

Zur Ladungssicherung mittels Verformungsschlusses am Beispiel einer Kettensicherung

Ulrich Podzuweit

2015

Inhalt

1	Einführung	3
2	Das 3-Kettenproblem	3
3	Begriffe der Ladungssicherungstechnologie	5
3.1	Einführung	5
3.2	Wirkmechanismen	6
3.3	Zurrvarianten	7
3.4	Zurrtechniken	8
3.5	Winkelangaben an einer Zurrung	10
3.6.1	Begriffe zum Berechnungsverfahren	10
3.6.2	Dehnung	11
3.6.3	Verformungsarbeit	12
3.6.4	Federrate	12
3.6.5	Zurkraftabnahme	13
4	Kombinationen von Sicherungstechniken	13
4.1	Kombinationen von Direktzurrungen	13
4.2	Kombinationen von Zurrtechniken	13
4.3	Kombinationen von verschiedenen Wirkmechanismen	14
4.4	Zusammenfassung der Kombinationen	15
5	Zur Vorgehensweise	15
5.1	D´Alembertscher Ansatz	15
5.2	Annahmen und Voraussetzungen	16
6	Zur Theorie des Berechnungsansatzes	17
6.1	Zum Verfahren	17
6.2	Antriebskraft F_A	18
6.3	Analyse Arbeitsaufnahmevermögen der Ketten	18
6.4	Ersatzenergie E_{Ers}	19
6.5	Rückhaltekraft aus Federwirkung einer Zurrung	20
6.6	Gesamtrückhaltekraft einer Zurrung	21
7	Zusammenfassung	23
8	Literatur	24
9	Bildnachweis	24

1 Einführung

Im Schwerguttransport werden eine Reihe von Sicherungsmaßnahmen angewendet, um zu verhindern, daß die Ladung im Transport vom Fahrzeug fällt. Grundlage für die Auslegung von Sicherungsmaßnahmen sind in der Deutschland die VDI-Richtlinien der Reihe 2700, mit denen die Sicherheit und eine einheitliche Durchführung von Maßnahmen gewährleistet werden sollen.

Zu den Sicherungstechniken gehören auch sog. „direkte“ Zurrungen mit Ketten, Abb.1 und 3. Längere Ketten für große Ladungsmassen sind aber auch schwer zu handhaben. Um die Handhabung zu erleichtern, werden deshalb oft statt zwei schweren Ketten drei leichtere eingesetzt. Dann sind einfache Berechnungsverfahren nicht möglich. Die maximal zulässigen Kettenkräfte (Grenze: Lasching Capacity LC) zu addieren, ist wegen der dann nicht berücksichtigten individuellen Dehnung der einzelnen Ketten nicht richtig, wie noch aufgezeigt werden soll. Dieser Aufsatz soll ein Beitrag zur Berechnung solcher Fälle sein.

2 Das 3-Kettenproblem

Zu den „direkten“ Zurrungen mit Ketten gehört die sog. „kreuzweise Diagonalzurrung“, wie sie in der Seitenansicht (S) und in der Draufsicht (D) in Abb. 1 dargestellt ist.

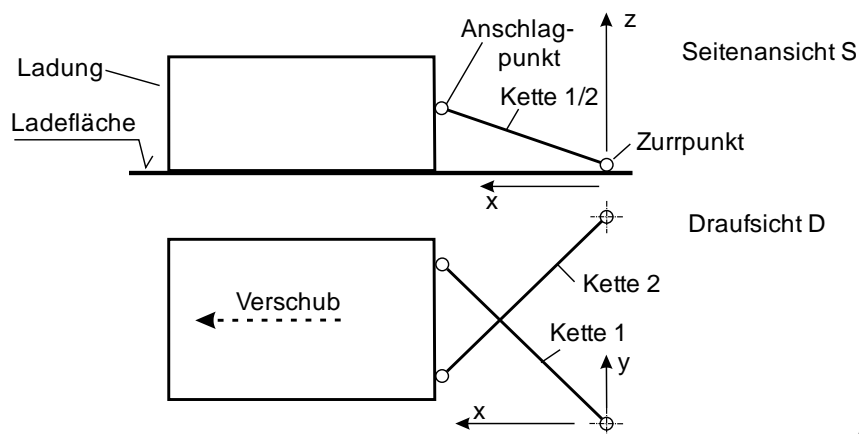


Abb. 1

In nicht wenigen Fällen reicht die Anzahl der Ketten (hier K1 und K2) nach gängigen Berechnungen nicht aus. Es wird dann z. B. eine dritte oder weitere zusätzlich gesetzt Abb. 2. Damit ergibt sich bei ungleichlangen Ketten ein Berechnungsproblem.

Eine Sicherung mit ungleich langen Ketten zeigt Abbildung 2, eine Sicherung mit vier Ketten Abb. 3. In Abb. 1 sind zwei Ketten (K1 und K2) gleichlang aber diagonal gesetzt. Die Kette 3 in Abb. 2 ist dagegen deutlich kürzer.

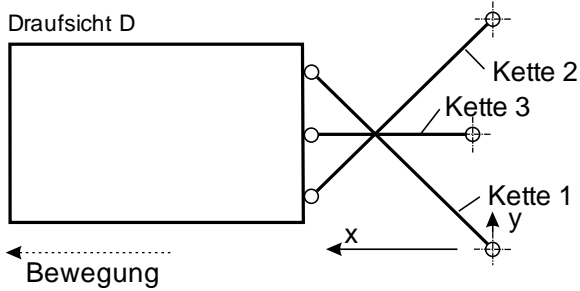


Abb. 2



Abb. 3

Kommt es zu einem Ladungsverschiebung, z. B. bei großen Bremsverzögerungen, dann werden die drei Ketten ungleichmäßig gedehnt. Selbst wenn alle weiteren Einflußgrößen gleich sind, führen die unterschiedlichen Ausgangslängen zu ungleichen Dehnungen der Ketten 1 und 2 zu der dritten Kette. In Einzelfällen kommt es zu einem Versagen der Kette K3. Abb. 4 zeigt ein Beispiel für eine gerissene Kette.



Abb. 4

Ziel dieser Ausarbeitung soll es sein, einen rechnerischen Weg aufzuzeigen, mit dem eine Kettenkonfiguration so ausgelegt werden kann, daß einerseits ein Versagen vermieden wird und andererseits eine Optimierung möglich ist.

Wenn eine direkt gezurrte Ladung sich aufgrund einer hohen Antriebskraft (Masseträgheit beim Bremsen) bewegt, werden folgende Kräfte an ihr wirken:

1. Ein Gleitreibungskraft an der Aufstandsfläche,
2. evtl. eine Niederzurrkraft bei einer Gleitung,
3. eine mit zunehmender Gleitweglänge sich steigernde Federkraft aus der Dehnung von Zurrmitteln, wie z. B. Ketten und
4. eine Masseträgheitskraft an der Ladung, die entsteht, weil die Bewegung beschleunigt abläuft.

