

## Schrifttum

[ 1 ] Hoffmann, H.J.: Über die Bremssicherheit landwirtschaftlicher Züge auf der Straße und im Gelände. Diss. TH Darmstadt (in Vorbereitung).

[ 2 ] Simuttis, A. u. B. Breuer: Das Bremsverhalten schneller Ackerschlepper.

Grundl. Landtechnik Bd. 33 (1983) Nr. 2, S. 35/40.

[ 3 ] —: Richtlinie des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über die Bremsanlagen bestimmter Klassen von Kraftfahrzeugen und deren Anhänger (71/320/EWG), 1979.

# Lastverlagerung und Bremskraftverteilung bei Einachs- und Doppelachsanhängern

Von Ben van Straelen, Wageningen, Niederlande\*)

DK 631.372:631.373:62-592

Bei Fahrzeugkombinationen von Schlepper und Anhänger treten während des Bremsens große Veränderungen der Radlasten und der Stützkkräfte auf infolge der Lastverlagerung. In dieser Arbeit werden Gleichungen für diese Kräfte abgeleitet.

Die großen Unterschiede in der Radbelastung bei Doppelachsanhängern sind der Grund dafür, die Bremskraftverteilung zwischen Vorder- und Hinterrädern zu verändern, d.h. von der in der Praxis üblichen 1 : 1-Verteilung abzuweichen.

## 1. Einleitung

Einachs- und Doppelachsanhänger erfahren im Landbau eine vielfältige Verwendung. Der Vorteil dieser Anhängertypen gegenüber zweiachsigen Anhängern ist die Lastübertragung auf den Schlepper. Die sich hieraus ergebende Erhöhung der Hinterachsbelastung des Schleppers wirkt sich in einer bedeutenden Zunahme der Zugkraft aus, die der Schlepper auf den Boden übertragen kann.

Bei einer Fahrzeugkombination, die aus einem Schlepper und angekoppeltem Einachs- oder Doppelachsanhänger besteht, treten während des Bremsens große Veränderungen der Radlasten und der Stützkkräfte auf. Das hat wichtige Folgen für die Konstruktion und das Verhalten der Fahrzeugkombination. Einerseits kommt schon die statische Stützkraft auf den Schlepper bei schweren Anhängern dem zulässigen Wert nahe; als Folge der Lastübertragung während des Bremsvorganges kann diese Stützkraft noch stark zunehmen. Andererseits treten bei Doppelachsanhängern der heutigen Konstruktion zwischen Vorder- und Hinterrädern große Unterschiede in den Radlasten auf, so daß der Bremskraftverteilung zwischen diesen Rädern besondere Aufmerksamkeit zukommt. Hieraus ergibt sich die Problemstellung für den vorliegenden Artikel.

Kutzbach u. Sy [1] führten Messungen der drei dynamischen Kräfte an der Kuppelstelle zwischen Schlepper und Anhänger durch.

Sagi e.a. [2, 3] bestimmten in ihren theoretischen Untersuchungen den Masseneinfluß von Schlepper und zweiachsigen Anhänger auf das Bremsverhalten dieser Fahrzeugkombination. Außerdem untersuchten Sagi e.a. [4] die dynamische Stützkraft von Einachsanhängern auf einer geraden und abschüssigen Fahrbahn. Schließlich ist noch auf die Untersuchung von Simuttis u. Breuer [5] hinzuweisen, die das Verhalten schneller Schlepper während der Bremsung zum Gegenstand hat.

\*) Ir. B. van Straelen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Landtechnik, Arbeit und Gebäude (I.M.A.G.), Wageningen, Niederlande.

## 2. Die Stützkraft und die Radlast bei Einachsanhängern

Aus dem Momentgleichgewicht um den Schwerpunkt Z, Bild 1, folgt:

$$\Delta G_V l_1 + \Delta G_H l_2 = R h_Z + H h_1 .$$

Die Zunahme der Stützkraft ist gleich der Abnahme der Achsbelastung des Anhängers. Mit  $\Delta G_V = \Delta G_H$  und  $l = l_1 + l_2$  folgt:

$$\Delta G_V l = R h_Z + H h_1 .$$

Wir vernachlässigen hier den Rollwiderstand, der auf dem befestigten Weg sehr viel kleiner ist als die Bremskraft. Nach dem Gesetz von Newton gilt:

$$R + H = m_{\text{anh}} a \quad \text{mit } m_{\text{anh}} = G_{\text{anh}}/g .$$

Die Elimination von R aus obigen Gleichungen ergibt mit  $h_2 = h_Z - h$  für die Zunahme der Stützkraft bzw. für die Abnahme der Achsbelastung

$$\Delta G_V = \Delta G_H = m_{\text{anh}} \frac{h_Z}{l} a - H \frac{h_2}{l} \quad (1).$$

Die Art und Weise, wie die Fahrzeugkombination gebremst wird, d.h. wie die Anhängerbremse und die Schlepperbremsen aufeinander abgestimmt sind, bestimmt die Richtung der Kraft H und, zusammen mit der Bremsverzögerung und einigen Fahrzeugabmessungen, ihre Größe.

