

# Der Einfluß des Anhängergewichtes auf das Bremsverhalten des Systems Schlepper - Anhänger

Ram Sagi, Samuel Orlowski und Dov Nir\*)

DK 631.372.06:621.373.097.152:629.1.073.282

Das Bremsverhalten des aus einem Schlepper und einem landwirtschaftlichen Anhänger bestehenden Systems wurde experimentell untersucht. Theoretisch hergeleitete Beziehungen gestatteten dabei einen Vergleich der Meßwerte mit den berechneten Werten. Das Untersuchungsergebnis bezieht sich auf zweiachsige Anhänger und auf Systeme, bei denen 1. nur der Schlepper, 2. nur der Anhänger und 3. sowohl der Schlepper als auch der Anhänger gebremst werden. Das Auswerten der Ergebnisse ermöglichte das Ausarbeiten von Vorschlägen für den praktischen Gebrauch.

## 1. Einleitung

Landwirtschaftliche Radschlepper mit angekoppeltem Anhänger werden häufig zum Befördern landwirtschaftlicher Güter und Erzeugnisse über kurze und mittellange Strecken in ländlichen Gebieten eingesetzt. Da diese Fahrzeuge auch am öffentlichen Straßenverkehr teilnehmen und sich dabei auf Straßen verschiedener Ordnung bewegen, ist es im Hinblick auf die Verkehrssicherheit erforderlich, Normen für das Bremsverhalten des Systems „Schlepper-Anhänger“ aufzustellen. Dieses System besteht aus zwei Einheiten; jede dieser Einheiten kann mit Bremseinrichtungen ausgerüstet sein. In das Bremsverhalten des Systems geht auch die Masse jeder dieser Einheiten ein. Hier gilt es, die Bedingungen zu finden, unter denen sich das System beim Bremsvorgang optimal verhält.

Das System, dessen Bremsverhalten zu untersuchen ist, besteht aus einem zweiachsigen Anhänger mit oder ohne eigene Bremsvorrichtung und einem Radschlepper, der eine eigene Bremsvorrichtung hat. Die angegebenen Beziehungen umfassen zwei Fälle, und zwar in Abhängigkeit davon, ob beim Bremsen die Bremsvorrichtung des Schleppers betätigt oder nicht betätigt wird.

In [1] wurden theoretisch Beziehungen hergeleitet, die das durch Messen der Verzögerung erfaßbare Bremsverhalten des Systems „Schlepper-Anhänger“ beschreiben. In diese Beziehungen gehen als unabhängige Veränderliche systemeigene Parameter und solche Kenngrößen ein, die die Gleitreibung und die Rollreibung der Schlepperreifen erfassen. Die Gültigkeit dieser Beziehungen wurde experimentell überprüft, und zwar durch Vergleich der berechneten mit den gemessenen Werten der Verzögerung, die beim Bremsen auftritt.

\*) Dr. Ram Sagi ist Senior Lecturer am Technion, Haifa, Israel; Prof. Samuel Orlowski ist Dean der Faculty of Agricultural Engr'g. Technion, Haifa, Israel; Dr. Dov Nir ist Senior Lecturer am Technion, Haifa, Israel.

## 2. Theoretische Beziehungen

Das Ergebnis der theoretischen Untersuchung [1] zusammenfassend, kann die Gültigkeit der folgenden Beziehungen als bestätigt angesehen werden.

### 2.1. Schlepper ohne Anhänger

Die beim Bremsen maximal auftretende Verzögerung  $a_0$  hängt nicht von der Masse (dem Gewicht) des Schleppers ab. Sie ist vielmehr eine Funktion, in die als unabhängige Veränderliche drei systemeigene geometrische Parameter und der (auf jeweils einen Schlepperreifen zu beziehende, vom Straßenbelag abhängende) Gleitreibungskoeffizient eingehen gemäß

$$a_0 = \mu g \frac{f}{L + \mu h} \quad (1);$$

hierbei sind  $g$  die Fallbeschleunigung,  $L$  der Achsenabstand,  $f$  der Abstand des Schwerpunktes von der Vorderachse und  $h$  die Höhe des Schwerpunktes über dem Boden.

