Zur Mechanik der Niederzurrtechnik

Ulrich Podzuweit
(Prof. im Ruhestand)

Hochschule München

November 2014

Vorwort

Die überarbeitete DIN EN 12 195 von 2010 hat in Ladungssicherungskreisen Deutschlands ein heftiges Echo hervorgerufen. Auf die zahlreichen, ablehnenden Stellungnahmen hat das Deutsche Institut für Normung bei der Veröffentlichung mit einer Präambel reagiert, in der vorgebrachte Sicherheitsbedenken zusammengefasst wurden. Im Folgenden soll sog. der k-Faktor, als das zur Zeit im Brennpunkt stehende Thema, behandelt werden.

Diese Studie ist aus Anfragen zum k-Faktor bei „überbreiten“ Ladungen entstanden. Vorhandene Rechenformeln für Praktiker lassen sich hier nur begrenzt anwenden. Zusätzlich kam die Bitte aus dem Königsberger Ladungssicherungskreis (KLSK), das Gebiet aus meiner Sicht zu bearbeiten. Mit dieser Ausarbeitung komme ich dem Wunsche nach.

Ziel ist es, das Problem des k-Faktors und damit des sog. Seitenzuges aus einer Niederzurrung aus meiner Sicht darzulegen. Darüber hinaus ist es ein weiteres Anliegen, deutlich zu machen, daß das Gebiet der Niederzurrtechnik aus theoretischer Sicht schwierig ist. Auch gibt es Zielkonflikte. Aufgezeigt wird, daß die theoretischen Grundlagen der Niederzurrtechnik keineswegs abschließend aufgearbeitet sind.

Ulrich Podzuweit

Dachau, November 2014

Inhaltsverzeichnis

1	**Einführung**	**1**
1.1	Allgemeines	1
1.2	Zum Problem	1
1.3	Richtlinien als antipiziertes Gutachten	3
2	**Zur Vorgehensweise**	**6**
2.1	Einführung	6
2.2	Zur Methodik	8
2.3	Voraussetzungen	9
2.3	Annahmen	9
3	**Sicherung mittels Niederzurrung**	**11**
3.1	Niederzurrtechnik	11
3.2	Zum Wirkmechanismus	11
3.3	Definition der Niederzurrtechnik	13
3.4	Niederhaltung	14
4	**Begriffe**	**15**
4.1	„Elemente“ der Niederzurrtechnik	15
4.2	Zurrtechnik	16
4.2.1	Einteilung einer Umschlingung	16
4.2.2	Anlegevarianten	17
4.2.3	„Direkte“ und „umschlingende“ Zurrung	17
4.2.4	Niederzurrvarianten	18
4.3	Zurrwinkel α_Z	19
4.3.1	Begriff	19
4.3.2	Ungleiche Zurrwinkel	21
4.3.3	Mindestgröße des Zurrwinkels	21
4.4	Umschlingungswinkel α_U	22
4.4.1	Begriff	22
4.4.2	Länge Umschlingungsbogen	23
4.5	Zurrkraft	23
4.5.1	Größe	23
4.5.2	Spannen von Gurten	24
4.5.2.1	Einführung	24
4.5.2.2	Zum Verfahren	24
4.5.2.3	Kraftflußdiagramm	27
4.5.2.4	Berechnungsbeispiel	28
4.5.2.4.1	Berechnungsweg	28
4.5.2.4.2	Beispiel	30
5	**Die Eytelweinsche Gleichung**	**32**
5.1	Einführung	32
5.2	Gurtkraftabbau am Kantenschutz	32
6	**Berechnungsformeln vorhandener Richtlinien**	**35**
6.1	Einführung	35
6.2	VDI 2702:1990	35

6.3	Berechnung zur Niederzurrkraft nach 12 195:2003	35
6.4	Feststellungen zum k-Faktor der Richtlinien	38
7	**Ableitung der Berechnungsformel zur Niederzurrkraft**	**39**
7.1	Einführung	39
7.2	Berechnungsformel für eine Niederzurrung	39
7.3	Definition k-Faktor	43
7.4	Neuer Berechnungsansatz – N-Formel	44
7.5	Feststellungen zur N-Formel	45
7.6	Gurtkraftfaktor	48
8	**Niederzurrwirkung bei „ladeflächenbreiter“ Ladung**	**50**
8.1	Einführung	50
8.2	Mittige Spannvorrichtungen	50
8.3	Unterschiedliche Zurrwinkel	50
8.4	Einseitige Spannvorrichtung	51
8.4.1	Berechnung resultierende Vertikalkraft	52
8.4.2	Zeichnerische Lösung	53
8.5	Zusammenfassung	55
9	**Niederzurrwirkung bei „überbreite Ladung“**	**56**
9.1	Begriff „überbreite“ Ladung	56
9.2	Berechnung Niederzurrwirkung bei überbreiter Ladung	56
9.2.1	Einführung	56
9.2.2	Zeichnerische Lösung für Ratsche in Sektion I	57
9.2.3	Ratsche in Sektion I	58
9.2.4	Ratsche in Sektion II	58
9.2.5	Ratsche in Sektion III	59
9.2.6	Ratsche in Sektion II und Zurrwinkel 30 Grad	59
9.3	Zylindrische, überbreite Ladungen	59
10	**Nicht behandelte Fälle**	**62**
10.1	Betonplatten	62
10.2	Überstaute Plattenladung	62
10.3	Gestapelte Korbbogen-/Klöpperböden	63
10.4	„Rundumzurrungen“	63
10.5	Cross-Over-Lasching	65
11	**Seitenzug einer Niederzurrung**	**67**
11.1	Seitenzug an der Ladung	67
11.2	Berechnungsformel für die Seitenzugkräfte	69
11.3	Folgen des Seitenzuges auf die Quer- und Längskraft	70
11.3.1	Reibungskreis	70
11.3.2	Auswirkungen des Reibungskreises bei Seitenzug	70
11.4	Berechnungsbeispiel	72
11.4.1	Annahmen	72
11.4.2	Querbeschleunigungsverlust	73
11.4.3	Längsbeschleunigungsverlust	74

12 **Zusammenfassung** 76

13 **Bildnachweis** 78

14 **Literatur** 73

Anlage 1 Tabelle A. 1.1 79
Anlage 2 Tabelle A. 2.1 82
Anlage 3 Ermittlung von Umschlingungswinkeln 83
Anlage 4 Einteilung von Ladungen 85
Anlage 5 Versuche in [12] (Auszug) 86
Anlage 6 Buchtlasching seitwärts 91
Anlage 7 Versuche zur Niederzurrung [2] 92
Anlage 8 Einfluß konstruktiver Größen am Kantenschutz 102
Anlage 9 Zur Eytelweinschen Gleichung 104

Verwendete Formelzeichen

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

Indizes

A	Aufprall-	max	Maximal-
B	Brems-	min	Minimal-
Diff	Differenz-	N	Normal-
Def	Deformation	q	quer
F	Flieh-	R	Rückhalte-
	Fahrzeug-	Res, res	Resultierende . . .
G	Gewichts-	T	Trägheits-/Vorspannungs-
G	Gleitreibung	tat	tatsächlich, -e
G	Gurt-	Vb	Verschub
H	Hangabtriebs-	vert	vertikal
H	Haftreibung	Vs	Versatz
h	horizontal	U	Umschlingungs-
l	längs	x, y, z	Koordinaten
K	Kantenschutz	Z	Zurr-

1 Einführung

1.1 Allgemeines

Diese Studie befasst sich mit den Berechnungsgrundlagen zur Niederzurrtechnik. Das betrifft dann einerseits die in Richtlinien zugrundegelegten Berechnungen als auch andererseits die sich aus der Mechanik ableitbaren Ansätze.

Auch wenn vordergründig die Theorie auf diesem Gebiet von Praktikern nicht für wichtig angesehen wird, zeigt die Ausarbeitung, daß die Niederzurrung komplizierter ist, als das allgemein gesehen wird. Gerade den Berechnungsformeln in deutschen und europäischen Richtlinien fehlt weithin eine ausreichende theoretische Basis.

Die Arbeit wurde auf Grund von Anfragen, wie der k-Faktor bei überbreiten Ladungen anzusetzen sei, begonnen. Da keine Ausarbeitungen zu diesem Thema gefunden wurden, wurden die Berechnungsformeln von Grund auf neu abgeleitet, um die in Richtlinien vorhandenen Formeln hinterfragen zu können.

Es hat sich dabei gezeigt, daß eine Niederzurrsicherung gegen Verschub und gegen Kippen mit der gleichen Technologie (Reibung Kantenschutz hoch oder niedrig) nur schwer vereinbar sind. So wird bei einem Verschub die Niederzurrung, wenn die Ladung nicht „durchrutscht“, mit dem Verschubweg zunehmend stärker zurückgehalten. Eine kippgefährdete Ladung wir dagegen, bei Zurrwinkel von kleiner als 90 Grad zunächst einmal bei einer Ladungsbewegung geringer zurückgehalten. Deswegen wird hier auch nur die Bewegungsart Verschub behandelt.

Weiterhin wurde deutlich, daß kein Algorithmus zur Berechnung einer Niederzurrung existiert, mit dem unter den gesetzten Zielvorgaben alle wirkenden Phänomen erfasst werden. Dieses Fehlen einer „durchgehenden“ Berechnung ist als Mangel anzusehen. Wege zu einem „durchgehenden“ Rechengang sollen aufgezeigt werden.

Daneben hat die Studie auch ergeben, daß für eine Niederzurrung die Ladung „fest verbunden“ gehalten werden muß. Wohl kann auch eine sich zum Trägerfahrzeug verschiebende Ladung durch eine Niederzurrung zurückgehalten werden, die dabei aber entstehenden Kräfte sind viel größer und mit „statischen“ Rechenmethoden nicht erfassbar.

1.2 Zum Problem

Die Niederzurrtechnik als eine Möglichkeit zur Sicherung von Ladungen wird im Landtransport in Deutschland in großem Umfang angewendet. Diese Technologie ist billig, schnell anwendbar und erfordert nur geringe Einarbeitsaufwendungen. Die Niederzurrtechnik hat aber bei genauerem Hinsehen einen beträchtlichen theoretischen Hintergrund. Ladungssicherung gilt als eine Praktikerdomäne. Die Theorie stand lange Zeit in Deutschland nicht im Blickpunkt. Das erklärt, warum in den letzten 40 Jahren wenig Theorie zu diesem Thema betrieben wurde. Dieser Beitrag zeigt auf, daß die Theorie erheblich komplizierter ist, als das allgemein anerkannt wird. Schon in der Ausarbeitung [3] wird deutlich, daß das Niederzurren eine komplizierte Materie ist.

In Deutschland existierte die VDI 2702, die in der überarbeiteten Fassung von 1990 weiter benutzt wurde. Alle heute existierenden Richtlinien bauen auf dieser Basis auf. Einige der in

der 2702 benutzten Begriffe, z. B. der Begriff g-Wert, wurden in der VDI 2700 festgelegt. Bereits diese Richtlinie, wie alle weiteren, lassen eine nur relativ geringe theoretische Grundlage erkennen, obwohl mit der Ausarbeitung und den Versuchen von Hörger [9] ein deutlich umfangreicherer Kenntnisstand bereits 1966 erkennbar ist. Auch in den folgenden Jahrzehnten wurde zu wenig zu dem Thema in der Bundesrepublik Deutschland geforscht. Dem steht auch immer das Argument entgegen, Ladungssicherung sei allein eine Praktikerdisziplin.

Die theoretische Vorgehensweise bietet aber weit mehr als nur eine sichere Lösung. Neue Lösungen können vor kostenaufwendigen Erprobungen rechnerisch untersucht werden und damit am Schreibtisch ermittelt und optimiert werden. Weiterhin können nach Unfällen bestimmte Fragen mittels Berechnungen untersucht werden. Nur wenn aus Ursache, Ablauf und „Endergebnis“ das Ereignis nachvollziehbar ist, kann etwas geändert werden. Auch die Möglichkeit, etwas im Nachhinein untersuchen zu können, verhindert Unfälle! Und: Ein funktionierendes Berechnungsverfahren zeigt an, daß die Mechanik richtig verstanden wurde!

Der Konflikt zwischen theoretischer und empirischer Vorgehensweise ist auch nicht neu! Schon die Römer mit ihrer großen technischen Überlegenheit wussten um den Konflikt zwischen Theorie und Praxis wie der nachfolgende Spruch zeigt.

Theoria sine praxis	Theorie ohne Praxis
est rota sine axis	ist wie ein Rad ohne Achse.
sed praxis sine theoria	Aber Praxis ohne Theorie
est asinus in academia.	ist der Esel in der Schule.

Deutlich wird daraus, daß beides, Theorie und Praxis, zusammen gehören. Die vorliegende Ausarbeitung legt den Schwerpunkt auf die theoretische Seite, behält die Praxis aber fest im Blick. Das ist auch aus weiteren Gründen notwendig. Es stellt sich nämlich die Frage nach der Gewichtung von Theorie und Praxis.

Entscheidend in der Technik ist immer die Praxis, denn Neues wird nur dort durch „Versuch und Irrtum“ geprüft. Nur dort erweist sich die Alltagstauglichkeit. In der Technik gibt es allerdings auch Fälle, in denen etwas eigentlich nach Theorie nur unzureichend ist, in der Praxis sich aber bei Erfüllung bestimmter Voraussetzungen als geeignet erweist.

Jede Ladungssicherung ist immer ladungs- und fahrzeugbezogen. Seit Ende 1970 hat es eine erhebliche Leistungssteigerung in der Nutzfahrzeugtechnik gegeben. So wurde die Motorenleistung massiv bei weniger Verbrauch erhöht (von ca. 200 Ps auf ca. 500 Ps bei Sattelzugmaschinen). Die Bremsleistungen wurden ebenfalls gesteigert, denn eine Fahrzeugbremse muß immer das Leistungsgewicht des Fahrzeugs (Ps/zul. Gesamtgewicht) und die Topographie (Passfahrten) berücksichtigen. So wurden die Bremsanlagen ebenfalls verbessert (z. B. das „Standvermögen“ gegen thermische Überhitzung). Ein Engpaß bleibt aber bis heute das Bremsvermögen als eine von mehreren wichtigen Reifeneigenschaft. So könnte die Verzögerung wohl auf über 0,8 g gesteigert werden, wie auch in Versuchen [1] festgestellt werden konnte, die Reifenlaufleistung sinken dann aber ab. Eine weitere Folge der hohen Motorleistungen ist, daß die Bedienung von Brems-, Schalt- und Lenkvorgängen problemlos Ausweichmanöver mit vollbeladenem Sattelzug in so kurzer Zeit durchgeführt werden können, wie das „früher“ nur von Oberklasse-PKW erreicht werden konnte. Die

Fahrzeugentwicklungen hätte viel früher zu einer Nachbesserung der einschlägigen Ladungssicherungsrichtlinien führen müssen.

Als positiv für die Ladungssicherungsnormung ist die Entwicklung des Straßenbaus und der höhere Allgemeinkenntnisstand zu nennen. Nur bei Transporten, die weit in den Osten Europas führen, muß die Sicherung diese Besonderheit des Straßenzustandes noch beachten.

1.3 Richtlinien als antizipiertes Gutachten

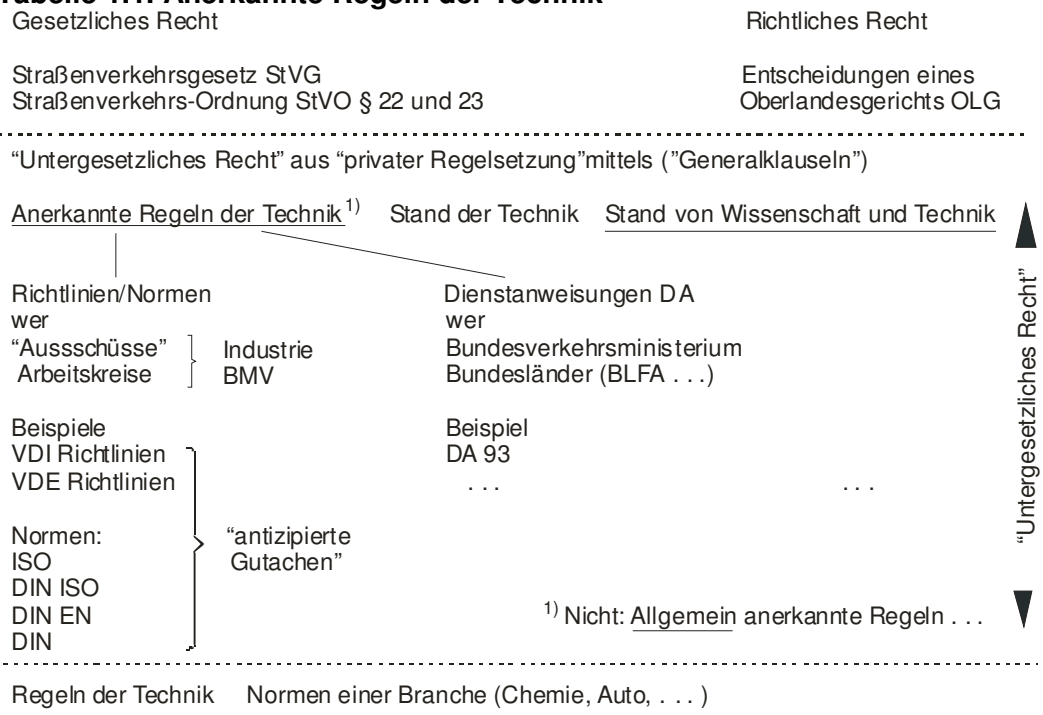
Der Mangel an Theorie wurde besonders deutlich, als die Europäische Union Anfang der 2000er Jahre begann, auch auf den Gebiet der Ladungssicherung zu normen. So entstanden unter anderem die beiden folgende Richtlinien:

DIN EN 12 195-1:2004	Teil 1 Berechnung von Zurrkräften (in Deutschland in Kraft) Anhänge A bis D: „informativ“ entspricht VDI 2702 (1990), später VDI 2700 Blatt 2, Nov. 2002 (in Deutschland in Kraft)	
DIN EN 12 195-1:2010	Teil 1 Berechnung von Zurrkräften	
	Anhang A	informativ
	Anhang B (Reibungszahlen)	normativ (!)
	Anhang C	informativ
	Anhang D	normativ

Richtlinien sind in der Lesart deutscher Juristen „antipizierte“ (vorweggenommene) Gutachten. Das Problem der Richtlinieninhalte wird in Deutschland durch den juristischen Stellenwert einer technischen Richtlinie, wenn sie dem Standard einer „anerkannten Regel der Technik“ entspricht, in besonderer Weise problematisch. Die „anerkannten Regel der Technik“ sind eine von drei „Generalklauseln“ des sog. „untergesetzlichen Rechts“, die in Strafprozessen eine sehr große Gewichtung in Deutschland haben, Tabelle 1.1. Diese Verfahrensweise deutscher Gerichte bei technischen Fragen hat eine lange Entwicklung hinter sich. Insbesondere bei Richtlinienentwicklungen sind Generalklauseln von Bedeutung. Während bei „anerkannten Regeln der Technik“ eine einfache Mehrheit mit einer Stimme entscheidet, wird bei „Stand von Wissenschaft und Technik“ (Sicherheitsfragen z. B. zu Atomkraft und Wasser) genau umgekehrt verfahren. Entscheidungen mit einer Stimme Mehrheit lassen die Möglichkeit zu, daß auch etwas wissenschaftlich Falsches verabschiedet und Richtlinientext wird. Nach einem deutschen OLG-Urteil kann in technischen Richtlinien nach den „anerkannten Regel der Technik“ auch etwas Falsches stehen, es muß trotzdem erst einmal beachtet werden. Ursprünglich war einmal der Begriff „allgemein anerkannte Regeln der Technik“ diskutiert worden!
In diesem Sinne sind deutsche Richtlinien keine relativ unverbindliche Verladeanweisung, sondern müssen beachtet werden, es sei dann, es wird ein höheres Sicherheitsniveau eingehalten und ist nachweisbar. Rechtliche Grundlage ist der Paragraph 22 der deutschen Straßenverkehrs-Ordnung (StVO).
Die DIN EN 12 195-1:2010 hat in Deutschland zu großen Diskussionen geführt. Insbesondere der sog. k-Faktor stand und steht im Brennpunkt. In der Diskussion zeigte sich allerdings, daß der Gurtkraftabbau am Kantenschutz, der mit dem k-Faktor erfasst wird, bei den „Praktikern“ nicht richtig angekommen war, obwohl in [2, 18] dazu bereits Untersuchungen gelaufen waren und in [3, 1] Ergebnisse in einem Aufsatz dazu vorgelegt

wurden. Auch in [3] ist erkennbar, daß das Phänomen bereits bekannt war. Die Materie hat einen hohen Anteil an Theorie und es gibt auch Zielkonflikte. Die Theorie, die im wesentlichen auf der sog. „Technische Mechanik“ des Maschinenbaus gründet, ist auch die Basis dieser Ausarbeitung. Sie beschäftigt sich im wesentlichen mit dem k-Faktor, soll aber auch aufzeigen, daß es eine Reihe weiterer Felder in der Niederzurrtechnik gibt, die bisher nicht oder unzureichend bearbeitet sind.

Tabelle 1.1. Anerkannte Regeln der Technik



Diese Studie soll ein Diskussionsbeitrag sein. Die Theorie der Niederzurrtechnik ist kompliziert. Zur Zeit kann auf einige Fragen keine abschließende Antwort gegeben werden, ob sich Zurrkraftunterschiede durch den Gurtkraftabbau während der Fahrt ausgleichen. Insbesondere fehlen „durchgehende“ Berechnungslösungen, die Verschub und Kippen bei Kräften in verschiedene Richtungen gleichzeitig erfassen. Es sollen aber Lösungswege für einige Fragen mit dieser Ausarbeitung eingebracht werden. Einen alles erfassenden Lösungsansatz gibt es bisher nicht.

Die Ausarbeitung fängt am „Nullpunkt“ in der Niederzurrtechnik an, d. h. es wird die Berechnungsformel aus Voraussetzungen und Annahmen neu abgeleitet. Eine andere Vorgehensweise, also z. B. bei den Aussagen der VDI 2700:1990 zu beginnen und die einzelnen Aussagen der verschiedenen Richtlinien zu vergleichen, erscheint nicht zielführend zu sein, weil dann vorausgesetzt wird, daß die den alten Richtlinien zugrunde gelegte Mechanik als richtig anzusehen ist.

Der im Folgenden begangene Weg orientiert sich an den Notwendigkeiten der Technischen Mechanik und nicht an der vorhandenen Richtlinien. Es wird allerdings auch Begriffe dieser Richtlinien zurückgegriffen. In diesen Fällen wird, wenn die Begriffe abweichend benutzt werden, allerdings eine Festlegung gegeben.

2 Zur Vorgehensweise

2.1 Einführung

Im Folgenden werden verschiedene Anwendungsfälle zur Niederzurrung betrachtet und durchgerechnet. Die Fälle werden unter den gleichen Randbedingungen, wie z. B. Reibungszahlen oder Zurrwinkeln, behandelt. Ziel ist es, zunächst die jeweils resultierende Niederhaltekraft zu ermitteln und insbesondere den Gurtkraftabbau am Kantenschutz zu berücksichtigen. Bei der Berechnung der Niederzurrkraft sollen alle Phänomene berücksichtigt werden, die jeweils wirken. Daraus wurde dann eine allgemein gültige Berechnungsformel abgeleitet.

Die Ausarbeitung fängt am Nullpunkt in der Niederzurrtechnik an und leitet die Leistungsmöglichkeiten der Niederzurrtechnik neu ab. Eine andere Vorgehensweise, also z. B. bei den Aussagen der VDI 2700:1990 zu beginnen, würde bedeuten, daß diese Festlegungen aus Sicht der „Technischen Mechanik“ als richtig vorausgesetzt werden. Würde das Endergebnis dieser Ausarbeitung dann mit den Voraussetzungen übereinstimmen, könnte bei einer wissenschaftlichen Überprüfung der Vorwurf erhoben werden, daß mit der Argumentation ein Zirkelschluß vorgenommen wurde.

Theoretische Grundlage dieser Ausarbeitung ist immer die sog. „Technischen Mechanik“, einem Ableger der Mechanik [z. B. 5]. Sie ist insbesondere für Maschinenbauer aus Berechnungsnotwendigkeiten entwickelt worden. Diese vor etwa 200 Jahren begonnene Entwicklung hat neben der Festigkeitsrechnung und der Werkstofftechnik wesentlichen Anteil für die Lösung technischer Probleme bei mechanischen Konstruktionen jedweder Art. Erst wenn ein Problem sich „rechnen“ lässt und die Berechnungsverfahren „funktionieren“, wird in Deutschland davon ausgegangen werden, daß die mechanischen Probleme verstanden wurden! Weiterhin wird auf einen weiteren Ableger, die sog. Unfallmechanik, z. B. bei Reibungsfragen, zurückgegriffen. Auch hier finden sich Vorgehensweisen, die sinnvoll für die Niederzurrtheorie sind.

In der Ausarbeitung wird auf rechnerische, aber auch auf zeichnerische Lösungswege zurückgegriffen. Gerade für Gutachter ist die zeichnerische Methode eine Möglichkeit, um schnell ein ausreichend genaues Ergebnis zu bekommen. Auch bietet die zeichnerische Möglichkeit den Vorteil der größeren Anschaulichkeit.

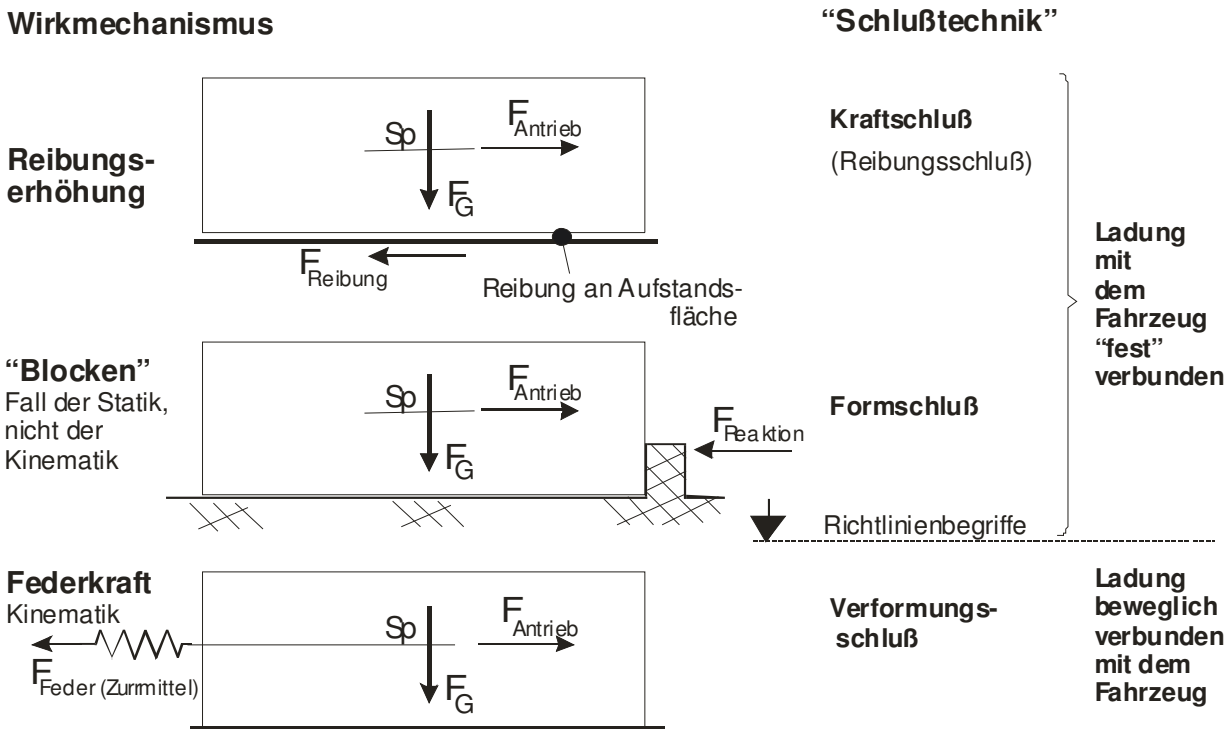
Ein wichtiger Gesichtspunkt ist sicher auch, daß eine Richtlinie, wie die VDI 2702:1990 mit ihren Festlegungen sich zwar für Standardfälle, die unter das Wirkprinzip der Niederzurrung fallen, einem „verstärktem“ Kraftschluß, bewährt hat. Denn eine technische Regel muß für die Praxis umsetzbar sein. Bewährt heißt aber nicht, daß sie auch allumfassend, also für alle Praxisfälle anzuwenden ist und „richtig“ im Sinne der Technischen Mechanik ist!

Die Übersicht 2.1 zeigt die Wirkmechanismen der Technischen Mechanik, mit denen eine Rückhaltewirkung gegen oder bei Eigenbewegungen von Ladungen auf der Ladefläche aufgebaut werden kann. Neben dem Wirkprinzip der Mechanik wird auch die entsprechende „Schlußtechnik“ des Maschinenbaus gegenübergestellt [19]. Der Begriff Schlußtechnik entstammt aber der Konstruktionslehre des Maschinenbaus.

Mit einem „Schluß“ soll hier die Weiterleitung von Kräften zwischen zwei Körpern, in Fall der Ladungssicherung zwischen der Ladung und der Ladefläche, verstanden werden. Im Maschinenbau müssen Teile zusammengefügt werden, es muß dann ein „Schluß“ hergestellt

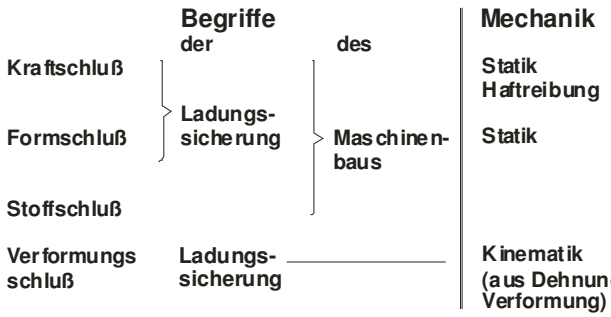
[4, 13], damit Kräfte oder Momente weitergeleitet werden können. Der Maschinenbau kennt verschiedene Schlußtechniken: Kraft- (z. B. Reibung), Form- und den Stoffschluß (z. B. Kleben oder Schweißen), Übersicht 2.2.

Übersicht 2.1. Wirkmechanismen der Sicherungstechniken



Alle Sicherungstechniken haben eine oder mehrere dieser Wirkmechanismen als Grundlage. Zu den wichtigsten Sicherungstechniken zählt die Niederzurrtechnik, die zu den Kraftschlußtechniken gehört.

Übersicht 2.2. Zu Begriffen der „Schlußtechniken"



Der Berechnungsansatz zur Niederzurrtechnik soll statisch aber für einen kleineren Teil der Ausarbeitung auch dynamisch erfolgen, um die Unterschiede aber auch Grenzen des einen oder des anderen Weges aufzuzeigen. Auf die Bewegungsart Kippen soll zunächst nicht

eingegangen werden. Für dieses Feld müsste zuerst eine ausreichende Theorie erarbeitet werden, z. B. ab wann eine Ladung nicht mehr „standfest“ ist.

Wie die folgenden Ausführungen zeigen werden, ist es sinnvoll, Ladungen für eine Untersuchung der Niederhaltewirkungen in zwei Fälle zu unterscheiden: Einmal in Niederzurrungen für Ladungen, die auf Ladeflächen bis 2550 mm Breite geladen werden („ladenflächenbreite“) und zweitens in Ladungen, die „überbreit“ sind, Abb. 4.10 und 4.11.

Die Tabelle 2.1 zeigt auf, welche Untersuchungsfelder in der Niederzurrtechnik existieren. Diese Ausarbeitung stellt nur einen Beitrag zu der Längssicherung standfester Ladungen dar. Aufgezeigt werden soll aber, daß es daneben weitere Problemfelder gibt.

Tabelle 2.1. Problemfelder der Niederzurrtechnik

Statischer Ansatz

Sicherung gegen Bewegungen zur Fahrtrichtung aus	quer	längs	kombiniert längs/quer quer/quer längs/längs l/q	q/q	l/l
Verschub		X			
(Kippen)	X [10]	X [10]			
Rollen					

Kinematischer Ansatz

Verschub					
Kippen					
Rollen					

bearbeitet:
X In dieser Studie /
X In [10] bearbeitet

Im Vergleich Sicherung gegen Verschub- und Kippen gibt es Zielkonflikte. So ist die Reibung am Kantenschutz unterschiedlich zu beurteilen. Sie soll bei einer Verschubsicherung niedrig sein, bei einer Kippsicherung möglichst hoch. Während bei einer Verschubsicherung zwangsläufig ein statischer Ansatz erforderlich ist, erscheint für eine Kippsicherung der dynamische Ansatz unvermeidbar. Der Verschub wird zuerst behandelt, weil in Fahrtrichtung nach vorn die größten Antriebskräfte auftreten.

2.2 Zur Methodik

Für die folgenden Berechnungen zur Niederhaltewirkung und dem Seitenzug wird ein „Freischnitt“ nach Abb. 2.1 angenommen. Mit dem sog. „Freischneiden“ wird ein Körper von seinen „Bindungen“ gelöst. Der Körper wird als frei schwebend angesehen. Es müssen dann reaktive Kräfte angebracht werden, um ihn in Ruhe zu halten. In unserem Fall wird ein

Freischnitt angedeutet und dann an dem als „frei schwebenden“ gedachten Körper Reaktionskräfte angebracht. Die Horizontalen und vertikalen Kräfte können dann bilanziert werden.

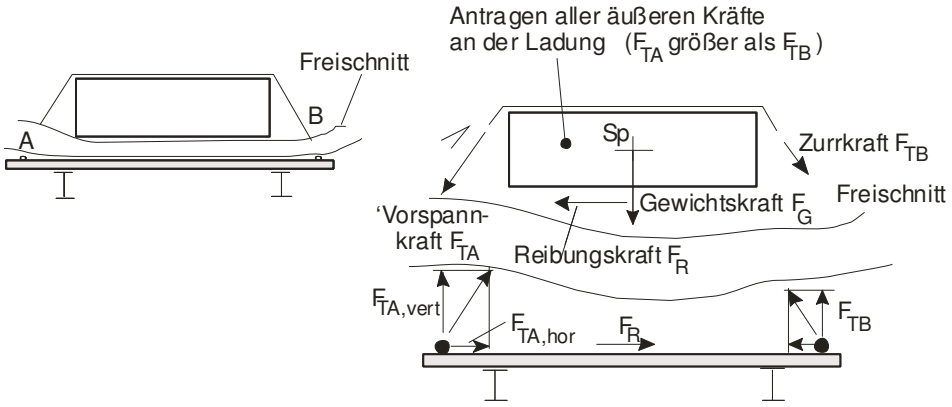


Abb. 2.1. Prinzip des „Freischneidens“

Die horizontale Kräftebilanz wird aus Abb. 2.2 ersichtlich. Dabei zeigt sich, daß ein Koordinatensystem (KOS) festgelegt werden muß, weil beide Horizontalkräfte unterschiedliche Richtungen haben können. Der Nullpunkt des KOS sei auf der Anspannseite durch (A) gelegt. Damit können dann die Kräfte mit einem Vorzeichen belegt werden.

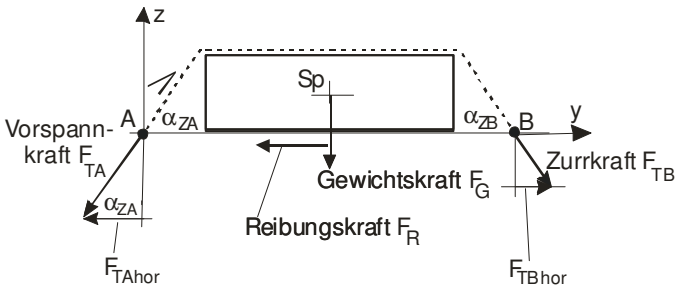


Abb. 2.2. Horizontale und vertikale Kräfte an einer Niederzurrung

2.3 Voraussetzungen

Für das Folgende soll für den rechnerischen Ansatz vorausgesetzt werden.

1. Es sollen nur Vertikalkräfte aus der Ladungsmasse ohne Aus- und Einfederungsbeschleunigungen berücksichtigt werden. Auch nicht behandelt werden sollen vertikale Kraftanteile aus Ladeflächenbewegungen aus Wank- und Nickbewegungen. Auch werden keine Hangabtriebskräfte mit einbezogen.
2. Es werden zunächst nur „standfeste“, also nicht „kippgefährdete“ Ladungen betrachtet.
3. Es sollen nur Ladungen betrachtet werden, die im technischen Sinne als starr anzusehen sind. Elastische Ladungen, wie gestapelte Reifen oder plastische Ladungen, wie Bigbags, sind entweder nicht niederzurrfähig oder nur mit Zusatzeinrichtungen. Wenn, wegen der hohen Ladungsmasse, zahlreiche Gurte eingesetzt werden müssen, müssen die Ladungen in Quer- und Längsrichtung starr sein.

4. Die Ladefläche wird ebenfalls in Quer- und Längsrichtung als unelastisch betrachtet. Das betrifft auch die Ladefläche in Querrichtung beim Überfahren eines einseitigen Hindernisses.
5. Eine Zurrung in dieser Ausarbeitung soll „eben“ sein (Abschnitt 4.2.3). Sie kann in Längs-, in Quer- und auch, in seltenen Fällen, in Diagonalrichtung angeordnet sein. Erfasst werden damit keine Niederzurrungsfälle mit z. B. Netzen oder Planen.
6. Ein Niederzurrgurt soll eine Ladungskante im rechten Winkel umlaufen (Abschnitt 5.1).
7. Ein Niederzurrgurt soll am Kantenschutz in einem Kreisbogen liegen, also nicht über eine Parabelkurve oder ähnliches (Abschnitt 5.1).
8. Eine Niederzurrung setzt voraus, daß der Gurt vorgespannt wird und zwar definiert. Bei einer Direktzurrung oder einer Buchtlaschingsicherung wird nur handfest angezogen! Geht die Ladung in eine Bewegung über, gibt es einen Übergang von der Haft- zur Gleitreibung. Die Rückhaltekraft „bricht zusammen“. Insofern ist hier der statische Ansatz der richtige Weg. Wohl sind auch Niederzurrungen denkbar, die auf eine sog. „Verformungssicherung“ [6] zurückgreifen und dann auch Eigenbewegungen machen müssen. Dann aber müssen auch die Voraussetzung für eine Verformungssicherung erfüllt werden.
9. Wank- Nickbewegungen oder eine Ladeflächenneigung bei Hangfahrten werden nicht berücksichtigt.

2.4 Annahmen

Maßstab für den Begriff „Niederzurrung“ soll das Wirkphänomen der Niederzurrwirkung sein: Durch eine Niederzurrung wird die Anpressung einer Ladung auf die Ladefläche über die Gewichtskraft hinaus erhöht. Das bedingt, daß die Ladung ausreichend steif ist und die die in Absatz 2.2 genannten Bedingungen gelten. .

Es werden als Bewegungen verursachende Kräfte die in den sog. g-Werten zugrundegelegten Belastungen angesetzt.

Für Berechnungen im Folgenden wird eine Gleitreibungszahl am Kantenschutz von 0,3 angenommen. Für den Zurrwinkel wird der Winkel mit 75 Grad angesetzt, wenn die Winkel links und rechts ungleich sind mit 60 und 75 Grad, Anlage 2.