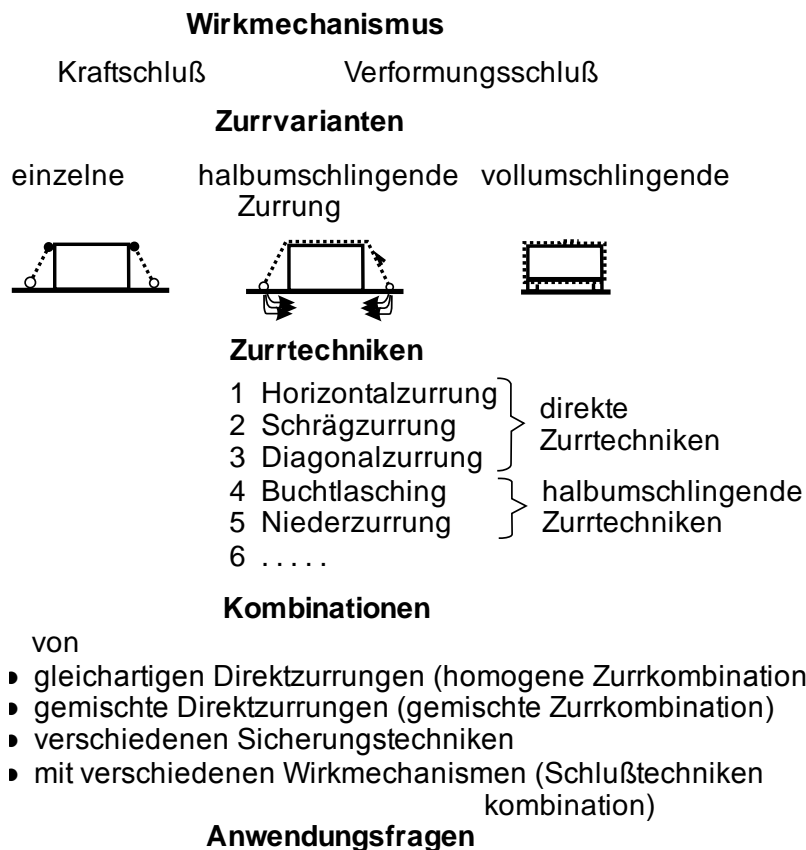
In diesem Beitrag soll nicht nur die Rückhaltung aus der Zurrmitteldehnung behandelt werden, sondern es soll deshalb auch die gesamte Rückhaltekraft gegen eine sich beschleunigt bewegende Ladung behandelt werden.

3 Begriffe der Ladungssicherungstechnologie

3.1 Einführung

Mit Zurrungen können Ladungen gesichert werden. Wird das Thema von der theoretischen Seite angedacht, ergeben sich eine Reihe von Themen, die sich dann aus dieser Vorgehensweise ableiten lassen, also zum Beispiel die, welche Mechanik da wirkt. Die Übersicht 3.1 zeigt eine Zusammenstellung von Einzelthemen zur Sicherungstechnik mittels Zurrungen.

Übersicht 3.1. Themen der Zurrtechnologie.



Der Wirkmechanismus erfaßt die Frage, welche Mechanik eigentlich die Rückhaltung bewirkt. Mit dem Begriff Zurrvarianten soll erfaßt werden, daß die einzelnen Zurrungen eine Ladung unterschiedlich „halten“. So kann eine Niederzurrwirkung über eine direkte Zurrung, aber ebenso über eine halbumschlingende Zurrung hergestellt werden. Mit einer halbumschlingenden Zurrung wird aber dann auch der Gurtkraftabbau an den Kantengleitern mit zu erfassen sein. Es folgen einzelne in der Praxis bekannte Zurrtechniken.

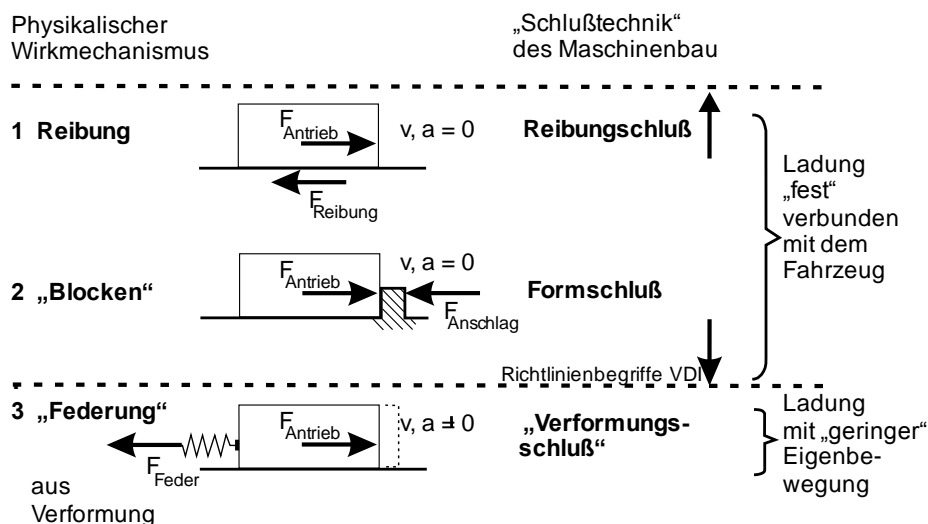
In der Praxis werden unterschiedliche Kombinationen von Sicherungen verwendet, insbesondere im Bereich des Schwerguttransports.

3.2 Wirkmechanismen

Auf eine Ladungen wirken im Transport Kräfte ein, die unter Umständen zu „kritischen“ Eigenbewegungen der Ladung in Bezug zum Fahrzeug führen und eine Bordwand durchstoßen können. Die Ladung kann vom Fahrzeug herabfallen. Diese äußere Kräfte können als über der Zeit konstante Kraft wirken oder stoßartig sein. Dem entsprechend können sie als Konstantanregung oder als Stoßanregung bezeichnet werden. Sie sind als „Antrieb“ die Ursache für eine Eigenbewegung anzusehen, die, wenn sie eine bestimmte Weglänge überschreitet, bei einem Aufprall z. B. auf eine Seitenlatte zu Beschädigungen oder Durchschlag führen kann. Wichtig für die Rückhaltung sind aber auch die Elastizitäten einer Ladung und des Aufbaus [5].

Um ein Herabfallen zu verhindern, muß eine Gegenkraft in der Lage sein, sie auf dem Fahrzeug zu halten. Diese Gegenkraft muß die Ladungssicherung aufbringen. Wird die Sicherung maschinenbautechnisch gesehen, muß eine Verbindung mit dem Fahrzeug, ein „Schluß“, vorhanden sein. Wird die Rückhaltung physikalisch betrachtet, dann kann von einem „Wirkmechanismen“ für die Rückhaltekräfte gesprochen werden. In der Ladungssicherung werden die Aufstandsflächenreibung, das Gegenhalten mit einer gleichgroßen Gegenkraft (Formschluß, Blocken) und der Aufbau von rückhaltenden Federkräften als Wirkmechanismen für Sicherungsmaßnahmen verwendet. Der Formschluß des Maschinenbaus wird auch in der Ladungssicherung verwendet, aber in einer anderen Definition. Der Begriff des Verformungsschlusses [1] existiert in dem vorhandenen Richtlinienwerk der Ladungssicherung zur Zeit nicht. Übersicht 3.2 zeigt die Begriffe zur „Schlußsicherung“ und zum physikalischen Wirkmechanismus in der Gegenüberstellung.

Übersicht 3.2. Begriffe Wirkmechanismus und Schlußtechniken



Während beim Kraftschluß (Aufstandsflächenreibung, Niederzurrung) und beim Formschluß eine Ladung „fest“ mit der Ladefläche verbunden ist, damit wirkt dann Haft- und nicht Gleitreibung, muß beim Verformungsschluß eine zumindest „geringe“ Eigenbewegung der

Ladung vorhanden sein, um Rückhaltekräfte z. B. bei einer Kette als Zurrmittel aus einer Dehnung aufbauen zu können.

Der hier benutzte, neue Begriff Verformungsschluß kann wie folgt definiert werden:

„Verformungsschluß“ ist eine Ladungssicherungstechnik im Straßentransport

- 1 für steife, elastische und plastische Ladungen,
- 2 die Vershub- und Versatzbewegungen
- 3 innerhalb der Ladefläche zuläßt,
- 4 um über Verformungsarbeit der Ladung, des Zurrmittels, des Sicherungshilfsmittel und der Schlußtechnik
- 5 Rückhaltekräfte in Ergänzung zur Aufstandsflächenreibung aufzubauen“.

Die elastischen Rückhaltekräfte werden bei Zurrungen mittels Gurten, Ketten, Stahlseilen oder auch Stangen (Vorläufer) [2] vorgenommen. Möglich ist es aber auch, Elastizitäten an anderen Teilen vorzusehen.

3.3 Zurrvarianten

In der Unterscheidung von Ladungssicherungsarten erscheint es sinnvoll für Zurrungen, zusätzlich in Zurrvarianten zu unterscheiden. Eingeteilt werden können sie in „Einzelzurrung“, „halbumschlingende“ und „vollumschlingende“ Zurrung, Abb. 5 und 6. Diese Unterscheidung weicht von der in den gängigen Richtlinien beschriebenen Vorgehensweise ab.

