

Ladungssicherung im Straßenverkehr – die Fakten

Inhalt

Vorwort.....	2
Einleitung	2
1. Niederzurrung	4
1.1 Wesen der Niederzurrtechnik	4
1.2 Traditionelle Bewertungsmodelle	5
1.3 Verbesserungsversuche in EN 12195-1:2003.....	8
1.3.1 Physikalische Grundlagen des k-Faktors	8
1.3.2 Der k-Faktor in der Niederzurrung	8
1.3.3 Rechenmodelle der DIN EN 12195-1:2004	9
1.3.4 Die genormte Vorspannkraft S_{TF}	10
1.3.5 Nutzen der Reibung zwischen Zurrmittel und Ladung	14
1.4 Tatsächliche Sicherungswirkung einer Niederzurrung	14
1.4.1 Vorspannkraft in der Ausgangssituation	15
1.4.2 Änderung der Zurrängen und Zurrwinkel	16
1.4.3 Elastizität von Spanngurten.....	19
1.4.4 Sicherungskraft quer zum Fahrzeug.....	20
1.4.5 Sicherungskraft längs zum Fahrzeug	23
1.4.6 Sicherungsmoment quer zum Fahrzeug.....	25
1.4.7 Sicherungsmoment längs zum Fahrzeug	29
1.4.8 Einfluss des Reibbeiwerts zwischen Zurrmittel und Ladung	33
1.5 Praktische Umsetzung.....	37
1.5.1 Vereinfachte Bewertungsmodelle	37
1.5.2 Reibbeiwert zwischen Ladefläche und Ladung.....	38
2. Direktsicherung.....	44
2.1 Notwendige Ladungsbewegung.....	44
2.1.1 Zurrmittel.....	45
2.1.2 Blockierung	48
2.2 Zulässige Vorspannung einer Direktzurrung	48
2.3 Sicherungswirkung einer Direktzurrung	49
2.3.1 Wirkung gegen horizontale Bewegung (Versatz, Vershub)	49
2.3.2 Wirkung gegen Kippen	50
2.4 Statische Unbestimmtheit komplexer Direktsicherungen	51
2.4.1 Unterschiedliche Zurrwinkel und Längen.....	51
2.4.2 Unterschiedliche Sicherungsmaterialien.....	53
3. Verschiedenes.....	55
3.1 Wankfaktor	55
3.1.1 Physikalische Ursachen	55
3.1.2 Akzeptanzprobleme	56
3.2 Kipp-Versuch.....	58
3.2.1 Gleichwertigkeit mit Rechenmodellen.....	58
3.2.2 Praktikabilität.....	59
3.2.3 Erweiterung für beliebige Vertikalbeschleunigungen	60
4. Zusammenfassung	61

Vorwort

Der im Mai 2010 an dieser Stelle veröffentlichte Bericht mit dem Titel "Ladungssicherung im Straßenverkehr – Wer kennt die Wahrheit?" hat erfreulich lebhaftes Interesse geweckt, aber auch Anlass zu vielerlei Rückfragen gegeben. Mit den hier veröffentlichten Fakten soll versucht werden, auf die wichtigsten Fragen Antwort zu geben und vielleicht auch Entscheidungshilfen bei der Suche nach einer einvernehmlichen Auslegung der DIN EN 12195-1 zu liefern, einer Auslegung, die möglichst auch im Einklang mit der inzwischen überarbeiteten Richtlinie VDI 2700, Blatt 2 und dem zu erwartenden CTU Code der IMO steht.

Inzwischen ist die Norm EN 12195-1:2010 durch das ADR 2013 als Grundlage für die Sicherung von Gefahrgut anerkannt worden und wird im gleichen Sinne in Deutschland bundesweit angewandt, während die überwiegende Zahl der Landespolizeibehörden die Sicherung von Nichtgefahrengut nach der augenscheinlich strengeren Fassung DIN EN 12195-1:2004 prüft. Allein dieser Umstand erscheint allen Praktikern paradox zu sein und bedarf der Aufklärung und gegebenenfalls der Korrektur.

Einleitung

Was muss eine Ladungssicherungsanordnung mindestens leisten? Diese Frage stellt sich einem umfangreichen Personenkreis, der hier nicht aufgezählt zu werden braucht. Die Antworten sind mehrschichtig und von unterschiedlichen Ansprüchen gekennzeichnet.

1. StVO §22 (1): Die Ladung einschließlich Geräte zur Ladungssicherung sowie Ladeeinrichtungen sind so zu verstauen und zu sichern, dass sie selbst bei Vollbremsung oder plötzlicher Ausweichbewegung nicht verrutschen, umfallen, hin- und herrollen, herabfallen oder vermeidbaren Lärm erzeugen können. Dabei sind die anerkannten Regeln der Technik zu beachten.
2. ADR 2013: Versandstücke, die gefährliche Güter enthalten, und unverpackte gefährliche Gegenstände, müssen durch geeignete Mittel gesichert werden, die in der Lage sind, die Güter im Fahrzeug oder Container so zurückzuhalten (z.B. Befestigungsgurte, Schiebewände, verstellbare Halterungen), dass eine Bewegung während der Beförderung, durch die die Ausrichtung der Versandstücke verändert wird oder die zu einer Beschädigung der Versandstücke führt, verhindert wird.
3. Die Kunden eines Transportunternehmers, insbesondere die Empfänger einer Ware und auch die Ladungsversicherer wünschen eine Sicherung jeglicher Ladung, welche die öffentlich-rechtlichen Anforderungen der StVO und der ADR in der Weise übertrifft, dass mechanische und auch klimatische Schäden an der Ladung grundsätzlich vermieden werden.

In der praktischen Umsetzung von Ladungssicherungsmaßnahmen wie auch bei polizeilichen Kontrollen ist man auf "anerkannte Regeln der Technik" angewiesen. Diese Regeln enthalten neben Gestaltungshinweisen rechnerische Prüfkriterien, in denen festgelegte Transportbeanspruchungen mit dem Wirkvermögen der gewählten Ladungssicherungsanordnung bilanziert werden. Diesen Bilanzen liegen stark vereinfachte Rechenmodelle zugrunde, von denen nicht angenommen werden darf, dass sie die Realität sowohl der Beanspruchungen als auch der Sicherungswirkungen genau und vollständig abbilden. Darauf ist im Bericht "Ladungssicherung im Straßenverkehr – Wer kennt die Wahrheit?" schon ausführlich eingegangen worden.

Eine exakte Abbildung der physikalischen Realität durch die genannten Rechenmodelle ist kaum möglich und wegen der Vielfalt der Einflussgrößen auch nicht anzustreben. Es kommt vielmehr darauf an, dass das verwendete Modell einfach und universell anwendbar ist und dabei sicherstellt, dass die oben genannten Ziele und Wünsche ohne übertriebenen Aufwand erfüllt werden können. Ob ein Rechenmodell diesen Anforderungen gerecht wird, kann eben wegen der Vielfalt der Einflussgrößen nur nach Ablauf von Jahren und nach sorgfältiger Ana-

lyse von Unfällen gesagt werden. Das alleinige Auftreten von Unfällen sagt noch nichts über die technische Untauglichkeit eines Rechenmodells aus, da Unfälle oft nachweislich die Folge von Verstößen gegen das Modell sind.

Nachstehend wird eine tabellarische Übersicht der derzeit als benötigt erachteten Rechenmodelle gegeben.

	Rutschen längs	Rutschen quer	Kippen längs	Kippen quer
Niederzurrung (NZ)	NZ RL	NZ RQ	NZ KL	NZ KQ
Direktzurrung (DZ)	DZ RL	DZ RQ	DZ KL	DZ KQ

Kompaktierung in Form von Bündelung oder Umreifung von einzelnen Ladungseinheiten oder Abdeckung von Schüttgut wird rechnerisch bislang so gut wie nicht geprüft. Die Kombination von Niederzurrung oder Direktzurrung mit Blockierungsmaßnahmen wird durch einfache Addition der Sicherungswirkungen geprüft. Die Prüfungen in Längsrichtung unterscheiden die Richtungen nach vorn und nach hinten wegen der unterschiedlichen Transportbeanspruchungsannahmen. Als Niederzurrung wird generell eine Anzahl von quer zum Fahrzeug über die Ladung verlaufender Laschings angesehen, die beidseitig am Fahrzeug befestigt sind, aber nur auf einer Seite vorgespannt werden.

Die Interpretation von stark vereinfachten Rechenmodellen führt gelegentlich zu Missverständnissen. So wird zum Beispiel nach den derzeitigen Regeln der Technik eine Niederzurrung als ausreichend gegenüber einer Beanspruchung in Fahrtrichtung angesehen, wenn die Bilanz aus Trägheitskraft der Ladung $F_X = 0,8 \cdot m \cdot g$ und Reibung zwischen Ladung und Fahrzeug $F_R = \mu \cdot (m \cdot g + \Sigma F_V)$ mindestens ausgeglichen ist.

$$0,8 \cdot m \cdot g \leq \mu \cdot (m \cdot g + \Sigma F_V)$$

Dabei ist es zunächst unbestimmt, ob der Reibbeiwert μ für Haft- oder Gleitreibung gewählt werden muss und auf welche Weise die Summe der vertikalen Vorspannkräfte ΣF_V der Niederzurrungen festgelegt wird. Das ist allein eine Frage der Kalibrierung des Modells, mit der seine Ergebnisse die komplexe physikalische Realität angenähert ersetzen sollen. Es ist daher nicht richtig, aus dem Rechenmodell zu folgern, dass eine derart geprüfte Niederzurrung einer Vollbremsung mit gemessenen 0,8 g Verzögerung ohne Verrutschen (Versatz) oder Verformung (Verschub) der Ladung standhalten muss. Auch darf aus dem erwarteten oder beobachteten Rutschen der niedergezurrten Ladung bei einer Vollbremsung nicht auf die zwingende Verwendung des Gleitreibbeiwerts im Rechenmodell geschlossen werden.

Die Kalibrierung von vereinfachten Rechenmodellen kann mit Hilfe von zahlreichen und systematischen Großversuchen mit statistischer Auswertung durchgeführt werden. Das ist aber kostspielig und praktisch nie geschehen. Ein anderer Weg ist die gründliche physikalische Analyse der Belastungsvorgänge mit einigen wenigen Prüfversuchen. Hier liegt möglicherweise einiges an Material vor. Tatsächlich aber scheint es vorzugsweise so zu sein, dass als Messlatte für vorgeschlagene Rechenmodelle in der Vergangenheit die "bisherige praktische Erfahrung" gedient hat, wobei unvermeidlich auch wirtschaftliche Beweggründe eine Rolle gespielt haben mögen. Trotzdem bleibt nicht aus, dass man nach einigen Jahren durchaus in der Lage ist, die Tauglichkeit eines Rechenmodells rückblickend zu beurteilen.

1. Niederzurrung

1.1 Wesen der Niederzurrtechnik

Die Niederzurrtechnik ist mit Sicherheit eine archaische Form der Ladungssicherung, denn die früheren auf Pferdefuhrwerken transportierten Ladungseinheiten in Form von Ballen, Fässern, Krügen und vielleicht Holzkisten eigneten sich kaum für Direktzurrung.

Eindrucksvoll wird die Niederzurrtechnik durch die Sicherung einer hohen Heuladung auf einem Leiterwagen demonstriert (Bild 1). Der Längsbalken auf dem Heu wird an beiden Enden durch jeweils zwei schräg laufende Ketten niedergehalten. Zusätzlich verlaufen mindestens drei Niederzurrungen aus Seilen quer über die Heuladung. Bei näherer Betrachtung enthält diese Sicherungsanordnung nahezu alle wesentlichen Elemente einer guten Niederzurrung:

- Das Heu wird zusammengepresst und sorgt durch seine Elastizität für eine gute und bleibende Vorspannung in den Ketten und Zurrseilen. Diese Aufgabe fällt heute bei Niederzurrung von steifen Ladungseinheiten allein den Zurrmitteln zu, die deshalb eine geeignete Elastizität aufweisen und nachspannbar sein sollten.
- Der lange Heubalken aus Rundholz sorgt für eine gute Längsverteilung der vertikalen Sicherungskräfte und verhindert zu tiefes Einschneiden der Zurrseile. Das übernehmen heute bei ähnlich nachgiebigen Ladungen sogenannte Kantenbleche, die leider oft fehlen.
- Die Zurrseile erfüllen den erwünschten Nebeneffekt der Kompaktierung der Heuladung. Auch das ist noch heute eine wichtige Nebenaufgabe einer Niederzurrung.



Bild 1: Heuwagen mit Sicherung durch Niederzurrung, © [http:// kleinsthof.de](http://kleinsthof.de)

Die Sicherungswirkung einer quer zur Fahrzeugachse verlaufenden Niederzurrung ist vielschichtig und lässt sich in folgende Elemente gliedern:

1. Die Vertikalkomponenten der Zurrkräfte erhöhen die Reibung zwischen Ladung und Ladefläche, aber auch zwischen horizontal geschichteten Ladungsteilen und sichern so gegen horizontale Verlagerung. Diese Wirkung ist für alle Richtungen gegeben, also längs und quer zur Fahrzeuglängsachse, setzt aber eine permanente Vorspannung in der Niederzurrung und einen brauchbaren Reibbeiwert voraus.
2. Bei äußerer Beanspruchung quer zur Fahrzeugachse wird sich die Ladung ein wenig seitwärts bewegen. Dies kann durch Versatz (Rutschen) oder Vers Schub (Verformung) geschehen. Bei schräg verlaufender Niederzurrung tritt infolge der Reibung zwischen Zurrmittel und Ladung eine kleine, sichernde Querkomponente als Differenz der Kräfte in

den Anteilen der Niederzurrung auf. Bei rein vertikaler Niederzurrung bekommen beide Anteile der Niederzurrung sichernde Querkomponenten. Im Übergangsbereich zwischen schräger und vertikaler Niederzurrung treten beide Effekte nebeneinander auf.

3. Bei äußerer Beanspruchung längs zur Fahrzeugachse wird sich die Ladung ein wenig in Längsrichtung bewegen. Beide Anteile einer quer verlaufenden Niederzurrung, ob schräg oder vertikal, werden dadurch in Längsrichtung geneigt und bekommen kleine, sichernde Längskomponenten, deren mögliche Größe durch die Reibung zwischen Ladung und Zurrmittel begrenzt wird.
4. Kippgefährdete Ladungseinheiten erhalten durch eine Niederzurrung eine vergrößerte Standsicherheit in alle Richtungen, da die Summe der Vertikalkomponenten der Zurrkräfte dem Eigengewicht zugeschlagen werden können und dadurch das Eigenstandmoment vergrößern. Diese vereinfachte Betrachtungsweise gilt allerdings nur für symmetrische Verhältnisse. Verlaufen die Zurrmittel asymmetrisch bezogen auf den Schwerpunkt der Ladung oder die wirksamen Kippachsen, so müssen die Niederzurrkräfte einzeln in Rechnung gestellt werden.
5. Bei äußerer Beanspruchung quer zur Fahrzeugachse wird sich eine kippgefährdete Ladungseinheit ein wenig seitwärts bewegen oder sogar etwas ankippen. Dadurch verändern sich die geometrische Verhältnisse in günstiger Weise, so dass kleine zusätzliche Momente entstehen, welche die Standsicherheit erhöhen.
6. Bei äußerer Beanspruchung längs zur Fahrzeugachse wird sich eine kippgefährdete Ladungseinheit ein wenig in Längsrichtung bewegen oder sogar etwas ankippen. Beide Anteile einer quer verlaufenden Niederzurrung wirken dann wie eine Direktsicherung und verhindern das Kippen, wobei die Belastungsgrenze durch den LC-Wert gegeben ist. Diese vergleichsweise große Kraft wird aber erst nach entsprechender Dehnung erreicht, was wiederum ein deutliches Ankippen mit dynamischen Zusatzeffekten bedeuten würde. Deshalb sollte die Belastungsgrenze LC nicht als Modellparameter benutzt werden.
7. Die angeführten Bewegungen der Ladung können unter Umständen zu einer kleinen elastischen Dehnung der Zurrmittel und dadurch zu einem Anstieg der Kräfte führen. Dies erhöht die Wirkungen unter 1. bis 6. der Aufzählung.
8. Im Falle mehrerer nebeneinander oder übereinander stehender Ladungseinheiten wirkt eine Niederzurrung auch kompaktierend. Das kann bei anfänglichen Staulücken allerdings auch zu einem Abfall der Vorspannung in der Niederzurrung führen. Deshalb sind nachspannbare Spannmittel und deren bedarfsgerechte Betätigung wichtig.
9. Elastische Niederzurrungen dämpfen vertikale Schwingungen einer Ladung, die durch Unebenheiten der Straße ausgelöst werden können. Deshalb ist es wichtig, auch dann, wenn die Reibung allein zur Sicherung ausreichend erscheint, mindestens zwei Niederzurrungen zu setzen.

Diese komplexen Wirkmechanismen entziehen sich einer einfachen rechnerischen Nachbildung und verlangen geradezu ausdrücklich den Entwurf eines vereinfachten Rechenmodells, welches nichtsdestoweniger den Gesamtumfang der Wirkungen quasi umhüllend abbildet. Das ist in der Vergangenheit offenbar nur unzureichend gelungen.

1.2 Traditionelle Bewertungsmodelle

Das traditionelle Bewertungsmodell für Niederzurrungen, welches z.B. in der deutschen Richtlinie VDI 2702 vom Mai 1990 dargestellt wird, verwendet ausschließlich die im vorangehenden Kapitel unter 1. und 4. beschriebenen Wirkungen. So wird als Sicherungswirkung gegen Rutschen ausschließlich die Reibungserhöhung durch die Summe der Vertikalkomponenten der Zurrkräfte verwertet. Als Sicherungswirkung gegen Kippen wird im gleichen Sinne die Summe der Vertikalkomponenten der Zurrkräfte zur Erhöhung der Standsicherheit eingesetzt. In mathematischer Schreibweise ergeben sich folgende Bilanzen:

$$\text{Rutschbilanz: } f \cdot G \leq \mu \cdot (G + 2 \cdot n \cdot F_T \cdot \sin \alpha) \quad (1)$$

$$\text{Kippbilanz: } a \cdot f \cdot G \leq b \cdot (G + 2 \cdot n \cdot F_T \cdot \sin \alpha) \quad (2)$$

f = Beschleunigungsbeiwert (0,8 nach vorn, 0,5 nach hinten und zu den Seiten)

G = Gewicht der zu sichernden Ladung [daN]

μ = Reibbeiwert zwischen Ladung und Ladefläche

n = Anzahl der Niederzurrungen

F_T = Vorspannung in der Niederzurrung [daN]

α = vertikaler Zurrwinkel [°]

a = Hebel des Kippmoments [m]

b = Hebel des Standmoments [m]

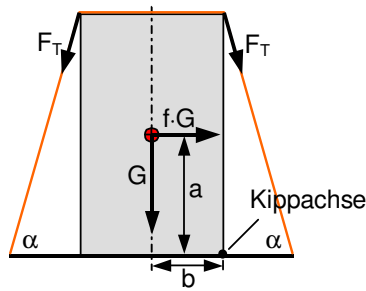


Bild 2: Traditionelle Bewertung einer Niederzurrung

Diese beiden Modelle haben zwei unschätzbare Vorteile. Sie sind gleichermaßen in Längs- und in Querrichtung des Fahrzeugs verwendbar und sie sind nicht auf die Auswertung der Wirkungen von kleinen Ladungsbewegungen angewiesen. Die auf kleinen Ladungsbewegungen beruhenden Sicherungswirkungen, die zwar allesamt deutlich geringer als die Hauptwirkung Reibungserhöhung sind, werden nicht beachtet.

Nun könnte man sich auf den Standpunkt stellen, die Ladung soll sich ja auch nicht bewegen. Das aber wäre inkonsequent, da man auch jeder Direktsicherung (siehe Kapitel 2) eine durchaus erhebliche Bewegung zugestehen muss, um die volle Sicherungskapazität LC der Zurrmittel auszuschöpfen, wie es die üblichen Rechenmodelle vorsehen. Es widerspräche außerdem den Gesetzen der Mechanik, der Störung eines Kräfte- oder Momentengleichgewichts ohne Bewegung der betroffenen Masse begegnen zu wollen. Eine niedergezurrte Ladung darf sich bei äußerer Belastung bewegen und sie tut es auch, wie alle Fahrversuche beweisen.

Insgesamt haben die oben genannten Rechenmodelle, die sich durchaus in der Praxis bewährt haben, bei vielen Anwendern den Eindruck erweckt, als enthielten sie die vollständige physikalische Beschreibung der Sicherungswirkung einer Niederzurrung. Daraus hat sich z.B. der "Lehrsatz" ergeben, dass eine Niederzurrung möglichst senkrecht verlaufen solle, weil der Sinus des Zurrwinkels α erst bei 90° den größtmöglichen Wert erreicht. Auch wird gelegentlich argumentiert, da sich die Ladung ja nicht bewege, sei es logisch, den Haftreibbeiwert für μ einzusetzen. Diese Schlussfolgerungen sind nicht haltbar, wie in Kapitel 1.4 gezeigt wird.

Fest steht, dass die genannten Rechenmodelle einen beträchtlichen Prozentsatz der potenziellen Sicherungswirkung einer Niederzurrung außeracht lassen. Man befindet sich also bei ihrer Anwendung deutlich auf der sicheren Seite, vor allem, wenn der niedrigere Gleitreibbeiwert in Rechnung gesetzt wird. Ob diese rechnerische Sicherheitsreserve den Vorspannungsverlust bei einseitigem Spannmittel oder das mögliche Nachlassen der Vorspannung in den Niederzurrungen während einer längeren Fahrt oder Unsicherheiten in der Bemessung der Reibung ausgleichen sollte, ist unbekannt. Derartige Abwägungen der Väter der oben genannten Rechenmodelle sind leider nicht überliefert.

Auf einen kleinen, verborgenen Makel der oben genannten Rechenmodelle muss noch hingewiesen werden. Es handelt sich um den dominanten Einfluss des Reibbeiwerts μ bzw. des Standhebels b . Betrachtet man die Sicherungswirkungen der Niederzurrung in beiden Model-

len isoliert, so haben die genannten Größen μ und b einen linearen Einfluss, d.h. die Sicherungswirkung verdoppelt sich, wenn μ bzw. b verdoppelt wird.

Sicherungswirkung gegen Rutschen: $SW = \mu \cdot 2 \cdot n \cdot F_T \cdot \sin \alpha$

Sicherungswirkung gegen Kippen: $SW = b \cdot 2 \cdot n \cdot F_T \cdot \sin \alpha$

Das entspricht rein gefühlsmäßig den Erwartungen jedes Praktikers. Jedoch erhält man einen deutlich nichtlinearen Einfluss der Größen μ und b , wenn man die vollständigen Bilanzen heranzieht und dazu verwendet, die notwendige Anzahl der Niederzurrungen oder die notwendige Vorspannkraft zu ermitteln. In den folgenden Beispielen wird die notwendige Anzahl n der Niederzurrungen in Abhängigkeit vom Reibbeiwert μ bzw. vom Standhebel b dargestellt. Die oben genannten Bilanzen werden zu dem Zweck nach n umgestellt.

Notwendige Anzahl n gegen Rutschen:
$$n \geq \left(\frac{f}{\mu} - 1 \right) \cdot \frac{G}{2 \cdot F_T \cdot \sin \alpha} \quad (3)$$

Notwendige Anzahl n gegen Kippen:
$$n \geq \left(\frac{a \cdot f}{b} - 1 \right) \cdot \frac{G}{2 \cdot F_T \cdot \sin \alpha} \quad (4)$$

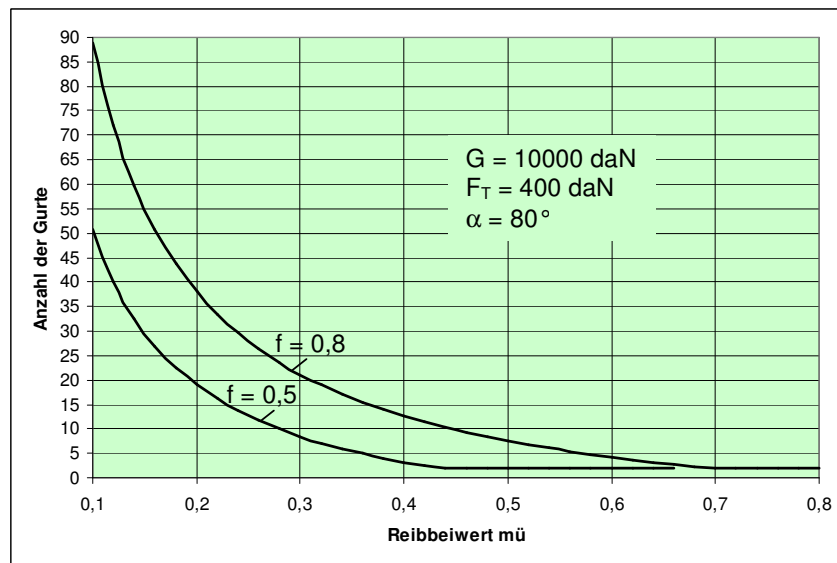


Bild 3: Einfluss des Reibbeiwerts auf die notwendige Anzahl von Niederzurrungen

Es ist zu erkennen, dass kein linearer, sondern ein hyperbolischer Zusammenhang zwischen n und μ bzw. zwischen n und b besteht. Der Grund hierfür ist, dass μ wie auch b nicht nur die Sicherungswirkung direkt und linear beeinflussen, sondern über das Ladungsgewicht auch maßgeblich den Bedarf an Sicherungswirkung aus der Niederzurrung bestimmen. Das ist zwar physikalisch richtig, aber eben durch das Ausblenden der sonstigen Sicherungswirkungen, die im Grunde Direktsicherungscharakter haben, unvollständig. Somit kann es dazu kommen, dass z.B. bei einem geringen Reibbeiwert μ eine "gefühlte Unzahl" von Niederzurrungen durch das Modell gefordert werden. Das kann unter Praktikern die Glaubwürdigkeit der vereinfachten Rechenmodelle beeinträchtigen.

Grundsätzlich sollte bei Anwendung der Niederzurrtechnik für einen guten Reibbeiwert von mindesten $\mu = 0,3$ gesorgt werden. Dann hält sich die Nichtlinearität des Bezugs zur notwendigen Anzahl der Niederzurrungen in vernünftigen Grenzen. Ebenso sind extrem kleine Standhebel b selten, so dass der beschriebene Geburtsfehler der Rechenmodelle in der Praxis nicht von überragender Bedeutung ist. Insgesamt gesehen waren also diese Modelle der Richtlinie VDI 2702 von 1990 mit der Empfehlung, den Gleitreibbeiwert zu verwenden,

durchaus reichlich angemessen und erfolgreich. Das gilt auch für die inhaltlich leicht geänderte Fassung mit der Bezeichnung VDI 2700 Blatt 2 vom November 2002.

1.3 Verbesserungsversuche in EN 12195-1:2003

Bei den Beratungen zur Erstellung einer europäischen Norm zur Vereinheitlichung der Ladungssicherung um die Jahrtausendwende wurde ein Hinweis in der Richtlinie VDI 2700 Blatt 2 vom November 2002 aufgegriffen, welcher auf die durchgängig einseitig angeordneten Spannmittel von Niederzurrungen gerichtet war.

Der Hinweis lautet: *"Bei Niederzurrung und nur einseitiger Spannvorrichtung kann auf der Vorspannseite im Rahmen der zulässigen Zurrmittelkraft – und Rücksicht auf den zunächst auftretenden Vorspannkraft-Unterschied infolge der Umschlingungsverluste – eine höhere Vorspannkraft sinnvoll sein."* Dieser Hinweis war in der genannten Richtlinie im Zusammenhang mit der rechnerisch ermittelten Mindestvorspannkraft zu sehen, mit der die Kräfte- und Momentenbilanzen erfüllt werden.

Mit dieser Fußnote wollte man sich in der europäischen Norm nicht zufrieden geben und hat den tatsächlich zu erwartenden Verlust an Vorspannkraft durch eine pauschale Korrektur in Rechnung gesetzt. Das war die Geburt des k-Faktors. Da die maßgeblichen physikalischen Zusammenhänge bei der weiteren Beurteilung der Sicherungswirkung einer Niederzurrung wichtig sind, wird an dieser Stelle ein wenig weiter ausgeholt.

1.3.1 Physikalische Grundlagen des k-Faktors

Die Berücksichtigung eines k-Faktors geht von der unbestreitbaren Tatsache aus, dass beim einseitigen Spannen eines umgelenkten Seils oder Gurts hinter der Umlenkstelle infolge der Reibung eine verringerte "resultierende" Kraft F_{res} zu verzeichnen ist. Dieser Umstand ist von Leonhard Euler (1707 – 1783) mathematisch beschrieben und später von Johann Albert Eytelwein (1764 – 1848) der Technik und dem Ingenieurwesen zugänglich gemacht worden.

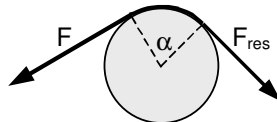


Bild 4: $F_{\text{res}} = F \cdot e^{-\mu \cdot \alpha}$

Die Eulersche Zahl e ist eine wichtige Naturkonstante und lautet im Dezimalsystem gerundet 2,718281828. Die Funktion e^x ist auf allen erweiterten Taschenrechnern enthalten. Die in Bild 4 dargestellte Umlenkung des Seils über einen Winkel $\alpha = 75^\circ$ und mit einem angenommenen Reibbeiwert zwischen Seil und Umlenkstelle $\mu = 0,2$ würde bei einer Zugkraft $F = 100$ daN dazu führen, dass auf der anderen Seite nur die Kraft $F_{\text{res}} = 77$ daN ankommt. Der Umlenkwinkel muss im Bogenmaß in Rechnung gesetzt werden. Er hat in diesem Beispiel den Wert von $\text{rund } 75 / 57,3 = 1,31 \text{ rad}$.

$$100 \cdot e^{-0,2 \cdot 1,31} = 100 \cdot 0,77 = 77$$

Der Radius der Umlenkstelle spielt dabei keine Rolle, solange er nicht so klein wird, dass die innere Steifigkeit des Seils einen zusätzlichen Kraftverlust herbeiführt. Mit den flachen Zurrgurten kann der Umlenkradius durchaus knapp unter 1 cm sein, ohne dass dieser Kanteneffekt merklich in Erscheinung tritt. Bei einer Kette ist dieser Grenzradius deutlich größer.

1.3.2 Der k-Faktor in der Niederzurrung

Die Euler'sche Kantenreibung lässt sich an einer üblichen Niederzurrung leicht anhand des Zurrwinkels α abschätzen, der zwischen Zurrgurt und Ladefläche liegt. Wie Bild 5 zeigt, wird der Zurrgurt zweimal um den gleichen Winkel α umgelenkt. Bei jeder dieser Umlenkungen

wird die Vorspannung F_T durch den Faktor $c = e^{-\mu' \cdot \alpha}$ geschwächt. Der hier verwendete Reibbeiwert μ' gilt für die Reibung zwischen Gurt und Ladungseinheit.

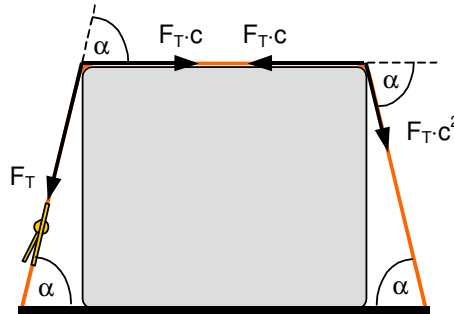


Bild 5: Vorspannungsverlust durch Reibung an den Ladungskanten

Geht man von Zurrwinkeln zwischen 80° und 90° und von Reibbeiwerten von 0,20 bis 0,25 zwischen Gurt und Ladung aus, so erhält man Werte für den Faktor c^2 um 0,5. Das bedeutet, dass von der Vorspannung F_T an der Ratsche etwa nur die Hälfte auf der anderen Seite ankommt. Es stehen als Summe der Vertikalkomponenten der Vorspannung also nicht wie in der Richtlinie VDI 2702 unterstellt ($2 \cdot F_T \cdot \sin \alpha$), sondern nur ($1,5 \cdot F_T \cdot \sin \alpha$) zur Verfügung. Der Faktor 2 bzw. 1,5 wurde k-Faktor genannt und in der DIN EN 12195-1:2004 bei einseitigem Spannmittel auf 1,5 festgesetzt und bei beidseitigem Spannmittel auf 2 belassen.

Da die einseitige Anordnung des Spannmittels aus praktischen Gründen die Regel ist, wurde mit dieser Festsetzung die rechnerische Sicherungswirkung einer Niederzurrung sowohl zum Verhindern des Rutschens als auch des Kippens um 25% verringert. Dieser rechnerische Verlust muss bei ansonsten gleichbleibenden Werten von Reibung und Vorspannung durch eine um 33,3% erhöhte Anzahl von Gurten ausgeglichen werden.

Diese substanzielle Erhöhung der Sicherungsanforderung ist im Nachhinein nicht leicht zu verstehen. Es lagen, soweit bekannt, keine systematischen Untersuchungen in Form von Unfallanalysen und Statistiken vor, die belegt hätten, dass Niederzurrungen gemäß der vorher bestehenden Richtlinie VDI 2702 bzw. VDI 2700 Blatt 2 nicht ausreichend gewesen wären. So kann die breite Akzeptanz dieser Änderung durch die deutsche Fachwelt vielleicht nur durch die erdrückende Überzeugungskraft der Euler'schen Gleichung erklärt werden. Die lässt sich freilich durch eine einfache Versuchs- und Messanordnung eindrucksvoll demonstrieren, was tatsächlich auch geschehen ist.

Somit sind die ursprünglichen Rechenmodelle zur Bewertung einer Niederzurrung zwar im Detail korrigiert worden. Ihre Eignung zur ausgewogenen Abbildung aller Sicherungswirkungen einer Niederzurrung muss hingegen mehr als zuvor in Frage gestellt werden, es sei denn, man wünscht bewusst einen Sicherheitsgewinn, den man mit einem 33%igen Mehraufwand an Zurrgurten zu bezahlen bereit ist.