3 Sicherung mittels Niederzurrung

3.1 Niederzurrtechnik

Von einer Ladung, die befördert wird, können Gefährdungen ausgehen. Eine Gefährdung liegt in einer Eigenbewegung der Ladung in Bezug zum Fahrzeug. Kritisch ist nach einer Eigenbewegung der Aufprall auf z. B. eine Stirnwand. Niederzurren ist eine von mehreren Sicherungstechniken in der Ladungssicherungstechnik, um Eigenbewegungen zu verhindern. Die Niederzurrtechnik beruht auf einer kraftschlüssigen Verbindung zwischen Ladung und Fahrzeug. Eine Kraftschlußsicherung ist neben der Formschluß- und der Stoffschlusssicherung eine Verbindungsmöglichkeit von Bauteilen im Maschinenbau [4, 13]. Sie beruht im Ladungssicherungsbereich darauf, daß die Anpressung zwischen Ladung und Ladefläche durch eine sog. Niederzurrkraft zusätzlich zu der Gewichtskraft auf eine errechenbare Größe dauerhaft erhöht wird. In Abb. 3.1 wird beispielhaft eine Niederzurrung gezeigt. Weitere Abbildungen sind u. a. in Abb. 4.1 ff zu finden.

Abb. 3.1. Beispiel für Niederzurrung

3.2 Zum Wirkmechanismus

Mit einer Niederzurrung wird eine Ladung zusätzlich zu dem Eigengewicht auf die Ladefläche gepresst. Die Spannvorrichtung, in der Regel eine sog. Ratsche, muß deshalb um eine bestimmte Kraft angezogen werden, damit eine ausreichende Vorspannung in den Zurrmitteln vorhanden ist, damit es nicht zu einer Gleitbewegung (Übergang von der Haft- in die Gleitreibung) kommt. Die Vorspannung muß während der Fahrt erhalten bleiben. Das ist z. B. bei Holzladungen wegen Setzungserscheinungen im Holz oder bei Weichladungen häufig nicht gegeben.

Neben Ladungseigenschaften sind aber auch die Eigenheiten des Straßentransports hinsichtlich des Fahrzeugs und der Verkehrswege zu beachten. Straßen sind nun einmal uneben. Die Aus- und Einfederungsbewegungen der Fahrzeugladefläche bedeuten, daß die Normalkraft aus der Gewichtskraft als der neben der Reibungszahl maßgebliche Parameter für die horizontale Sicherungswirkung schwankt. Auch diese Störgröße muß berücksichtigt werden, soll aber in dieser Ausarbeitung nicht betrachtet werden.

Die Voraussetzung „fest verbunden“ ist eine wesentliche Vorausbedingung für eine Sicherungswirkung. Denn wenn eine Ladung in eine Gleitbewegung übergeht, ist eine Beschleunigungskraft an der Ladung wirksam [12 (Auszug Anlage 5)], die die Ladung beschleunigt und bei einem Aufprall zu Schäden führen wird. Die aufzunehmenden Zurrkräfte können

dann sehr hoch werden. Die folgenden Berechnungsformeln legen deshalb zu Recht statische Kraftannahmen und statische Ansätze zugrunde. Würde sich eine niedergezurrte Ladung zu bewegen beginnen, muß statt Haften Gleitreibung zugrunde gelegt werden. Und es müßte für den Fall des Gleitens ein anderer Ansatz zugrunde gelegt werden, denn der Vorgang läuft beschleunigt ab und damit entsteht eine Trägheitskraft!

Allerdings findet sich auch in den deutschen Richtlinien ein Hinweis, daß Ladungseigenbewegungen nicht unbedingt von vorn herein abzulehnen sind. Auch in der VDI 2702 Ausgabe 1990 findet sich unter Bild 8, Abb. 3.2, eine verrutschende Ladung eingefügt[1)].

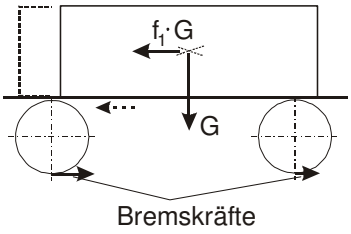


Bild 8. Ladungsverschiebung beim Quer- Schrägzurren

Abb. 3.2. Eigenbewegung bei Niederzurrung

Der Text in der VDI 2702:1990 lautete:

„Ohne ausreichende Sicherung in Längsrichtung würde durch eine Längsverschiebung des Ladeguts, Bild 8, die Schrägzurrung weiter und letztlich so weit verspannt werden, daß sich zu einer unbeabsichtigten, rückhaltenden Ladungssicherungs-Reibkraft . . . die erforderlichen Zurrkräfte Z_i einstellen.“ [1)]

Das gilt aber nur, wenn die Ladung nicht unter dem Kantengleiter durchrutscht.

Alle Zurrtechniken, z. B. die Buchtlaschingtechnik, die erst durch eine Eigenbewegung der Ladung zum Fahrzeug größere Rückhaltekräfte aufbauen können, sollen damit nicht zur Niederzurrtechnik gezählt werden. Es gibt aber auch Grenzfälle. Dazu gehört die Cross-Over-Lasching-Technik, Abb. 10.10 (Abschnitt 10.5), die eine Mischung verschiedener Zurrtechniken darstellen kann.

Wann eine Eigenbewegung einer Ladung bei einer kleinen Ortsveränderung vorliegt, ist in der Technischen Mechanik nicht festgelegt. In der Regel kann bei Ladungen davon ausgegangen werden, daß im Ladungssicherungsbereich eine Ortsveränderung von kleiner als 5 mm noch toleriert werden kann. Sind die Wege größer, sollten dynamische Ansätze benutzt werden. Eine Eigenbewegung wird immer beschleunigt (oder verzögert) sein. Nur bei sehr geringen Ladungswegen kann bei Ladungseigenbewegungen davon ausgegangen werden, daß die Masseträgheit nur geringfügig wirksam sein wird.

1) In einem Gespräch mit dem Schriftführer der VDI 2702 (Erstfassung), Dr. Dietrich Fuchs (MAN), ergab sich, daß geringe (!) Eigenbewegungen einer niedergezurrten Ladung für unbedenklich gehalten wurden. Das sollte das Bild 8 aufzeigen Das Sicherungsmittel Gurt hätte genügend Reserven! Hier wurde aber nur von einem Landtransport ausgegangen.

3.3 Definition der Niederzurrtechnik

Aus dieser Ausarbeitung hat sich für die Niederzurrtechnik folgende Definition ableiten lassen:

„Eine Niederzurrung ist eine Ladungssicherungsmethode bei der durch Zurrmittel die Ladung zur Ladefläche so hin gezogen wird, daß durch eine ausreichende Erhöhung der Anpreßkraft zusätzlich zum Eigengewicht eine ausreichend große Reibungskraft an der Ladungsaufstandsfläche bewirkt wird, damit eine Eigenbewegung der Ladung in Bezug zum Trägerfahrzeug bei Einwirkung von horizontalen Kräften zu verhindern. Die Anpressung der Ladung oder aller Ladungsteile muß ausreichen, um auch bei vertikalen Beschleunigungen der Ladefläche, z. B. aus Fahrbahnunebenheiten beim Wirken von einer oder mehreren Horizontalkräften gleichzeitig eine Eigenbewegungen der Ladung dauerhaft für den Transport zu verhindern."

Im Gegensatz zur Buchtlaschingmethode muß bei einer Niederzurrung eine ladungsgewichtabhängige Vertikalkraft zusätzlich aufgebracht und während der Fahrt gehalten werden. Während beim Buchtlasching oder der Direktzurrung nur handfest vorgespannt wird[1)], muß hier definiert angezogen werden. Da Ladungen, wie z. B. Holz, sich „setzen" können, muß hier durch weitere Maßnahmen dem entgegengewirkt werden.

Neben dem Begriff Niederzurrung wird weiterhin auch das Wort Niederhaltung in einigen Fällen benutzt. Das betrifft Holz- und Bigbagladungen. Bei querverladenem Holz wird in einer Beladerichtlinie gegen senkrecht wegspringendes Holz eine Niederhaltung in Längsrichtung vorgeschrieben. Hier muß aber keine definierte Niederzurrkraft dauerhaft aufgebracht werden.

Die Sicherungstechnik Niederzurren kennt folgende Einflußgrößen:

1. Horizontale Gesamthaftreibungskraft muß größer sein als die angreifende „Antriebskraft" (g-Wert),
2. Zurrwinkel α_z,
3. Umschließungswinkel α_U,
4. Reibungszahl an der Aufstandsfläche der Ladung,
5. Seitenzug im Reibungskreis,
6. Begrenzungen der Anwendbarkeit aus Eigenschaften der Ladungsmasse (Elastizität, Größe, Form, . . .),
7. vertikale Ladeflächenbewegungen,
8. Einhaltung einer definierten Vorspannkraft F_T[2)],
9. Dehnung von Zurrmitteln und
10. Randbedingungen für Zurrungen (eben, geschlossen – offen, . .).

[2)] DIN EN 12 195-1:2010: *„Das Zurrmittel sollte durch die normale Handkraft gespannt werden; diese sollte 0,5 LC nicht überschreiten."*

3.4 Niederhaltung

Inzwischen wird vorgeschlagen bei Bigbags, die für eine Vielzahl von Schüttgütern für die Niederzurrtechnik ungeeignet sind [12], vertikal wirkende Gurte einzusetzen, „um die Ladung zu fixieren“. Bei Weichladungen können vertikale Gurte die fehlende Ladungssteifigkeit nicht ersetzen. Auch bei Kurzholztransporten wird gegen Schwallen und vertikales Abheben eine Niederhaltung vorgesehen [16].

4 Begriffe

4.1 „Elemente“ der Niederzurrtechnik

In Abb. 4.1 werden in einer Skizze Begriffe und „Elemente“ einer Niederzurrung dargestellt.

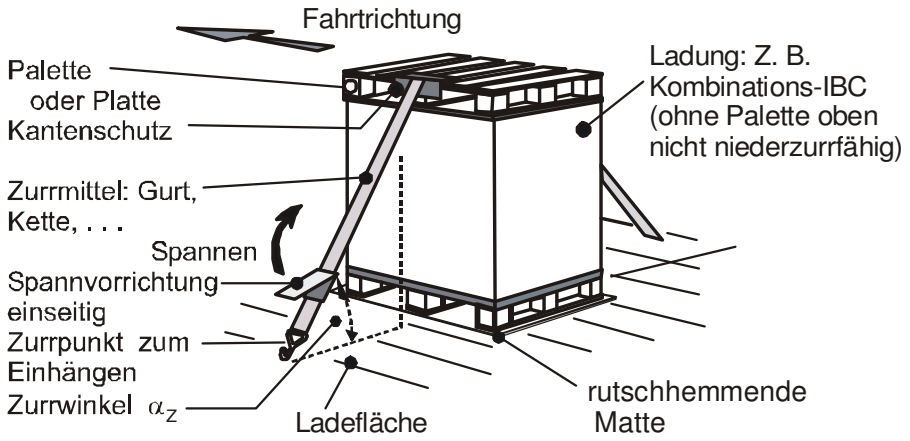


Abb. 4.1. „Elemente“ einer Niederzurrung

Im Folgenden werden einzelne Begriffe behandelt, die für die weiteren Ausführungen benötigt werden.

Ein wesentliches Element einer Niederzurrung ist eine Vorspannungsvorrichtung, mit der eine definierte Vorspannung auf die Zurrung aufgebracht werden kann und bei einer Niederzurrung aufgebracht werden muß. Für das Spannen wird davon ausgegangen, daß mit einer Handkraft (Standard Hand Force SHF) eine Kraft von 50 daN im Normalfall aufgebracht wird, die dann mit den Übersetzungen in der Ratsche auf die Spann-kraft STF (Standard Tension Force STF, z. B. 500 daN) verstärkt wird, die mindestens vorliegen muß.

Weil die Kraft oben eingeleitet wird, fließt die Kraft durch die Ladung hindurch, die deshalb ausreichend steif ein muß. Bei einigen Güter ist es sinnvoll die Gurtkraft „großflächig“ in die Ladung einzuleiten. Deshalb wurde in Abb. 4.1 eine Leerpalette vorgesehen.

Die Kräfte in dem Gurt werden an zwei Stellen, den Zurrpunkten, in die Ladefläche, bzw. direkt oder indirekt in den Rahmen des Fahrzeugs eingeleitet.

Um die Rückhaltewirkung aus der Reibung zu verstärken, wurde auch eine rutschhemmende Matte vorgesehen.

Praktische Fragen zur der Niederzurrtechnik sollen hier nicht Gegenstand sein [15].

In Abb. 4.2 werden die für eine Niederzurrung wichtigsten Begriffe für die wirkenden Kräfte gezeigt. Es muß für das Folgende deutlich unterschieden werden zwischen dem vertikalen und dem horizontalen Anteil aus der Gurtvorspannung. Außerdem kann die Gesamtkraft einer Niederzurrung nur mittels vektorieller Addition errechnet werden. Damit geht der Zurrwinkel als wichtiger Parameter ein. Wenn, wie noch behandelt wird, die Zurrwinkel unter-

schiedlich groß sind, ergeben sich in diesen Fällen auch ungleiche horizontale Anteile aus der Niederzurrkraft.

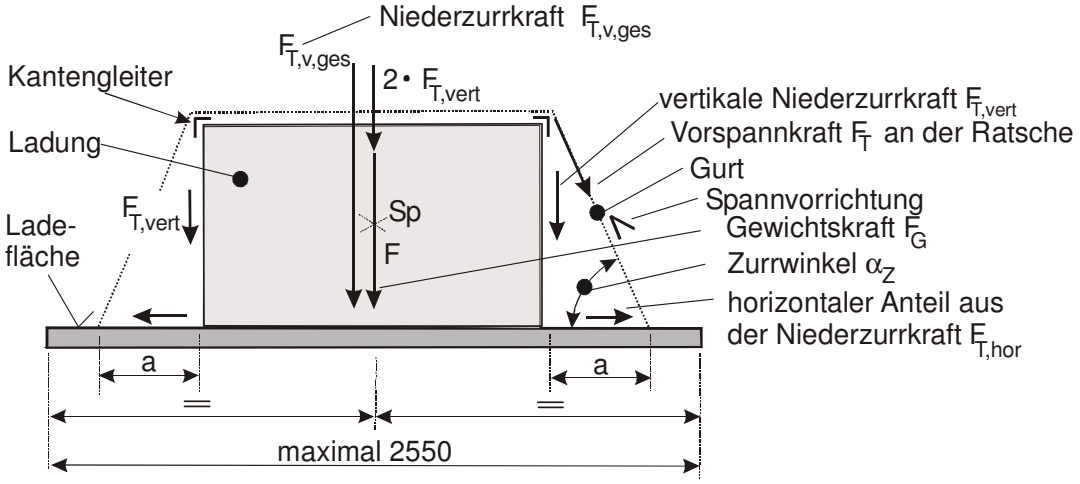


Abb. 4.2. Vertikale Kräfte an einer Niederzurrung

4.2 Zurrtechnik

4.2.1 Einteilung einer Umschlingung

Die Skizze in Abb. 4.3 stelle eine Zurrung dar. Die Ladung habe eine Breite, die kleiner ist als die Ladeflächenbreite („ladeflächenbreite Ladung“). Sie bestehe aus vier Abschnitten, als Sektionen (I, II, III, IV) bezeichnet. Die Zurrung habe zwei „Umschlingungsbögen“ und zwei „Abspannungen“ (erste und letzte Sektion). Die Bezeichnungen für die einzelnen Teile einer Zurrung existieren in den Richtlinien nicht, sollen aber hier, um Abgrenzungen vornehmen zu können, eingeführt werden.

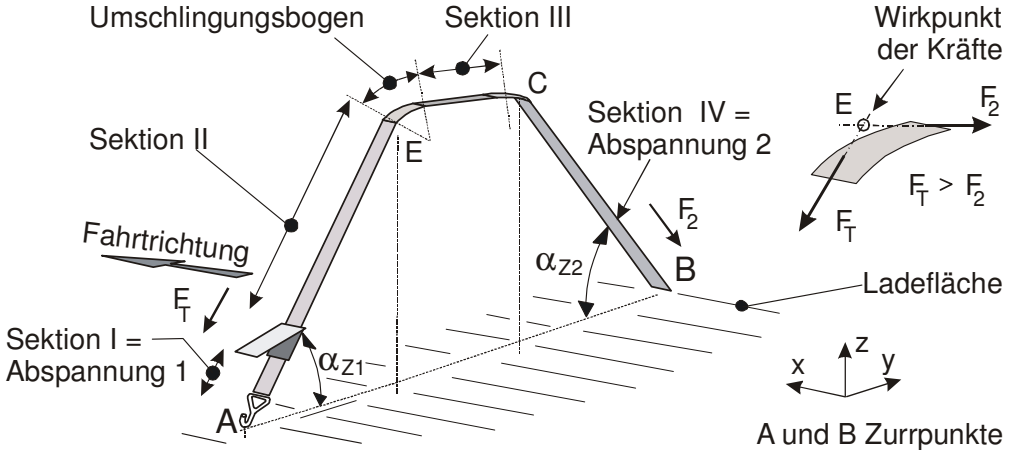


Abb. 4.3. Bezeichnungen in einer „ebenen“ Zurrung

Eine Zurrung soll geometrisch in einer Ebene liegen und, in dieser Variante, durch „Wirkpunkte“ ABCE gebildet werden, wobei A und B die Zurrpunkte sind, D und E sind

„Wirkpunkte“ von Kräften. Damit sind Fälle mit mehr als zwei Zurrpunkten, wie sie bei gespannten Netzen vorliegen, ausgeschlossen.

4.2.2 Anlegevarianten

Niederzurrungen können in Bezug zum Fahrzeug in quer, längs und diagonal (bei kreisförmigen Ladungen) angeordnete Zurrungen unterschieden werden, Abb. 4.4.

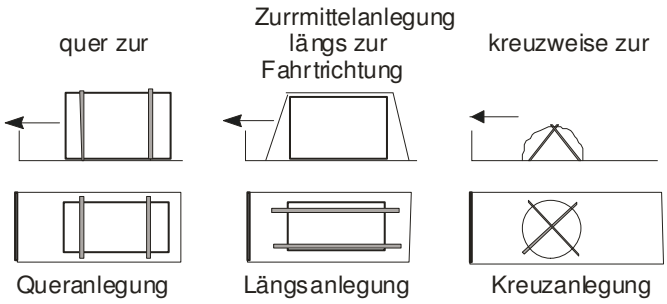


Abb. 4.4. Anlegevarianten

In Abb. 4.5 wird eine Niederzurrung in kreuzweiser Anlegung dargestellt.

Abb. 4.5. Beispiel für kreuzweise Anlegung

4.2.3 „Direkte“ und „umschlingende“ Zurrung

Die Begriffe „direkt“ und „umschlingend“ sollen wie aus Abb. 4.6 erkennbar, benutzt werden. In den Richtlinien wird die sog. Direktzurrung als eine eigenständige Sicherungsmethode genannt. Eine Direktzurrung bisheriger Art liegt aber kein eigener Wirkmechanismus zugrunde. Ab einem bestimmten Zurrwinkel liegt vollständig (90 Grad) oder teilweise (über 70 Grad) eine Niederzurrwirkung vor. Eine derartige Abgrenzung erscheint deshalb sinnvoll und notwendig.

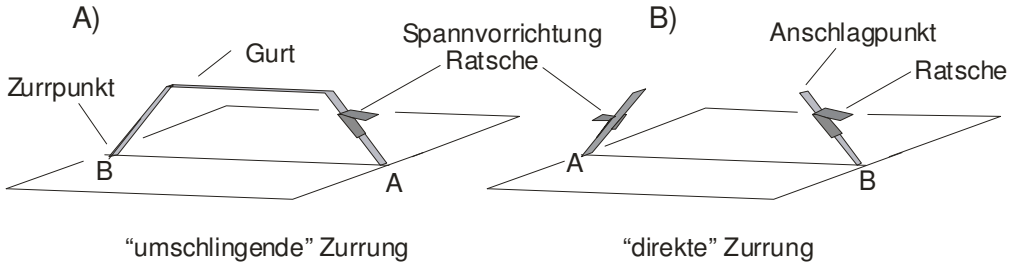


Abb.4.6. „Umschlingende“ und „direkte“ Zurrung

Wenn eine Zurrung nicht geschlossen ist, aber nach dem Wirkprinzip der Niederzurrtechnik funktioniert, sollen diese Fälle der Niederzurrtechnik zugeordnet werden. Abb. 4.7 zeigt eine Niederzurrung mit in direkter Zurrung.

Abb. 4.7. Niederzurrung in „direkter“ Zurrung

Und ausgeschlossen sollen damit auch Zurrtechniken wie eine Cross-Over-Laschingsicherung, werden, da hier der Zurrgurt schräg über die Ladungskante läuft und nicht rechtwinklig. In diesem Fall ist eine der Voraussetzungen der Eytelweinschen Gleichung, daß der Gurt die „Kante“ im rechten Winkel umschließt, nicht gegeben. Wie groß in diesem Fall der Gurtkraftabbau ausfällt, ist ungeklärt. Auch sind die Gurte relativ schräg gestellt und wirken damit teilweise eher wie bei einer Verformungssicherung [6].

Unterschieden werden könnte auch in „ebene“ und „räumliche“ Zurrung. Die bisher dargestellten Zurrungen sind als ebene Zurrung einzuordnen. Würden Zurrungen, wie in Abb. 4.8 dargestellt, angelegt sein und entsprechend vorgespannt und mit großem Zurrwinkel vorhanden sein, könnten Diagonalzurrung auch als „spezielle“ Niederzurrungen angesehen werden.

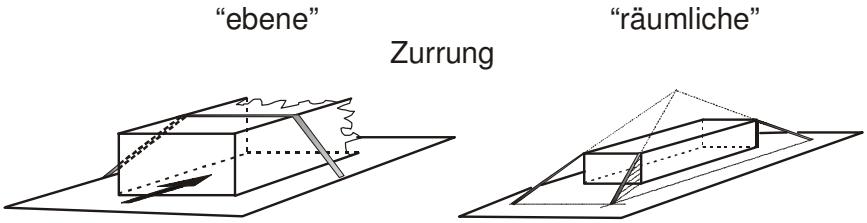


Abb. 4.8. „Ebene“ und „räumliche“ Zurrung

4.2.4 Niederzurrvarianten

Niederzurrvarianten lassen sich entsprechend nachfolgender Tabelle 4.1 zusammengefaßt einteilen. Dabei hat sich eine Dreiteilung in ladeflächenbreite, überbreite und sonstige als notwendig erwiesen, da sich daraus Folgerungen für die Berechnung ergeben.

Voraussetzungen dieser Niederzurrungsvarianten ist stets, daß

1. eine Vorspannung aufgebracht wird, also nicht nur „handfest“ angezogen wird,
2. eine definierte Vorspannung vorliegt und
3. die Vorspannung in ihrer Höhe dauerhaft während des Transports erhalten bleibt.

Tabelle 4.1. Niederzurrvarianten

		Spann-vorrichtung	Zurr-winkel	Bemerkung	
1.1	Ladeflächenbreite Ladungen	beidseitig	sym.	“Direkte” Zurrung	
1.2		mittig	sym.	“umschlingende” Zurrung	
1.3		mittig	unsym.	“umschlingende” Zurrung	
1.4		einseitig	sym.	“umschlingende” Zurrung	
1.5		einseitig	unsym.	“umschlingende” Zurrung	
1.6		beidseitig	unsym.	“umschlingende” Zurrung	
2.1	übertr eite Ladungen	Spannvorrichtung verschieden	sym.	“umschlingende” Zurrung	
2.2			sym.	Ladung geschichtet	
2.3			sym.	Ladung geschichtet, überstaut	
3.1	Sonstige Ladungen	einseitig oder beidseitig	sym.		
3.2		beidseitig		doppelter Buchtlasching seitwärts	
3.3				Cross-Overlashing	
3.4				Rundtörnlasching	

Anlage 6 zeigt weitere Varianten.

4.3 Zurrwinkel α_Z

4.3.1 Begriff

Der Zurrwinkel für ladeflächenbreite Ladungen ist Abb. 4.1 bis 4.3 dargestellt. Gleichzeitig sollen die Skizzen, Abb. 4.12 und 4.13, aufzeigen, daß auch unterschiedliche Zurrwinkel an einer Zurrung möglich sind. Einmal wird eine außermittig gestaute Ladung zu ungleichen Zurrwinkel führen und zweitens ungleich hohe neben einander stehende Ladungen mit einer gemeinsamen Umschlingung.

Den Standardfall einer ladeflächenbreiten Niederzurrung wird in der Abb. 4.9 dargestellt. Die allermeisten Niederzurrungen überspannen eine „ladeflächenbreite“ Ladung, d. h. die Ladung übersteigt die zulässige Ladeflächenbreite nicht. Die Zurrpunktanordnung und die Ladungspositionierung in diesem Fall sei symmetrisch zur Fahrzeugmitte. Mit dem Zurrwinkel α_Z liegt aber auch Wirkrichtung der Zurrkraft in Bezug zur Ladung fest.

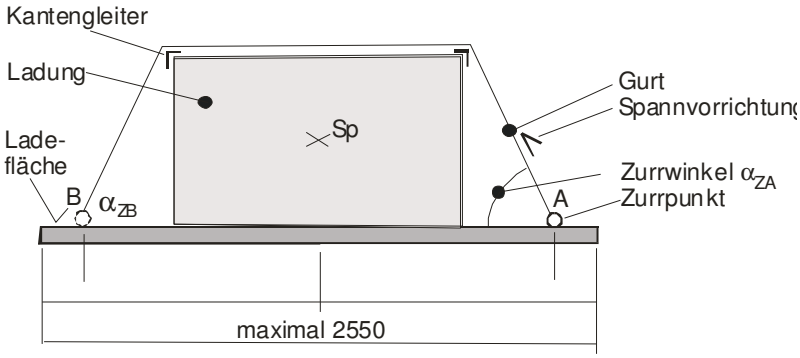


Abb. 4.9. Begriff Zurrwinkel bei „ladeflächenbreiter“ Ladung

Eine Ergänzung zu der Festlegung des Zurrwinkels ist für den Fall festzulegen, daß die Ladung breiter als die zulässige Ladeflächenbreite ist („überbreite Ladung“), Abb. 4.10. Die Abbildung zeigt auch auf, daß in diesem Fall fünf Sektionen vorhanden sind. Auch liegen die Zurrwinkel in diesem Fall völlig anders. Hier muß der Zurrwinkel festgelegt werden.

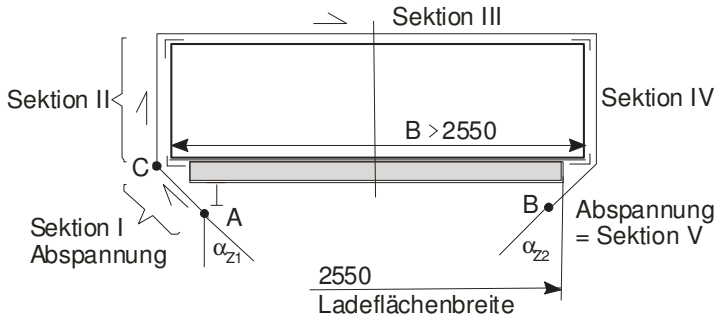


Abb. 4.10. Zurrwinkel bei „überbreiter“ Ladung

Da der Winkel als Sinus in die vorhandenen Formeln eingeht, der Sinus die „Gegenseite“ und die Hypotenuse erfaßt, die vertikale Kraft mit der „Gegenseite“ errechnet wird, kommen nur die in Abb. 4.11 dargestellten Winkelvarianten in Frage.

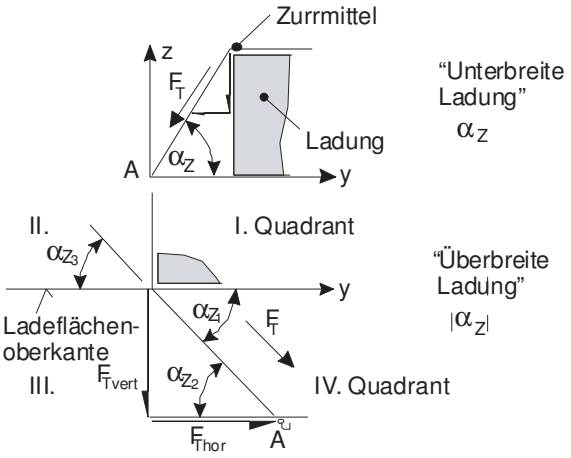


Abb. 4.11. Zurrwinkelfestlegungen in einem KOS

In der Abb. 4.11 wird auch ein Koordinatensystem (KOS) festgelegt. Es soll stets in A oder B liegen, die in dieser Ausarbeitung immer die beiden Zurrpunkte sind. Da der Sinus nur im I. und II. Quadranten positiv ist, käme nur die Festlegung im II. Quadranten in Frage. Entscheidend ist allerdings auch, welche der α_Z-Größen sich in der Praxis am einfachsten und sichersten messen läßt. Sollte die Praxis eine Festlegung im III. oder IV. Quadranten

bevorzugen, muß in die Berechnungsformel der „Betrag“ des Winkels eingesetzt werden, damit die Vorzeichenregel richtig bleibt.

Eine Formel jeweils für ladeflächenbreite und überbreite Ladungen erscheint wenig sinnvoll.

4.3.2 Ungleiche Zurrwinkel

Abb. 4.12 zeigt eine Niederzurrung mit vier Sektionen an einer unsymmetrischen aber mittig gestauten Ladung mit unterschiedlicher Lage der Spannvorrichtung. Die verschiedenen Zurrwinkel in A und B bedeuten, daß daraus ein Seitenzug vorhanden ist.

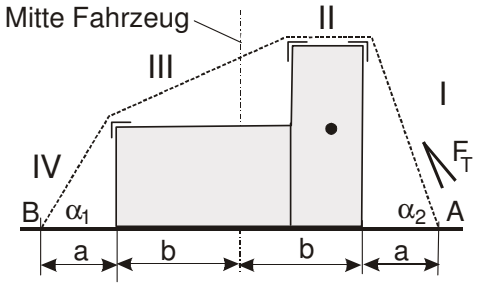


Abb. 4.12. Ungleiche Zurrwinkel aus der Ladung

Ein Beispiel für eine Zurrung mit ungleichen Zurrwinkeln, weil nicht mittig gestaut wurde, zeigt Abb. 4.13. Der vertikale Kraftanteil in α_{Z2} ist gering.

Abb. 4.13 Ungleiche Zurrwinkel bei außermittiger Stauung[2)]

4.3.3 Mindestgröße des Zurrwinkels

Der Wirkmechanismus der Niederzurrtechnik, Erhöhung der Anpresskraft durch Niederzurren, erfordert einen Grenzwert für den Zurrwinkel. Sinnvoll ist es, von Niederzurrung zu sprechen, wenn der Zurrwinkel größer als 70 Grad ist, da dann die Niederzurrwirkung noch relativ groß ist (89 %).

4.4 Umschlingungswinkel α_U

4.4.1 Begriff

Eine besondere Bedeutung hat die Gurtumschlingung am Kantenschutz (oder Kantengleiter) in der Ladungssicherung, Abb. 4.14 und 4.15. Die Gurtumschlingung hat darüber hinaus große Bedeutung im Maschinen- und Motorenbau und auch im Bauwesen (Spannseile in vorgespannten Brücken).

An einem Kantengleiter wird, wenn eine Vorspannung F_1 aufgegeben wird, die Gurtkraft F_2 „hinter“ der Umschlingung verringert, Abb. 5.1. Dieses Phänomen wird als Gurtkraftabbau bezeichnet.

In diesem Fall, Abb. 4.14, hat der Umschlingungswinkel α_U (= 90 Grad) die Größe des Zurrwinkels α_Z beträgt 90 Grad.

Ein Gurt, der nur auf einer Ladung aufliegt, wenn also kein Umschlingungswinkel vorhanden ist, wird auch keine Niederzurrwirkung ausüben, Abb. 4.15.

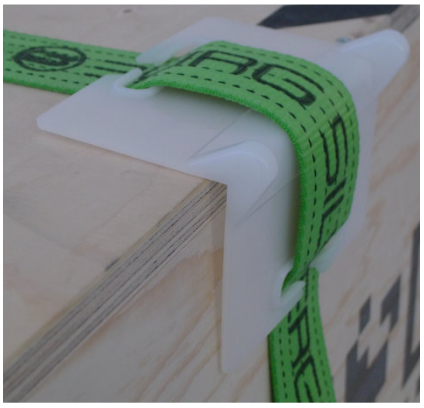


Abb. 4.14. Kantengleiter

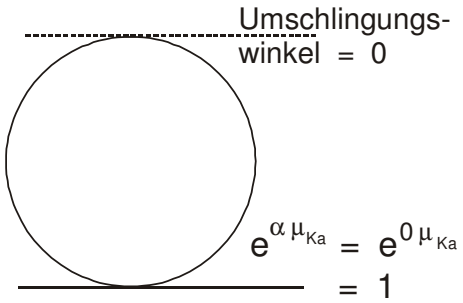
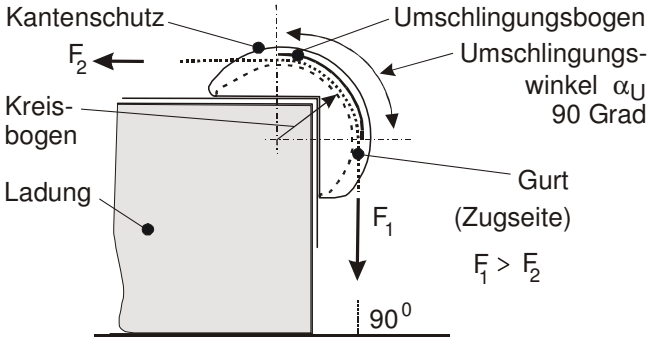


Abb. 4.15. Ohne Umschlingungswinkel

Beispiele für die Ermittlung von Zurrwinkeln sind in Anlage 3 zu finden. In Anlage 8 ist ergänzende Theorie zum Kantenschutz eingefügt.

Wichtige Begriffe und Festlegungen zum Kantenschutz sind in Abb. 4.16 enthalten.



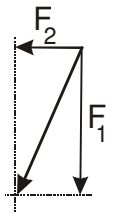


Abb. 4.16. Umschlingungswinkel

4.4.2 Länge Umschlingungsbogen

Im Regelfall ist die Bogenlänge eines Umschlingungsbogen bei den gängigen Kantengleitern zu kurz, als daß sie bei der Gurtdehnung berücksichtigt werden muß. Bei einem Fall, wie in Abb. 10.5 dargestellt, muß die Dehnung im Bogen allerdings erfasst werden. In Abb. 4.17 ist der Umschlingungsbogen U mit den für eine Berechnung wichtigen Punkten dargestellt

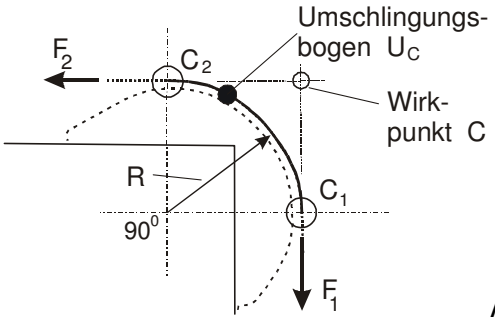


Abb. 4.17. Umschlingungsbogen im Punkt C

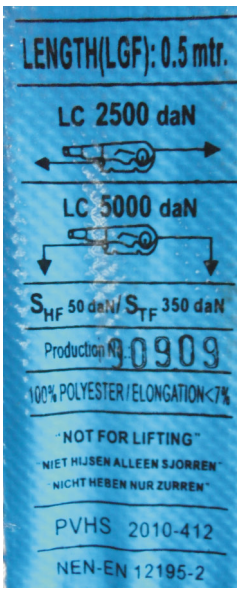
Die Länge ergibt aus:

$$U = \frac{R \ \pi \ \alpha}{180^0}$$

4.5 Zurrkraft

4.5.1 Größe

Für die Zurrkraft F_T ist, wie in den einschlägigen Richtlinien vorgegeben, der maximale Wert kleiner als 0,5 LC (Lashing Capacity) einzusetzen, Abb. 4.18. Die Reißfestigkeit eines Zurrgurts liegt dann bei 3 LC. Inwieweit der Wert von 1000 daN mit einer Handvorspannung STF (Standard Tension Force = Standardvorspannkraft kleiner/gleich 0,5 LC) von 750 daN erreicht wird, bleibt dann noch offen, denn nach Richtlinie wird davon ausgegangen, daß mit einer Handkraft SHF (Standard Hand Force = Standardhandkraft) die Vorspannungskraft erreicht wird.



Nur für Heben

Niederzurren

LC größte zulässige
Zurrkraft (Dehnung 7%)
Reißlast 3 LC

SHF/STF
hier Übersetzung ca. 1:7

Polyester PES (blau)
PA (grün)
PP (braun)

gemäß Richtlinie
. . .

Abb. 4.18. Angaben auf Zurrgurtanhänger

4.5.2 Spannen von Gurten

4.5.2.1 Einführung

Die folgenden Ausführungen sollen sich nur auf das Zurrmittel Gurt beziehen. Das Spannen eines Gurtes hat eine Dehnung zur Folge. Im Folgenden soll eine Möglichkeit zur Berechnung der Gurtdehnung behandelt werden. Es kann damit die Verlängerung der Gurtlänge beim Aufbringen einer Vorspannung unter Berücksichtigung der Dehnung am Kantenschutz ermittelt werden. Darüber hinaus und das hat die größere Gewichtung, kann die Gurtverlängerung bis zum Reißen des Gurts bei einem Verschub einer Ladung berechnet werden.

4.5.2.2 Zum Verfahren

Es wird eine „Standardniederzurrung“ (unterbreite Ladung, umschlingende Zurrung, einseitiger Anzug, symmetrische Abspannung) zunächst in „Elemente“ zerlegt. Die Unterteilung erfolgt für die einzelnen Sektionen, Abb. 4.3, weil sich in den Sektionen Elemente mit unterschiedlichen Eigenschaften in einer Reihenschaltung von Kräften in zwei „Strängen“ befinden, die durch die Lage der Spannvorrichtung entstehen. Es wird die Zurrung A nach B über E und C in gestreckter, aber ungespannter Darstellung gezeigt. In den Sektionen sind unterschiedliche „Elemente“ (= rheologische Elemente) eingezeichnet, die symbolhaft mechanische Eigenschaften bei Einwirkung von äußeren Kräften beschreiben. So soll das mit „Gurt“ bezeichnete „Element“ andeuten, daß es Federungseigenschaften hat, Abb. 4.19.

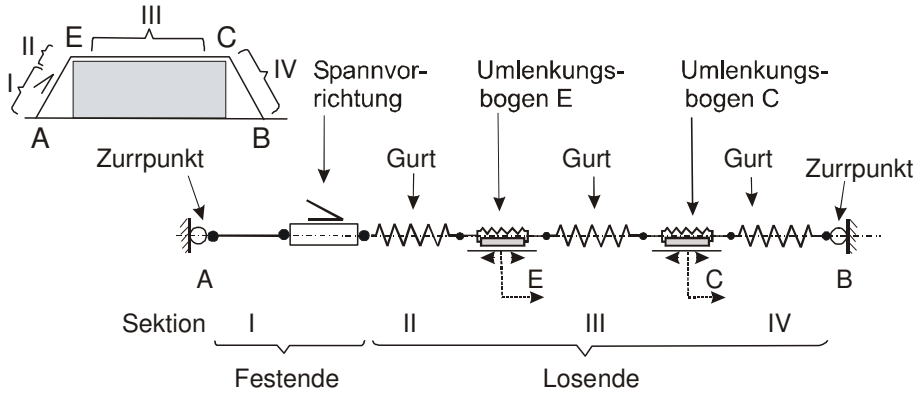


Abb. 4.19. Einteilung einer Niederzurrung mittels rheologischer Elemente

Um das Verhalten einer Niederzurrung rechnerisch nachbilden zu können, wird auf die Methode zur Modellierung eines Systems mit rheologischen Elementen zurückgegriffen. Es wird mit diesen zunächst ein mathematisch-physikalisches Modell entwickelt, das als rheologisches Modell bezeichnet werden soll [Beispiel auch in 17]. Damit können die Eigenschaften einer vollständigen Zurrung nachgebildet werden.