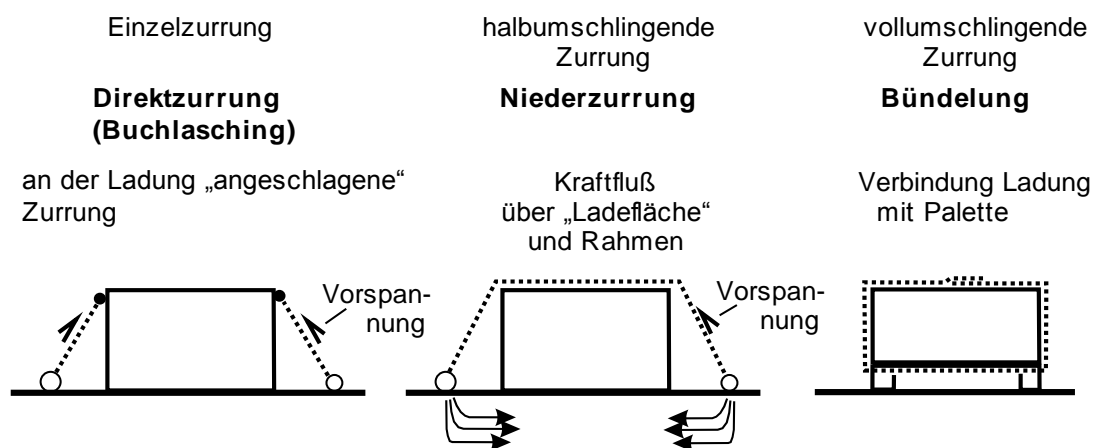


Abb. 5

Die Direktzurrung und die Buchlaschingzurrung weichen von der Niederzurrung insofern ab, als bei der Niederzurrung mittels einer Spannvorrichtung eine über die Haftreibung hinausgehende Rückhaltekraft aus der Ladungsmasse an der Aufstandsfläche aufgebaut wird und damit eine Rückhaltung ohne Eigenbewegung der Ladung entsteht. Bei der direkten

Zurrung und der Buchtlaschingzurrung, Abb. 6, muß für eine Maximalbelastung dagegen eine Eigenbewegung vorliegen, damit eine Rückhaltewirkung aufgebaut wird. „Direkte“ Zurrung bedeutet, daß jedes einzelne Zurrmittel eigens gespannt werden muß oder u. U. nicht vorgespannt wird oder darf.

Die Abb. 6 macht eine Zuordnung vom Wirkmechanismus zu bestimmten Zurrtechniken. Auch eine direkte Zurrung kann nach dem Niederzurrprinzip funktionieren. Dann müssen aber alle Zurrungen an der Ladung *definiert* (!) vorgespannt werden und es tritt dann ein Verschub auf.

Eine direkte Zurrung sieht in der Regel deutlich kürzere Zurrmittellängen vor, so daß die Verschubwege klein bleiben.

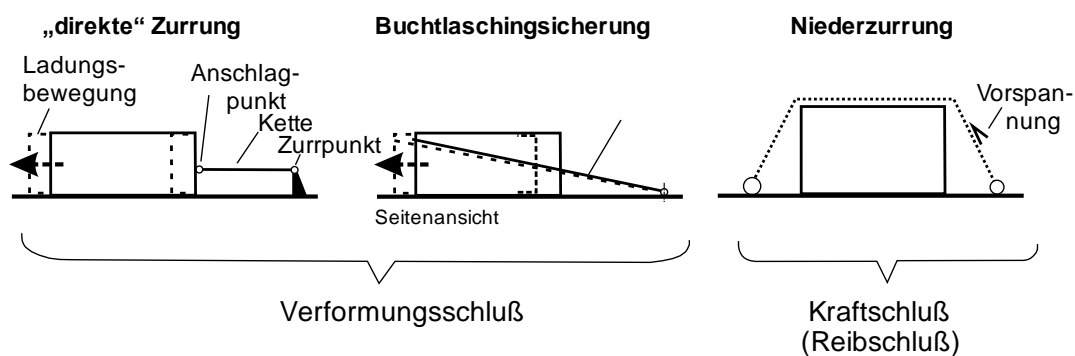


Abb. 6

3.4 Zurrtechniken

Es gibt in der Praxis eine Vielzahl von Zurrtechniken. Abb. 7 zeigt eine Auswahl. Im Folgenden wird aber nur die Direktzurrung behandelt, weil das in Absatz 2 angesprochene Problem bei einer Direktzurrung besonders kritisch ist. Die Direktzurrungen können in folgende direkte Zurrtechniken unterschieden werden, Abb. 7. Dabei wird mit Indizes nach der Anlegungstechnik unterschieden. Es bedeuten:

1. Die Horizontalzurrung (H),
2. die Schrägzurrung (S) und
3. die Diagonalzurrung (D).

Es gibt weitere Varianten, insbesondere zu Schrägzurrungen.

Mit den Indexbuchstaben x und y wird eine Zuordnung der Wirkrichtung einer Zurrung zu einem Koordinatensystem vorgenommen. Das setzt aber die Festlegung eines Koordinatensystems voraus. Für eine Zurrung soll im Folgenden der Nullpunkt stets in einem Zurrpunkt, bzw. unter dem Zurrpunkt auf der Ladefläche bei Horizontalzurrung, festgelegt werden. Die x-Achse soll in Fahrtrichtung nach vorn zeigen. Die y-Achse soll stets in Fahrtrichtung nach rechts weisen. Die x- und y-Achsen seien der Ladefläche zu geordnet.

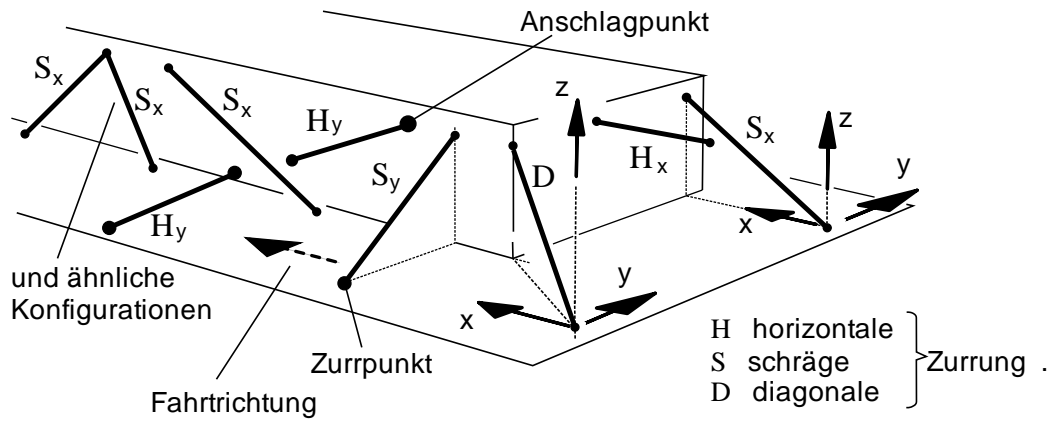


Abb. 7

Die Abb. 7 zeigt verschiedene Varianten von Direktzurrtechniken, ohne die jeweils notwendige Spannvorrichtung. Die Unterscheidung in Horizontal- Schräg- und Diagonalzurrung soll nach der Anschauung erfolgen. Eine Beschreibung über Winkel kann aus den Abb. 11 und 12 erfolgen. Die Indizes an den Bezeichnungen sollen die Wirkrichtung entsprechend einem Koordinatensystem festlegen.

3.5 Winkelangaben an einer Zurrung

In den Abbildungen 8 und 9 sind die Winkelfestlegungen an den drei Zurrtechniken dargestellt. Unterschieden werden kann in den „Zurrwinkel“ α_z und die „Projektionswinkel“ β_x und β_y .