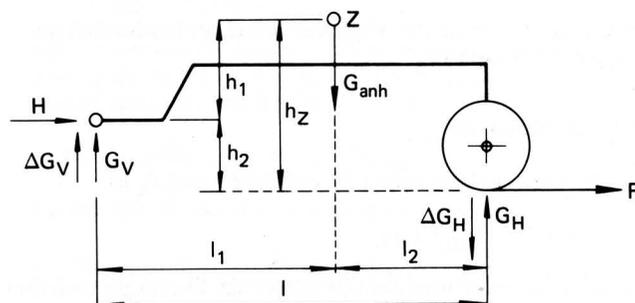


Bild 1. Die Kräfte auf einen Einachsanhänger beim Bremsen.

Es gibt drei Situationen, in denen die Kraft  $H$  definiert ist:

- a nur der Schlepper wird gebremst,
- b nur der Anhänger wird gebremst und
- c Schlepper und Anhänger sorgen für die Bremsung der eigenen Masse, d.h.  $H = 0$ .

Im Zusammenhang mit der Kursstabilität muß nach einer gleichen Eigenmassenbremsung gestrebt werden. In der Praxis ist das Optimum schwer zu erreichen, da der Anhänger unterschiedlich belastet wird. Meistens wird die Abstimmung zwischen der Bremsung des Schleppers und Anhängers zugleich und der Bremsung nur des Anhängers liegen.

Wir betrachten nun die Lastverlagerung in drei konkreten Situationen:

- nur der Schlepper wird gebremst.  
Die Lastverlagerung  $\Delta G_V$  erreicht ihr Minimum. Es gilt  $R = 0$  und  $H = m_{\text{anh}} a$ , Gl. (1) lautet:

$$\Delta G_{V \min} = m_{\text{anh}} \frac{(h_Z - h_2)}{l} a = m_{\text{anh}} \frac{h_1}{l} a .$$

- Nur der Anhänger wird gebremst.  
Die Lastverlagerung  $\Delta G_V$  erreicht ihr Maximum;  $H < 0$  und  $R$  erreicht ihr Maximum.

$$H = - m_{\text{schl}} a .$$

Somit wird Gl. (1):

$$\Delta G_{V \max} = m_{\text{anh}} \frac{h_Z}{l} a + m_{\text{schl}} \frac{h_2}{l} a .$$

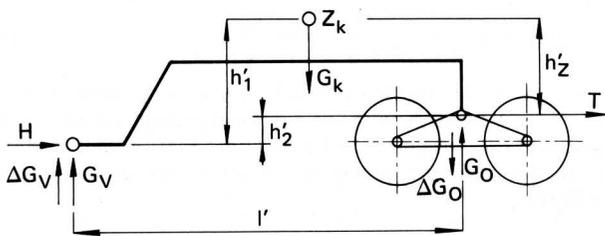
Da bei schweren Anhängern die statische Stützkraft auf den Schlepper ohnehin schon recht groß ist, empfiehlt sich eine Bremsung allein des Anhängers nicht. Dies wird aber noch häufig in der Praxis propagiert.

- Gleiche Abbremsung von Anhänger und Schlepper.  
Es gilt  $H = 0$  und Gl. (1) reduziert sich auf die Form

$$\Delta G_V = m_{\text{anh}} \frac{h_Z}{l} a .$$

### 3. Die Stützkraft und die Radlast bei Anhängern mit Pendelachse

Hier geht es um ungedeferte Anhänger, bei denen eine Pendelkonstruktion die Vorder- und Hinterradbelastung gleichzuhalten trachtet, **Bild 2**.



**Bild 2.** Die Kräfte auf den Wagenkasten und der Deichsel bei Anhänger mit Pendelachse.

#### 3.1 Die Stützkraft

Das Momentengleichgewicht um den Schwerpunkt  $Z_k$  ist:

$$\Delta G_V l' = H h'_1 + T h'_2 .$$

Der Rollwiderstand wird nicht berücksichtigt. Ebenso gilt nach dem Newtonschen Axiom

$$H + T = \frac{G_k}{g} a .$$

Die Elimination der Kraft  $T$  aus beiden Gleichungen führt zu:

$$\Delta G_V = m_k \frac{h'_2}{l'} a + \frac{H}{l'} h'_2 \quad (2).$$

In der Praxis gilt fast immer  $h'_2 \ll l'$ , wodurch die Gl. (2) vereinfacht werden kann:

$$\Delta G_V = m_k \frac{h'_2}{l'} a \quad (2a).$$

Da  $h'_2$  sowohl positiv als auch negativ sein kann, kann nicht allgemeingültig festgestellt werden, bei welcher Art von Bremsung die Lastverlagerung einen extremen Wert erreicht. In der Praxis wird jedoch die Gl. (2a) gültig sein, was bedeutet, daß die Stützkraft beim Bremsen so gut wie unabhängig von der Art der Bremsung ist.

#### 3.2 Die Radbelastung

In Abschn. 3.1 wurden Formeln für die Berechnung der Änderung der Stützkraft und somit für die Änderung in der Gesamtbelastung der Räder der Pendelachse gegeben. Bei der Pendelachse findet jedoch auch eine Lastübertragung zwischen den Achsen der Doppelachse statt. Das Momentengleichgewicht um den Schwerpunkt  $Z_D$  von **Bild 3** liefert die Beziehung