Im Folgenden wird eine Zurrung aus diesen rheologischen Elementen zusammengesetzt. Rheologische Elemente für diesen Fall können sein: „Elemente“ mit Elastizität (Federung, Kraft-Weg-Abhängigkeit), mit Viskosität (Dämpfung, Kraft-Zeit-Abhängigkeit), mit Plastizität (Reibung) und weiteren. Die Besonderheit einer Niederzurrung ist in diesem Modell der Gurtkraftabbau am Kantenschutz. Für die „Ableitung der Reibungskräfte“ aus dem Kraftfluß

im Gurt soll ein eigenes rheologisches Modell benutzt werden. Das Element muß sowohl die Dehnung des Gurts im Umlenkungsbereich erfassen als auch die dabei auftretende Reibungskraft. Für den Bereich Ladungssicherung konnte eine Benutzung von rheologische Elementen bisher nur in [17] festgestellt werden.

1. Sektion I

In der Sektion I wird beim Aufbringung einer Vorspannung mit Einschluß der Ratsche kaum eine Dehnung (Gurt vernäht mit umgelegten Gurtteilen) auftreten. Eine nicht vorhandene Dehnung sei aber das entscheidende Kriterium, Abb. 4.20, für eine Art eines rheologischen Elements.

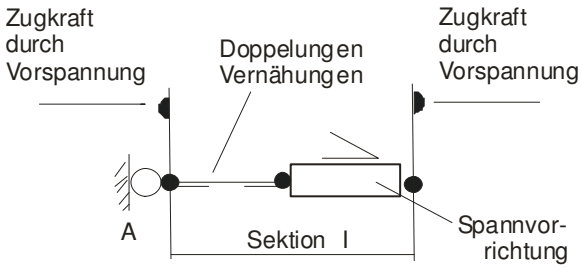


Abb. 4.20. Unelastisches Element

Daß es durchaus auch Zurrungen gibt, die entweder völlig starr oder teilweise starr sind, ist den Abb. 4.21 und 4.22 zu entnehmen. In 4.22 wird eine Niederzurrung dargestellt, in die Stangen eingefügt sind, sog. Vorläufer, um die Dehnlängen einer langen Zurrung zu reduzieren (GDV-Versuche [16]).

Abb. 4.21. „Starre“ Niederzurrlösung

Abb. 4.22. Teilweise starre

2. Sektion II, III und IV

In diesen Sektionen liegt eine Federung vor, wie sie bei vielen technischen Bauteilen im Maschinenbau auftritt, Abb. 4.23. Eine Federung bedeutet im Gegensatz zu einer Dämpfung eine reine Wegabhängigkeit der Kraft. Je größer die Kraft ist, desto größer wird der Gurt gedehnt. Dabei muß aber nicht nur ein linearer Zusammenhang vorhanden sein (Federkonstante), sondern es kann auch eine Progressivität oder Degressivität vorliegen (Federrate). Die Wegabhängigkeit bedeutet auch, daß es keine dynamische Federrate gibt. Die Kraft-Weg-Abhängigkeit wird mittels Federraten in entsprechenden Diagrammen beschrieben.

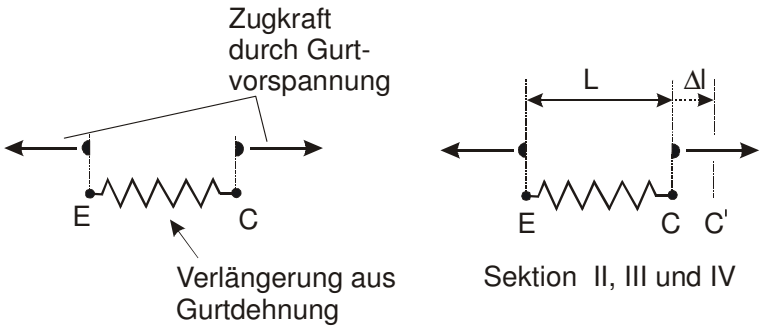


Abb. 4.23. Rheologische Darstellung einer „Elastizität“

3. Umschlingungsbogen in E und C

Das mechanische Verhalten in einer Gurtumschlingung ist durch zwei Wirkmechanismen bestimmt. Einmal wird die *Dehnung* in dem Gurt zu beachten sein und zweitens die *Reibung* zwischen Gurt und Kantenschutz. Wäre keine Dehnung vorhanden, würde Haftreibung wirken und, bei ausreichender Reibungskraft, die Ladung würde „mitgenommen“ werden, d. h. sie wird bewegt.

Ist die Gegenkraft zu groß, wird sich der Gurt durchrutschen und sich dabei dehnen. Insgesamt wird eine Kraftdifferenz zwischen Eingang und Ausgang bestehen. Ein Teil der Gurtkraft wird über die Ladung und die Ladefläche „ausgeleitet“. Dieser Anteil ist nicht reversibel. Über die Umschlingungsbogen in E und C werden Kräfte „ausgeleitet“. Die Betrachtungsweise, den Umschlingungsbogen als eine Ausleitung von Kräften anzusehen, ist insofern notwendig, als sonst kein Kräftegleichgewicht zwischen den Zurrpunkten A und B besteht, Abb. 4.24.

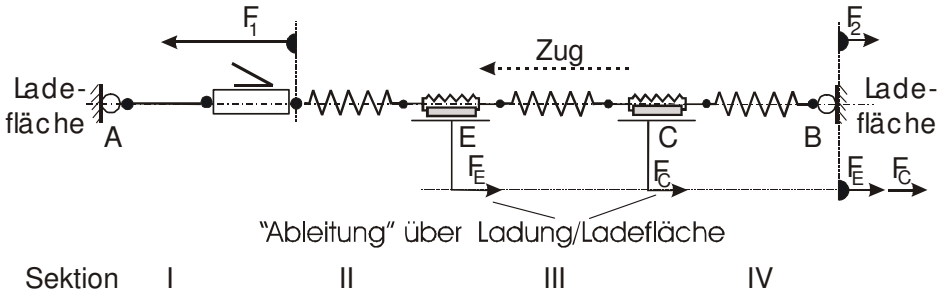


Abb. 4.24. Begriff „Ausleitung“ von Kräften im *Kraftflußschaubild*

Es gilt:

$$F_1 = F_2 + F_E + F_C$$

Für die folgende Berechnung wird für Gurt aber in Abweichung von einem Kraft-Weg-Diagramm ein Kraft-Dehnungsdiagramm als Grundlage gewählt, Abb. 4.25. Das Diagramm entspricht im wesentlichen einem realen Diagramm aus einem Zugfestigkeitsversuch für einen Gurt. Die folgenden Rechengänge fußen auf diesem Diagramm. Es soll nur das Prinzip des Rechenweges dargestellt werden. Der Kurvenzug wurde linearisiert, damit vereinfacht sich der Rechengang. Da auch, wie fast immer im Maschinenbau Reibung auftritt, erscheint die Vereinfachung durch Linearisierung als vertretbar. Ohne daß die freie Einspannlänge zu einem Dehnungsdiagramm bekannt ist, ist ein vorhandener Kurverzug allerdings nicht ver-wendbar.

Ohne ein Gleiten im Umschlingungsbogen (μ_{Gleit}) würde am Ende der Umschlingung keine Kraft vorhanden sein, um den Gurt in der nächsten Sektion zu spannen, es sei denn die Ladung wird mitgenommen. Die Darstellung der Elemente in Abb. 4.26 soll diese beiden Wirkmechanismen, Dehnung bei gleichzeitiger Reibung, deutlich machen.

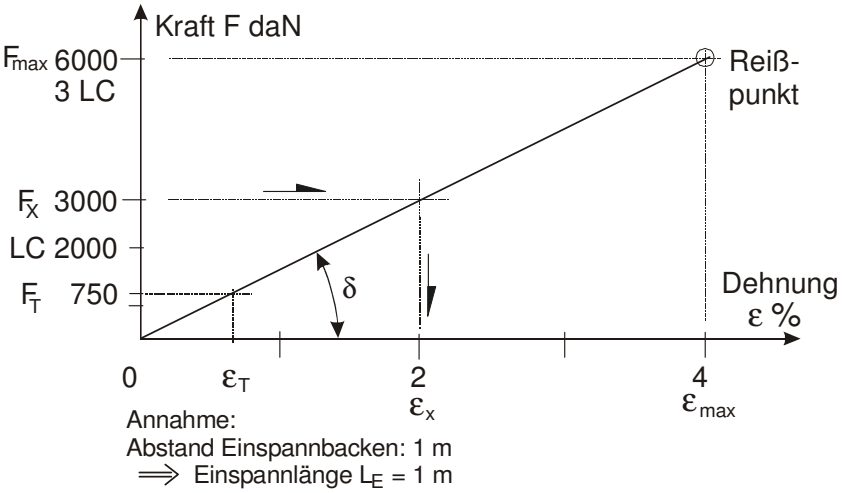


Abb. 4.25. Kraft-Dehnungs-Diagramm (Dehnungsrate $c_D = \tan \delta$)

4.5.2.3 Kraftflußdiagramm

Aus diesen rheologischen Elementen kann dann für jede Zurrung ein *Kraftlfußdiagramm* erstellt werden. In Abb. 4.26 ist zunächst der Kraftverlauf qualitativ in *einem* Umschlingungsbogen abgebildet.

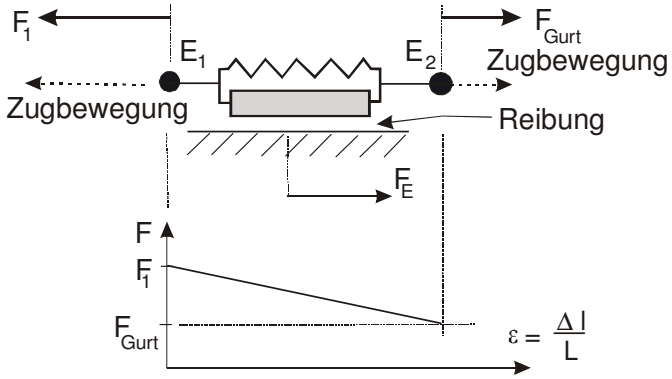


Abb. 4.26. Kraftabbau im Umschlingungsbogen

Die dargestellte Methode kann nun für eine vollständige Zurrung benutzt werden, um auch quantitativ den Kraftverlauf berechnen zu können, Abb. 4.27.

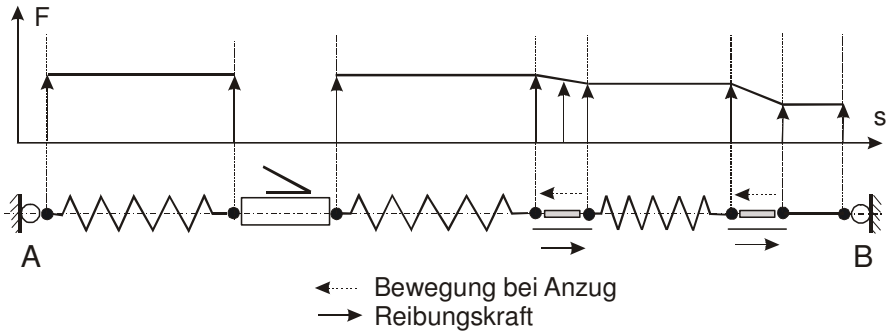


Abb. 4.27. Kraftflußdiagramm

Mittels dieser Methode kann aber auch ein Ladungsverschub bis zur Reißgrenze des Gurts gerechnet werden. In einem Kraftflussdiagramm kann dann der Kraftverlauf in den einzelnen Sektionen eingetragen werden.

4.5.2.4 Berechnungsbeispiel

Grundlage für eine Gurtdehnungsberechnung soll die in Abb. 4.28 dargestellten Zurrung mit den Abmessungen sein und das Kraft-Dehnungsdiagramm, Abb. 4.25. Danach soll in Sektion I ein unelastisches Element nach Abb. 4.20 vorliegen.

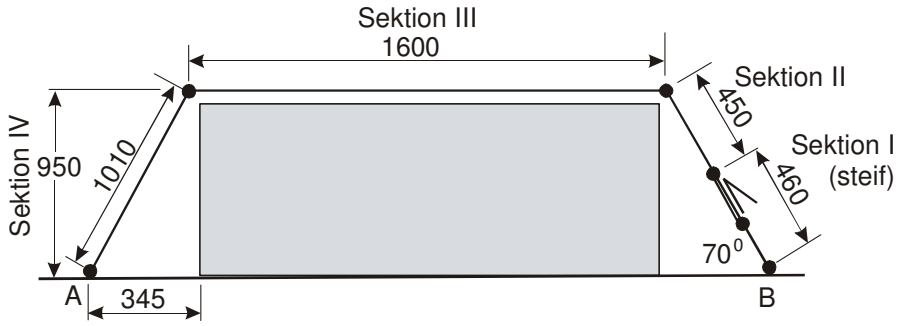


Abb. 4.28. Zugrunde gelegte Zurrung

4.5.2.4.1 Berechnungsweg

Die Dehnung des Gurts bei Einwirkung von F_T (sei 750 daN) wird für eine Einspannlänge von 1 m wie folgt allgemeinbeschrieben:

$$\text{Dehnung } \varepsilon = \frac{\Delta l}{L} = \frac{\text{Verlängerung}}{\text{Ursprüngl. Länge}}$$

für die maximale Dehnung bei Einspannlänge $L_E = 1\text{m}$

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Delta l_{max}}{L_E} \qquad \text{(Gl. 4.1)}$$

oder allgemein für eine beliebige Einspannlänge L und für eine beliebige Verlängerung l_x bei einer Kraft F_x:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l_x}{L} \qquad \text{(Gl. 4.2)}$$

Mit der Dehnung ε_x muß also die Ausgangslänge berücksichtigt werden. Ebenso gilt die Proportionalität (Annahme L_E = 1 m) nach Abb. 4.25:

$$\frac{F_{max}}{F_x} = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_x} = \frac{\Delta l_{max} \; \cancel{L_E}}{\cancel{L_E} \; \Delta l_x} \qquad \text{(Gl. 4.3)}$$

Wird bei gleicher Einspannlänge L_E eine Dehnkraft von F_x eingesetzt, stellt sich eine Verlängerung von Δl_x ein.

Eine weitere Größe soll eingeführt werden, die Dehnungsrate c_D. Sie soll das Verhältnis von spannender Kraft F und der Dehnung ε sein.

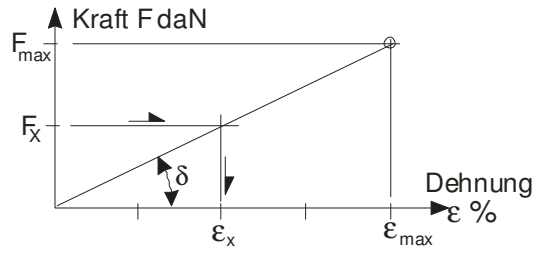


Abb. 4.29. Dehnungsrate

Die Dehnungsrate c_D ist stellt den Tangens des Steigungswinkel der Geraden (Annahme: idealisierter Verlauf) in Abb. 4.26 dar.

$$c_D = \frac{F_{max}}{\varepsilon_{max}} \left(= \frac{F_x}{\varepsilon_x} \right) \qquad \text{(Gl. 4.4)}$$

Für ein Diagramm in Abb. 4.26 ergibt sich eine Dehnungsrate von:

$$c_D = \frac{F_{max}}{\varepsilon_{max}} = \frac{6000 \text{ daN}}{4 \%}$$

$$c_D = 1500 \text{ daN pro } 1\% \text{ Dehnung} \qquad \text{(Gl. 4.5)}$$

Wird Gleichung 4.1 und die Gleichung 4.3 in Gleichung 4.4 eingefügt, ergibt sich

$$c_D = \frac{F_x \bullet L_E}{\Delta l_x}$$

Nach Δl_x aufgelöst:

$$\Delta l_x = \frac{F_x \bullet L_E}{c_D} \qquad \text{(Gl. 4.6)}$$

Für ein F_x kann nun eine Spannkraft angesetzt werden, z. B. F_T. Das Diagramm Abb. 4.26 ist für eine Einspannlänge L_E von 1m gemessen worden. Damit lässt sich die Gurtverlängerung

für jede Länge eines Gurts in einer Sektion bei einer beliebigen Gurtkraft errechnen, z. B. auch für die Reißlast bei 3 LC. Die Dehnungsrate muß gesondert errechnet werden.

Damit ergibt sich ein Berechnungsweg wie folgt:

1. c_D errechnen (Gl. 4.4),
2. die am Gurt anliegende Kraft F_x ermitteln, z. B. F_T = 750 daN.
3. Kraft-Dehnungs-Diagramm zugrundelegen (Einspannlänge feststellen) und auf die vorliegende „Einspannlänge“ umrechnen.
4. Berechnung der Kräfte an den Knoten der einzelnen Sektionen A beginnend von A, Abb. 4.28.

Für das in Abschnitt 4.6.3.2 durchgerechnete Beispiel wird die Gleichung 4.7 wie folgt verwendet:

$$\Delta l_{x,tat} = \frac{L_{x,tat}(m) \bullet F_T(daN) \bullet 10}{c_D(daN/\%)} \qquad \text{(Gl 4.7)}$$

4.5.2.4.2 Beispiel

Für die in Abb. 4.28 angenommene Niederzurrung ergibt sich damit:

1. Sektion I

Dieser Teil soll als geringfügig elastisch und damit als vernachlässigbar angesehen werden.

2. Sektion II

Bei einer aufgebrachten Anzugkraft von 750 daN errechnet sich eine Dehnung von

$$\Delta l_x = \frac{F_x \bullet L_{1m}}{c_D} = \frac{750\ daN \bullet 1\ m\ \%}{1500\ daN} = \frac{750\ daN \bullet \cancel{1\ m} \bullet 1000\ mm \bullet 1}{1500\ daN \bullet \cancel{1\ m} \bullet 100}$$

$$\Delta l_x = \frac{F_x \bullet L_{1m}}{c_D} = \frac{750\ daN \bullet 1\ m\ \%}{1500\ daN} = \frac{750\ daN \bullet \cancel{1\ m} \bullet 1000\ mm \bullet 1}{1500\ daN \bullet \cancel{1\ m} \bullet 100}$$

$$\Delta l_x = \frac{750\ mm}{150}$$

$$\Delta l_x = 5\ mm$$

Da aber nur eine Gurtlänge von 0,45 m für L_1 vorliegt, muß der Wert auf die vorliegende Länge von 0,45 m bezogen umgerechnet werden.

$$\Delta l_{x,tat} = 5\ mm \bullet 0{,}45 = 2{,}25\ mm$$

3. Sektion III

Zunächst muß die Gurtkraft nach dem Umschlingungsbogen berechnet werden. Angenommen wird: Umschlingungswinkel α_U von 70 Grad und μ_G = 0,3. Damit ergibt eine Kraft F_2 von 520 daN.

$$\Delta l_{x\,III} = \frac{F_x \bullet L}{c_D} = \frac{520\ daN \bullet 1\ m}{1500\ daN \bullet 100}$$

$$\frac{520\ daN \bullet 1\ m \bullet 1000\ mm}{1500\ daN \bullet 1m \bullet 100}$$

$$\Delta l_{x\,III} = 3{,}46\ mm \bullet 1{,}6 = 5.54\ mm$$

3. Sektion IV

Eine weitere Gurtkraftreduzierung ergibt dann eine Gurtkraft von

$$\Delta l_{x\,IV} = \frac{F_x \bullet L}{c_D} = \frac{360\ daN \bullet 1\ m}{1500\ daN \bullet 100}$$

$$\frac{360\ daN \bullet 1\ m \bullet 1000\ mm}{1500\ daN \bullet 1m \bullet 100}$$

$$\Delta l_{x\,IV} = 2{,}4\ mm \bullet 1{,}01 = 2{,}24\ mm$$

Damit ergibt sich eine Gesamtverkürzung des Gurts von 2,25 + 5,54 + 2,24 = 7.13 mm

5 Die Eytelweinsche Gleichung

5.1 Einführung

Wird ein Gurt in einem Bogen um eine Ladungskante, bzw. um einen Kantenschutz, gelegt und gespannt, Abb. 4.15 bis 4.18, wird die Gurtkraft reduziert. Die Gurtkraft wird nach dem Bogen geringer sein. Die Verringerung wird von zwei Faktoren bestimmt, einmal dem Umschlingungswinkel und zweitens von der Gleitreibung zwischen Gurt und dem Kantenschutzmaterial.

Ursache für die Gurtkraftreduzierung ist die Dehnung im Zurrmittel mit einer gleichzeitigen Gleitreibung beim Wirken einer Zugkraft. Je länger der Umschlingungsbogen wird, desto geringer wird die Kraft F_2 sein, Gleichung 5.1. Eine maschinenbau-technische Betrachtungsweise des Phänomens wird in [4] gegeben, eine aus Sicht der Technischen Mechanik z. B. in [5].

Ab einer bestimmten Bogenlänge wird keine Dehnung und damit keine Gleitreibung mehr auftreten. Dieser Fall wird bei einer Niederzurrung selbst bei hohen Gleitreibungszahlen (Coulombsche Reibung) nicht auftreten.

Ein erster Berechnungsansatz für das Problem, Schiffe mittels „Umschlingungen“ um einen Poller festzumachen, wurde 1701 von dem Franzosen Sauveur entwickelt. 1751 wurde dieser Ansatz von Leonhard Euler (1707 – 1783) [7] aufgegriffen und die heute bekannte Formulierung entwickelt. Dieser Ansatz wurde dann 1806 in einer Schrift in der Berlinischen Verlagsanstalt von Johann Albert Eytelwein (1764 – 1848) [8] veröffentlicht. Im Maschinenbau wird die Formel bei Riementrieben angewandt.

5.2 Gurtkraftabbau am Kantenschutz

Nach Abb. 5.1 gilt die Gleichung 5.1:

$$F_2 = \frac{F_1}{e^{\alpha \mu_K}} \qquad \text{(Gl. 5.1) e-Formel}$$

Die Gleichung 5.1 zeigt, daß ein erheblicher Teil der Anzugkraft durch Reibung (Gleitreibung!) am Kantenschutz bei gleichzeitiger Dehnung des Gurtes in der Auflage „verloren“ geht („abgeleitet“ wird). Die Gleitreibungszahl μ_K sollte deshalb niedrig liegen. Weitere Ausführungen zur Eytelweinschen Gleichung sind in Anlage 9 zu finden.

Diese Gleichung gilt nur unter den Bedingungen, daß der Gurt eine Kante rechtwinklig überspannt und daß der Radius konstant ist, also z. B. keine Parabelform hat. Die Bedingung Rechtwinkligkeit liegt bei einer Cross-Over-Laschingsicherung nicht vor. Der Umschlingungsbogen wird länger als bei einer rechtwinkligen Führung!

Für den Umschlingungswinkel α_U soll bei mehreren Winkeln hintereinander mit der Summe der Winkel gerechnet werden.

„Hinter“ den beiden Kantengleitern wirkt in dem Gurt statt der 450 daN Vorspannung nur noch 150 daN. Versuche zum Gurtkraftabbau sind in Anlage 7 aufgenommen.

Beispiel Umschlingungswinkel (im Bogenmaß) $\alpha = 70^0$ (2 Mal![3])
μ_K Gleitreibungszahl Gurt/Kantenschutz (beim Anziehen)[4]
= 0,45
F_1 = 450 daN Handkraft

Die Kraft F_2 hinter der Umschlingung errechnet sich dann mit:

$$F_2 = \frac{450\ daN}{e^{1,1}} = \frac{450\ daN}{3} = 150\ daN$$

Abb. 5.1 soll den Zusammenhang zwischen dem Zurrwinkel und dem Umschlingungswinkel bei einer ladeflächenbreiten Ladung aufzeigen.

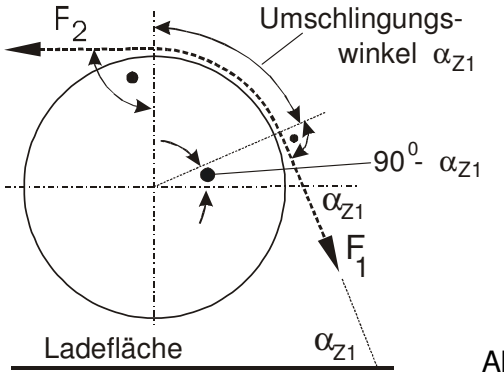


Abb. 5.1. Gurtkraftabbau am Kantenschutz

Es gelten folgende Umformungen:

$$\gamma = \alpha + \beta$$
$$e^a \bullet e^b = e^{a+b} \qquad \text{(Gl. 5.2)}$$

Abb. 5.2 zeigt, daß der Umschlingungswinkel auch weiteren Stellen der Ladungssicherung eingesetzt wird.

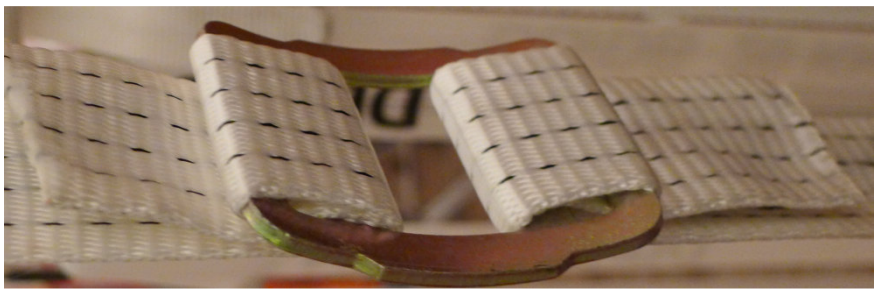


Abb. 5.2. Reibungswirkung am Bandverschluß

Für zwei Umschlingungen hintereinander ergibt sich nach Abb. 5.3:

[3] Einzusetzen im Bogenmaß: $140\ \pi / 180 = 2,44$
[4] Gleitreibungskoeffizient, weil der Gurt dehnungsfähig ist und beim Anziehen „durchgezogen" wird.

$$F_2 = \frac{F_1}{e^{\gamma \mu_{Ka}}} \qquad \gamma = \alpha + \beta \qquad e^a \bullet e^b = e^{a+b} \qquad \text{(Gl. 5.3)}$$

$$F_3 = \frac{F_1}{e^{(\alpha+\beta)\,\mu_K}}$$

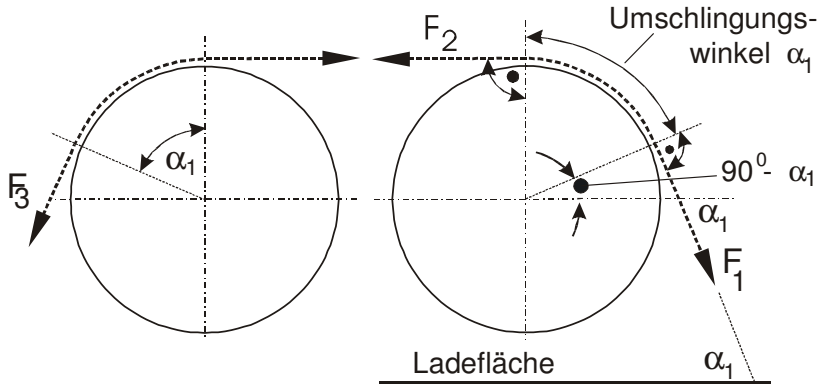


Abb. 5.3. Reihenschaltung von Umschlingungswinkeln

Wie Versuche in [2] gezeigt haben, kann der Gurtkraftabbau von der einen zur anderen Seite beträchtlich sein, wenn die Umschlingungswinkel und die Gleitreibungszahl hoch sind. Eine bisher mit Versuchen nicht ausreichend bearbeitete Frage ist, ob und ggf. unter welchen Bedingungen sich Gurtkraftunterschiede im Fahrbetrieb abbauen können. Bei den zitierten Versuchen konnte ein Ausgleich nicht festgestellt werden. Die Reibungszahl lag allerdings mit 0,45 sehr hoch (Anlage 7).

Anmerkung: Üblicherweise gilt die Regel für die Anzahl der Niederzurrungen an einer Ladung: „Einer ist keiner." Es sollen also danach stets zwei Gurte oder ein Vielfaches von zwei gesetzt werden, also 2,4,6 usw. Wenn dann jede zweite Spannvorrichtung auf die andere Seite gesetzt wird, wird der Seitenzug ausgeglichen! Bei einer Beladung von der Längsseite müsste dann aber die zweite Seite zugängig sein.

Auch die Reibungszahl lässt sich aus den unterschiedlichen Gurtkräften durch eine Umstellung der Formel ermitteln.

$$\mu_K = \frac{180^0 \bullet \ln \frac{F_1}{F_2}}{\pi \bullet \alpha} \qquad \text{(Gl. 5.4)}$$

Ausführungen zur Eytelweinschen Gleichung sind auch in Anlage 9 zu finden.

6 Berechnungsformeln vorhandener Richtlinien

6.1 Einführung

Im Folgenden werden die Berechnungsformeln aus verschiedenen Regelwerken ohne Kommentierung gegenübergestellt.

6.2 VDI 2702:1990

Die folgende Formel ist in der VDI 2702 in der Fassung von 1990 unter Punkt 4.1 als Berechnungsgrundlage für Niederzurrungen standfester Ladeeineinheiten (also nicht kippgefährdeter Ladeeinheiten) angegeben.

$$\underbrace{f \cdot G}_{\text{von außen wirkende Kraft z.B. 0,8 m g in Fahrtrichtung}} = \underbrace{\mu \cdot G}_{\text{Rückhaltekraft aus Eigengewicht}} + \underbrace{\mu \cdot 2 \cdot n \cdot Z_{iv}}_{\text{Reibungskraft aus Niederzurrung}}$$

(Gl. 6.1)

Diese Gleichung gilt für einen Zurrwinkel von 90 Grad. Da in der Regel eine Niederzurrung unter einem Zurrwinkel, Abb. 4.2, angebracht wird, ergibt sich eine abgewandelte Formel, die in Abweichung von dem Richtlinientext als Sinusfunktion angegeben wird. Gl. 6.1 lautet dann umgeformt für die Vorspannkraft im Zurrmittel:

$$Z_i = \frac{G \cdot (f - \mu)}{2 \; n \; \mu \; \sin \alpha_Z}$$

- G: Gewichtskraft in daN
- f: g-Wert, z.B. 0,8
- μ: Gleitreibungszahl
- α_Z: Zurrwinkel
- μ: Gleitreibungszahl
- n: niedergespannt mit n Überspannungen
- 2: ohne Gurt kraftminderung (k = 2)
- Z_i: Mindestvorspannkraft im Zurrmittel i

(Gl. 6.2)

Für µ wird aus Sicherheitsgründen (Vertikalkraftschwankungen Aus- und Einfederung) statt der Haftreibungszahl die Gleitreibungszahl verwendet.

6.3 Berechnung zur Niederzurrkraft nach 12 195:2003

Erkennbar ist, daß die Gleichungen unter 6.1 und 6.2 gleich sind. Gleichung 6.3 enthält im Nenner den sog. k-Faktor, der den Gurtkraftabbau am Kantenschutz erfassen soll.

In der europäischen Norm DIN EN 12 195-1:2003 ist dazu festgelegt:

„k = 1,5 bei Verwendung einer Spannvorrichtung für das Zurrmittel."
„k = 2,0 bei Verwendung eines Zurrmittel mit zwei Spannvorrichtungen je Zurrmittel oder . . ."

Hier wird damit ein fester Wert für den Abbau der Gurtkraft am Kantenschutz vorgegeben.

$$F_T = \frac{(c_{x,y} - \mu_D \bullet c_z) \bullet m \bullet g}{n \; k \; \mu_D \sin \alpha}$$

- $c_{x,y}$: Beschleunigungsbeiwert in x-, y-Richtung
- μ_D: Gleitreibungszahl
- c_z: Beschleunigungsbeiwert in z = 1, vertikal
- m: Ladungsmasse
- g
- α: Zurrwinkel
- μ_D: Gleitreibungszahl
- k: K-Faktor
- n: Gurtanzahl
- F_T: Vorspannkraft am Spannmittel (Ratsche, Winde, . . .)

(Gl. 6.3)

Als Berechnungsformel für den k-Faktor wird die Gl. 6.4 nach 12 195-1:2003 verwendet, wenn nicht ein konstanter Faktor angenommen werden soll.

$$k = \frac{1}{e^{\alpha \mu_G}} = 1{,}5 \qquad \text{(Gl. 6.4)}$$

$$F_2 = F_1 \cdot k$$
$$e^x = y$$
$$x = \ln y \qquad \text{(Gl. 6.5)}$$

$$e^{\alpha \mu_G} = \frac{1}{1{,}5} = 0{,}6\overline{6}$$
$$e^x = 0{,}6\overline{6}$$
$$x = \ln 0{,}6\overline{6}$$
$$\alpha \mu_G = 0{,}4054652 \qquad \text{(Gl. 6.6)}$$

Für den Exponenten $\alpha \bullet \mu_G$ ergibt sich 0,405465, wenn ein k von 1,5 zugrunde gelegt wird. Damit wird in einem α-μ-Diagramm, Abb. 6.1, eine hyperbelartige Kurve die Funktion beschreiben. Variable sind der Zurrwinkel und Gleitreibungswert $\mu_{Ka,G}$.

Im realen Fall werden ein Winkel und ein Reibwert vorgegeben und der k-Faktor (Gurtkraftabbau) damit errechnet. Es wurden eine Reihe von Kombinationen errechnet, Tabelle 6.1. Diese k-Werte sollen als „tatsächlicher k-Wert" bezeichnet werden und mit k_{tat} kenntlich gemacht werden.

Abb. 6.1 soll auch deutlich machen, daß die tatsächlichen k-Werte für eine spezielle Niederzurrung als Punkt in dem Diagramm erscheinen und in jedem Feld liegen können. Der k-Wert ist als Bezeichnung neu. Der Gurtkraftabbau ist dagegen nicht neu. So kannte die VDI 2702 in ihrer Erstfassung bereits die e-Formel als Berechnungsmöglichkeit!

Die e-Formel ist zur Verwendung in der Praxis ungeeignet. Allerdings ist es, wie noch gezeigt werden soll, auch nicht vertretbar, den Gurtkraftabbau zu ignorieren. Insbesondere bei überbreiten Ladungen hat das Sicherheitsauswirkungen. Wie das Diagramm in Abb. 6.1 zeigt ergibt ein fest vorgegebener Wert deutliche Abweichung von k-Faktoren für reale Fälle (Daten in Übersicht 6.1).

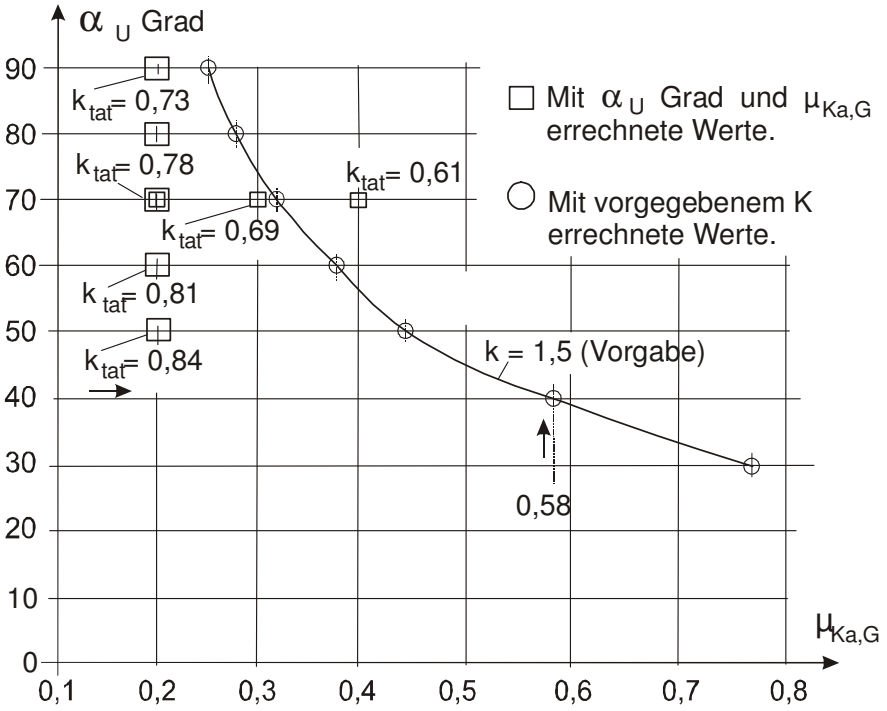


Abb. 6.1. k-Werte im Vergleich

Tabelle 6.1. Aus Winkel und Reibungszahl errechnete k_{tat}-Werte

	α_U in Grad	$\frac{\alpha \pi}{180}$	$e^{\frac{\alpha \pi \mu}{180}} = x$	$k = \frac{1}{x}$
$\mu_G = 0{,}2$	0		1	1
	50	0,872	1,19	0.84
	60	1,047	1,23	0,81
	70	1,22	1,28	0,78
	80	1,39	1,32	0,75
	90	1,57	1,37	0,73
	100			
	110			

6.4 Feststellungen zum k-Faktor der Richtlinien

Die Berechnungsformeln nach VDI 2702:1990 und nach 12 195:2003 zeigen die gleichen Komponenten und die gleiche Struktur. Die Einführung eines konstanten Gurtkraftfaktors von 1,5 anstelle von 2 in der VDI 2702 zeigt, daß die Mechanik des Gurtkraftfaktors nicht begriffen wurde oder bewußt ignoriert wurde. Das Ignorieren wäre verständlich, wenn deutlich geworden wäre, daß das Thema in einer Norm als nicht umsetzbar erscheint. Die VDI 2700 enthält als Basisrichtline zwar den klar erkennbaren Hinweis, daß sie nur für Verladen zugeschnitten ist, die VDI 2702 dagegen nicht. Nachdem immer wieder bei vielen Sachverständigen erkennbar ist, daß sie die in diesen beiden Richtlinien niedergelegte vereinfachte Mechanik für die tatsächlich wirkende ansehen, ist diese Lücke als problematisch anzusehen. Keine der in der Auflistung Tabelle A 2.1 in der Anlage 2 enthaltenen Formeln entspricht diesen beiden Formeln.

Tabelle A 2.1 Anlage 2 zeigt Berechnungsformeln in der Zusammenstellung für verschiedene Zurrvarianten. In der Spalte k-Faktor steht vor Zurrspannung F_T eine Zahl, der k-Faktor, die sich ergibt , wenn in die Formel drei Größen eingesetzt werden:

1. Die Summe der Umschlingungswinkel α_U,
2. die Zurrwinkel und
3. die Lage der Vorspanneinrichtung.

Damit ergibt sich die Möglichkeit die k-Faktoren verschiedener Zurrtechniken zu vergleichen, da jeweils die gleichen Größen für die Umschlingungswinkel, bzw. die Zurrwinkel gewählt wurden. Gleichzeitig wird deutlich, daß die Vorgabe eines konstanten k-Faktors völlig unsinnig ist [14]. Die Konstantvorgabe von k = 1,5 kann bestenfalls bei einigen Zurrvarianten des Typs 1 verwendet werden (ladeflächenbreite Ladung, symmetrische Zurrung mit einseitiger Vorspanneinrichtung und standfest). Denkbar wäre allenfalls einen Konstantfaktor mit Ober- und Untergrenzen anzugeben. Sinnvoller statt Formeln erscheinen es, in Richtlinien geeignete Tabellen aufzunehmen.

In den letzten Zeilen der Tabelle 6.1 sollte aufgezeigt werden, daß im Regelfall bei Umschlingungen bei Niederzurrungen immer eine Kraft F_2 existiert, da immer mehrere Vollumschlingungen (in dem Beispiel 4) vorhanden sein müssen bis am Ende der Umschlingung keine Kraft mehr auftritt.

7 Ableitung der Berechnungsformel zur Niederzurrkraft

7.1 Einführung

Bereits die Ursprungsrichtlinie der VDI 2702, wie alle weiteren, lassen eine nur relativ geringe theoretische Grundlage erkennen, obwohl mit der Ausarbeitung und den Versuchen von Hörger [9] ein deutlich umfangreicherer Kenntnisstand bereits 1966 erkennbar ist. Auch in den folgenden Jahrzehnten wurde zu wenig zu dem Thema geforscht. Dem steht auch immer das Argument entgegen, Ladungssicherung sei allein eine Sache der Praktiker.

