min} = \frac{m \cdot g \cdot ((f_y + f_w) \cdot d - b) \cdot L}{n \cdot (h \cdot Y + w \cdot Z)} = \frac{10 \cdot 9,81 \cdot (0,7 \cdot 1,5 - 0,25) \cdot 3,34}{2 \cdot (3 \cdot 1,46 + 0,5 \cdot 3)} = 22,29 \text{ kN}$$

Die Formel nach Quelle [2] zeigt in diesem Beispiel ein wesentlich zu kleines Ergebnis. Die Differenz wird umso gravierender, je größer der Reibungsbeiwert μ_D ist, der in einer Kippbilanz im Grunde nichts zu suchen hat.

Quelle [3] enthält einen verringerten Wankfaktor, indem bei kippgefährdeten Ladungseinheiten und Direktzurrung mit einem Beschleunigungsbeiwert $c_y = 0,6$ gerechnet werden soll. Die Prüfung der Kippsicherheit wird jedoch mit $c_y = 0,5$ und $c_z = 1$ vorgenommen:

$$\text{Kippsicherheitsprüfung in Querrichtung } b : d > c_y : c_z,$$

Die neu aufgenommene Kippbilanz ist der in Quelle [1] angegebenen gleichwertig. Daneben steht aber immer noch das teilweise untaugliche System von Ungleichungen, welche schon in Quelle [2] zu finden ist.

2.2 Niederzurrung

Niederzurrung wird konventionell überwiegend so behandelt, dass nur die vertikale Komponente der Vorspannkraft entweder als reibungserhöhend oder als kippsichernd eingesetzt wird. Niederzurrungen haben generell keine horizontalen Laschwinkel und werden überdies praktisch nur in Querrichtung zum Fahrzeug angebracht.

2.2.1 Rutschsicherung

Quelle [1] liefert die Rutschbilanz in der oben vereinbarten Schreibweise:

$$m \cdot g \cdot f_y \leq m \cdot g \cdot \mu + 2 \cdot n \cdot F \cdot \mu \cdot \frac{Z}{L}$$

Die Bilanz kann nach n oder F aufgelöst werden. Für F wird die Mindestvorspannkraft empfohlen, die aber 50% LC nicht überschreiten soll. Bei einseitiger Vorspannung wird empfohlen, diese auf der Spannseite zunächst höher aufzubringen, damit beim Ausgleich während der Fahrt der Vorspannungsverlust insgesamt nicht so hoch ausfällt. Ein k -Faktor wegen Reibungsverlust ist nicht vorgesehen. Für μ wird der Gleitreibbeiwert eingesetzt.

Quelle [2] übernimmt diesen Ansatz, führt jedoch bei einseitiger Vorspannung den k -Faktor ein, der den Faktor 2 (zwei niederzurrende Parten pro Überspannung) ersetzt.

$$m \cdot g \cdot f_y \leq m \cdot g \cdot \mu + k \cdot n \cdot F \cdot \mu \cdot \frac{Z}{L}$$

Bei einseitiger Vorspannung gilt $k = 1,5$, bei beidseitiger Vorspannung $k = 2$. Es wird ebenfalls der Gleitreibbeiwert verwendet. Bei diesem Ansatz bleiben die beiden unterschiedlichen Horizontalkomponenten der Überspannungen unberücksichtigt. Die Differenz dieser Kräfte könnte in die Bilanz einfließen. Die beiden Kräfte betragen:

$$\text{Vorspannseite: } n \cdot F \cdot \frac{Y}{L} \qquad \text{Gegenseite: } n \cdot (k-1) \cdot F \cdot \frac{Y}{L}$$

Quelle [3] kehrt von dem k-Faktor wieder ab, führt aber einen Sicherheitsfaktor $f_s = 1,1$ ein, welcher die notwendige Vorspannkraft um 10% vergrößert. Die Bilanz lautet:

$$m \cdot g \cdot f_y \leq m \cdot g \cdot \mu + \frac{2}{f_s} \cdot n \cdot F \cdot \mu \cdot \frac{Z}{L}$$

Diese Vereinbarung entspricht einem k-Faktor von 1,82. Der Sicherheitsfaktor wird in [3] allerdings nicht mit dem Umspannungsverlust, sondern mit Rechenunsicherheiten begründet.

Quelle [3] enthält außerdem eine Rutschbilanz für die Kombination von Niederzurrung und Blockierung, wiederum ohne Berücksichtigung der Lastaufnahmeverhaltens beider Sicherungsmittel.

2.2.2 Kippsicherung

Quelle [1] interpretiert die Wirkung der Niederzurrung als Vergrößerung der Normalkraft auf die Ladefläche, die mit der halben Breite als Hebel das Eigenstandmoment vergrößert. Horizontale Kraftkomponenten der Niederzurrung heben sich hier auf.

$$m \cdot g \cdot (f_y + f_w) \cdot H/2 \leq m \cdot g \cdot B/2 + 2 \cdot n \cdot F \cdot \frac{Z}{L} \cdot B/2$$

In Längsrichtung wird eine sinngemäße Formel angegeben, die aber von längsgerichteten Überspannungen ausgeht. Die Kippsicherung in Längsrichtung durch quer verlaufende Überspannungen wird nicht behandelt.

Quelle [2] behandelt in der Kippbilanz die Kräfte auf beiden Seiten der Ladungseinheit separat und nimmt dabei den ungünstigeren Fall an, bei dem die äußere Kraft zur vorgespannten Seite hin wirkt. Die dadurch erweiterte Bilanz lautet in der vereinbarten Schreibweise:

$$m \cdot g \cdot (f_y + f_w) \cdot H/2 \leq m \cdot g \cdot B/2 + n \cdot (k-1) \cdot B \cdot F \cdot \frac{Z}{L} + n \cdot (k-1) \cdot H \cdot F \cdot \frac{Y}{L} - n \cdot H \cdot F \cdot \frac{Y}{L}$$

Löst man diese Bilanz nach $n \cdot F$ auf, so erhält man:

$$n \cdot F = \frac{m \cdot g \cdot ((f_y + f_w) \cdot H/2 - B/2)}{(k-1) \cdot B \cdot \frac{Z}{L} - (2-k) \cdot H \cdot \frac{Y}{L}}$$

Diese Formel zur Bestimmung des erforderlichen Sicherungsaufwands hat die unangenehme Eigenschaft, dass auf der rechten Seite der Nenner des Bruchs ohne weiteres den Wert Null annehmen kann. Das bedeutet für die linke Seite ein gegen Unendlich strebendes Ergebnis. Ist der Nenner gleich Null, dann liegt eine Konstellation der Größen B, Z, H und Y vor, bei der jede weitere hinzugefügte Niederzurrung durch die Differenz ihrer Horizontalkomponenten die kippsichernd wirkende Vertikalkomponente aufhebt, also keine Wirkung zeigt.

An dieser Stelle sei im Vorgriff auf Kapitel 3 angemerkt, dass das "Gestatten" eines kleinen Versatzes, Verschubs oder Ankippens der Ladungseinheit die Kräfte umkehrt. Die Bilanz lautet dann:

$$m \cdot g \cdot (f_y + f_w) \cdot H/2 \leq m \cdot g \cdot B/2 + n \cdot B \cdot F \cdot \frac{Z}{L} - n \cdot (k-1) \cdot H \cdot F \cdot \frac{Y}{L} + n \cdot H \cdot F \cdot \frac{Y}{L}$$

Aufgelöst nach $n \cdot F$ erhält man:

$$n \cdot F = \frac{m \cdot g \cdot ((f_y + f_w) \cdot H/2 - B/2)}{B \cdot \frac{Z}{L} + (2-k) \cdot H \cdot \frac{Y}{L}}$$

Der Unterschied der Ergebnisse wird an einem Beispiel demonstriert. Die Werte sind: $H = Z = 2,75$ m, $B = 1,5$ m, $Y = 0,5$ m, $L = 2,8$ m, $F = 2,5$ kN, $m = 6$ t

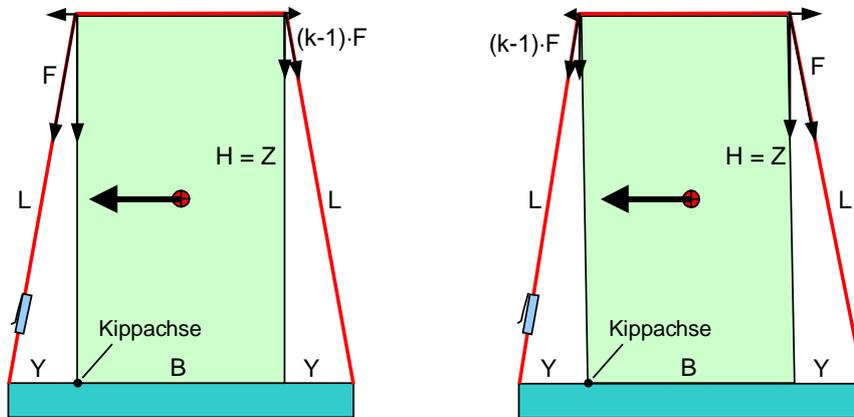


Bild 12: Kippbilanz nach Quelle [2] links; Alternative rechts

Nach Quelle [2] gemäß Bild 12 links sind 10 Niederzurrungen zur Sicherung gegen Kippen erforderlich. Rechnet man mit einem Wechsel der Gurtspannungen gemäß Bild 12 rechts, so reichen 3 Niederzurrungen aus. Auch in diesem Fall entspricht die Verteilung der Gurtspannungen dem Kraftabfall durch Reibung an den Umlenkungen der Gurte. Die Dehnung der Gurte infolge des geringfügigen Verschiebens der Ladungseinheit und die daraus folgende Kraftzunahme ist in diesem Vergleich noch nicht einmal berücksichtigt worden.