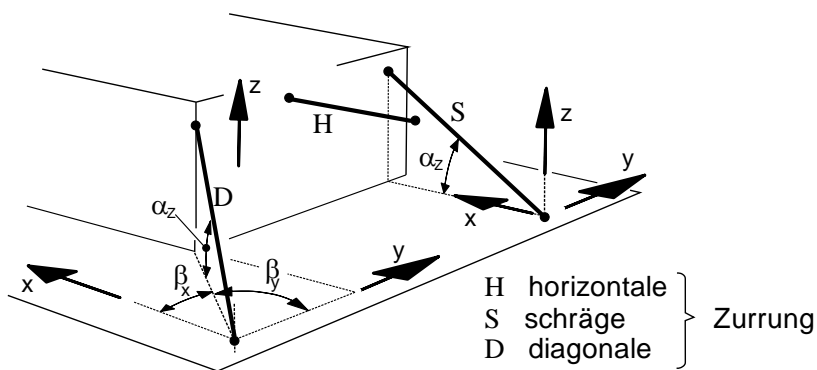


Abb. 8

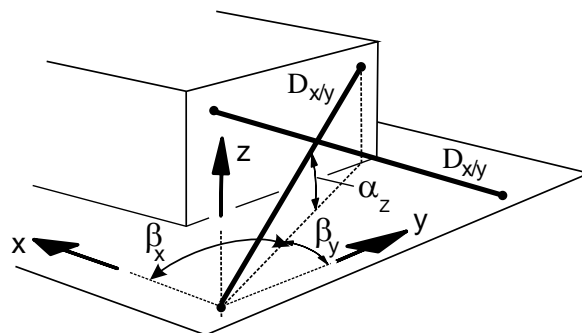


Abb. 9

Wichtig für die Berechnung der Rückhaltewirkung in B, z. B. parallel zur x-Richtung aber entgegengesetzt, sind die Winkel $\beta_{x/y}$, Abb. 10.

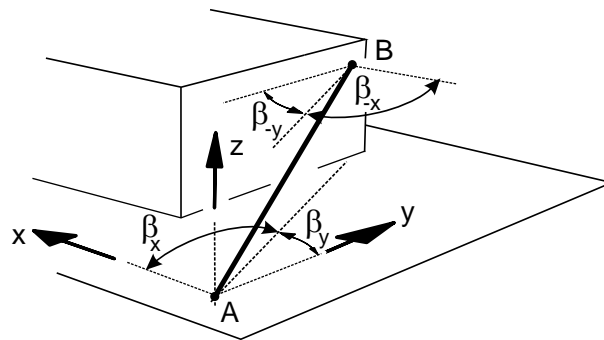


Abb.10

3.6.1 Begriffe zum Berechnungsverfahren

Das in Absatz 2 beschriebene „3-Kettenproblem“ kann über Kraftgleichungen, wie sie heute in den deutschen und europäischen Richtlinien benutzt werden, nicht gelöst werden, denn Kraftgleichungen allein reichen nicht aus. Für die Berechnung der Rückhaltekräfte müssen die Dehnungen der einzelnen Ketten und weitere Bedingungen mit einbezogen werden. Werden die einzelnen Kettendehnungen berücksichtigt, gehen neben unterschiedlichen Kettendehnungen auch Absolutlängen und andere Parameter der einzelnen Ketten mit ein. Es müssen deshalb einige Begriffe eingeführt werden.

Für die folgenden Ausführungen wird eine Kettenkombination gewählt, die, weil alle Ketten horizontal und in der Richtung der Rückhaltekräfte symmetrisch zum Ladungsschwerpunkt liegen sollen, eine Vereinfachung darstellt, Abb. 11. Bei einer Schrägzurrgung oder einer Diagonalzurrgung muß der Winkeleinfluß berücksichtigen werden. Es ergeben sich mit diesem Modell einfachere Verhältnisse für die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Gesamtverlängerung der einzelnen Ketten $\Delta L_{res,i}$ und dem Schubweg Δs der Ladung.

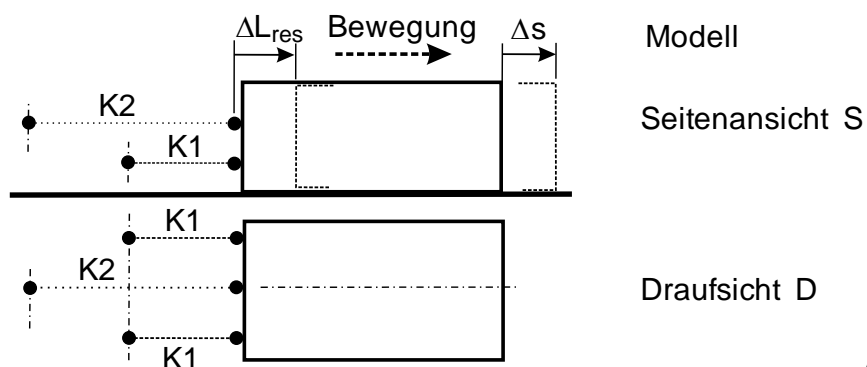


Abb. 11

3.6.2 Dehnung

Wird die angreifende Kraft F_{Antrieb} an einer Ladung in Schritten erhöht, so wird jede einzelne Kette bis auf einen zulässigen Maximalwert $\Delta L_{\text{max,zul}}$ gedehnt, Abb. 15. Die maximal zulässige Spannkraft sei in den Beispielen die sog. Lashing Capacity LC. Die Dehnungskurven der einzelnen Ketten soll linear verlaufen, die Dehnung sei reversibel.

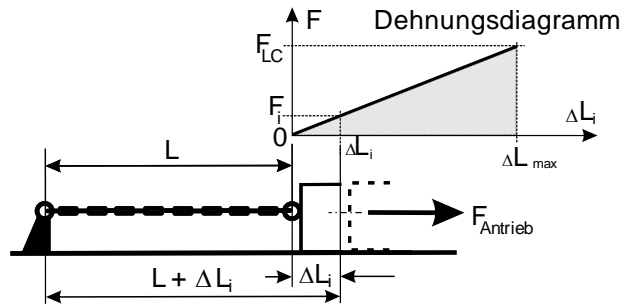
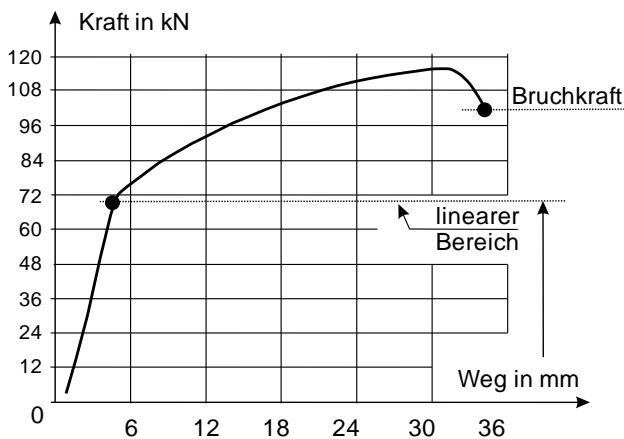


Abb. 12



Die Abbildung 13 zeigt ein reales Kraft-Dehnungs-Diagramm einer Kette.

Um die resultierende Zurrkraft einer Kettenkonfiguration zu ermitteln, muß für jede einzelne Kette der LC-Wert, die jeweilige Dehnung und die Einspannlänge im Zugversuch für das Dehnungsdiagramm bekannt sein.

Abb. 13

Die Abb. 14 zeigt allgemeine Begriffe für ein Kraft-Dehnungsdiagramm.