In diesem Abschnitt soll die Berechnungsformel neu abgeleitet werden. Eine andere Vorgehensweise, also z. B. bei den Aussagen der VDI 2700:1990 auszugehen, würde bedeuten, daß diese Festlegungen aus Sicht der „Technischen Mechanik“ als richtig vorausgesetzt werden.

7.2 Berechnungsformel für eine Niederzurrung

Mit einer ebenen Niederzurrung wird eine Ladung mit zwei Kräften, der Gewichtskraft und der Niederzurrkraft, zur Ladungsfläche gezogen. Die Ladung wird mit dem Fahrzeug „fest verbunden“. Damit wird zusätzlich zur Gewichtskraft die Ladung stärker und definiert an die Ladefläche gepresst. Gegen eine horizontal angreifende Kraft, z. B. eine Fliehkraft, wirkt damit eine höhere Reibungskraft, Abb. 7.1. Es wird damit verhindert, daß die Ladung eine Eigenbewegung zum Fahrzeug beginnt, Gleichung 7.1.

$$F_H \leq \underbrace{(F_G + F_N)\ \mu_{H,L}}_{F_H \leq \text{Reibungskraft } F_R} \qquad \text{(Gl. 7.1)}$$

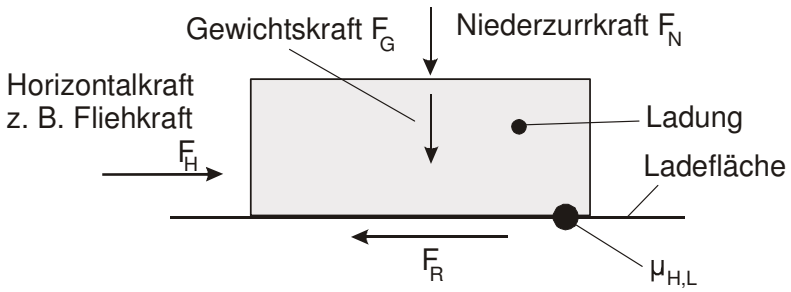


Abb. 7.1. Kräftebilanz an einer niedergezurrten Ladung

Die Niederzurrkraft wird in der Regel durch einen vorgespannten Niederzurrgurt aufgebracht. Dabei sind drei Faktoren für eine Berechnung zu berücksichtigen:

1. Der Zurrwinkel,
2. der Gurtkraftabbau am Kantenschutz und
3. die Lage Spannvorrichtung in den Sektionen der Niederzurrung.

Im Folgenden wird zunächst der Zurrwinkel von 90 Grad ausgegangen und dieser dann einseitig verringert. Damit kann der Einfluß auf die Niederzurrwirkung dargestellt werden. Anschließend werden die Auswirkungen ungleicher Zurrwinkel untersucht.
Grundlage für das Folgende ist ein Freischnitt nach Abb. 2.1.

Wird nun zunächst ein idealisierte Niederzurrung zugrunde gelegt, ergibt sich für die Niederzurrkraft F_N, Abb. 7.2, der in Gleichung 7.2 dargestellte Zusammenhang. Dabei wird an den Ecken eine reibungsfreie Umlenkung über Rollen vorgenommen, so daß die Niederzurrkraft nur von den Zurrwinkeln bestimmt wird. In der Abbildung wird unten in der Mitte zeichnerisch die vektorielle Kräfteaddition dargestellt.

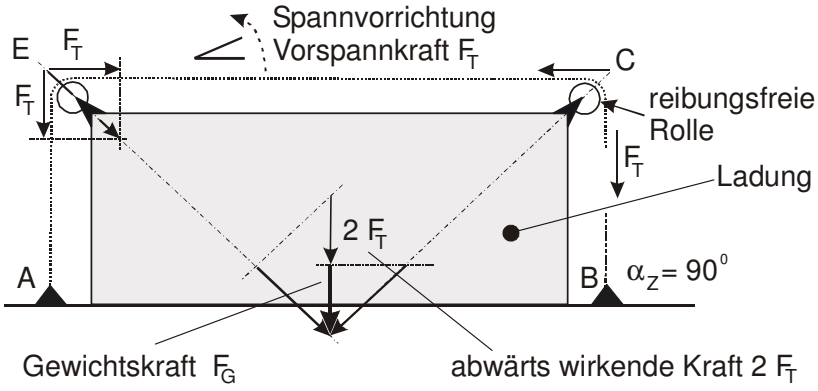


Abb. 7.2. Zurrwinkel 90 Grad

Unter dieser Voraussetzung ergibt sich eine Niederzurrkraft ohne die Gewichtskraft:

$$F_N = F_{T,A} + F_{T,B}$$

Die Vorspannkraft F_T wird, wie noch gezeigt wird, bei den einzelnen Niederzurrfällen in den einzelnen Sektionen unterschiedlich groß sein. Entscheidend für die Kraftermittlung ist die Größe und die Richtung der Kraft in den Zurrpunkten A und B, also in der ersten und letzten Sektion. Die Zusatzskizze unter B) in Abb. 7.3 soll das verdeutlichen. Ausgangspunkt für eine Berechnung muß immer die Kraft sein, die am Zurrpunkt wirkt (Freischnittbetrachtung).

Bei einer offenen Zurrung wird es dagegen nur einen Zurrpunkt (= Angriffspunkt der Niederzurrkraft) geben. Aber auch hier ist neben dem Angriffpunkt und der Größe der Kraft die Wirkrichtung noch als dritte Größe bei Kraftuntersuchungen zu beachten. Bei einer reibungsfreien Umlenkung in C und E gilt:

$$\begin{aligned} F_N &= F_{T,A} + F_{T,B} \\ F_{T,A} &= F_{T,B} = F_T \\ F_N &= 2\,F_T \end{aligned} \qquad \text{(Gl. 7.2)}$$

Die Richtung der Zurrkraft $F_{T,A}$ im Zurrpunkt A und B geht über den Zurrwinkel in die Rechnung ein. Bei einem Zurrwinkel von kleiner als 90 Grad Zurrwinkel, z. B. 75 Grad, gilt:

$$\begin{aligned} F_N &= F_{T,A} + F_{T,B} \\ F_N &= F_{T,A} \cdot \sin 75^0 + F_{T,B} \cdot \sin 90^0 \\ F_N &= F_{T,A} \cdot \sin 75^0 + F_{T,B} \end{aligned} \qquad \text{(Gl. 7.3)}$$

Der Zurrwinkel ist in Zurrpunkt B immer noch 90 Grad.

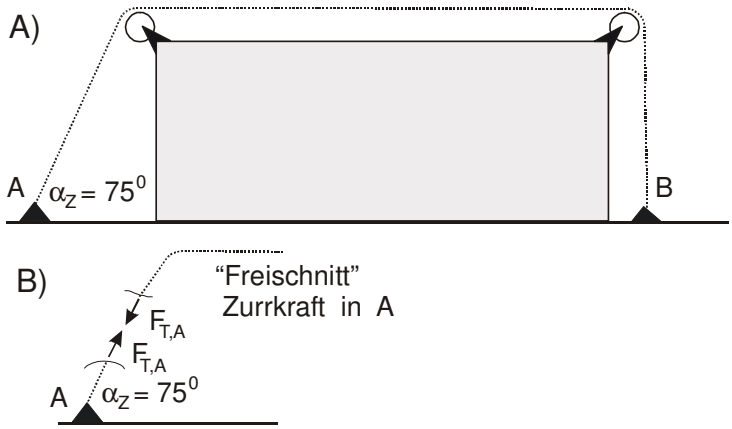


Abb. 7.3.1. Einfluß Richtung der Zurrkraft am Zurrpunkt

Allgemein gilt dann, wenn die Zurrwinkel in A und B ungleich sind :

$$F_N = F_{T,A} \bullet \sin \alpha_{Z,A} + F_{T,B} \bullet \sin \alpha_{Z,B} \qquad \text{(Gl. 7.4)}$$

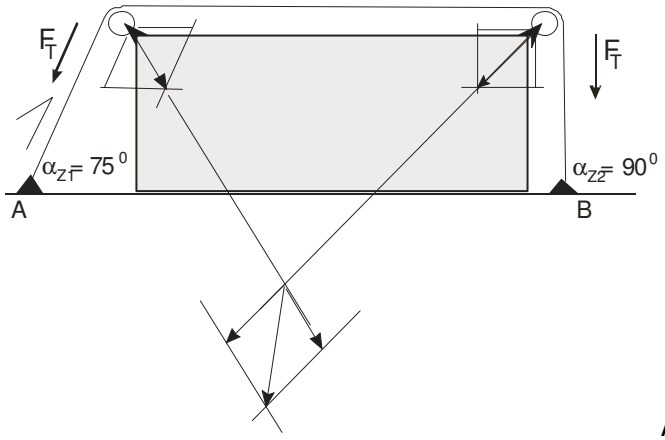


Abb. 7.3.2. Kräfteplan

Oder vereinfacht:

$$F_N = F_T \bullet (\sin \alpha_{Z1} + \sin \alpha_{Z2}) \qquad \text{(Gl. 7.5)}$$

Gleichungen zeigen auch, daß der Zurrwinkel und die Zurrkraft an einem Zurrpunkt stets zusammen behandelt werden müssen.

Werden nun die reibungsfreien Rollen an den Umlenkungen durch Kantengleiter ersetzt, so muß nun der Gurtkraftabbau am Kantenschutz berücksichtigt werden, denn entscheidend ist, was an den beiden Zurrpunkten an Zurrkraft F_{Tx} ankommt.

Bei einer ebenen Niederzurrung sind nicht mehr als zwei Zurrpunkte vorhanden, im Gegensatz zu Netz- und Planenlösungen. Da alle Gurtelemente in Reihe geschaltet (Abschnitt 4.7) sind, Abb. 7.4, und die Spannvorrichtung nunmehr zwischen Sektion I und II liegen soll, ergibt sich zwischen den Sektionen II bis IV ein Gurtkraftabbau. Inzwischen gibt es Niederzurrplanen, die eine definierte Vorspannung erlauben.

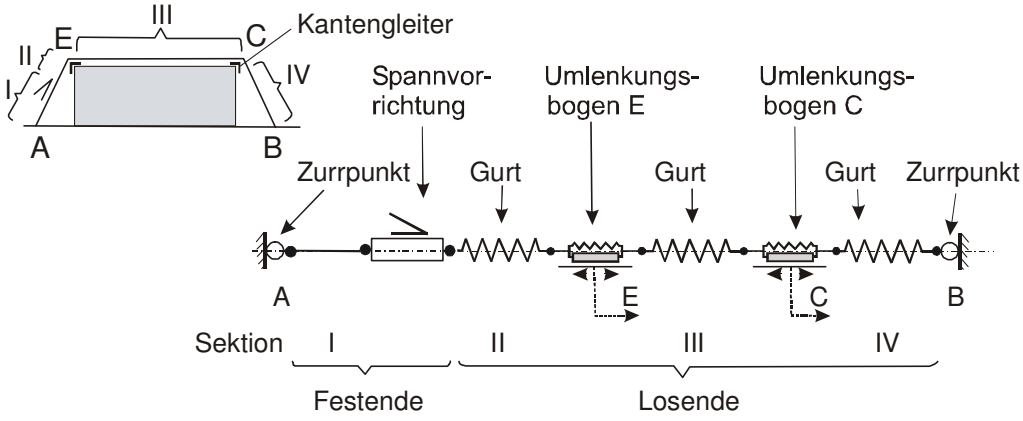


Abb. 7.4. Reihenschaltung von Gurtelementen

Mit Gleichung 7.4 ergibt sich die Gleichung 7.6:

$$F_N = F_{T,A} \cdot \sin \alpha_{Z,A} + \frac{F_{T,A}}{e^{2 \alpha_z \mu_K}} \cdot \sin \alpha_{Z,A}$$

$$F_N = F_{T,A} \left(\sin \alpha_{Z,A} + \frac{1}{e^{2 \alpha_z \mu_K}} \cdot \sin \alpha_{Z,A} \right) \qquad \text{(Gl. 7.6)}$$

Diese Gleichung gilt nur für den Fall einer einseitigen Niederzurrung mit ungleichen Zurrwinkeln in A und B und Spannvorrichtung zwischen Sektion I und II.

Aus der Vorgehensweise läßt sich aber jede andere Konfiguration einer Niederzurrung ableiten. Für den folgenden Fall einer mittigen Vorspannung mit ungleichen Zurrwinkel soll ein allgemeiner Ansatz abgeleitet werden.

Gegeben sei nun die in Abb. 7.5 dargestellte Niederzurrung.

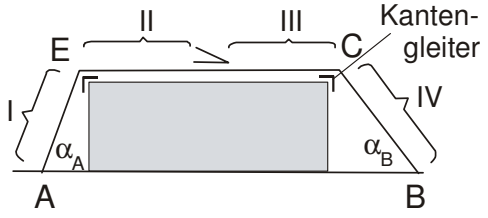


Abb. 7.5. Mittige Spannvorrichtung

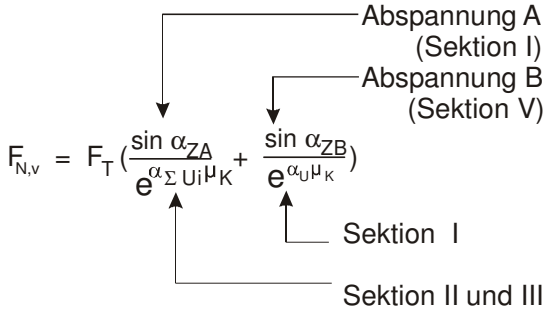
Es gilt der allgemeine Ansatz nach Gl. 7.4:

$$F_N = F_{T,A} \cdot \sin \alpha_{Z,A} + F_{T,B} \cdot \sin \alpha_{Z,B}$$

$$F_N = F_{T,A} \cdot \sin \alpha_{Z,A} + F_{T,B} \cdot \sin \alpha_{Z,B}$$

$$F_N = \frac{F_T}{e^{\alpha_{ZA} \mu_K}} \cdot \sin \alpha_{Z,A} + \frac{F_T}{e^{\alpha_{ZB} \mu_K}} \cdot \sin \alpha_{Z,B}$$

$$F_N = F_T \left(\frac{\sin \alpha_{Z,A}}{e^{\alpha_{ZA} \mu_K}} + \frac{\sin \alpha_{Z,B}}{e^{\alpha_{ZB} \mu_K}} \right)$$



(Gl. 7.7)

Gleichung 7.7 zeigt einerseits den Bezug der Berechnung auf die Abspannungsrichtung in A und B auf und andererseits der Lage der Spannvorrichtung. Denn wenn in der Gleichung 7.7 in Sektion I kein Umschlingungswinkel vorliegt, wird der Zurrwinkel Null. Dafür gilt:

$$e^{0^0 \mu_K} = 1 \qquad \text{(Gl. 7.8)}$$

7.3 Definition k-Faktor

Es erscheint sinnvoll, eine Abkürzung einzuführen, die die Lage der Spannvorrichtung mit den davor und dahinter liegenden Umschlingungsbögen erfaßt. Diese Vorgehensweise wird dann wichtig, wenn es um die Berechnung überbreiter Ladungen geht. Für das folgende soll eine Zurrung nach Abb. 7.6 zugrunde gelegt werden. Sie soll in die Sektionen I bis V unterteilt sein. Die Zurrwinkel seien unterschiedlich und kleiner als 90 Grad. Zwischen der Sektion I und Zurrpunkt B liege die Spannvorrichtung.

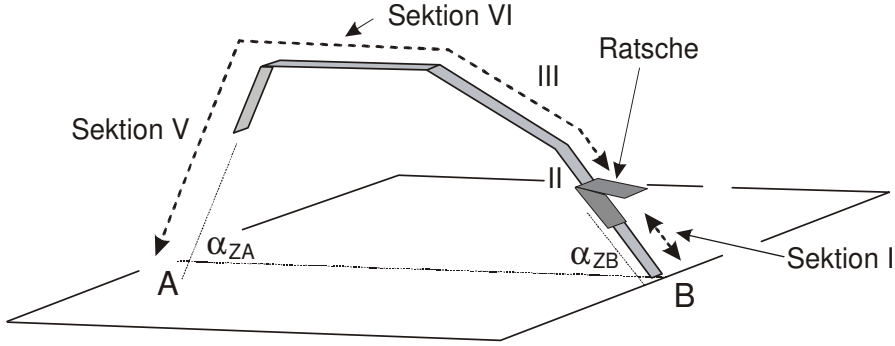


Abb.7. 6. Einteilung in „Sektionen“

Es wird eine Abkürzung, die mit k-Faktor bezeichnet werden soll, wie folgt eingeführt:

$$k_{U,i} = \frac{1}{e^{\sum_{U,i} \alpha_{U,i} \mu_K}} \qquad \text{(Gl. 7.9)}$$

Zwischen Zurrpunkt A, bzw. B und der Spannvorrichtung, können Umschlingungsbögen (ein oder mehrere) liegen. In den Exponenten geht jeweils die Summe aus den Winkeln α_U und der Reibungszahl μ_K ein. Damit wird die Lage und die Anzahl der Umschlingungsbogen vor und nach der Spannvorrichtung in der Berechnungsgleichung erfasst.

Ausgangspunkt soll die Berechnungsformel mit dem k-Faktor nach Gl. 7.7 sein. Sie erhält dann die Fassung:

$$F_{N,v} = F_T \left(\underbrace{\frac{\sin \alpha_{Z1}}{e^{\alpha_{U1} \mu_K}} + \frac{\sin \alpha_{Z2}}{e^{\alpha_{U2} \mu_K}}}_{k_1 \sin \alpha_{Z1} \quad k_2 \sin \alpha_{Z2}} \right)$$

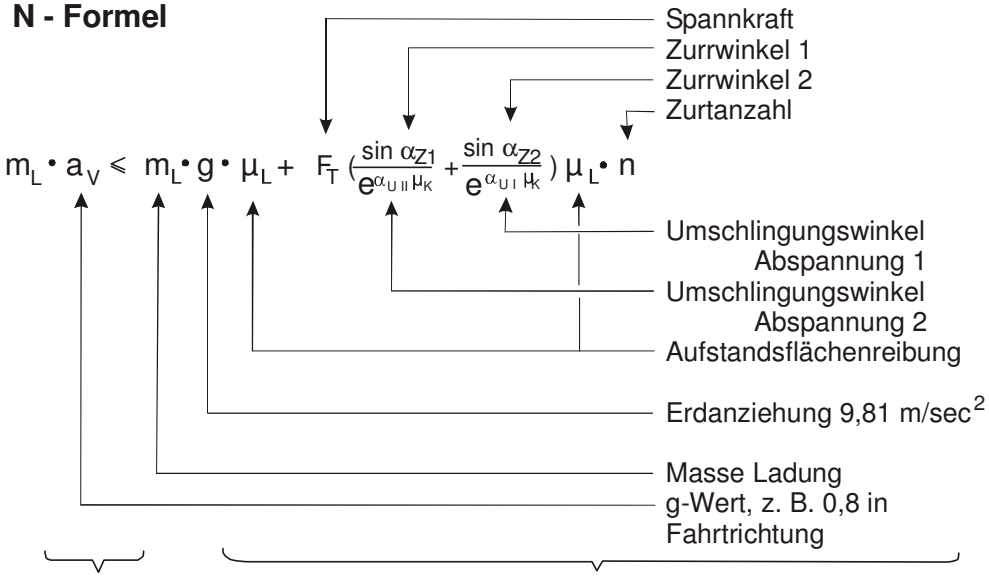
$$F_{N,v} = F_T \left(k_1 \sin_{Z1} + k_2 \sin_{Z2} \right) \qquad \text{(Gl. 7.10)}$$

Damit wird die Niederzurrwirkung einer ebenen Niederzurrung mit einer einseitigen Spannvorrichtung und jede beliebige andere Konstellation erfasst. Bei einer offenen Zurrung entfällt der zweite Term in Gl. 7.10.

7.4 Neuer Berechnungsansatz – N-Formel

Mit der Ableitung in den Abschnitten 7.2 und 7.3 ergibt sich die allgemeine Ableitung der Rückhaltekraft einer Niederzurrung für eine n-Anzahl von Gurten aus Gleichung 7.11. Sie ergibt sich aus der Bedingung, dass die Masseträgheitskraft z. B. bei einer Fahrzeugverzögerung kleiner sein muß als die rückhaltende Kraft aus Gewichts- mit Niederhaltekraft mal der Reibungszahl. Nur dann wird es zu keiner Ladungseigenbewegung in Bezug zum Trägerfahrzeug kommen. Die Nachrechnung erfolgte in den Vorabschnitten nur mit einem Gurt (n = 1). In Gleichung 7.11 wird die abgeleitete Berechnungsformel, die im Folgenden mit N-Formel bezeichnet werden soll, für eine n-Anzahl Gurte beschrieben.

N - Formel



(Gl. 7.11)

Der zweite Ausdruck in der Gleichung 7.11 darf mit der Gurtanzahl multipliziert werden, weil der Nachweis geführt werden kann, daß bei einer Paralllelschaltung von n-Gurten die Niederzurrkraft auch n-Mal so groß ist, wenn die Ladung (und die Ladefläche) ausreichend steif genug ist.

Die Gleichung 7.11 ist die allgemeinste Form für eine Berechnung der Rückhaltekräfte. Sie berücksichtigt jede Art von geschlossener Zurrung mit *einer* Ratsche, mit allen möglichen Lagen und jede Anzahl von Umschlingungen vor und hinter der Spannvorrichtung.

Eine weitere Schreibweise der Formel ist gegeben, wenn die Faktoren k_1 und k_2 benutzt werden, Gl. 7.12:

$$m_L \cdot a_V \leqslant m_L \cdot g \cdot \mu_L + F_T (k_1 \sin \alpha_{Z1} + k_2 \sin \alpha_{Z2}) \mu_L \cdot n \qquad \text{(Gl. 7.12)}$$

Die Kraftgleichung kann auch in Beschleunigungen ausgedrückt werden, wenn es sich um starre Ladungen handelt, Gl. 7.13:

$$a_V \leqslant \left(g + \frac{F_T}{m_L}\left(\frac{\sin \alpha_{Z1}}{e^{\alpha_{U II} \mu_K}} + \frac{\sin \alpha_{Z2}}{e^{\alpha_{U I} \mu_K}}\right)\right) \mu_L \cdot n \qquad \text{(Gl. 7.13)}$$

Eine normierte Version (auf g-Werte!) stellt Gl. 7.14 dar.

$$\frac{a_V}{g} \leqslant \left(1 + \frac{F_T}{m_L g}\left(\frac{\sin \alpha_{Z1}}{e^{\alpha_{U II} \mu_K}} + \frac{\sin \alpha_{Z2}}{e^{\alpha_{U I} \mu_K}}\right)\right) \mu_L \cdot n \qquad \text{(Gl. 7.14)}$$

Bei gleichen Zurrwinkeln kann mit einem Minderungsfaktor f_M gerechnet werden. Für den Fall gleicher Zurrwinkel stellt die Gl. 7.15 eine weitere Variante dar:

$$f_M = (k_1 + k_2) \sin \alpha_Z$$

$$\frac{a_V}{g} \leqslant \left(1 + \frac{F_T}{m_L g} f_M\right) \mu_L \cdot n \qquad \text{(Gl. 7.15)}$$

7.5 Feststellungen zur N-Formel

Im Folgenden werden Anmerkungen, Ergänzungen und zusätzliche Erläuterungen zu der N-Formeln und der Gleichungen in Abschnitt 7.4 gemacht.

1. Horizontalzug bei einseitiger Ratsche

Die Formeln erfassen nicht den Horizontalzug und seine Auswirkungen auf die Rückhaltekraft in Längsrichtung, der bei einseitiger Spannvorrichtung oder durch ungleiche Zurrwinkel entsteht. Auf dieses Problem wird in Abschnitt 11 eingegangen.

2. Reibungszahl μ_K am Kantenschutz

Die Formeln zeigen den Einfluß der Reibungszahl am Kantenschutz. Untersucht wurde nicht, welche Reibungszahl gegen das Gleiten und gegen das Kippen einer Ladung günstiger ist. Evtl. könnte es zwischen beiden einen Zielkonflikt geben.

3. Masseabhängigkeit der Niederzurrung

Die Berechnungsformel Gl. 7.11 zeigt, daß die Niederzurrtechnik von der Ladungsmasse abhängig ist (Abschnitt 7.6). Das bedeutet, je größer die Ladungsmasse ist, umso größer muß die Zahl der Gurte sein. Ab einer bestimmten Ladungsmasse ist der Einsatz dieser Sicherungstechnik Niederzurrung nicht mehr sinnvoll.

4. Größe Zurrwinkel

Der Zurrwinkel α_Z sollte größer als 70 Grad sein, weil der Sinusanteil dann immerhin noch noch ca. 89 % an der vertikalen Niederzurrkraft beteiligt ist. Bei kleineren Winkeln ist nicht der Kraftschluß des Wirkprinzips sondern der Verformungsschluß [6] aus der Dehnung z. B. eines Buchtlaschings. Hier ist die Bewegung der Ladung die notwendige Voraussetzung für den Aufbau einer Rückhaltekraft.

5. Einhaltung der Vorspannungskraft F_T

Die Vorspannungskraft kann allein durch vertikale Aus- und Einfederungen schwanken. Daneben gibt es aber auch Ladungen (Stämme), die Setzungserscheinungen zeigen oder auch bei Feuchtigkeitseinfluß nachgeben.

6. k-Faktor

Deutlich wird aus den gerechneten Beispielen, daß keine einzige k-Zahl nahe der Konstantzahl von 1,5 liegt, wie das in Richtlinien festgelegt wurde. Um das Problem zu lösen, könnten für verschiedene Zurrvarianten Tabellen für die Anwender entwickelt werden, die k-Werte mit einem Streubereich vorgeben (k = 1,3 $\pm$ . . .).

7. Voraussetzungen der N-Formel

Die in 7.4 aufgelisteten Formeln gelten nur für *eine* Spannvorrichtung in einer *ebenen* Zurrung, aber für alle Möglichkeiten, die Spannvorrichtung zwischen einzelnen Sektionen zu setzen.

8. Starre Ladungsmasse

Die Technische Mechanik ist die Grundlage dieser Ableitung. Daneben wird aber auch die sog. Unfallmechanik (Stoßmechanik) herangezogen. Beide teilen Massen in starre, elastische und plastische ein. Diese Einteilung erscheint für mechanische Fragen in der Ladungssicherung günstiger zu sein als andere Modelle. Es gibt für eine Abgrenzung zwischen den drei Varianten mehrere Möglichkeiten (Huygens, Newtonscher Ansatz, „PKW-Stoßmechanik). Für Ladungsmassen könnte die Abgrenzung starr zu elastisch an der Rückverformung festgemacht werden. Ladungen, die nach horizontalen Verformung sich wieder vollständig zurückverformen, sollen als elastisch eingestuft werden. Versuche in [1] haben gezeigt, daß Fässer sich während eines Transports ständig horizontal (Ober- zu Unterboden) schwingen (ca. 3 Hz). Das betrifft Stahl- als auch PE-Fässer! Für plastische Massen, z. B. für bestimmte Schüttgutladungen in Bigbags, braucht hier zunächst keine Festlegung diskutiert werden, weil eine Niederzurrung in aller Regel starre oder teilelastische Massen voraussetzt.

9. Fahrzeugaufbau

Die Niederzurrtechnik erfordert steife Ladungen aber ebenfalls auch relativ steife Ladeflächen. Wird einmal nur ein Sattelauflieger betrachtet, so gibt es drei wichtige Belastungen, die an heutigen Fahrzeugen zu relativ hohen elastischen Verformungen führen können. Da ist einmal die Durchbiegung in Längsrichtung. Daneben ist inzwischen besonders kritisch das Torsionsverhalten der Rahmen von Sattelaufliegern zu sehen. Extrem leicht gebauten Fahrzeuge haben heute so hohe Verdrehwinkel bei Kurvenfahrt, so daß ständig nicht ausreichend steife Ladeflächen vorliegen. Neben diesen beiden Belastungsarten ist noch die enge Kurvenfahrt zu nennen. Dadurch, daß die heutigen Hinterachsaggregate nur „mühsam“ spuren, entstehen bei enger Kurvenfahrt hohe Belastungen am Rahmen mit entsprechenden Verformungen. Da bei allen Formeln für Niederzurrungen die Bedingung „fest verbunden“ Voraussetzung ist, ist die Entwicklung der Aufbausteifigkeit kritisch zu sehen.

10. Vertikale Aufbauschwingungen

Die Formel berücksichtigt nicht, daß im Straßenbetrieb jeder Aufbau vertikale Einfederungsbewegungen macht (ca. 5 – 10 Hz). Die Auswirkungen dieser Aufbauschwingungen mit der Ladung, insbesondere das Verhältnis Aufbaumasse zur Ladungsmasse, wird in der Formel nicht erfasst. Dabei ist auch Unterscheidung in luft- und zumindest blattgefederte Aufbauten ebenfalls wichtig.

11. g-Werte als Antriebskraft

Der g-Wert ist eine statische Kraft auf die Ladung. In der Praxis treten aber in der Regel z. B. horizontale (quer – längs) Stöße in der Überlagerung auf. Derartige Einflüsse, z. B. aus der Überlagerung einer konstanten Bremskraft (0,7 g) mit einer Stoßkraft, wie sie beim Überfahren eines beidseitigen Hindernisses entsteht, werden heute in den Normen als Belastungen nicht berücksichtigt. Dabei können resultierende Belastungen von größer als 0,7 g auftreten.

12. Zur Genauigkeit der Berechnungsformeln

Die Rückhaltewirkung hängt an zwei Stellen von einer Reibungszahl ab. Eine Reibungszahl hängt immer von der Paarung, den äußeren Bedingungen und dem Zustand der Reibungspartner ab. Alle Versuche hier die Genauigkeit, z. B. wenn die zweite Stelle hinter dem Komma angegeben wird, vorzutäuschen, sind sinnlos. In der Unfallmechanik wird stets mit mindestens ± 10 % der Reibungszahlen gerechnet. Aus diesem Grund wird in der Unfallmechanik mit Ober- und Untergrenzen gerechnet. Ein Beispiel soll das deutlich machen. Wenn ein Bremsweg einer Geradeausbremsung mit konstanter Reibungszahl aus einer Anfangsgeschwindigkeit bis v_{Fz} = 0 km/h berechnet werden muß, wird mit folgender Formel gerechnet.

$$v = \sqrt{a_V \cdot s}$$

Für a_v wird g $\mu_{Fahrbahn}$ eingesetzt, allerdings mit einer Ober- (O z. B. 7,8) und einer Untergrenze (U z. B. 7,0):

$$v_{O_U} = \sqrt{\frac{7,8}{7,0}\ g \cdot s}$$

Die Berechnungen werden stets mit beiden Werten durchgeführt.

13. Haft- oder Gleitreibung

Die Unsicherheit bei Reibungszahlen und insbesondere die vertikalen Aufbauschwingungen wurde in älteren deutschen Richtlinien damit Rechnung getragen, daß die Gleit- statt der eigentlich erforderlichen Haftreibungszahlen für die Reibung an der Aufstandfläche der Ladung eingesetzt wurde. Die Verwendung einer Haftreibungszahl in neueren Richtlinien anstelle einer Gleitreibungszahl ohne Kompensation ist aus Sicherheitsgründen als unverantwortlich anzusehen.

Die Neigung auf Haftreibungszahlen zurückgreifen zu wollen, ist insofern verständlich, als sich Haftreibungszahlen einfacher und billiger messen lassen. Die Messsicherheit ist bei Haft- wie bei Gleitreibungszahlen gleichermaßen unsicher! Ein Kompromiss könnte sein, die Haftreibungszahl mit einem Abschlag (z. B. 40 % ?) zu verwenden.

14. Zurrmitteldehnung

Gurte sind relativ dehnfähig, Stahlseile eher geringer. Wenn Gurte (einseitige Spannvorrichtung, unterbreite Ladung) in einer ebenen Zurrung sehr lang sind (6 bis 7 m) sind, dann ergeben sich große Dehnlängen. Bei Einwirkung von horizontalen Kräften und Ladungsverschiebung ergeben sich dann größere Verschubwege. Auch hier zeigt sich eine weitere „Schwachstelle“ der Niederzurrtechnik. Auch deshalb wurde unterschieden in eine geschlossene und offene Zurrung.

15. Unterschiedliche Ladungen

Tabelle A 4.1 Anlage 4 zeigt eine Übersicht mit einer Einteilung von Ladungen. Deutlich wird, daß nicht jede Ladung für die Anwendung der Niederzurrtechnik geeignet ist. So wird die Niederzurrtechnik für bestimmte Schüttgüter oder horizontale geschchtete Ladungen nicht möglich sein.

7.6 Gurtkraftfaktor

Gleichung 7.10 kann ein weiteres Mal umgeschrieben werden und der Ausdruck F_T mal . . . mit GF (= Gurtkraftfaktor) abgekürzt wird. Man erhält dann Gl. 7.16.

$$\frac{a_V}{g} \leqslant \mu_L + \frac{1}{m_L} \cdot \underbrace{\frac{F_T \; f_M \; \mu_L}{g}}_{= \; GF}$$

$$\text{g-Wert} \leqslant \mu_L + \frac{GF}{m_L} \qquad \text{(Gl. 7.16)}$$

Weitere Umformungen ergeben dann eine Abhängigkeit der Ladungsmasse von der Anzahl der Gurte.

$$\frac{a_V}{g} \leqslant \left(1 + \frac{F_T}{m_L g} f_M\right) \mu_L \cdot n$$

$$\frac{a_V}{g} \leqslant \mu_L + \frac{1}{m_L} \cdot \frac{F_T f_M \mu_L}{g} n$$

$$\frac{a_V}{g} - \mu_L \leqslant \frac{1}{m_L} \cdot \underbrace{\frac{F_T f_M \mu_L}{g}}_{= GF} n$$

$$m_L \leqslant \frac{g}{a_V - g\mu_L} \cdot GF \cdot n$$

Nach n umgestellt ergibt:

$$n \geqslant \frac{a_V - g\mu_L}{g \cdot GF} \cdot m_L \qquad \text{(Gl. 7.17)}$$

Damit ergibt sich:

Die Gurtanzahl ist eine Funktion der Ladungsmasse m_L!

Je größer eine Ladungsmasse ist, umso stärker wächst die Anzahl der Gurte! In dem Quotienten vor der Ladungsmasse m_L stehen nur konstanten Faktoren, wenn von einer bestimmten Zurrung ausgegangen wird. Welche Einflußgrößen enthalten sind, zeigt Gleichung 7.10 auf.

8 Niederzurrwirkung bei „ladeflächenbreiter“ Ladung

8.1 Einführung

Im Folgenden werden einzelne Fälle gerechnet, teilweise auch mit zeichnerischen Mitteln. Es wird jeweils nur eine Spannvorrichtung vorgesehen.

8.2 Mittige Spannvorrichtung

Abb. 8.1 zeigt eine Niederzurrung mit Zurrwinkel α_Z =75 Grad (kleiner als 90 Grad). μ_{Gleit} am Kantengleiter sei 0,3. Bei mittiger Vorspannung entsteht kein Seitenzug, da sich die beiden Kräfte F_{Th} aufheben.

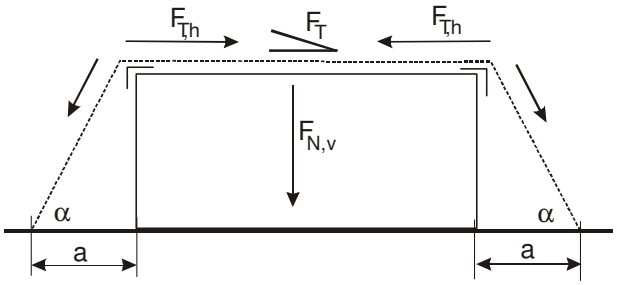


Abb. 8.1. Beispiel mittige Abspannung

Da die Ratsche in der Ladungsmitte gesetzt ist, kommt es an beiden Seiten zu einem Gurtkraftabbau, der allerdings symmetrisch ist. Es entsteht damit kein Seitenzug.

$$F_{N,v} = F_T \, k \sin \alpha_Z \qquad \text{(Gl. 8.1)}$$

$$F_{N,v,ges} = F_T \cdot e^{\frac{75 \cdot \pi}{180} \cdot 0,3} \cdot 2 \sin \alpha_Z$$

$$k = 0,675$$

$$F_{N,v,ges} = F_T \cdot 0,675 \cdot 2 \cdot \sin 75^0$$

$$F_{N,v,ges} = 1,3 \, F_T$$

$$f_M = 1,25$$

8.3 Mittige Zurrung bei unterschiedliche Zurrwinkeln

Werden für den Fall nach Abschnitt 8.2 unterschiedliche Zurrwinkel (60 und 75 Grad) angenommen bei mittiger Abspannung so ergibt sich nach Gleichung 7.4, Abb. 8.2 und 8.3:

$$F_{N,v,ges} = F_T (k_1 \sin \alpha_{Z1} + k_2 \sin \alpha_{Z2}) \qquad \text{(Gl. 8.2)}$$

Erkennbar ist, daß bei unterschiedlichen Zurrwinkeln sich auch in den Zurrpunkten jeweils andere Zurrkräfte auch aus den unterschiedlichen Umschlingungswinkeln ergeben.

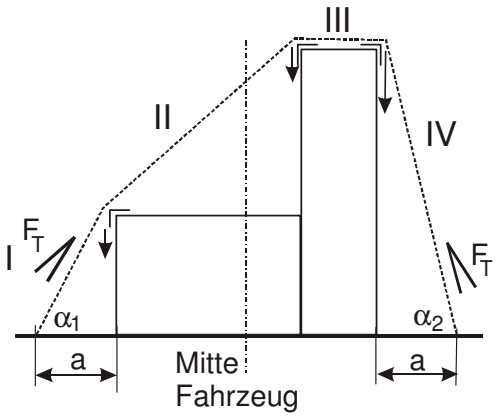


Abb. 8.2. Einteilung in Sektionen

Abb. 8.3. Beispiel ungleiche Zurrwinkel

$$F_{N,v,ges} = F_T (k_1 \sin \alpha_{Z1} + k_2 \sin \alpha_{Z2})$$

$\alpha_{Z2} = 75^0$

$\alpha_U = f(75^0)$

$\alpha_{Z1} = 60^0$

$\alpha_U = f(60^0)$

$$F_{N,v,ges} = F_T (0{,}740 + 0{,}585)$$

$$F_{N,v,ges} = 1{,}33\ F_T$$

$$f_M = 1{,}33$$

(Gl. 8.3)

8.4 Einseitige Spannvorrichtung

Bei dem Gurtkraftabbau ergibt sich dann unter Berücksichtigung der Lage der Vorspannvorrichtung, Abb. 8.4, die resultierende Niederzurrkraft F_N durch eine zeichnerisch gelöste vektorielle Addition.

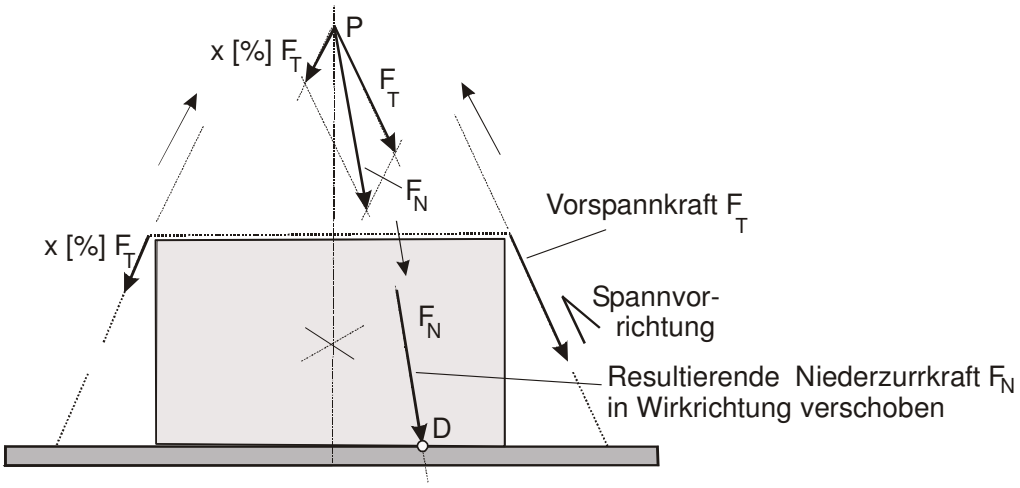


Abb. 8.4. Einseitige Spannvorrichtung

Wird diese Kraft in Wirkrichtung bis zur Ladefläche (Punkt D) verschoben, ist es die vertikale Komponente dieser Kraft, die die Verstärkung der Anpressung zusätzlich zu der Gewichtskraft bewirkt.