1.3.3 Rechenmodelle der DIN EN 12195-1:2004

Mit der Einführung des k-Faktors wurde erstmalig die Möglichkeit eröffnet, mit den Querkomponenten einer schrägen Niederzurrung zu rechnen. Bislang war man stillschweigend davon ausgegangen, dass sich diese Horizontalkomponenten im Ruhezustand – ähnlich wie bei Direktzurrung – gegenseitig aufheben. Die Querkomponenten der Niederzurrung in Bild 6 betragen links $F_T \cdot \cos \alpha$ und rechts $F_T \cdot c^2 \cdot \cos \alpha$. Wirksam ist jeweils die Differenz, weil die Kräfte in entgegengesetzte Richtungen weisen.

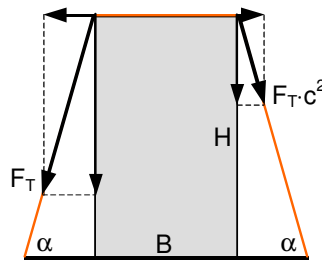


Bild 6: Komponenten einer Niederzurrung mit unterschiedlicher Vorspannung

Daraus folgt für die Sicherungswirkungen gegen **Rutschen**, einschließlich der Reibungserhöhung durch die Vertikalkomponente:

$$\text{Sicherungswirkung nach links: } SW = F_T \cdot [(1 + c^2) \cdot \mu \cdot \sin \alpha + (1 - c^2) \cdot \cos \alpha] \quad (5)$$

$$\text{Sicherungswirkung nach rechts: } SW = F_T \cdot [(1 + c^2) \cdot \mu \cdot \sin \alpha - (1 - c^2) \cdot \cos \alpha] \quad (6)$$

Für die Sicherungswirkungen gegen **Kippen** ergeben sich ähnliche Formeln:

$$\text{Sicherungswirkung nach links: } SW = F_T \cdot [B \cdot \sin \alpha + (1 - c^2) \cdot H \cdot \cos \alpha] \quad (7)$$

$$\text{Sicherungswirkung nach rechts: } SW = F_T \cdot [B \cdot c^2 \cdot \sin \alpha - (1 - c^2) \cdot H \cdot \cos \alpha] \quad (8)$$

Die Gleichungen zeigen, dass die Sicherungswirkungen nach links deutlich erhöht und die nach rechts ebenso deutlich verringert sind. Letztere können bei geeigneter Wahl der Parameter α , c , B und H zu Null werden oder sogar negativ. Allein diese Erkenntnis macht deutlich, dass derartige Rechenmodelle, obwohl mathematisch einwandfrei, nicht mit der Realität übereinstimmen können, diese also physikalisch unzureichend abbilden. Die Lösung des Problems wird in Kapitel 1.4 gezeigt.

In der Fassung der DIN EN 12195-1 von 2004 ist man nicht ganz so weit gegangen. Bei der Formulierung der Sicherungswirkungen gegen Rutschen hat man die Querkomponenten nicht berücksichtigt. Beim Kippen hat man es jedoch getan und ist von dem ungünstigen Fall ausgegangen, wie ihn die Sicherungswirkung gegen Kippen nach rechts (Gleichung 8) zeigt. Man erhält wegen der Möglichkeit, dass die Sicherungswirkung sehr klein, Null oder sogar negativ werden kann, in der Tat eine Formel, die unter Umständen eine unendlich große Anzahl von Niederzurrungen oder sogar eine negative Anzahl fordert. Darauf ist bereits im Bericht "Ladungssicherung im Straßenverkehr – Wer kennt die Wahrheit?" ausführlich eingegangen worden.

1.3.4 Die genormte Vorspannkraft S_{TF}

Die Einführung des k-Faktors in die EN 12195-1:2003 hat in Teilen des europäischen Auslands keine Zustimmung gefunden und Unzufriedenheit ausgelöst. Es wurde mit gerechneten Beispielen von unsinnig großer Anzahl von Niederzurrungen argumentiert und auch mit den Ergebnissen praktischer Versuche und Messungen¹ dagegen gehalten. Auch die vereinbarte Größe des k-Faktors wurde und wird noch heute bestritten, obwohl er in der Fassung EN 12195-1:2010 offiziell wieder abgeschafft worden ist.

Die gerechneten Beispiele belegen vor allem die offenkundige Unbrauchbarkeit der vorgelegten Formel zur Prüfung der Kippsicherung durch Niederzurrung. Die Ergebnisse der praktischen Versuche und Messungen können und sollen hier weder bestätigt noch bestritten werden. Die nachträglichen Überlegungen zur Größe des k-Faktors verdienen jedoch eine Erörterung, da hierdurch weitere wichtige Fakten dargestellt werden können. Es geht um die erreichbare Vorspannkraft in einer Niederzurrung, die unstrittig neben der Reibung die Hauptrolle für die Sicherungswirkung spielt.

¹ Verify-Report von TFK und MariTerm AB, Schweden, 2004

In der Richtlinie VDI 2700 Blatt 2 vom Januar 2002 wird über die anzustrebende Vorspannung in einer Niederzurrung lediglich gesagt, dass sie 50% der zulässigen Zurrkraft LC des verwendeten Zurrmittels nicht überschreiten, aber mindestens den Wert haben solle, der sich durch Auflösen der Rutsch- oder Kippbilanz nach der Vorspannung F_T ergibt. Ein gerechnetes Beispiel in dieser Richtlinie zeigt als Mindestvorspannkraft den Wert 1563 daN. Dieser Wert ist mit üblichen Zurrgurten jedoch keinesfalls zu erreichen.

Auch die DIN EN 12195-1:2004 verlangt noch lapidar für die Vorspannkraft F_T in Niederzurrungen Werte zwischen 0,1 LC und 0,5 LC, obwohl dort unter den normativen Verweisungen bereits die im Februar 2000 erschienene EN 12195-2 enthalten ist, welche eine "Standard Tension Force" (S_{TF}) definiert. Diese Norm, im Februar 2001 als DIN EN 12195-2 über "Zurrgurte aus Chemiefasern" erschienen, legt erstmals die mit üblichen Ratschen erreichbare Vorspannkraft von Zurrgurten und ihre Feststellung durch ein einheitliches Prüfverfahren fest.

Erst im Entwurf zur revidierten Fassung der VDI 2700 Blatt 2 vom Januar 2002 wie auch in der DIN EN 12195-1:2011 wird dieser S_{TF} -Wert als anzunehmende Vorspannkraft in der Bilanzrechnung empfohlen. Daraus ergibt sich eine Folge für den k-Faktor.

Der in Bild 5 dargestellte Fall setzt voraus, dass die Vorspannung F_T mit einem stetig arbeitenden Spannmittel, z.B. mit einer Spannschraube hergestellt wird. Üblicherweise werden zum Spannen von Textilfasergurten aber Spannratschen mit einem Repetierhebel verwendet. Beim Spannen wird dieser Hebel so lange betätigt, bis eine Handkraft² von nicht mehr als 50 daN erreicht ist. Dann wird der Ratschenhebel wieder nachgelassen, bis die Sperrklinke der Ratsche in den zuletzt übersprungenen Zahn der Wickeltrommel einrastet. Durch dieses Nachlassen fällt die Vorspannung in diesem Gurtteil wieder etwas ab.

Auf diese Weise kommt es dazu, dass auf der Spanngegensseite eine höhere Vorspannung steht, als es nach der Euler'schen Formel mit Bezug auf die verbliebene Vorspannung auf der Spannseite zu erwarten wäre. Dieser für Spannratschen typische Arbeitsablauf wird in einer jüngeren Veröffentlichung³ als Argument für die Verwendung eines k-Faktors = 2 vorgetragen, gleichbedeutend mit einer gleichen Vorspannung auf beiden Seiten des Gurts. Das Argument leuchtet zunächst ein. Aber bei genauerem Hinsehen ist der Spielraum dieses Vorspannungsausgleichs gering, wenn die Ratschen "bestimmungsgemäß" im Rahmen der Norm verwendet werden.

Die auf dem Etikett jedes genormten Gurts bescheinigte Spannkraft S_{TF} wird für jeden Gurt-Prototypen nach einem in der Norm DIN EN 12195-2:2001 beschriebenen Prüfverfahren bestimmt. Dieses Verfahren bildet die praktische Anwendung des Gurts in einer ebenfalls genormten Prüfvorrichtung nach, in welcher nach Spannen mit der "normalen Handkraft" S_{HF} von 50 daN der Spannhebel nachgelassen wird, bis die Sperrvorrichtung in den zuvor passierten Zahn der Wickelwelle einrastet. Der dadurch entstehende Kraftabbau wirkt sich infolge der mehrfachen Wiederholung des Prüfvorgangs bei versetztem Gurtband statistisch so aus, dass je nach Abstand der Zähne nur etwa 70% bis 90% der aus S_{HF} maximal möglichen Vorspannung als S_{TF} bescheinigt werden können.

Dieser Prüfvorgang lässt sich mathematisch folgendermaßen modellieren. Die Spannung des Gurts mit der normalen Handkraft S_{HF} erzeugt die anfängliche Kraft F_{max} auf der Spannseite und die zugehörige Restkraft $(k - 1) \cdot F_{max}$ auf der Gegenseite. Durch das anschließende Einrasten des Spannhebels nimmt die Kraft auf der Spannseite um den Betrag ΔF ab. Die Restkraft ist die genormte Spannkraft $S_{TF} = F_{max} - \Delta F$. Daraus lässt sich der auf S_{TF} bezogene neue Faktor k' berechnen.

$$k' = \frac{S_{TF} + (k - 1) \cdot F_{max}}{S_{TF}} = \frac{F_{max} - \Delta F + (k - 1) \cdot F_{max}}{F_{max} - \Delta F} = k + \frac{(k - 1) \cdot \Delta F}{F_{max} - \Delta F} \quad (9)$$

² Für diese "höchstzulässige Handkraft" (Standard Hand Force, S_{HF}) sind die Ratschen nach der Norm ausgelegt und zugelassen.

³ Positionspapier der CEFIC zur Norm EN 12195-1:2010 in Zeitschrift "Gefährliche Ladung" 07/2012

Es ist sofort ersichtlich, dass dieser berichtigte Wert k' größer als k sein muss. Er tendiert zu größeren Werten bei Spannratschen mit 10 oder 11 Zähnen im Sperrkranz der Wickelachse und zu kleineren bei 18 oder 20 Zähnen. Um die Größenordnung von k' abzuschätzen, müssen die Größen $F_{\max}$ und ΔF wenigstens annähernd genau bestimmt werden. Die anfängliche Vorspannung $F_{\max}$ wird aus der normalen Handkraft und dem Übersetzungsverhältnis der Ratsche mit Abzug für Reibung in der Ratschenmechanik berechnet.

$$F_{\max} = S_{HF} \cdot \frac{R}{r} \cdot (1 - \mu_R) \quad [\text{daN}] \quad (10)$$

Das Nachlassen in den letzten Zahn der Wickelachse führt zu einer elastischen Verkürzung des Gurts um eine Strecke ΔL , die sich im statistischen Mittel aus dem Bogenmaß eines halben Zahnwinkels, multipliziert mit dem wirksamen Wickelradius ergibt. Diese Strecke ist:

$$\Delta L = \frac{1}{2} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{z} \cdot r = \frac{\pi \cdot r}{z} \quad [\text{mm}] \quad (11)$$

Die zur Berechnung des Kraftabbaus im Gurtabschnitt der Länge L benötigte Federkonstante D wird aus der für qualitativ hochwertige Gurte zutreffenden Angabe einer etwa 4%igen elastischen Dehnung bei Erreichen des LC-Wertes geschätzt. Es gilt: $D = LC / (0,04 \cdot L)$. Die Länge L muss hier ebenfalls in mm eingesetzt werden.

$$\Delta F = \Delta L \cdot D = \frac{\pi \cdot r \cdot LC}{0,04 \cdot z \cdot L} \quad [\text{daN}] \quad (12)$$

$F_{\max}$ = mit der normalen Handkraft erreichbare Vorspannung ohne Nachlassen [daN]

R = Hebellänge der Ratsche [mm]

r = wirksamer Radius der Wickelachse mit ca. 2 Lagen Gurtband [mm]

μ_R = Reibkoeffizient in der Ratschenmechanik

S_{TF} = genormte Vorspannkraft [daN]

S_{HF} = normale Handkraft = 50 [daN]

ΔL = Nachlassen des Gurts beim Einrasten der Sperrmechanik [mm]

ΔF = Abfall der Vorspannkraft nach Einrasten der Sperrmechanik [daN]

z = Anzahl der Zähne der Sperrmechanik

D = Federkonstante des Gurts [daN/mm]

LC = Zulässige Belastbarkeit des Gurts [daN]

L = Länge des betrachteten Gurtabschnitts [mm]

Ein Mittelwert aus der Untersuchung von 30 unterschiedlichen Spannratschen verschiedener Hersteller hat ausgehend von $k = 1,5$ den Wert $k' = 1,60$ ergeben.

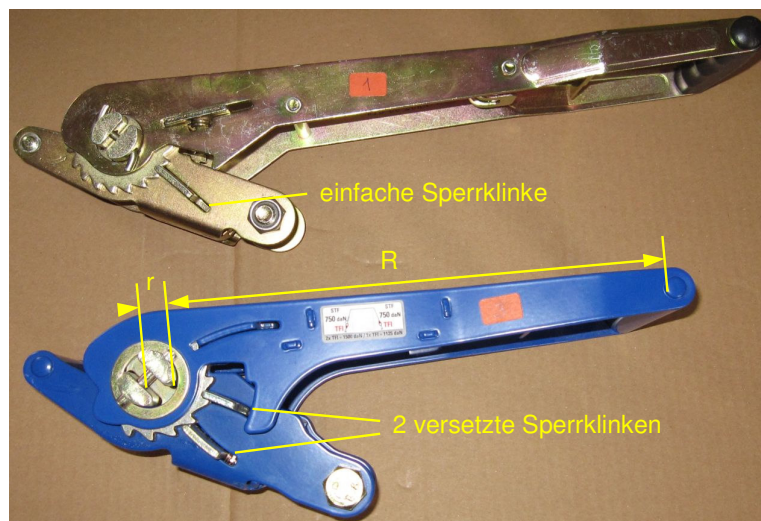


Bild 7: Spannratschen

Ein typisches Beispiel ergibt sich aus folgenden Zahlen, ebenfalls ausgehend von $k = 1,5$:
 Bescheinigtes $S_{TF} = 480$ daN; Hebellänge $R = 265$ mm; Wickelradius $r = 19$ mm; Anzahl der
 Zähne $z = 11$; Nutzlast $LC = 2000$ daN; angenommene Gurtlänge auf der Spannseite $L =$
 2700 mm; Reibbeiwert der Ratsche $\mu_R = 0,16$; normale Handkraft $S_{HF} = 50$ daN.

$$\Delta F = \frac{\pi \cdot r \cdot LC}{0,04 \cdot z \cdot L} = \frac{\pi \cdot 19 \cdot 2000}{0,04 \cdot 11 \cdot 2700} = 100 \text{ daN}$$

$$F_{\max} = S_{HF} \cdot \frac{R}{r} \cdot (1 - \mu_R) = 50 \cdot \frac{265}{19} \cdot 0,84 = 586 \text{ daN}$$

$$k' = k + \frac{(k - 1) \cdot \Delta F}{F_{\max} - \Delta F} = 1,5 + \frac{0,5 \cdot 100}{586 - 100} = 1,60$$

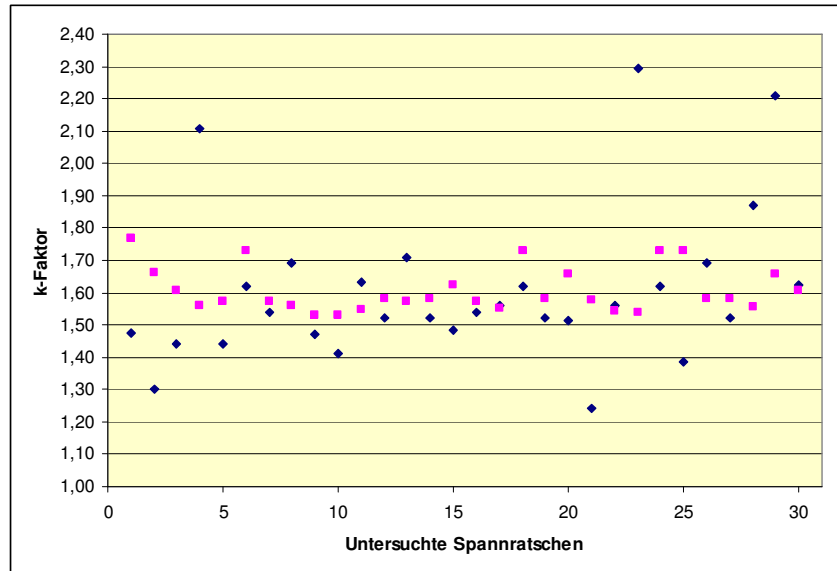


Bild 8: k'-Faktoren von Spannratschen

Bild 8 zeigt die Ermittlung der k'-Werte für 30 unterschiedliche Spannratschen. Der Berechnung geht von einem nominellen k-Faktor von 1,5 aus, der sich z.B. aus einem Zurrwinkel von $\alpha = 90^\circ$ und einem Reibbeiwert zwischen Gurt und Ladung von $\mu = 0,22$ ergibt. Die schwarzen Rhomben bezeichnen die k'-Werte bezogen auf die bescheinigten S_{TF} -Werte. Die roten Quadrate bezeichnen die k'-Werte bezogen auf die nach dem Rechenmodell berechneten S_{TF} -Werte. In beiden Fällen ergibt sich der genannte Mittelwert von 1,61. Die auf die bescheinigten S_{TF} -Werte bezogenen k'-Werte streuen erheblich stärker. Das ist merkwürdig und könnte die Folge von unzureichend durchgeführten Prüfverfahren sein.

Zunächst einmal ist das Argument in der oben genannten Publikation für einen generellen k-Faktor = 2 durch den beschriebenen Arbeitsvorgang beim Spannen eines Gurts relativiert und für den Regelfall widerlegt worden.

Allerdings kann sich eine erhebliche Fehlbewertung einer Niederzurrung dann ergeben, wenn die bescheinigte "normale Spannkraft" S_{TF} auf Grund des in DIN EN 12195-2:2001 unbefriedigend beschriebenen Prüfverfahrens⁴ zu klein festgestellt worden ist. Setzt man die in der Praxis mit der normalen Handkraft erreichbaren Werte zu diesem zu kleinen Wert ins Verhältnis, so können sich faktisch k-Faktoren von deutlich über 2 ergeben, die aber von der Norm nicht gebilligt werden. Trotzdem dürfte der in der erwähnten Veröffentlichung angegebene Wert von $k = 2,8$ ein extremer Einzelfall sein, bei dem das bescheinigte S_{TF} zu klein war und die Ratsche über den genormten Verwendungsbereich hinaus gespannt wurde.

⁴ In der genannten Norm wird die Einspannlänge des zu prüfenden Gurtes zwischen 0,5 und 4,0 m festgelegt. Die Wahl einer kurzen Einspannlänge hat zwangsläufig zur Folge, dass der Kraftabbau beim Nachlassen des Hebels groß wird und S_{TF} folglich zu klein bescheinigt wird.

1.3.5 Nutzen der Reibung zwischen Zurrmittel und Ladung

Der Gedanke, die Reibung zwischen Gurt und Ladung für die Ladungssicherung nutzbar zu machen, ist nicht neu und wurde bereits in der deutschen Richtlinie VDI 2702 vom Mai 1990 aufgegriffen. Dort wird in Kapitel 5.2 unter dem Titel "Schrägzurren in Querrichtung von quaderförmigen Ladeeinheiten" als zweites Beispiel eine kippgefährdete Kiste ohne Zurrpunkte mit Hilfe von zwei Zurrmitteln gesichert, die nicht an der Kiste befestigt sind, sondern diese jeweils einmal umschlingen. Diese Umschlingungen enden auf beiden Seiten der Kiste als scheinbare Direktzurrungen unter einem Winkel α , sind aber unter Nutzung der Euler'schen Kantenreibung miteinander verbunden. Der gesamte Umschlingungswinkel beträgt $2 \cdot (\alpha + \pi)$.

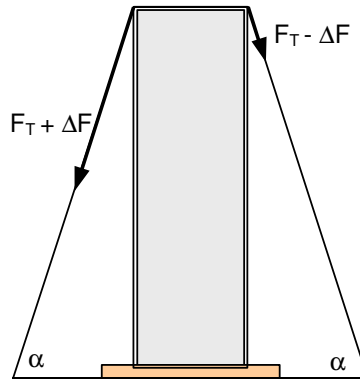


Bild 9: Ladungssicherung durch Umschlingung (nach VDI 2702)

Ziel jener Darstellung war es zu zeigen, dass die benötigte Zurrkraft auf der einen Seite eine Restzurrkraft auf der entlasteten Seite voraussetzt. Diese Restzurrkraft steht zur benötigten Zurrkraft in dem bekannten Verhältnis des Euler'schen Reibungsverlusts. Die weitere Auswertung des Beispiels enthält allerdings einen kleinen Fehler in der Kippbilanz, der hier jedoch nicht erörtert werden soll.

Die Darstellung des Falles geht davon aus, dass zunächst durch Spannmittel auf beiden Seiten der Sicherungsanordnung eine bestimmte und gleiche Vorspannkraft eingestellt wird. Im angenommenen Lastfall erhöht sich diese Kraft auf der einen Seite und verringert sich auf der anderen, bis die Kräfte in dem genannten Verhältnis zueinander stehen. Die anfangs eingestellte Vorspannkraft muss so groß sein, dass die Rutsch- bzw. Kippbilanz erfüllt wird.

Nicht erwähnt wird, dass die unterstellte gegenläufige Änderung der Vorspannkraft der beiden Seiten eine kleine Bewegung der Ladungseinheit voraussetzt. Vermutlich wurde das stillschweigend vorausgesetzt, weil der dargestellte Fall als Sonderbeispiel für Direktsicherung gelten sollte. Dieser Einstufung kann man ohne weiteres folgen, wenn man die "Befestigung des Zurrmittels an der Ladung durch Reibschluss" akzeptiert. Es ist darum auch leicht einzusehen, dass eine höhere Reibung des umschlingenden Zurrmittels an der Ladeeinheit die Sicherungswirkungen begünstigt.

Die bei Niederzurrungen übliche einseitig aufgebrachte Vorspannung hat im Zusammenhang mit der Anwendung des k-Faktors und dem auf Vertikalkräfte beschränkten Rechenmodell allerdings zu der stark betonten Doktrin geführt: "Mache die Reibung an den Kanten der Ladung so klein wie möglich". Dieser Lehrsatz ist nicht falsch, kann aber bei einer weiterführenden Betrachtung relativiert werden, d.h. es kann Bedingungen geben, unter denen er nicht stimmt. Im folgenden Kapitel wird der "Reibschluss" der Niederzurrung an der Ladung eine wesentliche Rolle spielen.

1.4 Tatsächliche Sicherungswirkung einer Niederzurrung

In der folgenden Abhandlung wird die vollständige Sicherungswirkung einer Niederzurrung rechnerisch entsprechend der Auflistung in Kapitel 1.1 dargestellt, mit Ausnahme der sekundären Wirkungen von Kompaktierung und Vibrationshemmung. Es wird eine **quer** zum Fahr-

zeug verlaufende Niederzurrung aus einem Kunstfaserspanngurt mit einseitiger Spannratsche angenommen. Die Ladungsabmessungen passen zu den Zurrwinkeln und zur Fahrzeugbreite von rund 2,5 m.

Der Zweck dieser Darstellung ist es, unterschiedliche Rechenmodelle miteinander zu vergleichen und mögliche Vereinfachungen zu bewerten. Beim Vergleich von Rechenmodellen wird jeweils der gleiche Reibbeiwert zwischen Ladung und Ladefläche vorausgesetzt, um die Sicherungswirkung der Querkomponenten unverfälscht beurteilen zu können.

1.4.1 Vorspannkraften in der Ausgangssituation

In den Berechnungen der folgenden Kapitel wird davon ausgegangen, dass die betrachtete Niederzurrung einseitig mit der Vorspannkraft S_{TF} vorgespannt worden ist. In Kapitel 1.3.4 wurde gezeigt, dass diese Vorspannkraft S_{TF} als Differenz der mit der Handkraft von 50 daN erzielbaren Maximalkraft F_{max} und dem Kraftabfall ΔF zu sehen ist, während die Gegenseite mit der Vorspannkraft $c^2 \cdot F_{max}$ gespannt bleibt. Diese Vorspannkraft soll ebenfalls mit S_{TF} ausgedrückt werden. Der Faktor c^2 steht für den Euler'schen Reibungsverlust.

$$c^2 \cdot F_{max} = c^2 \cdot S_{TF} \cdot \frac{F_{max}}{S_{TF}} = c^2 \cdot S_{TF} \cdot \frac{F_{max}}{F_{max} - \Delta F} = c^2 \cdot S_{TF} \cdot \left(\frac{1}{1 - \Delta F/F_{max}} \right) \quad (13)$$

Der Klammerausdruck rechts ist der Faktor, um welchen die auf die genormte Vorspannung S_{TF} bezogene Vorspannung der Gegenseite vergrößert wird, wenn S_{TF} als Vorspannung nach dem Loslassen der Spannratsche definiert wird, wie in Kapitel 1.3.4 ausführlich dargestellt wurde. Dieser im folgenden als "Ratschenfaktor" oder f_R bezeichnete Wert hängt unmittelbar vom Verhältnis $\Delta F/F_{max}$ ab und ist immer größer als 1.

Hinweis: Der Faktor f_R steht im Einklang mit der in Kapitel 1.3.4 gefundenen Berichtigung des k-Faktors. Es handelt sich nur um eine andere Herangehensweise an das gleiche Thema. Es gelten folgende Beziehungen:

$$k = 1 + c^2 \quad \text{und} \quad k' = 1 + f_R \cdot c^2 \quad (14)$$

Der k-Faktor bzw. k'-Faktor steht für die Vorspannung auf beiden Seiten. Die Behandlung der Querkomponenten der beiden Gurtabschnitte wird jedoch übersichtlicher, wenn sie getrennt betrachtet werden. Deshalb werden sie mit S_{TF} und $S_{TF} \cdot f_R \cdot c^2$ in die Berechnungen eingebracht und nicht gemeinsam mit $k' \cdot S_{TF}$.

In den Berechnungen der folgenden Kapitel wird weiter davon ausgegangen, dass die anfänglich unterschiedlichen Vorspannkraften auf beiden Seiten sich durch kleine Querschleunigungen weitgehend ausgeglichen haben. Ein solcher Ausgleich erfolgt nicht durch vertikale Vibrationen des Fahrzeugs, wie allgemein leichthin und fälschlich angenommen wird, sondern durch Querbewegungen der Ladung, überwiegend in Form von Verschub. Diese Annahme einer symmetrischen Ausgangssituation erleichtert lediglich das Verständnis der Berechnungen. Sie ist sachlich nicht zwingende Voraussetzung. Unter dieser Annahme ist auf beiden Seiten folgende Vorspannung zu verzeichnen:

$$F_T = \frac{S_{TF} \cdot (1 + f_R \cdot c^2)}{2} \quad [\text{daN}] \quad (15)$$

F_T = Vorspannkraft nach Ausgleich [daN]

S_{TF} = genormte Vorspannkraft [daN]

F_{max} = mit der normalen Handkraft erreichbare Vorspannung ohne Nachlassen [daN]

ΔF = Abfall der Vorspannkraft nach Einrasten der Sperrmechanik [daN]

c = Eulerfaktor ($c = e^{-\mu_G \cdot \alpha}$)

α = vertikaler Zurrwinkel [rad]

μ_G = Reibbeiwert zwischen Gurt und Ladung

f_R = Ratschenfaktor

Der Wert von f_R hängt von zahlreichen Einflussgrößen ab (siehe Kapitel 1.3.4). Für eine allgemeine Bewertung einer Niederzurrung wird er so gewählt, dass er nur mit geringer Wahrscheinlichkeit in der Praxis unterschritten werden kann. Die in Kapitel 1.3.4 verwendete Strichprobe von 30 Spannratschen liefert bei einer Länge der Gurtabschnitts von 2,0 m die in Bild 10 dargestellten Werte von f_R . Es wird im folgenden der Wert $f_R = 1,2$ gewählt.

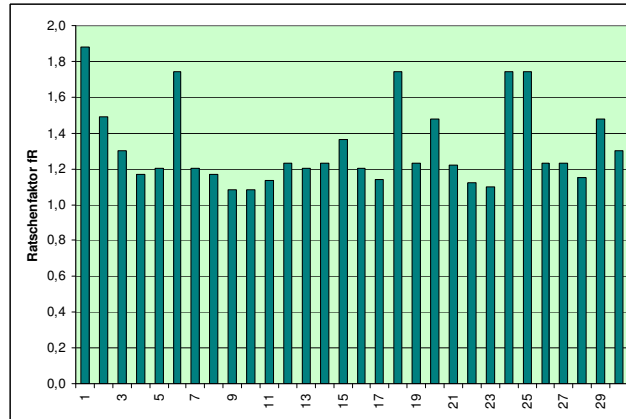


Bild 10: Ratschenfaktoren einer zufälligen Stichprobe bei 2 m Gurtabschnittlänge

1.4.2 Änderung der Zurrängen und Zurrwinkel

Wirken starke äußere Kräfte auf eine gesicherte Ladung ein, so wird sie sich ein wenig in Richtung dieser Kräfte bewegen. Das kann Versatz (Rutschen) oder Vershub (plastische und/oder elastische Verformung) sein. Bei Vershub muss zwischen dem "klassischen" Rahmenvershub und Plattenvershub unterschieden werden. Bei Versatz und bei Plattenvershub bleibt die Höhe der Ladung unverändert. Bei Rahmenvershub nimmt sie etwas ab. Eine weitere Form der Ladungsbewegung ist das Ankippen einer "kippgefährdeten" Ladungseinheit, deren Eigenstandmoment kleiner ist als das von der äußeren Kraft erzeugte Kippmoment.

Zur möglichst vollständigen Erfassung der Sicherungswirkung einer Niederzurrung ist es wichtig, die aus solchen Bewegungen folgenden Längenänderungen und Winkeländerungen in den Gurtabschnitten zu berücksichtigen. Auch die Gesamtlängenänderung des Gurts ist von Bedeutung, da sich mit ihr das Gesamtniveau der Vorspannkräfte in der Niederzurrung ändert.

Für die Berechnung der Winkeländerungen reicht ein einfacher linearer Ansatz aus, da sie nur bei sehr großen Zurrwinkeln starken Einfluss auf die Sicherungswirkung nehmen und der lineare Ansatz gerade dort ausreichend genau ist. Bei den Längenänderungen ist es umgekehrt. Sie werden deshalb geometrisch exakt unter Anwendung des pythagoreischen Satzes berechnet. Das führt zu entsprechend umständlichen Formeln.

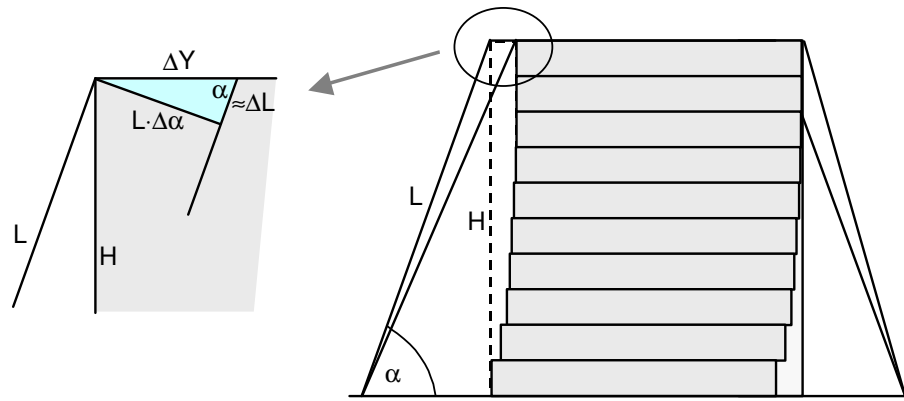
Bewegung quer zum Fahrzeug

Bei Bewegung der Ladung quer zum Fahrzeug verlagern sich die Kanten der Ladungseinheit um die kleinen Strecken ΔY und ΔZ . Die Strecke ΔY wird im Folgenden als Bezugs- und Eingangsgröße verwendet. Der Zurrwinkel α und die Strecke ΔY werden in den Formeln als Absolutgrößen behandelt.