$$\Delta W_V l_0 = \frac{R_V + R_H}{2} h_0 + \frac{T \Delta h}{2}$$

$$(W'_V = W'_H) .$$

Ferner gilt

$$H + (R_V + R_H) = \frac{G_{\text{anh}}}{g} a ,$$

weiterhin

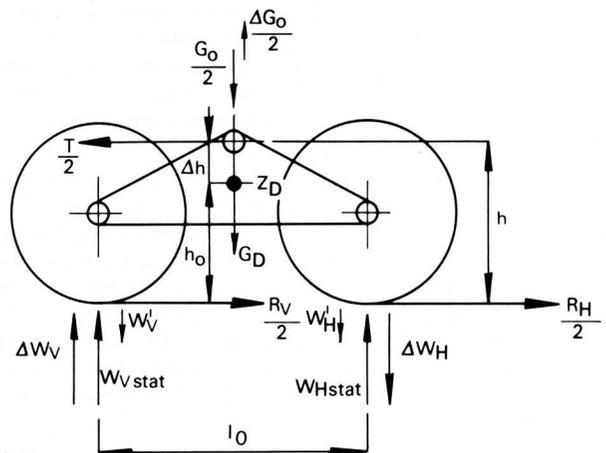
$$H + T = \frac{G_k}{g} a .$$

Die Elimination von  $(R_V + R_H)$  und  $T$  ergibt, mit  $h = h_0 + \Delta h$ :

$$\Delta W_V = m_{\text{anh}} \frac{h_0}{2 l_0} a + m_k \frac{\Delta h}{2 l_0} a - \frac{H h}{2 l_0} \quad (3).$$

Die Vorderradbelastung wird um den Wert  $\Delta W_V$  erhöht. Die Hinterräder werden um denselben Wert entlastet. Meist ist  $\Delta h \ll l_0$ , so daß der zweite Term in Gl. (3) weggelassen kann. Weiter liegt der Schwerpunkt der Doppelachse in der Nähe des Pendelpunktes, wodurch  $h = h_0$  wird. Das führt zu der vereinfachten Beziehung:

$$\Delta W_V = \frac{h_0}{2 l_0} (m_{\text{anh}} a - H) \quad (3a).$$



**Bild 3.** Die Kräfte auf eine Pendelachse wirkend.

Aus obigem folgt, daß sich die Radbelastung bei einer Pendelachse aus folgenden Komponenten zusammensetzt:

- der statischen Radbelastung,
- der Lastverlagerung in der Doppelachse selbst,
- der Lastverlagerung zum Schlepper, wodurch die vier Räder um den Wert  $\Delta G_0/4 = \Delta G_V/4$  gleichmäßig entlastet werden.

Zusammenfassend gilt für die Vorderradbelastung:

$$W_{V\text{brems}} = W_{V\text{stat}} + \Delta W_V - \frac{\Delta G_V}{4} \quad (4)$$

Für die Hinterradbelastung gilt mit  $W_{V\text{stat}} = W_{H\text{stat}}$  und  $\Delta W_V = \Delta W_H$ , siehe Bild 3

$$W_{H\text{brems}} = W_{V\text{stat}} - \Delta W_V - \frac{\Delta G_V}{4} \quad (5)$$

In erster Annäherung kann der letzte Term in den Gln. (4) und (5) hinsichtlich der übrigen Glieder vernachlässigt werden. Somit erhalten wir für die Praxis leichter zu handhabende Beziehungen:

$$W_{V\text{brems}} = W_{V\text{stat}} + \Delta W_V \quad (4a)$$

$$W_{H\text{brems}} = W_{V\text{stat}} - \Delta W_V \quad (5a)$$

Für diese Anhängerbauart können wir ebenfalls die drei Fälle unterscheiden, in denen H definiert ist:

- Bremsung allein des Schleppers.  
Die Lastverlagerung  $\Delta W_V$  in der Doppelachse selbst ist minimal ( $H > 0$  und maximal).  
Bei der Vernachlässigung des Rollwiderstandes und durch die Annahme, daß  $h = h_0$ , würde die Lastverlagerung  $\Delta W_V$  verschwindend klein.  $\Delta W_V \rightarrow 0$ .
- Bremsung allein des Anhängers:  $H = -m_{\text{schl}} a$ .  
Die Substitution in Gl. (3a) ergibt die maximale Lastübertragung in der Doppelachse:

$$\Delta W_{V\text{max}} = (m_{\text{anh}} + m_{\text{schl}}) \frac{h_0}{2 l_0} a.$$

- Gleiche Abbremsung von Schlepper und Anhänger.  
In diesem Fall ist  $H = 0$ . Somit wird die Gl. (3a):

$$\Delta W_V = m_{\text{anh}} \frac{h_0}{2 l_0} a.$$

Der Doppelachsanhänger mit einer federnden Radabstützung, wie in Bild 4 gezeigt, verhält sich im stationären Zustand analog zu dem Doppelachsanhänger mit Pendelachse nach Bild 3. Es sind dieselben Beziehungen gültig.

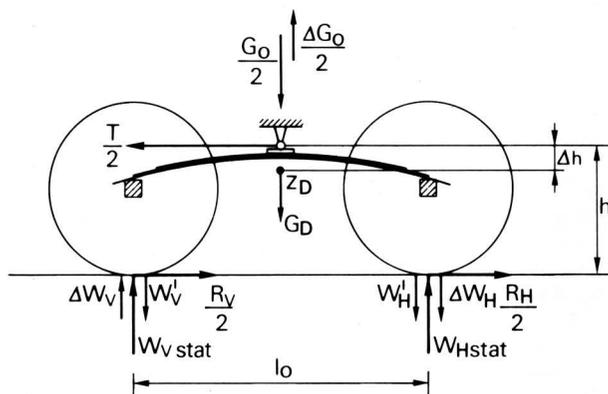


Bild 4. Der gefederte Anhänger mit einer Blattfeder pro Doppelachse.