8.4.1 Berechnung resultierende Vertikalkraft

Rechnerisch ergibt sich die vertikale Gesamtniederzurrkraft $F_{N,v}$ aus der vektoriellen Addition der Kräfte, die bei maßstäblicher Zeichnung aus den Strecken a + b gebildet werden, Abb. 8.5.

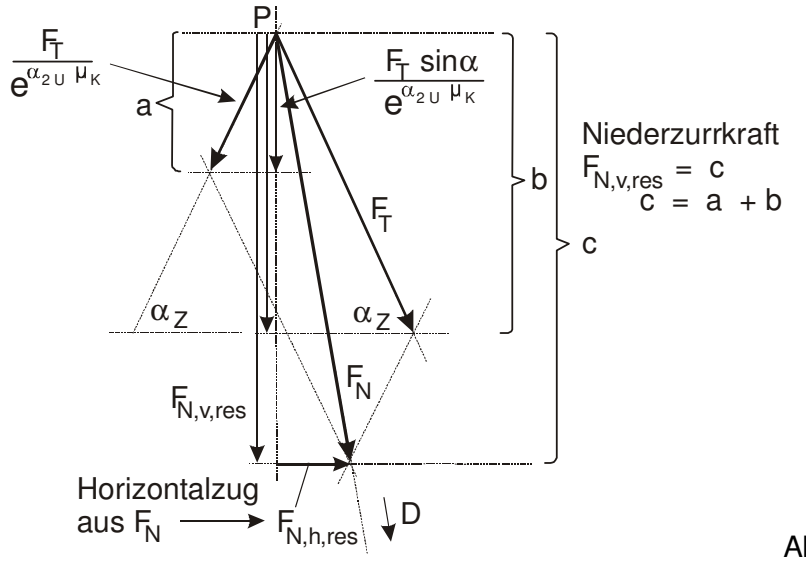


Abb. 8.5. Kräfteplan

Der folgende Ansatz geht von zwei gleich großen Zurr- und Umschließungswinkeln aus. In dem Ansatz wird die einseitige Spannvorrichtung dadurch berücksichtigt, daß einmal ein Umschlingungswinkel von $2\,\alpha_Z$ vorliegt und auf der Spannseite kein Umschlingungswinkel vorhanden ist (k = 1).

$$F_{N,v,ges} = F_T \sin\alpha_{Z1} + \frac{F_T \sin\alpha_{Z1}}{e^{2\alpha_U\,\mu_K}}$$

$$F_{N,v,ges} = F_T \sin\alpha_{Z1}\left(1 + \frac{1}{e^{2\alpha_U\,\mu_K}}\right) \qquad \text{(Gl. 8.4)}$$

$$F_{N,v,ges} = F_T \sin\alpha_{Z1}\left(\underbrace{1}_{k_1} + \underbrace{\frac{1}{e^{\alpha_{U,ges}\,\mu_K}}}_{k_2}\right)$$

Es sei

$$k = k_1 + k_2 \qquad \text{(Gl. 8.5)}$$

$$k_1 = e^{0^0\mu_K} = 1$$

$$k = \frac{1}{e^{0^0\mu_K}} + \frac{1}{e^{\Sigma\alpha_U\,\mu_K}}$$

$$F_{N,v,ges} = F_T \sin\alpha_{Z1} \bullet k \qquad \text{(Gl. 8.6)}$$

oder, da $k_2 = 1$ ist:

$$F_{N,v,ges} = F_T (k_1 + 1) \sin \alpha_Z \qquad \text{(Gl. 8.7)}$$

Bei ungleichen Zurrwinkeln mit α_{Z1} und α_{Z2} ergibt sich dann Gleichung 8.7.

$$F_{N,v,ges} = F_T \sin \alpha_{Z1} + \frac{F_T \sin \alpha_{Z2}}{e^{2\alpha_U \mu_K}}$$

$$F_{N,v,ges} = F_T (\sin \alpha_{Z1} + \frac{\sin \alpha_{Z2}}{e^{2\alpha_U \mu_K}}) \qquad \text{(Gl. 8.8)}$$

$$F_{N,v,ges} = F_T (k_1 \sin \alpha_{Z1} + k_2 \sin \alpha_{Z2}) \qquad \text{(Gl. 8.9)}$$

Gleichung 8.9 stellt die allgemeinste Form, also auch mit ungleichen Zurrwinkeln der tatsächlich umsetzbaren Niederzurrkraft bei ladeflächenbreiter Ladung dar. Nach Gleichung 8.7 ergibt sich für eine einseitige Niederzurrung mit gleichen Zurrwinkeln:

$$F_{N,v,ges} = F_T \cdot \sin 75^0 (1 + \frac{1}{e^{\frac{2 \cdot 75 \cdot \pi 0,3}{180}}})$$

$$F_{N,v,ges} = F_T \sin \alpha (1,45)$$

$$f_M = 1,40$$

8.4.2 Zeichnerische Lösung

Abb. 8.6 zeigt einen *Lageplan* einer „normalbreiten“ Ladung, die mit einer Niederzurrung bei einseitig liegender Spannvorrichtung gesichert ist. Die Ladung ist schmaler als die Ladefläche. Der weitaus überwiegende Teil der Niederzurrungen in der Praxis wird mit dieser Variante gesichert.

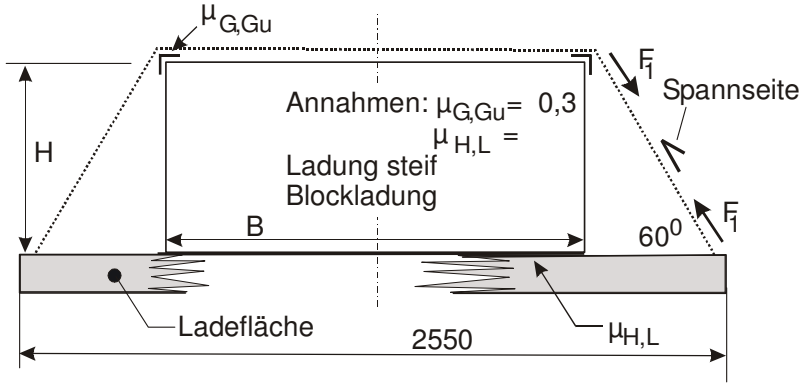


Abb. 8.6. Lageplan Niederzurrung mit einseitiger Ratsche

Abb. 8.7 zeigt die Kräfteverhältnisse dieser Niederzurrungsvariante in einem *Kräfteplan*. Um die Zeichnung in kleinen Maßen zu halten, wurde der Zurrwinkel mit 60 Grad gewählt werden.
Die Verfahrenschritte der zeichnerischen Lösung sind durchnummeriert. Die Niederhaltekräfte wirken im Gurt von den Ecken abwärts. Zunächst wird ein Maßstab für die Zugkraft F_1 für die Ratschen„kraft“ von 100 % in einem 1. Verfahrensschritt festgelegt. Die

Kaft F_2 ergibt sich aus dem Gurtkraftabbau und dem Umschlingungswinkel mittels der Eytelweinschen Gleichung. Im 2. und 3. Schritt werden die Wirkrichtungen der beiden Abspannungen zurück verlängert. Sie schneiden sich in S. Durch S verläuft auch die Wirkrichtung der Gewichtskraft F_G. Die vorhandene Anzugkraft F_1 und die errechnete Kraft F_2 werden von S aus im 4. und 5. Schritt angetragen. Damit ergibt sich eine resultierende Kraft F_{res} im 6. Schritt, die in der Vertikal- und Horizontalkomponenten, $F_{Res,ver}$ und $F_{res,hor}$ zerlegt werden kann. Im 9. Schritt kann damit die Kraft $F_{Res,vert}$ über den Maßstab ermittelt werden.

Als zusätzliche vertikale Anpresskraft aus der Niederzurrung ergeben sich statt 200 % ohne Gurtkraftabbau (in Reihe) und bei Zurrwinkel 90 Grad nun ca. 155 %. Das entspricht einem k-Faktor von ca. 1,5 (Zeichnungsungenauigkeiten). Das Ergebnis gilt für alle Ladungsabmessungen, die bei gegebenen Anschlagpunkten einen Zurrwinkel von 60 Grad haben.

Im 7. Schritt wird resultierende Kraft F_{res} in ihrer Wirklinie verschoben. Der Durchstoßpunkt durch die Ladefläche ist mit P bezeichnet. In diesem Punkt wirkt $F_{res,ver}$ und $F_{res,hor}$ (8.). Die Horizontalkraft ist nicht erkennbar, weil die Haftreibung die Ladung in ihrer Position „fixiert". Würde die Reibungszahl durch z. B. durch Öl unter der Ladung in diesem Zustand deutlich verringert werden, würde die Ladung zur Anspannseite solange rutschen, bis die F_{res} senkrecht über P steht!

Da $F_{F,Res,ver}$ außermittig steht, wird sich bei einer „großen" Längsbeschleunigung die Ladung sich drehend nach vorn verschieben.

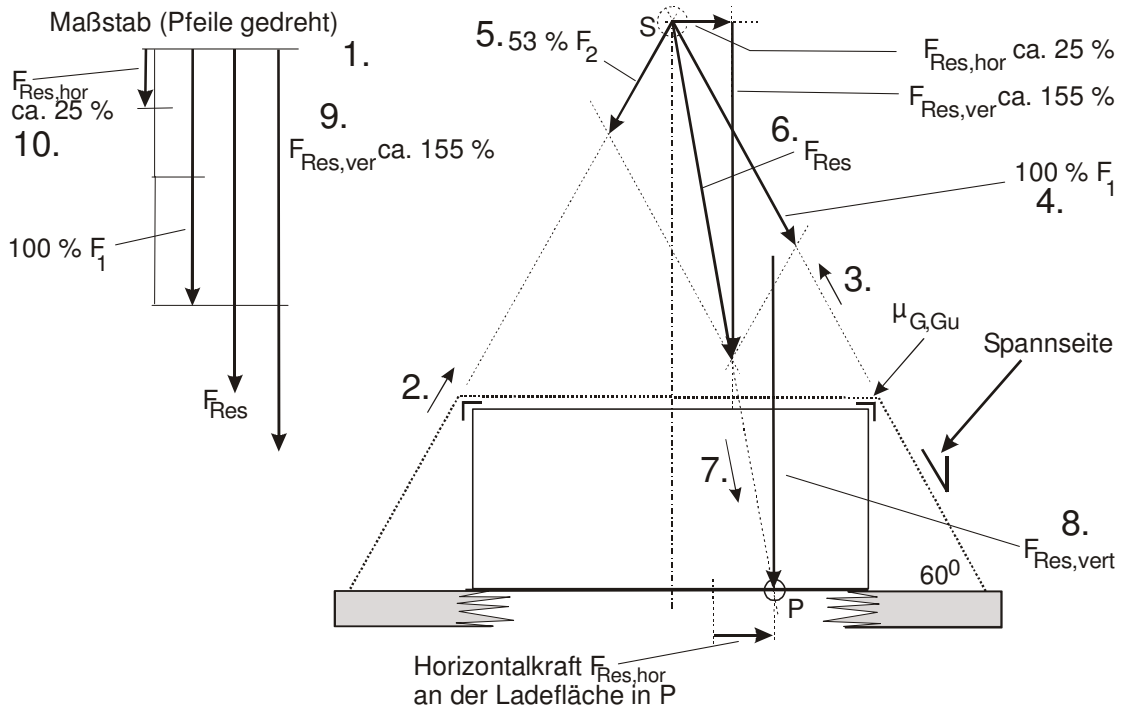


Abb.8.7. Kräfteplan

Mit $\mu_G = 0{,}3$ ergibt sich bei einem Winkel α_Z von 60 Grad rechnerisch:

$$e^{\frac{120^0 \cdot \pi \cdot \mu}{180^0}} = 1{,}8_7 \quad (F_1 / F_2 = 1 : 1{,}87)$$

$$k_{tat} = \frac{1}{e^{\frac{120^0 \cdot \pi \cdot \mu}{180^0}}}$$

$$k_{tat} = 0{,}53$$

Allgemein gilt für diesen Fall die Formel:

$$F_{N,v,ges} = F_T (k_x + 1) \sin \alpha_Z$$

Es wird der Ausdruck „Minderungsfaktor“ f_M verstanden

$$f_M = (k_x + 1) \sin \alpha_Z, \qquad \text{(Gl. 8.9)}$$

so ergibt sich für die effektive Niederzurrkraft:

$$F_{N,v} = f_M F_T \qquad \text{(Gl. 8.10)}$$

In diesem Fall:

$$f_M = (0{,}53 + 1) \cdot 0{,}866$$

$$f_M = 1{,}32$$

8.5 Zusammenfassung

Erkennbar soll mit diesen Ausführungen werden, daß ein Seitenzug sowohl aus ungleichen Zurrwinkeln als auch durch den Gurtkraftverlust an den Kantengleitern entsteht. Die beiden können sich aufheben, sie können aber auch gleichgerichtet sein. Die N-Formel berücksichtigt beide Einflüsse.

Nicht berücksichtigt wurde bisher, wie groß der resultierende Seitenzug ist und in welche Richtung er wirkt.

Der Seitenzug verursacht aber auch eine Reduzierung der Rückhaltekraft in Längsrichtung. Auf dieses Folgen wird im Abschnitt 11 eingegangen.

9 Niederzurrwirkung bei „überbreiter“ Ladung

9.1 Begriff „überbreite“ Ladung

Abb. 9.1 stellt eine sog „überbreite“ Ladung dar, eine Ladung also, die breiter als die maximale Ladeflächenbreite von 2550 mm ist. In der Regel werden Zurrmittel unterhalb der Ladefläche am Rahmen festgemacht. Bei dieser Ladungsbreite ergeben sich andere Probleme für die Berechnung des k-Faktors, bzw. des Minderungsfaktors.

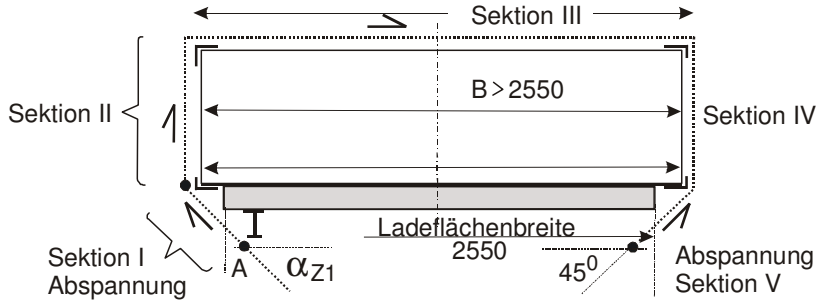


Abb. 9.1. „Überbreite“ Ladung

9.2 Berechnung Niederzurrwirkung bei überbreiter Ladung

9.2.1 Einführung

Die bisher hergeleiteten Formeln sind hier verwendbar, aber nur mit Erweiterungen. Es muß insbesondere die Lage der Spannvorrichtung in den Sektionen berücksichtigt werden. Es wird von der Gl. 7.7 als dem allgemeinsten Fall ausgegangen.

$$F_{N,v} = F_T (k_1 \sin \alpha_{Z1} + k_2 \sin \alpha_{Z2})$$

$$F_{N,v} = F_T \sin \alpha_Z (k_1 + k_2) \qquad \text{(Gl. 9.1)}$$

Wird die Spannvorrichtung in Sektion II angenommen, so ergibt sich für k_1 und k_2 nach Abb. 9.2 die Situation, daß es Umschlingungen vor und nach der Spannvorrichtung gibt. Und eine Berechnungsformel muß diese Varianten erfassen. Wegen dieser Problematik müssen die Niederzurrkräfte stets auf die Kräfte in den Zurrpunkten bezogen werden.

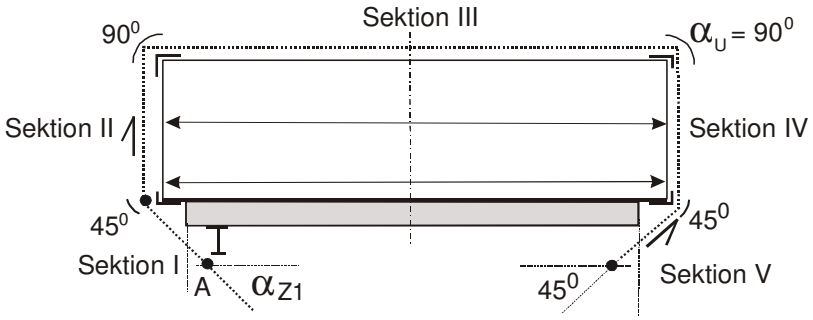


Abb. 9.2. Einteilung in Sektionen

Es wird, wie in der Statik üblich, zunächst in einem *Lageplan* die Maße, die Abmessungen und die Richtung der äußeren Kräfte über einen Längenmaßstab festgelegt, Abb. 9.3.

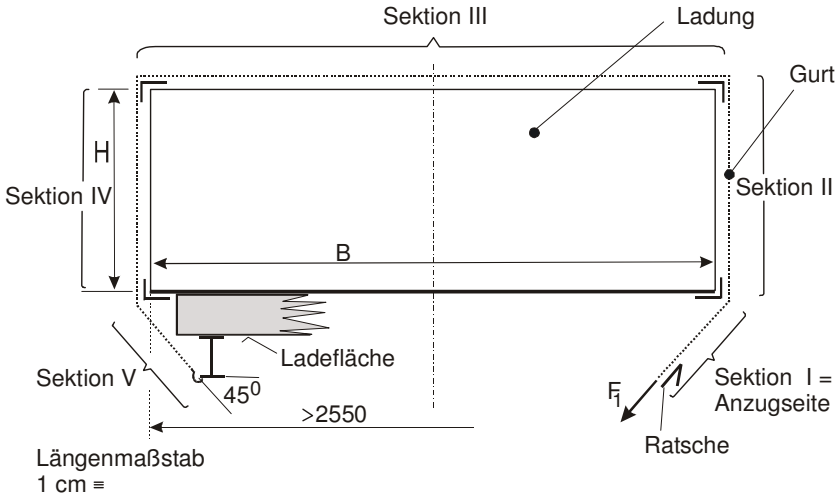


Abb. 9.3. Lageplan überbreite Ladung

9.2.2 Zeichnerische Lösung für Ratsche in Sektion I

Die zeichnerische Lösung kann aus Abb. 9.4 entnommen werden. Der dazugehörige Kräfteplan bei Anzug in Abschnitt 1 ist in der Abbildung enthalten.

Die Durchnummerierung zeigt die Arbeitsschritte der zeichnerischen Lösung. Es wird ein Gurtkraftabbau an allen Umlenkstellen berücksichtigt. Über den eingefügten Kräfteplan kann das Ergebnis auf andere Spannkräfte umgerechnet werden. Statt mit einer realen Kraft an der Zugseite wird mit 100 daN gerechnet. Bei entsprechend größeren Anzugkräften sind auch die anderen Kräfte größer.

Insgesamt wird mit einem resultierenden Umschlingungswinkel von $45^0 + 90^0 + 90^0 + 45^0 = 270^0$ für die Sektionen II bis V gerechnet. Von 100 daN ergibt sich dann nach der Eytelweinschen Gleichung eine Kraft von 24,4 daN an der Abspannseite.

$$F_4 = \frac{100 \text{ da N}}{e^{\frac{270^- \pi\, 0.3}{180^-}}} \qquad e^{\frac{270^- \pi\, 0.3}{180^-}} = 4,11$$

$$k = 0,307$$

$$f_M = 0,21$$

$$F_4 = 30 \text{ da N}$$

Die Kräfte F_1 und F_5 sind die äußeren Kräfte, die an der Ladung unter einem bestimmten Winkel angreifen. Mit ihnen wird im Kräfteplan die resultierende Kraft F_{Res} ermittelt (Arbeitsschritt 5). Sie beträgt ca. 108 daN. Im Arbeitsschritt 7. und 8. wird die Kraft soweit zurückverschoben bis Ladefläche „durchstoßen“ wird. An dieser Stelle wirkt die horizontale

und vertikale Komponente von F_{Res}. Mit dieser zeichnerischen Lösung ergibt sich eine resultierende vertikale Kraft in P von $F_{Res,ver}$ von ca. 87 daN und eine horizontale Kraft $F_{Res,hor}$ von ca. 45 daN. Für eine zeichnerische Lösung muß aber auch der Lageplan maßstäblich sein!

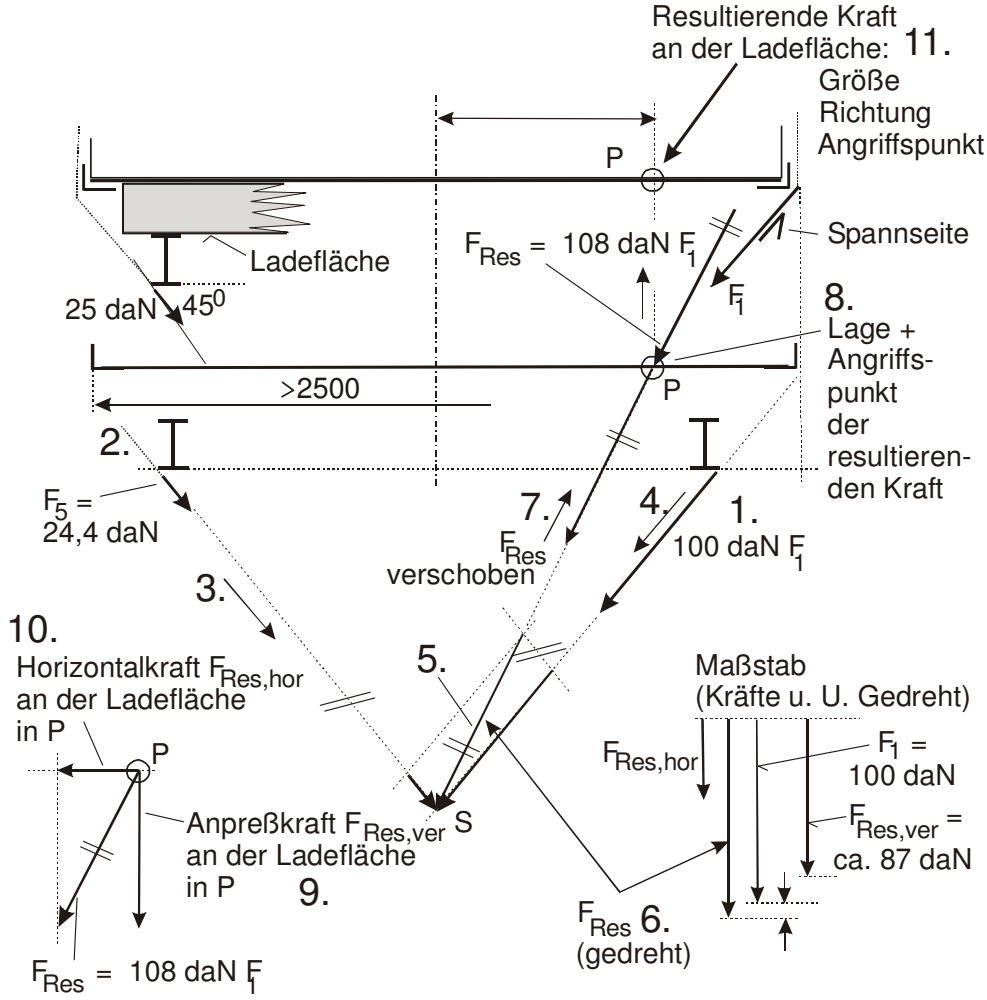


Abb. 9.4. Kräfteplan überbreite Ladung

9.2.3 Ratsche in Sektion I

Unter Berücksichtigung der Zurrwinkel ergibt sich dann aus Gl. 8.9 für den Minderungsfaktor f_M bei einer überbreiten Ladung:

$$f_M = (k_1 + k_2) \sin \alpha_Z \qquad \text{(Gl. 9.2)}$$

$$f_M = (k_1 + k_2) \sin \alpha_Z$$

$$f_M = (0{,}73 + 0{,}307) \sin 45^0$$

$$f_M = 1{,}03$$

9.2.4 Ratsche in Sektion II

Es ergibt sich die Möglichkeit die Ratsche in Sektion I, II und III zu setzen und bei Verwendung von zwei Spannvorrichtungen in Sektion I Und V. Es ergeben sich jeweils andere k-Faktoren. Für eine Lage in Sektion II ergibt sich:

Sektion III, IV, V: $k_2 = \frac{1}{e^{(90^0+90^0+45^0)\,\mu_K}}$

Sektion I: $k_1 = \frac{1}{e^{(45^0)\,\mu_K}}$

Damit ergibt sich für k_{ges} der Wert ($\mu_K = 0{,}3$) = 0,307 + 0,73 = 1,03.

$$f_M = (k_1 + k_2)\sin\alpha_Z$$
$$f_M = (0{,}307 + 0{,}73)\sin 45^0$$
$$f_M = 1{,}033 \bullet 0{,}707$$
$$f_M = 0{,}730$$

9.2.5 Ratsche in Sektion III

Für die Variante Spannvorrichtung in Sektion III errechnet sich (Umschlingungswinkel zweimal 135 Grad):

$$k = 0{,}49 + 0{,}49$$
$$k = 0{,}98$$
$$f_M = 0{,}986 \bullet 0{,}707$$
$$f_M = 0{,}697$$

9.2.6 Ratsche in Sektion II und Zurrwinkel 30 Grad

Damit ändern sich die Zurrwinkel von I nach II und von IV nach V.

Sektion III, IV, V: $k_2 = \frac{1}{e^{(90^0+90^0+60^0)\,\mu_K}} = 0{,}285$

Sektion I: $k_1 = \frac{1}{e^{(60^0)\,\mu_K}} = 0{,}730$

$$k = 1{,}015$$
$$f_M = (k_1 + k_2)\sin\alpha_Z$$
$$f_M = (0{,}285 + 0{,}730)\sin 30^0$$
$$f_M = 1{,}015 \bullet 0{,}5$$
$$f_M = 0{,}508$$

9.3 Zylindrische, überbreite Ladungen

Abb. 9.5 zeigt eine zylindrische Ladung, die überbreit (der Fall ist auch bei ladeflächenbreiten Ladungen möglich) und niedergezurrt ist. Es werden folgende Annahmen gemacht:

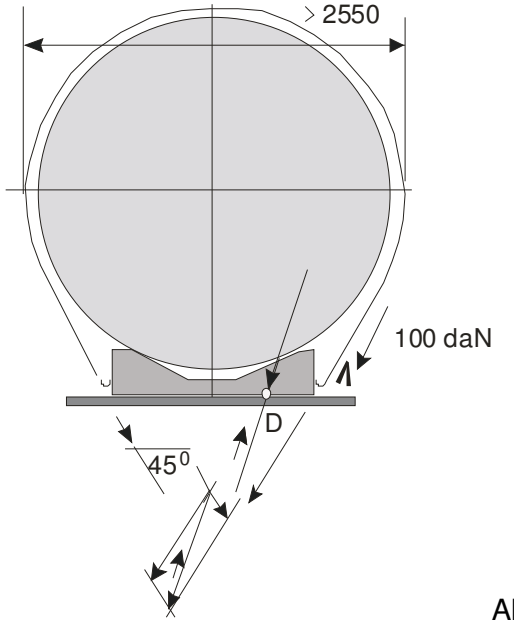


Abb. 9.5. Zylindrische Ladung

Es wird wieder die Gleichung 9.2 zugrunde gelegt.

$$F_{N,v,ges} = F_T (k_1 \sin \alpha_{Z1} + k_2 \sin \alpha_{Z2}) \qquad \text{(GL. 9.3)}$$

Für k_2 ist 1 mit einem Winkel von 45 Grad anzusetzen. Für k_1 ergibt sich dann 0,24 bei 270 Grad Umschlingungswinkel, für k also 1 + 0,24 = 1,24.

Da die Zurrwinkel gleich sind, ergibt sich:

$$F_{N,v,ges} = F_T (k_1 + k_2) \sin \alpha_Z$$

$$f_M = (k_1 + k_2) \sin \alpha_Z$$
$$f_M = 1{,}24 \cdot \sin 45^0$$
$$f_M = 0{,}879$$

Damit kann eine vertikale Niederzurrwirkung von

$$F_{N,v,ges} = F_T (k_1 + k_2) \sin \alpha_Z$$
$$= 100 \text{ daN} \cdot 1{,}24 \cdot \sin 45^0$$
$$= 87 \text{ daN}$$

erreicht werden, also ca. 87% der eingebrachten Spannkraft F_T.

Die Ladung muß gegen Rollen bei Seitenkräften zusätzlich gesichert werden.

Mit Gleichung 9.3 kann die Reibungszahl μ_K aus einer Umformung der Gleichung 5.4 errechnet werden, wenn der Umschlingungsbogen die Kräfte F_1 und F_2 gemessen werden:

$$\mu_K = \frac{180^0 \bullet \ln \frac{F_1}{F_2}}{\pi \bullet \alpha_U} \qquad \text{(Gl. 9.3)}$$

Es werden folgend Werte angenommen: F_1 = 450 daN, F_2 = 150 daN und α_U sei 75 Grad. Dan ergibt sich für μ_K:

$$\mu_K = 0{,}4_{19}$$

Mit der Gleichung 9.3 kann aber auch bei einer vorgegebenen Reibungszahl der Gesamtumschlingungswinkel errechnet werden, wenn für F_2 Wert nahe Null angesetzt wird[5)]. Es wird ein sehr geringer Wert von 0,001 für den Exponenten eingesetzt, da die Zahl im Nenner ungleich Null sein muß.

$$x = \ln 0{,}001$$

Für den Exponenten ergibt sich: $\alpha_U \mu_K = 6{,}9077$

Oder nach α_U aufgelöst:

$$\alpha_U = \frac{180^0 \bullet \ln \frac{F_1}{F_2}}{\pi \bullet \mu_K}$$

$$x = \ln 0{,}001$$

$$\alpha\mu = 6{,}9077$$

$$\frac{\alpha_U \bullet \pi \bullet \mu_K}{180} = 6{,}9077$$

$$\alpha = \frac{6{,}9077 \cdot 180}{\pi \bullet 0{,}2}$$

$$\alpha_U = 1979 \text{ Grad}$$

$$= 5{,}5 \text{ Vollumschlingungen}$$

Bei Anwendungsfällen der Eytelweinschen Gleichung in der Ladungssicherung wird es damit keine Fälle geben, wo der Wert F_2 Null werden wird.

5) Eine Null im Nenner eines Bruchs ist eine unzulässige Operation.

10 Nicht behandelte Fälle

Im Folgenden werden weitere Fälle zu überbreiten Ladungen vorgelegt, die aber nicht behandelt werden, die aber zu den Niederzurrfällen gehören. In den meisten Fällen kann die Lage der Spannvorrichtung kann verschieden sein. Auch in diesen Fällen ist Fällen anwendbar.

10.1 Betonplatten

Abb. 10.1 zeigt den Fall geschichteter Betonplatten.

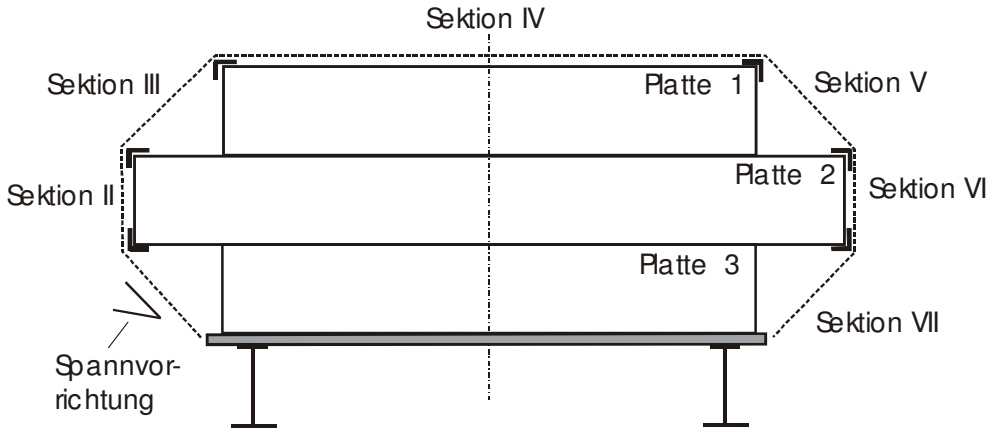


Abb. 10.1. Niederzurrung von Betonplatten

10.2 Überstaute Plattenladung

Ebenfalls ergibt der Fall überstauter Platten eine nicht gelöste Aufgabe, Abb. 10.2.

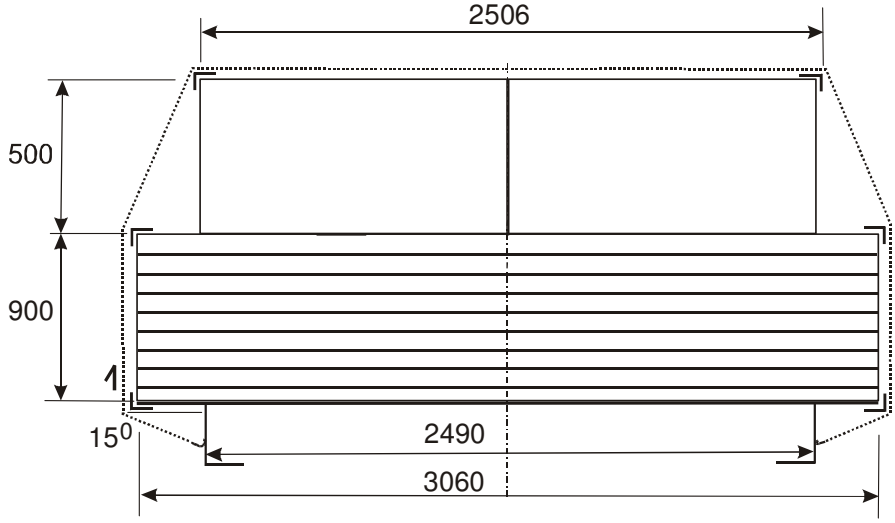


Abb. 10.2. Überstaute Plattenladung

10.3 Gestapelte Korbbogen-/Klöpperböden

Der Fall gestapelter Tankböden wird wegen der Beschreibung der Verschiebungswege einen komplizierten Berechnungsfall, Abb. 10.3, ergeben.

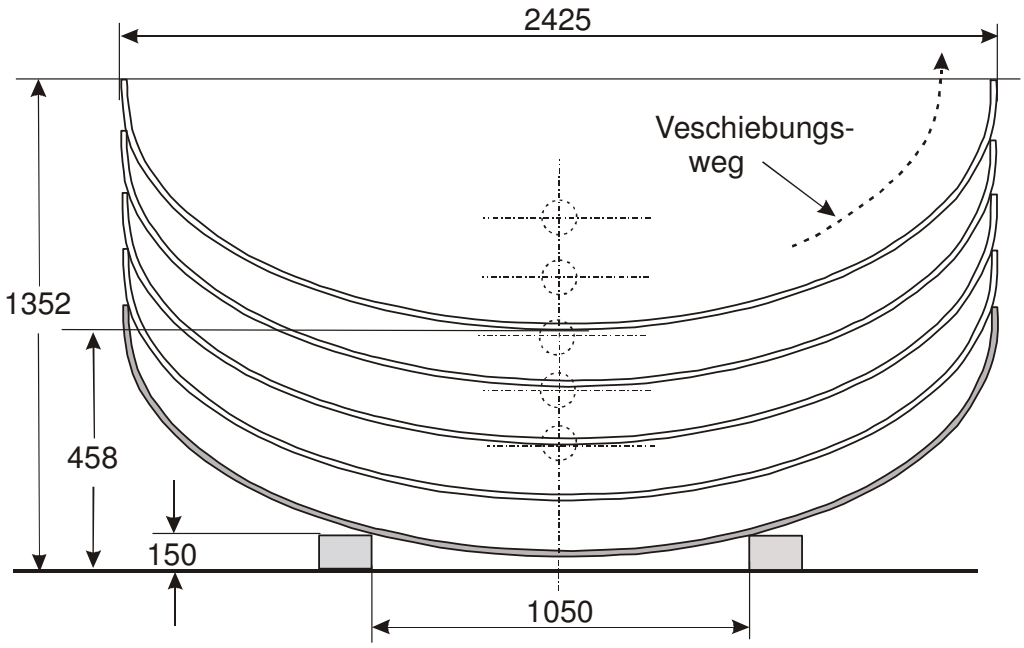


Abb. 10.3. Tankböden

Abb. 10.4 zeigt ein ähnliches Beispiel. Der Verschiebeweg verläuft allerdings horizontal geradlinig.

Abb10.4. Sicherung von Ringen aus Stahl

10.4 „Rundumzurrungen“

Die in den Abb. 10.5, 10.6 und 10.8 dargestellte Sicherungstechnik wirkt auf der Seite der Spannvorrichtung nach der Mechanik der Niederzurrtechnik und lässt sich mit den vorher vorgelegten Berechnungsverfahren berechnen, wenn die Zurrwinkel ausreichend groß sind.

Für rollfähige Güter müssen dann aber noch Keile gegen Wegrollen gesetzt werden.

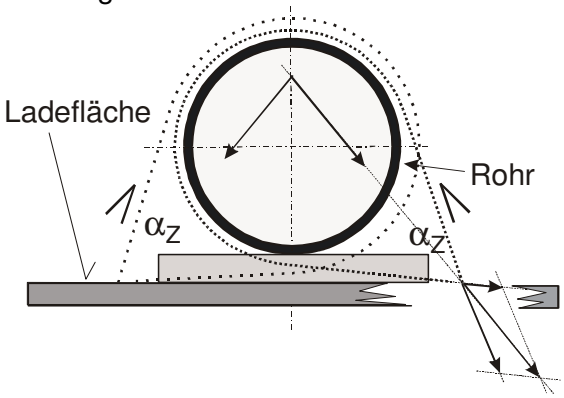


Abb.10.5. Doppelter Buchtlasching [11]

Eine Variante dazu ist der Rundtörnlasching, Abb. 10.6, 10.7 und 10.8.

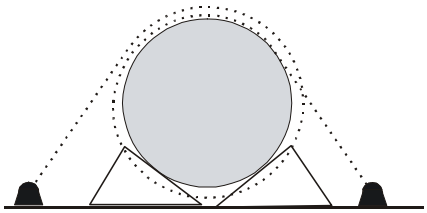


Abb. 10.6. Rundtörnlasching (Loop Lashing)

Rundtörnlaschings kommen in der Seefahrt vor, müssen aber als Sicherungsmaßnahme in der Ladungssicherung ohne Zusatzmaßnahmen als kritisch angesehen werden.

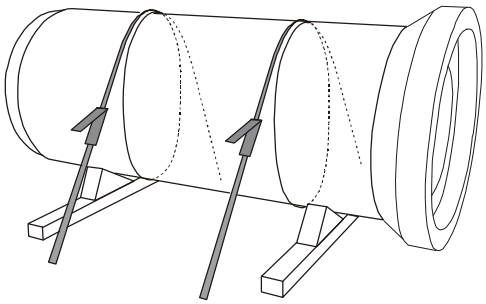


Abb. 10.7. „Rundtörnlasching“ [11]

Abb. 10.8. Beispiel für Rundumlasching (Rundtörnlasching [11])

Abb. 10.9 zeigt die Kräfte an einer einseitig angezogenem „Rundtörnlasching.