$$n = \frac{m \cdot g \cdot ((f_y + f_w) \cdot H/2 - B/2)}{F \cdot \left((k-1) \cdot B \cdot \frac{Z}{L} - (2-k) \cdot H \cdot \frac{Y}{L} \right)} = \frac{6 \cdot 9,81 \cdot (0,7 \cdot 1,375 - 0,75)}{2,5 \cdot (0,5 \cdot 1,5 \cdot 2,75/2,8 - 0,5 \cdot 2,75 \cdot 0,5/2,8)} = \frac{12,508}{1,228} = 10$$

$$n = \frac{m \cdot g \cdot ((f_y + f_w) \cdot H/2 - B/2)}{F \cdot \left(B \cdot \frac{Z}{L} + (2-k) \cdot H \cdot \frac{Y}{L} \right)} = \frac{6 \cdot 9,81 \cdot (0,7 \cdot 1,375 - 0,75)}{2,5 \cdot (1,5 \cdot 2,75/2,8 + 0,5 \cdot 2,75 \cdot 0,5/2,8)} = \frac{12,508}{4,297} = 3$$

Verringert man die Breite B auf $0,5$ m, so geht die Anzahl der erforderlichen Niederzurrungen nach der Berechnung in Quelle [2] gegen Unendlich, während die Berücksichtigung einer kleinen Ladungsbewegung zu 7 Niederzurrungen führt.

Quelle [3] verwendet den k -Faktor nicht mehr und vermeidet dadurch die unglückliche Berechnung zur Kippsicherung. Es wird der Ansatz aus Quelle [1] übernommen mit folgenden Modifizierungen:

- Querbeschleunigungsbeiwert $f_y = 0,5$, wenn die Vorspannung $F_T = S_{TF}$.
- Querbeschleunigungsbeiwert $f_y = 0,6$, wenn die Vorspannung $F_T = 0,5 \cdot LC$.
- Ein Sicherheitsfaktor $f_s = 1,1$ führt zur Vergrößerung der Vorspannung oder der Anzahl n .

$$m \cdot g \cdot f_y \cdot H/2 \leq m \cdot g \cdot B/2 + \frac{2}{f_s} \cdot n \cdot F \cdot \frac{Z}{L} \cdot B/2$$

Zusätzlich enthält die Quelle [3] einen Rechenansatz, welcher die kompaktierende Wirkung von Niederzurrungen auf eine Gruppe von nebeneinander stehenden hohen und schmalen Ladungseinheiten im Hinblick auf Kippsicherung prüft. Dieser Ansatz kann als richtungweisend zur rechnerischen Überprüfung von Kompaktierungsmaßnahmen angesehen werden.

3. Erweiterte Betrachtungsweisen

Eine erweiterte Betrachtungsweise sollte unbedingt die zu einer Direktsicherung gehörende Bewegung der Ladung ins Auge fassen, ohne die eine Formänderung der Sicherungsmittel und damit der notwendige Kraftaufbau nicht möglich ist. Kommt man auf diesem Wege zur Festlegung von "akzeptablen" Bewegungen der Ladung, so könnte man gleiche Bewegungen auch Anordnungen mit Reibungssicherung (Niederzurrungen) zugestehen. Daraus wiederum könnte eine Neubewertung dieses Sicherungsprinzips mit möglicherweise günstigeren Ergebnissen erwachsen.

3.1 Ladungsbewegungen

Ladungsbewegungen, die zu den notwendigen Formänderungen (meist Längenänderungen) von Ladungssicherungsmitteln führen, sind in erster Linie Rutschen oder leichtes Ankippen und vielfältige Formänderungen der Ladung selbst, die den beiden erstgenannten Bewegungsformen überlagert sein können. Rutschen ist generell irreversibel, während leichtes Ankippen nach dem Verschwinden des äußeren Kippmoments wieder zurückgeführt wird.

Die Formänderungen der Ladung können elastisch sein. Meist ist aber ein erheblicher plastischer Anteil dabei. Da extreme Belastungen im Straßenverkehr als Einzelereignisse auftreten, kann eine bleibende Verformung der Ladungsanordnung eher akzeptiert werden, weil eine Kontrolle und Nachbesserung der Sicherungsanordnung sofort und unter erträglichen Bedingungen möglich ist.

Zum Verständnis dieser Einschätzung wird auf den Seetransport verwiesen, wo extreme Belastungen mit dem Auftreten von Sturm und Seegang verbunden sind. Diese Bedingungen können längere Zeit anhalten, wodurch es zu einer unabsehbaren Aufeinanderfolge von Extrembelastungen kommen kann, und die Kontrolle und Nachbesserung der Ladungssicherung während dieser Zeit oft mit Lebensgefahr verbunden ist.

Die Bilder 13 und 14 zeigen die grundsätzlichen Ladungsbewegungen, wobei die in Bild 14 gezeigten Verformungen sicherlich noch um einige Fälle erweitert werden könnten.

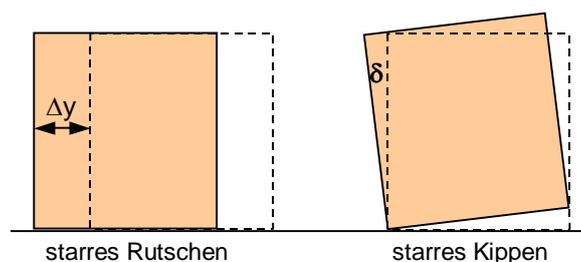


Bild 13: Bewegungsformen starrer Ladungseinheiten

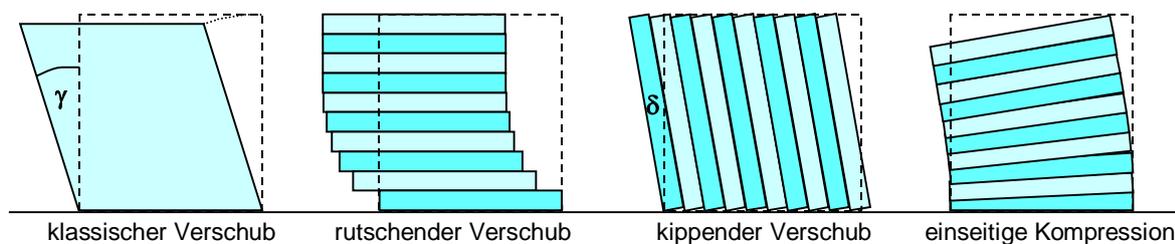


Bild 14: Bewegungsformen flexibler Ladungsanordnungen

Welche Bewegungen gesicherter Ladungen im Straßenverkehr toleriert werden können, ist bislang nicht in irgendwelchen Regelwerken, Richtlinien oder Leitfäden festgelegt bzw. empfohlen worden. Deshalb werden hier zunächst einige Einflussgrößen genannt, die bei derartigen Überlegungen eine Rolle spielen können.

Die **Häufigkeit** einer Belastung, unter welcher Ladung sich bewegt, könnte das tolerierbare Maß derart beeinflussen, dass man seltenen Ereignissen, wie Vollbremsungen oder extremen Fliehkräften, größere Bewegungen einräumt als sie im normalen Fahrbetrieb akzeptiert würden, da es nach extremen Ereignissen zumutbar ist, einen Rastplatz anzufahren und die Sicherungsanordnung zu kontrollieren.

Die **Art der Bewegung** entscheidet ebenfalls über das tolerierbare Maß. Versatz verschiebt den Schwerpunkt der Ladung und kann außerdem die Ladeflächenbegrenzung überschreiten. Verschub bei kompakten Ladungseinheiten hingegen kann im elastischen Verformungsbereich bleiben und ist daher weniger kritisch. Verschub bei gebündelten Einheiten ist hingegen quasi-plastisch und müsste daher ähnlich wie Versatz begrenzt werden. Ankippen einer Ladungseinheit sollte wegen der geringen Dämpfung des Kippvorgangs auf sehr kleine Winkel begrenzt bleiben.

Die **Richtung der Bewegung** ist von Einfluss. Bewegungen in Längsrichtung sind weniger kritisch als Bewegungen in Querrichtung, weil letztere die zulässige Breite des Fahrzeugs überschreiten und auch die Schwerpunktlage empfindlich verändern können.

Um einen Eindruck von der Größe bislang unwissentlich akzeptierter Ladungsbewegungen zu bekommen, ist es sinnvoll, Direktsicherungen zu analysieren, die nach konventioneller Bewertung als "gut" bezeichnet werden können. Das bedeutet aber noch nicht, dass die festgestellten Bewegungen damit allgemeingültig als tolerierbar empfohlen werden können.

Der rational begründete Weg zur Festlegung und Empfehlung von tolerierbaren Ladungsbewegungen dürfte letztlich über die Anwendung von numerischen Kriterien führen:

- zulässiger Versatz/Verschub in Längsrichtung und in Querrichtung hinsichtlich Beladungsgeometrie und Schwerpunkt,
- zulässiger Ankippwinkel hinsichtlich dynamischer Belastung der Sicherungsmittel,
- allgemeine dynamische Überschreitung der Belastung der Sicherungsmittel.

Hierzu ist erforderlich, dass typische Belastungsfälle durchgerechnet werden. Um an dieser Stelle einen ersten Eindruck von der Größenordnung bislang akzeptierter Ladungsbewegung zu vermitteln, wird unter Vorgriff auf einiger Formeln aus dem nachfolgenden Kapitel 3.2 ein Beispiel einer üblichen Direktzurrung vorgestellt.