#### 4. Die Stützkraft und die Radlast bei gefederten Anhängern mit Ausgleichswaage

Bei gefedertem Anhänger erfolgt die Radaufhängung meistens mit Blattfedern und einer Ausgleichswaage. Diese Ausgleichswaage dient dazu, die Radbelastungen zwischen den Vorder- und Hinterrädern möglichst gut auszugleichen.

##### 4.1 Die Stützkraft

Analog zu den Einachsanhängern kann man für die gefederten Anhänger, Bild 5, ableiten:

$$\Delta G_V = m_{\text{anh}} \frac{h_2^*}{l^*} a - H \frac{h_2^*}{l^*} \quad (6)$$

Vergleichen wir die Lastübertragung eines Pendelachsanhängers mit der eines bis auf die Radaufhängung identischen gefederten Doppelachsanhängers, Gln. (2a) und (6), dann wird  $h_2^* > h_2$ .

In der Praxis, für die gilt, daß die Abstimmung zwischen der Eigenmassenbremsung des Schleppers und Anhängers ( $H = 0$ ) und der Bremsung nur des Anhängers ( $H = -m_{\text{schl}} a$ ) liegt, wird dieser gefederte Anhänger eine größere Lastverlagerung auf den Schlepper aufweisen.

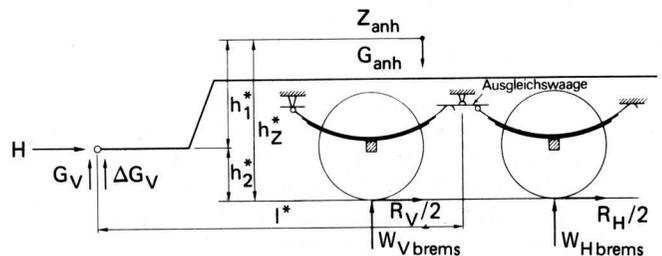


Bild 5. Die Kräfte auf einen gefederten Anhänger mit Ausgleichswaage.

##### 4.2 Die Radbelastung

Im stationären Zustand gilt in Bild 6 das Momentengleichgewicht um den Punkt A:  $\Sigma M_A = 0$ :

$$W_{V\text{brems}} \frac{n}{2} + \frac{R_V}{2} h^* = \frac{G_D}{2} \frac{n}{2} + V_2 n \quad (7)$$

Ebenso gilt  $\Sigma M_B = 0$ :

$$W_{H\text{brems}} \frac{n}{2} = \frac{G_D}{2} \frac{n}{2} + V_3 n + \frac{R_H}{2} h^* \quad (8)$$

Die Ausgleichswaage sorgt für:  $V_2 = V_3$ .

Die Differenz aus Gl. (7) und Gl. (8) ergibt:

$$W_{V\text{brems}} - W_{H\text{brems}} = -\frac{h^*}{n} (R_V + R_H) \quad (9)$$

Im Gegensatz zur Pendelachse wird die Radbelastung der Hinterräder größer als die der Vorderräder. Die Summe der 4 Radbelastungen nimmt um den Wert der Größe  $\Delta G_V$  ab:

$$W_{V\text{brems}} + W_{H\text{brems}} = W_{V\text{stat}} + W_{H\text{stat}} - \frac{\Delta G_V}{2} \quad (10)$$

Aus den Gln. (9) und (10) folgt zusammen mit  $W_{H\text{stat}} = W_{V\text{stat}}$ :

$$W_{V\text{brems}} = W_{V\text{stat}} - \frac{h^*}{2n} (R_V + R_H) - \frac{\Delta G_V}{4} \quad (11)$$

$$W_{H\text{brems}} = W_{V\text{stat}} + \frac{h^*}{2n} (R_V + R_H) - \frac{\Delta G_V}{4} \quad (12)$$



Als Beispiel sei ein Schlepper mit einem angekuppelten Doppelachsanhänger mit Pendelachse herangezogen. In Gl. (16) muß für den Term  $\Delta G_V$  die Gl. (2a) substituiert werden. Man kann wieder drei Situationen unterscheiden, in denen H definiert ist:

- Bremsung allein des Schleppers.  
Es gilt wieder:

$$H = \frac{G_{anh}}{g} a .$$

Substitution in Gl. (16):

$$\Delta V_H = -m_{schl} \frac{h_Z''}{l''} a + \frac{l_1'' + l_3''}{l''} m_k \frac{h_Z'}{l'} a - m_{anh} \frac{h_Z''}{l''} a .$$

Die Zunahme der Hinterachsbelastung ist minimal und kann sogar negativ werden.

- Bremsung allein des Anhängers, d.h.  $H = -(G_{schl}/g) a$ .  
Substitution in Gl. (16):

$$\Delta V_H = -m_{schl} \frac{h_Z''}{l''} a + \frac{l_1'' + l_3''}{l''} m_k \frac{h_Z'}{l'} a + m_{schl} \frac{h_Z''}{l''} a .$$

- Gleiche Abbremsung von Schlepper und Anhänger.  
Dann gilt:  $H = 0$ .