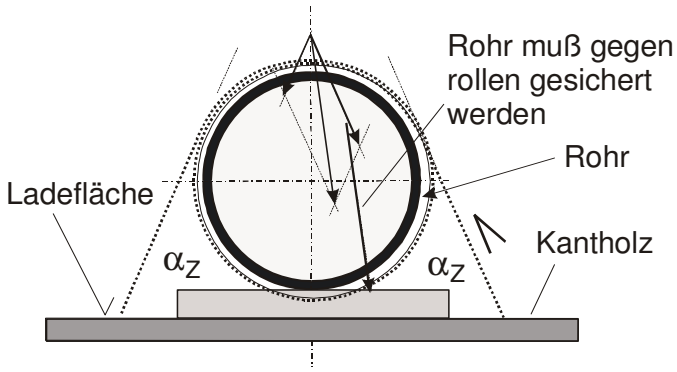


Abb. 10.9. Kräfteermittlung an Rundtörnlasching

10.5 Cross-Over-Lasching

In Abb. 10.10 wird eine Cross-Over-Lasching gezeigt. Die Sicherung stellt eine Niederzurrung dar, weil die Zurrmittel relativ senkrecht stehen und vorgespannt wird. Durch die diagonale Verlegung der Zurrmittel entstehen relativ lange Gurtlängen. Außerdem werden die Kanten schräg überspannt. [6)]

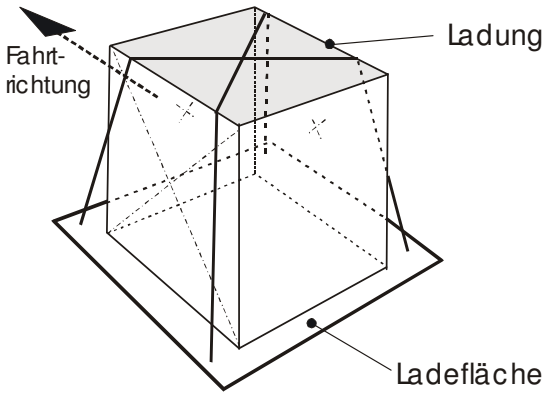


Abb. 10.10. Cross-Over-Lasching

In diesem Fall liegt keine rechtwinklige Umschlingung vor. Es gilt deshalb auch die Eytelweinsche Gleichung in ihrer bisherigen Form nicht.

[6)] Diese Zurrung soll nach Versuchen von Spediteuren größere Längs- und Seitenkräfte aushalten können, als eine vergleichbare Niederzurrung. Wie so oft, ist der Versuchsbericht nicht allgemein zugängig, so daß diese Aussagen nicht überprüft werden können.

Eine Variante der Cross-Over-Lasching-Sicherung ist in Abb. 10.11 dargestellt. Vom Grundsätzlichen her liegt hier eine Kombination einer Buchtlaschingsicherung mit einer Niederzurrung vor. Eine derartige Mischung ist abzulehnen, weil eine Sicherung (Buchtlaschingsicherung A) eine Ladungsbewegung voraussetzt, die andere (Niederzurrung B) bei einer Bewegung zunächst einen Großteil ihrer Rückhaltewirkung verliert.

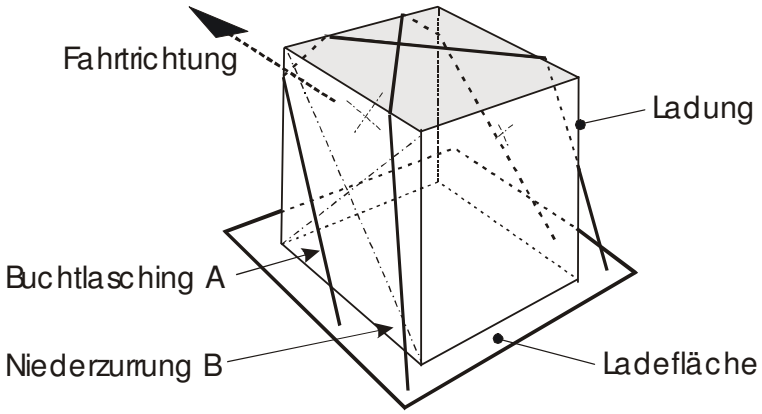


Abb. 10.11. Kopfbuchtlasching

Diese Variante kombiniert Kraftschluß mit dem Wirkprinzip Verformungsschluß. Wenn allerdings eine Niederzurrung mit Gleitschluß angesetzt wird, eine kinematische Berechnung eine Lösung ergeben.

11 Seitenzug einer Niederzurrung

11.1 Seitenzug an der Ladung

Wie in den Abschnitten 4.3.2 (ungleiche Zurrwinkel) und 6.2.5 (Gurtkraftabbau an den Kantengleitern) dargelegt wurde, entsteht eine Seitenzugkraft an der Ladung beim Niederzurren. Bei ungleichen Zurrwinkeln wird die Ladung zu der Seite mit dem flacheren Winkel gezogen. Liegt die Spannvorrichtung auf der Seite mit dem flacheren Zurrwinkel wird der Effekt verstärkt. Die folgenden Ausführungen zeigen, daß dieser Effekt zu einer Reduzierung der Rückhaltung auch in Fahrtrichtung führen kann.

Die Gurtkräfte in einer Niederzurrung können, wie in Abb. 11.1 gezeigt, dargestellt werden. Erkennbar werden soll, dass die überwiegende Kraft für die Horizontalkomponente von der Kraft F_{Rlinks} von der Seite mit dem kleineren Zurrwinkel kommt. Überwiegend ist sie es, die für einen Seitenzug verantwortlich ist!

Der Seitenzug und seine Wirkrichtung kann mittels Vektoraddition der Niederzurrkräfte sichtbar gemacht werden, Abb. 11.1. Gegeben sei eine unterbreite niedergezurrte Ladung mit gleichen Zurrwinkeln (kleiner 90 Grad) und einseitiger Spannvorrichtung.

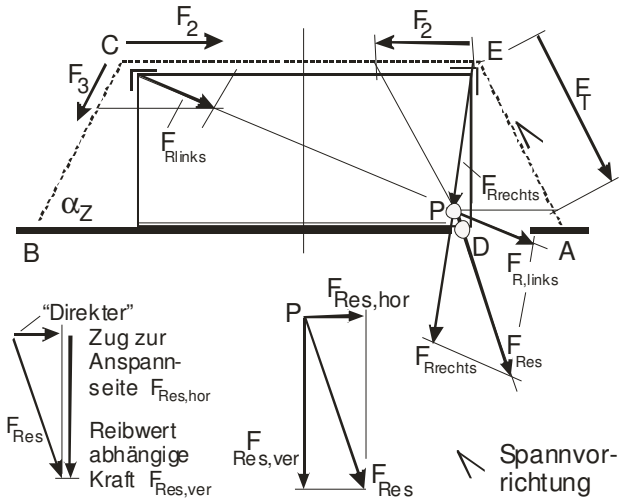


Abb. 11.1. Seitenzug an einer Ladung mit Niederzurrung

(Es gilt: Mindestens ein Zurrwinkel α_Z ungleich 90 Grad.)

Zusammengefaßt werden können die Kräfte F_T und F_3, die in den Zurrpunkten A und B wirken, mit der Resultierenden F_{Res} durch Vektoraddition. Der Punkt P stellt den Fußpunkt des Vektors dar, der Punkt D ist der Durchstoßpunkt durch die Ladefläche. In diesem Punkt wirkt die Vertikalkraftkomponente $F_{Res,vert}$ und Horizontalkomponente $F_{Res,hor}$ von F_{Res}. Die Kraft $F_{Res,hor}$ ist ein Zug zur Anspannseite hin. Die Ladung würde sich beim Anziehen in Richtung der Anspannungsseite bewegen, wenn die Haftreibung an der Aufstandsfläche der Ladung nicht eine Bewegung vehindern würde. Anders wird es sich bei geschichteten Platten oder rollfähigen Ladungen verhalten, wie in Abb. 11.3 dargestellt. Wird nicht gebündelt oder bei rollfähigem Gut keine Keile gesetzt werden, wird der Seitenzug sichtbar.

An diesem Fall, Abb. 11.2, soll erkennbar werden, dass die Seitenkraft für die Horizontalkomponente im Wesentlichen von der Kraft F_{Rlinks} kommt. Überwiegend ist sie es, die, in diesem Fall für den Seitenzug verantwortlich ist! Ursache ist der Gurtkraftabbau am Kantenschutz.

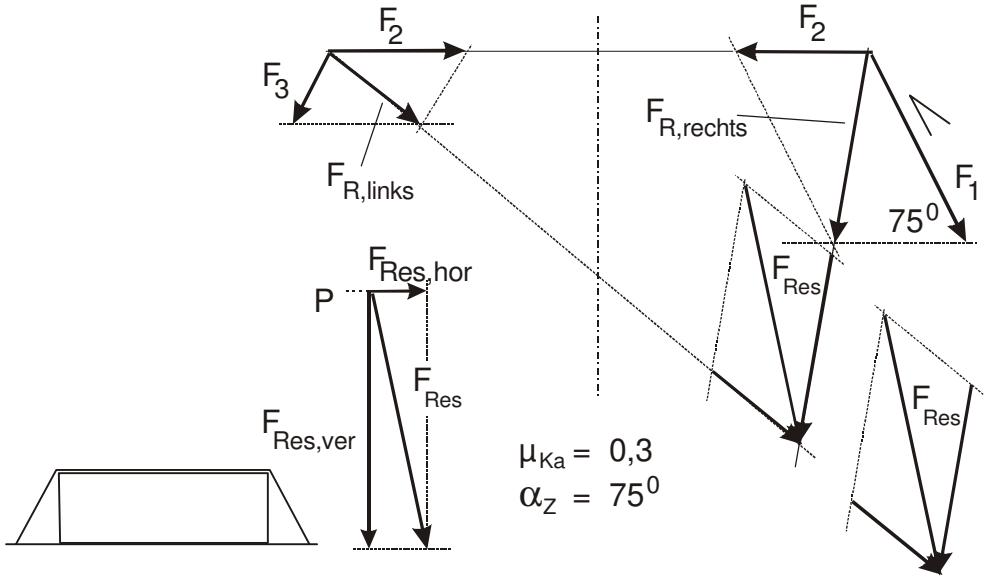


Abb. 11.2. Ermittlung Lage resultierende Kraft

In Abb. 11.3 ist eine Niederzurrung eines Rohres dargestellt. In diesem Fall wird eine Seitenzurrkraft nach rechts zur Spannvorrichtung wirken. Ursache ist der Verlust am Umschlingungswinkel. Die Ladung wird sich nicht nach links sondern nach rechts bewegen, weil der D-Punkt links liegt und damit ein Moment aus F_{Res} mal b entsteht. Diese Rollbewegung aus der Niederzurrung muß mit Keilen verhindert werden. Es spielt also auch die Form der Reibfläche eine Rolle.

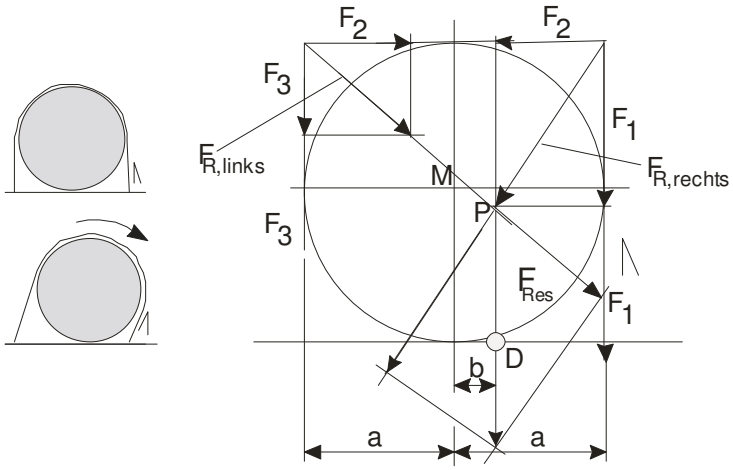


Abbildung 11.3. Seitenzug einer Rohrladungbei 90^0–Zurrwinkel

Bei Niederzurrungen von Ladungen mit ebenen Basisflächen mit einem 90 Grad Zurrwinkel wird der Wirkungsmechanismus Seitenzug nicht auftreten. Aber bereits bei einer einem Winkel von geringfügig kleiner als 90 Grad tritt ein Seitenzug auf.

11.2 Berechnungsformel für die Seitenzugkraft

Berechnet werden soll im Folgenden die Seitenzugkraft für eine Niederzurrung. Um die „außen“ an der Ladung wirkenden Kräfte deutlich machen zu können, soll die Ladung mit der Niederzurrung (Standardfall: Gleiche Zurrwinkel, einseitige Spannvorrichtung) zunächst „freigeschnitten“ werden, Abb. 11.4 [z. B. 20]. Es werden alle „außen“ wirkenden Horizontalkräfte *aus der Niederzurrung* angetragen und eine, in diesem Fall horizontale, Kräftebilanz vorgenommen werden. An der Ladung soll noch keine äußere Kraft, z. B. aus einer Fliehkraft, wirken.

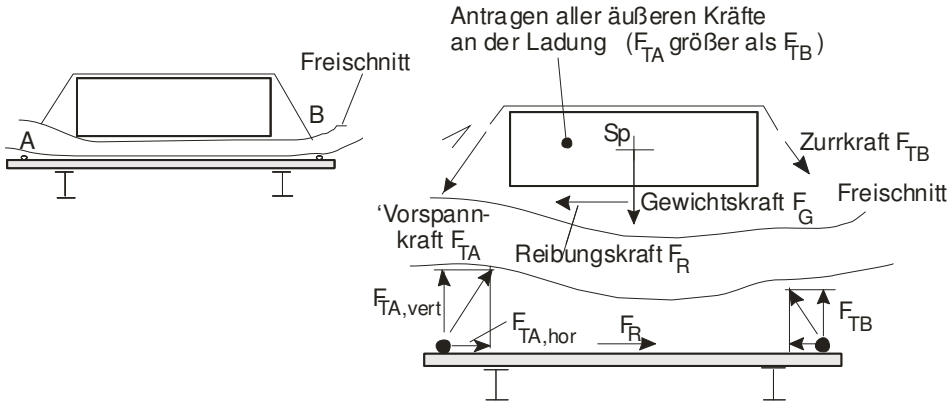


Abb. 11.4. Prinzip des „Freischneidens“

Die horizontale Kräftebilanz an den Zurrpunkten wird aus Abb. 11.5 ersichtlich. Dabei zeigt sich, daß ein Koordinatensystem (KOS) festgelegt werden muß, weil beide Horizontalkräfte unterschiedliche Richtungen haben können. Der Nullpunkt des KOS sei auf der Anspannseite durch (A) gelegt. Damit können dann die Kräfte mit einem Vorzeichen belegt werden.

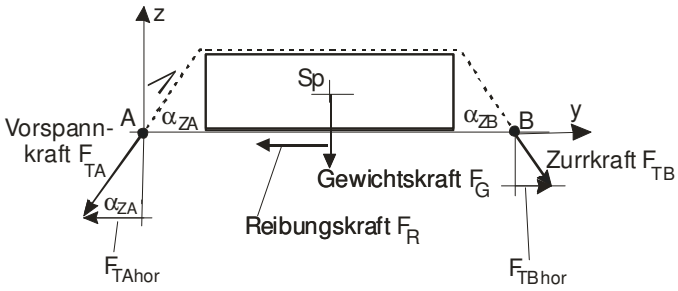


Abb. 11.5. Horizontalkräfte an Niederzurrung

Die resultierende Horizontalkraft F_{Res} aus der Niederzurrung ergibt sich dann aus der Differenz nach Gleichung 11.1. Die Reibungshaftung sei größer als die auftretende Differenzkraft.

$$F_R > F_{Res}$$

$$F_{Res} = -F_{TAhor} + F_{TBhor}$$

$$F_{Res} = \frac{-F_{TA}\cos\alpha_{ZA}}{e^{\frac{\alpha_{ZA}\pi\mu_{Ka}}{180}}} + \frac{F_{TA}\cos\alpha_{ZB}}{e^{\frac{\alpha_{ZB}\pi\mu_{Ka}}{180}}} \qquad \text{(G. 11.1)}$$

Es ergibt sich eine zu der für die Ermittlung der vertikalen Kräfte äquivalente Formel. Allerdings muß bei dem Resultat das Vorzeichen beachtet werden, denn ein negatives Vorzeichen bedeutet, daß die Ladung in negativer Richtung zur y-Achse gezogen wird.

11.3 Folgen des Seitenzuges auf die Quer- undLängskraft

11.3.1 Reibungskreis

Im Folgenden soll der sog. Reibungskreis und seine Bedeutung für die Auswirkungen des Seitenzugs dargestellt werden. In Abb. 11.6 wird eine Ladung dargestellt, die mit ihrer Gewichtskraft F_G in der Aufstandsfläche auf die Ladefläche drückt. Die maximale Reibungskraft F_R für Haftreibung aus F_G mal μ_{Haft} wird durch die Pfeilspitze angezeigt. In dem Reibungskreis ist die maximale Reibungskraft richtungslos. Das gilt aber nur, wenn Coulombsche Reibung vorliegt. Die Reibungskraft wirkt als reaktive Kraft erst dann, wenn eine äußere Kraft auf die Masse einwirkt. Sie wirkt aber auch bei einer Differenz aus den horizontalen Kräften aus einer Seitenkraft. Das wird oft nicht sichtbar, weil die Haftreibung in der Regel größer ist.

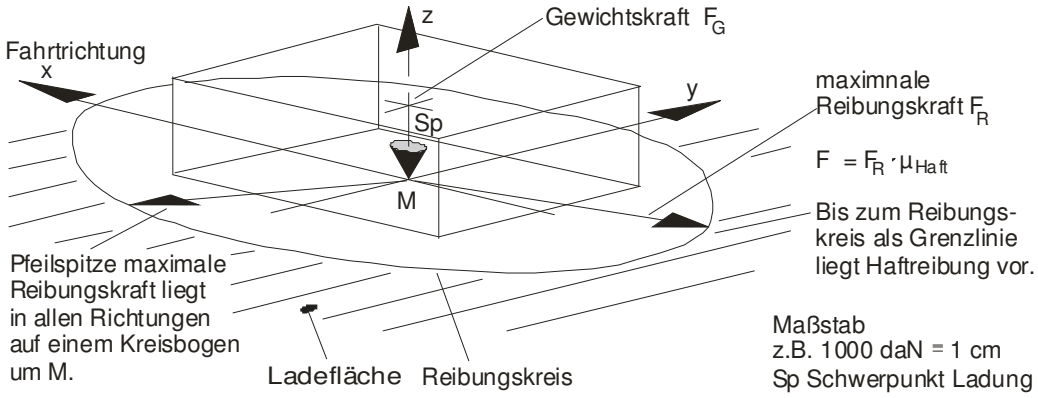


Abb. 11.6. Reibungskreis

11.3.2 Auswirkungen des Reibungskreises bei Seitenzug

Wirkt nun an der Ladung im Schwerpunkt Sp eine äußere Kraft, z. B. eine Fliehkraft entgegen der y-Richtung, so wird die Ladung in Ruhe verharren, solange die rückhaltende Reibungskraft F_R, in diesem Fall die Reibungskraft aus Gewicht und Niederzurrung, Abb. 11.7, größer ist.

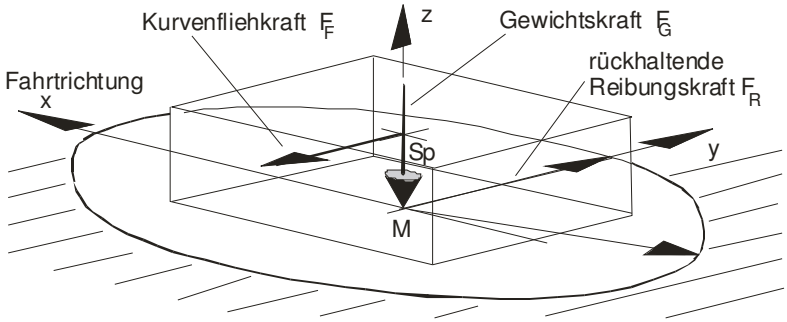


Abb. 11.7. Fall Fliehkraft

Wenn in diesem Reibungskreis nun statt der Fliehraft eine Seitenzugkraft aus einer Niederzurrung wirkt, kann dieser ebenfalls eingetragen werden, Abb. 11.8, in diesem Fall entgegen y-Richtung und an der Oberfläche.

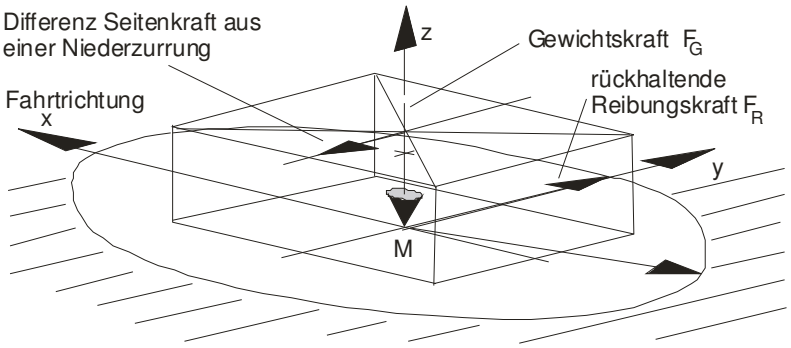


Abb. 11.8. Zug in Querrichtung

Der Seitenzug sei kleiner als die Haftreibungskraft. Dann verharrt Ladung ebenfalls in Ruhe.

Anders verhält es sich dagegen, wenn nun im Schwerpunkt eine Fliehkraft in der gleichen Richtung wie der Seitenzug zusätzlich wirkt. Nun wirken die beiden seitlichen Kräfte in Addition an der Ladefläche, Abb. 11.9. In diesem Fall ist es möglich, daß u. U. die resultierende Kraft über den Reibungskreis hinausreicht und damit die Haftreibungsgrenze überschritten wird. Die Ladung kommt in Bewegung.

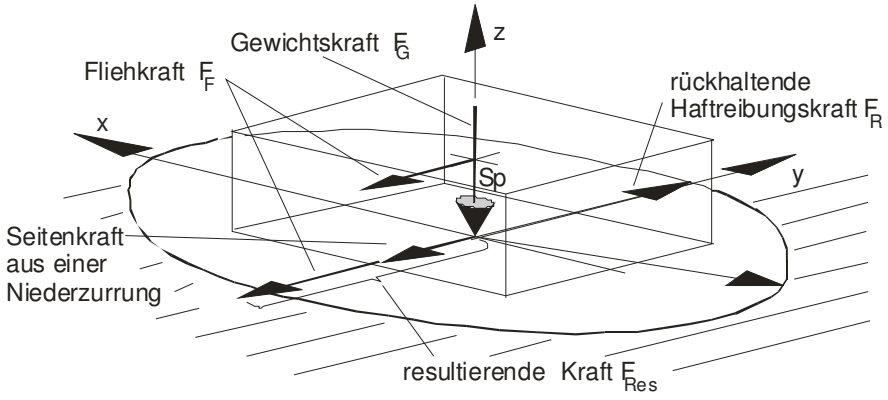


Abb. 11.9. Seitenzug mit Fliehkraft größer als Haftreibung

Eine weitere Variante ergibt sich, wenn eine Seitenzugkraft in Verbindung mit einer Masseträgheitskraft aus einem Bremsvorgang behandelt wird, Abb. 11.10. Beide Kräfte wirken

nicht gleichgerichtet, sondern rechtwinklig zueinander. Hier muß durch vektorielle Addition die resultierende Kraft F_{Res} aus der Seitenkraft und der Bremskraft ermittelt und zugrunde gelegt werden.

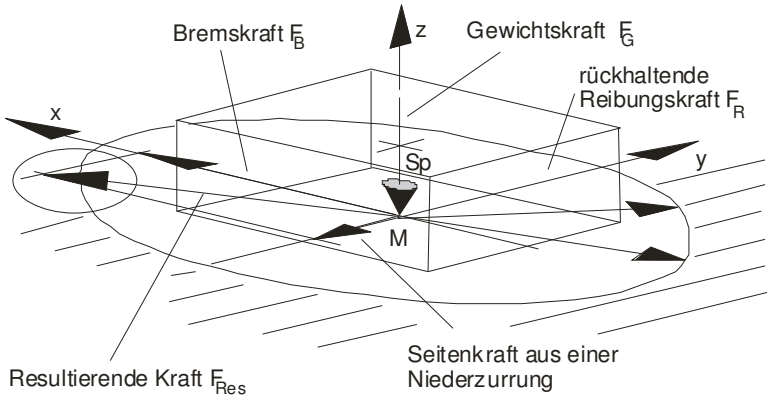


Abb. 11.10. Resultierende Kraft bei Brems- und Seitenkraft

Die resultierende Kraft bei zwei senkrecht aufeinander stehenden Kräften kann u. U. über den Reibungskreis aus Gewichts- und Niederzurrkraft mal μ hinausreichen. Die Ladung wird dann nicht mehr von Haftreibung gehalten. Es kommt zu einer Ladungsbewegung. Während aber die Wirkung aus einer Flieh- und einer Bremskraft bekannt ist, wird diese Folge aus einer Niederzurrung mit einer zusätzlichen Seitenkraft nicht erwartet. Wird ein Teil der möglichen Haftreibungskraft im Reibungskreis für den Seitenzug „verbraucht", so steht für eine Bremskraft u. U. nur ein Teil der möglichen Haftreibungskraft an der Ladefläche zur Verfügung.

Diese Folge des Seitenzuges kann als „Reibungskraftverlust in Längsrichtung aus einer Seitenkraft bei einseitiger Niederzurrung“ beschrieben werden und soll mit der Verkürzung *„Seitenkraftverlust"* bezeichnet werden. Dieser „Seitenkraft*verlust"* wird in den Berechnungsverfahren der heute existierenden Normung nicht berücksichtigt.

11.4 Berechnungsbeispiel

11.4.1 Annahmen

Es werden folgende Annahmen gemacht:

1	Spannkraft F_T	750 daN	Vorspannung wird erreicht
2			Spannvorrichtung in Sektion I
3	Masse Ladung m	900 kg	2 Paletten neben einander,
4			als „steife“ Masse angenommen.
5	Fallvariante:		Ladeflächenbreite Ladung nach Abb. 11.11
6	Reibhaftung Ladung/ Ladefläche μ_{Haft}	0,4	
7	Gleitreibungszahl μ_{Gleit}	0,35	Gurt/Kantengleiter
8	Gurtanzahl n	1	
9	Zurrwinkel α_{ZA}	70 Grad	
10	Zurrwinkel α_{ZB}	90 Grad	

11 „Antrieb“ 0,8 g nach vorn, 0,5 g seitlich

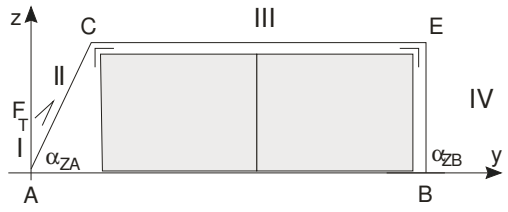


Abb. 11.11. Grundlage für Berechnungsbeispiel

Es wurden für das Beispiel ungünstig liegende Faktoren gewählt, wie Ladungsmasse hoch, niedrige Haftreibungszahl an der Aufstandsfläche, hohe Reibungszahl am Kantenschutz, ungleiche Zurrwinkel und Spannvorrichtung auf der Seite, die den kleineren Zurrwinkel hat. Es wird alles auf eine Gurtanzahl von n = 1 berechnet.

11.4.2 Querbeschleunigungsverlust

Mit den obigen Annahmen ergibt sich für die Horizontalkraft in A:

$$F_{TAhor} = \frac{F_T \cos \alpha_{ZA}}{e^{0}}$$

$e^{0} = 1$, da zwischen Spannvorrichtung und Zurrpunkt A keine Umlenkung vorhanden ist!

$$F_{TAhor} = 750\ daN \bullet 0{,}3420$$

$$F_{TAhor} = 256\ daN \qquad \text{(Gl. 11.2)}$$

Ebenso errechnet sich für F_{TBhor}:

$$F_{TAhor} = \frac{F_T \cos \alpha_{ZB}}{e^{\frac{(70+90)\,\pi\,\mu}{180}}}$$

$$e^{0{,}977} = 2{,}65$$

$$F_{TAhor} = \frac{750\ daN \bullet 0}{2{,}65}$$

$$F_{TAhor} = 0 \qquad \text{(Gl. 11.3)}$$

Die Seitenkraft in Zurrpunkt B wird Null, weil ein 90 Grad Zurrwinkel vorliegt. Damit entsteht eine Seitenkraft allein am Zurrpunkt A von 256 daN mit einem Minuszeichen, die Wirkrichtung ist also entgegen der y-Richtung.

Im Weiteren muß zunächst die maximale Vertikalkraft F_{Ver} aus Gewichts- und Niederzurrkraft ausgerechnet werden und daraus die tatsächliche Rückhaltekraft aus der Reibung.

$$F_{Ver} = F_G + F_{Nz}$$

$$F_{Nz} = F_T \left(\frac{\sin 70^0}{1} + \frac{\sin 90^0}{e^{\frac{(70+90)\pi \ 0,35}{180}}} \right)$$

$$F_{Nz} = 986 \text{ daN}$$

$$F_G = 900 \text{ daN}$$

$$F_{Ver} = 1886 \text{ daN}$$

$$F_R = 1886 \text{ daN} \cdot 0,4 = 754 \text{ daN} \qquad \text{(Gl. 11.4)}$$

Die Rückhaltekraft von 754 daN liegt nach allen Richtungen vor. Davon werden aber seitwärts in Minusrichtung der y-Richtung nur noch 754 daN – 256 daN = 498 daN zur Verfügung stehen. Damit kann dann die maximal noch mögliche Seitenkraft ermittelt werden:

$$754 \text{ daN} - 256 \text{ daN} = 498 \text{ daN} \qquad \text{(Gl. 11.5)}$$

Durch den Seitenzug stehen entgegen y-Richtung nur noch 498 daN statt 754 daN zur Verfügung. Mit einer Umformung der Newtonschen Kraftgleichung (Annahme 4) kann nun eine der Kraft äquivalente Seitenbeschleunigung ermittelt werden.

$$F = m \cdot a \Rightarrow a = \frac{F}{m}$$

$$a = \frac{4980 \text{ N}}{900 \text{ kg}} = 5,3 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2} \qquad \text{(Gl.11.6)}$$

Wäre der Seitenzug nicht wirksam, stünde eine deutlich höhere mögliche Rückhaltekraft zur Verfügung, nämlich:

$$F = m \cdot a \Rightarrow a = \frac{F}{m}$$

$$a = \frac{7540 \text{ N}}{900 \text{ kg}} = 8,3 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2} \qquad \text{(Gl. 11.6)}$$

Allein durch den Seitenzug stehen für eine Querbeschleunigung entgegen y-Richtung 3,0 m/sec^2 nicht mehr zur Verfügung.

11.4.3 Längsbeschleunigungsverlust

Im Folgenden soll aufgezeigt werden, daß in diesem Fall aus dem Seitenkraftzug auch in Längsrichtung ein Verlust an Sicherungswirkung zu verzeichnen ist. Es gelten die Annahmen von Abschnitt 11.4.1 und die Ergebnisse der vorherigen Berechnungen.

Bei einer Vollbremsung entsteht eine Masseträgheitskraft an der Ladung als „Antrieb“ nach vorn von:

$$900 \text{ kg} \cdot 0,8 \text{ g} = 7200 \text{ N} \qquad \text{(Gl. 11.7)}$$

Damit wird in einem Reibungskreis mit der rückhaltenden Reibungskraft von 7544 N (Gl. 11.4) die Antriebskraft von 7200 N (entspricht 0,8 g) innerhalb des Kreises liegen, die Ladung wird sich also nicht bewegen, Abb. 11.12. Die Richtlinienvorgaben sind erfüllt.

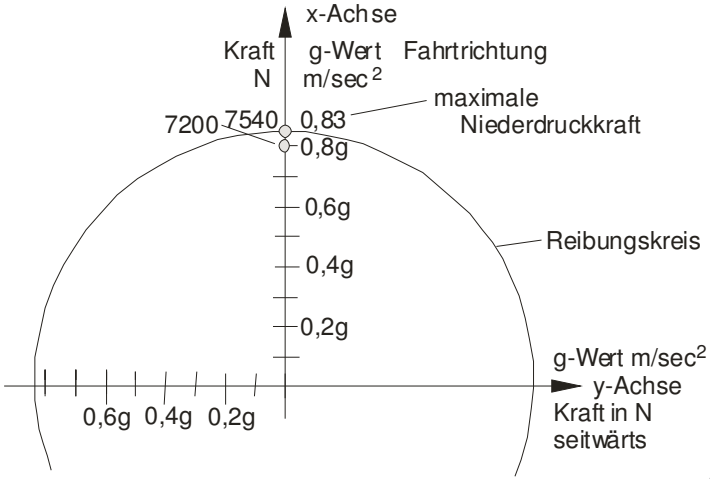


Abb. 11.12. Reibungskreis

Der Seitenkraftzug beträgt 2560 N. Das entspricht einem g-Wert von 0,32, wenn die Antriebskraft von 7200 N einem g-Wert von 0,8 g entspricht. Dieser Seitenzug entgegen y-Richtung wird nun mittels vektorieller Addition zweier senkrecht zueinander stehender Kräfte berücksichtigt, Abb. 11.13.

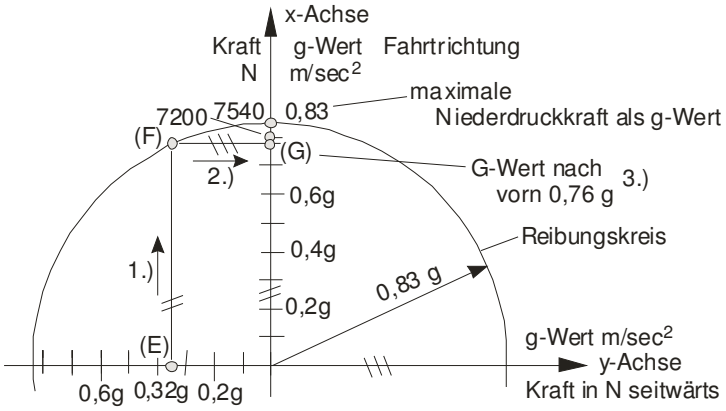


Abb. 11.13. Reduzierung der Längssicherung durch Seitenkraftzug

Die Abbildung 11.13 zeigt in der Nummerierung die Vorgehensweise bei der „vektoriellen Addition“. Ausgehend vom Punkt (E) bei 0,32 g (entspricht 2560 N Seitenzugkraft) wird eine Parallele zur x-Achse gezogen (1.). In (F) wird der Reibungskreis geschnitten. Durch (F) wird nun eine Parallele zur y-Achse gelegt, die in (G) die x-Achse schneidet und hier den Wert $0{,}76_5$ g liefert. Er liegt unter dem geforderten Wert von 0,8 g.

Ergebnis: Durch den Seitenzug wird die Sicherung nach vorn reduziert und das kann in bestimmten Fällen dazu führen, daß nach den gängigen Berechnungsverfahren der Richtlinien zwar gegen 0,8 g ausreichend gesichert ist, in der Praxis tatsächlich aber nicht!

12 Zusammenfassung

Die Feststellung zu dem Thema k-Faktor sind in dem Abschnitt 6.4 (Seite 38) und für die N-Formel unter Punkt 7.5 (Seite 46) enthalten. Darüber hinaus enthält diese Zusammenfassung Feststellungen allgemeiner Art zu der Sicherungstechnik Niederzurren, die sich aus dieser Studie ergeben.

Da die Niederzurrung masseabhängig ist (Abschnitt 7.5, Seite 48) ist sie für größere Massen ungeeignet, weil dann eine Unzahl von Gurten gesetzt werden müssen. Sie ist deshalb für tonnenschwere Ladungen (größer als ca. 5 t pro Einzelladung) nur mit besonderen technischen Maßnahmen geeignet. Das gleiche trifft zu, wenn die Ladung nicht ausreichend starr ist (Bigbags mit Schüttgut bei einem Schüttgutwinkel kleiner als 20 Grad) oder die Ladung Setzungserscheinungen (Holzstämme) zeigt.

Die Niederzurrung setzt eine niederzurrfähige Ladung („starr“) und ein geeignetes Fahrzeug (steife Ladefläche) voraus. Festgestellt werden kann, daß die Richtlinien zur Niederzurrung aus theoretischer Sicht völlig unzureichend sind.

Die Eytelweinsche Gleichung zur Berechnung von Gurtkräften ist ca. 200 Jahre alt! Da die Gleichung bereits in der VDI 2702 (Erstfassung) enthalten ist, war das Berechnungsverfahren schon damals bekannt. Die Theorie zur Abnahme von „Umschlingungskräften“ wird auch in der Schifffahrt zum Festmachen von Schiffen, im Motorenbau (Riementriebe), Bauwesen (vorgespannte Brücken) und an anderen Stellen benutzt. Die Theorie sollte aber nicht in Richtlinien stehen, da sie insgesamt, wie die Studien auch aufzeigen, zu kompliziert für Praktiker in der Anwendung ist.

Der Gurtkraftabbau darf in der Regel nicht vernachlässigt werden. Wenn der Gesamtumschlingungswinkel kleiner als 180 Grad bleibt und die Reibungszahl μ_{Ka} eine Grenze von ca. 0,3 übersteigt, muß der Einfluß berücksichtigt werden. Die Risiken bei Nichtbeachtung des Seitenzuges sind nur bei dem Standardfall einseitige Vorspannung bei ladeflächenbreiter Ladung und gleichgroße Zurrwinkel vertretbar. Das heißt auch, daß bei bestimmten Varianten der Seitenzug beachtet werden muß.

Für überbreite Ladungen sollten die Abspannwinkel (in der 1. und letzten Sektion) grundsätzlich 90 Grad betragen, auch wenn die Gesamtbreite dann noch etwas zunimmt. Die Niederzurrwirkung lässt sich dann erheblich verbessern.

Die Richtlinien sollten auf Formeln weitgehendst verzichten und dafür stärker auf Fallbehandlung und Tabellen abstellen. Die Richtlinien sollten stärker einfache Regeln enthalten, wie z. B. daß nur eine durch 2 teilbare Gurtanzahl gesetzt werden sollte oder daß die Spannvorrichtungen wechselseitig gesetzt werden müssen oder die Reibungszahl kleiner als z. B. 0,3 am Kantenschutz sein sollte.

Alle Ladungssicherungsrichtlinie in Deutschland haben den juristischen Stellenwert einer „anerkannten Regel der Technik“. Derartige Regeln werden in juristischen Verfahren in Deutschland immer nur den Stellenwert einer Praktikerregelung haben. Ist es schon zweifelhaft, ob eine Richtlinie mit Berechnungsformeln als Verladeanweisung taugt, so wird ein Jurist immer argumentieren können, daß eine Rechenformel für seinen Mandanten nicht umsetzbar ist. Diese Studie soll auch beitragen, daß für eine qualifizierte Ladungssicherung die Generalklausel „Stand von Wissenschaft und Technik“ gelten sollte.

Die Studie lässt erkennen, bearbeitet aber das Feld nicht, daß die Niederzurrtechnik u. U. einen Zielkonflikt hat, wenn eine Ladung mit einer Niederzurrung gleichermaßen gegen Verschub *und* Kippen gesichert werden soll.

Ein weiteres Problemfeld sind die Reibungszahlen. Im Maschinenbau und in der Unfallmechanik wird in der Regel mit einer Toleranz von ca. ± 8 % gerechnet. Diese Unsicherheit bestimmt die gesamte Denkweise im Maschinenbau, zu der auch die Ladungssicherung gehört, weil für beide Grundlage die Technische Mechanik ist. Das Messen von Reibungszahlen in der zweiten Kommastelle ist deshalb völlig unsinnig. Noch deutlich schwieriger ist es, allgemeingültige Gleitreibungszahlen zu ermitteln. Es erscheint deshalb sinnvoll Tabellen mit Reibungszahlen in die Richtlinien aufzunehmen oder auf die Verwendung von Gleitreibungszahlen zu verzichten und, um eine Sicherungslücke zu vermeiden, indem auf einen prozentualen Faktor von der Haftreibungszahl (= 0,6 μ_H) zurück zu gegriffen wird. Sonst wird der Einfluß der vertikalen Aus- und Einfederung nicht berücksichtigt.