### 2.2. Schlepper mit Anhänger

#### 2.2.1. Bremsen des Schleppers

Wird nur die Bremsvorrichtung des Schleppers betätigt, so ergibt sich mit guter Näherung die Verzögerung  $a$  des gesamten Systems zu

$$a = \frac{\mu g f}{(L + \mu h)(1 + \kappa)} \quad (2);$$

hierbei ist  $\kappa = m_1/m$ , mit  $m_1$  als der Masse des Anhängers und mit  $m$  als der Masse des Schleppers [1].

#### 2.2.2. Bremsen des Anhängers

Wird nur der Anhänger gebremst, so bewirkt eine der Masse des Anhängers proportionale Kraft die Verzögerung

$$a = \mu g \frac{\kappa}{1 + \kappa} \quad (3).$$

Die Verzögerungen  $a_1$  und  $a_2$ , die auftreten, wenn der Anhänger die Masse  $m_{1,1}$  bzw.  $m_{1,2}$  hat, befriedigen die Gleichung

$$a_2 = a_1 \frac{\kappa_2 / (1 + \kappa_2)}{\kappa_1 / (1 + \kappa_1)} \quad (4),$$

mit  $\kappa_1 = m_{1,1}/m$  und  $\kappa_2 = m_{1,2}/m$ . Gl. (4) gilt nur dann, wenn die Räder des Anhängers beim Bremsvorgang ausschließlich gleiten. Reicht hingegen die von den Bremsbacken auf die Räder des Anhängers übertragene Kraft nicht aus, um zu bewirken, daß die Räder ausschließlich gleiten, so sind die nunmehr auftretenden Verzögerungen  $a'_1$  und  $a'_2$  durch die Beziehung

$$a'_2 = a'_1 \frac{1 + \kappa_1}{1 + \kappa_2} \quad (5)$$

miteinander verknüpft. Der Wert der tatsächlich auftretenden Verzögerung  $a_2^*$  wird zwischen den beiden durch Gl. (4) und (5) bestimmten Werten liegen, vgl. Bild 3 in [1].

### 2.2.3. Gleichzeitiges Bremsen des Schleppers und des Anhängers

Werden gleichzeitig sowohl der Schlepper als auch der Anhänger gebremst, so befriedigt nach [1] die Verzögerung  $a$  des Systems mit sehr guter Näherung die Gleichung

$$a = a_0 \frac{1}{1 + \kappa} + \mu g \frac{\kappa}{1 + \kappa} \quad (6).$$

Dabei ist  $a_0$  die Verzögerung nach Gl. (1).

### 3. Versuchsverfahren und Ergebnisse

Das experimentell untersuchte System bestand aus einem Rad-schlepper und einem zweiachsigen Anhänger. Der Anhänger hatte an allen vier Rädern Bremsen. Es war jedoch nicht möglich, die beim Bremsen übertragene Kraft (und somit auch die Bremswirkung) abgestuft zu dosieren. Stets wurde beim Bremsen die maximal mögliche Kraft auf die Räder übertragen. Zum Messen der beim Bremsvorgang auftretenden Verzögerungen diente ein handelsübliches Meßgerät zum Aufzeichnen der durch Beschleunigungsaufnehmer erfaßten Meßwerte. Das Meßgerät war auf dem Schlepper (zwischen den beiden Achsen) so angeordnet, daß der Einfluß von Vibrationen auf den Meßvorgang so klein wie möglich blieb.

Die Versuche umfaßten drei Fälle, und zwar wurden

1. nur der Schlepper,
2. nur der Anhänger und
3. gleichzeitig der Schlepper und der Anhänger gebremst.

Jeder dieser Versuche wurde mehrfach wiederholt, um statistisch gesicherte Meßergebnisse zu gewährleisten. Bei allen Versuchen betrug die Fahrgeschwindigkeit stets  $(12 \pm 0,5)$  km/h. Diese Versuchsbedingung schränkt die Aussagekraft der Meßergebnisse nicht ein, da S. Bjerninger [2] nachgewiesen hat, daß die Fahrgeschwindigkeit den Wert der maximal auftretenden Verzögerung nicht beeinflußt.