Eine Ladungseinheit mit den Abmessungen Breite = 2,1 m, Höhe = 2,5 m wird in Querrichtung zum Fahrzeug mit diagonal verlaufenden Spanngurten gesichert, die an den oberen Ladungsecken befestigt sind. Die geometrischen Komponenten der Gurte betragen $X = 1,0$ m, $Y = 2,3$ m, $Z = 2,5$ m und die belastete Länge $L = 3,54$ m. Die Gurte haben ein $LC = 25$ kN und eine Dehnung von 3,75% bei Erreichen von LC. Daraus ergibt sich die Federkonstante des Gurts zu:

$$D = \frac{100 \cdot 25}{3,75 \cdot 3,54} = 188 \text{ kN/m}$$

Die Gurte sind mit 2,5 kN vorgespannt. Die hier nicht gezeigte Rutschtabelle geht vom Erreichen des LC aus. Die Längenänderung der Gurte beträgt dann zwangsläufig:

$$\Delta L = \frac{\Delta F}{D} = \frac{22,5}{188} = 0,12 \text{ m}$$

Um diese Längenänderung zu erreichen, muss die obere Ecke der Ladungseinheit um den Betrag ΔY entweder durch Versatz oder Verschub oder durch eine Kombination beider Bewegungen zur Seite ausweichen:

$$\Delta Y = \Delta L \cdot \frac{L}{Y} = 0,12 \cdot \frac{3,54}{2,3} = 0,18 \text{ m}$$

Die seitliche Bewegung von 0,18 m quer zum Fahrzeug bei extremer Belastung erscheint hinnehmbar und könnte unter Umständen, z.B. bei elastischem Vers Schub, auch noch größer akzeptiert werden.

3.2 Formänderung und Kraftaufnahme von Sicherungsmitteln

Die Zerlegung der Wirkrichtung von Ladungssicherungsmitteln in kartesische Komponenten ist bereits in Kapitel 2 vorgestellt worden. Geometrisch werden jedem Ladungssicherungsmittel die Komponenten X, Y und Z zugeordnet mit dem pythagoreischen Bezug zur Länge L:

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \text{ [m]}$$

Ladungsbewegung bzw. Verformung wird durch bestimmte, kleine Änderungen ΔX , ΔY und ΔZ dieser Komponenten ausgedrückt. Die Längenänderung ΔL wird exakt berechnet mit:

$$\Delta L = \sqrt{(X + \Delta X)^2 + (Y + \Delta Y)^2 + (Z + \Delta Z)^2} - L \text{ [m]}$$

Sind die einzelnen Änderungen klein gegenüber der Gesamtlänge L, so kann die Längenänderung ΔL in den meisten Fällen mit ausreichender Genauigkeit auch durch eine Näherungsgleichung bestimmt werden. Diese lautet:

$$\Delta L = \frac{X \cdot \Delta X + Y \cdot \Delta Y + Z \cdot \Delta Z}{L} \text{ [m]}$$

Diese Näherungsgleichung sollte jedoch nicht verwendet werden, wenn beispielsweise die Komponente Y nahe Null ist, aber eine Ladungsverschiebung mit einem ΔY untersucht werden soll. Dieser Fall trifft insbesondere auf steile Niederzurrungen zu.

Zur Ermittlung der Kraftaufnahme von Ladungssicherungsmitteln infolge von Ladungsbewegung bzw. Ladungsverformung ist es sinnvoll, jedem Sicherungsmittel einen "persönlichen" Faktor zuzuordnen, welcher die Kraftänderung ΔF direkt aus der Formänderung ΔL zu berechnen gestattet. Dieser Faktor ist die in der technischen Mechanik gebräuchliche Federkonstante D. Es gilt die Beziehung:

$$D = \frac{\Delta F}{\Delta L} \text{ [daN/m] oder [kN/m]}$$

Die Federkonstante enthält Querschnitt, E-Modul und Länge des Sicherungsmittels als Einflussgrößen nach der bekannten Hookeschen Beziehung:

$$\Delta F = \frac{A \cdot E}{L} \cdot \Delta L \text{ [daN] oder [kN]} \quad \text{mit } D = \frac{A \cdot E}{L} \text{ [daN/m] oder [kN/m].}$$

ΔF = Kraftänderung im Sicherungsmittel [daN] oder [kN]

A = Querschnitt des Sicherungsmittels [cm²]

E = Elastizitätsmodul [daN/cm²] oder [kN/cm²]

L = belastete Länge des Sicherungsmittels [m]

ΔL = Längenänderung des Sicherungsmittels [m]

Die Federkonstante fehlt gewöhnlich in den Angaben der Sicherungsmittelhersteller. Zur Feststellung der Federkonstanten gibt es mehrere Wege je nach den Informationen, die über das Sicherungsmittel zur Verfügung stehen.

Eine häufige Herstellerinformation für Seile, Ketten und Gurte lautet: Die Dehnung des Materials beträgt P %, wenn das Material mit einer bestimmten Kraft F (meist wird hier LC genannt) belastet wird. Die Angabe der Kraft F entspricht der Kraftänderung ΔF ausgehend von der Nullbelastung, wenn ein näherungsweise lineares Last/Dehnungsverhalten vorausgesetzt wird, was im begrenzten Lastbereich zwischen Vorspannung F_0 und zulässiger Belastung LC allgemein gegeben ist. Damit ist die Federkonstante:

$$D = \frac{100 \cdot \Delta F}{P \cdot L} \text{ [daN/m] oder [kN/m]}$$

Ist die Länge des Zurrmittels zunächst unbekannt, so kann für das Zurrmaterial eine normierte Federkonstante D_N für die Einheitslänge von 1 m eingeführt werden, für die gilt:

$$D_N = \frac{100 \cdot \Delta F}{P} \text{ [daN] oder [kN] mit } D = \frac{D_N}{L} \text{ [daN/m] oder [kN/m].}$$

Die Abschätzung der Federkonstanten von Druckübertragungsmitteln, z.B. Kantholz kann mit den drei Größen Querschnitt A , Elastizitätsmodul E und Länge L vorgenommen werden:

$$D = \frac{A \cdot E}{L} \text{ [daN/m] oder [kN/m].}$$

Für die Abschätzung der Federkonstanten von Stirnwänden und Rungen können diese als einseitig eingespannten Träger betrachtet werden. Die Federkonstante wird dann in Anlehnung an die Biegegleichung für Kragträger berechnet:

$$D = \frac{3 \cdot E \cdot I}{10^4 \cdot d^3} \text{ [daN/m] oder [kN/m]}$$

E = Elastizitätsmodul [daN/cm²] oder [kN/cm²]

I = Flächenträgheitsmoment in der Einspannstelle [cm⁴]

d = Hebellänge des eingespannten Trägers [m]

In der Praxis wird diese Lösung allerdings zu große Werte für D liefern, da die Einspannung der Bordwand oder Runge nicht absolut starr ist, sondern die tragende Unterkonstruktion sich ebenfalls verformt. Es ist daher ratsam, durch repräsentative Messungen einen Korrekturfaktor zu ermitteln oder die Federkonstante insgesamt experimentell zu bestimmen. Das gilt auch für Bordwände von Ladeflächen auf Lastkraftwagen, die unterschiedlich konstruiert sind und oft eine gewisse Stützung über ihre Länge durch die Dachkonstruktion erfahren. Eine einfache Formel lässt sich hier nicht mehr angeben.

Für parallel angeordnete Sicherungsmittel gilt: $D = D_1 + D_2 + \dots + D_n$

Für seriell angeordnete Sicherungsmittel gilt: $1/D = 1/D_1 + 1/D_2 + \dots + 1/D_n$

3.3 Horizontalkomponenten von Niederzurrungen

In fast allen konventionellen Rechenansätzen bleiben die Horizontalkomponenten einer schrägen Niederzurrung unbeachtet. Geht man von gleicher Vorspannung auf beiden Seiten aus, so heben sich diese Komponenten auf. Bei einseitiger Spannvorrichtung gibt es eine Resultierende, die jedoch zu einer Seite günstig, zur anderen Seite ungünstig wirkt. Rechnet man sicherheitshalber mit der ungünstigen Seite, so kommt es zu der Absonderlichkeit, die nicht der Wirklichkeit entspricht, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben worden ist.

Tatsächlich bewegen sich niedergezurte Ladungen unter dem Einfluss äußerer Kräfte. Dadurch ändert sich die Geometrie der Niederzurrung mit mehreren Folgen:

- Die Niederzurrung wird (geringfügig) verlängert mit einem (kleinen) Anstieg der Kräfte insgesamt.
- Bei Querbewegung der Ladung passt sich die Kraftverteilung auf beiden Seiten der Niederzurrung an die durch die Reibung an den Umlenkungen vorgegebenen Kräfteverhältnisse an. Es entsteht zwangsläufig eine "günstige" Resultierende der Querkomponenten.
- Bei Längsbewegung der Ladung (quergeführte Niederzurrung vorausgesetzt) entsteht ebenfalls eine "günstige" Horizontalkomponente der Zurrkraft auf beiden Seiten, die mit der Bewegung stetig anwächst und erst dann konstant bleibt, wenn der Gurt auf der Ladung rutscht.