Bei **Versatz** und bei **Plattenvershub** quer zum Fahrzeug ist $\Delta Z = 0$ (Bild 11).

$$\Delta L_{\text{links}} = \sqrt{L^2 + 2 \cdot L \cdot \Delta Y \cdot \cos \alpha + \Delta Y^2} - L \quad \Delta L_{\text{rechts}} = \sqrt{L^2 - 2 \cdot L \cdot \Delta Y \cdot \cos \alpha + \Delta Y^2} - L \quad (16)$$

$$\Delta \alpha_{\text{links}} = -\frac{\Delta Y}{L} \cdot \sin \alpha \quad [\text{rad}] \quad \Delta \alpha_{\text{rechts}} = \frac{\Delta Y}{L} \cdot \sin \alpha \quad (17)$$

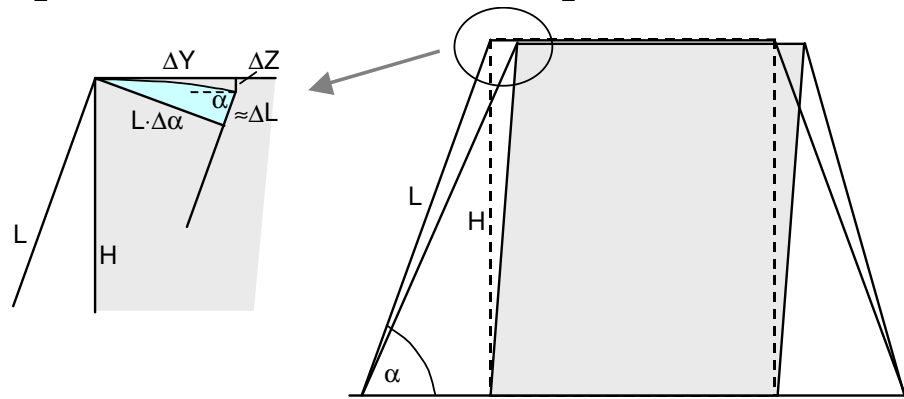
Bild 11: $\Delta\alpha$ und ΔL bei Versatz oder Plattenverschub quer zum Fahrzeug

Bei **Rahmenverschub** quer zum Fahrzeug ist ΔZ ein kleiner negativer Wert (Bild 12).

$$\Delta z = \sqrt{H^2 - \Delta Y^2} - H [\text{m}] \quad (\text{links und rechts}) \quad (18)$$

$$\Delta L_{\text{links}} = \sqrt{L^2 + 2 \cdot L \cdot \Delta Y \cdot \cos \alpha} - L [\text{m}]; \quad \Delta L_{\text{rechts}} = \sqrt{L^2 - 2 \cdot L \cdot \Delta Y \cdot \cos \alpha} - L [\text{m}] \quad (19)$$

$$\Delta \alpha_{\text{links}} = -\frac{\Delta Y}{L} \cdot \sin \alpha [\text{rad}] \quad \Delta \alpha_{\text{rechts}} = \frac{\Delta Y}{L} \cdot \sin \alpha [\text{rad}]$$

Bild 12: $\Delta\alpha$ und ΔL bei Rahmenverschub quer zum Fahrzeug

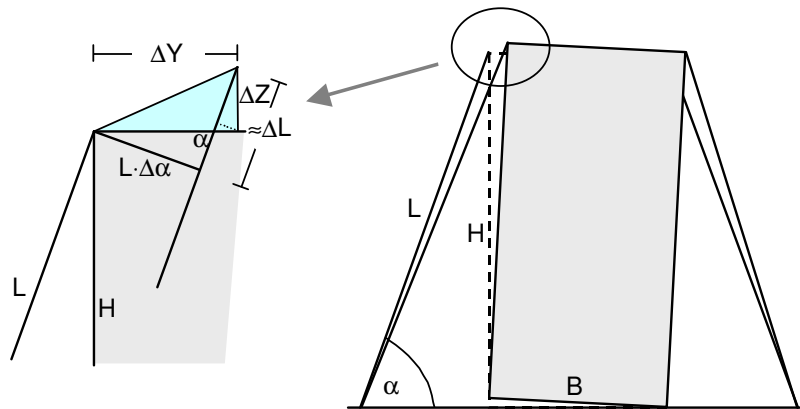
Beim **Ankippen** (Bild 13) ergibt sich links ein positiver Wert für ΔZ . Rechts gleicht die Bewegung der Ladungskante derjenigen beim Rahmenverschub.

$$\Delta z_{\text{links}} = \frac{B}{H} \cdot \Delta Y [\text{m}] \quad \Delta z_{\text{rechts}} = \sqrt{H^2 - \Delta Y^2} - H [\text{m}] \quad (20)$$

$$\Delta L_{\text{links}} = \sqrt{L^2 + 2 \cdot \Delta Y \cdot (B + L \cdot \cos \alpha) + \Delta Y^2 \cdot (1 + B^2/H^2)} - L [\text{m}] \quad (21)$$

$$\Delta L_{\text{rechts}} = \sqrt{L^2 - 2 \cdot L \cdot \Delta Y \cdot \cos \alpha} - L [\text{m}] \quad (22)$$

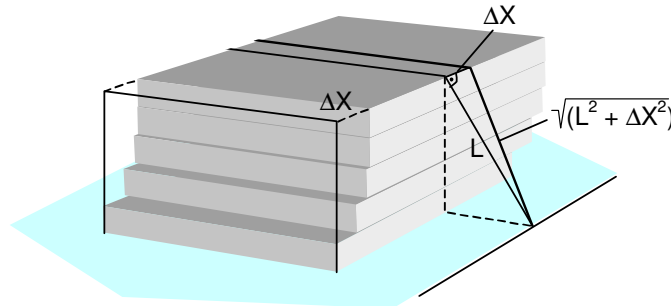
$$\Delta \alpha_{\text{links}} = -\frac{\Delta Y \cdot \sin \alpha}{L} [\text{rad}] \quad \Delta \alpha_{\text{rechts}} = \frac{\Delta Y \cdot \sin \alpha}{L} [\text{rad}]$$

Bild 13: $\Delta\alpha$ und ΔL links beim Ankippen quer zum Fahrzeug**Bewegung längs zum Fahrzeug**

Bei Bewegung der Ladung längs zum Fahrzeug verlagern sich die Kanten der Ladungseinheit um die kleinen Strecken ΔX und ΔZ . Da der Gurt quer zur Verlagerungsrichtung verläuft, wird er in Längsrichtung nur im Rahmen der verfügbaren Reibung mitgenommen. Die Strecke ΔX wird im Folgenden als Bezugs- und Eingangsgröße verwendet. Eine Längenänderung ΔL des Gurts ist stets positiv und auf beiden Seiten der Ladung gleich groß. Die Änderung des Zurrwinkels α ist so gering, dass sie zur Berechnung der Sicherungswirkung vernachlässigt werden kann.

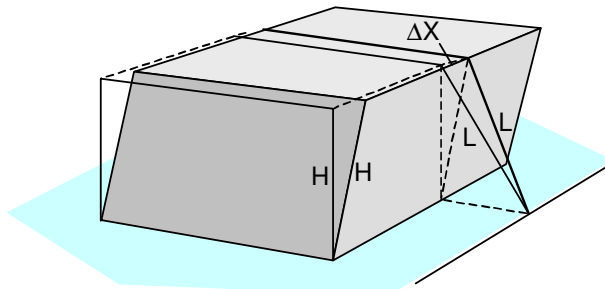
Bei **Versatz** und bei **Plattenverschub** längs zum Fahrzeug (Bild 14) gilt auf beiden Seiten:

$$\Delta Z = 0 \quad \text{und} \quad \Delta L = \sqrt{L^2 + \Delta X^2} - L \quad [\text{m}] \quad (23)$$

Bild 14: ΔL bei Versatz oder Plattenverschub längs zum Fahrzeug

Bei **Rahmenverschub** längs zum Fahrzeug (Bild 15) ist Δz ein kleiner negativer Wert, wie in Gleichung (18) für den quer gerichteten Rahmenverschub beschrieben. Er führt geometrisch exakt dazu, dass sich die Gurtlänge nicht ändert. Es gilt auf beiden Seiten:

$$\Delta Z = \sqrt{H^2 - \Delta X^2} - H \quad [\text{m}] \quad \text{und} \quad \Delta L = 0 \quad [\text{m}] \quad (24)$$

Bild 15: ΔL bei Rahmenverschub längs zum Fahrzeug

Beim **Ankippen** (Bild 16) ergibt sich auf beiden Seiten ein positiver Wert für ΔZ . Es gelten auf beiden Seiten die Beziehungen:

$$\Delta z = \frac{J}{H} \cdot \Delta X \text{ [m]} \quad \text{und} \quad \Delta L = \sqrt{L^2 + 2 \cdot J \cdot \Delta X + \Delta X^2 \cdot (1 + J^2/H^2)} - L \text{ [m]} \quad (25)$$

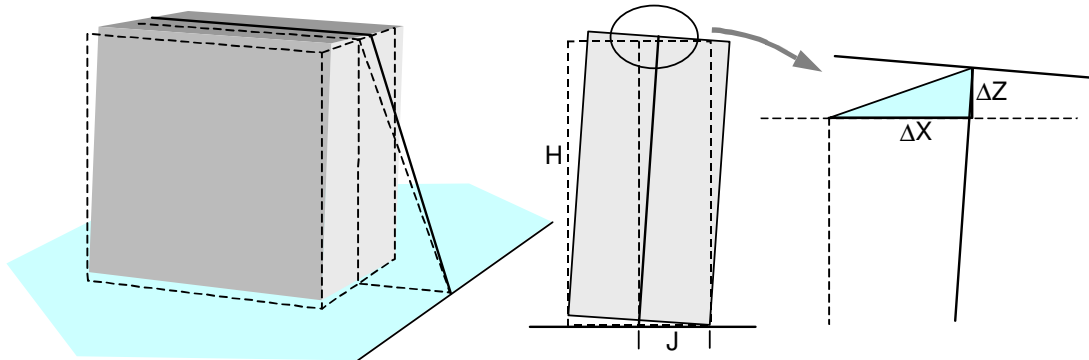


Bild 16: ΔL beim Ankippen längs zum Fahrzeug

1.4.3 Elastizität von Spanngurten

Die Längenänderungen der Gurtabschnitte führen zu Änderungen der Vorspannkräfte. Das gilt sowohl für die Gurtabschnitte rechts und links als auch für das Gesamtniveau der Vorspannung. Diese Kraftänderungen werden zur Ermittlung der Sicherungswirkung in Rechnung gestellt. Wie schon in Kapitel 1.3.4 demonstriert, wird hierzu der Begriff der Federkonstante verwendet. Die Federkonstante D erlaubt es, aus einer Längenänderung ΔL eines elastischen länglichen Körpers direkt die Kraftänderung ΔF zu berechnen.

$$\Delta F = D \cdot \Delta L \text{ [daN]} \quad (26)$$

Zurrgurte aus synthetischen Fasern verhalten sich im Lastbereich bis LC ausreichend elastisch, wobei vereinfachend Linearität angenommen werden kann. Dem in Bild 10 geprüften Gurt wurde eine elastische Dehnung von $p = 3,75\%$ bei Erreichen von $LC = 2500$ daN bescheinigt. Aus einer derartigen Angabe lässt sich zunächst die "nominelle" Federkonstante D_N ermitteln, die für die Einheitslänge von z.B. 1 Meter festgelegt werden kann.

$$D_N = \frac{LC \cdot 100}{p} \text{ [daN]} \quad (27)$$

Für eine beliebige Gurtlänge L erhält man die individuelle Federkonstante.

$$D = \frac{D_N}{L} \text{ [daN/m]} \quad (28)$$

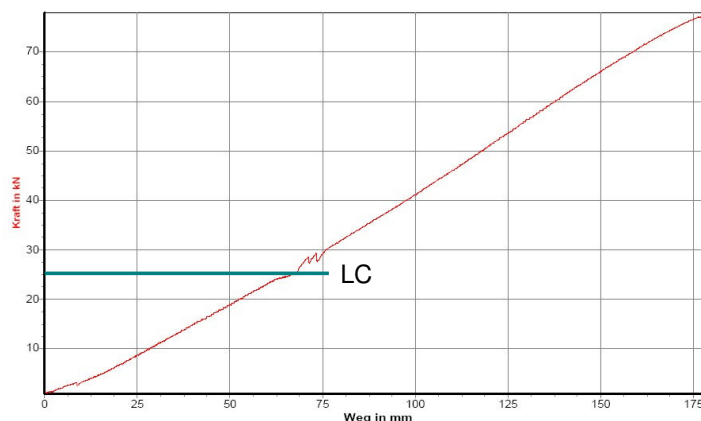


Bild 17: Last/Dehnungs-Diagramm eines 50 mm Polyester Gurts (Quelle: Dolezych)

Die Last/Dehnungs-Kurve verläuft im unteren Lastbereich etwas flacher. Deshalb wird in den Berechnungen der folgenden Kapitel pauschal die prozentuale Dehnung $p = 4\%$ verwendet⁵.

$$D_N = \frac{LC \cdot 100}{p} = \frac{2500 \cdot 100}{4} = 62500 \text{ daN}$$

Kraftänderung: $\Delta F = \Delta L \cdot \frac{D_N}{L} \text{ [daN]}$ (29)

1.4.4 Sicherungskraft quer zum Fahrzeug

Zunächst wird mit Hilfe der in Kapitel 1.4.2 festgestellten Längenänderungen ΔL_{links} und ΔL_{rechts} festgestellt, welche Gesamtlängenänderung der Gurt durch die vorliegende Bewegungsform erfährt. Bei Versatz und bei Plattenverschub ist diese Änderung positiv mit einem Maximum bei 90° Zurrwinkel. Daraus folgt ein Anstieg der nach Gleichung (15) berechneten Vorspannkraft F_T . Bei Rahmenverschub ist die Gesamtlängenänderung schwach negativ und erreicht bei 90° Zurrwinkel den Wert Null. Die Vorspannkraft F_T nimmt entsprechend ab. Diese Kraftänderung wird vereinfachend mit der Gesamtlänge des Gurts berechnet. F_{T1} ist die berichtigte Vorspannkraft.

$$F_{T1} = F_T + (\Delta L_{\text{links}} + \Delta L_{\text{rechts}}) \cdot \frac{D_N}{2 \cdot L + B} \text{ [daN]} \quad (30)$$

Dann wird die mögliche Kraftzunahme links bzw. Kraftabnahme rechts in den freien Gurtabschnitten mit Hilfe der Längenänderungen ΔL_{links} und ΔL_{rechts} berechnet.

$$\Delta F = \frac{(\Delta L_{\text{links}} - \Delta L_{\text{rechts}}) \cdot D_N}{2 \cdot L} \text{ [daN]} \quad (31)$$

Bis zu Zurrwinkeln von etwa 85° sind diese Kraftänderungen in der Regel so groß, dass der Gurt über die Ladung rutscht. Es ergibt sich damit eine Obergrenze für die Kraftänderung ΔF , die durch die Euler'sche Reibung zwischen Gurt und Ladungseinheit gegeben ist. Diese Obergrenze wird nachstehend mit folgender Grenzsituation berechnet.

$$\text{Links: } F_{T1} + \Delta F_{\text{max}} \quad \text{Rechts: } F_{T1} - \Delta F_{\text{max}}$$

Die Euler'sche Reibung gestattet maximal: $(F_{T1} - \Delta F_{\text{max}}) = c^2 \cdot (F_{T1} + \Delta F_{\text{max}})$

Die Auflösung dieser Gleichung nach ΔF_{max} ergibt: $\Delta F_{\text{max}} = F_{T1} \cdot \frac{1 - c^2}{1 + c^2} \text{ [daN]}$ (32)

Die vollständige Sicherungswirkung setzt sich aus $SW_1 = \text{Reibungserhöhung durch die Vertikalkomponenten der Kräfte in den Gurtanteilen links und rechts}$ und aus $SW_2 = \text{Differenz der Horizontalkomponenten dieser Kräfte}$ zusammen.

$$SW_1 = \mu_L \cdot [(F_{T1} + \Delta F) \cdot \sin(\alpha - \Delta\alpha) + (F_{T1} - \Delta F) \cdot \sin(\alpha + \Delta\alpha)]$$

$$SW_1 = \mu_L \cdot 2 \cdot (F_{T1} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \Delta\alpha - \Delta F \cdot \cos \alpha \cdot \sin \Delta\alpha) \quad (33)$$

$$SW_2 = (F_{T1} + \Delta F) \cdot \cos(\alpha - \Delta\alpha) - (F_{T1} - \Delta F) \cdot \cos(\alpha + \Delta\alpha)$$

$$SW_2 = 2 \cdot (F_{T1} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \Delta\alpha + \Delta F \cdot \cos \alpha \cdot \cos \Delta\alpha) \quad (34)$$

Es versteht sich, dass in die Gleichungen (33) und (34) und dann auch (35) für ΔF der Maximalwert nach Gleichung (32) eingesetzt werden muss.

⁵ Die in obigem Zusammenhang verwendete prozentuale Dehnung ist elastische Dehnung im Lastbereich bis LC. Sie darf nicht verwechselt werden mit der gelegentlich zitierten Bruchdehnung, die viel höher liegt und natürlich nicht elastisch ist, sondern bleibend.

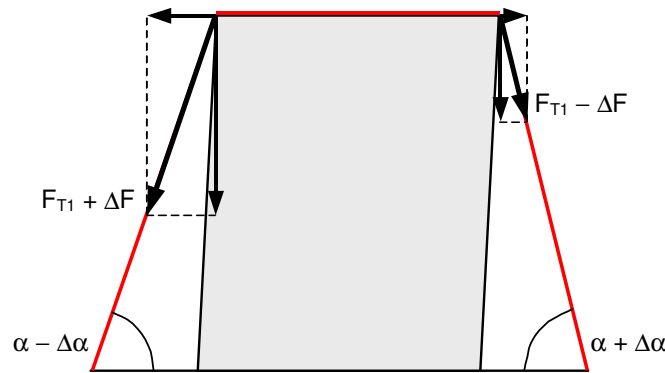


Bild 17: Sicherungswirkung durch Kräfte quer zum Fahrzeug

Da $\Delta\alpha$ ein kleiner Winkel ist, kann mit ausreichender Genauigkeit gesetzt werden: $\cos\Delta\alpha = 1$ und $\sin\Delta\alpha = \Delta\alpha$. Damit vereinfacht sich die Gleichung für die Gesamtsicherungswirkung.

$$SW = 2 \cdot \mu_L \cdot (F_{T1} \cdot \sin\alpha - \Delta F \cdot \Delta\alpha \cdot \cos\alpha) + 2 \cdot (F_{T1} \cdot \Delta\alpha \cdot \sin\alpha + \Delta F \cdot \cos\alpha) \text{ [daN]} \quad (35)$$

Für einen Zurrwinkel $\alpha = 90^\circ$ vereinfacht sich die Gleichung mit $\sin\alpha = 1$ und $\Delta F = 0$ weiter.

$$SW = 2 \cdot F_{T1} \cdot (\mu_L + \Delta\alpha) \text{ [daN]} \quad (36)$$

SW = Gesamt-Sicherungswirkung [daN]

μ_L = Reibbeiwert zwischen Ladefläche und Ladung

F_{T1} = ausgeglichene, korrigierte Vorspannung [daN] nach Gleichung (30)

ΔF = Änderung der Vorspannung [daN] nach Gleichung (31), Begrenzung durch Gl. (32)

α = anfänglicher Zurrwinkel [°]

$\Delta\alpha$ = Zurrwinkeländerung [rad] nach Gleichung (17)

Zur Veranschaulichung wird ein Beispiel berechnet mit der Annahme von **Versatz** oder **Plattenverschub**. Höhe und Breite der Ladung sind auf die Fahrzeugbreite von 2,5 m abgestimmt. Die Eingangsgrößen sind:

Höhe der Ladungseinheit:	$H = 1,778 \text{ m}$
Breite der Ladungseinheit:	$B = 1,873 \text{ m}$
Zurrwinkel:	$\alpha = 80^\circ = 1,3963 \text{ rad}$
Querweg der Ladungsoberseite:	$\Delta Y = 0,1 \text{ m}$
Normale Vorspannung:	$S_{TF} = 400 \text{ daN}$
Nominelle Federkonstante:	$D_N = 62500 \text{ daN}$
Reibbeiwert zwischen Gurt und Ladung:	$\mu_G = 0,20$
Reibbeiwert zwischen Ladefläche und Ladung:	$\mu_L = 0,40$
Ratschenfaktor:	$f_R = 1,2$

$$c^2 = e^{-2 \cdot \mu_G \cdot \alpha} = e^{-2 \cdot 0,2 \cdot 1,3963} = 0,5721$$

$$L = H / \sin\alpha = 1,778 / 0,9848 = 1,805 \text{ m}$$

$$F_T = 0,5 \cdot S_{TF} \cdot (1 + f_R \cdot c^2) = 0,5 \cdot 400 \cdot (1 + 1,2 \cdot 0,5721) = 337,3 \text{ daN}$$

$$\Delta L_{\text{links}} = \sqrt{L^2 + 2 \cdot L \cdot \Delta Y \cdot \cos\alpha + \Delta Y^2} - L = \sqrt{1,805^2 + 2 \cdot 1,805 \cdot 0,1 \cdot 0,1736 + 0,1^2} - 1,805 \text{ m}$$

$$\Delta L_{\text{links}} = 0,020024 \text{ m}$$

$$\Delta L_{\text{rechts}} = \sqrt{L^2 - 2 \cdot L \cdot \Delta Y \cdot \cos\alpha + \Delta Y^2} - L = \sqrt{1,805^2 - 2 \cdot 1,805 \cdot 0,1 \cdot 0,1736 + 0,1^2} - 1,805 \text{ m}$$

$$\Delta L_{\text{rechts}} = -0,014654 \text{ m}$$

$$F_{T1} = F_T + (\Delta L_{\text{links}} + \Delta L_{\text{rechts}}) \cdot \frac{D_N}{2 \cdot L + B} = 337,3 + 0,00537 \cdot \frac{62500}{2 \cdot 1,805 + 1,873} = 398,5 \text{ daN}$$

$$\Delta F = \frac{(\Delta L_{\text{links}} - \Delta L_{\text{rechts}}) \cdot D_N}{2 \cdot L} = \frac{(0,020024 + 0,014654) \cdot 62500}{2 \cdot 1,805} = 600,4 \text{ daN}$$

$$\Delta F_{\text{max}} = F_{T1} \cdot \frac{1 - c^2}{1 + c^2} = 398,5 \cdot \frac{1 - 0,5721}{1 + 0,5721} = 108,5 \text{ daN}$$

$$\Delta \alpha = \frac{\Delta y}{L} \cdot \sin \alpha = \frac{0,1}{1,805} \cdot 0,9848 = 0,0546 \text{ rad}$$

$$SW = 2 \cdot \mu_L \cdot (F_{T1} \cdot \sin \alpha - \Delta F \cdot \Delta \alpha \cdot \cos \alpha) + 2 \cdot (F_{T1} \cdot \Delta \alpha \cdot \sin \alpha + \Delta F \cdot \cos \alpha) \text{ daN}$$

$$SW = 0,8 \cdot (398,5 \cdot 0,9848 - 108,5 \cdot 0,0546 \cdot 0,1736) + 2 \cdot (398,5 \cdot 0,0546 \cdot 0,9848 + 108,5 \cdot 0,1736)$$

$$SW = 0,8 \cdot (392,4 - 1,9) + 2 \cdot (21,4 + 18,8) = 313,1 + 80,4 = 393,5 \text{ daN}$$

Zum Vergleich wird die Sicherungswirkung nach VDI 2702 wie in Gleichung (1) berechnet:

$$SW = 2 \cdot \mu_L \cdot S_{TF} \cdot \sin \alpha = 2 \cdot 0,4 \cdot 400 \cdot 0,9848 = 315,1 \text{ daN}$$

Das mögliche mittlere ΔF von rund 600 daN bei einer Querbewegung von $\Delta Y = 0,1 \text{ m}$ ist fast sechsmal so groß wie der Grenzwert von 108,5 daN, mit dem tatsächlich gerechnet wurde. Der Grenzwert wird demnach bei dem gegebenen Zurrwinkel von 80° schon bei einer Querbewegung von weniger als 2 cm erreicht.

Die Sicherungswirkung ändert sich mit dem Zurrwinkel. Wegen der auf rund 2,5 m begrenzten Breite der Ladeflächen von Nutzfahrzeugen treten kleine Zurrwinkel nur bei niedrigen Ladungen auf. Für die folgende Darstellung der Sicherungswirkungen über den Zurrwinkelbereich von 45° bis 90° sind folgende plausible Ladungsabmessungen gewählt worden:

Zurrwinkel α	45°	60°	75°	90°
Ladungshöhe H	1,000 m	1,333 m	1,666 m	2,000 m
Ladungsbreite B	0,500 m	0,960 m	1,607 m	2,500 m

Bild 18 zeigt den Verlauf der Sicherungswirkungen im Vergleich zu denen der vereinfachten Rechenmodelle der VDI 2702, DIN EN 12195-1:2004 und DIN EN 12195-1:2011. Für alle fünf Kurven gelten die Voraussetzungen wie im zuvor gerechneten Beispiel für $\alpha = 80^\circ$.

Die tatsächliche Sicherungswirkung hat ihr Maximum bei einem Zurrwinkel von etwa 65° bis 70° . Erst bei etwa $\alpha = 88^\circ$ werden die bewegungsbedingten Längenänderungen der Gurtabschnitte so klein, dass sich das günstige Euler'sche Kräfteverhältnis nicht mehr maximal einstellen kann. Statt dessen beginnt ab etwa $\alpha = 87^\circ$ auch die Querkomponente rechts sichernd zu wirken. Diese Umstellungen im Wirkmechanismus bewirken einen kleinen Knick in der Kurve an dieser Stelle.

Der Vergleich der Rechenmodelle zeigt, dass die tatsächliche Sicherungswirkung in einem weiten Bereich sogar größer ist, als sie durch das frühere Modell in der Richtlinie VDI 2702 ausgewiesen wurde. Die mit Einführung des k-Faktors in der DIN EN 12195-1:2004 bewirkte Verringerung ist erheblich. Die Begründung mit der "notwendigen Berücksichtigung physikalischer Fakten" ist untauglich, weil diese Fakten einseitig ausgelegt worden sind.

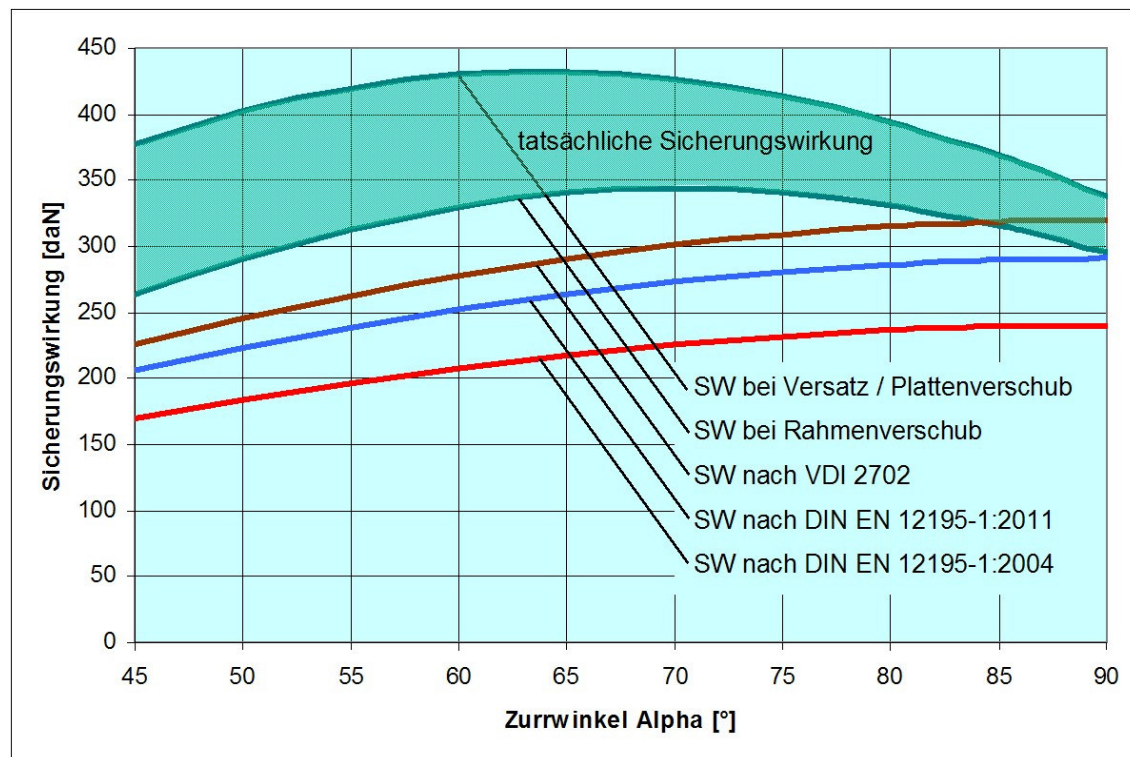


Bild 18: Sicherungswirkung Kräfte quer, Vergleich von Rechenmodellen

1.4.5 Sicherungskraft längs zum Fahrzeug

Auch hier wird zunächst mit Hilfe der in Kapitel 1.4.2 festgestellten beidseitigen Längenänderung ΔL festgestellt, welche Gesamtlängenänderung der Gurt durch die vorliegende Bewegungsform erfährt. Bei Versatz und bei Plattenverschub ist diese Änderung positiv. Daraus folgt ein Anstieg der nach Gleichung (15) berechneten Vorspannkraft F_T . Diese Kraftänderung wird vereinfachend mit der Gesamtlänge des Gurts berechnet. F_{T1} ist die berichtigte Vorspannkraft.

$$F_{T1} = F_T + 2 \cdot \Delta L \cdot \frac{D_N}{2 \cdot L + B} \quad [\text{daN}] \quad (37)$$

Bei Rahmenverschub ist die Gesamtlängenänderung gleich Null. Die Vorspannkraft bleibt unverändert mit $F_{T1} = F_T$. Jedoch gibt es bei Rahmenschub eine vertikale Bewegung ΔZ .

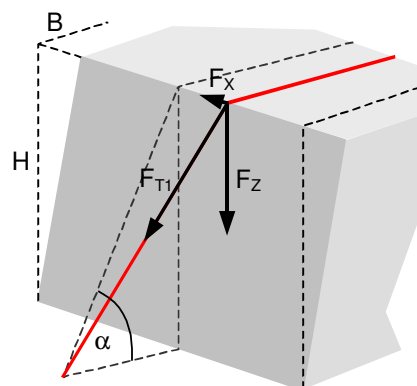


Bild 19: Sicherungswirkung durch Kräfte längs zum Fahrzeug

Die Gesamtsicherungswirkung setzt sich zusammen aus den beidseitigen Vertikalkomponenten F_Z , die mit dem Reibbeiwert μ_L multipliziert werden, und den beidseitigen Längskomponenten F_X .

$$\text{Vertikalkomponente: } F_Z = F_{T1} \cdot \frac{H + \Delta Z}{L + \Delta L} \quad [\text{daN}] \quad (38)$$

$$\text{Längskomponente: } F_X = F_{T1} \cdot \frac{\Delta X}{L + \Delta L} \quad [\text{daN}] \quad (39)$$

Für die Längskomponente ΔX gibt es eine Obergrenze, die durch die Reibung zwischen Gurt und Ladung bestimmt wird. Der umgelenkte Gurt übt eine Kraft F_K auf die Ladungskante aus, die eine Resultierende aus der Vorspannung der beiden angrenzenden Gurtabschnitte ist. Wegen der ungleichen Lastverteilung beidseitig der Kanten wird hier konservativ mit F_T statt mit F_{T1} gerechnet.

$$F_K = 2 \cdot F_T \cdot \sin(\alpha/2) \quad [\text{daN}] \quad (40)$$

Die Obergrenze der Längskomponente hängt vom Reibbeiwert zwischen Gurt und Ladung ab.

$$F_{X\max} = 2 \cdot \mu_G \cdot F_T \cdot \sin(\alpha/2) \quad [\text{daN}] \quad (41)$$

Mit diesen Vorgaben wird die Sicherungswirkung der Niederzurrung in Längsrichtung berechnet.

$$SW = 2 \cdot (\mu_L \cdot F_Z + F_X) \quad (42)$$

Es wird ein Beispiel mit **Versatz** oder **Plattenverschub** berechnet. Die Eingangsgrößen sind:

Höhe der Ladungseinheit:	$H = 1,778 \text{ m}$
Breite der Ladungseinheit:	$B = 1,873 \text{ m}$
Zurrwinkel:	$\alpha = 80^\circ = 1,3963 \text{ rad}$
Längsweg der Ladungsoberseite:	$\Delta X = 0,12 \text{ m}$
Normale Vorspannung:	$S_{TF} = 400 \text{ daN}$
Nominelle Federkonstante:	$D_N = 62500 \text{ daN}$
Reibbeiwert zwischen Gurt und Ladung:	$\mu_G = 0,20$
Reibbeiwert zwischen Ladefläche und Ladung:	$\mu_L = 0,40$
Ratschenfaktor:	$f_R = 1,2$

$$c^2 = e^{-2 \cdot \mu_G \cdot \alpha} = e^{-2 \cdot 0,2 \cdot 1,3963} = 0,5721$$

$$L = H / \sin \alpha = 1,778 / 0,9848 = 1,805 \text{ m}$$

$$F_T = 0,5 \cdot S_{TF} \cdot (1 + f_R \cdot c^2) = 0,5 \cdot 400 \cdot (1 + 1,2 \cdot 0,5721) = 337,3 \text{ daN}$$

$$\Delta L = \sqrt{L^2 + \Delta X^2} - L = \sqrt{1,805^2 + 0,12^2} - 1,805 = 0,00398 \text{ m}$$

$$\Delta Z = 0 \text{ m}$$

$$F_{T1} = F_T + 2 \cdot \Delta L \cdot \frac{D_N}{2 \cdot L + B} = 337,3 + 2 \cdot 0,00398 \cdot \frac{62500}{2 \cdot 1,805 + 1,873} = 428,0 \text{ daN}$$

$$F_X = F_{T1} \cdot \frac{\Delta X}{L + \Delta L} = 428,0 \cdot \frac{0,12}{1,805 + 0,004} = 28,4 \text{ daN}$$

$$F_{X\max} = 2 \cdot \mu_G \cdot F_T \cdot \sin(\alpha/2) = 2 \cdot 0,20 \cdot 337,3 \cdot 0,6428 = 86,7 \text{ daN}$$

$$F_Z = F_{T1} \cdot \frac{H + \Delta Z}{L + \Delta L} = 428,0 \cdot \frac{1,778}{1,805 + 0,004} = 420,7 \text{ daN}$$

$$SW = 2 \cdot (\mu_L \cdot F_Z + F_X) = 2 \cdot (0,40 \cdot 420,7 + 28,4) = 393,4 \text{ daN}$$

Auch hier liefert die Sicherungswirkung nach VDI 2702 einen deutlich geringeren Wert.

$$SW = 2 \cdot \mu_L \cdot S_{TF} \cdot \sin \alpha = 2 \cdot 0,4 \cdot 400 \cdot 0,9848 = 315,1 \text{ daN}$$

Bei Rahmenvershub ist die tatsächliche Sicherungswirkung erwartungsgemäß geringer, weil keine Verlängerung des Gurts stattfindet.

Die Sicherungswirkungen ändern sich mit dem Zurrwinkel. Bild 20 zeigt für die gleichen plausiblen Verhältnisse von α , H und B wie in Kapitel 1.4.4 den Verlauf der Sicherungswirkungen im Vergleich zu denen der vereinfachten Rechenmodelle der VDI 2702, DIN EN 12195-1:2004 und DIN EN 12195-1:2011. Für alle fünf Kurven gelten die Voraussetzungen wie im zuvor gerechneten Beispiel für $\alpha = 80^\circ$.

Der Vergleich der Rechenmodelle zeigt, dass auch in Längsrichtung die tatsächliche Sicherungswirkung deutlich größer ist, als sie durch die vereinfachten Rechenmodelle dargestellt wird. Um eine zur Sicherungswirkung in Querrichtung vergleichbare Größenordnung zu erhalten, wurde die Ladungsbewegung ΔX in Längsrichtung von 0,10 m auf 0,12 m gesetzt.