Gemessen wurden zunächst die Verzögerung des Schleppers (ohne Anhänger) und danach die Verzögerung des aus Schlepper und Anhänger bestehenden Systems. Ziel der Versuche war es, die Verzögerung in Abhängigkeit von der Masse (vom Gewicht) des Anhängers und den Bremsbedingungen zu ermitteln. In **Tafel 1** sind die vier Werte der Größe  $\kappa$  angegeben, bei denen die Verzögerung des Systems gemessen wurde. **Tafel 2** zeigt die Versuchsergebnisse. In ihr sind in Abhängigkeit vom Parameter  $\kappa$  und von den Bremsbedingungen die gemessene Verzögerung  $a^*$  (Maximalwerte), die auf die Fallbeschleunigung  $g$  bezogene Verzögerung  $q = a^*/g$  (dimensionslose Größe) und die Standardabweichung von  $q$  angegeben, die sich beim Vergleich der jeweils zugehörigen Meßwerte ergab.

**Tafel 1.** Gewicht des Schleppers und des Anhängers bei den Versuchen.

Gewicht $G = m g^*$ des Schleppers in kp	Gewicht $G_1 = m_1 g^*$ des Anhängers in kp	Gewichtsverhältnis bzw. Masseverhältnis $\kappa = G_1/G = m_1/m$
2320	2600	1,12
2320	4650	2,00
2320	7060	3,04
2320	8080	3,48

\*) Es gilt  $1 \text{ kp} \approx 10 \text{ N}$ .

**Tafel 2.** Einfluß des Anhängergewichts auf den Wert der maximal auftretenden Verzögerung.

System	Versuch Bremsbedingungen	Gewichts- verhältnis bzw. Massen- verhältnis $\kappa$	Bezogene Verzögerung $q = a^*/g$ in %	Verzö- gerung $a^*$ in m/s	Standard- abweichung von $q$ in %
Schlepper	Bremsen des Schleppers	-	41,0	4,01	1,45
		1,12	24,8	2,43	1,53
		2,00	17,6	1,72	1,85
		3,04	15,0	1,47	2,23
Schlepper und Anhängers	Bremsen des Schleppers	3,48	13,5	1,32	1,37
		1,12	41,6	4,07	1,74
		2,00	35,4	3,46	1,30
		3,04	34,0	3,33	3,07
Schlepper und Anhängers	Bremsen des Anhängers	3,48	33,2	3,25	2,15
		1,12	52,0	5,09	2,65
		2,00	46,8	4,58	2,00
		3,04	43,8	4,29	1,20
Schlepper und Anhängers	Bremsen des Schleppers und des Anhängers	3,48	38,2	3,74	3,12

### 4. Diskussion

#### 4.1. Verzögerung beim Bremsen des Schleppers

Die in **Tafel 2** zusammengestellten und experimentell ermittelten Werte der Größe  $q$  wurden mit den Werten verglichen, die sich für die Verzögerung rechnerisch aus Gl. (2) ergeben. Diese Gleichung enthält einen Faktor, der gleich der Verzögerung  $a_0$  nach Gl. (1) ist. Beim Berechnen der Verzögerung nach Gl. (2) wurde dieser Faktor, **Tafel 2** entsprechend, so gewählt, daß  $a_0 = a^* = q g$  gilt, mit  $q = 41\%$ . Das Vergleichsergebnis zeigt **Tafel 3**. In dieser **Tafel** entsprechen der bezogenen Verzögerung  $q_{ge}$  Meßwerte, der bezogenen Verzögerung  $q_{be2}$  die nach Gl. (2) berechneten Werte und der bezogenen Verzögerung  $q_{be7}$  die nach Gl. (7) berechneten Werte (eine Beziehung, die noch erläutert wird).

**Tafel 3.** Vergleich zwischen den gemessenen und den theoretisch ermittelten Verzögerungen; nur der Schlepper wird gebremst.