Das kleinstmögliche Kräfteverhältnis zwischen den beiden Seiten einer quergeführten Niederzurrung, und damit die größtmögliche sichernd wirkende Querkomponente, kann mit ausreichender Zuverlässigkeit durch die bekannte Euler'sche Beziehung berechnet werden.

$$\frac{F}{F_0} = e^{-\mu \cdot \gamma}$$

F und F_0 = Kräfte auf beiden Seite der Niederzurrung [daN] oder [kN]

e = Euler'sche Konstante (2,718281828)

μ = Reibbeiwert an der Umlenkung

γ = Winkel der Umlenkung (Richtungsänderung) der Niederzurrung [rad]

Die Größe der sichernd wirkenden Querkomponente einer Niederzurrung hängt allerdings entscheidend vom vertikalen Laschwinkel α ab. Bei $\mu = 0,25$ ist die Querkomponente bei beidseitigem $\alpha = 45^\circ$ am größten. Der insgesamt optimale vertikale Laschwinkel α liegt allerdings stets bei deutlich größeren Werten, da die Hauptwirkung einer Niederzurrung von der reibungserhöhenden Vertikalkomponente abhängt, die bekanntlich mit dem Sinus des Laschwinkels α zunimmt.

Bei einer rein vertikalen Niederzurrung gibt es keine Querkomponente. Erst mit Erreichen eines nennenswerten Versatzes oder Verschubs ergeben sich in einem solchen Fall günstige Querkomponenten auf beiden Seiten, deren Größe allerdings nicht durch die Reibung zwischen Zurrmittel und Ladung begrenzt wird. Es handelt sich hierbei um einen Grenzfall der Direktsicherung, also um ein anderes Wirkprinzip als bei der Querkomponente aus Euler'scher Reibung.

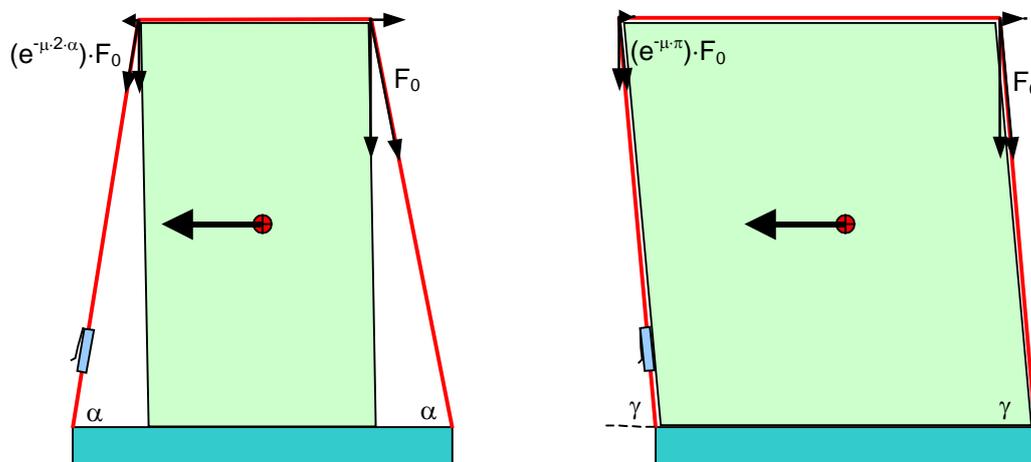


Bild 15: Querkomponenten einer quergeführten Niederzurrung

Die Querkomponente der Niederzurrung in Bild 15 links beträgt $F_0 \cdot (1 - e^{-\mu \cdot 2\alpha}) \cdot \cos \alpha$. Die Querkomponente der Niederzurrung in Bild 15 rechts beträgt $F_0 \cdot (1 + e^{-\mu \cdot \pi}) \cdot \cos \gamma$. Um die

Größenordnungen deutlich zu machen, wird ein Beispiel mit plausiblen Werten gegeben mit: $F_0 = 2 \text{ kN}$, $\mu = 0,25$, $\alpha = 75^\circ$, $\gamma = 85^\circ$.

Querkomponente in Bild 15 links = 0,25 kN; Querkomponente in Bild 15 rechts = 0,13 kN.

Beide Werte berücksichtigen nicht die mögliche Verlängerung des Zurrgurts durch die Veränderung der geometrischen Verhältnisse. Dies erfordert mehr Rechenaufwand, der hier nicht dargestellt wird.

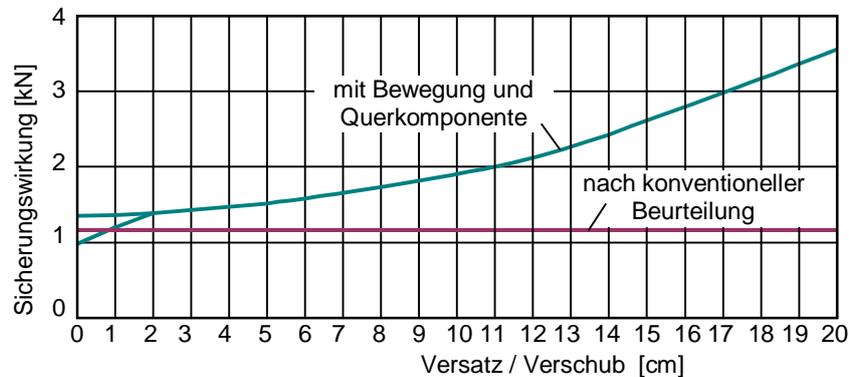


Bild 16: Sicherungswirkung in Querrichtung einer Niederzurrung mit $\alpha = 80^\circ$

In Bild 16 werden für ein Beispiel einer Niederzurrung mit $\alpha = 80^\circ$ die Sicherungswirkung nach konventioneller Beurteilung und die erweiterte Sicherungswirkung unter Berücksichtigung der Querkomponente und der Kraftzunahme durch Änderung der Geometrie infolge von Versatz oder Verschub gegenübergestellt.

Bis zur Querbewegung von etwa 1,9 cm unterscheiden sich die Wirkungen je nach Belastungsrichtung. Bei Belastung hin zur vorgespannten Seite ergeben sich zunächst kleinere Werte. Ab 1,9 cm rutscht der Gurt und es wird die größtmögliche Querkomponente wirksam, die sich aus der Euler'schen Reibung zwischen Gurt und Ladung ergibt. Bei Belastung zur Gegenseite rutscht der Gurt von Beginn an und liefert dabei die größtmögliche Querkomponente. Damit wird deutlich, dass die übliche einseitige Spannvorrichtung zwar die Sicherung insgesamt beeinträchtigt, der k-Faktor also unbedingt berechtigt ist, aber keine folgenreiche Asymmetrie in der Sicherungswirkung nach sich zieht.

Der weitere Anstieg ist auf die zunehmende Dehnung des Gurts zurückzuführen. Schon bei 15 cm Querbewegung wird in diesem Beispiel gut die doppelte Sicherungswirkung gegenüber der konventionellen Bewertung erreicht.

3.4 Semi-dynamischer Rechenansatz

Die Berücksichtigung von Ladungsbewegung und Formänderung der Ladungssicherungsmittel macht andere Rechenansätze als die konventionell verwendeten erforderlich, da die Eingangsgrößen für einfache Gleichgewichtsbetrachtungen zunächst unbekannt sind. Sie ergeben sich erst im Verlauf eines längeren Rechenprozesses. Es kann zwischen einem semi-dynamischen und einem volldynamischen Ansatz unterschieden werden.

Die Bezeichnung semi-dynamisch soll hier zum Ausdruck bringen, dass zwar Ladungsbewegungen in Betracht gezogen werden, diese aber nur zur Ermittlung der unterschiedlichen Lastaufnahmen der Sicherungsmittel bis zum Gleichgewicht mit der äußeren Kraft verwendet werden. Die weiteren dynamischen Effekte durch die in Bewegung geratene Ladung werden ignoriert und weiterhin durch die Sicherheitsmarge zwischen LC und Bruchlast abgedeckt.

3.4.1 Iteratives Verfahren

Bei einem iterativen Rechenverfahren wird die Ladung unter der Einwirkung einer äußeren Kraft schrittweise in einer vorbestimmten Art bewegt (Versatz, Kippen, Verschub). Für jeden Schritt wird aus dieser Bewegung die Formänderung der beteiligte Ladungssicherungsmittel und deren Lastaufnahme ermittelt. Die Lastaufnahme wird zur anfänglichen Vorspannung addiert und als Sicherungskraft in die kartesischen Komponenten zerlegt.

Diese Komponenten gehen in die Sicherungsbilanzen gegen horizontalen Versatz/Verschub und gegen Kippen ein. Gegen Versatz/Verschub wirken horizontale Komponenten direkt und vertikale Komponenten über den Reibungsbeiwert, während gegen das Kippen die horizontalen und die vertikalen Komponenten mit den zugehörigen Hebeln zur Kippachse in Rechnung gesetzt werden. Besteht die Sicherungsanordnung aus Niederzurrungen, so ist unter Berücksichtigung der Euler'schen Reibung an den Kanten sinngemäß zu verfahren.

Der Rechenvorgang wird abgebrochen, wenn das Gleichgewicht mit der äußeren Kraft bzw. mit dem äußeren Moment erreicht ist. Dann kann festgestellt werden, welche Belastungen die einzelnen Sicherungsmittel aufgenommen haben und wie groß die Ladungsbewegung oder Ladungsverformung geworden ist. Aus beiden Informationen kann die Eignung bzw. Zulässigkeit der betrachteten Ladungssicherungsanordnung beurteilt werden. Außerdem können die Ergebnisse auf mögliche Verbesserungen und Steigerungen der Effizienz einer Sicherungsanordnung hinweisen.