Substitution in Gl. (16) ergibt:

$$\Delta V_H = -m_{schl} \frac{h_Z''}{l''} a + \frac{l_1'' + l_3''}{l''} m_k \frac{h_Z'}{l'} a .$$

## 6. Beispiel aus der Praxis

Anhand eines Beispiels wird ein Eindruck von der Größenordnung der Belastungen beim Bremsen, die bei einer bremsenden Kombination auftreten, gegeben.

Dabei ging man von den Abmessungen und der Masse eines Schleppers des Fabrikats International Harvester, Type 724 (Masse 3000 kg, Leistung 48 kW) und einem vollbeladenen Anhänger mit einer Pendelachse (Gesamtmasse 13000 kg) aus. In den Bildern 9 bis 11 sind die Resultate graphisch dargestellt.

## 7. Die Bremskraftverteilung zwischen Vorder- und Hinterrädern

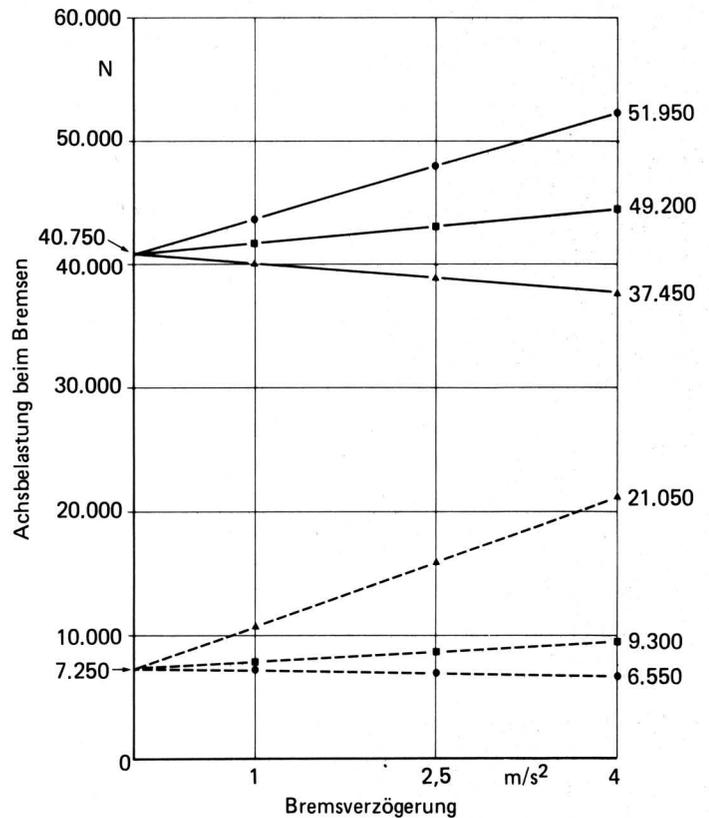
Die Bremskraft, die ein Reifen auf die Fahrbahn ausüben kann, verhält sich proportional zu der der Verzögerung proportionalen Radbelastung. Im Vorhergehenden wurde gezeigt, daß die Radbelastungen der Vorder- und Hinterräder eines Doppelachsanhängers während des Bremsens große Unterschiede aufweisen. Das führt dazu, daß, vorausgesetzt die Bremstrommeln und die mechanische Übertragung sind identisch ausgeführt, entweder die Vorder- oder die Hinterräder eine verstärkte Neigung zum Blockieren zeigen. Dieses bedingt eine starke Reifenabnutzung und eine Verminderung der erreichbaren Bremsverzögerung.

Um diese Effekte bei den zuvor beschriebenen Achsaufhängungen zu vermindern, können prinzipiell zwei Maßnahmen ergriffen werden:

- Man verändert bestimmte Abmessungen des Anhängers, um die Lastverlagerung zwischen den Rädern der Doppelachse zu reduzieren.
- Man strebt nach einer Situation, in der sich die an der Bereifung entwickelten Bremskräfte wie die entsprechenden Radbelastungen verhalten. Diese ideale Bremskraftverteilung wird erreicht, wenn gilt:

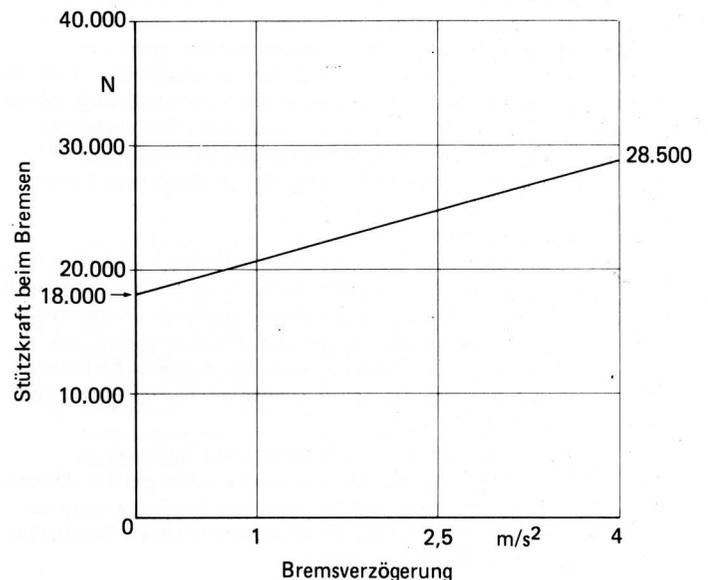
$$\frac{W_{Vbrems}}{W_{Hbrems}} = \frac{R_V}{R_H} .$$

Die Unterschiede in der Belastung beim Bremsen werden durch die Lastverlagerung in der Doppelachse selbst verursacht. Für die Pendelachse ist der Term  $h_0/2 l_0$ , Bild 3, bestimmend für die Lastverlagerung  $\Delta W_V$ , Gl. (3a). Für die gefederte Doppelachse von Bild 6 mit Ausgleichswaage ist das der Term  $h^*/2 n$ , Gl. (13).