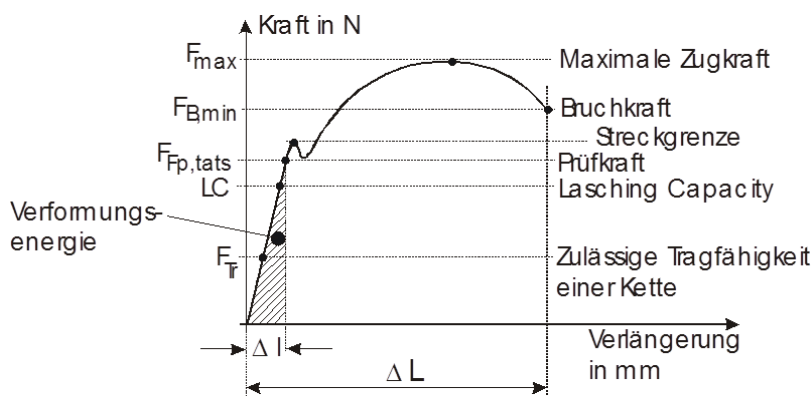


Abb. 14

In der Technischen Mechanik des Maschinenbaus wird nicht mit Verlängerungen sondern mit der Dehnung ε gearbeitet. Die Dehnung [3] ergibt aus:

$$\varepsilon = \frac{\text{Verlängerung } \Delta L}{\text{Ursprungslänge } L} \quad (\text{Gl. 1})$$

Umgeformt ergibt sich die Verlängerung aus:

$$\Delta L = \varepsilon \cdot L. \quad (\text{Gl. 2})$$

Damit ist neben der Belastungskraft, der Dehnung auch die jeweilige Länge der Kette mit einbezogen. Für eine Kette und andere Zurrmittel ist die Dehnung ein konstanter Wert in Prozent für den Bereich $F_{\max} \leq LC$. Abb. 15 zeigt den Verlauf der Kraft F als Funktion der Verlängerung.

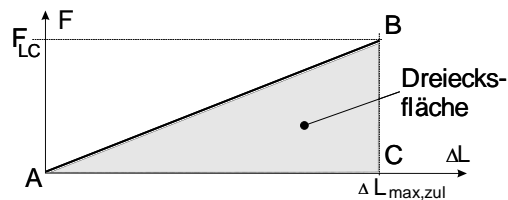


Abb. 15

3.6.3 Verformungsarbeit

Die in Gleichung 3 beschriebene Verformungsenergie E bei einer Kettendehnung ergibt sich aus dem Diagramm in Abb. 18. Die wirkende Kraft und der Dehnungsweg liegen gleichgerichtet. Sie ergeben nach Gleichung 3 eine Energie. Die Fläche unter der Kurve in Abb. 18 ist eine Dreiecksfläche. Damit errechnet sich die Verformungsenergie:

$$\begin{aligned} \text{Energie} &= \frac{1}{2} \text{Kraft} \cdot \text{Verformungsweg} \\ E_{\text{Ver}} &= \frac{1}{2} F_{LC} \cdot \Delta L_{\max} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 3})$$

3.6.4 Federrate

Eine weitere Festlegung soll eingeführt werden. Der Anstieg der Federkraft erfolgt linear. Damit kann in dem (rechtwinkligen) Dreieck $0BC$ der Tangenswinkel α gebildet werden, Abb. 16. Da der Verlauf geradlinig ist, wird die Federrate in solchen Fällen als Federkonstante bezeichnet. Bei Zurrmittel wird nur der Bereich für den Einsatz zugelassen, der linear verläuft.

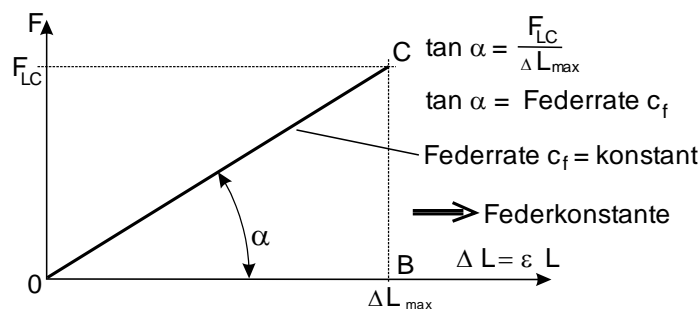


Abb. 16

3.6.5 Zurrkraftabnahme

Wenn ein Zurrmittel, in diesem Fall eine Kette, über eine Bogenkontur gespannt wird, tritt ebenso wie bei Gurten, eine Zurrkraftabnahme auf, weil gleichzeitig eine Reibung in der Länge der Auflage in Verbindung mit einer Dehnung vorhanden ist. Was die Kraftabnahme über die Bogenlänge liegen aber wenig Erfahrungen vor. Bei einer 180 Grad Umschlingung wird in der Praxis eine Abnahme von 20 Prozent der Zugkraft angenommen. Bei einer Direktzurrung kommt das Phänomen nicht zu Tragen.

4 Kombinationen von Sicherungstechniken

Direkte Zurrtechniken untereinander oder auch Zurrtechniken mit kraft- oder formschlüssigen Sicherungen können in unterschiedlichsten Kombinationen vorkommen. Es erscheint sinnvoll, für bestimmte Kombinationen eigene Bezeichnungen zu benutzen.

4.1 Kombinationen von Direktzurrungen

Für den Fall, daß ausnahmslos **direkte Zurrungen** für die vier Krafrichtungen verwendet werden müssen zwei Fälle unterschieden werden. Einmal kann eine einzige Zurrtechnik vorliegen, nur Schrägzurrungen oder nur Diagonalzurrungen oder es können verschiedenste direkte Zurrtechniken, Horizontal-, Diagonal- und Schrägzurrungen gleichzeitig vorkommen. Im ersten Fall soll von einer „*homogenen Zurrmittelkombination*“, Abb. 17, im zweiten Fall von einer „*gemischten Zurrmittelkombination*“ gesprochen werden. Eine bestimmte Kombination muß dann jeweils nach eigenen Regeln behandelt werden.



Abb.817

4.2 Kombinationen von Zurrtechniken

Abb. 18 zeigt eine Kombination verschiedener Zurrtechniken. Sie zeigt in eins und fünf eine beidseitige Direktzurrung, zwei und vier sind jeweils eine Buchtflaschingsicherung gezeigt und die dritte Sicherung ist eine Niederzurrung. Damit werden verschiedenste Sicherungstechniken miteinander kombiniert.

Wird eine Ladung, das betrifft insbesondere den Bereich Schwergutladung, mittels unterschiedlicher Wirkmechanismen gesichert, soll von einer „Mischsicherung“ gesprochen werden. In Abb. 19 wird ein Beispiel gezeigt.

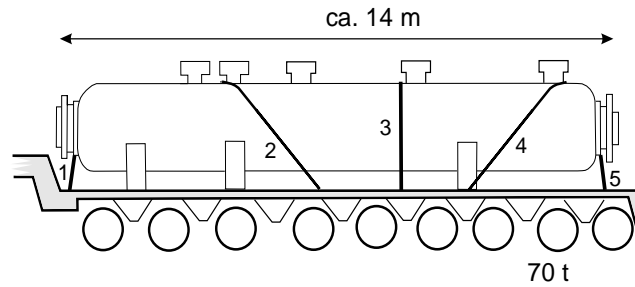


Abb. 18

Damit alle Sicherungen wirken können, muß auch die Niederzurrung eine Verschiebung machen! Dieser Fall wird von den heute geltenden Richtlinien nicht erfaßt.

4.3 Kombinationen von verschiedenen Wirkmechanismen

Wird eine Ladung, das betrifft insbesondere den Bereich Schwergutladung, mittels unterschiedlicher Wirkmechanismen gesichert, soll von einer „Mischsicherung“ gesprochen werden. In Abb. 19 wird ein Beispiel gezeigt.