Wenn gesicherte Erfahrungen über dynamische Zusatzlasten vorliegen, kann der iterative Rechenvorgang auch ein wenig später als beim Erreichen des statischen Gleichgewichts abgebrochen werden. Das Maß dieses Zuschlags könnte etwa proportional zur bis zum Gleichgewicht aufgetretenen Ladungsbewegung gewählt werden. Damit wäre ein pragmatischer Schritt in Richtung auf einen dynamischen Rechenansatz möglich.

Es versteht sich von selbst, dass dieser Rechenprozess nur mit einem programmierten Rechner durchgeführt werden kann und damit nicht für die Bemessung oder Überprüfung einer Ladungssicherungsanordnung vor Ort in Frage kommt, wohl aber für individuelle Planung von kritischen Transporten oder für die Konzeption von typisierten Sicherungsanordnungen mit langfristiger Anwendung.

3.4.2 Selektive Verfahren

Eine selektive Herangehensweise für Direktsicherung geht von dem Ladungssicherungsmittel in der betrachteten Anordnung aus, welches zweifelsfrei als erstes seine zulässige Belastung erreicht. Diese Belastung wird über die Längenänderung des selektierten Ladungssicherungsmittels in eine Ladungsbewegung/Ladungsverformung umgerechnet. Aus dieser werden die Längenänderungen und Lastaufnahmen aller weiteren Ladungssicherungsmittel bestimmt und einer Bilanz zugeführt.

Die Bilanz liefert die Information darüber, ob die Sicherungsanordnung ausreichend ist oder nachgebessert werden muss. Sie lässt auch erkennen, welche Sicherungsmittel möglicherweise nur unzureichend zur Sicherung beitragen.

Für Reibungssicherung, also Niederzurrung, sollte der selektive Ansatz dahingehend modifiziert werden, dass man die Rechnung mit der maximal zu tolerierenden Ladungsbewegung beginnt und daraus die Längenänderungen, Kräfte und geometrischen Komponenten der Zurrmittel bestimmt und den Rutsch- und Kippbilanzen zuführt.

Diese selektiven Verfahren sind mit weniger Rechenaufwand verbunden und können in den meisten Fällen auch von Hand gerechnet werden. Sie eignen sich damit auch für die Schulung

von Personal. Was man selbst gerechnet hat, überzeugt mehr als das ohnmächtige Entgegennehmen eines Computerresultats.

3.5 Volldynamischer Rechenansatz

Ein volldynamischer Rechenansatz sollte nicht nur die unterschiedlichen Lastaufnahmen der Sicherungsmittel bis zum Gleichgewicht mit der äußeren Kraft ermitteln, sondern auch die zusätzlichen Kräfte erfassen, die erforderlich sind, um eine in Bewegung/Verformung geratene Ladungseinheit wieder zum Stillstand zu bringen. Ein solcher Ansatz ist praktisch nur mit Hilfe einer Simulation zu verwirklichen, die den begrenzten Zeitraum der kritischen Fahrsituation darstellt. Dadurch können auch die in Kapitel 1 dargestellten Effekte von Schwellphasen sowie Nick- und Wankschwingungen berücksichtigt werden.

Eine wesentliche Information aus typischen, gerechneten Fällen ist die Größe der genannten zusätzlichen Kräfte und deren Abhängigkeit von den beteiligten Parametern, wie Reibungsbeiwerte und Elastizität von Ladungssicherungsmitteln. Die Auswertung solcher Informationen sollte zur Festlegung von pauschalen Zuschlägen sowie zur Formulierung von Empfehlungen für die Auslegung von Sicherungsanordnungen führen.

4. Fallbeispiele

4.1 Direktsicherung in Längsrichtung mit Gurten und Holzblockierung

Dieses Fallbeispiel soll deutlich machen, welche Fehlbeurteilung einer Ladungssicherungsanordnung mit Hilfe der konventionellen Berechnungsmethode möglich ist, wenn Ladungssicherungsmittel unterschiedlicher Federkonstante parallel belastet werden. Das Einbeziehen der Ladungsbewegung kann den Fehler aufdecken.

Eine schwere Ladungseinheit wird mit quer über Kreuz geführten Ketten gegen Verrutschen in Querrichtung und mit längs über Kreuz geführten Gurten gegen Verrutschen in Längsrichtung gesichert. Die Sicherungsanordnung ist weitgehend symmetrisch. Wegen des größeren Sicherungsbedarfs gegen Verrutschen nach vorn wird zusätzlich mit zwei Kanthölzern gegen die Stirnwand der Ladefläche geblockt. Die beiden Längshölzer drücken auf quer liegende Kanthölzer gleichen Querschnitts. Die Ladungseinheit selbst steht auf flachen Holzkufen.

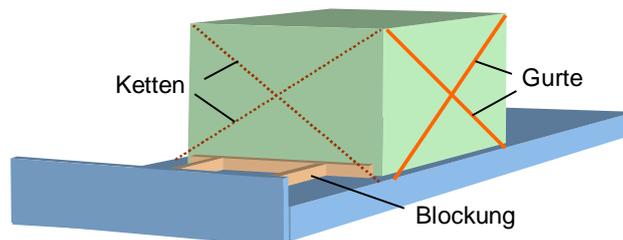


Bild 17: Sicherung des Schwerstücks gegen Verrutschen nach vorn

Es wird in diesem Beispiel ausschließlich die Sicherung gegen Verrutschen nach vorn untersucht. Die Ketten tragen zur Sicherung in Längsrichtung allenfalls mit ihrer die Reibung erhöhenden Vorspannung bei. Da sie jedoch nur "handfest" angezogen worden sind, wird dies nicht berücksichtigt.

Ladungsmasse $m = 18 \text{ t}$, Abmessungen $l \times b \times h = 5,0 \times 2,4 \times 1,9 \text{ m}$, $\mu = 0,3$

4 Gurte längs: $X = 4,9 \text{ m}$, $Y = 0,0 \text{ m}$, $Z = 1,8 \text{ m}$; $L = 5,22 \text{ m}$

$LC = 25 \text{ kN}$, Dehnung bei $LC = 4,5\%$, Vorspannung $F_0 = 2,5 \text{ kN}$

2 Längshölzer: Querschnitt 9,6 x 9,6 cm, LC = 2 · 92 kN, L = 2,2 m

2 Querhölzer: Querschnitt 9,6 x 9,6 cm, LC = 2 · 27,65 kN

Die äußere Kraft wird nach den üblichen Vereinbarungen bestimmt.

$$F_X = c_x \cdot m \cdot g = 0,8 \cdot 18 \cdot 9,81 = 141,3 \text{ kN}$$

Konventionelle Bewertung der Sicherung gegen Rutschen nach vorn:

$$F_X \leq \mu \cdot m \cdot g + 2 \cdot LC_{\text{Blockung}} + 2 \cdot LC_{\text{Gurt}} \cdot \frac{X + \mu \cdot Z}{L} \text{ [kN]}$$

$$141,3 < 0,3 \cdot 18 \cdot 9,81 + 2 \cdot 27,65 + 2 \cdot 25 \cdot \frac{4,9 + 0,3 \cdot 1,8}{5,22} = 53,0 + 55,3 + 52,1 = 160,4 \text{ kN}$$

Die Sicherung ist nach konventioneller Bewertung mit gut 13% Überschuss erfüllt, wenn wie üblich die Belastung LC für jedes Sicherungsmittel eingesetzt wird.

Berücksichtigung von Ladungsverschiebung:

Im vorliegenden Fall ist die Blockung eindeutig das steifere Ladungssicherungsmittel. Unter Anwendung des zuvor beschriebenen selektiven Verfahrens wird zunächst berechnet, um welche Strecke sich die Ladung nach vorn verschoben hat, wenn die Blockung das LC von 55,3 kN erreicht hat. Dazu wird die Federkonstante der Blockung benötigt.

Die Blockung besteht aus zwei parallelen Längshölzern von je 2,2 m Länge mit je zwei seriellen Querhölzern von 9,6 cm Dicke. Das E-Modul bei Belastung längs ist 1100 kN/cm² und bei Belastung quer zur Faser 100 kN/cm². Damit erhält man folgende Federkonstanten:

$$\text{Längsholz: } D_L = A \cdot E / L = 9,6^2 \cdot 1100 / 2,2 = 46080 \text{ kN/m}$$

$$2 \text{ Querhölzer: } D_Q = A \cdot E / L = 9,6^2 \cdot 100 / 0,192 = 48000 \text{ kN/m}$$

In serieller Anordnung erhält man für ein Holz: $D = D_1 \cdot D_2 / (D_1 + D_2) = 23510 \text{ kN/m}$ und für beide Hölzer den doppelten Wert von 47020 kN/m. Daraus ergibt sich eine Ladungsverschiebung von $\Delta L = \Delta F / D = 55,3 / 47020 = 0,0012 \text{ m} = 1,2 \text{ mm}$. Da die Hölzer horizontal verlaufen, ist dies auch der Versatz ΔX der Ladungseinheit.