Die unterschiedlichen Sicherungswirkungen der DIN EN 12195-1:2011 nach vorn und nach hinten erscheinen befremdlich, da sie sich physikalisch nicht begründen lassen. Tatsächlich soll im zuständigen Gremium bei dieser Festlegung die Kompensation unterschiedlicher Lastannahmen im europäischen Raum für Längskräfte nach vorn angestrebt worden sein.

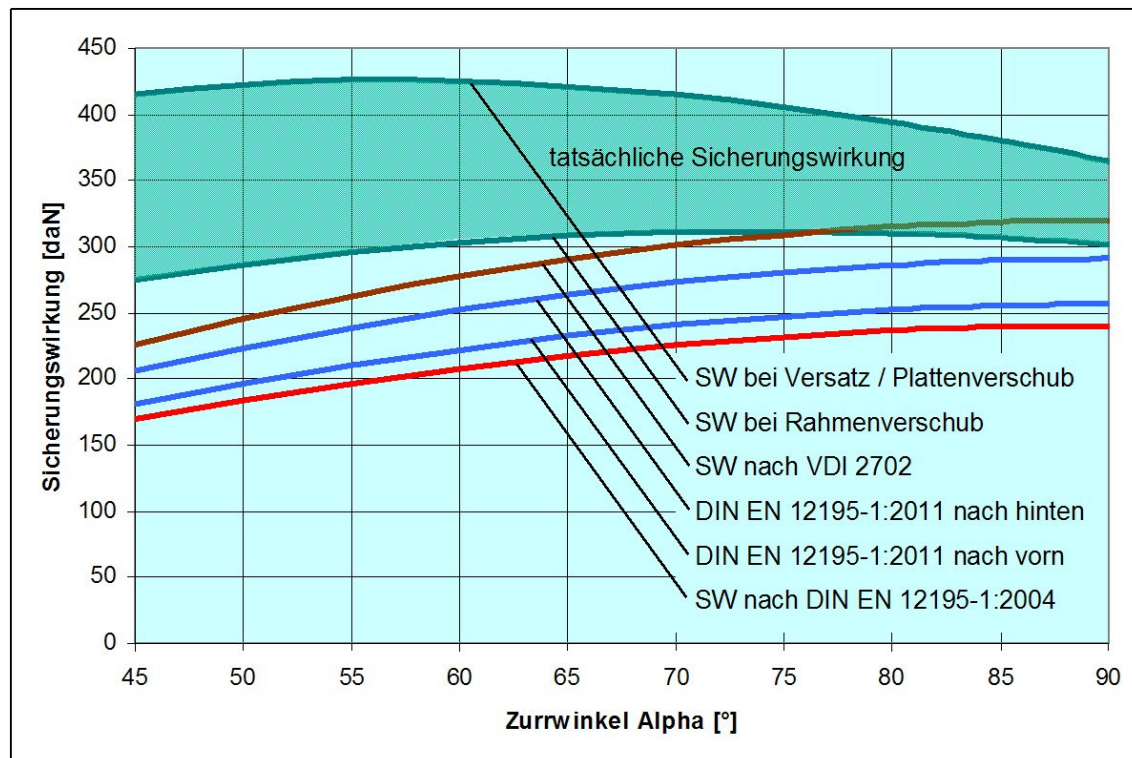


Bild 20: Sicherungswirkung Kräfte längs, Vergleich von Rechenmodellen

1.4.6 Sicherungsmoment quer zum Fahrzeug

Die Prüfung einer Niederzurrung auf ihre Tauglichkeit zur Kippsicherung ist nur bei Ladungseinheiten erforderlich, deren Eigenstandfestigkeit hierzu allein nicht ausreicht. Das sind vereinfacht ausgedrückt Einheiten, deren Standbreite B kleiner ist als 60% ihrer Höhe H. Diese Bedingung, zusammen mit der Breite der Ladefläche von rund 2,5 m und der maximalen Ladungshöhe von rund 3 m, schränkt die plausiblen Zurrwinkel auf einen Bereich von etwa 45° bis höchstens 83° ein. Für die Darstellung der Kippsicherungswirkungen über diesen

Berechnung werden folgende plausible Ladungsabmessungen auf der Basis $B = 0,48 \cdot H$ gewählt:

Zurrwinkel α	45°	60°	70°	80°
Ladungshöhe H	1,008 m	1,529 m	2,070 m	3,002 m
Ladungsbreite B	0,484 m	0,734 m	0,993 m	1,441 m

Die anfängliche Vorspannkraft F_T nach Gleichung (15) wird durch die Bewegung der Ladung infolge der äußeren Beanspruchung verändert. Zu den unter Kapitel 1.4.4 untersuchten Bewegungsformen des Versatzes bzw. Plattenverschubs und des Rahmenverschubs kommt hier noch die Möglichkeit des Ankippens hinzu. Mit den entsprechenden Längenänderungen des Gurts links und rechts erhält man mit den Gleichungen (30), (31) und (32) die notwendigen Berechnungsgrößen.

$$F_{T1} = F_T + (\Delta L_{\text{links}} + \Delta L_{\text{rechts}}) \cdot \frac{D_N}{2 \cdot L + B} \text{ [daN]}$$

$$\Delta F = \frac{(\Delta L_{\text{links}} - \Delta L_{\text{rechts}}) \cdot D_N}{2 \cdot L} \text{ [m]}$$

$$\Delta F_{\text{max}} = F_{T1} \cdot \frac{1 - c^2}{1 + c^2} \text{ [daN]}$$

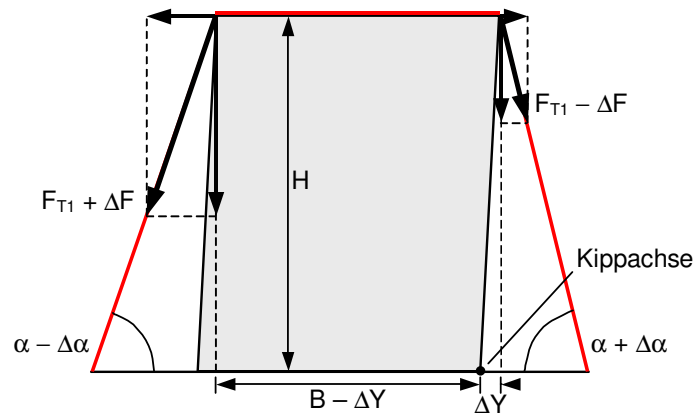


Bild 21: Sicherungswirkung durch Momente quer zum Fahrzeug

Die Berücksichtigung einer Ladungsbewegung bei der Formulierung der Sicherungsmomente verlangt, dass der Hebel B der linken Vertikalkomponente um ΔY verkleinert wird, und dass außerdem die rechte Vertikalkomponente mit dem Hebel ΔY kippend wirkt (Bild 21). Das sind kleine Abzüge in der Sicherungswirkung gegenüber den vereinfachten Rechenmodellen in den Richtlinien und Normen. Es zeigt sich allerdings in den folgenden Berechnungen, dass diese Abzüge bei der Kippsicherung in Querrichtung verschwindend klein bleiben, weil nur kleine Beträge von ΔY erforderlich sind, um die erwünschten Querkomponenten der Vorspannkraft aufzubauen.

Die vollständige Sicherungswirkung gegen Kippen setzt sich aus SW_1 = Moment aus den Vertikalkomponenten der Kräfte in den Gurtanteilen links und rechts und aus SW_2 = Moment aus der Differenz der Horizontalkomponenten dieser Kräfte zusammen.

$$SW_1 = (F_{T1} + \Delta F) \cdot \sin(\alpha - \Delta\alpha) \cdot (B - \Delta Y) - (F_{T1} - \Delta F) \cdot \sin(\alpha + \Delta\alpha) \cdot \Delta Y \text{ [daN}\cdot\text{m]}$$

$$SW_1 = B \cdot (F_{T1} + \Delta F) \cdot (\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \Delta\alpha) - 2 \cdot \Delta Y \cdot (\Delta F \cdot \sin \alpha - F_{T1} \cdot \cos \alpha \cdot \Delta\alpha) \text{ [daN}\cdot\text{m]} \quad (43)$$

$$SW_2 = H \cdot [(F_{T1} + \Delta F) \cdot \cos(\alpha - \Delta\alpha) - (F_{T1} - \Delta F) \cdot \cos(\alpha + \Delta\alpha)] \text{ [daN}\cdot\text{m]}$$

$$SW_2 = 2 \cdot H \cdot (\Delta F \cdot \cos \alpha + F_{T1} \cdot \sin \alpha \cdot \Delta\alpha) \text{ [daN}\cdot\text{m]} \quad (44)$$

$$SW = SW_1 + SW_2 \text{ [daN}\cdot\text{m]}$$

SW = Gesamt-Sicherungswirkung [daN·m]

B = Standbreite der Ladungseinheit [m]

H = Höhe der Ladungseinheit [m]

F_{T1} = ausgeglichene, korrigierte Vorspannung [daN] nach Gleichung (30)

ΔF = Änderung der Vorspannung [daN] nach Gleichung (31), Begrenzung durch Gl. (32)

ΔY = Querbewegung der Ladungsoberfläche [m]

α = anfänglicher Zurrwinkel [°]

$\Delta\alpha$ = Zurrwinkeländerung [rad] nach Gleichung (17)

In diesen Herleitungen sind wie bisher vereinfachend der Betrag von $\Delta\alpha$ links und rechts gleich gesetzt sowie die Vereinfachungen $\cos\Delta\alpha = 1$ und $\sin\Delta\alpha = \Delta\alpha$ vorgenommen worden. Der Subtrahend in SW_1 " $(F_{T1} - \Delta F) \cdot \sin(\alpha + \Delta\alpha) \cdot \Delta Y$ " entfällt, wenn die Ladungseinheit ausschließlich rutscht, weil sich dann die Kippkante an der Ladungsunterseite ebenfalls seitwärts verlagert. Das ist aber wenig wahrscheinlich, da es sich per Definition hier um eine kippgefährdete Ladungseinheit handelt, die eher ankippen als rutschen dürfte.

Es wird ein Beispiel mit **Ankippen** von $0,5^\circ$ als Reaktionsbewegung berechnet. Die Eingangsgrößen sind:

Höhe der Ladungseinheit:	$H = 3,002 \text{ m}$
Breite der Ladungseinheit:	$B = 1,441 \text{ m}$
Zurrwinkel:	$\alpha = 80^\circ = 1,3963 \text{ rad}$
Querweg der Ladungsoberseite:	$\Delta Y = 0,0262 \text{ m}$
Normale Vorspannung:	$S_{TF} = 400 \text{ daN}$
Nominelle Federkonstante:	$D_N = 62500 \text{ daN}$
Reibbeiwert zwischen Gurt und Ladung:	$\mu_G = 0,20$
Ratschenfaktor:	$f_R = 1,2$

$$c^2 = e^{-2 \cdot \mu_G \cdot \alpha} = e^{-2 \cdot 0,2 \cdot 1,3963} = 0,5721$$

$$F_T = 0,5 \cdot S_{TF} \cdot (1 + f_R \cdot c^2) = 0,5 \cdot 400 \cdot (1 + 1,2 \cdot 0,5721) = 337,3 \text{ daN}$$

$$L = H / \sin \alpha = 3,002 / 0,9848 = 3,048 \text{ m}$$

$$\Delta Z_{\text{links}} = \frac{B}{H} \cdot \Delta Y = \frac{1,441}{3,002} \cdot 0,0262 = 0,0126 \text{ m}$$

$$\Delta Z_{\text{rechts}} = \sqrt{H^2 - \Delta Y^2} - H = \sqrt{3,002^2 - 0,0262^2} - 3,002 = -0,0001 \text{ m}$$

$$\Delta L_{\text{links}} = \sqrt{L^2 + 2 \cdot \Delta Y \cdot (B + L \cdot \cos \alpha) + \Delta Y^2 \cdot (1 + B^2/H^2)} - L \text{ [m]}$$

$$\Delta L_{\text{links}} = \sqrt{3,048^2 + 2 \cdot 0,0262 \cdot (1,441 + 3,048 \cdot 0,1736) + 0,0262^2 \cdot (1 + 0,48^2)} - 3,048 = 0,01703$$

$$\Delta L_{\text{rechts}} = \sqrt{L^2 - 2 \cdot L \cdot \Delta Y \cdot \cos \alpha} - L = \sqrt{3,048^2 - 2 \cdot 3,048 \cdot 0,0262 \cdot 0,1736} - 3,048 = -0,00455$$

$$\Delta\alpha = \pm \frac{\Delta Y \cdot \sin \alpha}{L} = \frac{0,0262 \cdot 0,9848}{3,048} = 0,008465 \text{ rad}$$

$$F_{T1} = F_T + (\Delta L_{\text{links}} + \Delta L_{\text{rechts}}) \cdot \frac{D_N}{2 \cdot L + B} \text{ [daN]}$$

$$F_{T1} = 337,3 + (0,01703 - 0,00455) \cdot \frac{62500}{2 \cdot 3,048 + 1,441} = 440,8 \text{ daN}$$

$$\Delta F = \frac{(\Delta L_{\text{links}} - \Delta L_{\text{rechts}}) \cdot D_N}{2 \cdot L} = \frac{(0,01703 + 0,00455) \cdot 62500}{2 \cdot 3,048} = 221,3 \text{ daN}$$

$$\Delta F_{\max} = F_{T1} \cdot \frac{1-c^2}{1+c^2} = 440,8 \cdot \frac{1-0,5721}{1+0,5721} = 120,0 \text{ daN}$$

$$SW_1 = B \cdot (F_{T1} + \Delta F) \cdot (\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \Delta \alpha) - 2 \cdot \Delta Y \cdot (\Delta F \cdot \sin \alpha - F_{T1} \cdot \cos \alpha \cdot \Delta \alpha) \text{ [daN}\cdot\text{m]}$$

$$SW_1 = 1,441 \cdot 560,8 \cdot (0,9848 - 0,0015) - 2 \cdot 0,0262 \cdot (120,0 \cdot 0,9848 - 440,8 \cdot 0,0015) = 788,5$$

$$SW_2 = 2 \cdot H \cdot (\Delta F \cdot \cos \alpha + F_{T1} \cdot \sin \alpha \cdot \Delta \alpha) \text{ [daN}\cdot\text{m]}$$

$$SW_2 = 2 \cdot 3,002 \cdot (120,0 \cdot 0,1736 + 440,8 \cdot 0,00834) = 147,2 \text{ daN}\cdot\text{m}$$

$$SW = SW_1 + SW_2 = 788,5 + 147,2 = 935,7 \text{ daN}\cdot\text{m}$$

Zum Vergleich wird die Sicherungswirkung nach VDI 2702 berechnet:

$$SW = B \cdot S_{TF} \cdot \sin \alpha = 1,441 \cdot 400 \cdot 0,9848 = 567,6 \text{ daN}\cdot\text{m}$$

Der Vergleich zeigt, dass die tatsächliche Sicherungswirkung nach einem geringfügigen Ankippen der Ladungseinheit erheblich größer ist als die Sicherungswirkung nach der inzwischen als überholt geltenden Empfehlung der Richtlinie VDI 2702 von 2000. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass es bei einer Auslegung der Sicherung nach dieser Richtlinie wahrscheinlich überhaupt nicht zu einem Ankippen kommen wird, weil die übrigen Ladungsbewegungen wie Rutschen, Plattenvershub oder Rahmenvershub allein ausreichend sind, um die benötigte Sicherungswirkung zu erzielen. Dieses wahrscheinliche Verhalten wird nachstehend unter folgenden konservativen Annahmen überprüft:

- Die Querbewegungsdistanz ΔY wird gerade so groß gewählt, dass über den gewählten Bereich der möglichen Zurrwinkel von 45° bis 80° genau die Längenänderung ΔL erreicht wird, die zum Erzielen der auf Grund der Euler'schen Reibung maximal möglichen Kraftdifferenz ΔF notwendig ist.
- Die vertikale Bewegungsdistanz ΔZ wird durch die erstgenannte Annahme so klein, dass der Gurt insgesamt praktisch keine Längenänderung erfährt, d.h. es wird $F_{T1} = F_T$ gesetzt.

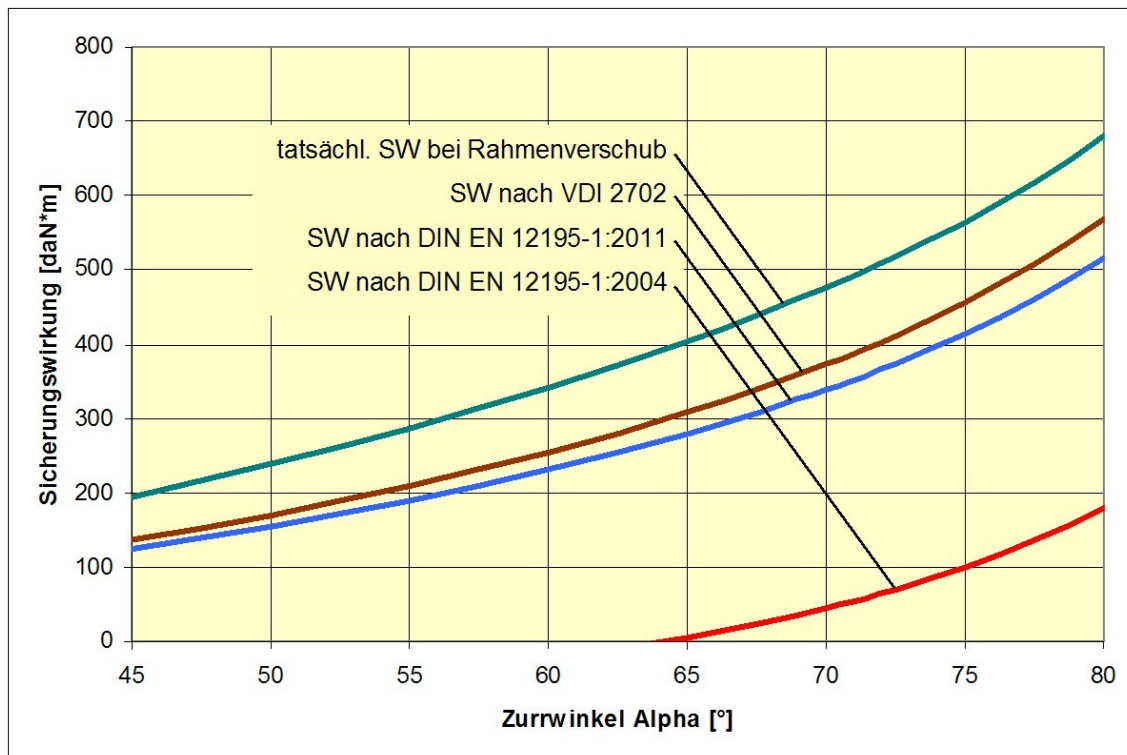


Bild 22: Sicherungswirkung Momente quer, Vergleich von Rechenmodellen

Die Kurven in Bild 22 zeigen, dass trotz der getroffenen konservativen Annahmen die tatsächliche Sicherungswirkung alle bestehenden Rechenmodelle reichlich übertrifft. Das Modell der DIN EN 12195-1:2004 fällt hier besonders aus dem Rahmen. Bei Zurrwinkeln unter 64° und dem hier zugrunde liegenden Verhältnis $B : H = 0,48$ ergeben sich negative Sicherungswirkungen, d.h. das Anbringen von Gurten vergrößert rechnerisch die Kippgefahr. Das Rechenmodell ist absolut untauglich.

Die zum Erreichen der in Bild 22 gezeigten tatsächlichen Sicherungswirkung notwendige Querbewegung ΔY beträgt knapp 2 mm bei $\alpha = 45^\circ$ und wächst an auf knapp 26 mm bei $\alpha = 80^\circ$. Diese Werte sind deutlich geringer als die bei einer Direktsicherung notwendigen Bewegungen zum Erreichen der üblicherweise bilanzierten Belastung LC des Ladungssicherungsmittels. Ein Anklicken ist demnach nicht erforderlich. Selbst eine absolut starre Ladungseinheit, die keine eigene Verformung zulässt, kann durch geringfügiges Rutschen und/oder Verformung der Ladefläche die notwendige Querbewegung ΔY ohne anzuklicken herbeiführen.

1.4.7 Sicherungsmoment längs zum Fahrzeug

Eine quer zum Fahrzeug verlaufende Niederzurrung kann gegen Kippen in Längsrichtung wie eine Direktsicherung wirken. Direktsicherungen werden traditionell so bewertet, dass sie mit ihrer zulässigen Belastbarkeit LC in eine Bilanz eingesetzt werden. Dieser Ansatz setzt jedoch voraus, dass sich das Sicherungsmittel so weit elastisch dehnen kann, dass die Sicherungskraft von der anfänglichen Vorspannkraft F_T auf die zulässige Belastung LC zunimmt.

Die hierzu notwendige Dehnung kann bei einer Niederzurrung im reichlichen Zentimeterbereich liegen und im vorliegenden Fall einer Kippsicherung nur durch Anklicken geliefert werden. Versatz und/oder Vershub reichen hierzu kaum aus. Ein derart ausgeprägtes Anklicken birgt jedoch Risiken durch dynamische Effekte. Die mögliche Größenordnung eines derartigen Anklickens wird im folgenden Beispiel rechnerisch abgeschätzt.

Anklicken mit Sicherungskraft = LC

Eine in sich homogene Ladungseinheit mit Gewicht $G = 3200 \text{ daN}$, Breite $B = 1,873 \text{ m}$, Höhe $H = 1,778 \text{ m}$ steht quer auf dem Fahrzeug und wird durch eine quer geführte Niederzurrung gesichert. Die Niederzurrung ist auf halber Länge der Ladungseinheit angebracht. Der Abstand zur Kippachse vorn und hinten beträgt jeweils $J = 0,444 \text{ m}$. Der Zurrwinkel beträgt beidseitig $\alpha = 80^\circ$. Die Längen der freien Gurtabschnitte betragen beidseitig $L = 1,805 \text{ m}$.

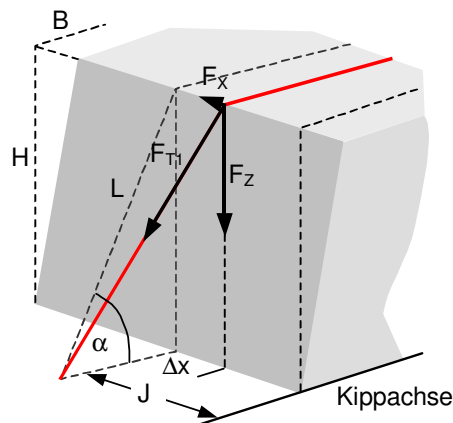


Bild 23: Sicherungswirkung durch Momente längs zum Fahrzeug

Die kippsichernden Vertikalkomponenten der Niederzurrung greifen am Hebel J zur Kippachse an. Die Momentenbilanz für Kippen nach vorn in Anlehnung an VDI 2702 lautet:

$$f_l \cdot G \cdot H/2 \leq G \cdot J + 2 \cdot F \cdot J \cdot \sin \alpha \quad [\text{daN} \cdot \text{m}] \quad (45)$$

$$F = \frac{G \cdot (f_l \cdot H/2 - J)}{2 \cdot J \cdot \sin \alpha} = \frac{3200 \cdot (0,8 \cdot 0,889 - 0,444)}{2 \cdot 0,444 \cdot 0,9848} = 977,7 \text{ daN}$$

Interpretiert man diese für das Momentengleichgewicht in beiden Gurtabschnitten mindestens notwendige Kraft F als zulässige Zurrkraft LC , so würde eine Niederzurrung mit einem Gurt von $LC = 1000 \text{ daN}$ im Einzelstrang ausreichen. Die nominelle Federkonstante D_N für diesen Gurt ist bei einer angenommenen elastischen Dehnung von 4% bei Erreichen von LC :

$$D_N = \frac{LC \cdot 100}{p} = \frac{1000 \cdot 100}{4} = 25000 \text{ daN}$$

Nimmt man ferner an, dass der Gurt auf beiden Seiten im Mittel mit 330 daN vorgespannt wurde, so ist auf jeder Seite eine Kraftzunahme von $\Delta F_1 = 648 \text{ daN}$ erforderlich. Im horizontalen Mittelteil beträgt diese Zunahme wegen der Reibung an den Ladungskanten nur etwa $\Delta F_2 = 490 \text{ daN}$. Daraus kann die notwendige Längenänderung des Gurts ermittelt werden.

$$\Delta L = \frac{2 \cdot \Delta F_1 \cdot L}{D_N} + \frac{\Delta F_2 \cdot B}{D_N} = \frac{2 \cdot 648 \cdot 1,805 + 490 \cdot 1,873}{25000} = 0,130 \text{ m}$$

Diese Längenänderung verteilt sich mit $0,065 \text{ m}$ auf jede Seite und ergibt ein Anheben der Ladung unter der Niederzurrung von 6.6 cm bzw. ein Ankippen um etwa $8,5^\circ$. Durch Änderungen der Kippgeometrie und durch das Rotationsträgheitsmoment der ankippenden Ladung bei einer Vollbremsung kann sich dieser Wert noch beträchtlich vergrößern, so dass die Interpretation der notwendigen Kraft als zulässige Zurrkraft LC nicht ratsam erscheint.

Vermutlich aus diesem Grunde enthalten die Richtlinien VDI 2702 vom Mai 1990 und VDI 2700 Blatt 2 vom November 2002 ein Rechenmodell für diese Situation, in dem als Sicherungskraft eine Vorspannkraft unterstellt wird, die auf 50% der zulässigen Zurrkraft LC begrenzt sein soll. Auch die Norm DIN EN 12195-1:2011 sieht als Sicherungskraft die Vorspannkraft S_{TF} (oder einen gemessenen Wert) vor und bringt noch einen Sicherheitsfaktor in die Rechnung ein. Dieser Faktor beträgt $1,25$ bei Belastung in Fahrtrichtung und $1,1$ bei Belastung gegen die Fahrtrichtung. Die zwischenzeitliche Norm DIN EN 12195-1:2004 enthält für diese Problemstellung keinen Vorschlag.

In den angeführten Rechenmodellen wird keine Reaktionsbewegung der Ladung unterstellt. Sie gehen rechnerisch auch nicht auf Reibungsverlust bei einseitigem Spannmittel ein. Da dies nicht den wirklichen Verhältnissen entspricht, wird die tatsächliche Sicherungswirkung der Niederzurrung den vereinfachten Rechenmodellen gegenübergestellt.

Sicherungswirkung mit Vorspannkraft

Unterstellt wird eine Ladungsbewegung in der gleichen Größenordnung, wie sie zur Darstellung der Sicherungskräfte in Längsrichtung verwendet wurde. Als Bewegungsform wird entweder Rahmenvershub oder Ankippen angenommen. Rutschen ist bei der drohenden Kippgefahr weniger wahrscheinlich und Plattenvershub entfällt aus praktischen Gründen.

Bei **Rahmenvershub** gibt es keine Längenänderung des Gurts und damit keine Zunahme der Vorspannkraft (Kapitel 1.4.2). Es bleibt bei der nach Gleichung (15) ermittelten Kraft F_T .

$$F_T = \frac{S_{TF} \cdot (1 + f_R \cdot c^2)}{2} \text{ [daN]}$$

Neben der Bewegung in Längsrichtung ΔX tritt auch eine kleine vertikale Bewegung der Ladoberfläche ΔZ nach Gleichung (24) auf. Der Wert von ΔZ ist hier negativ.

$$\Delta Z = \sqrt{H^2 - \Delta X^2} - H \text{ [m]}$$

Die Gesamtsicherungswirkung setzt sich zusammen aus den beidseitigen Vertikalkomponenten F_Z , die mit dem Hebel $(J - \Delta X)$ bis zur Kippachse multipliziert werden, und den beidseitigen Längskomponenten F_X , die mit dem Hebel $(H + \Delta Z)$ multipliziert werden.

Vertikalkomponente: $F_Z = F_T \cdot \frac{H + \Delta Z}{L}$ [daN]

Längskomponente: $F_X = F_T \cdot \frac{\Delta X}{L}$ [daN]

Für die Obergrenze der Längskomponente gilt nach Gleichung (41):

$$F_{X_{\max}} = 2 \cdot \mu_G \cdot F_T \cdot \sin(\alpha/2) \text{ [daN]}$$

Die Sicherungswirkung der Niederzurrung gegen Kippen in Längsrichtung wird berechnet.

$$SW = 2 \cdot ((J - \Delta X) \cdot F_Z + (H + \Delta Z) \cdot F_X) \text{ [daN} \cdot \text{m]} \quad (46)$$

SW = Gesamt-Sicherungswirkung [daN·m]

J = Hebel der Vertikalkomponenten der Niederzurrung zur Kippachse [m]

F_T = ausgeglichene Vorspannung nach Gleichung (15) [daN]

F_Z = Vertikalkomponente von F_T [daN]

F_X = Horizontalkomponente von F_T [daN]

H = Höhe der Ladungseinheit [m]

L = Länge des freien Gurtabschnitts [m]

ΔX = Längsbewegung der Ladungsoberfläche [m]

ΔZ = Vertikalbewegung der Ladungsoberfläche [m]

μ_G = Reibbeiwert zwischen Gurt und Ladung

α = Zurrwinkel [°]

Es wird hierzu ein Beispiel berechnet. Die Eingangsgrößen sind:

Höhe der Ladungseinheit:	H = 1,778 m
Breite der Ladungseinheit:	B = 1,873 m
Abstand des Gurts zur Kippachse:	J = 0,444 m
Zurrwinkel:	$\alpha = 80^\circ = 1,3963 \text{ rad}$
Längsweg der Ladungsoberseite:	$\Delta X = 0,1 \text{ m}$
Normale Vorspannung:	$S_{TF} = 400 \text{ daN}$
Nominelle Federkonstante:	$D_N = 62500 \text{ daN}$
Reibbeiwert zwischen Gurt und Ladung:	$\mu_G = 0,20$
Ratschenfaktor:	$f_R = 1,2$

$$c^2 = e^{-2 \cdot \mu_G \cdot \alpha} = e^{-2 \cdot 0,2 \cdot 1,3963} = 0,5721$$

$$F_T = 0,5 \cdot S_{TF} \cdot (1 + f_R \cdot c^2) = 0,5 \cdot 400 \cdot (1 + 1,2 \cdot 0,5721) = 337,3 \text{ daN}$$

$$L = H / \sin \alpha = 1,778 / 0,9848 = 1,805 \text{ m}$$

$$\Delta Z = \sqrt{H^2 - \Delta X^2} - H = \sqrt{1,778^2 - 0,1^2} - 1,778 = -0,0028 \text{ m}$$

$$F_Z = F_T \cdot \frac{H + \Delta Z}{L} = 337,3 \cdot \frac{1,778 - 0,0028}{1,805} = 331,7 \text{ daN}$$

$$F_X = F_T \cdot \frac{\Delta X}{L} = 337,3 \cdot \frac{0,1}{1,805} = 18,7 \text{ daN}$$

$$F_{X_{\max}} = 2 \cdot \mu_G \cdot F_T \cdot \sin(\alpha/2) = 2 \cdot 0,2 \cdot 337,3 \cdot 0,6428 = 86,7 \text{ daN}$$

$$SW = 2 \cdot ((J - \Delta X) \cdot F_Z + (H + \Delta Z) \cdot F_X) = 2 \cdot (0,344 \cdot 331,7 + 1,775 \cdot 18,7) = 294,6 \text{ daN} \cdot \text{m}$$

Zum Vergleich wird die Sicherungswirkung nach DIN EN 12195-1:2011 berechnet:

$$\text{Nach vorn: } SW = \frac{2 \cdot J \cdot S_{TF} \cdot \sin \alpha}{1,25} = \frac{2 \cdot 0,444 \cdot 400 \cdot 0,9848}{1,25} = 279,8 \text{ daN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Nach hinten: } SW = \frac{2 \cdot J \cdot S_{TF} \cdot \sin \alpha}{1,1} = \frac{2 \cdot 0,444 \cdot 400 \cdot 0,9848}{1,1} = 318,0 \text{ daN}\cdot\text{m}$$

Es zeigt sich, dass für die getroffene Annahme von Rahmenverschub die tatsächliche Sicherungswirkung kleiner ist als die nach dem Rechenmodell der DIN EN 12195-1:2011 für Belastung nach hinten, aber größer als die für Belastung nach vorn. Diese Merkwürdigkeit ist schon am Ende von Kapitel 1.4.5 kommentiert worden.

Wenn die tatsächliche Sicherungswirkung einer nach obigem Rechenmodell für Belastung nach hinten (also schwächer) dimensionierten Niederzurrung der Belastung nicht standhält, wird die Ladungseinheit zwangsläufig ankippen, sobald ihre zunehmende innere Steifigkeit weiteren Verschub verhindert. Das kann durchaus schon bei einem $\Delta X < 0,1 \text{ m}$ eintreten.

Das gleiche Beispiel wird mit **Ankippen** von $\gamma = 0,5^\circ$ als Reaktionsbewegung gerechnet.

$$\Delta X = H \cdot \tan \gamma = 1,778 \cdot 0,00873 = 0,0155 \text{ m}$$

$$\Delta Z = \frac{J}{H} \cdot \Delta X = \frac{0,444}{1,778} \cdot 0,0155 = 0,0039 \text{ m}$$

$$\Delta L = \sqrt{L^2 + 2 \cdot J \cdot \Delta X + \Delta X^2 \cdot (1 + J^2/H^2)} - L \text{ [m]}$$

$$\Delta L = \sqrt{1,805^2 + 2 \cdot 0,444 \cdot 0,0155 + 0,00024 \cdot 1,062} - 1,805 = 0,0039 \text{ m}$$

$$F_{T1} = F_T + 2 \cdot \Delta L \cdot \frac{D_N}{2 \cdot L + B} = 337,3 + 2 \cdot 0,0039 \cdot \frac{62500}{2 \cdot 1,805 + 1,873} = 337,3 + 88,9 = 426,2 \text{ daN}$$

$$F_Z = F_{T1} \cdot \frac{H + \Delta Z}{L + \Delta L} = 426,2 \cdot \frac{1,778 + 0,0039}{1,805 + 0,0039} = 419,8 \text{ daN}$$

$$F_X = F_{T1} \cdot \frac{\Delta X}{L + \Delta L} = 426,2 \cdot \frac{0,0155}{1,805 + 0,0039} = 3,7 \text{ daN}$$

$$F_{X_{\max}} = 2 \cdot \mu_G \cdot F_T \cdot \sin(\alpha/2) = 2 \cdot 0,2 \cdot 337,3 \cdot 0,6428 = 86,7 \text{ daN}$$

$$SW = 2 \cdot ((J - \Delta X) \cdot F_Z + (H + \Delta Z) \cdot F_X) = 2 \cdot (0,428 \cdot 419,8 + 1,782 \cdot 3,7) = 372,5 \text{ daN}\cdot\text{m}$$

Dieses Ergebnis übertrifft beide Rechenmodelle der DIN EN 12195-1:2011, so dass ein geringeres Ankippen als $0,5^\circ$ unter den gegebenen Randbedingungen zu erwarten ist.