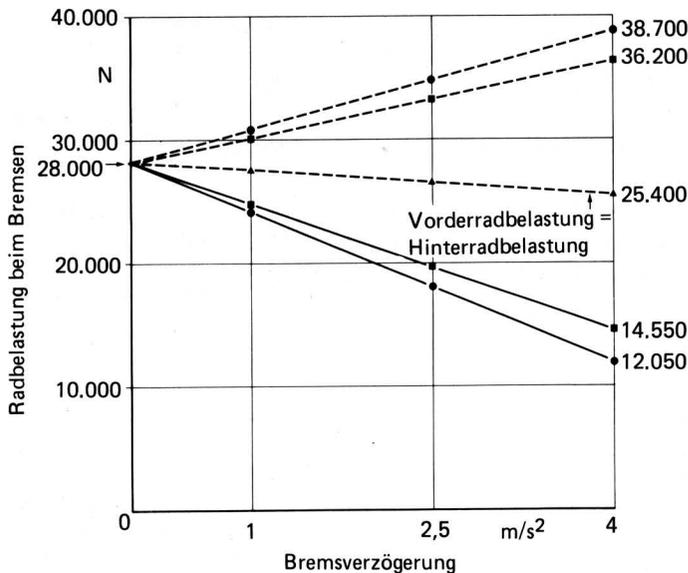


**Bild 9.** Die Vorder- und Hinterachsbelastung eines Schleppers als Funktion der Bremsverzögerung und Art der Bremsung. Schlepper: IH 724, Anhänger: Miedema HST 100.

- Hinteradbelastung
- - - Vorderradbelastung
- ▲ nur Schlepper gebremst
- nur Anhänger gebremst
- gleiche Abbremsung



**Bild 10.** Die Stützkraft eines Schleppers als Funktion der Bremsverzögerung (IH 724, Miedema HST 100).



**Bild 11.** Die Vorder- und Hinterradbelastung als Funktion der Bremsverzögerung und Art der Bremsung. (IH 724, Miedema HST 100).

- Hinterradbelastung
- - - Vorderradbelastung
- ▲ nur Schlepper gebremst
- nur Anhänger gebremst
- gleiche Abbremsung

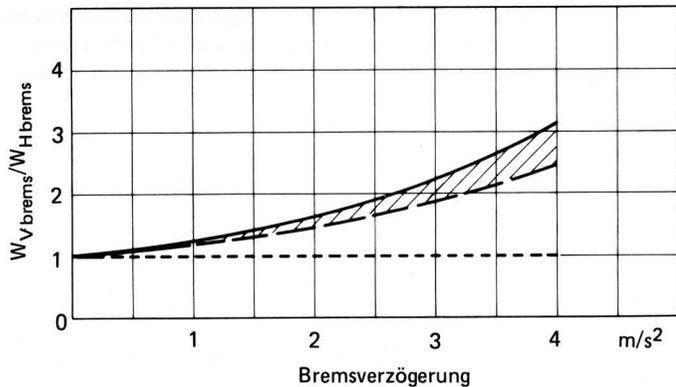
Die Konstruktionsmöglichkeiten, um diese Termen und damit die Lastverlagerung in der Doppelachse zu verringern, sind beschränkt: die Abmessungen  $h_0$  und  $h^*$  sind an den Raddurchmessern gebunden: die Abmessungen  $l_0$  und  $n$  müssen wegen der Torsion der Reifen in den Kurven klein gehalten werden.

Es bleibt damit nur die Anpassung der Bremskraftverteilung auf die Radlasten übrig.

In **Bild 12** ist der Faktor  $W_{V\text{brems}}/W_{H\text{brems}}$  als Funktion der Bremsverzögerung für den beladenen Anhänger des in Abschn. 6 beschriebenen Beispiels aus der Praxis dargestellt. Es zeigt sich deutlich, daß der Faktor  $W_{V\text{brems}}/W_{H\text{brems}}$  nicht nur von der Bremsverzögerung, sondern auch von der Art und Weise der Bremsung abhängig ist. Die ideale Bremskraftverteilung ist also nicht mit einfachen Mitteln zu realisieren. (Bei den gefederten Achsunterstützungen sind technische Lösungen möglich: Luftbremsen kombiniert mit automatisch arbeitender, von der Beladung abhängiger Bremskraftregelung). Wenn die Kapazität der Bremsstrommeln groß genug ist, können einige sehr gezielte Eingriffe die Situation in der Praxis wesentlich verbessern: man nähert die Kurve für die ideale Bremskraftverteilung einer Geraden bzw. dem konstanten Wert  $R_V/R_H$  an. Bei diesem Kompromiß wird folgendes vorausgesetzt:

- Bremsverzögerung von  $2,5 \text{ m/s}^2$ .  
Dieser Wert stimmt mit den zu erwartenden künftigen gesetzlichen Vorschriften überein. Andererseits ist dieser Wert auch haltbar hinsichtlich der maximal erreichbaren Bremsverzögerung einer Schlepper-Anhängerkombination. (Durch das IMAG ausgeführte Messungen ergaben mögliche Bremsverzögerungen von  $3,5$  bis  $4 \text{ m/s}^2$  bei vollbeladenen Doppelachsanhängern.)
- Gleiche Abbremsung von Schlepper und Anhänger.  
In der Praxis liegt die Abstimmung zwischen gleicher Abbremsung von Schlepper und Anhänger und Bremsung allein des Anhängers vor. Letztere Situation wird vor allem bei Anhängern bei niedriger Last auftreten.
- Vollbeladener Anhänger.  
Dieser Beladungsgrad ist am kritischsten.