Durch den Versatz ΔX dehnen sich die nach hinten weisenden Gurte um den Betrag

$$\Delta L = \Delta X \cdot \frac{X}{L} = 0,0012 \cdot \frac{4,9}{5,22} = 0,0011 \text{ m}$$

Die Federkonstante der Gurte beträgt $D_G = \Delta F / \Delta L = 25 / (5,22 \cdot 0,045) = 106 \text{ kN/m}$. Durch die Dehnung um 0,0011 m erhöhen die nach hinten weisenden Gurte ihre Zugkraft um $\Delta F = D_G \cdot \Delta L = 106 \cdot 0,0011 = 0,117 \text{ kN}$ von 2,5 auf 2,617 kN. Die nach vorn weisenden Gurte verringern ihre Zugkraft um den gleichen Betrag von 2,5 auf 2,383 kN. Sie ziehen also noch nach vorn und unterstützen die Längskraft F_X . Beide Werte werden in eine Bilanz eingesetzt:

$$F_X \leq \mu \cdot m \cdot g + 2 \cdot LC_{\text{Blockung}} + 2 \cdot F_{\text{Gurt h}} \cdot \frac{X + \mu \cdot Z}{L} + 2 \cdot F_{\text{Gurt v}} \cdot \frac{-X + \mu \cdot Z}{L}$$

$$141,3 > 0,3 \cdot 18 \cdot 9,81 + 2 \cdot 27,65 + 2 \cdot 2,617 \cdot \frac{4,9 + 0,3 \cdot 1,8}{5,22} + 2 \cdot 2,383 \cdot \frac{-4,9 + 0,3 \cdot 1,8}{5,22} = 109,8 \text{ kN}$$

Die Bilanz ist nicht ausgeglichen. Das Defizit liegt bei gut 22%. Im gegebenen Lastfall würde die Blockung überlastet und könnte dabei sogar die kritische Knicklast erreichen. Als Abhilfe wird hier vorgeschlagen, die Blockung mit vier anstatt zwei Längshölzern vorzunehmen, damit sie die Sicherung nach vorn zusammen mit der Reibung allein erfüllen kann.

4.2 Direktsicherung mit Ketten unter ungünstigen Winkeln

Dieses Fallbeispiel soll zeigen, dass eine tolerierbare Ladungsbewegung eine ungünstige Geometrie der Ladungssicherungsanordnung so verbessern kann, dass die Sicherung ohne Überschreitung zulässiger Belastung möglich wird, während die konventionelle Rechnung zu einem negativen Ergebnis gekommen ist.

Eine schwere Ladungseinheit wird vorn und hinten mit diagonal geführten Ketten gegen Verrutschen in Längs- und Querrichtung gesichert. Die Ketten haben ungünstigerweise sehr kleine Längskomponenten. Die Ladungseinheit selbst steht auf flachen Holzkufen. Es wird in diesem Beispiel ausschließlich die Sicherung gegen Verrutschen nach hinten untersucht.

Ladungsmasse $m = 12$ t, Abmessungen $l \times b \times h = 4,0 \times 2,3 \times 2,2$ m, $\mu = 0,3$

2 Ketten vorn: $X = 0,5$ m, $Y = 2,4$ m, $Z = 2,2$ m; $L = 3,294$ m

LC = 30 kN, Dehnung bei LC = 1,5%, Vorspannung $F_0 = 1,0$ kN

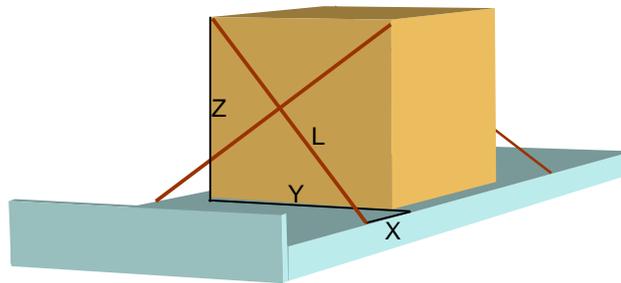


Bild 18: Sicherung des Schwerstücks gegen Verrutschen nach hinten

Die äußere Kraft wird nach den üblichen Vereinbarungen bestimmt.

$$F_X = c_x \cdot m \cdot g = 0,5 \cdot 12 \cdot 9,81 = 58,9 \text{ kN}$$

Konventionelle Bewertung der Sicherung gegen Rutschen nach hinten:

$$F_X \leq \mu \cdot m \cdot g + 2 \cdot LC_{\text{Kette}} \cdot \frac{X + \mu \cdot Z}{L} \text{ [kN]}$$

$$58,9 > 0,3 \cdot 12 \cdot 9,81 + 2 \cdot 30 \cdot \frac{0,5 + 0,3 \cdot 2,2}{3,294} = 35,3 + 21,1 = 56,4 \text{ kN}$$

Die Sicherung ist nach konventioneller Bewertung nicht erfüllt mit gut 4% Defizit.

Berücksichtigung von Ladungsverschiebung:

Gestattet man Ladungsverschiebung in Längsrichtung, so vergrößert sich die X-Komponente der beiden Ketten und damit ihre Sicherungswirkung. Die exakte Verschiebestrecke für das Erreichen statischen Gleichgewichts lässt sich nur mit aufwendiger Umstellung der Bilanzformel unter Einbeziehen der Federkonstante der Ketten berechnen. Übersichtlicher wird der Zusammenhang, wenn man die Verschiebestrecke berechnet, sie sich bei Erreichen des LC der Ketten ergibt, und dann prüft, ob die Bilanz erfüllt wird.

Die Federkonstante der Ketten beträgt $D_K = \Delta F / \Delta L = 30 / (3,294 \cdot 0,015) = 607$ kN/m. Bei einer Kraftzunahmen von 1,0 kN Vorspannung auf LC = 30 kN verlängern sich die Ketten um $29 / 607 = 0,04778$ m auf 3,342 m. Dadurch wächst die X-Komponente der Ketten auf

$$X = \sqrt{3,342^2 - 2,4^2 - 2,2^2} = 0,754 \text{ m}$$

Die Ladungseinheit hat sich um ca. 25 cm nach hinten verschoben. Die angepasste Bilanz lautet nun:

$$58,9 < 0,3 \cdot 12 \cdot 9,81 + 2 \cdot 30 \cdot \frac{0,754 + 0,3 \cdot 2,2}{3,342} = 35,3 + 25,4 = 60,7 \text{ kN}$$

Die Bilanz ist erfüllt mit gut 3% Überschuss. Die Verbesserung ist zwar nicht erheblich, aber der positive Trend ist für solche Sicherungssituationen symptomatisch. Das statische Gleichgewicht wird bei einer geringeren Verschiebung der Ladung erreicht werden. Allerdings hat die Ladung im Zeitpunkt des Kräftegleichgewichts eine bestimmte Relativgeschwindigkeit zur Ladefläche erreicht, die durch einen Sicherungskraftüberschuss abgebaut werden muss. Diese Betrachtung führt zu einer dynamischen Analyse, die hier nicht durchgeführt werden soll.

4.3 Rutsicherung in Längsrichtung mit schlaffer Niederzurrung

Dieses Fallbeispiel soll zeigen, dass eine tolerierbare Ladungsbewegung die Sicherungswirkung einer quergeführten Niederzurrung in Längsrichtung wiederherstellen kann, auch wenn die Vorspannung durch Setzen der Ladung zunächst völlig verschwunden war.

Auf der Ladefläche werden jeweils drei beladene Paletten mit je 1,0 t Masse nebeneinander gestellt und mit zwei Gurten niedergezurrt. Die Abmessungen der Einheiten sind 1200 x 800 x 1200 mm. Das ganze Paket hat die Höhe $h = 1,2$ m und die Breite $b = 2,4$ m.

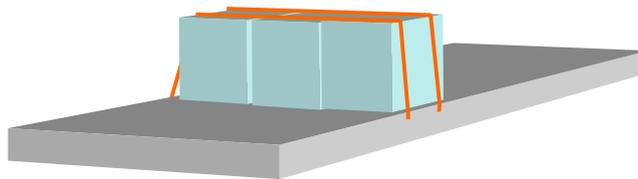


Bild 19: Niederzurrung von Gitterpaletten

Die Gurte verlaufen an den Außenseiten praktisch senkrecht. Die Vorspannung der Gurte beträgt bei Fahrtbeginn im Mittel etwa $F_0 = 2$ kN. Der Reibungsbeiwert zur Ladefläche wird mit $\mu = 0,38$ und der zwischen Gurt und Ladung mit $\mu_L = 0,25$ angenommen. Es wird in diesem Beispiel ausschließlich die Sicherung gegen Verrutschen nach vorn untersucht.

Die äußere Kraft wird nach den üblichen Vereinbarungen bestimmt.

$$F_X = c_x \cdot m \cdot g = 0,8 \cdot 3,0 \cdot 9,81 = 23,5 \text{ kN}$$

Konventionelle Bewertung der Sicherung gegen Rutschen nach vorn:

$$F_X \leq \mu \cdot m \cdot g + 4 \cdot F_0 \cdot \mu \text{ [kN]}$$

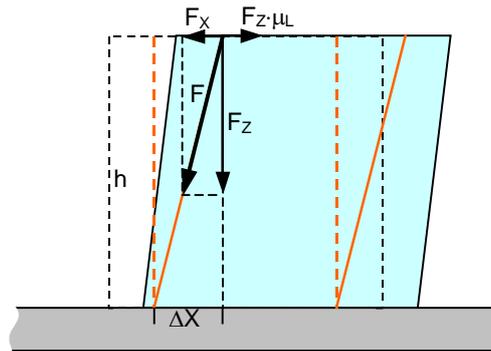
$$23,5 > 0,38 \cdot 3,0 \cdot 9,81 + 4 \cdot 2 \cdot 0,38 = 11,2 + 3,0 = 14,2 \text{ kN}$$

Die Sicherung ist nach konventioneller Bewertung nicht erfüllt mit knapp 40% Defizit.