13 Bildnachweis

Abb. 4.5 S. Ehringer, SE-LogCon, 86 943 Thaining

Alle weiteren Fotos und Skizzen der Verfasser.
(Skizzen dürfen mit Quellennachweis verwendet werden.)

14 Literatur

[1] Podzuweit, Ulrich, Forschungsvorhaben des deutschen Bundesverkehrsministeriums „Ladungssicherung von Gefahrgut“, FE Nr. 90380/9, 1994,

[2] Podzuweit, Ulrich, Forschungsvorhaben des deutschen Bundesverkehrsminiministeriums „Ermittlung der Transportbeanspruchungen zur Optimierung der Ladungssicherung in Containern“, Teil Straßentransport, 2001, BMV FE Nr. A.24/16.49.00 – 96473/97 – K, Nachtragsbericht

[3] Podzuweit, Ulrich, Ladungssicherung – Neue Erkenntnisse zur Sicherungstechnik Niederzurren, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2002, Heft 1

[4] Niemann, Gustav, Maschinenelemente, Springer-Verlag, Berlin, 1963

[5] Szabo, Istvan, Einführung in die Technische Mechanik, Springer-Verlag, Berlin, 1984

[6] Podzuweit, Ulrich, „Zurück zu den Wurzeln“, Gefährliche Ladung, 2013/07

[7] Brandl, Marc, Messung von Trockenreibung, Fortschrittsberichte VDI-Reihe 11, Nr. 292, VDI-Verlag 2000, ISBN 3-18-329211-4

[8] Eytelwein, J. A., Handbuch der Statik fester Körper, Realschulbuchhandlung, Berlin 1808

[9] Hörger, Hans, H., Beanspruchungen, Maßnahmen und Vereinbarungen im Transportwesen, VDI-Verlag, 1966

[10] Kaps, Hermann, www.tis-gdv.de (TIS News +++Ladungssicherung im Straßenverkehr – die Fakten), 2013

[11] Strauch, Winfrid, Containerhandbuch, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft GDV, Berlin

[12] Podzuweit, Ulrich, Bigbagtransport – Studie zu Versatzbewegungen von Weichladungen, Bibliothek der Hochschule München, 2013
www.hm.edu/bib → Recherche → HMdigital→

[13] Pahl, G., Beitz, W., et al., Konstruktionslehre, 5. Auflage, Verlag Springer

[14] Jagelcak,Juraj, Verification measurements of frequent lashing methods in road freight transport and load distribution diagram, University of Zilina, 010 26 Zilina, Slovakia, 2006, Juray.jagelcak@fpedas.utc.sk

[15] Podzuweit, Ulrich, Ehringer, Sigurd, Niederzurrtechnik – Leitfaden für die Praxis, expert verlag, 71 272 Renningen, 2008, ISBN 978-3-8169-2719-8

[16] Podzuweit, Ulrich, Sicherung von Kurzholz auf Straßenfahrzeugen I, Versuche des Gesamtverbandes der deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) und der BG Fahrzeughaltungen, 2005
www.tis-gdv.de/tis/ls/holzversuche/inhalt.htm (zuletzt2014)

[17] Lippmann, R., Geipel, F., Beitrag zur Erarbeitung eines Schadensmodels für druckbeanspruchte Verpackungen, DIE VERPACKUNG, 1/77

[18] VDI 2700, Fassung von 1990, Seite 10

[19] Podzuweit, Ulrich, Zurrtechniken der Ladungssicherung, unveröffentlicht

[20] Gross, D., Hauger, W., Schröder, J., Wall, W., Technische Mechanik I, Springer-Verlag, 11. Auflage, ISBN 978-3-642-19983-7, Seite 12 ff

Tabelle A 1.1

Statischer Ansatz

Sicherung gegen aus	Bewegungen zur Fahrtrichtung quer	längs	kombiniert längs/quer quer/quer längs/längs l/q	q/q	l/l
Verschub	———	X	—	—	—
(Kippen) 1)	———	———	—	—	—
Rollen 1) 2)	———	———	—	—	—

Kinematischer Ansatz

Verschub 3)	———	———	—	—	—
Kippen 3)	———	———	—	—	—
Rollen 2) 3)	———	———	—	—	—

2014

X Bearbeitet ——— nicht bearbeitet

1) Statische Betrachtungsweise nicht vertretbar.
2) bei rollfähigen Gütern
3) Statische Betrachtungsweise nicht vertretbar.

Tabelle A 1.2

Statischer Ansatz

Sicherung gegen aus	Bewegungen zur Fahrtrichtung quer	längs	kombiniert längs/quer quer/quer längs/längs l/q	q/q	l/l
Verschub	1 2	1 2			
(Kippen)					
Rollen					

Kinematischer Ansatz

Verschub					
Kippen					
Rollen					

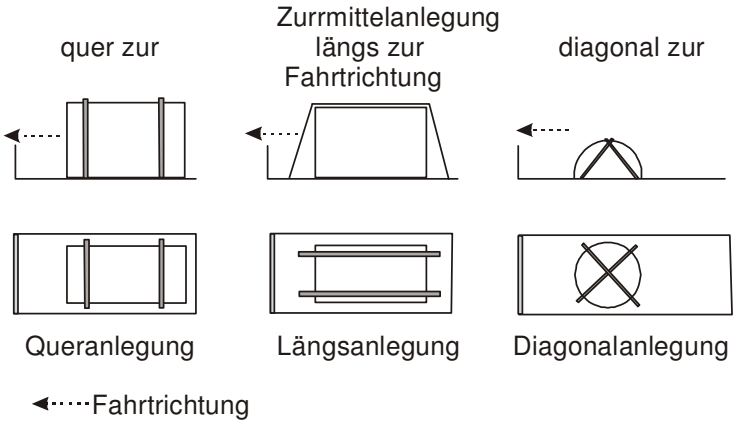
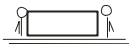
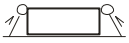
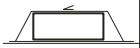
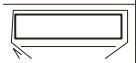
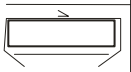


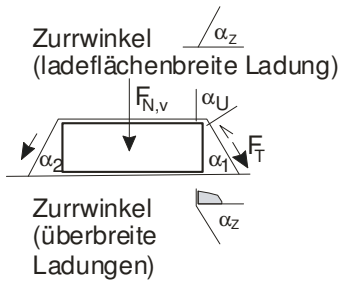
Tabelle A 2.1

		Ratsche	Zurr-winkel	Formel	Bem.	k-Faktor	f_M
1.0		beidseitig	sym/90^0	$F_{N,v,ges} = 2 \cdot F_T \cdot 1 \cdot 1$ (sin 90 $=^0$1)	——	2	2
1.1		beidseitig	sym.	$F_{N,v,ges} = 2 \cdot F_T \cdot 1 \cdot \sin \alpha_Z$	6)	2	1,93
1.2		mittig	sym.	$F_{N,v,ges} = F_T \cdot k_1 \cdot 2 \cdot \sin \alpha_Z$	1)	1,3	1,25
1.3		mittig	unsym.	$F_{N,v,ges} = F_T (k_1 \sin \alpha_{Z1} + k_2 \sin \alpha_{Z2})$	3)		1,33
1.4		einseitig	sym.	$F_{N,v,ges} = F_T (k_1 + 1) \sin \alpha_Z$	4)	1,45	1,4
1.5		Einseitig	unsym.	$F_{N,v,ges} = F_T (k_1 \sin \alpha_{Z1} + \sin \alpha_{Z2})$	3)	1,53	1,32
1.6		beidseitig	unsym.	$F_{N,v,ges} = F_T (\sin \alpha_{Z1} + \sin \alpha_{Z2})$			
2.1		einseitig	sym.	$F_{N,v,ges} = F_T (k_1 \sin \alpha_{Z1} + k_2 \sin \alpha_{Z2})$	5)	1,24	0,879
2.2		einseitig	sym.	$F_{N,v,ges} = F_T (k_1 \sin \alpha_{Z1} + k_2 \sin \alpha_{Z2})$		1,03	0,73
2.3		mittig	sym.	$F_{N,v,ges} = F_T \cdot k_1 \cdot 2 \sin \alpha_Z$	2)	0,98	0,947
2.4		einseitig	sym.	$F_{N,v,ges} = F_T (k_1 + 1) \sin \alpha_Z$	4)	1,24	0,879

k-Faktor: Berücksichtigt Gurtkraftabbau am Kantengleiter
Minderungsfaktor f_M : Erfasst Abbau am Kantenschutz mit dem zugehörigen Zurrwinkel

Bemerkungen:

1) $\alpha_Z = 75^0$
2) $k_1 = k_2$, $k_{½} = f(\Sigma \alpha_{U,i})$
3) $\alpha_{Z1} = 60^0$ $\alpha_{Z2} = 75^0$
   $\mu_I = 0{,}3$, Ratsche links (60^0)
4) k_1 aus Summe Umschlingungswinkel, bzw. $f(\Sigma \alpha_{U,i})$
5) $k_1 = 1$, $k_2 = f(\Sigma \alpha_{U,i})$
6) Direktzurrung mit $\alpha_Z = 75^0$, $1 = e^0$; es gibt keinen Umschlingungswinkel α_U , nur einen Zurrwinkel von 75^0



Ermittlung von Umschlingungswinkeln α_U

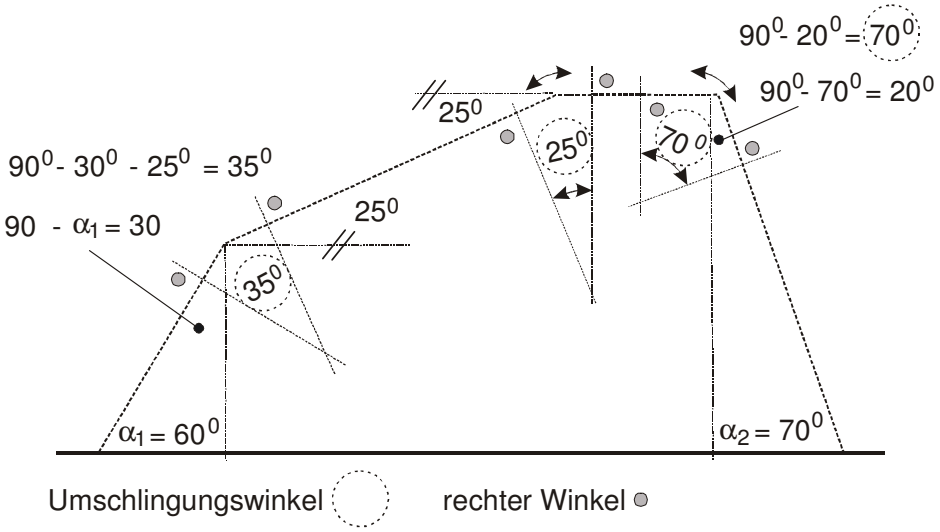


Abb. A 3.1. Ermittlung Umschließungswinkel

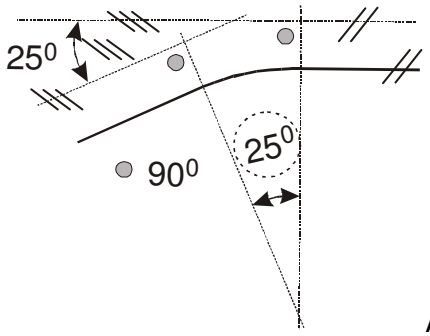


Abb. 3.2. Ausschnitt zu Abb. A 3.1

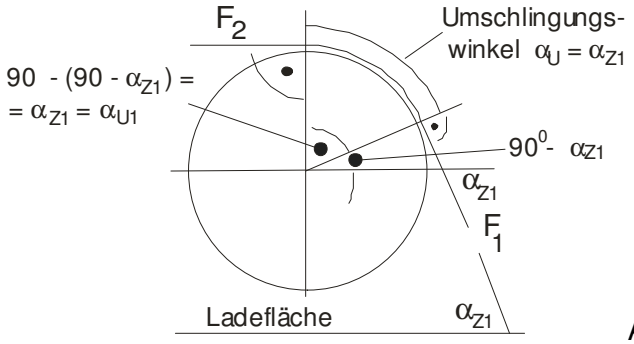


Abb. A 3.3. Beispiel 2

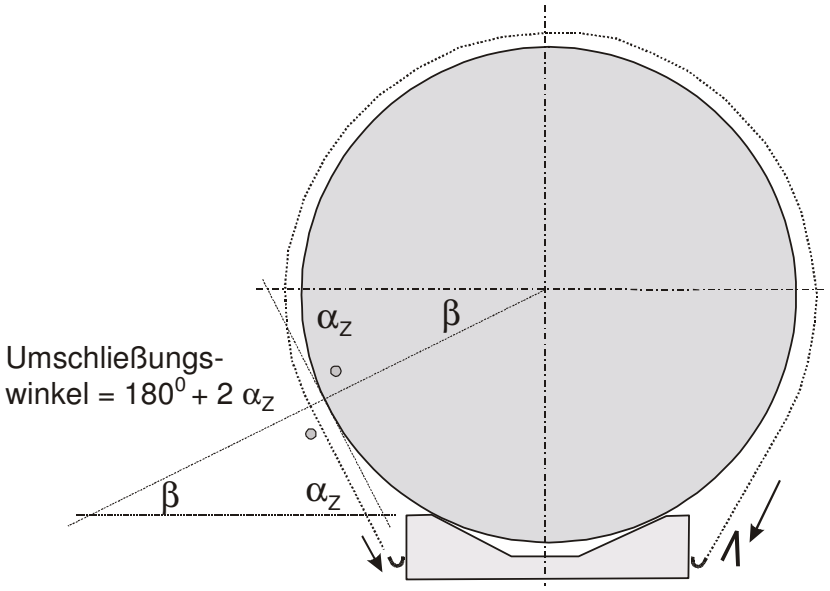
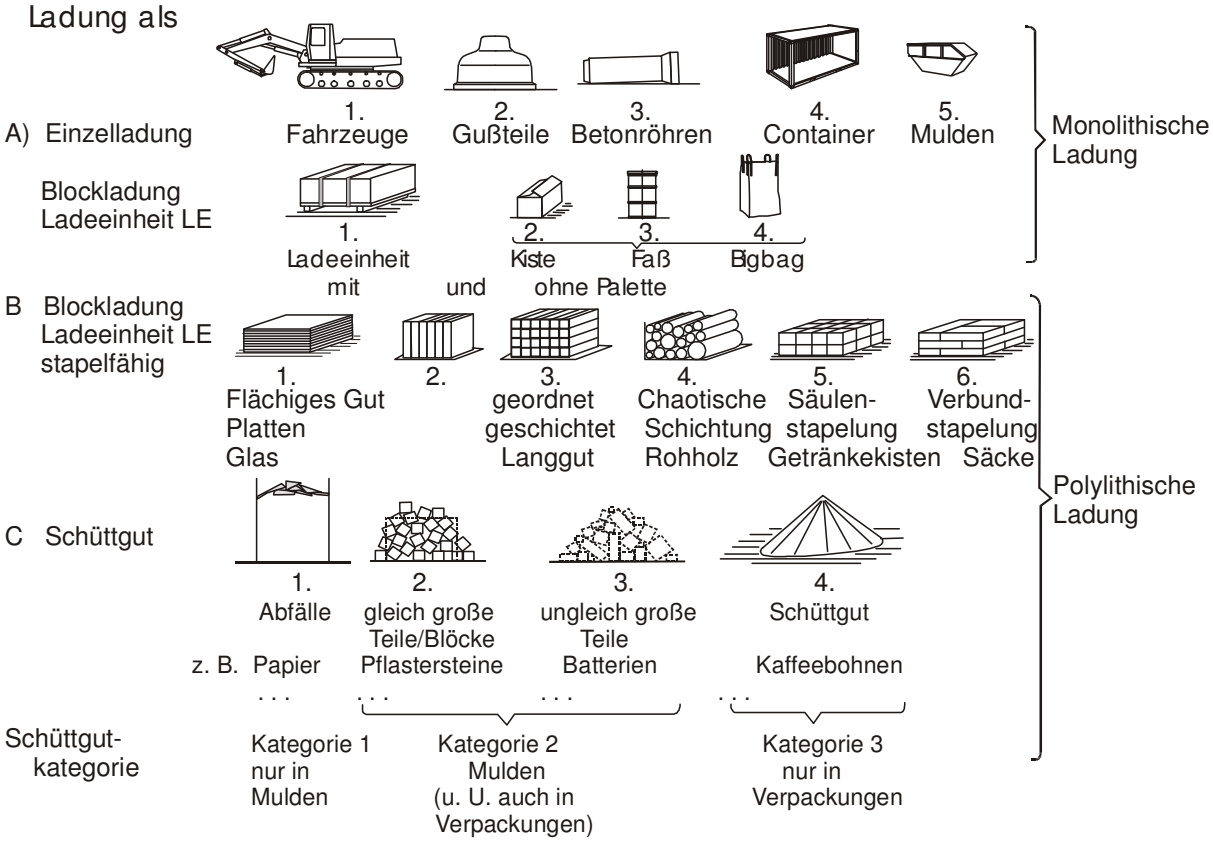


Abb. A 3.4. Beispiel 3

Einteilung von Ladungen

Tabelle A 4.1



Versuche in [12] (Auszug)

1 Aufprallphase

1.1 Einführung

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

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

1.2 Verschub in der Schwellphase einer Bremsung

Wird einmal davon ausgegangen, daß die Antriebskraft von der Masseträgheitskraft einer Schwellphasenbremsung ausgeht, dann kann mittels einiger Annahmen ein zeitlicher Zusammenhang zwischen dem Verschubweg und der jeweils zurückgelegten Zeit errechnet werden. Ausgangspunkt ist ein Verschubdiagramm nach Abb. A.5 1.

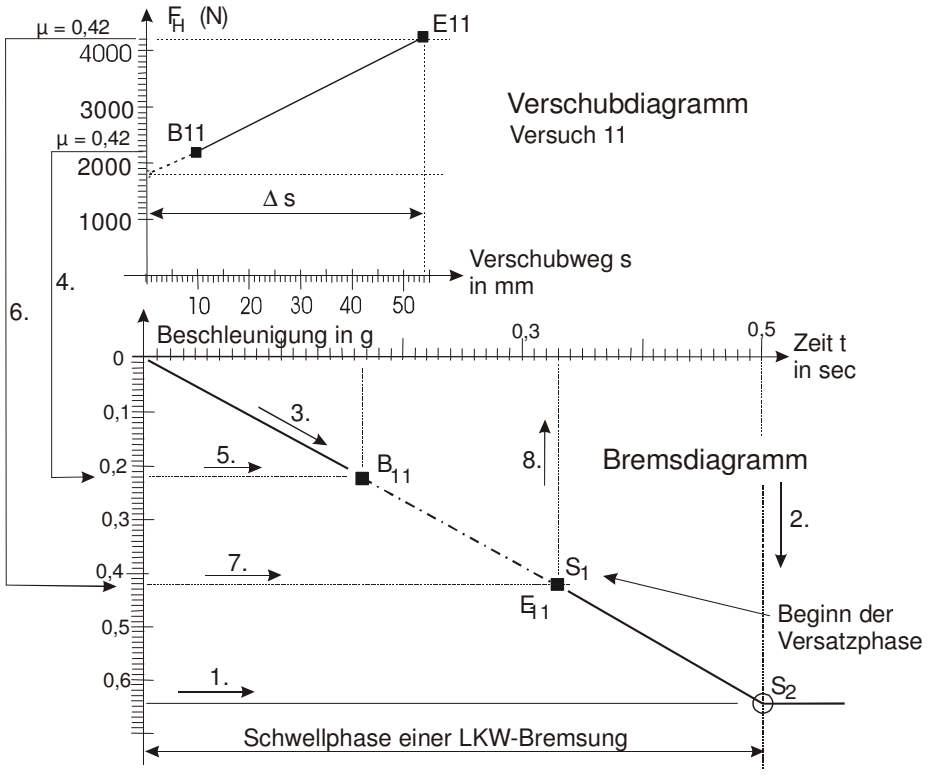


Abb. A 5.1. Brems- mit Versatzdiagramm

Zu den einzelnen Schritten in Abb. A 5.1:

1. → 3. Konstruktion des Schwellphasenverlaufs

4. → 7. Übertragung des Verschubdiagramms

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

1.3 Aufprallgeschwindigkeit, -energie

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

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

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

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

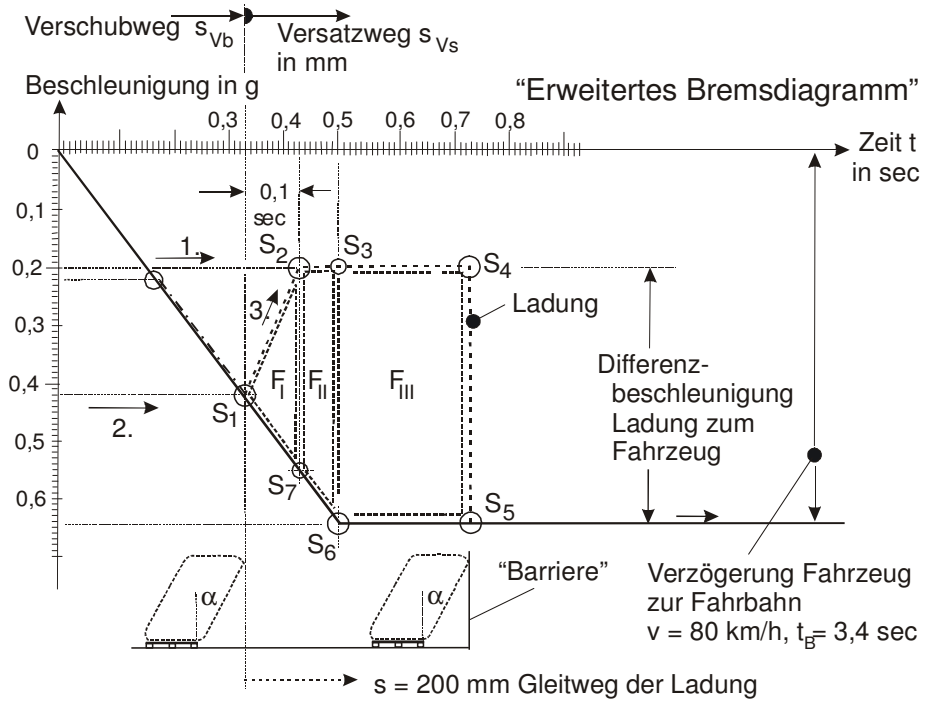


Abb. A 5.2. „Erweitertes Bremsdiagramm“

Das Bremsdiagramm ist erweitert um die Bewegung der Ladung von Punkt S_1 bis Punkt S_4, Abb. 9.2. In S_4 komme die Ladungsbewegung an einer steifen „Barriere“ auf dem Fahrzeug (z. B. Stirnwand) zum Stillstand. Von S_4 bis S_5 wird die Zeitdifferenz mit Null angenom-men. Die Fahrzeug und die Ladungsbewegung sind reibungsverzögert und werden idealisiert für diese Vorgänge als zeitlich konstant angenommen. Damit liegt an der Ladung eine sog. Differenzbeschleunigung als Antriebskraft (Antriebsbeschleunigung mal Masse) von Punkt S_3 bis S_4 an, die damit ebenfalls über dem Gleitweg zeitlich konstant ist. Aus der Differenzbeschleunigung und der Zeit Δt kann dann die Aufschlaggeschwindigkeit berechnet werden.

1.4 Nachrechnungen Aufprallgeschwindigkeit

Um zu prüfen, ob das Fahrzeug vor Beendigung des Ladungsverschubs zum Stillstand kommt, wird zuerst die Bremszeit des Fahrzeugs nach [16] errechnet. Die Fahrzeuggeschwindigkeit betrage 80 km/h und die Verzögerung a_F = 6,5 m/sec^2. Das Beispiel wird ohne Rechnung mit Ober- und Untergrenzen für die Reifen- und die Ladungsreibung behandelt. Damit wird die Bremszeit bis Stillstand des Fahrzeugs:

$$t = \frac{v}{a_F}$$

$$= \frac{80\,km/h}{6{,}5\,m/sec^2}$$

$$= 3{,}4\,sec$$

Die Bremszeit beträgt ca. 3,4 sec.

Der Ladungsversatz von 200 mm Länge liegt, wie unten gezeigt wird, zeitlich deutlich innerhalb der Bremszeit des Fahrzeugs von 3,4 sec. Vereinfacht wird die Berechnung der Aufprallgeschwindigkeit der Ladung in Abb. 9.1 nur die „Fläche“ S_3, S_4, S_5 und S_6 herangezogen. In diesem Bereich liegt eine konstante Differenzbeschleunigung vor. Mit μ_G = 0,2 ergibt sich eine Gleitreibungsverzögerung von ca. 2 m/sec^2. Damit wird die anzurechnende Verzögerung:

$$a_{DIF} = 6{,}5 - 2\,(m/sec^2)$$

$$= 4{,}5\ m/sec^2$$

Die Aufprallgeschwindigkeit errechnet sich dann aus folgendem Ansatz:

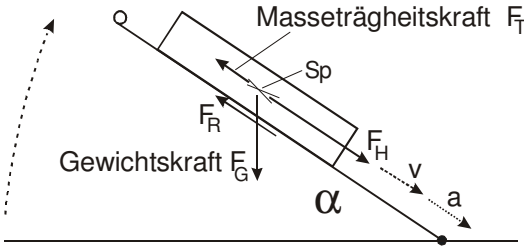
Für die Nachrechnung soll statt der Bremsverzögerung als Antriebskraft ein Antrieb aus einer schiefen Ebene genommen werden. Wird der Winkel auf der schiefen Ebene so groß, daß die Ladung in Bewegung kommt, so wirkt nun entgegen der Bewegungsrichtung die Masseträgheitskraft F_T, Abb. A 5.3, da die Ladung durch die Gewichtskraft beschleunigt wird. Da an der Gewichtskraft die Massenanziehungskraft wirkt und diese konstant ist, wird die Bewegung aus der Hangabtriebskraft ebenfalls gleichmäßig konstant beschleunigt sein.

Das Kräftegleichgewicht in Richtung der Wirkfläche ergibt sich dann nach dem d`Alembertschen Ansatz:

$$F_H - F_R - F_T = 0$$

oder

$$m g \sin\alpha - m \ddot{s} - m g \mu \cos\alpha = 0 \qquad \text{(Gl. A 5.1)}$$



Ladung wird durch g in der Hangabtriebskraft beschleunigt.

Abb. A 5.3. Sich bewegende Ladung auf einer schiefen Ebene

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

$$\ddot{s} = g \sin\alpha - g \mu_G \cos\alpha \qquad \text{(Gl. A 5.2)}$$

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

$$\dot{s} = v = (g \sin\alpha - g \mu_G \cos\alpha) \cdot t \qquad \text{(Gl. A 5.3)}$$

und für den Weg als Funktion der Zeit:

$$s = \frac{1}{2}(g \sin\alpha - g \mu_G \cos\alpha) \cdot t^2 \qquad \text{(Gl. A 5.4)}$$

$$t = \sqrt{\frac{2\,s}{g(\sin\alpha - \mu_G \cos\alpha)}} \qquad \text{(Gl. A 5.5)}$$

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

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

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

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

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

Die Aufprallenergie wird mit einer Masse m = 1000 kg:

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

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

$$t = 0,31\ sec$$

$$v = 1,28\ m/sec$$

$$E = 821\ Nm$$

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

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

1 Buchtlasching seitwärts

Abbildung A 6.1 zeigt eine Buchtlaschingsicherung, die allerdings, wenn die Zurrwinkel größer als 75 Grad sind, überwiegend Niederzurrung angesehen werden muß. Entscheidend ist allerdings auch, ob vorgespannt wird oder nicht. Das wird dann der Fall sein müssen, wenn seitwärts kein Gleitweg vorhanden ist.

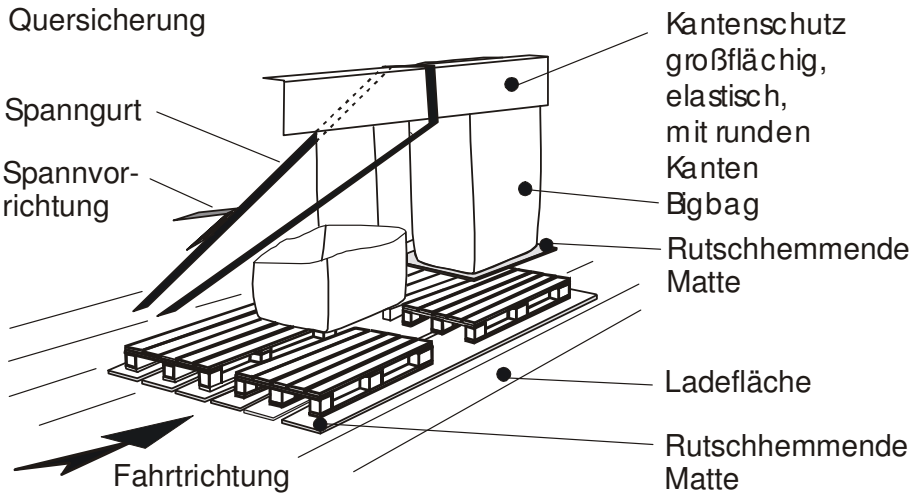


Abb. A 6.1. Niederzurrung

Diese Sicherung muß aber jeweils doppelt, nach links und rechts angelegt werden!

Versuche zur Niederzurrung [2]
(Auszug aus dem Bericht)

1 Einleitung

Im Jahr 2000 wurden Versuche zur Niederzurrtechnik gemacht [2]. Es sollte u. a. geklärt werden, ob Ladungsbewegungen bei gurtgesicherten Ladungen zu erwarten sind und ob sie überhaupt im Grenzfall notwendig zum Aufbau von ausreichend hohen Rückhaltekräften sind. Außerdem sollten die Gurtkräfte bei dynamischen Belastungen gemessen werden.

2 Versuchsbeschreibung

Es wurden aus einer Ausgangsgeschwindigkeit von ca. 25 bis 30 km/h immer stärkere Verzögerung (Geradeausbremsung) auf einen Sattelzug aufgebracht werden, bis nach Überschreiten der Fahrzeugverzögerung (= Haftreibungszahl μ mal g) Ladungsbewe-gungen erwartet werden konnten. Es wurden zeitgleich die Fahrzeugverzögerung, die Gurtkräfte „links" und „rechts" und ein eventueller Ladungsverschub gemessen.

Grundlage für die Versuche war die in Abb. A 7.1 dargestellte Versuchsanordnung.

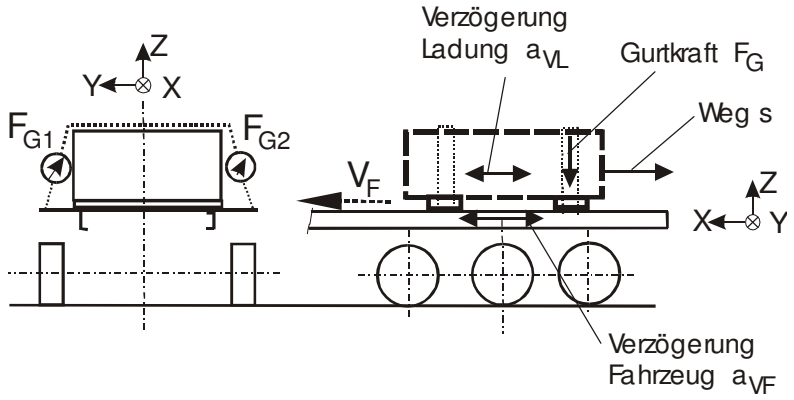


Abb. A 7.1. Versuchsanordnung Gurte quer zur Fahrtrichtung

Die Abb. A 7.2 und A 7.3 zeigen die Messeinheit und den Einbau der Kraftmesser in einen Gurt.

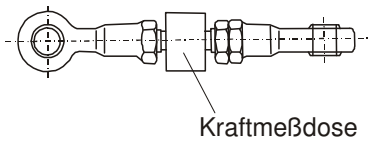


Abb. A 7.2. Kraftmesseinheit im Gurt

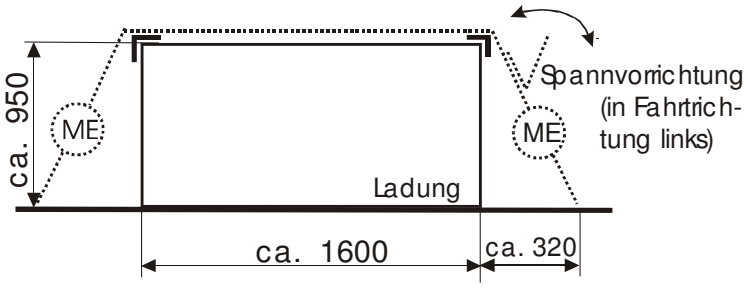


Abbildung A 7.3. Versuchsanordnung (Der vordere Gurt war ohne Kraftmesser)

3 Daten zu den Versuchen

Fahrzeug	Sattelauflieger	
	Kennzeichen	ME – GA 709
	Art:	Plane und Spriegel
	Ladefläche:	Holzboden mit Stahlschienen längs
		Haftreibungszahl ca. 0,35
		Gleitreibungszahl ca. 0,15
	Nutzlast:	27 560 kg
	Leergewicht:	6 940 kg
	zGG:	34 500 kg
	Bereifung:	385/65 R 22,5
	Zulassung:	1999
Ladung	2 Holzkisten, mit Gurten zu einer Ladung verbunden	
	Haftreibungszahl Ladung/Ladefläche	µHL ca. 0,35
	Gleitreibungszahl	µGL ca. 0,15
	Masse	500 kg (pro Gurt)
	Breite:	1600 mm
	Länge:	1200 mm
	Höhe:	950 mm
Gurt	Hersteller:	Firma Spanset 20035/ - 2 Lc 2500 daN
		5m 9/00 60060
		STF 800 daN
		LC 5000 daN
Niederzurrung:		2 Gurte
		Kantenschutz: Gleitreibungszahl 0,45, [9]
Messanlage	Geräte	Toshiba – Laptop mit Catman 2.2
		HBM GmbH
		Abtastrate 100 Hz
		Messdatenumwandlung Spider 8
	Meßaufnehmer	alle von HBM GmbH, Darmstadt
		Kraftaufnehmer Zug/Druck
		Typ U9B/10 kN
		34110072/34110064
		Wegaufnehmer
		WA – L 200 mm – 32 – K1 – F1
		Kennwert: 80 mV/V Vollbrücke
		Beschleunigungsaufnehmer-kapazitiv
		ENDECO 7290 A – 10

	EE 0141/10g; 200mV/g
Versuchsbedingungen	Betriebsgelände Fa. Henkel, Düsseldorf
	Ausgangsgeschwindigkeit vor Bremsung: ca. 25 – 28 km/h
Fahrbahn:	Beton, stark abgefahren, naß
Datum:	10. Oktober 2000
Koppelung der Geräte	Abbildung 5.4

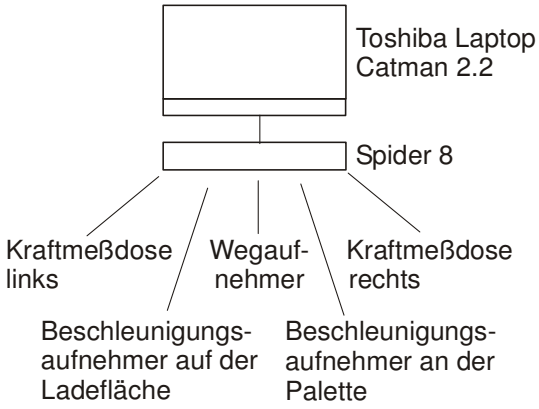


Abb. A 7.4. Meßgeräteaufbau

Die Abbildung 7.5 zeigt den Einbauort der Weg- und Verzögerungsaufnehmer. A und C stellen die Spannvorrichtungen dar.

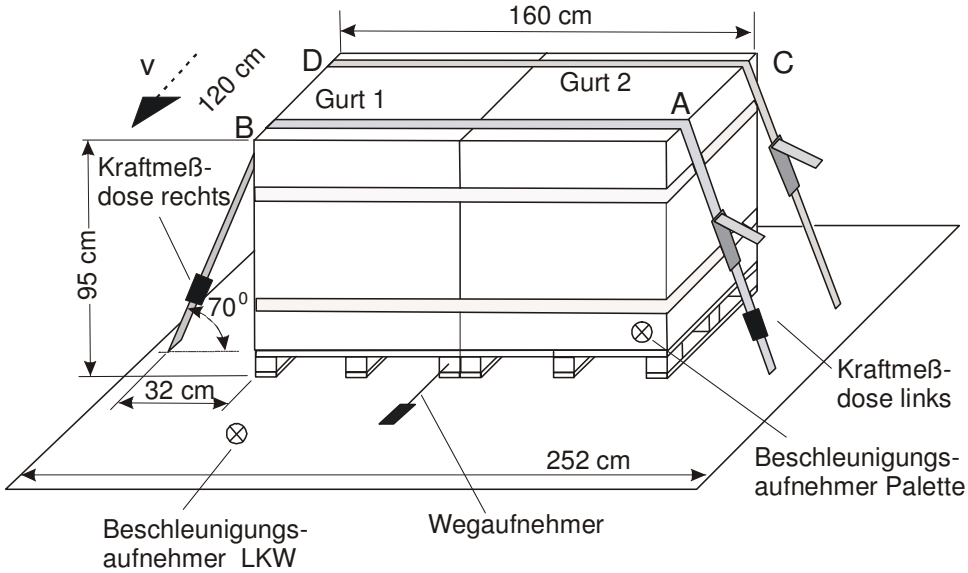


Abb. A 7.5. Anbau der Sensoren

4 Versuchsergebnisse

4.1 Einleitung

Die Abb. A 7.6 zeigt einen der aufgenommenen Messschriebe mit Ladungsverschub (Versuch 22).

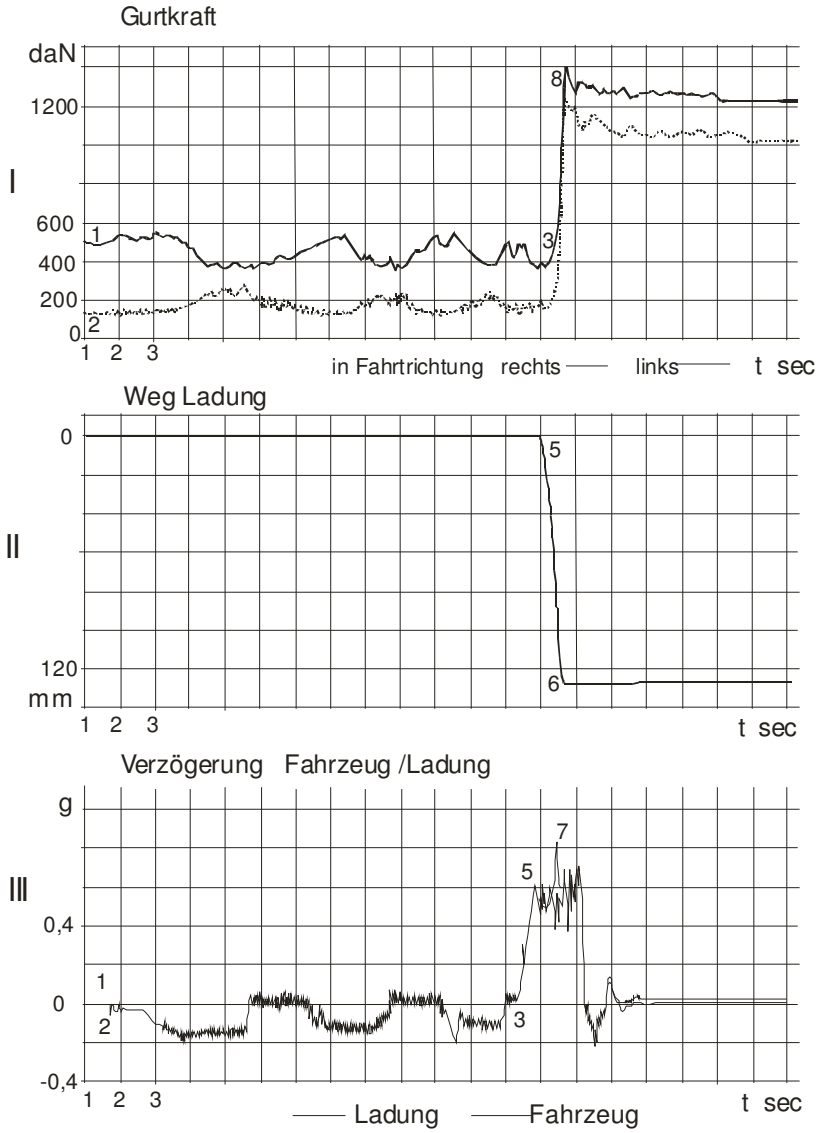


Abb. A 7.6. Messschrieb Gurtversuche

Die folgenden Feststellungen und Erkenntnisse gelten nur für die gewählte Gurtanordnung, also insbesondere nicht für deutlich größere Ladungsmassen oder für eine Quergurtbeanspruchung (aus einer Fliehkraft).