Größe	Gewichtsverhältnis $\kappa$			
	1,12	2,00	3,04	3,48
$q_{ge}$ in %	24,8	17,6	15,0	13,5
$q_{be2}$ in %	19,3	13,6	10,1	9,2
$q_{ge} - q_{be2}$ in %	5,5	4,0	4,9	4,3
$q_{be7}$ in %	24,5	18,6	14,5	13,3

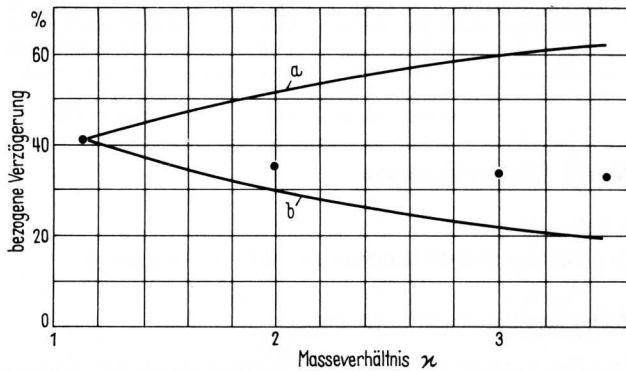
Aus **Tafel 3** geht hervor, daß stets  $q_{ge} > q_{be2}$  gilt. Die Differenz  $q_{ge} - q_{be2}$  schwankt nur wenig; im Mittel beträgt sie 4,7%. Dies deutet darauf hin, daß der nicht berücksichtigte Einfluß des Anhängers möglicherweise die mangelnde Übereinstimmung der Werte von  $q_{ge}$  und  $q_{be2}$  verursacht. Deshalb wurde als Ergebnis einer Analyse nach der Methode der kleinsten Quadrate auch die bezogene Verzögerung  $q_{be7}$  berechnet, die sich ergibt, wenn man anstatt von Gl. (2) von der Gleichung

$$a = \frac{a_0}{1 + k \kappa} \quad (7)$$

ausgeht, mit  $k = 0,6$ . Diese Gleichung ist als eine korrigierte, Gl. (2) entsprechende Beziehung aufzufassen. Selbstverständlich stimmen die Werte von  $q_{be7}$  besser mit den Werten von  $q_{ge}$  überein als die von  $q_{be2}$ .

**Tafel 4.** Vergleich zwischen den gemessenen und den theoretisch ermittelten Verzögerungen; nur der Anhänger wird gebremst.

Gewichtsverhältnis $\kappa$	1,12	2,00	3,04	3,48
$q_{ge}$ in %	41,6	35,4	34,0	33,2
$q_{be4}$ in %	41,6	51,6	58,6	61,1
$q_{be5}$ in %	41,6	29,5	21,6	19,5

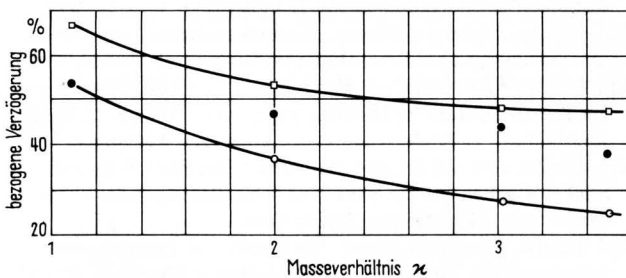


**Bild 1.** Vergleich der bezogenen Verzögerungen  $q_{ge}$ ,  $q_{be4}$  und  $q_{be5}$  nach Tafel 4.

a Verlauf der bezogenen Verzögerung  $q_{be4}$  nach Gl. (4)  
 b Verlauf der bezogenen Verzögerung  $q_{be5}$  nach Gl. (5)

**Tafel 5.** Vergleich zwischen den gemessenen und den errechneten Verzögerungen; der Schlepper und der Anhänger werden gleichzeitig gebremst.

Gewichtsverhältnis $\kappa$	1,12	2,00	3,04	3,48
$q_{ge}$ in %	52,0	46,8	43,8	38,2
Summe der Werte von $q_{ge}$ nach Tafel 2 und 3	66,4	53,0	49,0	46,7
$q_{be5}$ in %	52,0	36,9	27,0	24,4
$0,84 q_{be6}$ in %	55,7	44,5	41,2	39,2



**Bild 2.** Vergleich der bezogenen Verzögerungen nach Tafel 5.

□ obere Grenzwerte    ○ untere Grenzwerte    ● Meßwerte

#### 4.2. Verzögerung beim Bremsen des Anhängers

Für diesen Fall wurden die Versuchsergebnisse nach Tafel 2 mit den Verzögerungen verglichen, die sich aus Gl. (4) und Gl. (5) rechnerisch ergeben; dabei diente das System mit nicht beladenem

Anhänger als Bezugssystem. Das Vergleichsergebnis zeigt Tafel 4. Hierbei entsprechen der bezogenen Verzögerung  $q_{be4}$  die aus Gl. (4) und der bezogenen Verzögerung  $q_{be5}$  die aus Gl. (5) ermittelten Werte. Wie zu erwarten, liegen die  $q_{ge}$  zugeordneten Meßwerte zwischen den theoretisch bestimmten Werten von  $q_{be4}$  und  $q_{be5}$ , Bild 1.