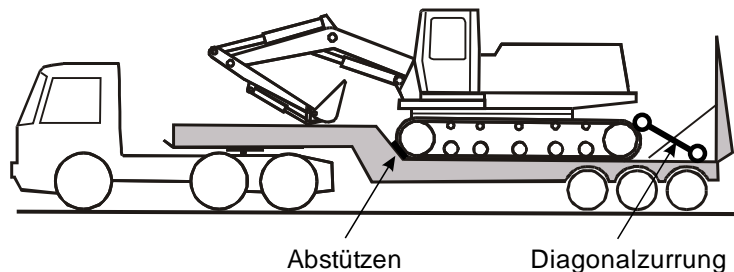


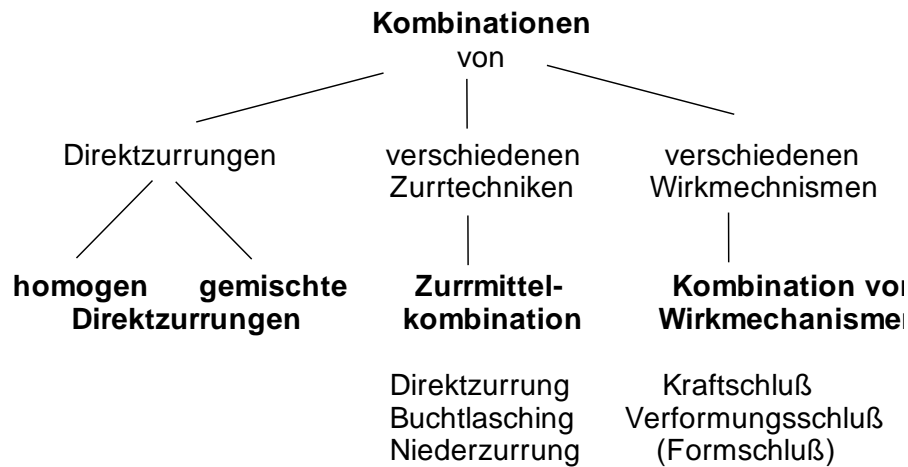
Abb. 19

Hier wird nach vorn formschlüssig gesichert. Bei dieser Art von Formschluß sind Bewegungen, die ein Übergang von der Haft- in die Gleitreibung zur Folge haben, nicht möglich. Geprüft werden muß, ob vorn die seitliche Sicherung gegeben ist oder nicht. Wenn dagegen auf Biegung beanspruchte Balken als formschlüssige Sicherung eingesetzt werden, muß untersucht werden, ob hier nicht über die Balkenbiegung größere Bewegungen auftreten werden können. Unfalluntersuchungen haben gezeigt, daß eine Schwerladung entweder rechtwinklig zum Fahrzeug abrutscht oder drehend, also zuerst hinten und dann vorn oder umgekehrt.

4.4 Zusammenfassung der Kombinationen

Es ergeben sich die Möglichkeiten nach Übersicht 4.1.

Übersicht 4.1. Kombinationen.



5 Zur Vorgehensweise

5.1 D'Alembertscher Ansatz

Mit der Suche nach einer Berechnungsmöglichkeit für alle Arten von Kombinationen von Zurrtechniken, Zurrvarianten und Schlußtechniken muß es ein Ziel sein, die Eigenarten einer Sicherung zu berücksichtigen. Neben der Wegabhängigkeit kommt z. B. Beispiel bei einer Niederzurrung der Gurtkraftabbau zum Tragen, bei einer Formschlußsicherung die Spannungsart der Rückhaltung, Biegung oder Druck oder die Reversierbarkeit der Bewegung.

Da Kräfte mit den Dehnungen der Zurrmittel bei einem Ladungsvershub oft nicht gleichgerichtet sind, muß in vielen Fällen erst eine Umrechnung aufgestellt werden. Es wird für die Darstellung des Berechnungsansatzes auf eine einfache Kombination zurückgegriffen.

Es wird ein energetischer Ansatz benutzt. Über Energiebilanzen kann dann statt mit einer Kettenkonfiguration von fünf Ketten entgegen z. B. Fahrtrichtung mit *einer* „Ersatzkette“ gerechnet werden. Da es sich, wie angenommen wird, von Ladungsbewegungen über 5 mm hinaus handelt und die Bewegung beschleunigt ist, müssen Massenträgheitskräfte berücksichtigt werden. Die resultierenden Kräfte sollen mittels des d'Alembertschen Ansatz bearbeitet werden. Damit können alle wirkenden Kräfte bei einer beschleunigten Bewegung, also auch die Massenträgheitskraft, mit einbezogen werden. Mit der Lösung kann dann zu jedem Zeitpunkt der Bewegung die momentane Geschwindigkeit und der zurückgelegte Weg ermittelt werden. Es kann damit auch die Aufprallgeschwindigkeit einer Ladung nach einem bestimmten Weg ermittelt werden.

15. Der d'Alembertscher Ansatz wird ohne eine geschwindigkeitsabhängige Dämpfung gemacht. Die Aufstandsflächenreibung ist relativ groß und damit wird es nach aller Erfahrung kein mehrmaliges Schwingen der Ladung geben.

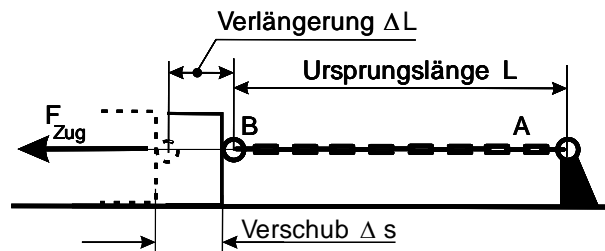


Abb. 21

6 Zur Theorie des Berechnungsansatzes

6.1 Zum Verfahren

In dem folgenden Verfahren soll eine Lösung des 3-Kettenproblems an einem idealisierten Fall vorgestellt werden. Es wird nach dem Modell in Abb. 22 dargestellte Kettenkonfiguration angenommen ΔL_1 die Kraft ΔF_2 . Diese „Grenzlinie“ ist die Belastungsgrenze der „schwächsten“ Kette.

Es sollen zwei Ketten (K1) mit einer weiteren (K2) zu einer Konfiguration zu der Frage untersucht werden, inwieweit sie belastet werden können, ohne daß eine Kette vorzeitig versagt. Bei einem Ladungsverschub um Δs werden die Ketten um ΔL gedehnt.

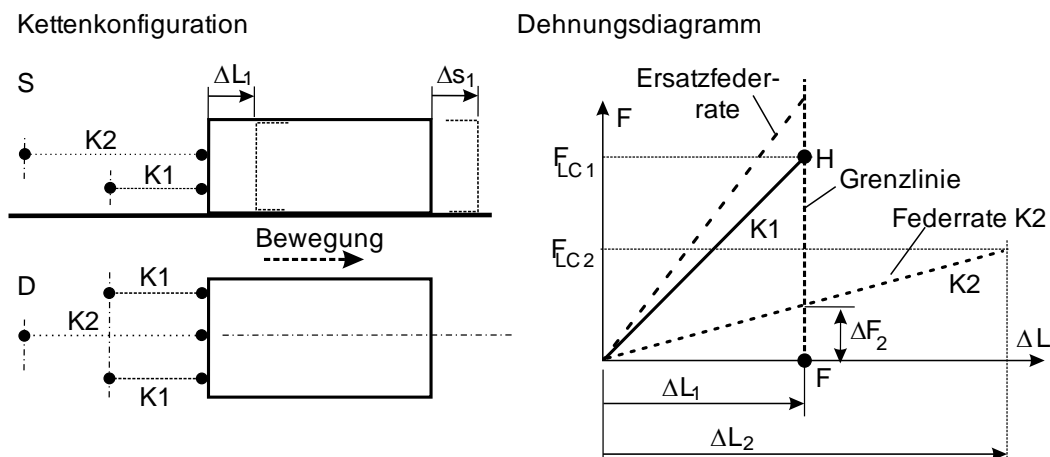


Abb. 22

Für die Berechnung sollen folgende Werte angenommen werden:

	F_{LC} (daN)	ε %	L (m)	Anzahl
Kette 1	6000	3	1	2
Kette 2	3000	4	2	1

Masse Ladung	$m_L = 10\,000\text{ kg}$
Verzögerung	$a_v = 8\text{ m/sec}^2$
Reibungszahl	$\mu_H = 0,4$
	$\mu_G = 0,25$

Mit diesen Daten soll das Verfahren an einer Nachrechnung dargestellt werden.

6.2 Antriebskraft F_A

Mit den obigen Werten ergibt sich für die Kraft an der Ladung in x-Richtung:

$$F_A = m_L \cdot a_{\text{ver}}$$

$$F_A = 10\,000\text{ kg} \cdot 8\text{ m/sec}^2$$

$$F_A = 80\,000\text{ kg m/sec}^2$$

$$F_A = 8000\text{ daN}$$

Die Sicherung durch die Ketten K1 und K2 muß diese Antriebskraft $F_A = 8\,000\text{ daN}$ aufnehmen können.