4.2 Feststellungen und Erkenntnisse

1. Ladungsbewegungen bei Fahrzeugbeschleunigung

Die Fahrzeugbewegung ist in Schrieb III Abbildung A 7.6 aufgenommen. Deutlich sind die 3 Beschleunigungsphasen (Diagramm oben) erkennbar. Das Beschleunigungsvermögen wird von Gang zu Gang nach oben erwartungsgemäß kleiner. Anschließend beginnt mit der Schwellphase die Verzögerung. Es wurde auf der nassen Betonfahrbahn nur eine Verzögerung von ca. 6 m/sec^2 erreicht, Abb. A 7.7. In den Versuchen wurde das nur mit der Versuchsladung beladene Fahrzeug „scharf" beschleunigt.

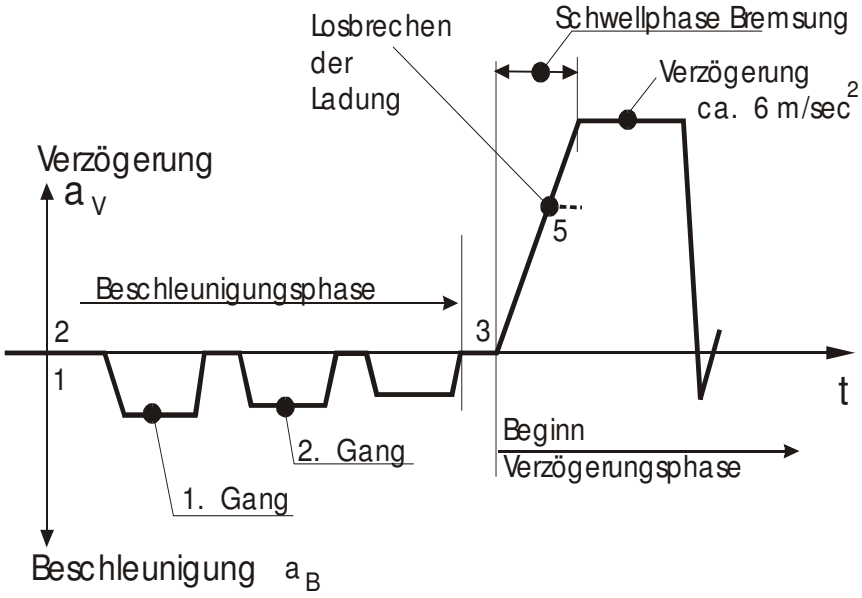


Abb. A 7.7. Beschleunigung/Verzögerung Sattelzug

In der Beschleunigungsphase schwanken die Gurtkräfte „links" und „rechts" (Schrieb I in 7.6) in der Phase beginnend von (1)/(2) nach (3). Wenn die Gurtkraft „links" zunimmt, reduziert sich die Kraft „"rechts" und umgekehrt.

Die Verläufe lassen den Schluß zu, dass die Ladung beim Beschleunigen mit stärkeren Zugkraftunterbrechungen durch die Schaltvorgänge zu einer Drehschwingung um eine vertikale Achse angeregt wird.

Die Auswertungen zeigten, dass der Dreheffekt umso stärker auftreten wird, je größer der Gurtkraftabbau durch Reibung an den Kantenwinkeln ist und je kleiner das Ladungsgewicht (Verhältnis Gurtvorspannung an der Spannvorrichtung zum Ladungsgewicht) ist. Die beiden Einflußgrößen bestimmen die Größe der Hebelarms l. Je größer l und auch a ist, desto stärker wird der Dreheffekt auftreten. Auch die Unterlage einer rutschhemmenden Matte könnte einen Einfluß auf den Dreheffekts haben.

2. Verzögerungsphase

In (5) Abbildung A 7.6 erfolgt das Lösen der Ladung aus der Haftreibung in der Schwellphase der Bremsung. Sie rutscht dann ca. 128 mm; geht danach aber nicht mehr aus der Endlage zurück.

Im Stillstandspunkt (6) kommt es im unteren Messschrieb zu einer stoßartigen Verzögerung an der Ladung (7). Die Differenz beträgt im Maximum ca. 2 m/sec^2 und dauert ca. 0,15 msec.

Diese Verzögerungsspitze aus der Ladungsbewegung zeigt, dass bei einer Gleitbewegung höhere Kräfte auftreten können als bei nur konstanten Verzögerungskräften. Wird einmal voraus gesetzt, dass die maximale Verzögerung bei ungefähr 8 m/sec^2 liegt, dann bedeuten solche zusätzlichen Verzögerungsspitzen, dass die zur Bemessung zugrunde zu legenden G-Werte (= Fahrzeugverzögerung geteilt durch 10 bei einer Stopbremsung) überschritten werden! Aus dem Überfahren eines beidseitigen Fahrbahnhindernisses ergibt sich ebenfalls ein Längsstoß an der Ladefläche. Theoretisch könnten sich auch beide Stöße überlagern.

Wenn die Ladung rutscht, können von der Anregungsseite - Ladefläche - keine oder nur geringe Verzögerungskräfte mehr übertragen werden. Erst wenn sich die Gurtkräfte (8) aufgebaut haben, hat die Ladung wieder Teil an der Verzögerung des Fahrzeugs.

3. Ladungsgeschwindigkeit

Die mittlere Gleitgeschwindigkeit der Ladung in der Rutschphase ist in 1. Näherung konstant (linearer Verlauf im Weg-Zeit-Diagramm) und liegt im Versuch 22 relativ zur Ladefläche bei

$$v_{gleit} = \frac{0{,}128 \text{ m}}{0{,}66 \text{ sec}} = \mathbf{0{,}19 \text{ m/sec}}$$

Da die Gleitgeschwindigkeit über den gesamten Rutschweg in 1. Näherung konstant ist, ergeben sich daraus auch folgenden Folgerungen:

Sind die Gurtspannkräfte nicht ausreichend groß genug, so kommt es bei hohen Verzögerungen zu Ladungsbewegungen.

Wenn die Ladung „losbricht", benötigt sie einen **Rutschweg**. Hat sie keinen Weg, würde sie mit der, in diesem Fall allerdings relativ geringen Geschwindigkeit auf ein „Hindernis" (z. B. Stirnwand) aufprallen.

Wenn also Gurtkräfte in ausreichender Höhe nicht garantiert werden können oder eine u. U höhere Aufschlaggeschwindigkeit auftreten könnte, müßte ein ausreichender Rutschweg (Freiraum) vor der Ladung in Richtung der Bewegung vorgesehen werden.

4. Kräfte im Gurt

Die Gurtkraft rechts (in Fahrtrichtung) nimmt durch den Stoß von ca. 500 N auf 1350 N zu. Links ist eine Anhebung von ca. 150 N auf ca. 1200 N zu erkennen.

Die Kräfte bleiben nach dem Gleitweg anliegend, gehen nur geringfügig zurück.

Der Unterschied der Gurtkraft zwischen linker und rechter Seite ist nach Einleitung der Verzögerung an beiden Kantenschutzvorrichtungen geringer geworden. Während beim Anziehen des Gurts durch die hohe Reibung zwischen Gurt und Kantenschutz das Verhältnis der Niederzurrkraft zwischen linker und rechter Seite ca. 3 : 1 betrug, war es nach dem Ladungsverschub ca. 1,1 : 1.

5 Meßergebnisse

Für die Auswertung wurde der Messschrieb Nummer 22, Abb. A 7.8, verwendet.

Die Abbildungen A 7.8 bis 7.10 zeigen die Messschriebe der Versuchsreihe, bei denen größere Ladungsverschiebungen aufgetreten sind.

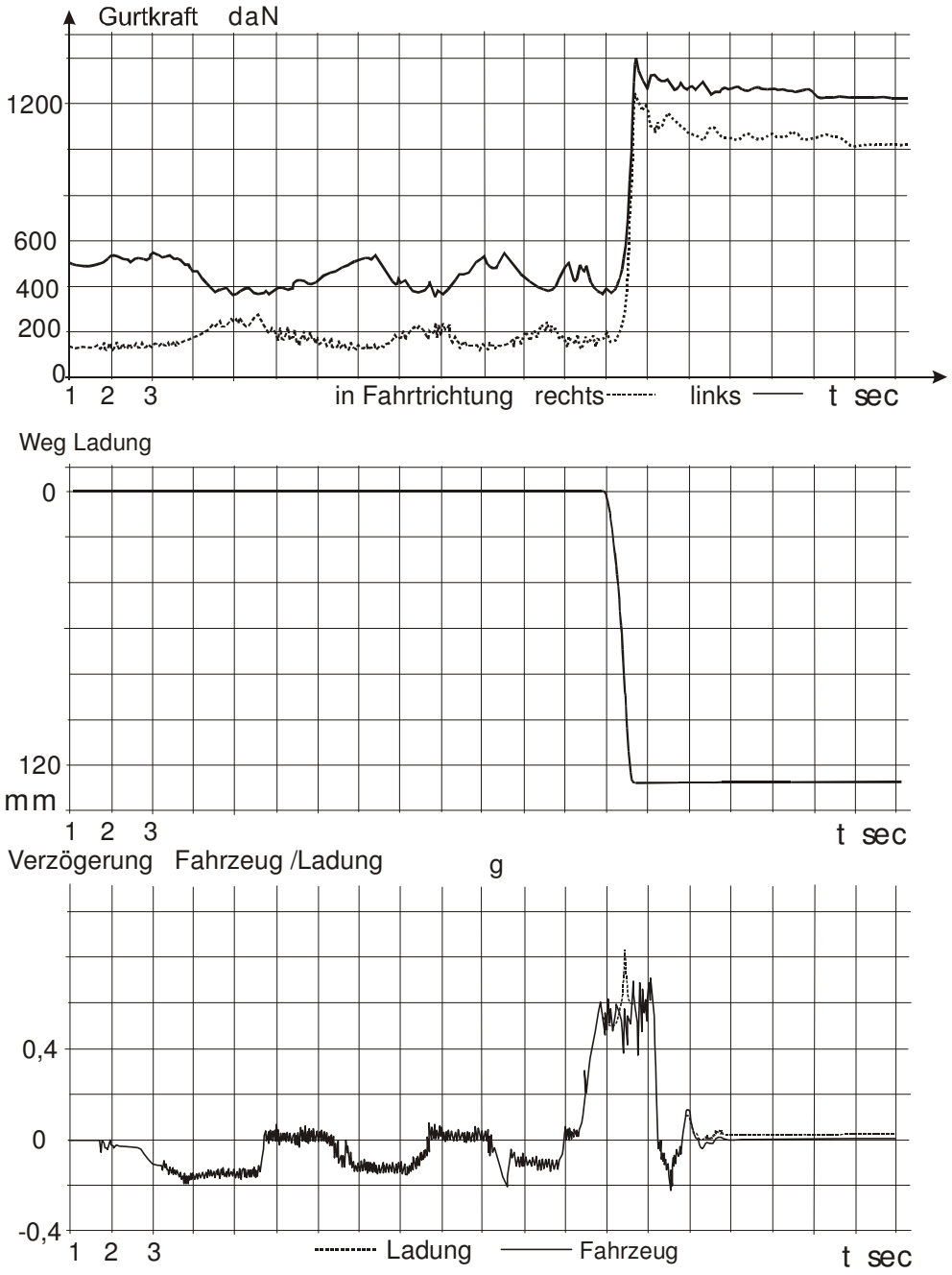


Abb. A 7.8. Messschrieb Nummer 22

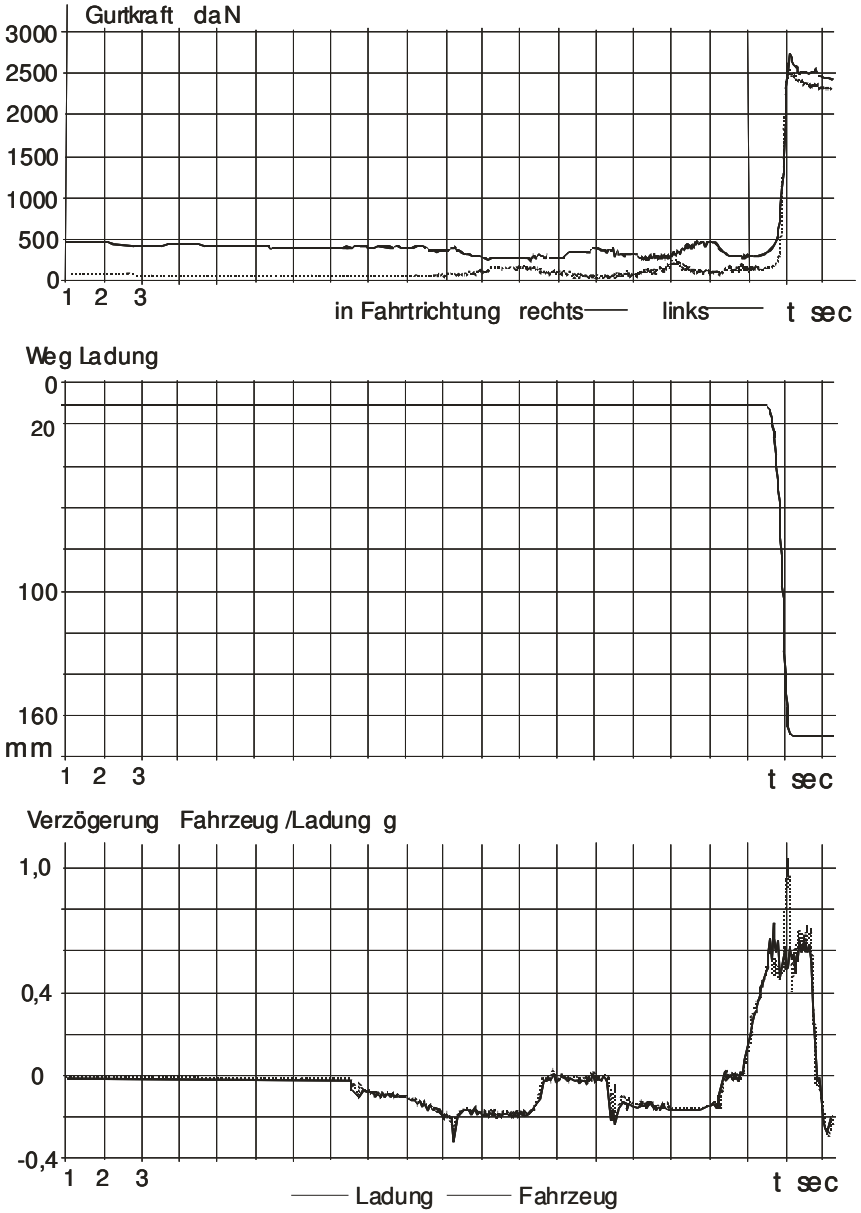


Abb. A 7.9. Messschrieb Nummer 24

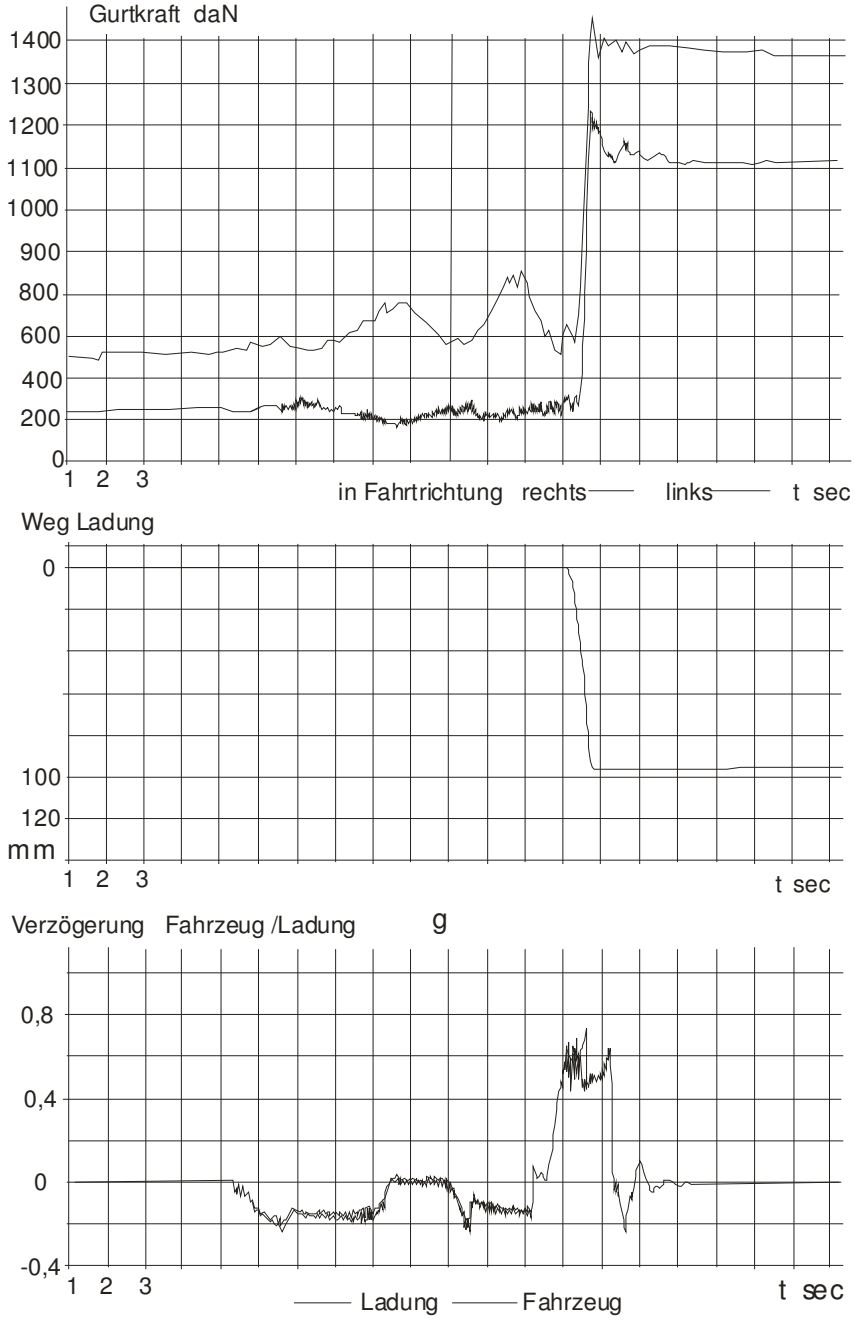


Abb. A 7.10. Messschrieb Nummer 26

Die Abb. A 7.11 gibt einen Messschrieb wieder, wie er aufgenommen wurde, wenn keine Ladungsbewegung aufgezeichnet wurde. Eine sehr geringe Bewegung wurde aber in jeden Fall aufgezeichnet. Sie lag aber maximal unter 3,1 mm.

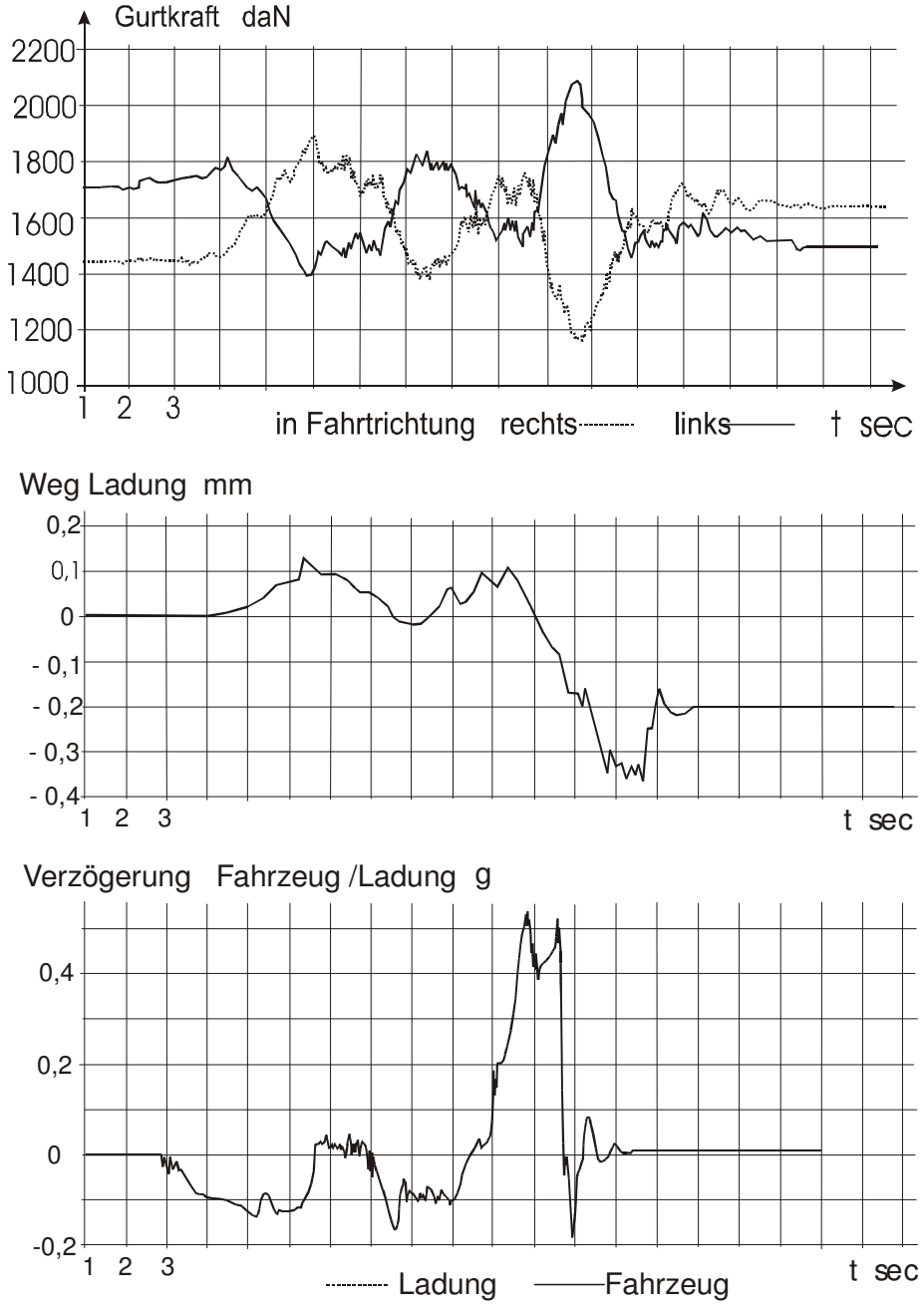


Abb. A 7.11. Messschrieb Nummer 3

Einfluß konstruktiver Größen am Kantenschutz

1 Lage der resultierenden Kraft

Die resultierende Anpresskraft F_{Res} ergibt sich durch vektorielle Kraftaddition, wie in Abb. A 8.1 dargestellt.

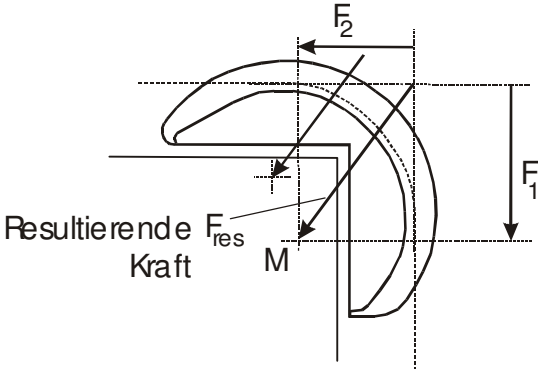


Abb. A 8.1. Gegebener Kantenschutz

Die Wirklinie der resultierenden Kraft kann verlegt werden, indem die Maße a und b oder der Kreisbogen in einen elliptischen Bogen verändert werden, Abb. A 8.2.

2 Verlagerung Mittelpunkt M

Wie in Abb. A 8.2 dargestellt, soll der Mittelpunkt M verschoben werden. a soll zunächst gleich groß bleiben, b dagegen kleiner werden, (Zurrwinkel $\alpha = 90^0$).

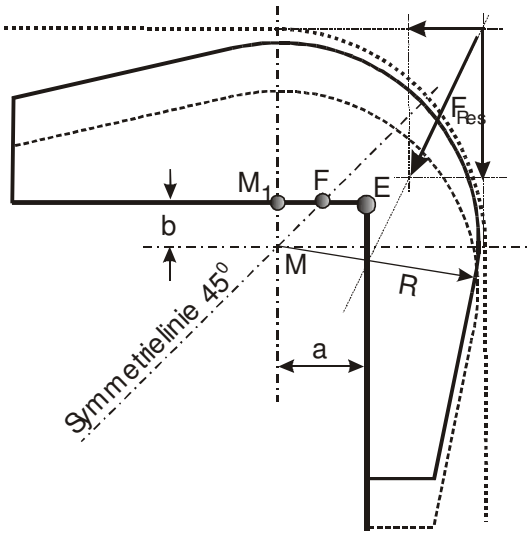


Abb. A 8.2. Wichtige Auslegungspunkte am Kantenschutz

Durch den Gurtkraftabbau am Kantenschutz wird die resultierende Gurtkraft F_{Res} anders liegen als ohne diesen Gurtkraftabbau. Wenn die Haftreibungszahl zwischen Kantenschutz und Gurt hoch liegt, wird die resultierende Kraft am Kantenschutz rechts steil abwärts weisen. Wird dann a oder b geändert, wirkt die Kraft F_{Res} an anderer Stelle und mit anderer Richtung.

Berücksichtigt werden muß aber, dass bei gleichem Kantenschutz links und rechts die resultierende Kraft am 2. Kantenschutz sehr flach liegen wird. Für die Lage des Druckpunkts D hat die Kurvenverschiebung ebenfalls Auswirkungen. Sie ist jedoch von Einfluß, ob eine Auflage- oder Anlagefläche weniger oder stärker angepresst wird. Für das folgende soll die resultierende Kraft in ihrer Wirkrichtung zwischen E und F liegen, Abb. A 8.3.

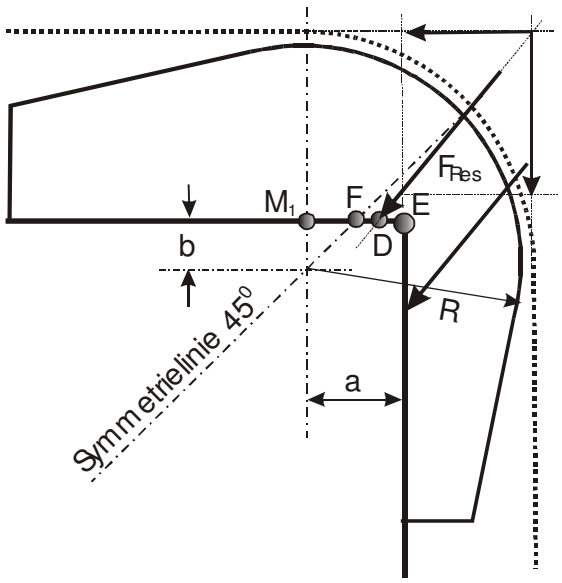


Abb. A 8.3. Auslegungsvarianten am Kantenschutz

Die resultierende Kraft greift in diesem Fall an der horizontalen Auflage an. Wenn das Teil steif ist, wird eine horizontale und eine vertikale Anpressung entsprechend der Schrägstellung der resultierenden Kraft erreicht. Entscheidend ist nicht so sehr der Angriffspunkt sondern der Winkel unter dem die Kraft wirkt. Bei einem Winkel kleiner 45 Grad wird dann die vertikale Anlagefläche stärker angepresst, obwohl der Vektorpfeil zwischen E und F liegt.

In der Praxis gibt es Fälle, in denen eine größere horizontale Anpressung sinnvoll ist. Soll der Kantenschutz eine Ladungsbündelung ersetzen, muß die horizontale Anpresskraft in die Überlegungen mit einbezogen werden, Abb. A 8.4.

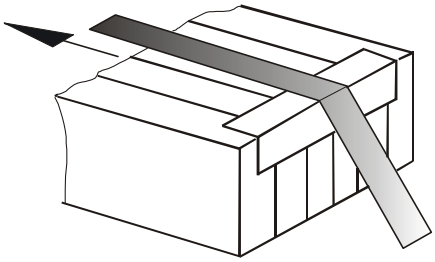


Abb. A 8.4. Betonung der horizontalen Komponente

Zur Eytelweinschen Gleichung

1 Einführung

Die Berechnung von Gurtkräften bei Umschlingung einer Rolle oder wie in der Ladungssicherung über einen Kantenschutz bedeutet einen Abbau der Gurtkraft. Wenn beispielsweise die Gurtkraft F_{S1} = 300 daN beträgt, Abb. A 9.1, wird sie reduziert auf z. B. 200 daN. Es wird dann von einem Gurtkraftabbau gesprochen.

Das Phänomen wurde erstmals von Sauveur (1703) untersucht, die Ansätze wurden dann von L. Euler (1790) aufgenommen und von J. A. Eytelwein (1801) [10.7] zu der heute bekannten Formel zur Berechnung des Gurtkraftabbaus weiterentwickelt. Die Berechnungsformel wird nach wie vor in der Technik an zahlreichen Stellen benötigt, so z. B. an Motoren mit Riemenantrieb für Nebenaggregate und in der Schifffahrt beim Festmachen von Schiffen.

Während allerdings bei Riemenantrieben in der Motorentechnik eine treibende und eine angetriebene Scheibe vorliegt, also beide drehend sind und der riemen mit Haftreibung gehalten wird, wird der Kantenschutz in der Ladungssicherung als eine „Riemenscheibe im Ruhezustand“ anzusehen sein und der Gurt gleitet mehr oder weniger „behindert“ über den Kantenschutz. Während es bei Riemenscheiben um die Übertragung von Kräften, Momenten und Leistung geht, wird am Kantenschutz eine Kraft auf die Ladung ausgeübt, die die Ladung auf die Ladefläche pressen soll. Dabei gleitet der Gurt beim Spannen über den Kantenschutz. Es soll deshalb nicht wie bei Riementrieben die Haftreibungszahl angesetzt werden, sondern für den Fall Kantenschutz die Gleitreibungszahl verwendet werden.

2 Gleichung für Riementriebe

Abb. A 9.1 zeigt einen Riementrieb mit einer 90 Grad-Umschlingung. Über den Umschlingungswinkel wird eine Reibungskraft wirken.

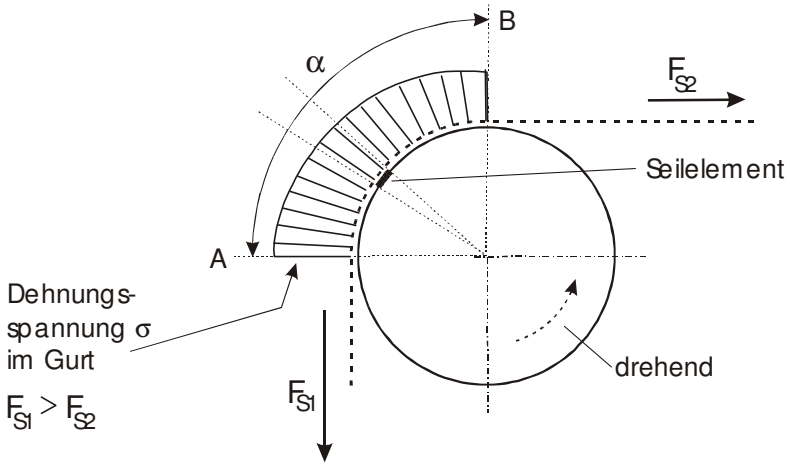


Abb. A 9.1. Riemenscheibe mit Kräften und Spannungen

Der Zusammenhang zwischen den beiden Kräften kann mit der sog. Eytelweinschen Gleichung berechnet werden. Die Haftreibung hängt dabei von dem Umschlingungswinkel und der Haftreibungszahl μ_H zwischen Gurt und Scheibe ab.

$$F_{S2} = F_{S1} \bullet e^{\alpha \mu_H} \qquad \text{(Gl. A 9.1)}$$

3 Formel für einen Kantenschutz

Für den Fall Kantenschutz ergibt sich nach Abb. A 9.2 in Anlehnung an das Modell in Abb. A 9.1.

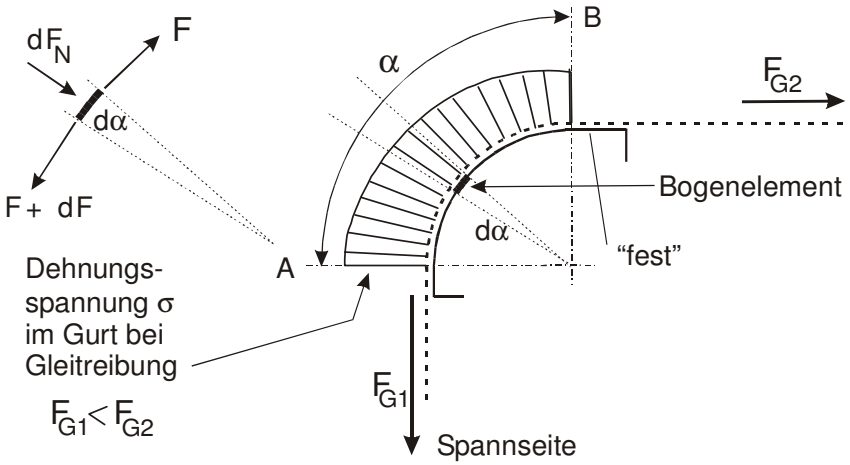


Abb. A 9.2. Gurtkraftabbau am Kantenschutz

Für die folgenden Gleichgewichtsbedingungen der Kräfte wird von Abb. A 9.3 ausgegangen:

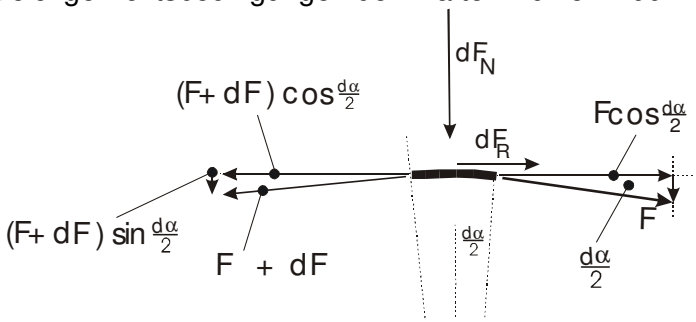


Abb. A 9.3. Kräftegleichgewicht am Bogenelement

Das tangentiale Kräftegleichgewicht ergibt sich nach Abb. A 9.3:

$$(F + dF)\cos\frac{d\alpha}{2} - \mu_G dF_N - F\cos\frac{d\alpha}{2} = 0$$

weil $d\alpha$ klein, $\cos\frac{d\alpha}{2} = 1$

(Gl. A 9.2)

$$dF = \mu_G \, dF_N \qquad \text{(Gl. A 9.3)}$$

Das Gleichgewicht in Normalkraftrichtung ergibt:

$$dF_N - F \sin\frac{d\alpha}{2} - F \sin\frac{d\alpha}{2} - \underbrace{dF \sin\frac{d\alpha}{2}}_{\text{da sehr klein, vernachlässigt}} = 0$$

$$\sin\frac{d\alpha}{2} = \frac{d\alpha}{2} \qquad \text{(Gl. A 9.4)}$$

$$dF_N = F \; d\alpha$$

$$\frac{1}{F} dF = \mu_G \, d\alpha \qquad \text{(Gl. A 9.5)}$$

$$\int_{F\alpha = 0}^{F\alpha} \frac{1}{F} dF = \ln F \Big|_{F_0}^{F\alpha} = \underline{\ln \frac{F\alpha}{F_0}} = \mu_G \, d\alpha = \int_0^{\alpha} \underline{\mu_G \, d\alpha} \qquad \text{(Gl. A 9.6)}$$

$$\ln \frac{F\alpha}{F_0} = \mu_G \alpha \qquad \text{(Gl. A 9.7)}$$

oder, wenn α mit 1 angezeigt wird und Null mit 2:

$$F_1 = F_2 \cdot e^{\alpha \mu_G} \qquad \text{(Gl. A 9.8)}$$

3 Besondere Fälle

Für den Fall einer Cross-Over-Lasching, Abb. A 9.4 und A 9.5 liegen abweichende Fälle vor.

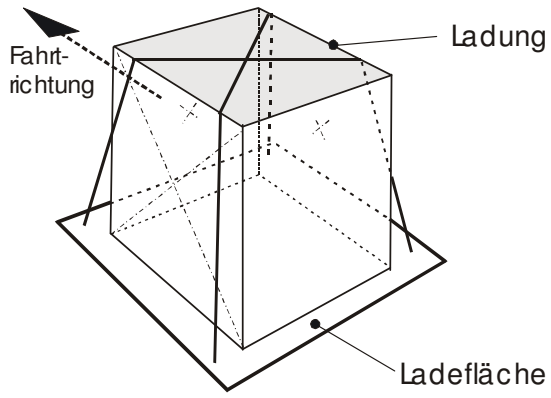


Abb. A 9.4. Cross-Over-Laschung

Bei der Cross-Over-Laschung liegt vom Wirkprinzip eine Niederzurrung vor. Dann wird der aber der Gurt schräg über die Ladung verlegt. Das bedeutet, daß eine längerer Gleitweg entsteht.

Ein ähnlicher Fall würde für einen nicht kreisförmigen Kantenschutz vorliegen, Abb. A 9.5. Auch hier ergibt sich ein längerer Gleitweg als in Gleichung A 9.8 zugrunde gelegt.

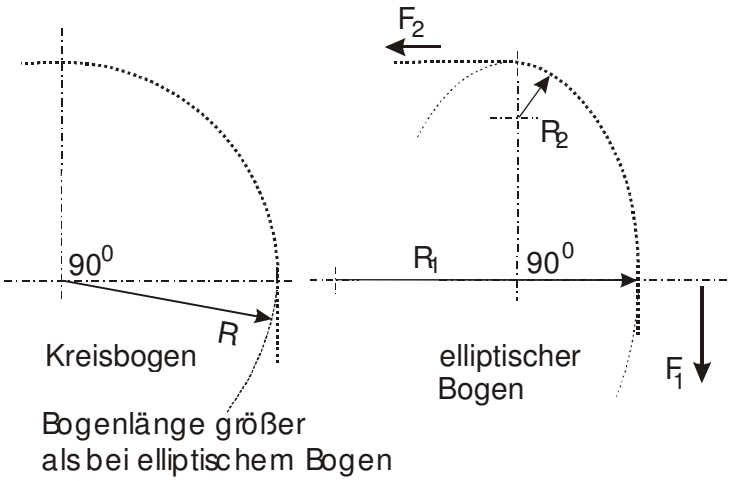


Abb. A 9.5. Kreisförmige und elliptische Kurve am Kantenschutz