Die berechneten Sicherungswirkungen ändern sich mit dem Zurrwinkel. Die Ergebnisse in Bild 24 zeigen, dass die Rechenmodelle der DIN EN 12195-1:2011 ausreichend sind. Bei Kippsicherung nach hinten muss bei knapper Auslegung der Sicherung allerdings mit einem geringfügigen Ankippen $< 0,5^\circ$ gerechnet werden.

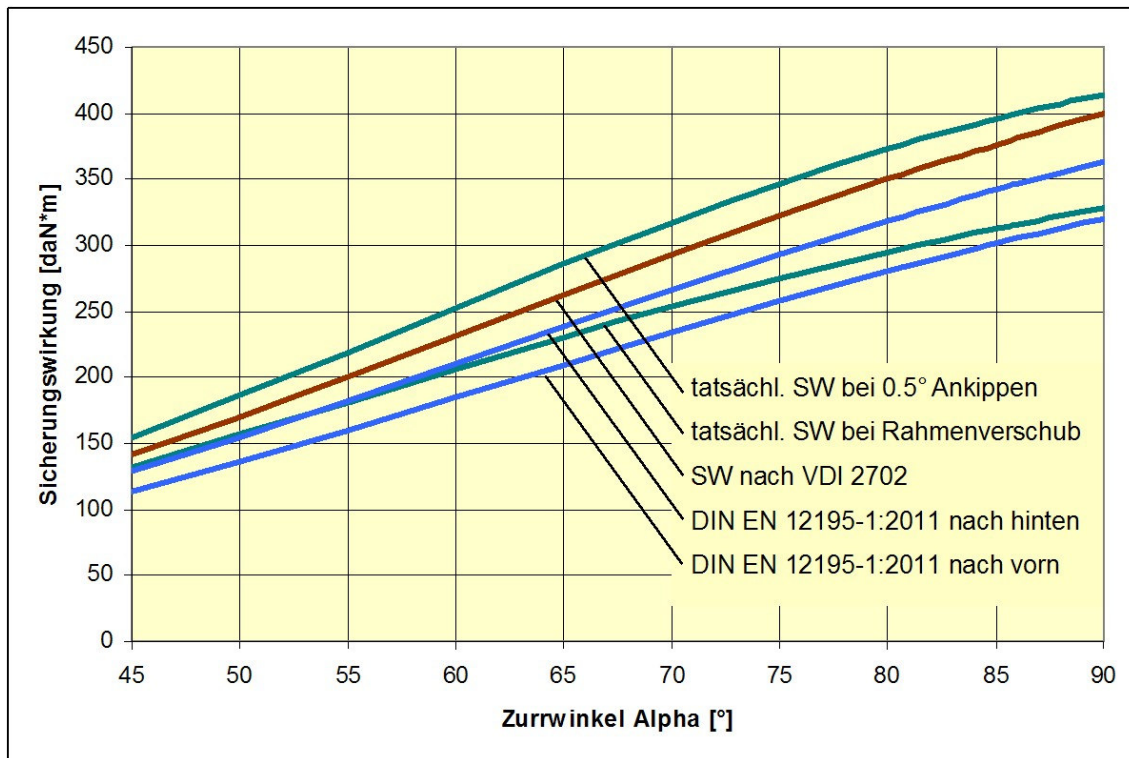


Bild 24: Sicherungswirkung Momente längs, Vergleich von Rechenmodellen

1.4.8 Einfluss des Reibbeiwerts zwischen Zurrmittel und Ladung

Die verwendeten Rechenmodelle zur Darstellung der tatsächlichen Sicherungswirkung einer Niederzurrung sind in hohem Maße von der Vorspannkraft F_T abhängig. Diese Vorspannkraft basiert auf der genormten Vorspannkraft S_{TF} des verwendeten Gurts und dem Übertragungsbeiwert k , der in den vorstehenden Berechnungen in der Form $(1 + c^2)$ verwendet wurde. Ein großer Wert von c^2 setzt einen niedrigen Reibbeiwert zwischen Gurt und Ladung voraus.

Andererseits profitiert die Sicherungswirkung einer Niederzurrung bei Beanspruchung quer zum Fahrzeug vor allem bei kleinen Zurrwinkeln stark von der Differenz der Querkomponenten der Vorspannkraft auf beiden Seiten. Diese Differenz wird größer mit einem großen Reibbeiwert zwischen Gurt und Ladung. Das gilt sowohl für die sichernden Kräfte als auch für die sichernden Momente. Bei Beanspruchung in Längsrichtung dominiert der erstgenannte Einfluss eines niedrigen Reibbeiwerts zwischen Gurt und Ladung.

Diese etwas unübersichtlichen Verhältnisse werden nachstehend in Diagrammen verdeutlicht.

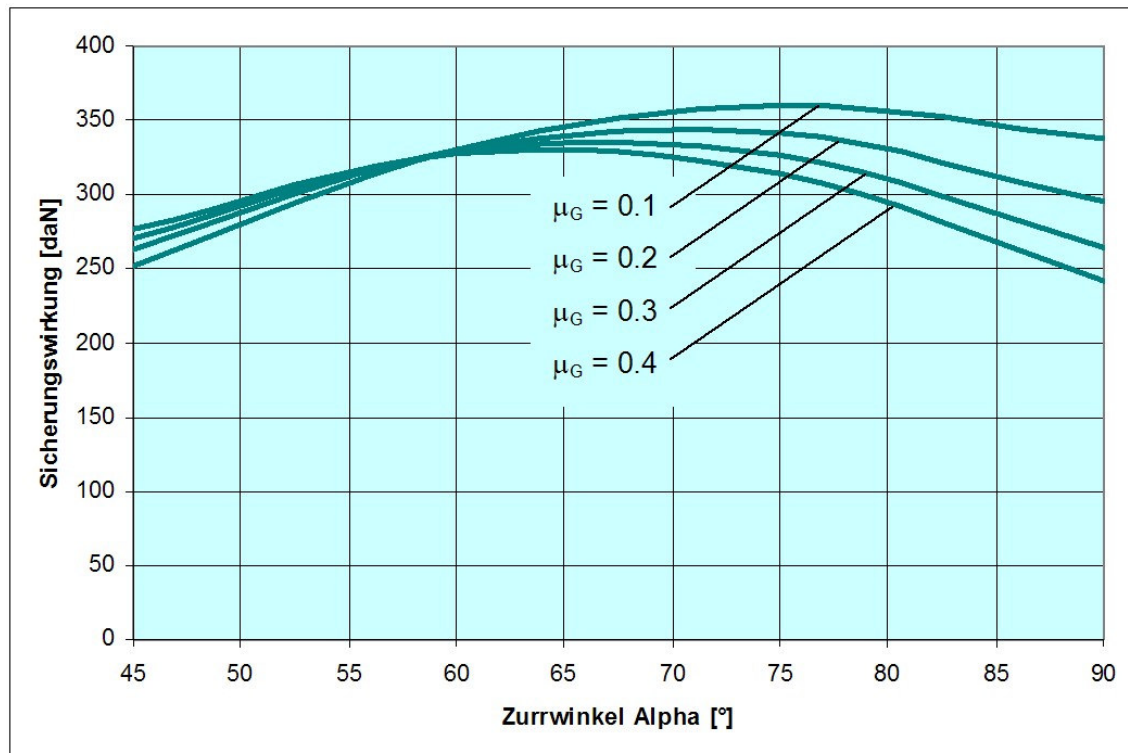


Bild 25: Sicherungswirkung Kräfte quer, Einfluss des Reibbeiwerts Gurt / Ladung

Bild 25 zeigt beispielhaft, dass ein möglichst niedriger Reibbeiwert zwischen Gurt und Ladung angestrebt werden sollte, um die Sicherungswirkung in Form von Querkraften zu maximieren. Das gilt vor allem bei großen Zurrwinkeln. Bei kleinen Zurrwinkeln unter 70° wird dieser Einfluss zunehmend bedeutungslos und kehrt sich bei Zurrwinkeln unter 60° sogar geringfügig um. Da jedoch kleine Zurrwinkel nur bei niedrigen und schmalen Ladungseinheiten technisch möglich sind, liegt mit solchen Winkeln eine Sicherungssituation vor, bei der Direktsicherung möglicherweise die günstigere Option darstellt.

Grundsätzlich also sollte der Reibbeiwert zwischen Gurt und Ladung bei den in der Praxis üblichen großen Zurrwinkeln durch Verwendung von geeigneten Kantenwinkeln oder Kantenblechen möglichst klein gehalten werden. In besonderen Fällen mit kleinen Zurrwinkeln kann es jedoch günstiger sein, an den Kanten rutschhemmendes Material unterzulegen.

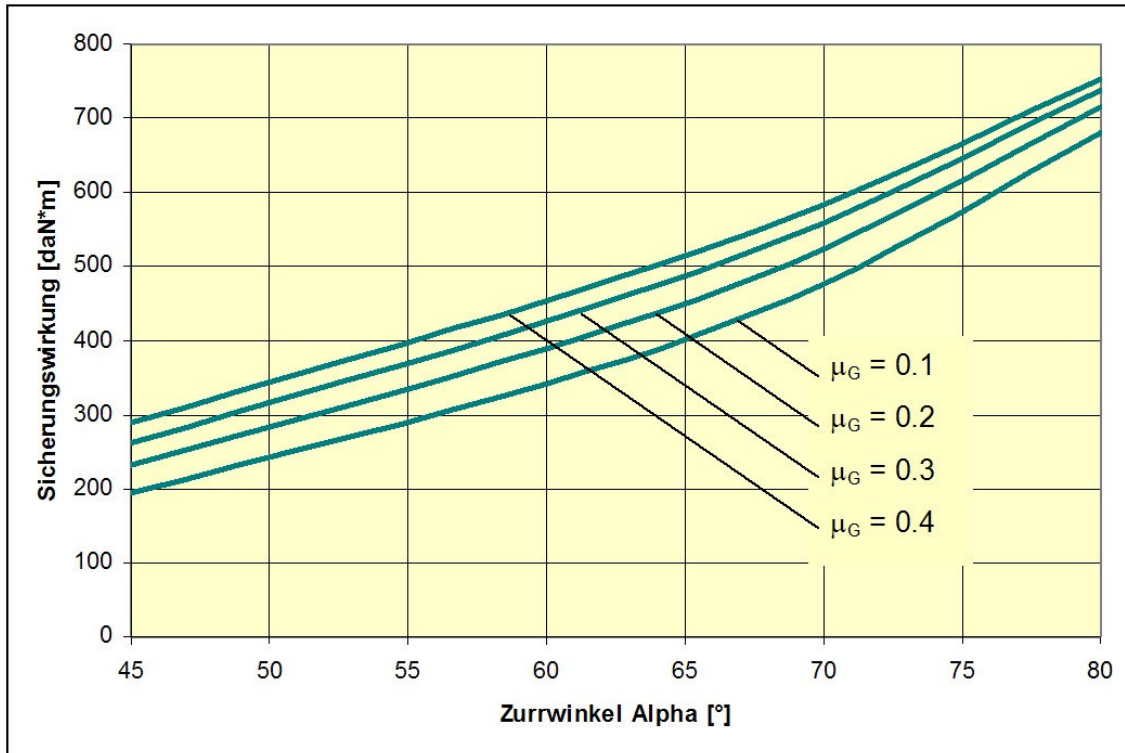


Bild 26: Sicherungswirkung Momente quer, Einfluss des Reibbeiwerts Gurt / Ladung

Bild 26 zeigt den gegenläufigen Einfluss des Reibbeiwerts zwischen Gurt und Ladung, wenn die Niederzurrung als Kippsicherung dienen soll. Ein großer Reibbeiwert begünstigt die mit dem größeren Hebel H wirkenden Querkomponenten so sehr, dass das insgesamt niedrigere Niveau der Vorspannkkräfte überspielt wird. Dieser Effekt tritt umso ausgeprägter auf, je kleiner das Verhältnis $B : H$ ist, d.h. je kippsgefährdeter die Ladungseinheit ist. In solchen Fällen sollte rutschhemmendes Material unter die Zurrgurte gelegt werden. Dieser Hinweis soll nicht davon ablenken, dass die beabsichtigte Kippsicherung möglicherweise günstiger mit einer Direktsicherungsanordnung zu erreichen ist.

Die Bilder 27 und 28 zeigen, dass die Sicherungswirkungen in Form von Kräften wie auch Momenten in Längsrichtung des Fahrzeugs von einem kleinen Reibbeiwert zwischen Gurt und Ladung durchweg profitieren. Das bestärkt die grundsätzliche Empfehlung zur Verwendung von reibungsarmen Kantenwinkeln oder -blechen. Da im Falle der Sicherung gegen Kräfte in Längsrichtung auch Längskomponenten der Zurrkräfte an den Ladungskanten übertragen werden sollen, ist es ratsam, an den Kantenwinkeln oder -blechen geeignete Falze oder Vorsprünge vorzusehen, die ein Rutschen des Gurts in Längsrichtung verhindern. Bei schmalen Kantenwinkeln ist dies regelmäßig vorhanden, allein um ein seitliches Abrutschen des Gurts zu verhindern.

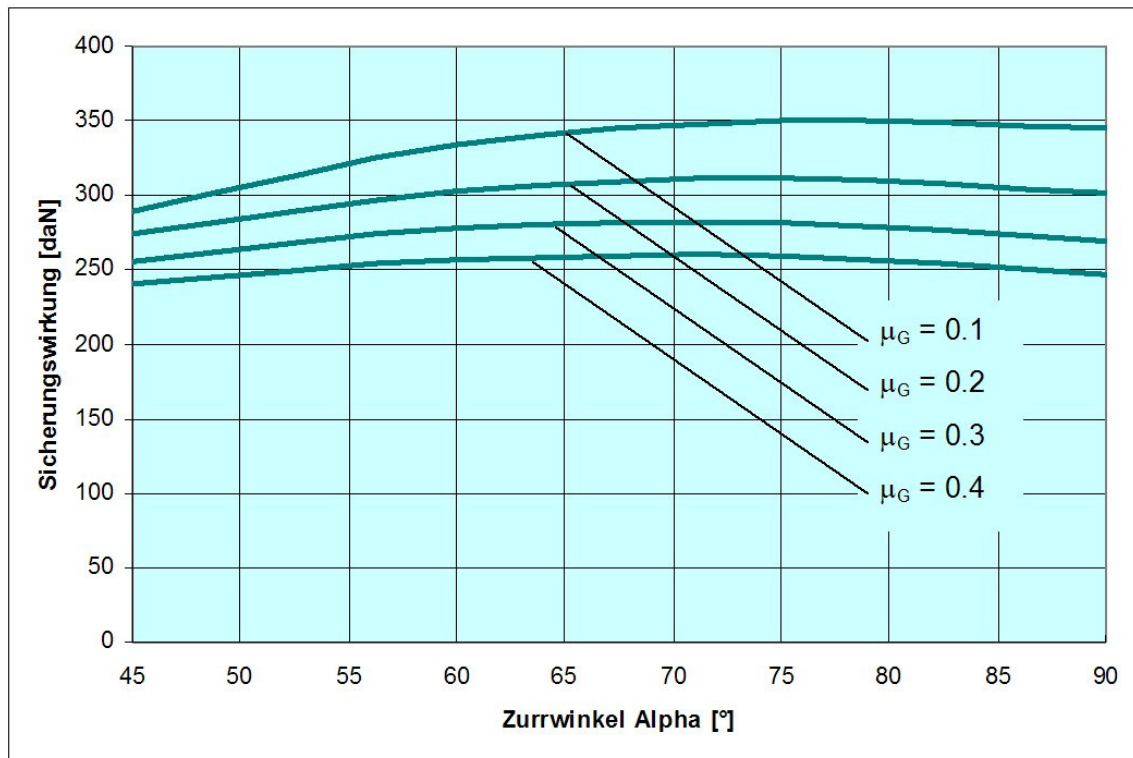


Bild 27: Sicherungswirkung Kräfte längs, Einfluss des Reibbeiwerts Gurt / Ladung

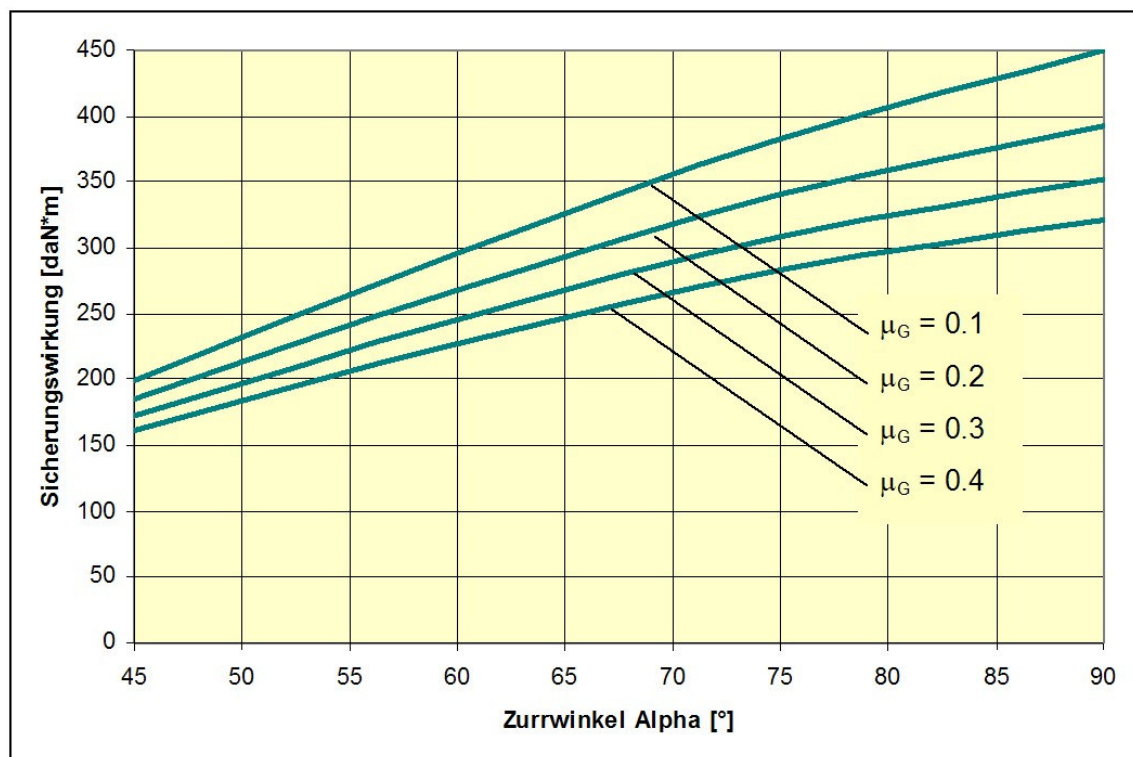


Bild 28: Sicherungswirkung Momente längs, Einfluss des Reibbeiwerts Gurt / Ladung

1.5 Praktische Umsetzung

Die in Kapitel 1.4 angestellten Überlegungen und Rechenwege zur Darstellung der tatsächlichen Sicherungswirkung einer Niederzurrung in den vier Anforderungen "Verhüten von Rutschen der Ladung quer und längs" sowie "Verhüten von Kippen der Ladung quer und längs" eignen sich schwerlich für den praktischen Gebrauch. Man könnte sie mit einem Rechenprogramm für die einmalige Ausarbeitung von standardisierten Sicherungskonzepten einsetzen. Aber selbst dann wären zusätzliche praktische Versuche ratsam, um bestehende Spielräume des spezifischen Ladungsverhaltens und weitere getroffene Annahmen, wie z.B. das elastische Dehnungs- und Hystereseverhalten von Zurrgurten zu kalibrieren.

Für den täglichen Gebrauch der richtigen Bemessung einer Ladungssicherungsanordnung wie auch für polizeiliche Kontrollen ist es wichtig, vereinfachte und anerkannte Rechenmodelle zu haben, die in Form von Rechenregeln oder Tabellen mit möglichst wenigen Parametern die Auskunft über die notwendige Anzahl der Niederzurrungen liefern. Denn auf diese Frage läuft es für den Fahrer letzten Endes hinaus: "Wie viele Gurte muss ich über die Ladung spannen, bevor ich losfahren darf?"

1.5.1 Vereinfachte Bewertungsmodelle

Kapitel 1.4 hat gezeigt, dass die bestehenden und immer noch diskutierten Rechenmodelle der deutschen Richtlinie VDI 2700 Blatt 2 und der beiden Fassungen der DIN EN 12195-1 von 2004 und von 2011 sich bei Annahme gleicher Einflussgrößen teilweise beträchtlich voneinander unterscheiden und außerdem in ihren Ergebnissen weitgehend zur sicheren Seite hin von denen der genaueren Ermittlung der Sicherungswirkungen abweichen. Es können folgende Aussagen gemacht werden:

- Die Rechenmodelle der DIN EN 12195-1:2011 sind sämtlich ausreichend. Die beiden unterschiedlichen Sicherheitsfaktoren bei Belastung in Längsrichtung des Fahrzeugs nach vorn bzw. hinten sind allerdings nicht physikalisch mit den Wirkmechanismen begründbar.
- Die Rechenmodelle der VDI 2700 Blatt 2 unterscheiden sich von denen der DIN EN 12195-1:2011 im wesentlichen nur durch das Fehlen des Sicherheitsfaktors. Sie liefern deshalb Ergebnisse mit geringfügig kleinerer Sicherheitsmarge.
- Die Rechenmodelle der DIN EN 12195-1:2004 für sichernde Quer- und Längskräfte weichen mit 17,5% erheblich von denen der DIN EN 12195-1:2011 ab. Für Kippbeanspruchung in Querrichtung liegen die Abweichungen aus den bekannten Gründen bei mehreren 100%. Das Zustandekommen dieser Abweichungen ist in den Kapiteln 1.3.2 und 1.3.3 bereits erörtert worden.

Somit könnte man sich auf die Rechenmodelle der DIN EN 12195-1:2011 einigen. Das bedeutet aber nicht, dass diese Modelle nicht noch verbesserungsfähig sind.

Die Kurven in den Bildern 18 und 20 zeigen, dass die tatsächliche Sicherungswirkung bei abnehmenden Zurrwinkeln zunächst noch zunimmt, während die gebräuchlichen Rechenmodelle den abnehmenden Verlauf einer Sinus-Kurve zeigen. Es ist also naheliegend, den Faktor " $\sin\alpha$ " in diesen Modellen für Zurrwinkel zwischen 45° und 90° schlicht zu streichen. Das trifft auch auf die Kurven in den Bildern 22 und 24 zu, obwohl dort der Einfluss der mit abnehmendem Zurrwinkel ebenfalls abnehmenden Ladungsbreite B bzw. Hebel J die Zusammenhänge etwas verschleiert. Es können also folgende Rechenmodelle für Zurrwinkel zwischen 45° und 90° formuliert werden:

$$\text{Rutschen quer und längs: } SW = 1,8 \cdot \mu_L \cdot S_{TF} \text{ [daN]} \quad (\text{Bild 29}) \quad (48)$$

$$\text{Kippen quer: } SW = B \cdot S_{TF} \text{ [daN}\cdot\text{m]} \quad (\text{Bild 30 links}) \quad (49)$$

$$\text{Kippen längs: } SW = 1,5 \cdot J \cdot S_{TF} \text{ [daN}\cdot\text{m]} \quad (\text{Bild 30 rechts}) \quad (50)$$

Bei Zurrwinkeln kleiner als 45° ist Niederzurrung zunehmend unwirksam und muss durch andere Sicherungsmethoden ersetzt werden.

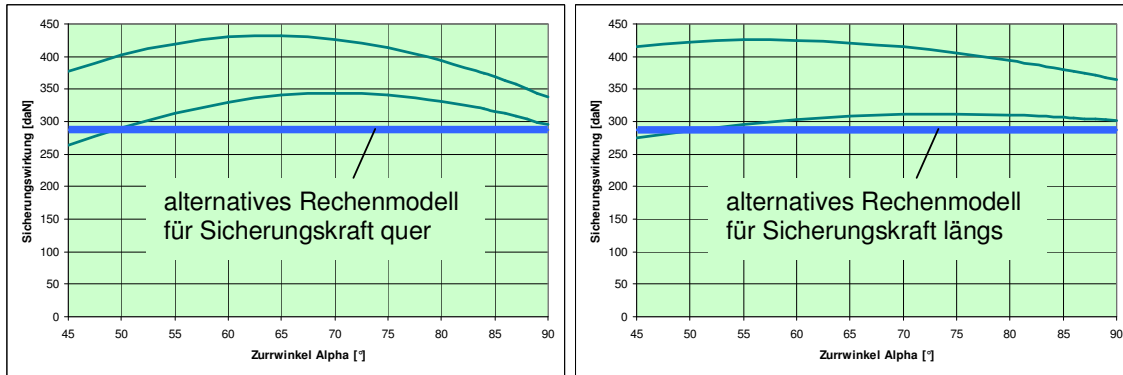


Bild 29: Alternatives Modell der Sicherungswirkung (blau)

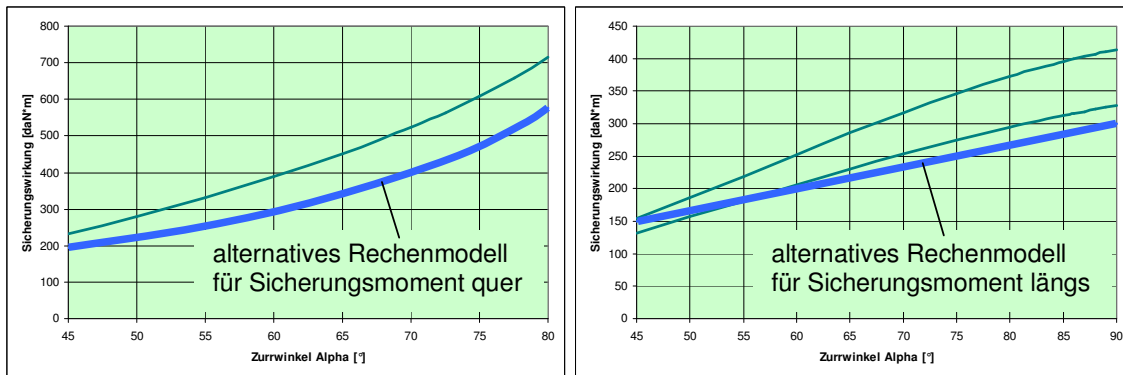


Bild 30: Alternative Modelle der Sicherungswirkung (blau)

Die blauen Kurven in den Bildern 29 und 30 stellen die Sicherungswirkungen nach den vorgeschlagenen vereinfachten Modellen gemäß Gleichungen (48) bis (50) dar. Die grünen Kurven zeigen die tatsächlichen Sicherungswirkungen aus den Bildern 18, 20, 22 und 24. Wichtig erscheint an dieser Stelle der Hinweis, dass die vorgeschlagene Vereinfachung der Rechenmodelle völlig unabhängig von der noch ausstehenden Frage ist, welcher Reibbeiwert in Gleichung (48) einzusetzen ist. Diese Frage muss gesondert behandelt werden.

Der in Kapitel 1.2 beschriebene kleine Makel der konventionellen Rechenmodelle, der darin besteht, dass die durch Reibung zwischen Gurt und Ladung entstehenden Horizontalkomponenten der Niederzurrung außer Acht gelassen werden und dadurch die ohnehin bestehende Dominanz des Reibbeiwerts μ_L bzw. des Standhebels b noch weiter verstärkt wird, ist dadurch jedoch noch nicht behoben. Dieser Schönheitsfehler ließe sich beheben, indem ein kleiner Festanteil der genormten Vorspannkraft S_{TF} zur Wirkung gebracht wird. Die Sicherungswirkung gegen Rutschen quer und längs könnte dann z.B. lauten:

$$\text{Rutschen quer und längs: } SW = (1,5 \cdot \mu_L + 0,1) \cdot S_{TF} \quad [\text{daN}] \quad (51)$$

Es scheint jedoch, dass sich diese Kosmetik angesichts der damit verbundenen komplizierteren Formeln nicht lohnt.

1.5.2 Reibbeiwert zwischen Ladefläche und Ladung

Die wirklich entscheidende Frage, welcher Reibbeiwert zwischen Ladefläche und Ladung in einem Rechenmodell für Niederzurrungen verwendet werden soll, ist aus den Überlegungen und Berechnungen in Kapitel 1.4 nicht zu beantworten. Es geht um die Wahl zwischen einem Wert in der Nähe des Haftreibbeiwerts, wie in der Norm DIN EN 12195-1:2011 vorgesehen, und dem Gleitreibbeiwert, wie in der Vorläufernorm DIN EN 12195-1:2004 und in der Richtlinie VDI 2700 Blatt 2 gefordert. Die Entscheidung darüber betrifft sowohl die tatsächliche Si-

cherungswirkung als auch die durch vereinfachte Modelle ermittelte Sicherungswirkung in nahezu gleichem Ausmaß.

Grundsätzlich sollte eine gewissenhafte Langzeitanalyse von Schäden und Unfällen zu einer volkswirtschaftlich tragfähigen Entscheidung in dieser Frage führen. Solange aber in der Mehrzahl der registrierten Vorfälle nicht einmal die Mindestanforderungen einer ausreichenden Niederzurrung erfüllt zu werden scheinen, ist es schwierig, aus den bisherigen Erfahrungen die richtigen Schlüsse zu ziehen. Die Auswirkungen dieser Entscheidung sind gravierend wegen der in Kapitel 1.2 beschriebenen Nichtlinearität des Einflusses des Reibbeiwerts auf die Anzahl der zu spannenden Gurte (vergl. Bild 3). Die bestehenden konträren Argumente lauten:

1. Alle Fahrversuche zeigen, dass in einem extremen Lastfall die Ladung in Bewegung gerät, also u.U. gleitet, bis die Änderungen der Geometrie der Niederzurrung und gegebenenfalls weitere Kraftaufnahme durch Dehnung der Gurte die Bewegung stoppen und die Ladung festhalten. Während dieses kurzen Zeitraums wirkt der Gleitreibbeiwert.
2. Die vereinfachten Rechenmodelle für Niederzurrungen sind so beschaffen, dass sie ein Kräftegleichgewicht fordern und auch herstellen, ohne Bewegung der Ladung zu unterstellen. Folglich ist es angemessen, den Haftreibbeiwert zu verwenden.

Die Bezugnahme auf Fahrversuche im Argument 1 ist ein ganzheitlicher Denkansatz. Er schließt die tatsächlichen Begleitumstände eines Belastungsfalles ein. Dazu gehören alle positiven wie negativen Einflüsse, wie z.B. kleine vertikale Beschleunigungen, kleine dynamische Zusatzbelastungen infolge der Ladungsbewegung sowie die vollständige Sicherungswirkung der Niederzurrung, wie in Kapitel 1.4 beschrieben.

Das Argument 2 bezieht sich auf die vereinfachten Rechenmodelle und könnte sich sogar zu Gute halten, dass die tatsächliche Sicherungswirkung meist noch etwas größer ist, als die Modelle ausweisen. Allerdings wird ein Teil dieses Gewinns dadurch "verbraucht", dass zumindest im Modell der Norm DIN EN 12195-1:2011 der Übertragungsbeiwert k nicht voll berücksichtigt wird, also durch zusätzliche Wirkungen kompensiert werden muss und auch wird. Zweifellos aber fehlt dem Argument 2 die Berücksichtigung der negativen Begleitumstände eines realen Lastfalls, also vertikale Beschleunigungen und dynamische Effekte.

Unabhängig von den genannten Argumenten können noch folgende Gesichtspunkte geltend gemacht werden:

- Viele niedergezurrte Ladungen, wie mit Einzelpackstücken beladene Paletten, zeigen ein Bewegungsverhalten unter Last, in welchem vorrangig elastische und/oder plastische Verformung vor dem Rutschen der ganzen Ladungseinheit stattfindet. Diese Verformungen reichen vielfach aus, um die volle Sicherungswirkung der Niederzurrung zu entfalten, ohne dass die Ladung rutscht. Das spricht für die Verwendung eines Beiwerts in der Nähe des Haftreibbeiwerts.
- Extreme Lastfälle sind im Straßenverkehr vergleichsweise selten und wenn sie stattfinden, wiederholen sie sich nicht zwangsläufig. Das verringert das Risiko größerer Verlagerungen und könnte für die Verwendung eines größeren Beiwerts sprechen. Allerdings trifft das nicht zu für Ladungen auf Straßenfahrzeugen, die im kombinierten Verkehr über See gehen, wo sich ungünstige Schiffsbewegungen in großer Zahl wiederholen können, wenn das Schiff starken Seegang antrifft. Hier wäre ein Beiwert näher am Reibbeiwert angemessener.

Die Diskussionen im Nachgang der Verabschiedung der Norm EN 12195-1:2003 haben dazu geführt, dass im Jahre 2004 in Schweden praktische Versuche durchgeführt worden sind, mit denen eine Reihe von strittigen Punkten geklärt werden sollten. Einer dieser Punkte war die Frage nach dem anzuwendenden Reibbeiwert in der Bemessung von Niederzurrungen.

Es wurden hierzu sechs Fahrversuche mit Vollbremsung und Aufzeichnung der Beschleunigungen in Längs- und Vertikalrichtung durchgeführt. Die mit Niederzurrung gesicherte Ladungseinheit war eine stehende Papierrolle von 600 kg Masse. Der Haftreibbeiwert zwischen

Papierrolle und Ladefläche wurde zuvor mit drei Zugversuchen zu 0,54 ermittelt. Die Niederzurrung bestand aus einem Polyestergurt, der mit einem beidseitigen Zurrwinkel $\alpha = 58,7^\circ$ quer zum Fahrzeug gespannt war. Die sechs Versuche wurden mit unterschiedlichen, schrittweise abnehmenden Vorspannwerten der Niederzurrung durchgeführt.