Berücksichtigung von Ladungsverschiebung:

Zur Vereinfachung der nachfolgenden Darstellung wird angenommen, dass die Vorspannung durch Zusammenrücken der drei Paletten auf den Wert Null abgesunken ist. Gestattet man beim Auftreten des extremen Lastfalls eine Ladungsverschiebung nach vorn, so werden die Gurte an der Oberseite der Ladung ohne zu rutschen soweit mitgenommen, bis ein Gleichgewicht zwischen Längskomponente der Gurtkraft F_X und Reibung an der Ladungsoberseite $F_Z \cdot \mu_L$ erreicht ist. Die sich hieraus ergebende maximale Bewegungsdistanz wird berechnet:

$$\Delta X = h \cdot \frac{F_X}{F_Z} = h \cdot \mu_L = 1,2 \cdot 0,25 = 0,30 \text{ m}$$

Bild 20: Ladungsversatz und Verschiebung ΔX in Längsrichtung

Diese Distanz kann sich aus Rutschen der Paletten sowie aus einer Schubverformung zusammensetzen. Die Gurte haben sich in diesem Zustand um den Betrag ΔL verlängert.

$$\Delta L = 2 \cdot \left(\sqrt{h^2 + \Delta X^2} - h \right) = 2 \cdot \left(\sqrt{1,2^2 + 0,3^2} - 1,2 \right) = 0,074 \text{ m}$$

Die Verlängerung führt zu einer Kraftaufnahme, die aber nicht gleichmäßig über die Gurtlänge verteilt ist. Der horizontale Mittelteil nimmt eine Kraft auf, die im Verhältnis des Euler'schen Reibungsverlustes an den Kanten gegenüber der Kraft in den äußeren Teilen des Gurtes verringert ist.

Jeder Gurt hat ein $LC = 25 \text{ kN}$ und eine Dehnung von 3,5% bei Erreichen von LC. Die Federkonstante der vertikalen Gurtteile beträgt $D_v = \Delta F / \Delta L = 25 / (0,035 \cdot 1,2) = 595 \text{ kN/m}$, der horizontalen Gurtteile nur $D_h = \Delta F / \Delta L = 25 / (0,035 \cdot 2,4) = 298 \text{ kN/m}$. Daraus lassen sich mit der zunächst unbekanntem Kraft F in den äußeren Gurtteilen die einzelnen Längenänderungen bestimmen, deren Summe die Gesamtlängenänderung ΔL sein muss.

$$\Delta L = 2 \cdot \frac{F}{D_v} + e^{-\mu_L \cdot \pi/2} \cdot \frac{F}{D_h} = F \cdot \left(\frac{2}{D_v} + \frac{0,675}{D_h} \right)$$

$$F = \Delta L \cdot \left(\frac{D_v \cdot D_h}{2 \cdot D_h + 0,675 \cdot D_v} \right) = 0,074 \cdot \frac{177310}{998} = 13,15 \text{ kN}$$

Die Gurte erreichen also in den Außenteilen auf beiden Seiten eine Kraft von gut 13 kN. Die horizontalen Mittelteile kommen auf knapp 9 kN. Für die Rutschbilanz werden die Längs- und die Vertikalkomponenten der Außenkräfte berechnet.

$$F_z = F \cdot \frac{h}{\sqrt{h^2 + \Delta X^2}} = 13,15 \cdot \frac{1,2}{1,237} = 12,76 \text{ kN}$$

$$F_x = F_z \cdot \mu_L = 12,76 \cdot 0,25 = 3,19 \text{ kN}$$

Mit diesen Werten wird eine Rutschbilanz aufgemacht.

$$F_X \leq \mu \cdot m \cdot g + 4 \cdot F_x + 4 \cdot F_z \cdot \mu \quad [\text{kN}]$$

$$23,5 < 0,38 \cdot 3,0 \cdot 9,81 + 4 \cdot 3,19 + 4 \cdot 12,76 \cdot 0,38 = 11,2 + 12,8 + 19,4 = 43,4 \text{ kN}$$

Die Bilanz ist reichlich erfüllt mit knapp 85% Überschuss. Tatsächlich wird die Ladung also nicht über die ganzen 30 cm rutschen bzw. verziehen müssen, um das Kräftegleichgewicht zu erreichen. Dieses Beispiel demonstriert eindrucksvoll das in einer begrenzten Ladungsbewegung steckende Sicherungspotenzial. Die Frage, ob die mittlere Einheit durch die Reibung zu den beiden äußeren Einheiten und zur Ladefläche gesichert bleibt, wird hier offen gelassen.

4.4 Rutschsicherung in Querrichtung mit schlaffer Niederzurrung

Dieses Fallbeispiel soll zeigen, dass auch in Querrichtung eine tolerierbare Ladungsbewegung die Sicherungswirkung einer erschlafften Niederzurrung wiederherstellen kann. Hierzu werden die Umstände des vorangegangenen Beispiels verwendet.

Die äußere Kraft wird nach den üblichen Vereinbarungen bestimmt.

$$F_Y = c_y \cdot m \cdot g = 0,5 \cdot 3,0 \cdot 9,81 = 14,7 \text{ kN}$$

Konventionelle Bewertung der Sicherung gegen Rutschen nach vorn:

$$F_Y \leq \mu \cdot m \cdot g + 4 \cdot F_0 \cdot \mu \text{ [kN]}$$

$$14,7 > 0,38 \cdot 3,0 \cdot 9,81 + 4 \cdot 2 \cdot 0,38 = 11,2 + 3,0 = 14,2 \text{ kN}$$

Die Sicherung ist nach konventioneller Bewertung nicht erfüllt mit gut 3% Defizit. Es wird nun auch hier nachträglich angenommen, dass die Vorspannung F_0 in der Niederzurrung durch Zusammenrücken der Ladungseinheiten verloren gegangen ist.

Anders als im vorangegangenen Beispiel, wo als Bewegungsdistanz derjenige ΔX -Wert gewählt wurde, bei dem die Gurte auf der Ladungsoberfläche durch Reibung gerade noch haften, sollte in diesem Beispiel die anzunehmende Bewegungsdistanz ΔY anhand der geometrischen Bedingungen der Ladefläche festgelegt werden.

Die Ladung hat eine Breite von 2,4 m. Bei einer angenommenen Nettobreite der Ladefläche von 2,5 m und zunächst mittiger Beladung können die Paletten um 5 cm zur Seite rutschen, bevor sie an die Bordwände stoßen. Zusätzlich wird ein Verschub angenommen, bei dem die Oberkanten der Einheiten nochmals um 10 cm zur Seite gezogen werden.

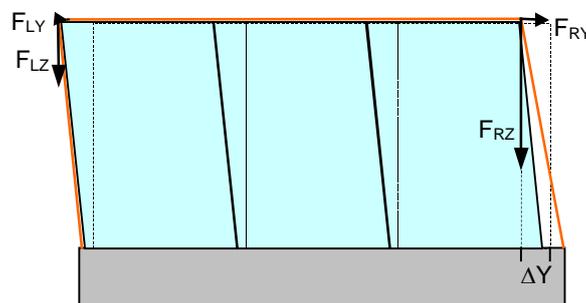


Bild 21: Ladungsversatz und Verschiebung ΔY in Querrichtung

Die aus diesen Bewegungen folgende Verlängerung der Gurte wird berechnet:

$$\text{Anfängliche Länge der äußeren Gurtteile: } L_0 = \sqrt{1,2^2 + 0,05^2} = 1,20104 \text{ m}$$

$$\text{Neue Länge rechts: } L_R = \sqrt{1,2^2 + 0,20^2} = 1,21655 \text{ m}$$

$$\text{Neue Länge links: } L_L = \sqrt{1,2^2 + 0,10^2} = 1,20416 \text{ m}$$

$$\text{Längenänderung: } \Delta L = L_R + L_L - 2 \cdot L_0 = 0,0186 \text{ m}$$

Diese Längenänderung bewirkt eine Kraftaufnahme im Gurt, die sich so verteilt, dass im rechten vertikalen Gurtteil die Kraft F_R wirkt, während im horizontalen Mittelteil und im linken vertikalen Teil die um den Euler'schen Reibungsverlust verringerten Kräfte wirken. Die einzelnen Längenänderungen müssen wieder die Gesamtlängenänderung ergeben. Die Umlenkung rechts beträgt $\alpha = 81^\circ = 1,40 \text{ rad}$, die Umlenkung links beträgt $\beta = 95^\circ = 1,66 \text{ rad}$. Der Reibungsbeiwert $\mu_L = 0,25$ gilt wie im vorangegangenen Beispiel.

$$\Delta L = \frac{F}{D_v} + e^{-\mu_L \cdot \alpha} \cdot \frac{F}{D_h} + e^{-\mu_L \cdot (\alpha + \beta)} \cdot \frac{F}{D_v} = F \cdot \left(\frac{1,465}{595} + \frac{0,705}{298} \right) = 0,00483 \cdot F$$

$$F = \Delta L / 0,00483 = 0,0186 / 0,00483 = 3,851 \text{ kN}$$

Im rechten Gurtteil wirkt somit $F_R = 3,851 \text{ kN}$ mit $F_{RY} = 0,60 \text{ kN}$ und $F_{RZ} = 3,80 \text{ kN}$

Im linken Gurtteil wirkt $F_L = 0,465 \cdot F_R = 1,791 \text{ kN}$ mit $F_{LY} = 0,16 \text{ kN}$ und $F_{LZ} = 1,78 \text{ kN}$

Mit diesen Werten wird die Bilanz gezogen:

$$F_Y \leq \mu \cdot m \cdot g + 2 \cdot (F_{RZ} + F_{LZ}) \cdot \mu + 2 \cdot (F_{RY} + F_{LY}) \text{ [kN]}$$

$$14,7 < 0,38 \cdot 3,0 \cdot 9,81 + 2 \cdot 5,58 \cdot 0,38 + 2 \cdot 0,76 = 11,2 + 4,2 + 1,5 = 16,9 \text{ kN}$$

Die Bilanz ist mit 15% Überschuss erfüllt, wobei mögliche Rückhaltekräfte aus der Ladeflächenbegrenzung unberücksichtigt geblieben sind. Dieses Beispiel bestätigt, dass eine geringe Ladungsbewegung den völligen Verlust an Vorspannung kompensieren kann. Daraus darf jedoch nicht der Schluss gezogen werden, dass Vorspannung unwichtig sei. Vielmehr soll ein Hinweis auf die tatsächlich wahrscheinlichere Wirkungsweise eine Niederzurrung gegeben werden, die sich nicht mit der im konventionellen Rechenansatz dargestellten deckt. Der konventionelle Rechenansatz bildet die hier anzuwendende Physik offenbar nicht hinreichend ab.