#### 4.3. Gleichzeitiges Bremsen des Schleppers und des Anhängers

Aus Gl. (6) geht hervor, daß die beim gleichzeitigen Bremsen des Schleppers und des Anhängers auftretende Verzögerung gleich der Summe der Verzögerungen nach Gl. (2) und Gl. (3) sein sollte. Dies ist allerdings nur dann zu erwarten, wenn die Bremsen bei beiden Fahrzeugen beim Bremsvorgang voll eingreifen. Deshalb wird der aus Gl. (6) errechneten bezogenen Verzögerung  $q_{be6}$  ein oberer Grenzwert entsprechen. Andererseits müßte man die aus Gl. (5) ermittelte bezogene Verzögerung  $q_{be5}$  als unteren Grenzwert auffassen. Diese Erwartungen bestätigen Tafel 5 und Bild 2.

### 5. Schlußfolgerungen

#### 5.1. Anhänger ohne Bremsen

Die vorstehende Untersuchung hat gezeigt, daß der Einfluß eines zweiachsigen Anhängers auf das Bremsverhalten des gesamten Systems vom Verhältnis  $\kappa$  seiner Masse zu der des Schleppers abhängt. Gilt  $\kappa = 1$ , so bleibt die Bremswirkung in annehmbaren Grenzen; nicht ratsam jedoch ist ein Verhältnis  $\kappa > 1$ , da dann die Verzögerung zu klein sein könnte.

#### 5.2. Anhänger mit Bremsen

Die Belastung eines Anhängers, der mit Bremsen ausgerüstet ist, beeinflusst die Bremswirkung und damit die Verzögerung des Systems nur wenig, und zwar unabhängig davon, ob nur der Anhänger oder der Anhänger und der Schlepper gleichzeitig bremsen. Bei Anhängern mit Bremsen braucht deshalb das Gewichtsverhältnis kaum nach oben begrenzt zu werden. In diesem Fall ist sogar dann, wenn nur der Anhänger gebremst wird, ein Gewichtsverhältnis  $\kappa = 4$  noch tragbar, ohne daß dadurch die Verzögerung auf einen Wert absinkt, der dem Schlepper ohne Anhänger entspricht bzw. der kleiner als  $q = 25\%$  ist (ein in manchen Ländern minimal zulässiger Wert). Selbstverständlich kann es u.U. erforderlich sein, das Gewichtsverhältnis auch noch aus anderen Gründen zu begrenzen.

Es wird empfohlen, Schlepper und landwirtschaftliche Anhänger beispielsweise in vier Klassen zu gliedern, und zwar abgestuft nach Gewicht und den jeweiligen Bremssystemen. Das Benutzen eines bestimmten Anhängers wird demnach nur dann gestattet sein, wenn er an einen Schlepper angekoppelt wird, der zur gleichen oder zu einer höheren Klasse gehört. In Israel haben die Landwirtschafts- und Verkehrsministerien, auf deren Betreiben hin die vorliegende Untersuchung ausgeführt wurde [3], bereits eine dahingehende Empfehlung angenommen und erteilen entsprechende Tauglichkeits- und Verwendungsbescheinigungen.

### Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Sagi, R., S. Orłowski u. D. Nir: Eine theoretische Untersuchung des Bremsverhaltens des Systems Schlepper–Anhänger. Grundl. Landtechn. 20 (1970) Nr. 6, S. 171/74.
- [2] ● Bjerninger, S.: Investigations into Braking of Tractors and Trailers. Uppsala, Sweden: Almqvist & Wiksells, Boktryckeri AB, 1959.
- [3] Sagi, R., S. Orłowski u. D. Nir: Traktor-Anhänger Wechselbeziehungen im landwirtschaftlichen Transport. (Orig. hebräisch). Veröffentlichung Nr. 22 der Landwirtschaftstechnischen Fakultät, Technion – Israel Institute of Technology, 1969.