Test Nr.	Mittelwert der Verzögerung	Vorspannung vor dem Versuch (beide Seiten)	Vorspannung nach dem Versuch (beide Seiten)	Fiktiver Reibbeiwert für Kräftegleichgewicht
1	6,76 m/s ²	600 kg	-	0,372 kein Rutschen
2	6,95 m/s ²	600 kg	-	0,382 kein Rutschen
3	6,97 m/s ²	500 kg	500 kg	0,415 kein Rutschen
4	6,96 m/s ²	400 kg	400 kg	0,452 kein Rutschen
5	7,14 m/s ²	300 kg	310 kg	0,510 kein Rutschen
6	7,27 m/s ²	250 kg	390 kg	0,547 rutscht 45 mm

Die Auslegung der untersuchten Niederzurrung unter Verwendung des Gleitreibbeiwerts hätte eine Vorspannung von rund 600 daN (als Summe beider Seiten) gefordert, die Auslegung unter Verwendung des Haftreibbeiwerts jedoch nur rund 250 daN. Die Versuchsreihe zeigt erwartungsgemäß, dass ein Rutschen erst beginnt, wenn die benötigte Sicherungskraft größer wird als die Reibung, die der Haftreibbeiwert liefern kann. Das ist im 6. Versuch der Fall, wo der Haftreibbeiwert von 0,54 überschritten wird. Im 5. Versuch deutet die geringfügige Erhöhung der Vorspannung eine sich anbahnende Bewegung der Papierrolle an.

Nachdem im 6. Versuch die Haftung überwunden ist, gleitet die Papierrolle nach vorn. Dabei besteht sofort ein kleiner Überschuss der nach vorn wirkenden Trägheitskraft gegen die nun geringere Gleitreibung und der löst eine beschleunigte Bewegung der Papierrolle aus. Diese Bewegung wird jedoch schnell gehemmt, weil sich der Gurt dehnen muss und dadurch seine Spannung erhöht. Außerdem entsteht durch den Versatz der Rolle eine kleine, nach hinten gerichtete und direkt wirkende Kraftkomponente. Das sind die zusätzlichen Sicherungswirkungen der Niederzurrung, die für das Rutschen in Längsrichtung in Kapitel 1.4.5 der vorliegenden Abhandlung beschrieben worden sind.

Die durchgeführte Versuchsreihe und ihr Ergebnis, so wenig es auch überraschen kann, zeigt das Dilemma der Fragestellung sehr deutlich. Legt man die Niederzurrung auf der Basis des Gleitreibbeiwerts aus, so darf man sehr sicher sein, dass die Ladung im vorgeschriebenen Bezugslastfall niemals gleiten wird. Der Sicherungsaufwand ist dann aber wegen der mehrfach erwähnten Nichtlinearität des Reibungseinflusses beträchtlich und im Grunde unnütz, weil er nie in Anspruch genommen wird. Das ist volkswirtschaftlich bedenklich.

Legt man hingegen die Niederzurrung auf der Basis des Haftreibbeiwerts aus, so besteht aus mehreren Gründen die Möglichkeit, dass dieser nicht ganz ausreicht und die Ladung mit dem nun geringeren Gleitreibbeiwert "in Fahrt" kommt. Zwar kann die in Kapitel 1.4 beschriebene zusätzliche Sicherungswirkung der Niederzurrung die Ladung meist noch halten. Aber das ist nicht sicher. Auch darf nicht vergessen werden, dass diese zusätzliche Wirkung zum Teil als Ausgleich für andere Defizite der vereinfachten Rechenmodelle dienen soll.

Die im Verify-Report⁶ gezogene Schlussfolgerung lautet, dass die bei einer Vollbremsung auftretenden vertikalen Beschleunigungen keinen nennenswerten Einfluss ausüben und daher die Verwendung des Haftreibbeiwerts bei der Bemessung einer Niederzurrung "physikalisch korrekt" sei. Dieser Schlussfolgerung kann nicht ohne Vorbehalt zugestimmt werden. Sie ist im Sinne der vorgenannten Überlegungen zu einseitig. Auch reicht die geringe Zahl der Versuche und die auf einen bestimmten Fahrzeugtyp und auf eine einzige Ladungsart angewandte Versuchsanordnung für eine solche generelle Bewertung nicht aus.

Eine salomonische Lösung könnte lauten: Es ist im Rechenmodell ein graduell verringerter Haftreibbeiwert zu nehmen, der dazu führt, dass etwas mehr Gurte oder größere Vorspannkraft gewählt werden müssen, als es der tatsächliche Haftreibbeiwert ergäbe. Auf diese Weise kann die Wahrscheinlichkeit, dass die tatsächliche Haftreibung nicht ausreicht, auf ein von allen Beteiligten akzeptiertes Minimum gesenkt werden.

⁶ Erhältlich als pdf-Datei unter www.maritem.se

Es ist denkbar, dass die Definition des für Niederzurrungen anzuwendenden Reibbeiwertes im Anhang B der Norm DIN EN 12195-1:2011 dieser Lösung sehr nahe kommt. Dort wird die Verwendung eines normativen Wertes μ vorgeschrieben, der experimentell auf zwei alternativen Wegen ermittelt werden kann:

1. Aus fünf Kippversuchen wird der mittlere Neigungswinkel α bestimmt, bei dem die zu untersuchende Ladungseinheit zu rutschen beginnt. Das geschieht beim Erreichen der maximal möglichen Haftreibung. Als normativer Reibbeiwert wird dann festgelegt:

$$\mu = 0,925 \cdot \tan \alpha \quad (52)$$

2. Es werden näher beschriebene Zugversuche⁷ mit registriertem Gleiten durchgeführt, die zu einem mittleren Verhältnis von Zugkraft zu Gewichtskraft führen. Die Zugkraft ist die Gleitreibung. Als normativer Reibbeiwert wird dann bestimmt:

$$\mu = \frac{0,95 \cdot \text{Zugkraft}}{0,925 \cdot \text{Gewichtskraft}} \quad (53)$$

Die normative Gleichwertigkeit dieser beiden Ergebnisse und ihre Bezüge zur Haftreibung und Gleitreibung lässt einen Schluss auf das unterstellte Verhältnis von Gleitreibung μ_D zu Haftreibung μ_S zu. Ein solches Verhältnis kann selbstverständlich nur als grober Bezugswert aufgefasst werden, da es hierfür bekanntlich keine physikalische Gesetzmäßigkeit gibt.

$$\frac{\mu_D}{\mu_S} = 0,925^2 = 0,856$$

Im Vorgriff auf Kapitel 2 sei hier erwähnt, dass für die Berücksichtigung von Reibung bei Direktsicherung nach der Norm DIN EN 12195-1:2011 der oben festgelegte normative Reibbeiwert μ mit dem Faktor $f_\mu = 0,75$ verringert werden soll. Es wird damit für die Bewertung einer Direktsicherung ein Reibbeiwert von $0,75 \cdot 0,925 \cdot \mu_S = 0,694 \cdot \mu_S$ vorgesehen.

Zu völlig anderen Aussagen und Empfehlungen kommt eine in Deutschland im Jahre 2007 fertig gestellte Studie⁸ mit dem Titel "Untersuchung der Wirksamkeit von Reibungskräften bei der Sicherung verladener Güter im Fahrbetrieb". Die Studie enthält die Ergebnisse von Zugversuchen unter Verwendung von Anti-Rutschmaterial sowie Zugversuchen mit und ohne Niederzurrungen, quasistationär und unter der Einwirkung von vertikalen Schwingungen der Ladefläche. Wichtig im vorliegenden Zusammenhang sind die Versuche mit und ohne Niederzurrung.

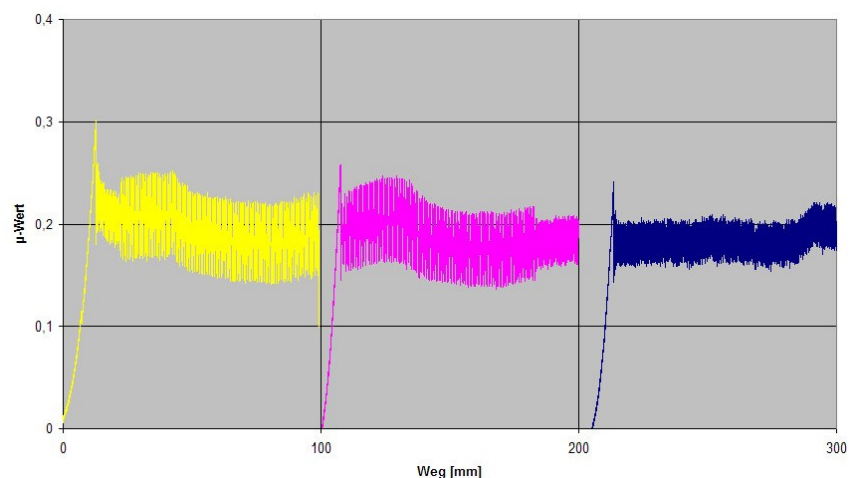


Bild 31: Reibbeiwerte im Zugversuch ohne Niederzurrung (Quelle: Flog)

⁷ Die Beschreibung entspricht in Kurzform der ausführlichen Anweisungen der deutschen Richtlinie VDI 2700 Blatt 14 vom September 2011 zur Ermittlung von Reibbeiwerten.

⁸ Durchgeführt vom Fachgebiet Logistik (Flog) der Universität Dortmund im Auftrage der Berufsgenossenschaft für Fahrzeughaltungen (BGF).

Bild 31 zeigt die aus dem Verhältnis Zugkraft zu Gewichtskraft ermittelten Reibbeiwerte einer Sequenz von drei Versuchen mit der Materialpaarung Siebdruckboden, strukturiert / Europalette, sägerau.

Der Haftreibbeiwert liegt beim ersten Versuch bei 0,3 und fällt dann auf 0,26 und 0,24 ab. Die Gleitreibbeiwerte liegen im Mittel bei 0,18. Diese Werte sind erstaunlich niedrig im Vergleich zu anderen Angaben für gleiche Materialpaarung, die bislang zur Debatte stehen:

DIN EN 12195-1:2004: $\mu_S = 0,5$ $\mu_D = 0,35$

DIN EN 12195-1:2011: $\mu_S = 0,4865$ $\mu_D = 0,4164$ (umgerechnet aus μ_{normativ})

In einem Referenzversuch wird die gleiche Ladungseinheit von 400 daN Gewicht mit zwei Niederzurrungen unter dem beidseitigen Zurrwinkel $\alpha = 80^\circ$ und einer Vorspannkraft von beidseitig rund 350 daN gesichert und dann gezogen. **Hinweis:** Diese Niederzurrung war so ausgelegt, dass sie unter Annahme eines Reibbeiwerts von 0,18 ohne Gleiten einer Zugkraft standhalten sollte, die einer Verzögerung von 0,8 g entsprach. Das zeigt folgende Bilanz:

$$0,8 \cdot 400 \leq 0,18 \cdot 400 + 4 \cdot 0,18 \cdot 350 \cdot \sin 80^\circ \text{ [daN]}$$

$$320 \leq 72 + 248 = 320 \text{ daN}$$

Der unterstellte Reibbeiwert von 0,18 entspricht etwa dem mittleren Gleitreibbeiwert aus dem vorangegangenen Versuch. Mit dem dort festgestellten Haftreibbeiwert von ca. 0,30 hätte die Ladungseinheit erst bei einer Zugkraft von 484 daN rutschen dürfen. Das entspräche einer Verzögerung von 1,21 g. Tatsächlich aber rutschte die Ladungseinheit im ersten Versuch schon bei einer Zugkraft von weniger als 200 daN, also der Hälfte ihres Gewichts, wie die Aufzeichnung in Bild 32 zeigt.

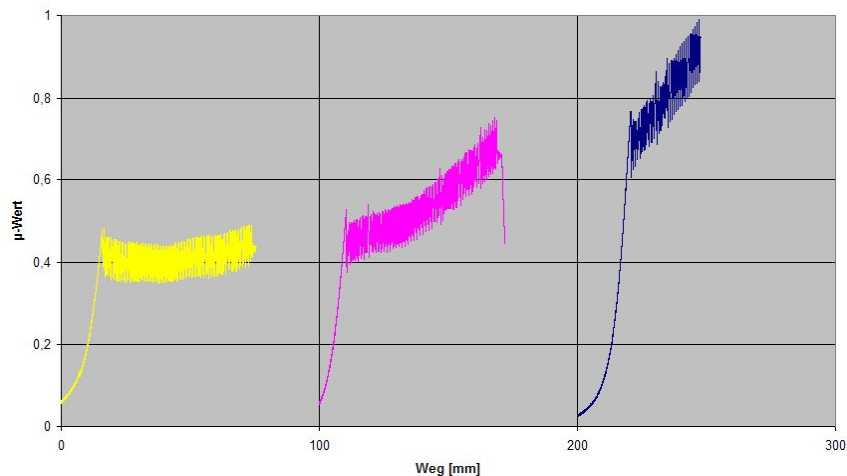


Bild 32: Reibbeiwerte im Zugversuch mit Niederzurrung (Quelle: Flog)

Die scheinbar ansteigenden Reibbeiwerte im zweiten und dritten Versuch sind auf die elastische Dehnung und Kraftzunahme der Gurte und auf ihre direkt wirkenden Längskomponenten zurückzuführen, welche die Versuchszugkraft und damit den scheinbaren Reibbeiwert ansteigen lassen.

In der Studie der Universität Dortmund wird das überraschend große Defizit an Sicherungswirkung mit möglichen Setzvorgängen und möglicher plastischer Dehnung der Zurrgurte sowie sonstigen Einflüssen erklärt. Das erscheint aber wenig plausibel. Unterstellt man den gleichen Haftreibbeiwert von $\mu_S = 0,3$ wie im ersten Versuch ohne Niederzurrung, so lässt sich die wirkende mittlere Vorspannkraft F_T in den Niederzurrungen bei Beginn des Rutschens mit einer Zugkraft von 0,48 des Gewichts berechnen. Die Bilanz lautet:

$$0,48 \cdot 400 \leq 0,3 \cdot 400 + 4 \cdot 0,3 \cdot F_T \cdot \sin 80^\circ \text{ [daN]}$$

$$F_T = \frac{0,18 \cdot 400}{4 \cdot 0,3 \cdot 0,985} = 61 \text{ daN}$$

Ein so drastischer Rückgang der Vorspannkraft von rund 350 daN auf rund 60 daN durch Setzvorgänge oder plastische Dehnung der Gurte ist wenig wahrscheinlich.

Trotz dieser ungeklärten Frage oder vielleicht gerade weil sie nicht geklärt wurde, lautet die zusammenfassende Empfehlung der Autoren der Studie, dass "für die Berechnung von Ladungssicherungsmaßnahmen nicht der Haftreibbeiwert, sondern der Gleitreibbeiwert eingesetzt werden muss. Diese Vorgabe hat sich in den durchgeführten Untersuchungen als unbedingt einzuhaltende Mindestvorgabe herausgestellt."

Diese Empfehlung wurde im Jahre 2007 ausgesprochen, hatte aber offenbar keinen Einfluss auf die Beratungen zur Neufassung der EN 12195-1 in den Jahren 2008 bis 2010 mit dem Ergebnis, den oben beschriebenen mittleren Wert zwischen Haft- und Gleitreibbeiwert normativ vorzusehen.

Allerdings hat die genannte Studie die im September 2011 veröffentlichte Richtlinie VDI 2700 Blatt 14 mit dem Titel "Ermittlung von Reibbeiwerten" nachhaltig geprägt. In dieser Richtlinie wird ein Sicherheitsabschlag $S = 0,95$ festgelegt, mit dem der durch Zugversuche festgestellte Gleitreibbeiwert zu multiplizieren sei, bevor dieser für die Bewertung von Ladungssicherungsvorkehrungen verwendet wird. Dieser Sicherheitsabschlag erscheint dann – für einige europäische Delegationen überraschend – in der Endfassung der EN 12195-1:2010 und auch in der DIN EN 12195-1:2011 (siehe Gleichung (53) oben).

2. Direktsicherung

Direktsicherung von Ladung auf einem Fahrzeug bezeichnet alle Methoden, die als Hauptwirkmechanismus eine "formschlüssige" Kraftübertragung zwischen Ladung und Fahrzeug nutzen. Das ist der wesentliche Gegensatz zur Reibungssicherung (Niederzurrung), die als Hauptwirkmechanismus eine "kraftschlüssige" Verbindung zwischen Ladung und Fahrzeug, also Reibung nutzt, die durch die Niederzurrung nur ein wenig verstärkt wird.

Während die Wirkung formschlüssiger Kraftübertragungen von der Festigkeit des Sicherungsmaterials begrenzt wird, sind der Reibung engere Grenzen gesetzt, die nur marginal vom Sicherungsmittel beeinflusst werden. Deshalb kann eine Direktsicherung um rund eine Zehnerpotenz leistungsfähiger sein als eine Reibungssicherung aus gleichwertigem Material.

Beispiel: Ein direkt sichernder Gurt kann bis zu seiner zulässigen Belastbarkeit LC von beispielsweise 2500 daN belastet werden. Der gleiche Gurt als Niederzurrung eingesetzt und mit der genormten Vorspannkraft S_{TF} von 400 daN gespannt, liefert bei einem Reibbeiwert $\mu = 0,3$ eine Sicherungswirkung von höchstens $2 \cdot 0,3 \cdot 400 = 240$ daN.

Wird der direkt sichernde Gurt mit einer Winkelabweichung von der Richtung der gewünschten Sicherungswirkung angebracht, so ist seine Sicherungswirkung geringer. Das wird in den Rechenmodellen der angeführten Richtlinien und Normen ziemlich einheitlich berücksichtigt.

Rechnerisch wird aber in keiner der Vorgaben in Betracht gezogen, dass die jeweils mögliche Sicherungswirkung nur bei einer merklichen Ladungsbewegung erreicht wird, die bei ungünstigen Zurrwinkeln sogar gefährlich groß werden kann. Es wird lediglich in der Norm DIN EN 12195-1:2011 mit Hinweis auf die notwendige Ladungsbewegung die Verwendung eines um 25% verringerten Reibbeiwerts in den Kräftebilanzen quer und längs zum Fahrzeug gefordert. Dieser kann als Gleitreibbeiwert aufgefasst werden.

Diese Abhängigkeit der Wirkung einer Direktsicherung von Ladungsbewegung hat außerdem zur Folge, dass "im Verbund" eingesetzte, direkt wirkende Sicherungsmittel nur dann mit ihrer zulässigen Belastbarkeit LC wirken können, wenn sie gleiche elastische Eigenschaften in Bezug zur Richtung der Ladungsbewegung haben. Diese einschränkenden Begleitumstände der Direktsicherung werden in den folgenden Kapiteln näher erklärt und exemplarisch dargestellt.

2.1 Notwendige Ladungsbewegung

Das Hooke'sche Gesetz sagt aus, dass alle festen Körper, und dazu zählen auch Ladungssicherungsmittel, sich verformen müssen, wenn sie eine Kraft übertragen sollen. Diese Verformung bedeutet für ein Zurrmittel Dehnung und für ein Blockiermittel Stauchung. Wenn diese Verformungen im zulässigen Bereich bleiben, dann sind sie elastisch. Das bedeutet, es gibt keine bleibende Verformung und der Vorgang einer Kraftübertragung kann beliebig oft wiederholt werden. Genau das erwartet man von einem Ladungssicherungsmittel.

Das Hooke'sche Gesetz sagt ferner aus, dass für praktische Anwendungen im unteren Lastbereich die Lastaufnahme und die zugehörige Formänderung zueinander proportional sind. Das erleichtert alle Berechnungen. Für metallische Zurrmittel trifft diese Annahme recht gut zu, für Kunstfasergurte weniger, aber immer noch ausreichend (siehe Bild 17). Auch für Holz als Blockiermittel kann diese Annahme bei Kurzzeitbelastung verwendet werden.

Zur Ermittlung der zur Kraftübertragung notwendigen Ladungsbewegung wird auf der Grundlage des Hooke'schen Gesetzes, wie bereits in Kapitel 1.4.3 gezeigt, der Begriff der Federkonstanten verwendet. Die Federkonstante D erlaubt eine einfache Umrechnung von Längenänderung ΔL in Kraftänderung ΔF und umgekehrt nach Gleichung (26):

$$\Delta F = D \cdot \Delta L \text{ [daN]}$$

Wie schon in Kapitel 1.4.3 erläutert, ist es sinnvoll, zunächst die nominelle Federkonstante D_N zu verwenden, die unabhängig von der Länge des Sicherungsmittels nur von seinem Querschnitt und einer Materialkonstanten abhängt. Es gilt nach Gleichung (27):

$$D_N = \frac{LC \cdot 100}{p} \text{ [daN]} \quad (p = \text{prozentuale Dehnung})$$

und nach Gleichung (28):

$$D = \frac{D_N}{L} \text{ [daN/m]}$$

Damit lassen sich unter Annahme von 4% elastischer Dehnung von Zurrgurten und 1,5% elastischer Dehnung von Ketten, jeweils bei Erreichen von LC, folgende Werte für nominelle Federkonstanten in daN bestimmen:

LC	500 daN	1000 daN	2500 daN	5000 daN	10000 daN
konfektionierte Zurrgurte	12500	25000	62500	125000	250000
kurzgliedrige Zurrketten	33333	66666	166666	333333	666666

2.1.1 Zurrmittel

Direkt sichernde Zurrmittel werden vom Sicherungspunkt an der Ladungseinheit zum Sicherungspunkt am Fahrzeug gespannt. Dabei treten je nach den Gegebenheiten Abweichungen von der Idealrichtung des Zurrmittels auf, die in Richtung der zu übertragenden Kraft liegen sollte. Die dadurch entstehende Zurrgeometrie nimmt einen erheblichen Einfluss auf die zur Kraftübertragung notwendige Ladungsbewegung.

Bild 33 zeigt einen Lasching der Länge L , der unter einem vertikalen Winkel α zur Ladefläche verläuft. Außerdem weicht der Lasching um den horizontalen Winkel β_x von der Längsrichtung des Fahrzeugs ab. Die gleichzeitige Abweichung von der Querrichtung des Fahrzeugs wird durch den horizontalen Winkel β_y dargestellt.

Neben dieser auf Winkeln beruhenden Beschreibung der Zurrgeometrie besteht die gleichwertige Möglichkeit, den Lasching durch seine geometrischen Komponenten X , Y und Z zu beschreiben. Diese Möglichkeit führt zu etwas übersichtlicheren Formeln und wird im folgenden vorzugsweise benutzt.

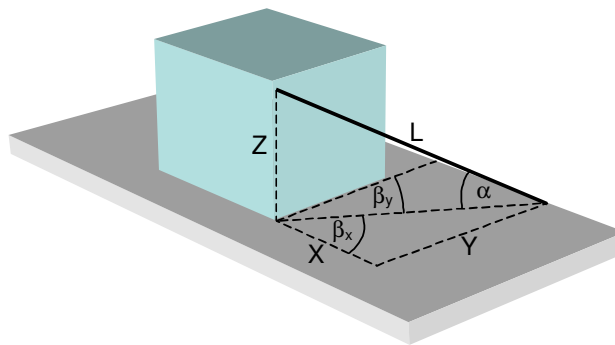


Bild 33: Geometrie einer Direktzurrung

Für die genannten Komponenten X , Y und Z sowie die Länge L des Laschings gilt der räumliche Satz des Pythagoras (L ist die räumliche Diagonale im Quader mit den Seiten X , Y , Z):

$$L^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 \text{ [m]} \quad (54)$$

Der Lasching wird mit der Vorspannung F_T festgesetzt. Um die zulässige Belastung LC zu erreichen, muss er sich um den Betrag ΔL dehnen. Es gilt:

$$\Delta L = \frac{(LC - F_T) \cdot L}{D_N} \quad [\text{m}] \quad (55)$$

Rutschen der Ladung

Bei einem Lastfall in x-Richtung muss sich die Ladungseinheit um die Strecke ΔX bewegen, um die Längenänderung ΔL zu bewirken. Nach Pythagoras erhält man:

$$\Delta X = \sqrt{(L + \Delta L)^2 - Y^2 - Z^2} - X \quad [\text{m}] \quad (56)$$

Bei einem Lastfall in y-Richtung muss sich die Ladungseinheit um die Strecke ΔY bewegen.

$$\Delta Y = \sqrt{(L + \Delta L)^2 - X^2 - Z^2} - Y \quad [\text{m}] \quad (57)$$

Gleichung (55) zeigt, dass man die Längenänderung ΔL gering halten kann, indem man bei gegebener zulässiger Belastung LC eine hohe Vorspannung F_T aufbringt, die Länge L des Laschings möglichst klein macht und/oder ein Material mit großer nomineller Federkonstante wählt, also z.B. eine stählerne Kette anstatt eines Kunstfasergurts.

Die Gleichungen (56) und (57) lassen sich so umformen, dass eine Abschätzung des Verhältnisses von Ladungsbewegung zu Längenänderung möglich ist. Die Umformungen lauten:

$$\frac{\Delta X}{\Delta L} = \frac{2 \cdot L + \Delta L}{2 \cdot X + \Delta X} \quad \text{und} \quad \frac{\Delta Y}{\Delta L} = \frac{2 \cdot L + \Delta L}{2 \cdot Y + \Delta Y} \quad (58)$$

Zieht man in Betracht, dass die beiden addierten Änderungswerte klein gegenüber den zweifachen Grundwerten sind, so kann man mit ausreichender Genauigkeit schreiben:

$$\frac{\Delta X}{\Delta L} = \frac{L}{X} \quad \text{und} \quad \frac{\Delta Y}{\Delta L} = \frac{L}{Y} \quad (59)$$

Die Ladungsbewegungen sind also im Regelfall immer größer als die Längenänderungen, niemals kleiner. Sie können nur dann auf die Größe der Längenänderungen beschränkt werden, wenn der Lasching ausschließlich in x-Richtung bzw. in y-Richtung geführt wird, also keine sonstigen Komponenten hat. Wenn jedoch X bzw. Y nahe oder gleich Null ist, was ohnehin als äußerst ungünstige Anordnung anzusehen ist, liefern die Näherungsgleichungen (59) keine richtigen, sondern zu große Ergebnisse. Die Berechnung von ΔX bzw. ΔY mit den Gleichungen (56) und (57) ist daher grundsätzlich vorzuziehen.

Beispiel: Zur Demonstration der Größenordnungen, um die es hier geht, wird ein einfaches Beispiel durchgerechnet. Ein Lasching wird ähnlich wie in Bild 33 gesetzt mit den Längskomponenten $X = 1,4 \text{ m}$, $Y = 2,0 \text{ m}$, $Z = 1,3 \text{ m}$. Die Länge des Laschings beträgt:

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = \sqrt{1,4^2 + 2,0^2 + 1,3^2} = 2,766 \text{ m}$$

Der Lasching ist ein einfach gelegter Zurrurt mit $LC = 2500 \text{ daN}$. Er ist auf $S_{TF} = 400 \text{ daN}$ vorgespannt. Die zum Erreichen von LC notwendige Längenänderung beträgt:

$$\Delta L = \frac{(LC - F_T) \cdot L}{D_N} = \frac{(2500 - 400) \cdot 2,766}{62500} = 0,093 \text{ m}$$

Bei Beanspruchung in x-Richtung ist die notwendige Ladungsbewegung nach Gl. (56):

$$\Delta X = \sqrt{(L + \Delta L)^2 - Y^2 - Z^2} - X = \sqrt{2,859^2 - 2,0^2 - 1,3^2} - 1,4 = 0,176 \text{ m}$$

Bei Beanspruchung in y-Richtung ist die notwendige Ladungsbewegung nach Gl. (57):

$$\Delta Y = \sqrt{(L + \Delta L)^2 - X^2 - Z^2} - Y = \sqrt{2,859^2 - 1,4^2 - 1,3^2} - 2,0 = 0,127 \text{ m}$$

Beide Ergebnisse sind noch nicht extrem, zeigen aber, dass die notwendige Ladungsbewegung für eine Direktsicherung mit Gurten erheblich sein kann.

Kippen der Ladung

Eine Ladungseinheit, die eher kippt als rutscht, muss um einen kleinen Winkel $\Delta\delta$ ankippen, um die zur vollen Lastaufnahme des Laschings erforderliche elastische Dehnung zu erzeugen. Auch hier kann ein einfacher Zusammenhang zwischen dieser Längenänderung und dem Ankippwinkel gefunden werden.

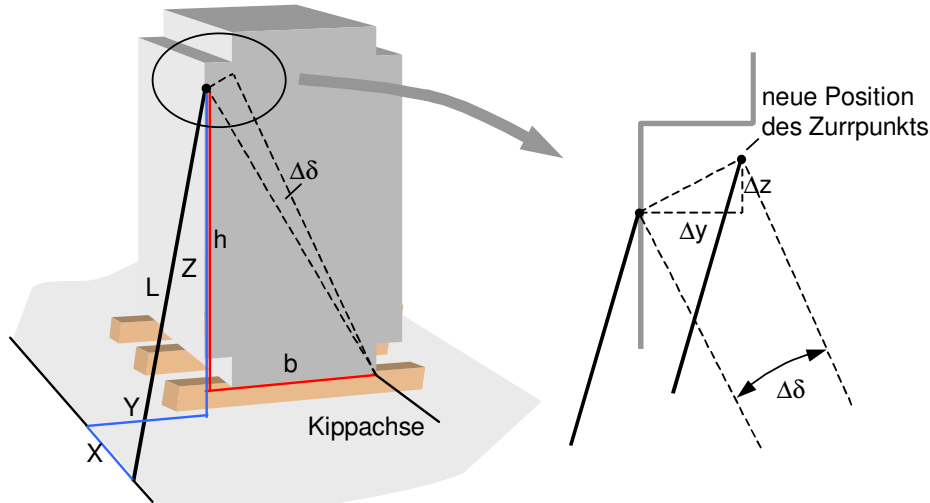


Bild 34: Direktsicherung gegen Kippen

Da der Ankippwinkel klein ist, kann die neue Position des Zurrpunkts an der Ladungseinheit mit einem vereinfachenden Ansatz gefunden werden.

$$\Delta Y = h \cdot \Delta\delta \text{ [m]} \quad \text{und} \quad \Delta Z = b \cdot \Delta\delta \text{ [m]}$$

Der räumliche Satz des Pythagoras führt zum gewünschten Zusammenhang zwischen ΔL und $\Delta\delta$ für ein Ankippen in Querrichtung des Fahrzeugs.

$$(L + \Delta L)^2 = X^2 + (Y + h \cdot \Delta\delta)^2 + (Z + b \cdot \Delta\delta)^2 \text{ [m}^2\text{]}$$

Nach weiteren Umformungen und zulässigen Vereinfachungen erhält man:

$$\Delta\delta = \Delta L \cdot \frac{L}{h \cdot Y + b \cdot Z} \text{ [rad]} \quad (60)$$

Beispiel: Zur Demonstration der Größenordnungen wird ein einfaches Beispiel durchgerechnet. Ein Lasching wird ähnlich wie in Bild 34 gesetzt mit den Längskomponenten $X = 0,9 \text{ m}$, $Y = 0,7 \text{ m}$, $Z = 2,0 \text{ m}$. Die Länge des Laschings beträgt:

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = \sqrt{0,9^2 + 0,7^2 + 2,0^2} = 2,302 \text{ m}$$

Der Lasching ist ein einfach gelegter Zurrgurt mit $LC = 2500 \text{ daN}$. Er ist auf $S_{TF} = 400 \text{ daN}$ vorgespannt. Die zum Erreichen von LC notwendige Längenänderung beträgt:

$$\Delta L = \frac{(LC - F_T) \cdot L}{D_N} = \frac{(2500 - 400) \cdot 2,302}{62500} = 0,077 \text{ m}$$

Die Abstände zur Kippachse sind $h = 1,9 \text{ m}$ und $b = 1,2 \text{ m}$. Damit erhält man den Ankippwinkel nach Gleichung (60).

$$\Delta\delta = \Delta L \cdot \frac{L}{h \cdot Y + b \cdot Z} = 0,077 \cdot \frac{2,302}{1,9 \cdot 0,7 + 1,2 \cdot 2,0} = 0,0475 \text{ rad}; \Delta\delta = 2,7^\circ$$

Das Ankippen von $2,7^\circ$ bewirkt z.B., dass sich die Ladungseinheit auf der Seite gegenüber der Kippachse um knapp 6 cm anhebt.

2.1.2 Blockierung

Blockierungen werden auf Druck beansprucht. Da eine schräge Kraftübertragung zum seitlichen Wegsprengen der Blockierung führen könnte, werden sie üblicherweise so angebracht, dass sie genau in Richtung der Belastung wirken. Das vereinfacht die Betrachtung der notwendigen Ladungsbewegung. Sie ist genau so groß, wie die Längenänderung der Blockierung, genauer, wie der Betrag, um den sie zusammengedrückt werden muss, um die Druckkraft nach dem Hooke'schen Gesetz zu übertragen.

Blockierungen auf Straßenfahrzeugen setzen sich zusammen aus dem begrenzenden Element der Ladefläche, also elastischer Stirnwand, Bordwand, Runge oder Spezialaufbau, und den ausfüllenden Elementen, meist Holzbohlen, Paletten oder sogar Luftpolster. Dadurch ist es schwer, eine halbwegs verlässliche Federkonstante zu bestimmen, die es ermöglicht, die Formänderung aus der Blockierkraft abzuschätzen. Hinzu kommt, dass viele Blockierungen am Beginn einer Fahrt selten bereits vollen Kontakt haben, so dass im Falle einer Belastung zunächst ein gewisser "Leerlauf" erfolgt, bevor die blockierende Gegenkraft aufgebaut wird. Dieser Leerlauf sollte so klein wie möglich gehalten werden, um zu verhindern, dass die bewegte Ladung zuviel kinetische Energie aufnimmt.

Trotz dieser Unsicherheiten kann davon ausgegangen werden, dass eine gezielt hergestellte Blockierung, z.B. mit Holzbohlen zur Stirnwand, im Auslegungslastfall nur wenige Zentimeter an Bewegung der Ladung benötigt bzw. zulässt, um die volle Last zu übernehmen, also viel weniger als dies bei Laschings überwiegend der Fall ist.