Inwieweit daraus eine Modifikation des konventionellen Rechenansatzes abgeleitet werden muss, kann derzeit noch nicht gesagt werden.

5. Zusammenfassung, Ausblick und Zielsetzung

5.1 Lastannahmen

Die durchgeführten Überlegungen und Untersuchungen zu den Lastannahmen haben gezeigt, dass es unzulässig ist, die bisher üblichen Werte von 0,8 g nach vorn und jeweils 0,5 g nach hinten und zu den Seiten unmittelbar als Fahrzeugbeschleunigungen in Form von Bremsverzögerung, Anfahrbeschleunigung oder Kurvenfliehkraft zu interpretieren. Insbesondere die direkte Bezugnahme auf Maximalkräfte, die durch die Fahrzeugreifen übertragen werden können, greift zu kurz. Die auf die Ladung wirkenden Kräfte werden durch Schräglagen der Ladefläche (Nick- und Wankwinkel) sowie durch tangentielle Trägheitskräfte aus überlagerten Nick- und Wankschwingungen bedeutend verstärkt. Gleichzeitig wird die für Reibung und Eigenstandfestigkeit wichtige Normalkraft verringert, die aber in konventionellen Sicherungsbilanzen stets mit dem vollen Gewicht der Ladung eingesetzt wird.

Diese Erkenntnisse können für die Lastannahmen nach vorn dazu führen, dass für eine Fahrzeugausstattung mit Reifen und Bremsanlagen, die 0,8 g Bremsverzögerung zu liefern imstande sind, eine Lastannahme für die Ladungssicherung von 1,0 g gefordert werden muss.

5.2 Wankfaktor

In diesem Zuge wurde auch der in den VDI-Richtlinien 2700, Blatt 2 verankerte Wankfaktor von 0,2 g untersucht, der bisher als Zuschlag zur Querbeschleunigungsannahme von 0,5 g für die Kippsicherung von nicht eigenstandfesten Ladungseinheiten verwendet werden soll. Es ist zutreffend, dass ein solcher Zuschlag wegen der Rotationsträgheit von Ladungseinheiten erforderlich ist, da das hieraus abzuleitende Drehmoment nicht durch das rechenübliche Kippmoment aus Querkraft und Hebel zur Kippachse erfasst wird. Allerdings ist der Zuschlag von 0,2 g zu hoch gegriffen. Ein Zuschlag von 0,1 g, wie er im Entwurf der Norm DIN EN 12195-1 von 2009 enthalten ist, scheint völlig auszureichen. Weitergehend sollte ein entsprechender

Zuschlag auch für Ladungseinheiten verwendet werden, die in Längsrichtung des Fahrzeugs kippgefährdet sind.

Wenn die Standsicherheit einer Ladungseinheit unter Einbeziehen des Zuschlags von 0,1 g durch die Eigenstandfestigkeit gesichert ist, braucht eine Kippbilanz nicht gerechnet zu werden. Es sollte aber durch weitere Untersuchungen noch geklärt werden, inwieweit in dieser Eigenstandsicherheitsprüfung das tatsächliche Rotationsträgheitsmoment der Ladungseinheit und die Abnahme der Normalkraft berücksichtigt werden sollten.

5.3 Konventionelle Bilanz-Rechenverfahren

Die Analyse der konventionellen Rechenverfahren erstreckt sich auf Vergleich und Kommentierung folgender Quellen: VDI 2700, Blatt 2 vom November 2002, Entwurf DIN EN 12195-1 vom April 2004 und Entwurf DIN EN 12195-1 vom Januar 2009.

Es wurden einige Unzulänglichkeiten und auch Fehler gefunden. Im wesentlichen sind die untersuchten Verfahren darauf beschränkt, bei Direktsicherung die Höchstbelastbarkeit der Sicherungsmittel in die Bilanz einzusetzen, während bei der Reibungssicherung (Niederzurrung) die Vertikalkomponenten der nominellen Vorspannung der Zurrmittel verwendet werden. Unzulänglichkeiten bei der Direktsicherung bestehen darin, dass die zur Lastaufnahme der Sicherungsmittel notwendigen Ladungsbewegungen nicht in irgendeiner Form, nicht einmal als Warnung, in den Regelwerken erscheinen und auch die aus unterschiedlichem Lastaufnahmeverhalten parallel eingesetzter Sicherungsmittel sich ergebenden Sicherungsdefizite nicht erwähnt werden.

Auf Reibschluss basierende Horizontalkomponenten von Niederzurrungen werden mit wenigen Ausnahmen ignoriert. Im Entwurf DIN EN 12195-1 vom April 2004 werden sie bei der Kippsicherungsprüfung statisch eingebracht, um dem zwischenzeitlich als wichtig erachteten k-Faktor zu genügen. Dieser k-Faktor berücksichtigt den bekannten Umstand der Reibung eines Zurrmittels bei Umlenkung und damit der Einbuße an Vorspannung, wenn wie üblich nur auf einer Seite vorgespannt wird. Der k-Faktor ist jedoch aus nicht öffentlich bekannten Gründen im späteren Entwurf DIN EN 12195-1 vom Januar 2009 wieder aufgegeben und scheinbar durch einen halbherzigen Sicherheitsfaktor ersetzt worden.

Der k-Faktor ist als Ausdruck einer generellen Schwächung des Niederzurrungsprinzips bei einseitiger Spannvorrichtung unbedingt berechtigt und wichtig. Eine sinnvolle Deutung und Nutzung der zugrunde liegenden Ursachen fehlt in den genannten Quellen, weil man einfache Formeln haben wollte und daher nicht bereit war, die Gesetzmäßigkeiten von Kraft und Formänderung in Betracht zu ziehen.

5.4 Ladungsbewegungen und Formänderung von Sicherungsmitteln

Die berechtigterweise als effektiv gepriesene Direktsicherung setzt unweigerlich Ladungsbewegung und/oder Ladungsverformung voraus. Tolerierbare Grenzen solcher Bewegungen oder Verformungen sind jedoch nirgends festgelegt. Trotzdem gibt es sie und eine Vereinbarung sollte getroffen werden. Es wäre dann aber konsequent, niedergezurten Ladungseinheiten die gleichen Bewegungsspielräume zuzugestehen. Daraus könnte das Nutzungspotenzial der trotz allem mit Nachteilen behaftete Reibungssicherung erweitert werden.

Die Formänderung durch Kraftaufnahme von losen Sicherungsmitteln ist ohne Probleme mit ausreichender Zuverlässigkeit zu berechnen. Schwierigkeiten bereiten vergleichbare Daten für feste Ein- und Anbauten an Ladeflächen, wie Bordwände, Stirnwände und Rungen. Hier sind die Fahrzeughersteller gefragt.

Die Berücksichtigung der Ladungsbewegungen und Formänderungen von Sicherungsmitteln, die in mehreren Beispielen rechnerisch demonstriert worden ist, zeigt die bedenklichen Größenordnung der oben genannten Unzulänglichkeiten in den konventionellen Rechenverfahren, im positiven, wie auch im negativen Sinne.

5.5 Rechenverfahren

Es kann nicht das Ziel sein, die herkömmlichen, verhältnismäßig einfachen und tabellierbaren Formeln zur Bemessung ausreichender Ladungssicherung durch kompliziertere Berechnungen zu ersetzen, zumindest nicht für den täglichen Umgang. Trotzdem müssen Konsequenzen gezogen werden. Dabei sollten alle Vorteile der erweiterten Betrachtungsweise genutzt werden. So ist schon jetzt zu erkennen, dass die Niederzurrung profitieren wird. Ihr Ruf wird aufgebessert und der Zurraufwand auf physikalisch begründbare Notwendigkeit beschränkt werden können. Mit welchen neuen Formeln und zugehörigen Randbedingungen dieses Ziel erreicht werden kann, ist noch offen.

Ähnliches kann für die Direktsicherung gelten, wenn bestimmte Gesetzmäßigkeiten besser als bisher zur Geltung gebracht werden. Allerdings wird hier die Homogenität von Sicherungsanordnungen, also einheitliches Lastaufnahmeverhalten und Begrenzung von Ladungsbewegung auch zu Einschränkungen führen können.

Analoge, neu zu entwickelnde Rechenansätze können sich auch dem Kompaktieren, also der Bündelung und Umreifung zuwenden und wirtschaftlich attraktive Sicherungskonzepte ermöglichen.

Am Ende müssen einfache, praxistaugliche und gerichtsfeste Regeln und Richtlinien stehen, die in ihrer Anwendung die zugrunde liegende Physik möglichst vollständig zur Geltung kommen lassen.