6.3 Analyse Arbeitsaufnahmevermögen der Ketten

Im zweiten Schritt wird das „*maximal zulässige Arbeitsaufnahmevermögen*“ der einzelnen Ketten der Konfiguration errechnet, um einen Vergleich zu haben, welche der Kette das geringste Arbeitsaufnahmevermögen bei seiner LC hat. Ebenso werden die einzelnen Verlängerungen ΔL bei LC errechnet.

Kette 1: Verformungsenergie bei LC	$E_1 = \frac{1}{2} 6000\text{ daN} \cdot 3\% \cdot 1\text{ m} = 90\text{ daN m}$	(Gl. 4)
------------------------------------	--	---------

Verformungsweg bei LC:	$\Delta L_1 = 3\% \cdot 1\text{ m} = 3\text{ cm}$	(Gl. 5)
------------------------	---	---------

Kette 2: Verformungsenergie bei LC:	$E_2 = \frac{1}{2} 3000\text{ daN} \cdot 4\% \cdot 2\text{ m} = 120\text{ daN m}$	(Gl. 6)
-------------------------------------	---	---------

Verformungsweg bei LC:	$\Delta L_2 = 4\% \cdot 2\text{ m} = 8\text{ cm}$	(Gl. 7)
------------------------	---	---------

Erkennbar ist, daß die beiden K1-Ketten, obwohl sie mit insgesamt $12\,000\text{ daN}$ gezogen werden könnten, jedoch bei 3 cm Verformung an der LC-Grenze sind, die Kette 2 wegen ihrer Länge und der höheren Dehnfähigkeit aber erst nach 8 cm an ihre Grenze kommt. Es können also alle drei Ketten nicht *gleichzeitig* voll ausgenutzt werden. Von der K2-Kette darf nur die Kraft angesetzt werden, die bei der Verformung um ΔL_1 vorhanden ist! Mit diesem

Ansatz ist möglich, jede beliebige Kettenkombination unter den Abschnitt 5.2 genannten Annahmen und Voraussetzungen im Hinblick auf eine Kräfteinwirkung in x-, bzw. in y-Richtung ermitteln zu können.

Wird entschieden, daß die K2-Kette energetisch angepaßt werden soll, es könnten auch die K1-Ketten verändert werden, kann sie in der Konfiguration nur mit der Kraft angesetzt werden, die bei einer Dehnung um 3 cm vorhanden ist! Mit diesem Ansatz, der von der minimal aufnehmbaren Energie einer Kette in einer Kettenkombination ausgeht, ist es möglich, jede denkbare Kombination so auszulegen, daß keine Einzelkette überlastet wird. Erkennbar ist allerdings auch, daß ein Verfahren nicht richtig kann, welches von der Addition der maximal möglichen LC-Werte zu höheren Gesamtbelastungswerten führt als bei dieser Vorgehensweise.

6.4 „Ersatzenergie“ E_{Ers}

Für den hier angenommenen Fall ergibt sich für die Ketten eine Gesamtenergieaufnahme von:

$$E_{ges} = 2 E_1 + E_{2red} \quad (Gl. 8)$$

Mit Gl. 3 ergibt sich: $E_{1ges} = 2 \bullet 90 \text{ daN m}$

Die K2-Kette muß auf den Dehnungsweg ΔL_1 reduziert (Index red) werden:

$$E_2 = \frac{1}{2} \Delta F_2 \cdot \Delta L_1$$

$$\frac{F_{LC2}}{\Delta L_2} = \frac{\Delta F_2}{\Delta L_1}$$

$$\Delta F_2 = \frac{\Delta L_1}{\Delta L_2} F_{LC2}$$

$$E_2 = \frac{1}{2} \frac{\Delta L_1}{\Delta L_2} F_{LC2} \cdot \Delta L_1$$

$$E_2 = \frac{1}{2} \Delta F_{LC2} \cdot \frac{\Delta L_1^2}{\Delta L_2}$$

$$E_{2red} = \frac{1}{2} F_{LC2} \cdot \frac{\Delta L_1^2}{\Delta L_2} \quad (Gl. 9)$$

$$E_{2red} = \frac{1}{2} 3000 \text{ daN} \cdot \frac{0,03^2 \text{ m}^2}{0,08 \text{ m}}$$

$$= 16,9 \text{ daNm}$$

Damit kann diese Direktzurrung eine maximal zulässige Verformungsenergie nach Gl. 8 von

$$E_{\text{ges}} = 2 E_1 + E_{2\text{red}}$$

aufnehmen, insgesamt:

$$E_{\text{ges}} = 2 \cdot 90 \text{ daNm} + 16,9 \text{ daNm}$$

$$E_{\text{ges}} = 196,9 \text{ daNm.}$$

Da die Gesamtenergie eine Federenergie ist und linear ansteigt, muß für die Berechnung der maximale Wert der Kraft verdoppelt werden.

$$E_{\text{ges}} = 393,8 \text{ daN m.}$$

Die Gesamtkraft bei einer Zugbeanspruchung der Ketten um $\Delta L = 30 \text{ mm}$ Verlängerung ergibt sich aus:

$$E_{\text{ges}} = F_{\text{ges}} \cdot \Delta L_1$$

$$F_{\text{ges}} = \frac{E_{\text{ges}}}{\Delta L_1}$$

Für eine Umrechnung auf eine lineare Federkurve (Rechteckfläche \blacksquare = Dreiecksfläche \blacktriangle) verdoppelt sich damit die Rückhaltekraft, Abb. 23, da der Weg gleich bleibt!

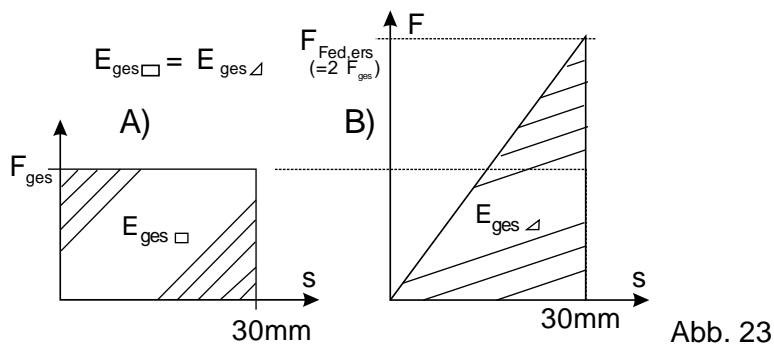


Abb. 23

6.5 Rückhaltekraft aus der Federwirkung einer Zurrung

Mit der berechneten Ersatzenergie kann mittels des maximal zulässigen Verformungsweges ΔL_1 die maximal zulässige Rückhaltekraft errechnet werden.

Rückhaltekraft der Ersatzfeder

$$E_{\text{ges}} = F_{\text{ges}} \cdot \Delta L_1$$

$$F_{\text{ges}} = \frac{E_{\text{ges}}}{\Delta L_1}$$

(Gl. 10)

$$F_{\text{ges}} = \frac{393,8 \text{ daN m}}{0,03 \text{ m}}$$

$$F_{\text{ges}} = 13\,126,6 \text{ daN}$$

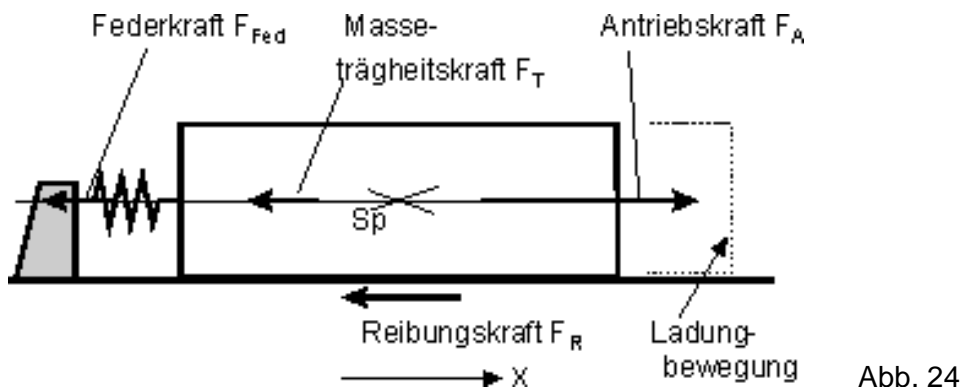
Es wird also statt zweimal 6000 daN plus einmal 3000 daN, also 15 000 daN Rückhalte­kraft, nur 13126 daN erreicht.