2.2 Zulässige Vorspannung einer Direktzurrung

Direktzurrungen sollten grundsätzlich zweiseitig angeordnet werden, so dass Sicherungswirkung nach vorn und hinten bzw. nach rechts und links ermöglicht wird. Wird überall eine Vorspannkraft aufgebracht, so besteht die Sicherungswirkung im Ruhezustand der üblicherweise schrägen Zurrungen lediglich aus der Reibungserhöhung zwischen Ladung und Ladefläche, die durch die Vertikalkomponenten der Vorspannkräfte erzeugt wird. Die Horizontal-komponenten der Vorspannkräfte heben sich weitgehend gegenseitig auf. Damit unterscheidet sich die Direktzurrung zunächst nicht von einer Niederzurrung.

Die volle Belastbarkeit LC der Zurrmittel kommt erst zur Wirkung, wenn die Ladung durch eine äußere Kraft – meist Trägheitskraft bei Bremsmanöver oder Kurvenfahrt – so weit fortbewegt oder verformt worden ist, dass auf der belasteten Seite die Kraft in den Zurrmitteln durch deren Längung von der Vorspannkraft auf die Zurrkraft LC ansteigt und auf der Gegenseite durch Verkürzung auf Null abfällt. Nur unter dieser Voraussetzung gelten die in Richtlinien und Normen üblichen Rechenmodelle für die Bemessung einer Direktzurrung. Diese Modelle gehen stets davon aus, dass die Zurrkraft auf der Gegenseite gleich Null ist.

Diese Voraussetzung wird in der Praxis meist ohne Schwierigkeiten erreicht. Wichtig ist dabei die Höhe der anfänglichen Vorspannkraft auf beiden Seiten. Beträgt diese z.B. 50% des Wertes von LC und ist die Anordnung der Zurrmittel auf beiden Seiten symmetrisch und von gleicher Elastizität, so wird dieser Idealzustand gerade erreicht. Bei höherer Vorspannung würde auf der Gegenseite eine (schädliche) Restkraft verbleiben oder auf der belasteten Seite würde der LC-Wert überschritten. Damit ist eine Vorspannkraft von 50% LC für mechanisch symmetrische Anordnungen der Grenzfall. Darauf wird z.B. in der Richtlinie VDI 2702 ausdrücklich hingewiesen.

Für asymmetrische Anordnungen sinkt diese Grenze. Eine einfache Faustregel kann hierfür nicht gegeben werden. Ein Beispiel soll diese Situation erläutern.

Beispiel: Eine Ladungseinheit ist nach vorn und hinten mit über Kreuz laufenden Gurten von zulässiger Belastung $LC = 1000 \text{ daN}$ und Vorspannung $F_T = 500 \text{ daN}$ gesichert. Die Geometrie der Gurte ist:

$$\text{Vorn} : X = 0,5 \text{ m}, Y = 2,4 \text{ m}, Z = 1,8 \text{ m}; \quad L = \sqrt{0,5^2 + 2,4^2 + 1,8^2} = 3,041 \text{ m}$$

Hinten : $X = 2,0 \text{ m}$, $Y = 2,4 \text{ m}$, $Z = 1,8 \text{ m}$; $L = \sqrt{2,0^2 + 2,4^2 + 1,8^2} = 3,606 \text{ m}$

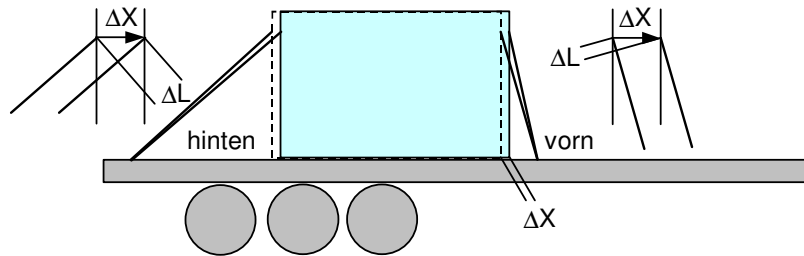


Bild 35: Asymmetrische Direktzurrung

Wenn die volle Belastbarkeit LC von den beiden hinteren Gurten bei einer Vollbremsung verlangt wird, so müssen sie sich um ΔL dehnen.

$$\Delta L = \frac{(LC - F_T) \cdot L}{D_N} = \frac{500 \cdot 3,606}{25000} = 0,072 \text{ m}$$

Diese Dehnung wird durch eine Verlagerung der Ladungseinheit um die Strecke ΔX erreicht.

$$\Delta X = \sqrt{(L + \Delta L)^2 - Y^2 - Z^2} - X = \sqrt{3,678^2 - 2,4^2 - 1,8^2} - 2,0 = 0,128 \text{ m}$$

Durch diese Verlagerung verkürzen sich die vorderen Gurte um ΔL .

$$\Delta L = \sqrt{(X - \Delta X)^2 + Y^2 + Z^2} - L = \sqrt{0,372^2 + 2,4^2 + 1,8^2} - 3,041 = -0,018 \text{ m}$$

Diese Verkürzung verringert die Vorspannkraft in den vorderen Gurten um ΔF .

$$\Delta F = \Delta L \cdot \frac{D_N}{L} = -0,018 \cdot \frac{25000}{3,041} = -148 \text{ daN}$$

Da die vorderen Gurte mit 500 daN vorgespannt waren, haben sie immer noch eine Spannkraft von 352 daN, wenn die hinteren Gurte bereits ihre zulässige Belastung LC erreicht haben. Dadurch wird deren Sicherungswirkung in der Horizontalkomponente vermindert. Diese Verminderung wird aber abgemildert oder sogar aufgehoben, weil die Vertikalkomponenten der vorderen Gurte über den Reibbeiwert zwischen Ladung und Ladefläche positiv zur Sicherung beitragen. Die Gesamtsicherungswirkung dieser asymmetrischen Anordnung wird im folgenden Kapitel berechnet.

Eine Vorspannkraft von 50% der zulässigen Belastung wird bei Zurrgurten nur selten erreicht und diese Vorspannkraft fällt durch Setzvorgänge schon nach kurzer Zeit etwas ab. Somit tritt das Problem einer übermäßigen Vorspannkraft bei Gurten kaum auf. Bei Zurrketten mit hochwertigen Spannvorrichtungen ist ein übermäßiges Vorspannen mit bestimmten, unzulässigen Hilfsmitteln möglich und muss unbedingt vermieden werden. Der Ratschlag in Broschüren von Herstellern, Kettenlaschings nur "handfest" vorzuspannen, sollte jedoch nicht so verstanden werden, dass die Ketten "lose" gefahren werden sollen. Auch für Ketten gilt die optimale Grenze der Vorspannkraft von 40% bis 50% der zulässigen Belastung LC.

2.3 Sicherungswirkung einer Direktzurrung

2.3.1 Wirkung gegen horizontale Bewegung (Versatz, Vershub)

Die Sicherungswirkung einer Direktzurrung gegen horizontale Kräfte besteht wie bei Niederzurrungen aus den Teilwirkungen der Horizontalkomponente und der auf Straßenfahrzeugen stets nach unten gerichteten Vertikalkomponente der Zurrkraft, die so über die Reibungserhöhung sichernd wirkt. Während bei Niederzurrungen die Reibungserhöhung dominiert, soll-

te man bei Direktsicherungen mit einem möglichst kleinen Zurrwinkel α dafür sorgen, dass die ergiebigere Wirkung der Horizontalkomponente gut genutzt wird (Bild 36 links).

Es besteht in allen Richtlinien und Normen Einigkeit darüber, dass als Reibbeiwert für die Direktzurrung der Gleitreibbeiwert verwendet werden soll, weil die Wahrscheinlichkeit groß ist, dass die Ladung zum Erreichen der vollen Sicherungswirkung gleiten muss, wie in den vorangehenden Kapiteln erläutert worden ist. Die Sicherungswirkung einer Direktzurrung gegen Versatz einer Ladungseinheit wird durch folgende Gleichungen beschrieben:

$$SW_X = LC \cdot \left(\frac{X + \Delta X}{L + \Delta L} + \mu_D \cdot \frac{Z}{L + \Delta L} \right) \quad [\text{daN}] \quad (61)$$

$$SW_Y = LC \cdot \left(\frac{Y + \Delta Y}{L + \Delta L} + \mu_D \cdot \frac{Z}{L + \Delta L} \right) \quad [\text{daN}] \quad (62)$$

Zu beachten ist, dass für eine exakte Berechnung in beiden Gleichungen die um die kleinen Gleitstrecken ΔX bzw. ΔY vergrößerten Horizontalkomponenten und auch die um ΔL vergrößerte Länge L eingesetzt werden. Das wird in allen üblichen Rechenmodellen nicht gemacht. Statt dessen werden stets die Ausgangswerte X , Y und L verwendet, weil die Ladungsbewegung insgesamt ignoriert wird. Die Ergebnisse liegen dadurch jedoch stets auf der sicheren Seite. Bei kleinen Ausgangswerten von X bzw. Y , also ohnehin ungünstigen Sicherungsgeometrien, sind die Abweichungen der üblichen Rechenmodelle von den Ergebnissen der Gleichungen (61) und (62) allerdings erheblich. Die vereinfachten Rechenmodelle sind in dieser Hinsicht für Kräftebilanzen angemessen und brauchbar.

An dieser Stelle wird die Sicherungswirkung für das **Beispiel** des vorangegangenen Kapitels mit einem Gleitreibbeiwert $\mu_D = 0,3$ berechnet.

$$SW_X = 2 \cdot 1000 \cdot \left(\frac{2,128 + 0,3 \cdot 1,8}{3,678} \right) + 2 \cdot 352 \cdot \left(\frac{-0,372 + 0,3 \cdot 1,8}{3,023} \right) = 1450,8 + 39,1 = 1489,9 \text{ daN}$$

Der konventionelle Rechenansatz ergibt für die gleiche Situation folgendes Resultat:

$$SW_X = n \cdot LC \cdot \left(\frac{X}{L} + \mu_D \cdot \frac{Z}{L} \right) = 2 \cdot 1000 \cdot \left(\frac{2,0 + 0,3 \cdot 1,8}{3,606} \right) = 1408,8 \text{ daN}$$

Damit weicht das Ergebnis in diesem Beispiel um knapp 6% zur sicheren Seite vom Ergebnis einer genaueren Berechnung ab. Nicht berücksichtigt ist in dieser Beurteilung die Dynamik sich bewegnender Ladung, die zu einem etwas erhöhten Sicherheitsbedarf führt.

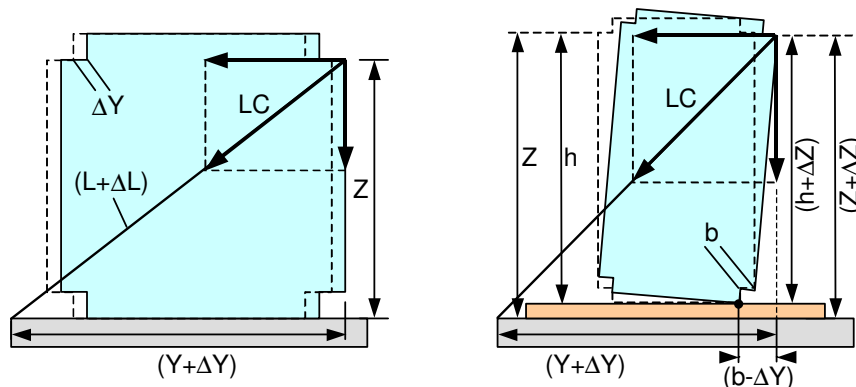


Bild 36: Sicherungswirkungen gegen Rutschen und Kippen

2.3.2 Wirkung gegen Kippen

Die Sicherungswirkung einer Direktzurrung gegen Kippen setzt sich ebenfalls aus den Teilwirkungen der Horizontalkomponente und der Vertikalkomponente der Zurrkraft zusammen.

Eine exakte Berechnung sollte das mögliche Ankippen und die dadurch auftretenden Änderungen der wirksamen Kräfte und Hebel berücksichtigen. Die Gleichung für die Sicherungswirkung in Querrichtung des Fahrzeugs lautet mit den Größen in Bild 36 rechts:

$$SW_Y = LC \cdot \left(\frac{Z + \Delta Z}{L + \Delta L} \cdot (b - \Delta Y) + \frac{Y + \Delta Y}{L + \Delta L} \cdot (h + \Delta Z) \right) \text{ [daN}\cdot\text{m]} \quad (63)$$

Zum Vergleich wird das übliche, vereinfachte Modell wiedergegeben.

$$SW_Y = LC \cdot \left(\frac{Z}{L} \cdot b + \frac{Y}{L} \cdot h \right) \text{ [daN}\cdot\text{m]}$$

Die Unterschiede in den Ergebnissen sind meist vernachlässigbar klein. Allerdings weichen die Ergebnisse der vereinfachten Modelle zur unsicheren Seite ab. Sie sind stets etwas größer als die genaueren Ergebnisse. Die vereinfachten Rechenmodelle für Kippbilanzen sind dennoch angemessen und brauchbar.

Die Sicherungswirkung einer Direktzurrung gegen Kippen in Längsrichtung wird nach Gleichung (63) sinngemäß berechnet.

In Bild 36 rechts ist zu beachten, dass der Wert von b im gewählten Beispiel negativ ist. (b = horizontaler Abstand des Zurrpunkts an der Ladungseinheit von der Kippachse). Die Vertikalkomponente der Zurrkraft unterstützt das äußere Kippmoment. Über Kreuz geführte Direktzurrungen sind daher gegen Kippen der Ladung weniger wirksam als steil geführte.

2.4 Statische Unbestimmtheit komplexer Direktsicherungen

Komplexe Ladungssicherungsanordnungen können aus einer Kombination von Sicherungsmitteln verschiedener Elastizität, unterschiedlicher Abmessungen und unterschiedlicher Wirkrichtungen bestehen. Die Beanspruchung der einzelnen Mittel ist unter diesen Umständen statisch unbestimmt und richtet sich allein danach, wie jedes Sicherungsmittel durch die Bewegung oder Verformung der Ladungseinheit seinerseits verformt wird. Es ist unzulässig, in eine Kräfte- oder Momentenbilanz für jedes dieser Sicherungsmittel die zulässige Belastbarkeit LC einzusetzen. Auf diesen wichtigen Sachverhalt ist bereits im Bericht "Ladungssicherung im Straßenverkehr – Wer kennt die Wahrheit?" hingewiesen worden.

Dort wurde kurz ein sogenannter selektiver Rechenansatz beschrieben, mit dem das Problem der statischen Unbestimmtheit näherungsweise mit ausreichender Genauigkeit gelöst werden kann. Der selektive Ansatz geht von dem Ladungssicherungsmittel in der betrachteten Anordnung aus, welches in einem bestimmten Lastfall 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. Im folgenden wird dieser Berechnungsweg für die Kräftebilanz in X-Richtung dargestellt.

2.4.1 Unterschiedliche Zurrwinkel und Längen

Werden mehrere Zurrmittel direkt sichernd in unterschiedlichen Winkeln, mit unterschiedlichen Längen und Querschnitten und mit unterschiedlichen Vorspannungen eingesetzt, so muss zunächst das "empfindlichste" Zurrmittel gefunden werden, welches mit der geringsten Ladungsbewegung seine zulässige Belastung LC erreicht. Da es bei dieser Aufgabe nicht auf letzte Genauigkeit ankommt, werden zur Umrechnung von ΔL in ΔX die vereinfachten Gleichungen (59) verwendet. Mit Gleichung (55) wird zunächst die notwendig Längenänderung ΔL für jedes Zurrmittel bestimmt.

$$\Delta L = \frac{(LC - F_T) \cdot L}{D_N} \text{ [m]}$$

Mit der umgestellten Gleichung (59) erhält man das zugehörige ΔX für jedes der betrachteten Zurrmittel.

$$\Delta X = \frac{(LC - F_T) \cdot L^2}{D_N \cdot X} \text{ [m]}$$

Aus den ΔX -Werten wählt man den kleinsten Wert $\Delta X_{\min}$. Die von den übrigen Zurrmitteln aus $\Delta X_{\min}$ zu erwartenden Belastungen F_W erhält man dann mit der Gleichung:

$$F_W = \frac{D_N \cdot X}{L^2} \cdot \Delta X_{\min} + F_T \text{ [daN]} \quad (64)$$

Dieser Rechenprozess wird an einem einfachen Beispiel demonstriert. Eine Ladungseinheit ist gegen Rutschen in Fahrtrichtung mit sechs Direktzurrungen gesichert (Bild 37). Diese Zurrungen setzen sich aus drei Typen zusammen, die sich in ihren Komponenten unterscheiden. Als Zurrmittel werden Gurte gewählt mit zulässiger Belastbarkeit $LC = 1000$ daN und einer nominellen Federkonstanten $D_N = 25000$ daN. Die Berechnung wird mit einem Tabellenprogramm durchgeführt.

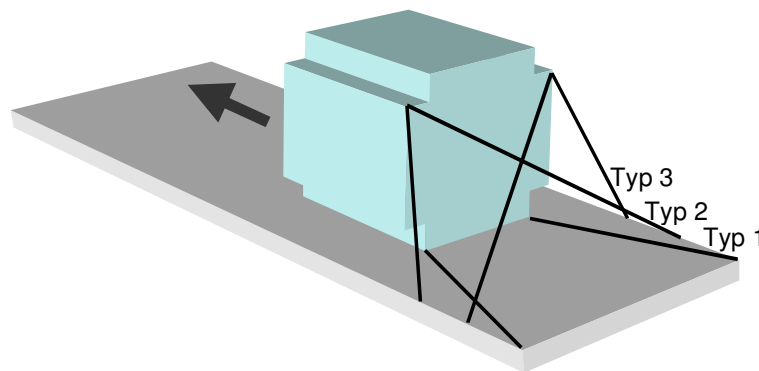


Bild 37: Komplexe Direktzurrung

Die Tabelle in Bild 38 zeigt die Ergebnisse unter der Voraussetzung, dass in allen Gurten die gleiche Vorspannkraft von 400 daN aufgebracht worden ist. Die Laschings vom Typ1 erreichen ihre zulässige Belastung von 1000 daN schon bei einer Längsbewegung der Ladungseinheit von $\Delta X = 0,055$ m. Diese Strecke reicht nur aus, um die Belastung der Laschings des Typs 2 auf 614 daN und derjenigen des Typs 3 auf 697 daN ansteigen zu lassen. Die Sicherungswirkung wird dadurch insgesamt entsprechend eingeschränkt.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Typ	X	Y	Z	L	LC	FT	DX	FW
2		[m]	[m]	[m]	[m]	[daN]	[daN]	[m]	[daN]
3	1	2,100	0,600	0,000	2,184	1000	400	0,055	1000
4	2	1,400	2,100	1,600	2,988	1000	400	0,153	614
5	3	0,700	0,400	1,600	1,792	1000	400	0,110	697
6	DN =	25000					DXmin =	0,055	

Bild 38: Belastungsverteilung bei gleichen Vorspannkraften

Gibt man den Laschings, die als erste die zulässige Belastung erreichen, weniger Vorspannung und den übrigen mehr, so kann die "Ausbeute" an Sicherungswirkung verbessert werden. In Bild 39 ist das geschehen, allerdings mit der unvermeidlichen Folge, dass die Ladungseinheit unter diesen Umständen eine Strecke von $\Delta X = 0,077$ m rutschen muss, um die Laschings des Typs 1 auf ihre zulässige Belastung von 1000 daN zu bringen. Die übrigen Laschings erreichen mit der etwas höheren Vorspannkraft immerhin rund 80% und 92% ihrer Kapazität.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Typ	X	Y	Z	L	LC	FT	DX	FW
2		[m]	[m]	[m]	[m]	[daN]	[daN]	[m]	[daN]
3	1	2,100	0,600	0,000	2,184	1000	150	0,077	1000
4	2	1,400	2,100	1,600	2,988	1000	500	0,128	803
5	3	0,700	0,400	1,600	1,792	1000	500	0,092	921
6	DN =	25000					DXmin =	0,077	

Bild 39: Belastungsverteilung bei angepassten Vorspannkräften

In Befolgung der Rechenschemata in den gebräuchlichen Richtlinien und Normen hätte man allen drei Typen von Laschings die Belastung LC = 1000 daN zugeordnet.

2.4.2 Unterschiedliche Sicherungsmaterialien

Die parallele Verwendung unterschiedlicher Sicherungsmaterialien, z.B. gleichzeitiges Sichern mit Gurten und Ketten, führt wegen der unterschiedlichen Federkonstanten ebenfalls zu Verlust an Sicherungswirkung. Die nachgiebigeren Sicherungsmittel tragen immer weniger als ihre zulässige Belastbarkeit ermöglichen würde, wenn die steiferen Sicherungsmittel bereits die Grenze ihrer Belastbarkeit erreicht haben.

Besonders drastisch wirkt sich dies aus, wenn eine "steife" Blockierung mit nachgiebigen Zurrgurten kombiniert wird. Der klassische Fall ist die Sicherung einer schweren Ladung gegen Rutschen nach vorn unter Einbeziehen der Ladeflächenstirnwand.

Die zulässige Belastung von Stirnwänden wird durch die Norm DIN EN 12642:2007 für Standardaufbauten (Code L) mit 0,4 des Gewichts der Nutzlast, aber maximal 5000 daN, und für verstärkte Aufbauten (Code XL) mit 0,5 des Gewichts der Nutzlast gefordert. Die Norm enthält auch eine Angabe über die bei der Typprüfung maximal zulässige elastische Verformung. Diese ist aber sehr allgemein gehalten und erlaubt es nicht, realistische Annahmen über zu erwartende Verformungen einer Stirnwand bei Ausnutzung ihrer zulässigen Belastung zu treffen.

Wird die Stirnwand nur in ihrem unteren Teil belastet, so reagiert sie "unempfindlicher" und wird sich bei voller Ausnutzung ihrer Kapazität nur im unteren Zentimeterbereich verformen. Bei Belastung über die volle Höhe, die auch einen gewissen Vers Schub der Ladung voraussetzt, dürfte die zulässige Verformung bereits an den Dezimeterbereich herankommen. Diese Verformung kann als Strecke $\Delta X_{\min}$ interpretiert werden und ermöglicht die Abschätzung der Belastung gleichzeitig gesetzter Zurrgurte. Die Gleichung (64) kann für jeden derartigen Gurt oder auch Kette verwendet werden.

$$F_W = \frac{D_N \cdot X}{L^2} \cdot \Delta X_{\min} + F_T \quad [\text{daN}]$$

Beispiel: Die in Bild 40 dargestellte Sicherungsanordnung kombiniert Niederzurrung, Direktzurrung und Blockierung gegen Rutschen nach vorn. Die Blockierung ist mit Sicherheit die steifste Vorkehrung. Weil die Stirnwand des Fahrzeugs ganz unten beansprucht wird, gibt sie wenig nach. Als Schätzwert für die Verschiebestrecke der Ladung, nach der die Stirnwand bei einer Vollbremsung ihre zulässige Belastung erhält, wird unter Einbeziehen sonstiger Nachgiebigkeiten der Wert $\Delta X = 0,020$ m eingesetzt.

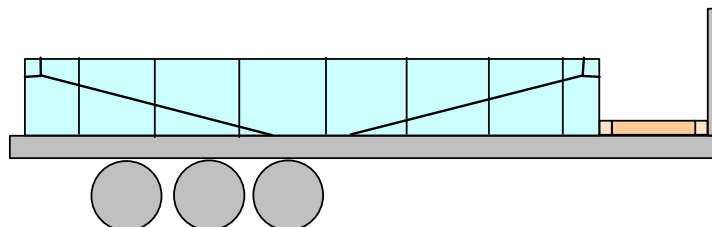


Bild 40: Sicherung in Längsrichtung durch Niederzurrung, Direktzurrung und Blockierung

Mit diesem Schätzwert wird die Wirkung der Längszurrgung untersucht. Deren Daten sind: $X = 3,0$ m, $Y = 0,0$ m, $Z = 1,0$ m, $L = 3,162$ m, $LC = 2500$ daN, $D_N = 62500$ daN, $F_T = 500$ daN. Die genannten Daten gelten auch für die nach hinten gerichtete Direktzurrgung. Für beide Laschings wird mit Gleichung (64) die Kraft F_W berechnet, die sich nach einem Versatz der Ladung von $\Delta X = 0,020$ m nach vorn einstellt.

$$\text{Lasching vorn:} \quad F_{W1} = \frac{D_N \cdot X}{L^2} \cdot \Delta X_{\min} + F_T = \frac{62500 \cdot 3,0}{3,162^2} \cdot 0,02 + 500 = 875 \text{ daN}$$

$$\text{Lasching hinten:} \quad F_{W2} = -\frac{D_N \cdot X}{L^2} \cdot \Delta X_{\min} + F_T = -\frac{62500 \cdot 3,0}{3,162^2} \cdot 0,02 + 500 = 125 \text{ daN}$$

Die Ladungsverschiebung ist so gering, dass die hinten angebrachten Laschings noch nicht kraftlos werden. Die Gesamtsicherungswirkung aller vier Direktzurrgungen im Falle einer Vollbremsung ist in vereinfachter Schreibweise mit dem dynamischen Reibbeiwert $\mu_D = 0,3$:

$$SW = n \cdot F_{W1} \cdot \left(\frac{X}{L} + \mu_D \cdot \frac{Z}{L} \right) + n \cdot F_{W2} \cdot \left(\frac{-X}{L} + \mu_D \cdot \frac{Z}{L} \right) [\text{daN}]$$

$$SW = 1750 \cdot (0,949 + 0,3 \cdot 0,316) + 250 \cdot (-0,949 + 0,3 \cdot 0,316) = 1827 - 214 = 1613 \text{ daN}$$

Die Nichtbeachtung der statischen Unbestimmtheit hätte in blinder Befolgung der gebräuchlichen Richtlinien und Normen den beiden vorn angebrachten Direktlaschings jeweils die zulässige Belastung LC zugeordnet und die hinten angebrachten als lose angenommen. Als Gesamtsicherungswirkung hätte sich dann ergeben:

$$SW = n \cdot LC \cdot \left(\frac{X}{L} + \mu_D \cdot \frac{Z}{L} \right) = 2 \cdot 2500 \cdot (0,949 + 0,3 \cdot 0,316) = 5219 \text{ daN}$$

Der Unterschied ist dramatisch, so dass es sehr angebracht erscheint, auf derartige statisch unbestimmte Sicherungsanordnungen in den Richtlinien und Normen in geeigneter Weise⁹ einzugehen.

⁹ Für die Sicherung nicht-standardisierter Ladung auf Seeschiffen gibt es als Empfehlungswerk den CSS-Code der IMO. Dort wird zur groben Berücksichtigung statischer Unbestimmtheit in gerechneten Bilanzen grundsätzlich nicht die zulässige Belastung MSL (vergleichbar mit LC), sondern ein mit einem Sicherheitsfaktor deutlich verringerter Wert CS verwendet.

3. Verschiedenes

3.1 Wankfaktor

3.1.1 Physikalische Ursachen

Zu den im europäischen Raum noch strittigen Punkten der Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen gehört der sogenannte Wankfaktor. Dieser Rechenwert erscheint als Zuschlag zum Querschleunigungsfaktor 0,5 offenbar als einmalige Besonderheit zuerst in der deutschen Richtlinie VDI 2702 und später auch in der Norm EN 12185-1:2003. Der Zuschlag beträgt dort in beiden Fällen 0,2 und soll nur dann zur Bemessung der Kippsicherung quer zur Fahrtrichtung verwendet werden, wenn die betreffende Ladungseinheit unter der Annahme einer Querschleunigung von 0,7 g nicht aus sich selbst heraus standsicher ist.

Als Begründung für diesen zusätzlichen Faktor wird die *"Berücksichtigung von dynamischen Kippmomenten durch eine stationäre Seitenneigung bzw. durch Winkelbeschleunigungen aus Wankschwingungen des Fahrzeugs um seine Längsachse während einer Kurvenfahrt"* angegeben.

Im Bericht "Ladungssicherung im Straßenverkehr – Wer kennt die Wahrheit?" ist gezeigt worden, dass beim schnellen Einleiten einer stationären Kurvenfahrt und auch bei einem Spurwechsel sowie bei schnellen Ausweichmanövern das Anwachsen der Querschleunigung von Winkelbeschleunigungen aus Schwingungen der Ladefläche um die Längsachse des Fahrzeugs überlagert wird.

Diese Schwingungen können je nach Fahrzeugfederung mit Perioden um 1,5 s und Amplituden um 3° auftreten. Die Winkelbeschleunigungen aus diesen Schwingungen liegen in der Größenordnung von 1 s^{-2} und führen zu Tangentialkräften. Diese werden zusammen mit der Fliehkraft und dem Hangabtrieb aus der geneigten Ladefläche rechnerisch als gemeinsame Trägheitskraft im Schwerpunkt der Ladungseinheit angesetzt. Damit sind die Tangentialkräfte aus den Winkelbeschleunigungen Bestandteil der Querkraft aus der festgelegten Querschleunigung von 0,5 g. Das quasistatische Kippmoment der Ladungseinheit wird aus dieser Querkraft und dem vertikalen Hebel zwischen Ladungsschwerpunkt und Kippachse zusammengesetzt.

Bei diesem üblichen und brauchbaren Denkmodell wird vereinfachend angenommen, dass die Masse der Ladungseinheit in ihrem Schwerpunkt konzentriert ist. Tatsächlich aber hat jede Masse eine räumliche Ausdehnung und reagiert auf Winkelbeschleunigungen mit Rotationsträgheit. Die Rotationsträgheit wiederum führt zu einem zusätzlichen Kippmoment, welches nicht in dem verwendeten Rechenmodell enthalten ist, weil eine punktförmige Masse keine Rotationsträgheit haben kann. Die etwas umständliche Berechnung dieses zusätzlichen Kippmoments wird in den genannten Richtlinien und Normen durch eine pauschale Vergrößerung der angenommenen Querschleunigung ersetzt. Das ist der Hintergrund der oben zitierten Begründung für den Wankfaktor.

Im Bericht "Ladungssicherung im Straßenverkehr – Wer kennt die Wahrheit?" ist mit plausiblen Annahmen vorgerechnet worden, dass dieser Wankfaktor aufgrund der beschriebenen Mechanismen höchstens den Wert 0,1 g haben sollte. Tatsächlich ist auch dieser Wert nur mit einer Ladungseinheit zu erreichen, die mit der straßenverkehrsmäßig zulässigen Höhe und Breite im Grenzbereich liegt, also eine große Rotationsträgheit besitzt.

Nicht geklärt ist, warum die Väter des Wankfaktors den recht großen Wert 0,2 g gewählt haben. Aufzeichnungen oder Beratungsprotokolle existieren nicht oder sind nicht zugänglich. Eine Vermutung lautet, dass Nutzfahrzeuge in der Vergangenheit andere Fahrgestellfedern hatten, deren Dämpfungseigenschaften im Vergleich zu heutigen Nutzfahrzeugen schlechter waren, so dass mit deutlich stärkeren Wankschwingungen gerechnet wurde. Es besteht auch die Möglichkeit, dass mit einem größeren Wankfaktor, als es das zusätzliche

Kippmoment aus der Rotationsträgheit erfordert hätte, das oben mehrfach beschriebene Ankippen von Ladungseinheiten und die damit verbundenen dynamischen Effekte begrenzt werden sollten.

3.1.2 Akzeptanzprobleme

Während in der Fassung der Norm DIN EN 12195-1:2004 dieser Wankfaktor noch mit 0,2 g festgelegt worden war, ist er in der geänderten Fassung DIN EN 12195-1:2011 aufgrund von weiteren unabhängigen Expertenschätzungen auf 0,1 g verringert worden. Allerdings wurde in der Norm die Verwendung des Wankfaktors an Bedingungen geknüpft, die nahezu einer faktischen "Abschaffung" gleichkommen. Diese Bedingungen lauten für den Querbeschleunigungskoeffizienten c_y :

Kippsicherung durch Niederzurrung: $c_y = 0,5$ mit $F_T = S_{TF}$

oder: $c_y = 0,6$ mit $F_T = 0,5 \cdot LC$

Kippsicherung durch Direktzurrung: $c_y = 0,6$ mit $F_R = LC$

Die Mehrzahl der Ladungssicherungsanordnungen im Straßenverkehr sind Niederzurrungen, von denen allerdings nur ein kleiner Teil der Kippsicherung dient. Die erreichbare Vorspannkraft dürfte in nahezu allen solchen Fällen gleich S_{TF} sein, so dass mit $c_y = 0,5$ gerechnet werden darf, also ohne Wankfaktor.

Nicht unerwähnt soll bleiben, dass in der gleichen Norm das Kriterium zur Feststellung der Kippsicherheit falsch formuliert ist. Es heißt dort als Nachweis der Kippsicherheit:

$$b_y > \frac{c_y}{c_z} \cdot d \quad [m] \quad (65)$$

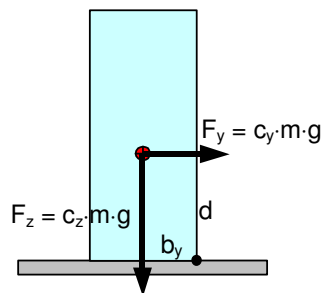


Bild 41: Kippsicherheit durch Eigenstandfestigkeit

Es soll verwendet werden: $c_y = 0,5$ und $c_z = 1$. Damit wäre nach der Norm eine Ladungseinheit mit beispielsweise $b_y = 0,55 \cdot d$ noch kippsicher. Sie könnte also normgerecht ausschließlich durch Blockieren in ihrer unteren Standebene gegen Rutschen gesichert werden.

Tatsächlich aber ist die Rotationsträgheit eines Körpers ständig vorhanden. Sie tritt nicht erst auf, wenn Kippgefährdung da ist, wie der Anwendungshinweis des Wankfaktors möglicherweise suggeriert. Folglich muss die Eigenstandfestigkeit mit dem pauschalen Kippmoment von $0,6 \cdot m \cdot g \cdot d$ geprüft werden. Mit einem Standfestigkeitshebel von $b = 0,55 \cdot d$ beträgt das Eigenstandmoment aber nur $0,55 \cdot m \cdot g \cdot d$. Es wäre also nicht in der Lage, Kippen allein zu verhindern. Das Prüfkriterium sollte entsprechend geändert werden.