Aufgrund dieser Ausgangspunkte kann für jeden Anhänger der Faktor  $R_V/R_H$  mit Hilfe folgender Formeln berechnet werden:



**Bild 12.** Das Verhältnis zwischen der Vorder- und Hinterradbelastung. (IH 724, Miedema HST 100).

a) Pendelachsanhänger

$$\frac{W_{V\text{brems}}}{W_{H\text{brems}}} = \frac{R_V}{R_H} = \frac{W_{V\text{stat}} + \Delta W_V - \frac{\Delta G_V}{4}}{W_{V\text{stat}} - \Delta W_V - \frac{\Delta G_V}{4}} \quad (18a),$$

b) Gefederter Doppelachsanhänger mit Ausgleichswaage

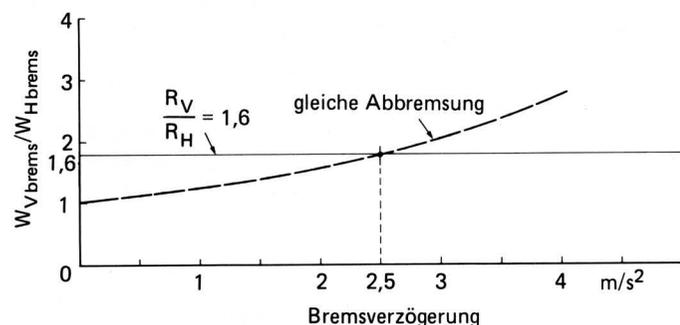
$$\frac{W_{V\text{brems}}}{W_{H\text{brems}}} = \frac{R_V}{R_H} = \frac{W_{V\text{stat}} - \Delta W_V - \frac{\Delta G_V}{4}}{W_{V\text{stat}} + \Delta W_V - \frac{\Delta G_V}{4}} \quad (18b).$$

Der konstante Wert von  $R_V/R_H$  bedeutet eine konstante Bremskraftverteilung, die einfach dadurch realisiert werden kann, daß die effektive Hebellänge der Vorder- und Hinterräderbremsen demgemäß eingestellt wird. Mit diesen gezielten Eingriffen erreicht man ein besseres Bremsverhalten des Anhängers und eine geringere Abnutzung der Reifen.

Für das Beispiel aus der Praxis in Abschn. 6 kann die ideale Bremskraftverteilung durch  $R_V/R_H = 1,6$  annähernd erreicht werden. Dieser Sachverhalt ist in **Bild 13** graphisch dargestellt.

Die Annäherung an die ideale Bremskraftverteilung bedeutet für vollständig beladene Anhänger mit Pendelachse:

- eine ideale Bremskraftverteilung von  $a = 2,5 \text{ m/s}^2$  und eine gleiche Abbremsung
- für  $a < 2,5 \text{ m/s}^2$  und einer gleichen Abbremsung werden die Vorderräder (relativ) zu stark gebremst (sie neigen dazu, früher zu blockieren als die Hinterräder)
- für  $a > 2,5 \text{ m/s}^2$  und einer gleichen Abbremsung werden die Hinterräder zu stark gebremst.



**Bild 13.** Die ideale Bremskraftverteilung, angenähert von einem konstanten Wert (IH 724, Miedema HST 100).

Bei der Frage, wie es sich mit der Bremskraftverteilung verhält, wenn der Anhänger nicht vollständig beladen ist, betrachten wir die Gln. (18a) und (18b) und vernachlässigen den Term  $\Delta G_V/4$ . Es gilt:

$$W_{V\text{stat}} = \frac{G_{\text{anh}}}{4} - \frac{G_V}{4}.$$

Im allgemeinen wird sich die statische Stützkraft proportional zu dem Gewicht des Anhängers verhalten; also  $G_V = c G_{\text{anh}}$ . Die gleiche Abbremsung von Schlepper und Anhänger bedeutet:

$$\Delta W_V = m_{\text{anh}} \frac{h_0}{2 l_0} a \quad (\text{Pendelachsanhänger}),$$

$$\Delta W_V = - m_{\text{anh}} \frac{h^*}{2n} a \quad (\text{gefedertes Doppelachsanhänger}).$$

Daraus ergibt sich, daß jeder Term im rechten Teil der Gln. (18a) und (18b) die Größe  $G_{\text{anh}}$  enthalten muß. Die Gleichungen können daher durch diesen Term geteilt werden, woraus sich ergibt, daß sie in hohem Maße von  $G_{\text{anh}}$  abhängig sind. Mit anderen Worten:  $W_{V\text{brems}}/W_{H\text{brems}}$  wird so gut wie gar nicht durch das Gewicht des Anhängers beeinflusst. Ein anderer Beladungsgrad des Anhängers macht daher eine fundamental andere Bremskraftverteilung nicht notwendig.