Diese Rückhalte­kraft wird nach einem Verformungsweg von 0,03 m erreicht.

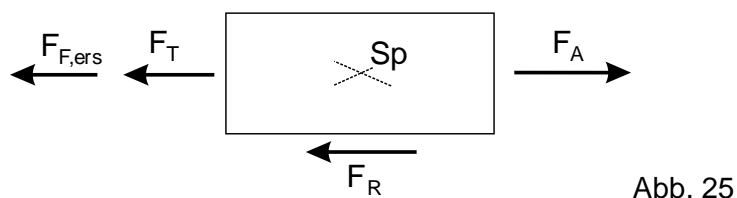
Damit kann eine Federrate $c_{f,\text{ers}} = 4\,375\,533 \text{ N/m}$ Grunde gelegt werden.

6.6 Gesamtrückhalte­kraft einer Zurrung

Für die Berechnung der Gesamtrückhalte­kraft müssen weitere Kräfte berücksichtigt werden, Abb. 24. Es wird folgende Annahme gemacht: Der Übergang von der Haft- in die Gleitreibung soll nach 5 mm Weg abgeschlossen sein. Danach beginnt die Ladung aus einer „konstanten Antriebskraft“ F_A eine beschleunigte Bewegung. Es tritt also eine Masse­trägheits­kraft F_T auf! Die Kräfte sollen nach dem d’Alembertschen Prinzip bilanziert werden, Abb. 24.



Nach einem Freischnitt der Ladungsmasse ergibt sich folgendes Kräftegleichgewicht:



Das horizontale Kräftegleichgewicht ergibt sich aus Gl. 11:

$$F_A - F_{Fed} - F_R - F_T = 0$$

Antriebskraft, z. B. 0,8 g

Federungskraft

Reibungskraft

Trägheitskraft

(Gl. 11)

Umgeformt erhält man eine inhomogene Differentialgleichung 2. Grades:

$$m \cdot a - c_{f,ers} \cdot s - m \cdot g \cdot \mu_G - m \cdot \ddot{s} = 0 \quad (Gl. 12)$$

Neben dem allgemeinen Lösungsansatz kann ein einfacherer Lösungsweg über eine Randbedingungen des Geltungsbereichs gewählt werden. Wenn die Federkraft bei 30 mm Dehnung am Maximum haben soll, muß die Beschleunigung „in diesem Punkt“ Null sein! Daraus folgt für die Gl. 12:

$$m \cdot a - c_{f,ers} \cdot s - m \cdot g \cdot \mu_G = 0 \quad (Gl. 13)$$

Wird die Gleichung 13 nach dem Weg s umgeformt und für s der tatsächlich zurückgelegte Weg angesetzt, ergibt sich Gl. 14:

$$\Delta s = \frac{m}{c_{f,ers}}(a - g \mu_G) \quad (Gl. 14)$$

Δs ist bei den angenommenen Größen, wie der Masse, der Antriebsbeschleunigung und Gleitreibungszahl, nur von der Größe der Ersatzfederzahl $c_{f,ers}$ abhängig.

$$\Delta s = \frac{m}{c_{f,ers}}(a - g \mu_G) \quad (Gl. 15)$$

Wird eine Antriebsbeschleunigung a von 0,8 g und obige Werte eingesetzt, ergibt sich ein Weg von 0,021 m. Das bedeutet, daß in Verbindung mit der Reibungskraft und der Masse-trägheit der zulässige Weg von 0,03 m nicht erreicht wird und damit gegen 0,8 g eine ausreichende Sicherheit besteht.

Es kann aber auch umgekehrt gerechnet werden, indem die Gl. 14 nach der Antriebsbeschleunigung a aufgelöst wird. Die Nachrechnung der mit der LC vorgegebenen Grenze ergibt dann eine Antriebsbeschleunigung, die größer sein muß als 0,8 g-Grenze.

$$a = \frac{\Delta s \cdot c_{f,ers}}{m} + g \cdot \mu_G \quad (Gl. 16)$$

$$c_{f,ers} = \frac{131\,266\text{ N}}{0,03\text{ m}} = 4\,375\,533,3\text{ N/m}$$

$$a = \frac{0,03 \text{ m} \cdot 4375533}{10\,000} + 9,81 \cdot 0,25 \text{ [m/sec}^2 \text{]}$$

Damit ist Antriebsbeschleunigung mit $a = 13,1 \text{ m/sec}^2$ größer ist als 0,8 g. Das bedeutet, daß die Rückhaltung überdimensioniert ist.

7 Zusammenfassung

Während das konventionelle Verfahren die maximale Rückhaltekraft aus der Addition der maximalen Zurrmittelkräfte in den einzelnen Ketten herleitet, werden bei dem hier vorgeschlagenen Verfahren die maximalen Rückhaltekräfte unter Einbeziehung der Dehnungen der einzelnen Kräfte abgeleitet. Dabei wird auch berücksichtigt, welche Kette die schwächste von der Energieaufnahme her in einer Kettenkombination ist. Das bisherige Verfahren könnte mit Additionsverfahren bezeichnet werden. Das hier vorgeschlagene Verfahren könnte in Abgrenzung dazu als Minimalenergie-Grenzverfahren (MEG-Verfahren) bezeichnet werden. Mit diesem Ansatz läßt sich auch die Sicherung nach dem Wirkmechanismus Verformungsschluß allgemein berechnen. Auch die Kombinationen von Kraft-, Form- und Verformungsschlußtechniken können damit ausgelegt werden.

Die Einbeziehung der jeweiligen Dehnungen erfordert einen energetischen Ansatz. Damit werden aber auch alle Formen der Verformung, ob elastisch, elastisch innerhalb der Hookeschen Geraden und auch plastische, berechenbar.

Für eine Berechnung der Gesamtrückhaltekraft muß neben der Antriebskraft, der „Verlust“ aus der Gleitreibung an der Aufstandsfläche und die Masseträgheitskraft mit berücksichtigt werden. Der d'Alembertsche Ansatz ermöglicht das.

Der zeitliche Ablauf der Ladungsbewegung wird bei dem hier beschriebenen energetischen Ansatz erfaßt, aber in dem Berechnungsbeispiel mit einem „Trick“ umgangen.

Das hier verwendete Beispiel stellt einen vereinfachten Fall für eine Horizontalzurrung dar, der aber auf symmetrische Schräg- und Diagonalzurrungen ebenso angewendet werden kann. Nur für einen Überlagerungsfall bei gleichzeitiger Wirkung einer zeitabhängigen Längs- und Querkraft wird es mit händischen Verfahren Schwierigkeiten ergeben.

8 Literatur

- [1] Podzuweit, U., Neumann, W., Zurück zu den Wurzeln, Gefährliche Ladung, August 2008
- [2] Podzuweit, U., Ehringer, S. Niederrurrtechnik, expert verlag, 2008, ISBN 978-3-8169-2719-8
- [3] Gross, D., Hauger, W., Schröder, J., Wall, W. A., Technische Mechanik, Springer Vieweg, 12. Auflage, ISBN 978-3-642-32267-5
- [4] Podzuweit, U., Ladungssicherung in Bigbags, Internetbibliothek der Hochschule München, HMdigital, 2013, Seite 49 ff
- [5] Podzuweit U., Ladungssicherung – Zur Festigkeit von Stirnwänden, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 12/2007

9 Bildnachweis

Bild 4 „Bild des Monats“ Januar 2015 W. Jaspers (Internetseite KLSK)
Bild 13 und 16 Fa. RUD