Bei einem sehr schnell eingeleiteten Bremsmanöver oder einem scharfen Anfahren gibt es auch vergleichbare Schwingungen der Ladefläche um die Querachse. Diese Schwingungen werden Nickschwingungen genannt. Ihre Amplituden sind zwar kleiner als die von Wankschwingungen. Dafür sind ihre Perioden kürzer, so dass Winkelbeschleunigungen in gleicher Größenordnung wie bei den Wankschwingungen nicht ausgeschlossen werden können. Hierüber sind jedoch Untersuchungen nicht bekannt und keine der bestehenden deutschen Richtlinien oder Normen wendet einen "Nickfaktor" an.

Da der Wankfaktor weder im europäischen Ausland noch anderswo in der Welt bekannt war, wurde seine Übernahme in die Norm EN 12195-1 im Jahre 2003 von etlichen Delegationen, insbesondere von Schweden, kritisch beurteilt. Im Rahmen der bereits in Kapitel 1.5.2 erwähnten praktischen Versuche im Jahre 2004 in Schweden wurde folglich auch untersucht, ob der Wankfaktor berechtigt sei.

Die Versuche mit einem voll beladenen Lastkraftwagen waren allerdings nicht zielführend, da Ladungseinheiten mit relativ kleinen Abmessungen (Stapel von jeweils zwei Papierrollen mit Gesamthöhe = 2,27 m und 1,0 m Durchmesser) als Prüfobjekte verwendet wurden. Es wurde auch nicht gezielt nach dem Effekt der Rotationsträgheit, gepaart mit Winkelbeschleunigungen gesucht. Die Kurvenfahrten wurden extrem behutsam eingeleitet mit Erreichen der vollen Querbeschleunigung erst nach ca. 15 Sekunden, so dass überlagerte Wankschwingungen nicht entstehen konnten. Statt dessen wurden Niederzurrungen mit unterschiedlichen Vorspannkräften geprüft mit Ergebnissen, die geeignet sind, die zusätzlichen Sicherungswirkungen von Niederzurrungen zu bestätigen und einige Annahmen der damals gerade herausgegebenen Norm EN 12195-1:2003 zu widerlegen.

Die für den Wankfaktor halbwegs relevanten Resultate der betreffenden Fahrversuche waren, dass bei gemessenen Querbeschleunigungen von deutlich unter 0,5 g bereits das zusätzliche Stützrad des Fahrzeugs Bodenkontakt hatte. Daraus wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass die allseits gebräuchliche Annahme von 0,5 g Querbeschleunigung erhebliche Reserven in der Ladungssicherung schafft, da dieser Wert in der Praxis kaum auftreten werde. Eher würde das Fahrzeug umkippen.

Überraschend taucht im Jahre 2011 in dem bereits in Kapitel 1.3.4 erwähnten Positionspapier der CEFIC zur Norm EN 12195-1:2010 eine Stellungnahme zum Wankfaktor und seiner tatsächlichen Herkunft als Kompensation eines Rotationsträgheitsmoments auf. Es wird aber im gleichen Atemzug abgestritten, dass es im Fahrbetrieb eines Nutzfahrzeugs Winkelbeschleunigungen ausreichender Größe gebe, die zeitgleich mit sonstigen Querbeschleunigungen aufträten und so die Anwendung eines Wankfaktors berechtigten. Eine Bezugnahme auf irgendwelche Plausibilitätsüberlegungen, Berechnungen oder Messungen fehlt jedoch bei CEFIC.

Diese Unsicherheit im Umgang mit der unbestreitbar vorhandenen Rotationsträgheit von Ladungseinheiten setzt sich zur Zeit fort. Im Entwurf einer Neufassung der deutschen Richtlinie VDI 2700 Blatt 2 ist der Wankfaktor mit 0,1 g in Form eines Standsicherheitsbeiwerts enthalten wie schon in der Norm DIN EN 12195-1:2011, aber nicht nur für die Kippsicherung zur Seite, sondern auch nach hinten, jedoch nicht nach vorn. Die einschränkenden Bedingungen der Norm DIN EN 12195-1:2011 fehlen. Dieser Faktor soll also bei Niederzurrung und bei Direktzurrung gleichermaßen angewendet werden.

In den internationalen Beratungen zur Neufassung der CTU-Packrichtlinie in einen internationalen Code¹⁰ stieß der Wankfaktor auf Ablehnung, ein wenig auch gestützt auf die schwedischen Versuchsergebnisse und die tatsächliche oder vermeintliche Reserve, welche die Annahme von 0,5 g Querbeschleunigung enthält. Der "deutsche Wankfaktor", was immer auch seine tiefere Bedeutung sein möge, werde von diesen Reserven abgedeckt.

Diese vermeintliche oder tatsächliche Reserve gibt Anlass zu betriebswirtschaftlichen Überlegungen. Wenn die erreichbare Querbeschleunigung im realen Fahrbetrieb tatsächlich um diese unterstellte Reserve geringer wäre, so hätte man derzeit die Mehrzahl aller kippsicheren und vorschriftsmäßig niedergezurrten Ladungen um 50 bis 100% "überlascht". Das folgt aus der in Kapitel 1.2 beschriebenen starken Nichtlinearität des Verhältnisses zwischen Reibbeiwert und notwendiger Anzahl von Niederzurrungen, wie ein kurzes Beispiel zeigt.

Beispiel: Ladung mit dem Gesamtgewicht von 8700 daN wird gegen Verrutschen in Querrichtung mit Gurten niedergezurrt. Reibbeiwert $\mu = 0,3$. Vorspannkraft $F_T = 400$ daN, Zurrwinkel $\alpha = 90^\circ$. Die erforderliche Anzahl n der Gurte ist nach DIN EN 12195-1:2011:

¹⁰ Code of Practice for Packing of Cargo Transport Units (CTUs)

$$n = \frac{(c_y - \mu \cdot c_z) \cdot m \cdot g}{2 \cdot \mu \cdot \sin \alpha \cdot F_T} \cdot f_s = \frac{(0,5 - 0,3) \cdot 8700}{2 \cdot 0,3 \cdot 1 \cdot 400} \cdot 1,1 = 7,975 = 8$$

Bei einer angenommenen Querbesehleunigung von 0,4 g, also ohne die unterstellte Reserve, hätte man in der gleichen Situation nur die Hälfte der Gurte benötigt. Der "unnötige" Sicherungsmehraufwand hätte damit 100% betragen.

$$n = \frac{(c_y - \mu \cdot c_z) \cdot m \cdot g}{2 \cdot \mu \cdot \sin \alpha \cdot F_T} \cdot f_s = \frac{(0,4 - 0,3) \cdot 8700}{2 \cdot 0,3 \cdot 1 \cdot 400} \cdot 1,1 = 3,988 = 4$$

Diese Überlegung sollte Anlass sein, langfristig verlässlichere Besehleunigungsannahmen zu finden und zur Verfügung zu stellen. Solche Werte sollten auch vom Fahrzeugtyp, seiner Federung und sonstigen relevanten Eigenschaften abhängig gemacht werden.

Solange das nicht geschehen ist, bleibt der Wert von 0,5 g unangetastet auch für die reine Gleitsicherung. Die zusätzlichen Risiken für nicht eigenstandsichere Einheiten aus deren Rotationsträgheit sollten, auch ohne Veranlassung durch eine Norm oder einen Code, im Eigeninteresse aller Beteiligten durch zusätzliche Sicherungsmaßnahmen aufgefangen werden, und das umso mehr, je höher und breiter, also rotationsträger die Ladungseinheit ist.

3.2 Kipp-Versuch

Die Norm DIN EN 12195-1:2011 enthält in Anhang D die Beschreibung von "Praktischen Prüfungen zur Bestimmung der Wirksamkeit von Ladungssicherungsmaßnahmen". Diese Prüfungen können als Alternative zu den vorgeschlagenen Berechnungen durchgeführt werden und bieten sich vor allem für solche Ladungssicherungsanordnungen an, die sich aufgrund ihrer Komplexität einer einfachen deterministischen Berechnung entziehen. Typische Anwendungen sind die Sicherung von Ladungen auf Paletten mit Hilfe von Schrumpffolien oder die Sicherung mit Hilfe von Kunststoffnetzen. Es stehen zwei Methoden zur Auswahl: Dynamische Fahrprüfungen nach EN 12642:2006 oder eine Neigungsprüfung¹¹ mit näherer Beschreibung im Anhang D der DIN EN 12195-1:2011.

Es wird im nationalen Vorwort der DIN EN 12195-1:2011 beanstandet, dass der statische Kippversuch (= Neigungsprüfung) dynamische Einflüsse nicht enthalte. Diese Kritik soll zum Ausdruck bringen, dass Sicherungsanordnungen, die den statischen Kippversuch überstehen, in einer dynamischen Fahrprüfung versagen könnten. Außerdem trifft den statischen Kippversuch auch die Kritik an der Verwendung des "mittleren" Reibbeiwerts μ für Niederzurrung und Blockierung anstelle eines ausgesprochenen Gleitreibbeiwerts μ_D in der Vorläuferversion dieser Norm von 2004.

3.2.1 Gleichwertigkeit mit Rechenmodellen

Beide praktische Prüfungsformen sollen die rechnerische Prüfung nach dem vereinfachten Rechenmodell ersetzen können und sollten daher mit diesem Modell, aber auch untereinander gleichwertig sein. Diese Gleichwertigkeit ist auf Anhieb und ohne gründliche Langzeituntersuchungen kaum zu erwarten. Nachstehend werden einige Ausführungen gemacht, deren Ziel nicht die Antwort auf offene Fragen sein kann, sondern nur der Versuch, diese Fragen zu präzisieren. Dabei steht wieder die Niederzurrung im Zentrum der Betrachtung.

Das vereinfachte Rechenmodell nach DIN EN 12195-1:2011 geht von einer stationären Horizontalbesehleunigung aus und belässt die Schwerkraft auf 1 g für den Straßenverkehr. Die Sicherungswirkung der Niederzurrung wird auf die Reibungserhöhung durch die Vertikal-komponenten der beidseitigen Vorspannkräfte S_{TF} beschränkt, wobei diese durch einen Sicherheitsfaktor verringert werden. Als Reibbeiwert wird der mittlere Wert μ verwendet.

¹¹ Die Bezeichnung "Neigungsprüfung" erscheint in der DIN EN 12195-1:2011 sowohl in Anhang B zur Beschreibung eines Versuchs zur Bestimmung des Reibbeiwerts als auch in Anhang D zur Beschreibung eines Versuchs zur Bestimmung der Wirksamkeit von Ladungssicherungsmaßnahmen. Diese Doppeldeutigkeit ist irreführend.

Der statische Kippversuch gleicht hinsichtlich der stationären vertikalen und horizontalen Beschleunigungen exakt dem vereinfachten Rechenmodell. Das setzt allerdings voraus, dass der für die Festlegung der Versuchsneigung verwendete mittlere Reibbeiwert dem tatsächlichen Haftreibbeiwert entspricht. Das aber ist per Definition nicht der Fall, da der zu verwendende mittlere Reibbeiwert nur 0,925 des Haftreibbeiwerts ist. Aus dieser Abweichung folgt, dass die Versuchsneigung größer festgesetzt wird, als sie mit dem tatsächlichen Haftreibbeiwert zu sein brauchte. Dadurch erhält der statische Kippversuch eine kleine Sicherheitsreserve. Diese Reserve wird aber in aller Regel dadurch aufgebraucht und sogar ins Gegenteil verkehrt, dass die sich tatsächlich auswirkende größere Reibung den Versuch mit einer geringeren Sicherungswirkung erfolgreich erscheinen lässt, als sie das Rechenmodell mit der kleineren Reibung fordert. Der Erfolg des Kippversuchs ist gegeben, wenn die untersuchte Ladungseinheit unter der Prüflage "ihre Position beibehält und sich nur eingeschränkt bewegt", so die Norm DIN EN 12195-1:2011.

Dieser etwas schwer zu durchschauende Sachverhalt wird an einem Beispiel erläutert. Die nach dem Rechenmodell erforderliche Sicherungswirkung SW einer Niederzurrung oder vergleichbaren Sicherungsanordnung ergibt sich als Differenz von Trägheitskraft und Gewichtskraft mit dem mittleren Rechen-Reibbeiwert μ . Der tatsächliche Haftreibbeiwert sei in diesem Beispiel $\mu_s = 0,4$. Der mittlere Reibbeiwert ergibt sich zu $\mu = 0,925 \cdot 0,4 = 0,37$. Das Ladungsgewicht sei 1000 daN. Gesucht wird die Sicherungswirkung gegen Rutschen nach vorn mit der Bremsverzögerung von 0,8 g.

Rechnerisch erforderliche Sicherungswirkung: $SW = (0,8 - 0,37) \cdot 1000 = 430 \text{ daN}$

Für den Kippversuch ergibt sich mit $\mu = 0,37$ ein Winkel $\varphi = 44,1^\circ$. Der Versuch ist erfolgreich ohne Rutschen der Ladung. Weil aber statt des mittleren Reibbeiwerts $\mu = 0,37$ der tatsächliche Wert von 0,4 wirkt, reicht eine kleinere Sicherungswirkung als die berechnete aus.

Im Versuch ausreichende Sicherungswirkung: $SW = (0,8 - 0,40) \cdot 1000 = 400 \text{ daN}$

Damit gibt sich der Kippversuch mit weniger Sicherungswirkung zufrieden, als das Rechenmodell fordert. Diese Schwäche des Kippversuchs wird ein wenig dadurch ausgeglichen, dass er die Sicherungswirkung selbst etwas näher an der Realität abbildet, also kleine, zulässige Bewegungen und Verformungen der Ladung berücksichtigt, wozu auch der vorübergehende Abfall des Reibbeiwerts hin zum Gleitreibbeiwert gehören kann. Nicht erfasst werden allerdings die bei einer realen Vollbremsung auftretenden dynamischen Vorgänge, die sich vor allem in Schwankungen des scheinbaren Gewichts durch Vertikalbeschleunigungen äußern.

Dynamische Fahrprüfungen bilden das Rechenmodell nur selten genau ab. Die Horizontalbeschleunigung kann größer oder kleiner als der Prüfwert ausfallen und weist überlagerte Schwankungen auf. Schwankungen der Vertikalkraft führen zu Schwankungen in der Reibung. Aber auch hier kommt zunächst der höhere tatsächliche Haftreibbeiwert und nicht der im Rechenmodell geforderte mittlere Reibbeiwert zur Geltung. Allerdings besteht der beobachtete Trend zu ausgeprägter Ladungsbewegung und damit zum geringeren Gleitreibbeiwert. Die Sicherungswirkung der Niederzurrung wird absolut realistisch erfasst.

Aus dem Blickwinkel der wirklichen Verhältnisse müsste natürlich erwartet werden, dass das Rechenmodell die dynamischen Fahrprüfungen abbildet und nicht umgekehrt. Aber Fragen der Abbildung komplexer Vorgänge durch vereinfachte Rechenmodelle sind nicht nur technisch-physikalischer Natur, sondern müssen unter Berücksichtigung der volkswirtschaftlich vertretbaren Risikoakzeptanz beantwortet werden.

3.2.2 Praktikabilität

Beurteilt man den kritisierten Kippversuch unabhängig von seiner Gleichwertigkeit zum Rechenmodell der Norm, so erweist sie sich als recht praktikabel. Mit einer geeigneten Versuchsanordnung (z.B. Kiplaster) wird zunächst die Neigungsprüfung mit der ungesicherten Ladung nach B.1.2 der Norm DIN EN 12195-1:2011 durchgeführt und der Reibbeiwert mit μ

= $0,925 \cdot \tan \alpha$ bestimmt. Aus diesem Reibbeiwert μ und den transportrelevanten Beschleunigungsbeiwerten $c_{x,y}$ und c_z wird der Neigungswinkel ϕ der eigentlichen Neigungsprüfung berechnet. Dann wird die Ladung gesichert und mit derselben Versuchsanordnung dieser Neigung ϕ ausgesetzt und festgestellt, ob die Ladung in Position bleibt.

Rutscht die Ladung nicht, so ist die Sicherungswirkung offensichtlich ausreichend. Rutscht sie, so muss der Versuch mit einer verbesserten Ladungssicherung wiederholt werden. Mit geeigneten Vorsichtsmaßnahmen kann dieser Neigungsversuch ohne Gefahr von Ladungsbeschädigung mehrfach wiederholt werden. Auch die evtl. vorzunehmenden Verbesserungen an der Sicherung können durch gefahrlose Beobachtung des Ladungsverhaltens während des Versuchs leicht bestimmt werden. Das ist mit einer Fahrprüfung kaum zu leisten.

3.2.3 Erweiterung für beliebige Vertikalbeschleunigungen

Der Anhang D der Norm DIN EN 12195-1:2011 weist noch einen kleinen Mangel auf. Der Anwendungsbereich der Norm schließt den Seeverkehr und den Schienenverkehr mit ein. Dort kann der Beschleunigungsbeiwert c_z kleiner als 1 sein. Die angegebene Tabelle D.1 und auch das Bild D.3 liefern jedoch die Prüfwinkel ϕ nur für den vertikalen Beschleunigungsbeiwert $c_z = 1$, also nur für den Straßenverkehr. Die nachstehende Gleichung liefert den Wert von $\sin \phi$ als Funktion von $c_{x,y}$, c_z und γ für alle genannten Verkehrsbereiche. Der Parameter γ steht hier für den einzusetzenden Reibbeiwert oder das Verhältnis von Standhebel zu Kipphebel, wenn der Versuch zum Nachweis der Kippsicherheit verwendet werden soll.

$$\sin \phi = \frac{c_{x,y} - \gamma \cdot c_z + \gamma \cdot \sqrt{1 + \gamma^2 - (c_{x,y} - \gamma \cdot c_z)^2}}{1 + \gamma^2} \quad (66)$$

Um Gleichung (66) mit größerer Rechensicherheit zu lösen, wird eine Substitution vorgenommen. Sie lautet:

$$r = c_{x,y} - \gamma \cdot c_z$$

Der Wert von r ist zu berechnen und dann in folgende, einfachere Gleichung einzusetzen:

$$\sin \phi = \frac{r + \gamma \cdot \sqrt{1 + \gamma^2 - r^2}}{1 + \gamma^2} \quad (67)$$

Die Lösung der Gleichung (67) kann mit Hilfe einer Tabelle überprüft werden. Die Tabelle zeigt den Winkel ϕ mit den Eingängen r und γ .

	r										
γ	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0
0,00	90,0	64,2	53,1	44,4	36,9	30,0	23,6	17,5	11,5	5,7	0,0
0,05	90,0	66,9	55,9	47,2	39,7	32,8	26,4	20,3	14,4	8,6	2,9
0,10	90,0	69,3	58,5	49,9	42,4	35,5	29,2	23,1	17,2	11,4	5,7
0,15	90,0	71,4	60,8	52,3	44,9	38,2	31,8	25,8	19,9	14,2	8,5
0,20	90,0	73,3	63,0	54,7	47,3	40,7	34,4	28,4	22,6	16,9	11,3
0,25	90,0	74,9	64,9	56,8	49,6	43,1	36,9	31,0	25,2	19,6	14,0
0,30	90,0	76,2	66,7	58,8	51,8	45,3	39,2	33,4	27,7	22,2	16,7
0,35	90,0	77,4	68,3	60,6	53,8	47,4	41,5	35,7	30,2	24,7	19,3
0,40	90,0	78,5	69,8	62,3	55,7	49,5	43,6	38,0	32,5	27,1	21,8
0,45	90,0	79,4	71,1	63,9	57,4	51,4	45,6	40,1	34,7	29,5	24,2
0,50	90,0	80,2	72,3	65,3	59,0	53,1	47,5	42,1	36,9	31,7	26,6
0,55	90,0	80,9	73,3	66,6	60,5	54,8	49,3	44,1	38,9	33,8	28,8
0,60	90,0	81,5	74,3	67,9	61,9	56,4	51,0	45,9	40,8	35,9	31,0
0,65	90,0	82,0	75,1	69,0	63,2	57,8	52,6	47,6	42,7	37,8	33,0
0,70	90,0	82,5	75,9	70,0	64,4	59,2	54,1	49,2	44,4	39,7	35,0
0,75	90,0	82,9	76,7	70,9	65,6	60,4	55,5	50,8	46,1	41,5	36,9
0,80	90,0	83,3	77,3	71,8	66,6	61,6	56,9	52,2	47,6	43,1	38,7

4. Zusammenfassung

Die vorliegende Abhandlung befasst sich in erster Linie mit der Beurteilung von Niederzurrung und Direktsicherung von Ladung auf Straßenfahrzeugen. Für diese Beurteilung werden in der Praxis stark vereinfachte Rechenmodelle verwendet. Diese dienen dem befördernden Verkehrsteilnehmer dazu, den notwendigen Sicherungsaufwand zu bestimmen, und ermöglichen außerdem der Polizei eine Kontrolle mit nötigenfalls gerichtsfester Beurteilung. Ein vereinfachtes Rechenmodell für die Beurteilung einer Ladungssicherungsmaßnahme sollte sich neben der einfachen Handhabung vor allem dadurch auszeichnen, dass es trotz der Außerachtlassung der weniger bedeutsamen Nebeneffekte ein realistisches Abbild der tatsächlichen Gesamtsicherungswirkung liefert.

Die bestehenden Unterschiede in den Rechenmodellen zur Niederzurrung in der Richtlinie VDI 2700, Blatt 2 sowie der Norm DIN EN 12195-1:2004 zu den Modellen der Norm DIN EN 12195-1:2011 sind erst im vergangenen Jahrzehnt entstanden. Die Unterschiede beruhen auf uneinheitlicher Vereinfachung der Rechenmodelle. Insbesondere stellt die inzwischen eigentlich überholte DIN EN 12195-1:2004 den sogenannten k-Faktor für den Übertragungsverlust an Vorspannkraft bei einseitigem Spannmittel in Rechnung, was anforderungsgemäß zu einem 33%igen Mehraufwand an Sicherung führt.

Die Rechenmodelle von Niederzurrungen sind in der Abhandlung eingehend dargestellt und mit der tatsächlichen, komplexen Sicherungswirkung verglichen worden. Ebenso wurden einige wichtige Aspekte der Beurteilung von Direktsicherungen untersucht. Die Ergebnisse lauten zusammengefasst:

1. Die üblichen Rechenmodelle für die Ermittlung der notwendigen Anzahl von Niederzurrungen vernachlässigen direktsichernde Nebenwirkungen der Niederzurrung und liefern deshalb vor allem bei kleinen Reibbeiwerten bzw. bei kleinen Standhebeln kippgefährdeter Einheiten überhöhte Ergebnisse. Das bedeutet, der Sicherungsaufwand erhöht sich bei kleinen Reibbeiwerten bzw. bei kleinen Standhebeln scheinbar überproportional, was der Realität nicht ganz entspricht.
2. Die rechnerische Berücksichtigung des Übertragungsverlusts an Vorspannkraft bei einseitigem Spannmittel in einer Niederzurrung durch den k-Faktor von 1,5 wurde mit der Einführung der Norm DIN EN 12195-1:2004 in Deutschland weitgehend akzeptiert, ohne dass ein anerkannter Nachweis für die Untauglichkeit des bis dahin gültigen Rechenmodells der Richtlinie VDI 2700, Blatt 2 vorgelegen hätte, welches keinen k-Faktor hatte.
3. Der Umgang mit dem neu eingeführten k-Faktor in der Norm DIN EN 12195-1:2004 war einerseits inkonsequent, weil die durch den k-Faktor zugänglich gemachten Querkomponenten bei der Rutschbilanz nicht beachtet wurden, wohl aber bei der Kippbilanz. Dort aber wurden sie physikalisch unsinnig ausgewertet, was zu völlig unrealistischen Ergebnissen führte. Die Ursache der Fehlbewertung lag in der Außerachtlassung von Ladungsbewegungen bei niedergezurten Ladungen, während derartige Bewegungen bei direkt gesicherten Ladungen in den üblichen Rechenmodellen stets vorausgesetzt werden.
4. Die Einführung der genormten Vorspannkraft S_{TF} und ihre Feststellung durch Prototypprüfung nach der Norm DIN EN 12195-2:2001 hat zu der Spekulation Anlass gegeben, dass das Einrasten der Spannratsche in den zurückliegenden Zahn der Wickelwelle den Übertragungsverlust in der auf S_{TF} bezogenen Gesamtvorspannkraft wieder ausgleicht. Die vorliegende Abhandlung zeigt jedoch, dass dieser Ausgleich nicht stattfindet, sondern der k-Faktor im Regelfall nur geringfügig angehoben wird.
5. Bei einer Direktsicherung führen kleine Ladungsbewegungen oder Ladungsverformungen dazu, dass die anfängliche Vorspannkraft auf der belasteten Seite ansteigt und rechnerisch die zulässige Belastbarkeit LC des betreffenden Zurrmittels in Ansatz gebracht werden kann. Bei einer Niederzurrung steigt die Vorspannkraft auf der belasteten Seite hingegen nur soweit an, wie es das Euler'sche Verhältnis zur gleichzeitig abneh-

menden Gurtkraft auf der Gegenseite erlaubt. Es ergibt sich jedoch in jedem Fall eine für die Sicherung günstige Konfiguration von Horizontalkomponenten.

6. Die tatsächliche Sicherungswirkung einer Niederzurrung gegen Kräfte in Querrichtung und gegen Kräfte in Längsrichtung zum Fahrzeug ist im Bereich aller Zurrwinkel größer als die Sicherungswirkung nach den Rechenmodellen der derzeit gültigen Norm DIN EN 12195-1:2011 und weitgehend auch größer als die Sicherungswirkung nach dem Rechenmodell der Richtlinie VDI 2700, Blatt 2. Außerdem ist die in allen bisherigen Rechenmodellen unterlegte Abhängigkeit der Sicherungswirkung von Sinus des Zurrwinkels unzutreffend. Das tatsächliche Maximum der Sicherungswirkungen liegt bei Zurrwinkeln zwischen 60° und 70° und nicht bei 90°.
7. Die tatsächliche Sicherungswirkung einer Niederzurrung gegen Momente in Querrichtung zum Fahrzeug ist im Bereich aller Zurrwinkel größer als die Sicherungswirkung nach den Rechenmodellen der derzeit gültigen Norm DIN EN 12195-1:2011 und auch der Richtlinie VDI 2700, Blatt 2. Auch hier ist die unterstellte Einflussnahme des Sinus des Zurrwinkels überflüssig.
8. Die tatsächliche Sicherungswirkung einer Niederzurrung gegen Momente in Längsrichtung zum Fahrzeug ist im Bereich aller Zurrwinkel größer als die Sicherungswirkung nach den Rechenmodellen der derzeit gültigen Norm DIN EN 12195-1:2011 und auch der Richtlinie VDI 2700, Blatt 2, wenn ein geringfügiges Ankippen der Ladungseinheit zugelassen wird. Da eine quergeführte Niederzurrung beim Ankippen in Längsrichtung im Grunde direkt sichernd wirkt, besteht die Versuchung, als sichernde Kraft die zulässige Belastung LC einzusetzen. Davon wird dringend abgeraten, weil sich diese große Kraft erst nach einem erheblichen Ankippen einstellt. Im übrigen ist auch hier die unterstellte Einflussnahme des Sinus des Zurrwinkels überflüssig.
9. Bei einer Niederzurrung sollte generell der Reibbeiwert zwischen Gurt und Ladung möglichst klein sein, also 0,2 oder weniger. Das lässt sich durch glatte, gerundete Kantenbleche oder entsprechende gleitfähige Materialien erreichen. Eine Ausnahme von dieser Regel stellt die Kippsicherung von kippgefährdeten Ladungseinheiten in Querrichtung dar, wo ein großer Reibbeiwert zwischen Gurt und Ladung günstiger ist.
10. Im Hinblick auf die in Deutschland bestehende Diskussion um den angeblichen Sicherheitsverlust, der durch die Einführung der Norm DIN EN 12195-1:2011 entstanden sein soll, ist festzustellen: Die neue Fassung DIN EN 12195-1:2011 stellt höhere Ansprüche an eine Niederzurrung als die noch immer parallel angewandte Richtlinie VDI 2700, Blatt 2. Da diese Richtlinie aber immer noch als bewährte "Regel der Technik" anerkannt wird, sind die Argumente gegen die Norm DIN EN 12195-1:2011 nicht konsistent.
11. Die Rechenmodelle der Vorläufernorm DIN EN 12195-1:2004 für sichernde Quer- und Längskräfte sind um 17,5% strenger als die der DIN EN 12195-1:2011. Für Kippbeanspruchung in Querrichtung können die Abweichungen bei mehreren 100% liegen. Abgesehen von diesen auf einem Modellierungsfehler beruhenden Abweichungen ist der beklagte Sicherheitsverlust nur etwa halb so groß wie der wenige Jahre zuvor durch den k-Faktor eingeführte Sicherheitszuwachs. Die DIN EN 12195-1:2011 enthält also einen Sicherheitsgewinn gegenüber der Richtlinie VDI 2700, Blatt 2.
12. Obwohl die Instrumente der DIN EN 12195-1:2011 nach der Feststellung unter Punkt 10 und 11 akzeptabel erscheinen, bedeutet das nicht, dass diese Norm nicht korrekturbedürftig und verbesserungsfähig ist. Vorschläge zur Verbesserung sind jedoch nicht das Hauptanliegen dieser Abhandlung.
13. In den vereinfachten Rechenmodellen zur Bewertung einer Niederzurrung gegen Rutschen spielt der anzusetzende Reibbeiwert zwischen Ladefläche und Ladung eine herausragende Rolle, wie schon oben unter Punkt 1 festgestellt worden ist. Nach Abwägung der derzeit herrschenden unterschiedlichen Auffassungen kann der Vorschlag der Norm DIN EN 12195-1:2011 zur Verwendung eines mittleren Wertes zwischen Haftreibbeiwert und Gleitreibbeiwert unterstützt werden.

14. Direktzurrkräfte werden in die üblichen Rechenmodelle mit der zulässigen Belastung LC des Zurrmittels eingesetzt. Die zum Erreichen dieser Kraft im Zurrmittel notwendige Ladungsbewegung in Richtung der äußeren Kraft kann und sollte minimiert werden. Das lässt sich erreichen durch Ausrichtung des Zurrmittels so nahe wie möglich in die Richtung der äußeren Kraft, durch eine hohe Vorspannkraft im Zurrmittel, die allerdings 40% bis 50% des Wertes von LC nicht überschreiten darf, und durch Wahl eines Zurrmittels mit großer Federkonstante.
15. Die üblichen Rechenmodelle zur Beurteilung einer Direktsicherung berücksichtigen nicht die notwendige und stets vorhandene Ladungsbewegung. Dadurch weichen die Ergebnisse der Rechenmodelle von denen der genaueren Berechnung ab. Die Abweichungen liegen für Rutschbilanzen auf der "sicheren Seite", für Kippbilanzen hingegen auf der "unsicheren Seite". Sie sind aber insgesamt tolerierbar.
16. Werden zwei oder mehr direkt und gleichsinnig wirkende Ladungssicherungsmittel mit unterschiedlichen Winkeln, unterschiedlichen Längen und/oder unterschiedlichen Federkonstanten mit den üblichen, vereinfachten Rechenmodellen beurteilt, so werden alle Mittel mit ihrem LC in eine Kräfte- oder Momentenbilanz eingesetzt. Diese Vorgehensweise ist falsch. Wenn das Sicherungsmittel mit der günstigsten Wirkrichtung, der kleinsten Länge und/oder der größten Federkonstanten seine zulässige Belastung LC erreicht, sind die übrigen von ihrem LC noch mehr oder weniger weit entfernt. Die Sicherungsanordnung ist daher unzureichend oder es wird eine Überlastung des erstgenannten, "steifsten" Sicherungsmittels in Kauf genommen. Diesem Umstand sollte in den Richtlinien und Normen in geeigneter Weise durch Abhilfe Rechnung getragen werden.
17. Der von der deutschen Richtlinie VDI 2702 eingeführte, sogenannte Wankfaktor zur Berücksichtigung des durch Rotationsbeschleunigungen der Ladefläche und Rotationsträgheit der Ladung entstehenden zusätzlichen Kippmoments ist im Zuge der Beratungen zur Norm DIN EN 12195-1:2011 möglicherweise das Opfer von Missverständnissen geworden. Die Reduzierung von 0,2 g auf 0,1 g scheint berechtigt zu sein. Jedoch ist das Anwendungskriterium zur Feststellung der Kippgefahr fehlerhaft formuliert und die unterstellte Abhängigkeit der Anwendung des Wankfaktors von der Vorspannkraft ist physikalisch nicht begründbar.
18. Der statische Kippversuch zur Feststellung der Angemessenheit von Sicherungsanordnungen, die sich einer Prüfung mit den vereinfachten Rechenmodellen entziehen, ist den vereinfachten Rechenmodellen nicht völlig gleichwertig. Die vorgeschriebene Verwendung eines "willkürlich" mit dem Faktor 0,925 verringerten Haftreibbeiwerts im Versuch führt dazu, dass der tatsächlich wirksame Haftreibbeiwert eine geringere Sicherungswirkung ausreichend erscheinen lässt, als das Rechenmodell mit dem verringerten Reibbeiwert fordern würde.
19. Der alternativ zugelassene, genormte Fahrversuch enthält zwangsläufig dynamische Effekte. Diese Effekte führen in der Regel zu größeren Ladungsbewegungen, so dass die Abweichung vom vereinfachten Rechenmodell tendenziell zur anderen Seite auftritt. Somit ist es zutreffend und auch erklärlich, dass statischer Kippversuch und dynamische Fahrprüfung einander weniger gleichwertig sind als jede der beiden Optionen dem vereinfachten Rechenmodell. Jedoch ist der statische Kippversuch einfacher und kontrollierter durchzuführen und kommt dabei den Rechenmodellen ausreichend gleich.
20. Eine für Niederzurrungen wichtige Erkenntnis ist, dass alle Rechenmodelle ebenso wie die genauere Erfassung aller Sicherungswirkungen völlig nutzlos und nichtssagend sind, wenn in der Praxis versäumt wird, die Kräfte aus den Gurten wirksam und über einen möglichst langen Zeitraum auf die ganze Ladung zu übertragen. Dies wurde in dem eingangs gezeigten Beispiel des Heuwagens mit dem sogenannten Heubalken verdeutlicht. Für übliche Ladungen auf modernen Straßenfahrzeugen sollten hierfür Kantenbleche oder Kantenschutzwinkel verwendet werden. Derartige Hilfsmittel sind integrative Bestandteile einer Niederzurrung und sollten daher in Richtlinien und Normen einen festen Platz im Rahmen der Bewertung einer Niederzurrung erhalten.