## 8. Zusammenfassung

Es wurden Formeln für die Stützkraft und die Radbelastung als Funktion der Bremsverzögerung, die Abmessungen des Anhängers und die Art und Weise, auf die gebremst wird (Bremsung allein des Schleppers, Bremsung allein des Anhängers, gleiche Abbremsung von Schlepper und Anhänger), abgeleitet.

Diese Formeln beziehen sich auf einachsige Anhänger, auf Doppelachsanhänger mit sowohl einer gefederten als auch ungefederten Achsunterstützung und Schlepper. Aus diesen Beziehungen ist abzulesen:

- der Einfluß bestimmter Fahrzeugabmessungen auf die Lastverlagerung;
- die großen Unterschiede in der Radbelastung zwischen Vorder- und Hinterrädern von Doppelachsanhängern.

Diese großen Unterschiede in der Radbelastung sind der Grund dafür, die Bremskraftverteilung zwischen Vorder- und Hinterrädern zu verändern, d.h. von der in der Praxis üblichen 1 : 1-Verteilung abzuweichen. Anstelle dieser Verteilung wird eine Lösung vorgeschlagen, die der idealen Bremskraftverteilung am nächsten kommt.

### Verwendete Formelzeichen

a	m/s <sup>2</sup>	Bremsverzögerung
F <sub>H</sub>	N	Abnahme der Hinterachsbelastung des Schleppers infolge der Stützkraft G <sub>V</sub>
F <sub>V</sub>	N	Abnahme der Vorderachsbelastung des Schleppers infolge der Stützkraft G <sub>V</sub>
G <sub>anh</sub>	N	Gewicht des Anhängers
G <sub>k</sub>	N	Gewicht des Wagens, vermindert um die Masse der Doppelachskonstruktion
G <sub>D</sub>	N	Gewicht der halben Doppelachse: 2 Räder + 1 Achse + 2 Federn

G <sub>R</sub>	N	Gewicht des Anhängers, vermindert um das Gewicht der Doppelachskonstruktion
G <sub>0</sub>	N	Totalgewicht auf den Pendelpunkten der Doppelachskonstruktion
ΔG <sub>0</sub>	N	Abnahme des Totalgewichts an den Pendelpunkten der Doppelachse
G <sub>V</sub>	N	statische Stützkraft
ΔG <sub>V</sub>	N	Zunahme der Stützkraft durch Bremsen
H	N	horizontale Kraft in der Zugöse
m <sub>anh</sub>	kg	Masse des Anhängers
m <sub>schl</sub>	kg	Masse des Schleppers
m <sub>k</sub>	kg	Masse des Wagens, vermindert um die Masse der Doppelachskonstruktion
R	N	totale Bremskraft an den Rädern
R <sub>H</sub>	N	totale Bremskraft an den Hinterrädern
R <sub>V</sub>	N	totale Bremskraft an den Vorderrädern
T	N	totale horizontale Kraft in den Pendelpunkten der Doppelachse
V <sub>H</sub>	N	statische Hinterachsbelastung des Schleppers
ΔV <sub>H</sub>	N	Zunahme der Hinterachsbelastung des Schleppers durch Bremsen
V <sub>V</sub>	N	statische Vorderachsbelastung des Schleppers
ΔV <sub>V</sub>	N	Zunahme der Vorderachsbelastung des Schleppers durch Bremsen
W <sub>Hbrems</sub>	N	Hinterradbelastung beim Bremsvorgang
W <sub>Hstat</sub>	N	statische Hinterradbelastung
W <sub>H</sub>	N	Abnahme der Hinterradbelastung infolge der Lastübertragung
ΔW <sub>H</sub>	N	Änderung der Hinterradbelastung infolge der Lastverlagerung in der Doppelachse
W <sub>Vbrems</sub>	N	Vorderradbelastung beim Bremsvorgang
W <sub>Vstat</sub>	N	statische Vorderradbelastung
W <sub>V</sub>	N	Abnahme der Vorderradbelastung infolge der Lastübertragung
ΔW <sub>V</sub>	N	Änderung der Vorderradbelastung infolge der Lastverlagerung in der Doppelachse

### Schrifttum

- [ 1 ] *Kutzbach, H.D. u. C.N. Sy:* Dynamische Belastungen von Schlepper-Anhängerkupplungen durch Einachs- bzw. Doppelachsanhänger hoher Nutzmasse. *Grundl. Landtechnik* Bd. 28 (1978) Nr. 6, S. 209/13.
- [ 2 ] *Sagi, R., S. Orłowski u. D. Nir:* Eine theoretische Untersuchung des Bremsverhaltens des Systems Schlepper–Anhänger. *Grundl. Landtechnik* Bd. 20 (1970) Nr. 6, S. 171/74.
- [ 3 ] *Sagi, R., S. Orłowski u. D. Nir:* Der Einfluß des Anhänger-gewichtes auf das Bremsverhalten des Systems Schlepper–Anhänger. *Grundl. Landtechnik* Bd. 22 (1972) Nr. 1, S. 21/23.
- [ 4 ] *Sagi, R., A. Racotch u. D. Wolf:* Theoretical considerations in placing the centre of gravity of single-axled trailers. *J. Agric. Engng. Res.* Bd. 18 (1973) S. 159/65.
- [ 5 ] *Simuttis, A. u. B. Breuer:* Das Bremsverhalten schneller Ackerschlepper. *Grundl. Landtechnik* Bd. 33 (1983) Nr. 2, S. 35/40.